

'Geodesy, ... a Space Odyssey'

Prof.dr.ir. R.F. Hanssen (TU Delft)

Verkorte versie van 'Geodesy, ... a Space Odyssey', intreedere TU Delft, 3 september 2008.

Ruimtevaart staat in de traditie van de grote ontdekkingsreizen terug tot de tocht van Odysseus. In ieder geval qua historisch belang vergelijkbaar met de ontdekking van Amerika van Columbus. In veel gevallen wordt ruimtevaart dan ook gelijk gesteld aan de bemande ruimtevaart. De ministeriële conferentie die ESA (European Space Agency) eind 2008 organiseert, onder voorzitterschap van minister Van der Hoeven moet onder meer bekijken of een eigen Europese bemande ruimtevaart haalbaar en wenselijk is. De supermachten hebben die keuzes reeds gemaakt, voornamelijk gebaseerd op prestige. De keuze van de VS om naar de Maan, Mars en daar voorbij te gaan (met bemande missies) is vanuit wetenschappelijk oogpunt slecht onderbouwd, maar vanuit geopolitieke redenen begrijpelijk. Zo is het ook zeer waarschijnlijk dat één van de volgende mensen op de Maan een Chinees of een Japanner is, wederom vanwege geopolitieke redenen.

NASA (National Aeronautics and Space Administration) heeft voor 2008 een budget van meer dan 11 miljard euro; ESA heeft een budget van 3 miljard¹. Je zou daarom verwachten dat Europa strategisch keuzes maakt voor haar focus op het gebied van ruimtevaart, haar eigen odyssee uitstippelt, en niet probeert te dupliceren wat andere supermachten doen. Toch schrijft ESA bij haar astronautenwerving:

"It is now time for ESA to seek out new talent to bolster its Astronaut Corps for future manned missions to the ISS, the Moon and beyond."

Zowel in woord (formulering) en daad wordt dus juist voor de duplicatie gekozen. Waarom eigenlijk? Jean-Luc Dordain, de directeur-generaal van ESA, noemt expliciet drie redenen: (1) vanwege de te vergaren wetenschappelijke kennis, (2) de spin-off van de technologieontwikkeling en (3) het aantonen dat Europa op hetzelfde niveau staat als de andere ruimtevaartmogendheden. Volgens Dordain is het uiteindelijke doel van de bemande ruimtevaart een bemande basis op Mars. Dit type uitspraken is voor bestuurders en politici natuurlijk aantrekkelijk. Wie wil niet als visionair bestuurder de geschiedenis in gaan. Toch zitten er grote, vaak niet

¹ Het grootste deel van het ESA-budget, 22%, wordt besteed aan 'launch vehicles'. Daarna volgen 'human space flight', aardobservatie en ruimteonderzoek met gelijkwaardige porties van ca. 15%.

uitgesproken keerzijden aan deze visie. De budgetten zijn niet altijd onafhankelijk, daar kunnen mijn Amerikaanse collega's bij JPL (Jet Propulsion Laboratory) en NASA van getuigen. Door de uitspraak "Moon, Mars en beyond" werden budgetten voor aardobservatiemissies bevroren. Missies die zouden kunnen bijdragen aan bijvoorbeeld de bepaling van het aardbevingsrisico voor Los Angeles en San Francisco sneuvelden, omdat ze niet in het adagium van Bush pasten.

Het is dus onverstandig wanneer Europa ook inzet op de bemande ruimtevaart. Concentratie op onbemande projecten, voor planetaire exploratie, voor astronomie en zeker voor aardobservatie is een veel verstandiger keuze. Onbemand maakt zeker niet onbemind. Minister Van der Hoeven zou er dus goed aan doen om, wanneer zij de Europese ministersconferentie over ruimtevaart in Den Haag voorziet, keuzes te maken waar Europa haar voorttrekkersrol kan uitbouwen. Europa speelt namelijk al een voorttrekkersrol in de internationale ruimtevaart. In het GMES-programma (Global Monitoring for Environment and Security) wordt niet meer gedacht in termen van een enkele satelliet, maar in een taak of dienst die voor de maatschappij van belang is. Dit is een werkelijke paradigmaverschuiving: waarnemingstijdreeksen worden hiermee voor langere tijdsduur gegarandeerd en zijn niet meer afhankelijk van het slagen van een enkele satelliet. Weersatellieten werken al langer volgens dit principe, waardoor we het ons inmiddels niet meer kunnen voorstellen dat er geen satellietbeelden meer zouden zijn. Voor alle andere aardobservatiesatellieten is dit nu nog een utopie, die door GMES verwezenlijkt zou worden. Het is juist deze odyssee waar Europa verder op zou moeten inzetten.

De odyssee van de geodesie

De geodesie zou kunnen worden beschreven als "de wetenschap van het meten en representeren van het oppervlak van een hemellichaam, in het bijzonder de planeet Aarde, inclusief haar zwaartekrachtsveld, in een driedimensionale tijdsafhankelijke ruimte". Dit bestrijkt verschillende schaalniveaus. Op een kleine schaal (geodeten noemen dat overigens een grote schaal) begint dit al wanneer men eigendomsgrenzen van een perceel wil vaststellen, of belastingen wil heffen aan de hand van een landareaal. Dit was overigens het werkelijke beroep van Antoni van Leeuwenhoek, naar wie mijn leerstoel vernoemd is. Zijn activiteiten met zelfgeknutselde microscopen was eigenlijk slechts een hobby, in feite was hij geodeet. Maar dat terzijde. Toch werden er al zeer snel minder voor de hand liggende vragen gesteld. Wat is de vorm van de Aarde en hoe verhoudt de Aarde zich tot de hemellichamen om haar heen? Homerus, die de reis van Odysseus zo mooi beschreef, dacht in de 9e eeuw v.Chr. nog dat de aarde plat was, maar Pythagoras (6e eeuw v.Chr.) veronderstelde al een bolvorm, omdat dat nu eenmaal de perfecte vorm was, door de goden gemaakt. Eratosthenes (bibliothecaris van de bibliotheek van Alexandrië) schatte in de 3e eeuw v.Chr. voor het eerst de omtrek van de Aarde. Ook de stand van de aardas in de ruimte, de afstand Aarde – Zon en de lengte van het jaar (365,25 dagen) werden door hem afgeleid.

De planeet Aarde als roterende ronde bal was dus bekend. Maar hoe rond is rond eigenlijk? Het duurde tot 1735 dat men er onomstotelijk achter kwam dat de Aarde afgeplat is aan de polen, zoals beweerd door Newton en Huygens. Grote meetcampagnes en astronomische metingen in Lapland en Peru kwamen daar aan te pas. De Aarde is dus niet rond, maar een omwentelingsellipsoïde.

Men dacht er te zijn: de Aarde is een omwentelingsellipsoïde en alle topografische afwijkingen daarvan (bergen, dalen) noemen we eenvoudigweg 'hoogte'. Een GPS-ontvanger (Global Positioning System) werkt overigens nog steeds met dat begrip. Het zeeoppervlak is dan hoogte-nul, denk aan ons NAP-stelsel (Normaal Amsterdams Peil), en volgt dus eenvoudigweg de ellipsoïde. De richting 'omhoog' staat eenvoudigweg loodrecht op die ellipsoïde. Met een schietlood is dit makkelijk aan te geven.

Helaas. Ook dit bleek een te grote vereenvoudiging van de werkelijkheid. Door massaverschillen in de korst en het bovenste deel van de mantel van de aarde staat het schietlood scheef, althans, ten opzichte van de omwentelingsellipsoïde. Het vlak waarlangs de hoogteverschillen nul zijn, is daardoor dus gebobbeld ten opzichte van de ellipsoïde. De aarde is dus geen ellipsoïde, maar een aardappel. We noemen deze aardappel de geoïde. De Delfts-Utrechtse hoogleraar Felix Vening-Meinesz heeft in 1934 de variaties in het zwaartekrachtsveld in kaart gebracht door met een slinger in een duikboot rond de aarde te varen en de variaties in de zwaartekrachtsversnelling te karteren. Het probleem was echter hoe we dit voor de gehele wereld kunnen vaststellen (met een duikboot gaat dat niet gemakkelijk).

Vanaf 4 oktober 1957 klonken er bliepjes uit de ruimte. De Sovjet-Unie had haar kunstmaan Spoetnik gelanceerd en het tijdperk van de ruimtevaart was definitief aangebroken. Het is op dit moment dat de odyssee van de geodesie en die van de ruimtevaart elkaar voor de eerste, en zeker niet de laatste maal, kruisten. Aangezien Spoetnik baantjes om de Aarde trok, konden vanuit twee of meer punten op Aarde driehoeken naar de satelliet worden gemaakt, die de grote meetnetten op Aarde met elkaar verbond. Positiebepaling tussen continenten werd definitief mogelijk. Vanaf 1961 werden vanaf het gebouw voor Werktuigbouwkunde astronomische foto's gemaakt waarop de positie van kunstmanen, we noemen ze tegenwoordig satellieten, zichtbaar was ten opzicht van de achtergrond van sterren. Door dit gelijktijdig vanuit andere locaties op Aarde te doen, met een andere achtergrond van sterren vanwege het perspectief, was hoekmeting mogelijk, en daardoor een zogenaamde achterwaartse insnijding. Wat nog ontbrak was de afstandsmeting, maar in het rock-'n-rolltijdperk werd daar al snel wat op gevonden: het lanceren van een discobol. Door een lichtflits af te vuren op een spiegelende satelliet en de tijdsduur tot de ontvangen reflectie te meten, waren ook afstanden meetbaar. Dit gaf de cruciale informatie om het ontbrekende stuk van de puzzel, het aardse zwaartekrachtsveld mondiaal waar te nemen. De baan van de rondcirkelende satellieten wordt immers continu beïnvloed door het zwaartekrachtsveld. Dat deze ontwikkeling nog steeds actueel is, blijkt uit het feit dat binnenkort (17 maart 2009),

een nieuw hoofdstuk van de odyssee wordt geschreven. Dan wordt vanaf de Russische basis Plesetsk de satelliet GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer) gelanceerd; een missie die het zwaartekrachtsveld van de planeet Aarde met een onwaarschijnlijk hoge resolutie en precisie in kaart gaat brengen. De begrippen 'boven' en 'onder', bijvoorbeeld in relatie tot topografie, zijn hiervan direct afhankelijk. Voor Delft is dit de kroon op zo'n 25 jaar onderzoek.

Tot nu toe sprak ik over de planeet Aarde vanuit een statisch perspectief. De Aarde is echter verre van statisch en juist haar dynamische gedrag is belangrijk voor de mens. Dynamische processen zijn bijvoorbeeld globale tektoniek, belasting van de korst (bijvoorbeeld door ijs of water) of opwarming en afkoeling in relatie tot de zeespiegel en het klimaat. Daarnaast wordt een gedeelte van de dynamiek door de mens veroorzaakt, bijvoorbeeld door de winning van delfstoffen of het aanleggen van infrastructuur. Het is deze etappe van de odyssee van de geodesie waar het Delftse radaronderzoek zich mee bezighoudt.

De eerste stop: planeet Aarde, terra incognita?

Het is één van de taken van de wetenschap om helder te krijgen wat we nog niet weten. Wat weten we nog niet van onze planeet en hoe kan de combinatie van ruimtevaart en geodesie ons daarin helpen? Laat ik beginnen met een alledaags voorbeeld. Bij onze weersverwachting horen we regelmatig: "Morgen kans op neerslag" of "... bewolkt en nu en dan regen", en op een wonderlijke manier nemen we daar genoeg mee. In eerste instantie zou je al willen weten hoe groot de betreffende kans is. Vervolgens wil je eigenlijk wel weten, voordat je op de fiets stapt om boodschappen te gaan doen, of het daadwerkelijk gaat regenen op jouw route en op het moment dat je onderweg bent. We accepteren dat gebrek aan informatie, omdat we niet beter weten. In feite begrijpen we dat aspect van het systeem Aarde (in dit geval haar atmosfeer) nog onvoldoende om dermate gedetailleerde weersvoorspellingen mogelijk te maken. Nu is de onvoorspelbaarheid van een nat pak door een onverwachte bui nog overkomelijk (sommigen vinden het wellicht charmant). Anders wordt dit wanneer er sprake is van de onvoorspelbaarheid van een aardbeving, misschien met een tsunami, de onvoorspelbaarheid van een vulkaaneruptie, de onvoorspelbaarheid van het exacte peil van de zeespiegel tijdens een storm en de vraag of onze dijken die kunnen weerstaan, de onzekerheid in de prognoses van het IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) over globale temperatuurstijging en zeespiegelverandering. Welke kracht zal orkaan Gustav hebben wanneer hij langs New Orleans raast? Allemaal processen van onze planeet, al dan niet aangejaagd door menselijk handelen. Soms op 'kleine', locale schaal, soms op mondiale schaal.

Hoe relevant zijn deze planetaire processen? Het bureau voor de coördinatie van humanitaire zaken van de VN becijferde in 2005 dat in het laatste decennium 2 miljard mensen te lijden hebben gehad van natuurrampen. Maar liefst 75% van de

wereldbevolking leeft in gebieden die minimaal eenmaal door een aardbeving, een tropische cycloon, overstroming of droogte getroffen zijn tussen 1980 en 2000. Ook een welvarend land als Nederland loopt risico, waarbij overstroming van de laaggelegen gebieden het grootste is. Wanneer we spreken over het voorkomen of mitigeren van rampen gaat het dus om het verminderen van de onvoorspelbaarheid van deze planetaire processen. Beter begrip van de processen en betere modellen die deze processen beschrijven zijn nodig, maar in zeer veel gevallen ontbreekt simpelweg voldoende observationeel materiaal.

Voor een aardbeving willen we niet pas metingen doen wanneer deze al ergens is opgetreden, maar vooral daarvoor; lang daarvoor, vaak op alle mogelijke locaties en liefst met een hoge precisie en betrouwbaarheid. Voor vulkaaneruptions geldt hetzelfde. Voor de klimaatverandering willen we graag voor de gehele Antarctische en Groenlandse ijskappen weten hoeveel sneeuw er elk jaar bij valt, hoeveel ijs er langs de randen afsmelt en of dit in balans is. 'Waarnemingen' zijn de sleutel voor al deze gebieden. De ruimtevaart kan met haar aardobservatietechnieken een belangrijke bijdrage aan de oplossing van deze vraagstukken geven.

De techniek die ik nu aan de orde wil stellen is die van de beeldvormende actieve microgolftwaarneming, ofwel de beeldvormende radar. Laten we het maar gewoon radar noemen.

Radarinterferometrie

Een radar is in feite een soort lamp, in mijn geval een knipperende lamp, die elektromagnetische straling uitzendt. We weten van de afstandbediening van onze televisie, die in het infrarood werkt in plaats van het zichtbaar licht, dat we niet alle straling met ons oog kunnen waarnemen. De radar werkt met nog veel lagere frequenties. Net zoals bij een zaklamp is onze knipperende radarlamp 'gericht'; de straling gaat in een bepaalde richting. Bij de zaklamp vangen onze ogen de weerkaatste straling op een object op. Bij een radar hebben we daar natuurlijk een instrument voor nodig, en dat is de radar zelf. Het is alsof de knipperende zaklamp zelf ook als oog fungeert. Om dat te bereiken zorgen we er voor dat de pulsduur heel kort is, zo dat we de tijd tussen het zenden van de pulsen kunnen gebruiken om het weerkaatste signaal op te vangen.

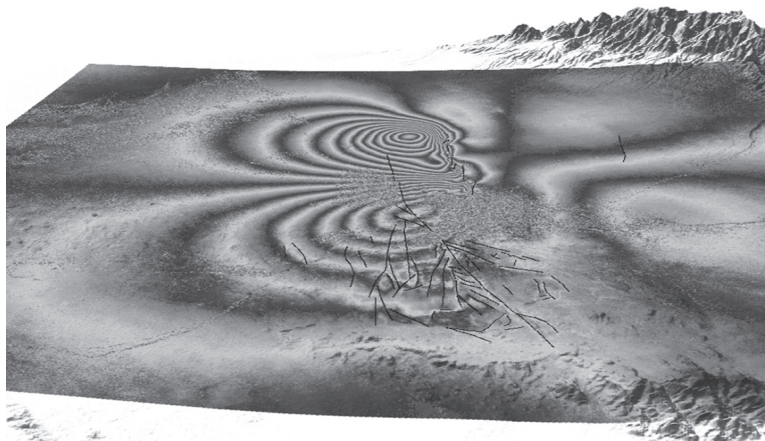
Plaatsen we vervolgens onze knipperende radarzaklamp in een baan om de aarde, dan hebben we de belangrijkste kenmerken van de door ons gebruikte satellietradars te pakken. Het baantje om de aarde zorgt er voor dat we de gehele planeet 'beschijnen', en dat we na verloop van tijd weer exact boven hetzelfde plekje op aarde aankomen. Op deze manier kunnen we dus voor een bepaalde locatie een tijdreeks opbouwen, die jaren, soms decennia, kan bestrijken. Slimme verwerking van de radargegevens op de grond zorgt er vervolgens voor, dat we een beeld met een hoge resolutie kunnen maken van alle gecombineerde radarpulsen.

Interferometrie

Het tweede concept dat we nodig hebben is de interferometrie. Het begrip interferentie kennen we allemaal, wanneer we bijvoorbeeld een steentje in een kalme vijver gooien. Een prachtig golfpatroon plant zich voort op het wateroppervlak en zal op een gegeven moment weerkaatsen op de randen van het bassin. De vorm en structuur van die randen bepaalt hoe en in welke mate de golf zal weerkaatsen en een klein gedeelte van de weerkaatste golven zal weer passeren langs de plek waar het steentje in het water viel.

We kunnen ons nu ook voorstellen dat wanneer we 'luisteren' op de plek van het steentje naar de weerkaatste golven, deze informatie zal bevatten over de geometrie en de structuur van de rand van het bassin. We kunnen ons echter ook, intuïtief, al voorstellen dat het weerkaatste golfpatroon op de plek van één steentje onvoldoende zal zijn om de geometrie van de rand van het bassin geheel te reconstrueren. Eigenlijk zouden we tegelijkertijd op twee locaties moeten 'luisteren' naar de weerkaatste golven. Dit is exact wat we met satellietradarinterferometrie doen. Vanaf twee locaties in de ruimte, en dan ook nog op twee verschillende tijdstippen, meten we de reflecties van uitgezonden elektromagnetische golven en berekenen we het faseverschil bij aankomst. Dit faseverschil is op een zeer gevoelige manier gerelateerd aan de looptijd van het signaal en daarmee aan de afstand tot een punt of pixel op aarde. Dit maakt de waarneming gevoelig voor hoogte en hoogteverandering in de tijd.

De faseverschilmetingen, voor elk pixel van het beeld, kunnen we nu combineren tot een zogenaamd interferogram, waar we het faseverschil met een kleur aangeven. In de figuur hieronder ziet u het interferogram dat op deze wijze is gemaakt van de aardbeving bij de stad Bam in Iran op 26 december 2003. Bij deze aardbeving kwamen 30.000 mensen om het leven. Het interferogram toont ons welke



*Radarinterferogram van de aardbeving in Bam, Iran, 26 december 2003.
Elke kleurencyclus is 28 mm in de kijkrichting van de radar.*

deformatie de aarde heeft ondergaan ten gevolge van de aardbeving. Gebieden met constante kleur zijn ten opzichte van elkaar niet bewogen, terwijl gebieden met verschillende kleuren wel ten opzichte van elkaar zijn gedeformeerd. Hiermee krijgen we dus, zonder vooraf fysieke meetpunten te moeten aanbrengen, een zeer gedetailleerd beeld van de deformatie. Geofysici interpreteren deze beelden en krijgen daarmee een beter beeld van het mechanisme achter de aardbeving. Dit is van groot belang om een risico-inschatting voor toekomstige bevingen te kunnen maken. Voor Nederland is dit lastig, aangezien veel van de deformatie langzaam plaatsvindt en daarbij het weerkaatsend vermogen van het aardoppervlak te sterk verandert in de tijd. In Nederland zijn echter bebouwing en harde infrastructuur goed bruikbaar als natuurlijke radar reflector. Door nu de reflecties voor dit soort punten te identificeren en deze voor elke satellietoverkomst te vergelijken, krijgen we een gedetailleerd beeld van de deformaties. Ik zal hier drie voorbeelden van laten zien.

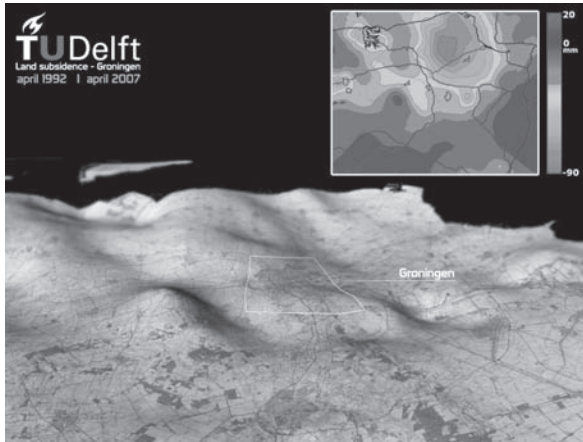
Resultaten

Groningen

Mijn eerste voorbeeld is het gebied waar Nederland het grootste deel van haar natuurlijke rijkdom vandaan haalt: Groningen en de Noord-Nederlandse gasvelden. Het gas wordt sinds 1963 gewonnen uit een laag van ongeveer 100 m dik op een diepte van ongeveer 3 km. Sinds de start van de winning was duidelijk dat door de vermindering van de druk in het gasvoerende gesteente de bodem van Groningen zou dalen. Ook al gaat het om beperkte dalingssnelheden, nu zo'n 7 mm/jaar maximaal, de financiële gevolgen lopen in de honderden miljoenen. De haven van Delfzijl moest worden aangepast, gemalen moesten worden gebouwd, de waterschappen moesten hun bemalingsaanpak veranderen, en bruggen en viaducten moesten worden aangepast. Tot begin dit jaar is aan de provincie Groningen een bedrag van 177 miljoen euro aan vergoedingen voor claims uitbetaald². Om deze reden worden om de vijf jaar grote waterpassingen uitgevoerd, zodat de combinatie van metingen en modellen het mogelijk maakte om de bodemdaling te voorspellen.

Deze werkwijze functioneert goed, maar tot aan de dag van vandaag is bodemdaling door gaswinning een terugkerend discussiepunt. Het winnen uit gasvelden die gedeeltelijk onder de Waddenzee liggen, is het laatste voorbeeld hiervan. De politiek besloot tot winning 'met de hand aan de kraan', waardoor men indien de bodemdalingssnelheid te groot werd, de winningsnelheid kan bijregelen. Voor deze problematiek zijn goede metingen onontbeerlijk en een uitgebreid systeem van ondergrondse en bovengrondse peilmerken is aangelegd om middels waterpassingen hoogteveranderingen te kunnen constateren. Dit type metingen

² Commissie Bodemdaling Groningen, Jaarverslag 2007. Technical report, Commissie Bodemdaling Groningen, 2007.



*Bodemdaling in Groningen
in de periode 1992 – 2007.*

duurt maanden en is zeer arbeidsintensief. Voorts worden er door de Nederlandse overheid eisen gesteld aan de representativiteit van deze metingen: geven ze echt wel de bodemdaling door gaswinning aan en wie is er verantwoordelijk voor mogelijke schade?

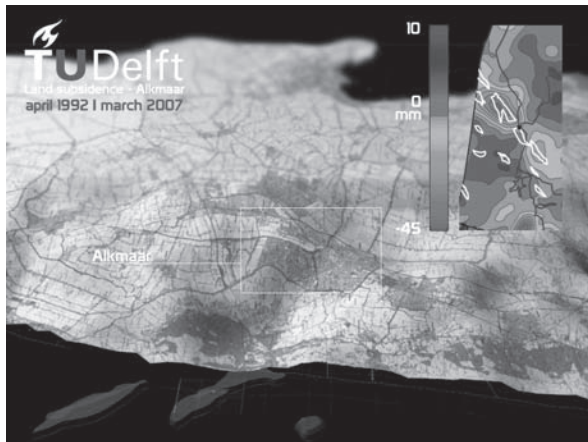
De ruimtevaart, in het bijzonder de radarinterferometrie, kan een bijdrage leveren aan dit maatschappelijke vraagstuk. In haar promotieonderzoek heeft mw. dr.ir. V.B.H. Ketelaar zich gebogen over de vraag of we met ruimtevaarttechnieken, satellietradarmetingen, bodembeweging van deze orde, millimeters per jaar, kunnen waarnemen. Bij de aanvang van haar onderzoek werd dit door veel experts betwist, onder andere door de invloed van de atmosfeer op de voortplantingssnelheid van de radarsignalen en door het ongunstige reflectiekarakter van de bodem in Groningen. Door echter de dataverwerkingsmethoden slim aan te passen, hebben we kunnen aantonen dat bodembeweging in Noord-Nederland en in het bijzonder boven de Groningse gasvelden zeer goed meetbaar is. Tevens is het hierdoor nu mogelijk om bijna elke week een meting van het hele gebied te doen, in plaats van om de vijf jaar. Dit maakt het mogelijk om afwijkingen in de bodembeweging veel eerder te detecteren, van belang voor het hand-aan-de-kraanprincipe.

De belangrijkste conclusie tot nu toe is dat er hiermee nu een alternatieve methode is die onafhankelijk de beweging van de bodem kan waarnemen. De ruimtevaartmethoden maken het mogelijk om satellietgegevens, die in databanken opgeslagen zijn, te gebruiken in situaties waar bijvoorbeeld controverses ontstaan.

Monitoring van waterkeringen

Het tweede voorbeeld dat ik zou willen laten zien betreft het monitoren van specifieke objecten zoals waterkeringen. De grootste potentiële natuurramp voor Nederland is een overstroming. Samen wonen wij in een land dat voor meer dan de helft onder de hoogwaterniveaus van de zee en rivieren ligt. In dat gebied wonen meer dan 9 miljoen mensen en wordt 65% van het bruto nationaal product verdiend.

We weten dat de zeespiegel in absolute zin stijgt, maar dat is maar de helft van het

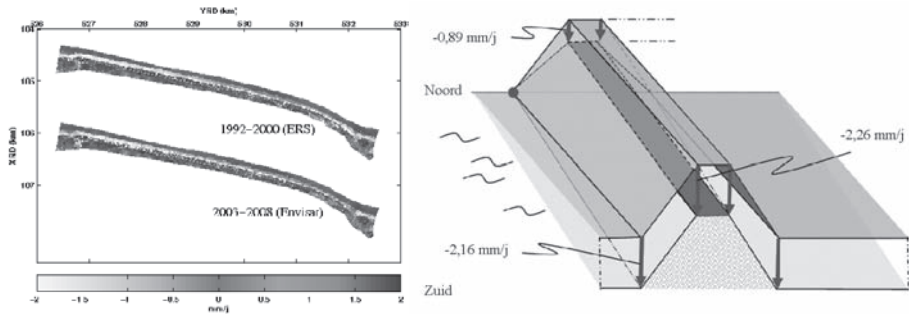


Bodemdaling Kennemerland in de periode 1992 – 2007.

probleem. Daling van de bodem moet bij de stijging van de zeespiegel worden opgeteld. De bodem in Nederland zal nog eeuwen blijven dalen, hier en daar versterkt door menselijk handelen.

Om al deze redenen is het van belang om onze waterkeringen goed te blijven monitoren, een zaak van het grootste belang, evident lijkt het. Toch kwam de Inspectie Verkeer en Waterstaat eind 2006 met een vernietigend rapport, waarin vermeldt staat dat een kwart van de waterkeringen in Nederland niet voldoet aan de norm en dat voor een verdere 32% de status onbekend is. Tien locaties werden aangeduid als 'zwakke schakels' in de kustverdediging. Je zou zeggen dat we met onze eeuwen aan ervaring het monitoren van waterkeringen, gecombineerd met gedegen risico-inschatting, wel onder de knie hebben. Die conclusie is echter niet gefundeerd. Een dijkdoorbraak is wat men ook wel een 'low-probability/high-impact event' noemt. De Nederlandse expertise is befaamd, maar ook onze experts hebben relatief weinig mogelijkheden om het faalgedrag van dijken te kunnen observeren. Gelukkig maar, het falen van een waterkering willen de meesten van ons liever niet zien. Enerzijds wordt hier hard aan gewerkt door geomechanische modellering, maar het zou ook kunnen helpen wanneer er meer waarnemingsmateriaal is voor de 17.000 km waterkering in Nederland. Vaker, sneller, preciezer en goedkoper meten is voor ons land zinvol.

De ruimtevaart kan ook hier helpen. In de figuur hierboven ziet u Kennemerland en de bewegingen van het gebied, zoals waargenomen met de satelliet. Het blijkt dat de bodem beweegt, voornamelijk in relatie tot de gaswinning. Maximale snelheden zijn zo'n 4 millimeter per jaar. Nu zult u wellicht denken, waar praten we over? Echter, de zeespiegelstijging, waar heel de wereld zich druk over maakt, met Nederland als dramatische hoofdrolspeler in Al Gore's film, is van dezelfde orde van grootte en deze processen vinden plaats over periodes van eeuwen. Het verwaarlozen van de bodemdaling in de discussie is dus een dramatische vergissing. Het is dus van belang te komen tot realistische waarden voor de relatieve zeespie-



Links. Radarwaarnemingen van de Hondsbossche en Pettemer Zeewering in de perioden 1992 – 2000 en 2003 – 2008. De noordkant (Petten) is rechts, de zuidkant (Camperduin) is links. De grijs tinten geven een langzame kanteling aan. Rechts. Interpretatie van de waargenomen kanteling van de Hondsbossche Zeewering. Ten opzichte van de voet van de dijk aan de noordzijde zakt de zuidzijde langzaam, circa 2 mm/jaar. Daarbovenop klinkt de top van de dijk langzaam in, waarschijnlijk ten gevolge van zetting.

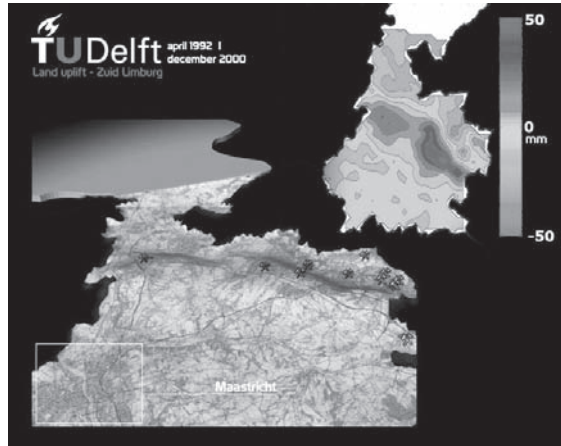
gelstijging, ten opzichte van de Nederlandse kust. De Hondsbossche en Pettemer Zeewering is één van die tien zwakke schakels in de Nederlandse kustverdediging. In 1953 heeft het geen haar gescheeld of de dijk was doorgebroken, met catastrofale gevolgen.

De radarwaarnemingen van de dijk laten zien dat de dijk langzaam kantelt in zuidelijke richting, ongeveer één centimeter per vijf jaar. Aan de top van de dijk is deze dalingsnelheid iets groter dan aan de voet, wat duidt op zettingsverschijnselen. Dit type informatie is voor de beheerders van waterkeringen zinvol om beheersactiviteiten goed te kunnen plannen.

Zuid-Limburg

Mijn laatste voorbeeld is mijn geboortegrond, Zuid-Limburg. Tijdens de periode van de mijnbouw is daar in Carboonlagen steenkool gewonnen, net als in naburige gebieden in België en Duitsland. In de regio ligt dat Carboon op een diepte van 100 – 400 m. Natuurlijk zorgden deze activiteiten indertijd dus voor bodemdaling. Toen wij dit voorjaar echter het gebied eens met de satelliet onder de loep gingen nemen, met data tussen 1992 en 2001, 35 jaar na de mijnsluitingen, zagen we iets wat we niet verwachtten: de gebieden die vroeger zakten door de mijnbouw komen weer omhoog, maximaal zo'n 10 cm in de laatste 15 jaar. Experts was het al duidelijk dat bodemstijging mogelijk zou zijn. Ten tijde van de mijnbouw was immers het grondwater in de mijnen weggepompt om de gangen droog te houden. Na de sluiting, 35 jaar geleden, kwam dat grondwater weer langzaam omhoog en zorgde voor een opwaartse kracht en een toename van de poriëndruk in het gesteente. Hierdoor was het waarschijnlijk dat het gebied omhoog zou komen. Hoe lang dat effect zou duren, hoe sterk het zou zijn, op welke locatie en met welke

Bodemstijging Zuid-Limburg in de periode april 1992 – december 2000. De opheffing vindt plaats boven de mijnbouwgebieden en is begrensd door lokale breuken.

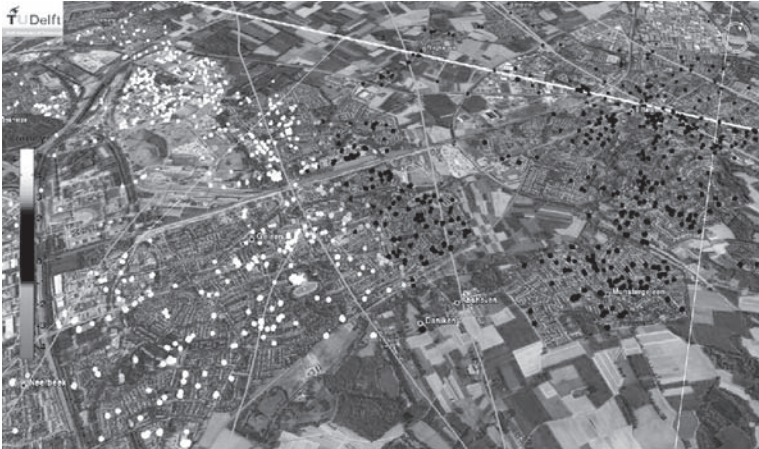


omvang, was echter niet bekend, aangezien er niet zoals in Groningen regelmatig gebiedsdekkende waterpassingen werden uitgevoerd. Er is echter meer te halen uit deze gegevens, wat betreft de structuur van de ondergrond en het inschatten van risico's.

(i) Wat betreft de structuur is het zeer interessant om waar te nemen dat er allereerst een sterk stijgingssignaal is in de regio Heerlen/Kerkrade, dat zich later lijkt te verplaatsen richting het westen. Het lijkt op een ondergronds overlopen van bassins, waardoor effecten zich lateraal verplaatsen. Dit dient door geo- en hydrologen te worden bestudeerd. In een vergelijkbaar geval in het Duitse Wassenberg namen we waar dat, toen het grondwater de diepte van de zogenaamde deklaag bereikte, slecht doorlaatbaar voor water, er een sterke versnelling van het stijgingssignaal optrad. Wanneer dit ook in deze regio zou optreden, zou dit ongunstige gevolgen kunnen hebben voor bebouwing in de regio.

(ii) Wat betreft de risico-inschatting gaat het juist om de gradiënten in de deformatie. Terwijl de situatie in Groningen eigenlijk redelijk 'glad' is, zonder sterke gradiënten, blijkt dit in Zuid-Limburg geheel niet het geval te zijn. Het signaal is begrensd door breuken in de aardkorst, die nog als actief worden bestempeld. Dit blijkt uit het voorkomen van aardbevingen in de regio, de sterkste in 1992 in Roermond. Deze breuken zijn te zien als een soort douchegordijn in de aardkorst; ze zijn ondoordringbaar voor het grondwater. Het gevolg is dat de stijging van het grondwater zeer lokaal begrensd is en daarmee is de stijging van de bodem zeer begrensd.

De gradiënten in het aardoppervlak zijn belangrijke indicatoren voor risico-inschatting. Uit de beelden blijkt dat er verschillende gebieden in de regio zijn, zoals Kerkrade/Heerlen, waar door de combinatie van stijgend mijnwater en geologische breuken lokaal zeer sterke relatieve bodembeweging optreedt. Dit is een potentieel risico voor bebouwing en infrastructuur. We zien deze situatie het sterkst wan-



De invloed van een breuk op het stijgingssignaal bij Geleen. Aan de linkerkant (zuid) komt het gebied omhoog, tot 5 mm per jaar, terwijl de rechterkant (noord) relatief stabiel is. De locatie van de breuken (lichtgrijs) is geschat en dient ter indicatie. Deze situatie is ook geconstateerd in onder andere Brunssum, Heerlen en Kerkrade.

neer we teruggaan naar onze oorspronkelijke satellietdata en deze projecteren op Google Earth. De waargenomen punten zijn reflecties van de radarpuls die gedurende negen jaar zijn gevolgd. Eén zo'n reflectie aan de westkant van de breuk toont zeer sterke stijging, zo'n 4 cm in 5 jaar, terwijl een punt net aan de andere kant nagenoeg geen deformatie vertoont. Zeker bij industriële complexen verdient dit serieuze aandacht.

Synthese

Ik heb drie voorbeelden besproken waaruit bleek dat nieuw ontwikkelde ruimtevaarttechnieken kunnen worden gebruikt om processen op onze planeet waar te nemen. In dit geval ging het om subtiele, maar significante, bewegingen van het aardoppervlak. Dit proces gaat door. Nederland gebruikt haar ondergrond intensief, door de aanleg van tunnels voor verkeersstromen, voor het winnen van gas, olie, zout en grondwater, voor het gebruik van geothermische energie, voor het injecteren van gas en van CO₂. Daarnaast is heel Nederland een groot deltagebied, bestaand uit afzettingen van grote rivieren. Deze zachte ondergrond klinkt in en de natuurlijke bodemdaling is voor ons land zeer belangrijk om in de gaten te houden. Geodetische waarnemingen vanuit de ruimte kunnen hier een efficiënte bijdrage leveren en ons het gedrag van onze planeet tonen dat we nog niet kenden. Het interessante is dat het door de ontwikkeling van de technologie en de geodetische verwerkingsmethodes mogelijk is om steeds subtielere processen waar te nemen. Doordat onze foutmarges omlaag gaan, worden signalen zichtbaar die voorheen in de ruis verdwenen.

Uitdagingen

Uit de resultaten die ik hiervoor beschreef moge duidelijk zijn dat mijn fascinatie ligt in het bekijken (en bewonderen) van de wereld door een bijzondere bril: een radar aan boord van een satelliet. De Spaanse schrijver Ortega y Gasset stelde: "everything in the World is strange and marvelous to well-open eyes" (alles in de wereld is vreemd en prachtig voor goedgeopende ogen). Die stelling kan ik van harte onderschrijven en het is een voorrecht om de wereld door deze bril te mogen bekijken. De eerste uitdaging van het onderzoek zit dan ook in het ontwikkelen van theorie en algoritmes om uit deze bijzondere waarnemingen informatie te destilleren. Ik zal daar verder niet op ingaan.

De tweede uitdaging binnen mijn onderzoek is de parametrisatie van a priori informatie in de schattingstheorie en kwaliteitbeschrijving. Waarnemingen zijn nooit exact gelijk aan de parameters die men wil schatten. Altijd is er een aspect, een model dat waarnemingen en onbekenden aan elkaar koppelt. Daarmee is de kwaliteit van de geschatte parameters dus altijd afhankelijk van de hypothese dat het model correct is. Deze hypothese is geschaagd op a priori kennis en is daarmee ook intrinsiek beperkt toetsbaar. Het is mijn doelstelling om deze a priori informatie te parametriseren en daarmee toetsbaar te maken. Veel controverse die momenteel bestaat over de interpretatie van geodetische deformatiemetingen kan daarmee worden weggenomen. In het bijzonder ligt er in dit vlak een uitdaging voor de schatting van de geheeltallige fasemeerduidigheden. Prof.dr.ir. P.J.G. Teunissen heeft hiervoor zijn geheeltallige kleinstekwadratenmethode ontwikkeld. Zeker in situaties waarin er sprake is van onderbemonstering van een variabel signaal, kan de parametrisatie van a priori kennis in combinatie met een robuuste schattingsmethodiek oplossingen bieden. Ik interpreteer dit echter ook als een prettige noodzaak tot samenwerking met andere disciplines, zoals de geofysica, geologie, geomechanica en hydrologie. Tot slot onderstreept dat het belang van veldwerk, om te weten wat er speelt op locatie.

De derde uitdaging die ik zie binnen de ruimtevaarttechniek is het gebruik van een 'system-of-systems'. Het aantal satellieten voor het waarnemen van onze planeet neemt toe. Daar waar we tot nu toe vaak vanuit een 'technology push' gebruik maakten van een enkele satelliet of waarnemingstechniek, treedt er een verschuiving op naar 'market pull'. Eindgebruikers geven aan aan welke informatie men behoefte heeft. En een aanpak waarbij we gebruik maken van een systeem dat bestaat uit verschillende (niet-afgestemde) subsystemen, zal dan ook een grote meerwaarde krijgen.

Tenslotte

Ik hoop dat ik u heb kunnen overtuigen van mijn stelling dat de ruimtevaart breed gedefinieerd dient te worden. De odyssee van de ruimtevaart en die van de geo-

desie en aardobservatie gaan hand in hand en de combinatie van technieken en applicatiedomeinen staat garant voor een vruchtbare toekomst. Ik zie er naar uit om hieraan mijn bijdrage te mogen geven.