

# Satelliet meet ons tuintje nu op de millimeter nauwkeurig

ARNO SCHRAUWERS *Delftse geodeten maken GPS beter bruikbaar voor landmeting*

GPS, het wereldomspannende satellietpositioneringssysteem, is bij normaal gebruik te onnauwkeurig voor landmeetkundige doeleinden. GPS (Global Positioning System) meet in meters terwijl de landmeetkundigen het tot op centimeters of zelfs millimeters nauwkeurig willen weten. Op initiatief van de Delftse landmeetkundigen (geodeten) is in 1994 begonnen met de bouw van een actief referentiesysteem, AGRS.NL, waarmee wél die beoogde nauwkeurigheid is te halen. Met het systeem, dat in de loop van vorig jaar in gebruik is genomen, kunnen en passant nog allerlei meteorologische gegevens worden verzameld.

Landmeetkunde, vaak met de chique Griekse naam geodesie aangeduid, is lang gedomineerd door kerktorens. Met behulp van dit soort karakteristieke en van verre herkenbare landschapkenmerken konden de landmeters het land netjes op zijn 'plaats zetten'. Tegenwoordige cirkelen er allerlei satellieten rond de aarde die met ontvangers op de grond het wereldomvattende positioneringssysteem GPS vormen. De kerktorens hebben afgedaan, zo lijkt het. Voor landmeting is GPS in principe het ideale systeem. Een beetje vervelend is alleen dat landmeters nogal gesteld zijn op nauwkeurigheid. Mijn tuintje heeft een breedte van nog geen vijf meter en ik zou het dan ook nogal vervelend vinden als landmeters hun werk met de nauwkeurigheid van enkele meters, laat staan van enkele tientallen meters zouden doen. Over dat soort nauwkeurigheden praten we bij het mondiale positioneringssysteem. De Amerikanen, de eigenaren van GPS, hebben dan nog de nare hebbelijkheid om een beetje te knoeien met de signalen die de satellieten naar de aarde sturen, zodat de nauwkeurigheid voor niet-militaire toepassingen (de NAVO krijgt de nauwkeurigere gegevens wél) niet beter wordt dan enkele tientallen meters.

'Dat geknoei met die signalen is op zich niet zo erg', zegt geodeet dr.ir. Hans van der Marel, samen met prof.dr.ir. Peter J.G. Teunissen de initiatiefnemer van het AGRS.NL -project (Actief GPS-ReferentieSysteem voor Nederland). 'Die opzettelijk gemaakte fouten zijn, bijvoorbeeld, in Den Haag dezelfde als in Delft. Je kunt ze er dan makkelijk uit filteren als je gebruik maakt van twee ontvangers en de positie van de één ten opzichte van de ander berekent. Maar als je dat doet, kom je op dezelfde nauwkeurigheid uit als de Amerikanen. Die ligt in de orde van meters, terwijl het Kadaster, bijvoorbeeld - een van de deelnemers aan dit project - nauwkeurigheden van centimeters wil hebben.'



Station van het AGRS.NL (Actief GPS-referentiesysteem Nederland) op het gelijdeemeststation van Rijkswaterstaat op West-Terschelling. Om met GPS met centimeter-nauwkeurigheid te kunnen meten, is in Nederland een speciaal meetnet neergezet, bestaande uit vijf referentiestationen, elk met een hoogwaardige GPS-ontvanger.

Tot nog waren kerktorens belangrijke referentiepunten voor landmeters. Door het toenemend gebruik van GPS dreigen ze deze rol te verliezen.

## De kerktoren heeft afgedaan als oriëntatiepunt

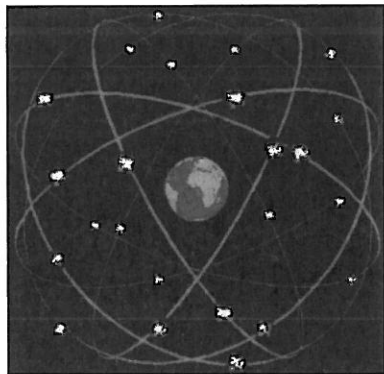
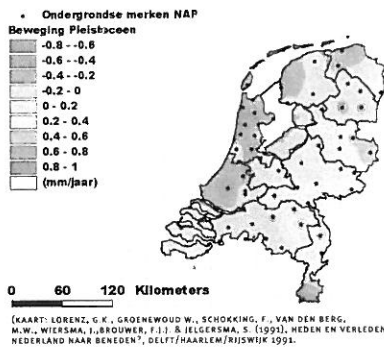




FOTO: MEETKUNDIGE DIENST RIJKSWATERSTAAT, DELFT

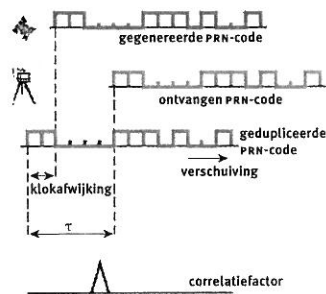
Ondanks de beschikbaarheid van GPS-apparatuur voeren landmeters nog dagelijks waterpasmetingen uit. Dit komt doordat er strengere eisen aan de hoogte worden gesteld en GPS beter is in de informatie over positie.

Bodemdaling in Nederland afgeleid uit de beweging van Ondergrondse Merken van het NAP. De beweging van de Ondergrondse Merken is berekend uit waterpassingen tussen 1926 en 1986. Na afronding van de 5<sup>de</sup> Nauwkeurigheidswaterpassing in 1998, waarbij ook voor het eerst GPS metingen zijn ingezet, komen nieuwe meetgegevens beschikbaar die deze resultaten aanzienlijk verbeteren. Het zal dan mogelijk zijn om voor veel meer punten bewegingen te berekenen, onder meer ook langs de kust waar in de huidige berekening nu belangrijke informatie ontbreekt.



Constellatie van 24 GPS-satellieten. De satellieten staan op een hoogte van 20.000 kilometer en hebben een omlooptijd van 12 uur. Ze zijn gelijkmatig verdeeld over zes baanvlakken. Afhankelijk van de plaats op aarde zijn tenminste vier en maximaal twaalf satellieten waar te nemen.

Principe van een afstandsmeting met behulp van een GPS-codemetingen. De satelliet zendt signalen uit die tevens gegevens bevatten over plaats, status en de klokfout. Een deel van het signaal, de zogenaamde PRN-code, wordt in de GPS-ontvanger vergeleken met een door de ontvanger zelf gegenereerde PRN-code. Hieruit kan de looptijd van een signaal worden berekend en de afstand tot de satelliet. In GPS-terminen heet dit de pseudo-afstand, omdat de klokken in de satelliet en in de ontvanger niet exact gelijk lopen. Er zijn daarom minimaal vier satellieten nodig om de positie en de klokfout van de ontvanger te kunnen vaststellen.



**Draag golf** ¶ Om die nauwkeurigheid te bereiken, passen geodeten een tweede truc toe. Van der Marel: 'Het signaal dat van de satelliet komt, bestaat uit een aantal codes waarvan we er slechts één kennen. Die codes zijn gemoduleerd, zeg maar 'geplakt', op twee draaggolven. Die codes pellen we er eerst af zodat we de oorspronkelijke draaggolven overhouden. Met die draaggolven werken we uiteindelijk en daarmee kun je nauwkeurigheden in de orde van millimeters behalen.' Maar ook voor deze techniek zijn twee (of meer) ontvangers nodig. Voor gebruikers is dat niet altijd even handig. Er zijn systemen ontwikkeld die een tweede ontvanger overbodig maken. In Nederland zijn twee soorten systemen in gebruik: Differentieel-GPS (D-GPS), dat gebruik maakt van de code van GPS, en AGRS.NL, dat gebruik maakt van de fasemeting op de draaggolf. D-GPS wordt gebruikt om direct een positie te bepalen voor, bijvoorbeeld, mobiele doeleinden. De codesignalen van de GPS-satelliet worden met behulp van referentiestationen gecorrigeerd en die correcties worden uitgezonden door speciale zenders en via het radiodatasysteem (RDS) op de FM-programma's van Radio 2. Dit systeem heeft een meetnauwkeurigheid in de orde van enkele meters. AGRS.NL is het tweede systeem.

Van der Marel: 'AGRS.NL is veel nauwkeuriger, maar dat heeft nog geen radioverbinding. Real-time toepassingen zijn voor ons niet zo noodzakelijk. Het gaat er ons toch vooral om naderhand met behulp van gespecialiseerde rekenprogramma's een hoge nauwkeurigheid te behalen.'

AGRS.NL, waarbij naast de TU Delft en het Kadaster ook de Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat en de Nederlandse Commissie voor Geodesie zijn betrokken, bestaat 'fysiek' uit vijf referentiestationen en een rekencentrum in Apeldoorn waar de ontvangen signalen worden verwerkt en doorgestuurd naar gebruikers. Met dit referentiesysteem hoeven gebruikers niet zelf met extra ontvangers aan de slag te gaan, maar kunnen ze direct de voor hen benodigde gegevens oppikken van, bijvoorbeeld, internet. Overigens is AGRS.NL geen unieke operatie. In Japan is een soortgelijk systeem opgezet met zo'n 600 referentiestationen en ook Californië heeft een referentiesysteem met zo'n honderd grondstations. Ook zijn er in Nederland gebruikers die een eigen referentiestation opzetten of dit in samenwerking doen met gespecialiseerde bedrijven, zoals Globalcom in Rijswijk. Hierbij gaat het, in tegenstelling tot AGRS.NL, om lokale systemen.

**Toepassingen** ¶ De belangrijkste afnemers van het referentiesysteem zijn het Kadaster en de Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat (RWS). Zo is in 1996 en 1997 door de Meetkundige Dienst de vijfde nauwkeurigheidswaterpassing uitgevoerd. Dat gebeurt eens in de twintig jaar. Dan gaat het vooral om de hoogte. Nederland zakt (of kantelt eigenlijk: het westen daalt sneller dan het oosten). Een aardige bijzonderheid bij de metingen is dat bij de vele waterwegen die ons land telt de waterpassing wordt gemeten met een flesjeswaterpas die door de te bemeten waterweg wordt getrokken. De hoogte is ook met GPS te meten, maar de uitkomsten van die meting zijn niet dezelfde omdat GPS de hoogte meet ten opzichte van een rekenoppervlak, terwijl met waterpassing de hoogte wordt gemeten ten opzichte van de geoid, zeg maar het gemiddelde zeeniveau. Voor het meten van de daling of de stijging van de bodem maakt dat natuurlijk niet uit.

Van der Marel: 'Bovendien is met behulp van zwaartekrachtmetingen is de hoogte uit de geoid ten opzichte van het rekenoppervlak van GPS te bepalen. Vorig jaar is met GPS de hele stabiele ondergrond gemeten en zijn die metingen vastgerekend aan de vijf referentiestationen van AGRS.NL.'

**Kernet** ¶ De tweede grond voor het opzetten van het referentiesysteem is de koppeling van de Nederlandse driehoeksmeting aan het Europees (ETRS'89) en het mondiale referentiesysteem (WGS84). In dit kader heeft het Kadaster het zogeheten kernnet opgezet: een net van 400 punten, die gemakkelijk toegankelijk zijn voor GPS-gebruikers, dat in feite de functie van de kerktorens (de landmeetkundige althans) overneemt. Voor onderzoekers zijn dat aardige dingen, maar die willen natuurlijk meer dan het opzetten van een praktisch positioneringssysteem.

Van der Marel: 'Voor ons is het vooral interessant om de mogelijkheden van GPS te vergroten. Op dit terrein hebben we vier, nee zes promotie-onderzoeken, waarvan er inmiddels vier zijn afgerond en twee nog lopen.

Ons onderzoek richt zich op drie doelen: de atmosfeer, plaatsbepaling en de analyse van horizontale en verticale deformaties. Dan gaat het speciaal om toepassingen waar hoge nauwkeurigheidseisen worden gesteld. De nadruk ligt op het 'in huis' ontwikkelen en beproeven van geavanceerde modellen en

van methodes van gegevensverwerking om signaal en ruis te scheiden.'  
 Het eerste aandachtsgebied wordt gevormd door de fasemetingen. We kunnen wel op millimeternauwkeurigheid meten, maar we weten niet hoeveel decimeters daar bij horen. Het is net alsof je een liniaal met millimeterverdeling hebt, waar de centimeterschaal op ontbreekt. Het is het punt om een heel aantal golflengtes te zoeken om de juiste afstand tot de GPS-satellieten te kennen; eigenlijk is dit een bijzonder geval van de kleinste-kwadraten-schatting. We zijn nu redelijk succesvol met onze schattingen, maar we zijn er nog lang niet mee klaar.'

**Waterdamp** ¶ Een andere gebruiksmogelijkheid van GPS waar de Delftse geodeten naar kijken zijn de atmosferische invloeden. De signalen die de satellieten naar de aarde sturen, worden beïnvloed door de atmosferische lagen waar het signaal zich een weg door moet banen. In de ionosfeer, die zo'n 200 à 300 kilometer boven het aardoppervlak begint, wordt het signaal vertraagd en in de troposfeer, de onderste tien kilometer van de atmosfeer, wordt het signaal vooral beïnvloed door de aanwezige waterdamp.

Dat is wetenschappelijk natuurlijk een prachtige insteek. Je doet 24 uur per dag waarnemingen, waaruit je de atmosferische invloeden kunt berekenen. Zo kun je dus boven een bepaalde plaats de hoeveelheid waterdamp berekenen en die gegevens gaan naar het KNMI.'

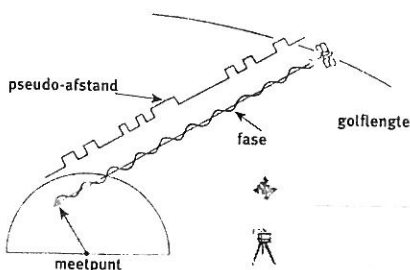
Het KNMI zelf vergelijkt die gegevens weer met behulp van modellen en verifieert die aan metingen van een weerballon. De waterdampmetingen via GPS en de metingen van de weerballon blijken prachtig overeen te komen.

'Overigens staat dit onderzoek nog helemaal in de kinderschoenen', zegt Van der Marel.

'Een ander aspect is dat we GPS ook gebruiken om de zakkingen in Groningen te meten die het gevolg zijn van de aardgaswinning. Dat soort metingen moeten effectiever worden via de verwijdering van de atmosferische effecten. De atmosferische vertraging maakt het moeilijk om het probleem van de geheeltallige meerduidigheid - het probleem dus dat je op millimeters nauwkeurig kunt meten, maar niet weet hoeveel golflengtes daarbij horen - op te lossen. Dat houdt in dat je over langere afstanden langer moet meten dan over kortere. Boven afstanden van twintig kilometer ben je dan al gauw een uur aan het meten en dat staat haaks op het idee van de gebruiker direct over zijn gegevens te kunnen beschikken.

Er valt veel te verdienen als je de atmosferische effecten beter zou kunnen modelleren en daarbij helpt AGRS.NL. Een geval van zelfcalibratie. Dat lijkt een beetje op baron Von Münchhausen die zichzelf bij zijn haren uit het moeras trekt.'

Op de langere termijn gaan we kijken naar zakking en zeespiegelrijzing. Dan ben je, uiteraard, vooral in de hoogte geïnteresseerd. Hoogtemeting met GPS is lastig doordat alle GPS-satellieten 'aan één kant', namelijk boven ons, staan. Overigens is het bepalen van hoogtedeformenties niet louter een kwestie van meten. Daar komt een hele analyse aan te pas om te beoordelen of die veranderingen werkelijk zijn toe te schrijven aan zakking of andere geofysische effecten of aan min of meer toevallige meetonauwkeurigheden.'



Het vertraagde en doppler verschoven signaal dat van de satelliet wordt ontvangen

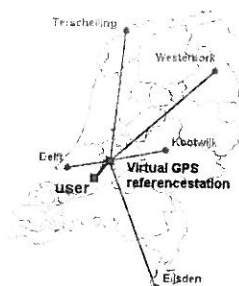
De middelste sinus is een replicatie van de draaggolf die door de ontvanger wordt gegenereerd

Verschilsignaal waarvan de fase wordt gemeten

Naast de pseudo-afstand wordt ook de fase van de draaggolf (radiosignaal) gemeten.

Dit is een sinusvormige golf, die door de snelheid van de satelliet een Doppler-verschuiving heeft ondergaan. In de ontvanger wordt de fase van draaggolf uit de satelliet vergeleken met een door de ontvanger zelf gegenereerde draaggolf (replica) en wordt het faseverschil bepaald. Het verschil is een maat voor de verandering in afstand.

#### VIRTUEEL GPS-REFERENTIESTATION



Het AGRS.NL bestaat uit vijf permanente GPS-stations.

Om optimaal te kunnen profiteren van het AGRS.NL moet een landmeter in principe gegevens van alle vijf stations van het Internet ophalen. Een ander bezwaar is de afstand tot de referentiestationen. Hoe groter de afstand tot het station, des te langer moet er worden gemeten. Dat komt door verstoringen in de atmosfeer, met name in de ionosfeer.

Om aan deze bezwaren tegemoet te komen, krijgt de gebruiker in de toekomst gegevens aangeboden van een virtueel GPS-referentiestation, op een door hem gespecificeerde locatie.

De gegevens van het virtuele station worden berekend uit alle beschikbare data van de vijf AGRS.NL-stations. Daarbij wordt een aantal correcties toegepast, zoals voor atmosferische vertragingen en instrumentele effecten. Het resultaat is een nabootsing van de atmosferische toestand zoals die boven de meetplek werd ondervonden. Het grote voordeel voor de gebruiker is dat, wanneer hij de gegevens van een virtueel station via Internet heeft opgehaald, hij minder lang hoeft te meten en gewoon zijn vertrouwde software voor korte basislijnen kan blijven gebruiken.

De gebruiker hoeft zich geen zorgen meer te maken over ingewikkelde modellen van de atmosfeer en andere correcties, dit wordt overgelaten aan de software op het AGRS.NL-referentiecentrum bij het Kadaster in Apeldoorn. Een voordeel hiervan is dat de laatste inzichten uit onderzoek op het referentiecentrum kunnen worden toegepast. Via het virtuele GPS-referentiestation komen ze direct ter beschikking aan de gebruikers.

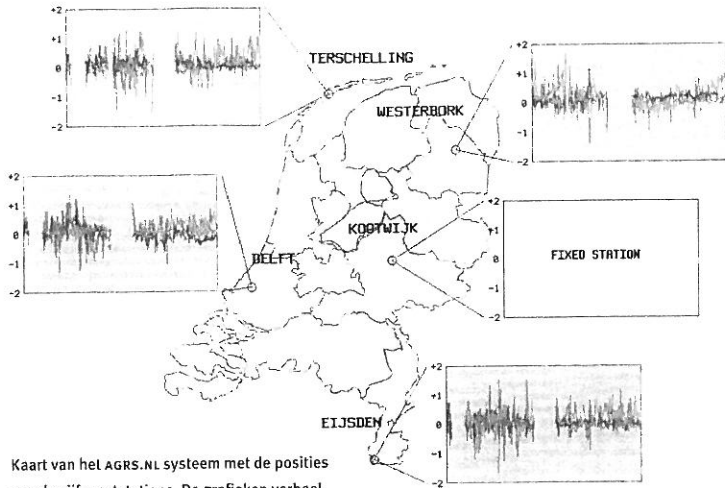
De virtuele GPS-referentiestationen zijn momenteel in ontwikkeling, de eerste gebruikerstests worden tegen het einde van 1998 verwacht. Overigens is het niet zo dat de virtuele GPS-stations lokale GPS-referentiestationen, met een bereik van maximaal 10-20 kilometer, direct zullen vervangen. Het is meer zo dat virtuele GPS-stations de 'gaten' tussen echte referentiestationen zullen opvullen.



Landmeter met GPS-meetapparatuur tijdens het opmeten van een trottoirband. De positie van de mobiele ontvanger wordt bepaald ten opzichte van een referentie-ontvanger en gebruikt voor het vervaardigen van een digitale kaart.



Stationaire GPS-ontvanger die als referentie fungeert voor de mobiele ontvanger. Deze ontvanger staat op een locatie met een exact bekende positie.

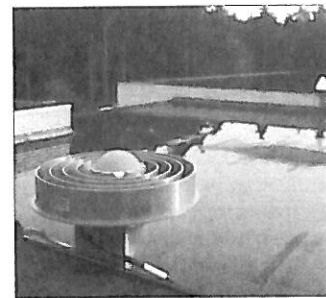


Kaart van het AGRS.NL systeem met de posities van de vijf meetstations. De grafieken verbeelden de berekende positie vanaf 29 juni 1997 tot 27 maart 1998. (zie ook: [www.geo.tudelft.nl/mgp/agrs/time-series/index.html](http://www.geo.tudelft.nl/mgp/agrs/time-series/index.html))

Het GPS-Kernet vormt de schakel tussen het systeem van de Rijksdriehoeksmeting uit 1918 en het GPS-referentiesysteem wgs-84 (World Geodetic System) dat door het AGRS.NL wordt gebruikt. Het Kernet bestaat uit ruim 400 punten bekend in het Rijksdriehoek-systeem en wgs-84. (Illustratie: Kadaster Apeldoorn)



AGRS.NL kan worden ingezet voor meteorologische toepassingen, waarbij uit de berekeningen van het AGRS.NL de hoeveelheid waterdamp in de atmosfeer kan worden afgeleid.



De GPS-antenne zoals die worden gebruikt op AGRS.NL-referentiestationen. De concentrische ringen dienen ervoor om ongewenste reflecties te onderdrukken. De antenne is normaal afgeschermd met een kunststof kap.

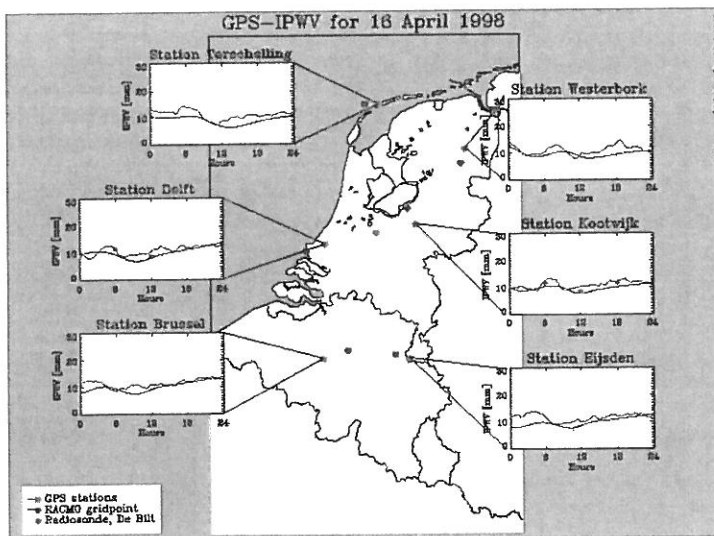


Opstelling van GPS-ontvanger, computer, voedingsapparatuur en modems, zoals opgesteld in de AGRS.NL-referentiestationen.

Remote-sensing Voor de scheep- en luchtvaart en in toenemende mate ook voor de vrachtrijders op het land is GPS een plaatsbepaler. Daar is directe verwerking van gegevens belangrijk. Voor statische toepassingen is real-time-verwerking wat minder van belang. Bij directe verwerking is nauwkeurigheid niet het grote probleem (de laatste meters van een landing doet de piloot toch op zicht) maar de betrouwbaarheid (is dit wel het vliegveld van Tokio?). Van der Marel: 'Alhoewel we op het gebied van betrouwbaarheid een praktisch bruikbare methodiek hebben ontwikkeld, ligt de mobiele toepassing toch een beetje buiten ons bestek. Wel worden onze technieken, bijvoorbeeld, door Philips gebruikt in hun autonavigatiesysteem en ook door de marine en TNO in het elektronische navigatiesysteem 'Brug 2000'.'

Waar we zelf veel meer mee bezig zijn is de nauwkeurige positiebepaling van remote-sensing-instrumenten in vliegtuigen en op schepen voor allerlei meetdoeleinden. Daarbij bereik je in sterk dynamische omgevingen meetnauwkeurigheden van enkele decimeters tot zelfs centimeters. AGRS.NL kan daarbij van nut zijn, omdat de gebruikers dan niet meer zelf op de grond instrumenten hoeven te plaatsen. Dat is soms een nogal vervelend karwei, omdat bij slecht weer, bijvoorbeeld, metingen uitgesteld kunnen worden en je later weer opnieuw kan beginnen. De sterke punten van het AGRS.NL is dat het systeem lanc dekkend is, en 24 uur per dag meet met ontvangers, waarvan de positie exact bekend is. Die sterke punten proberen we bij ons onderzoek uit te buiten.' De kerktorens, zo lijkt het, zijn een functie kwijtgeraakt.

Voor nadere informatie kunt u contact meenemen met prof.dr.ir. Peter J.G. Teunissen, tel. (015) 278 2558, e-mail [p.j.g.teunissen@geo.tudelft.nl](mailto:p.j.g.teunissen@geo.tudelft.nl) of dr.ir. H. van der Marel, tel. (015) 278 4907, e-mail [h.vandermarel@geo.tudelft.nl](mailto:h.vandermarel@geo.tudelft.nl). Gegevens over AGRS.NL zijn ook te vinden op: [www.agrs.nl](http://www.agrs.nl) of op [www.geo.tudelft.nl/mgp](http://www.geo.tudelft.nl/mgp)



Vergelijking tussen de hoeveelheid waterdamp in de atmosfeer, zoals bepaald uit GPS-metgegevens (rode lijn), meteorologische modellen (blauwe lijn) en radiosondemetingen (ballon) in De Bilt. De punten representeren de data van de radiosonden.