

In 1991 kwam van de Delftse faculteit Geodesie het voorstel om Nederland uit te rusten met een Actief Global Referentie Systeem (AGRS). Eind 1997 werd het prototype opgeleverd. Dat bestaat uit een netwerk van vijf referentiestationen, die elk in directe verbinding staan met het centrale Global Positioning System-rekencentrum in Apeldoorn. Inmiddels staat vast dat het AGRS belangrijk bijdraagt aan de vernieuwing van de nationale geometrische infrastructuur. Volgens het KNMI is het bovendien 'het meest geschikt' voor GPS-waterdampmetingen, iets dat de auteur van deze bijdrage in 1991 - toen hij met het AGRS-voorstel kwam - zelf niet voor mogelijk had gehouden. Zeven jaren na de geboorte van een idee: de ontwikkeling en toepassingen van een nieuw meetsysteem.

De geometrische vorm van de nationale geodetische infrastructuur - kortweg aan te duiden als de 'geometrische infrastructuur' - dient voor een uniforme en consistente geometrische inpassing van de plaatsbepalingsactiviteiten in Nederland.

De infrastructurele voorzieningen hebben betrekking op de referentiesystemen voor hoogte en situatie, die in onderlinge coördinatie worden onderhouden door Rijkswaterstaat en het Kadaster. De Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat is daarbij verantwoordelijk voor de instandhouding van het nationale hoogtenet op basis van het Normaal Amsterdams Peil, terwijl de Rijksdriehoeksmeting van het Kadaster belast is met het nationale horizontale referentienet.

In toenemende mate wordt bij de verschillende plaatsbepalingsactiviteiten in ons land gebruik gemaakt van ruimtegeodetische technieken, zoals in het bijzonder die van het Global Positioning System. De geodetische toepassing van dit systeem maakt zeer nauwkeurige plaatsbepaling mogelijk voor een grote verscheidenheid van gebruikersgroepen. Hierdoor worden nieuwe en hogere eisen aan de geometrische infrastructuur gesteld. Een aantal jaren geleden is daarom besloten de nationale geometrische infrastructuur te moderniseren.



GPS-antenne op een statief tijdens metingen in het veld. Het doosje op de voorgrond bevat de GPS-ontvanger. De kerktoren op de achtergrond wordt daardoor overbodig als referentie voor meetkundige doeleinden.

Het momenteel in ontwikkeling zijnde Actieve GPS Referentie Systeem zal daarbij een belangrijke bijdrage gaan leveren aan de verankering van deze vernieuwde infrastructuur.

HET GLOBAL POSITIONING SYSTEM

GPS-plaatsbepaling Bij de bepaling van de meetkundige figuur van de aarde was men in het verleden hoofdzakelijk aangewezen op het gebruik van terrestrische hoek- en afstandsmetingen. Met de komst van het Global Positioning System, veelal afgekort tot GPS, is daar drastisch verandering in gekomen. Het sinds 1993 volledig operationele GPS bestaat uit een bijna perfect symmetrische constellatie van in totaal 24 satellieten die, verdeeld over zes baanvlakken, op een hoogte van ongeveer 20.000 kilometer hun baantjes om de aarde trekken.

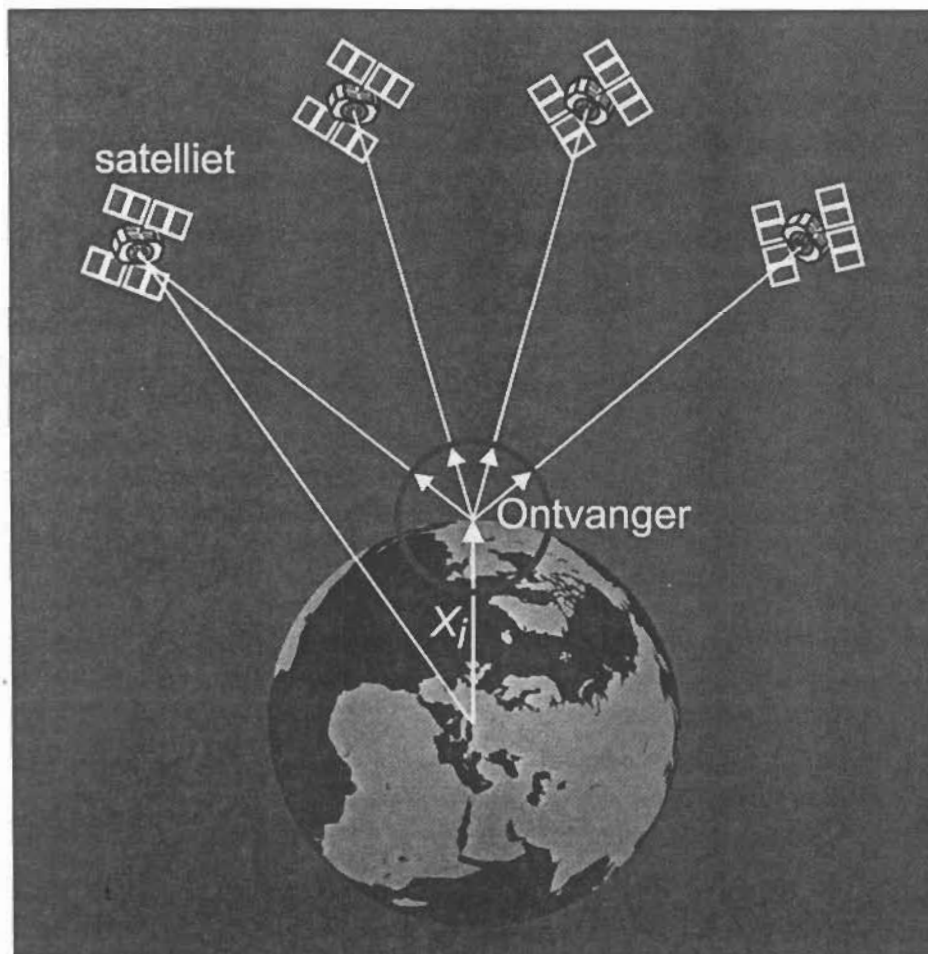
De hoge banen hebben het voordeel dat de satellieten relatief weinig hinder ondervinden van de wrijving van de atmosfeer en van de grilligheden in het aardse zwaartekrachtsveld. De satellietposities zijn hierdoor in de tijd goed te voorspellen, zodat ze voor veel praktische toepassingen als bekend verondersteld mogen worden. De hoge banen maken het, gekoppeld met het aantal satellieten en de gekozen satellietenconfiguratie, tevens mogelijk dat steeds een voldoende aantal satellieten over een groot oppervlak van de aarde simultaan 'zichtbaar' is. Door nu met behulp van een GPS-ontvanger op aarde afstandsmetingen naar een voldoende aantal in positie bekende satellieten te verrichten, is de plaats van de ontvanger in een wereldwijd coördinatenstelsel te bepalen (zie figuur 1).

Nauwkeurige GPS-plaatsbepaling Bij het GPS kunnen twee typen afstandsmeting worden onderscheiden, de looptijdmeting en de fasemeting [1]. Bij het eerste type meting wordt de looptijd gemeten van het door de satelliet uitgezonden signaal.

Vermenigvuldigd met de lichtsnelheid levert dit de afstand tussen satelliet en ontvanger op het moment van meting. Dit type meting is echter vanwege het relatief hoge meetruisniveau minder geschikt voor geodetische toepassingen, waarvoor immers vaak zeer hoge nauwkeurigheidseisen aan de plaatsbepaling worden gesteld.

Het tweede type meting, de fasemeting, is wèl geschikt voor geodetische toepassingen. De fasemeting bestaat uit het meten van het faseverschil tussen het door de satelliet uitgezonden en in de ontvanger gegenereerde signaal. Deze fasemeting kan, op een aantal correcties na, ook als een afstandsmeting naar de GPS-satelliet worden geïnterpreteerd. De hoge meetprecisie van de fasemeting is echter nog niet voldoende om tot een nauwkeurige plaatsbepaling te komen. De door de satellieten uitgezonden signalen zijn namelijk nog behept met een aantal verstoringen als ze door de GPS-ontvanger worden ontvangen. Deze verstoringen zijn onder andere de satelliet- en ontvanger-klokfouten en de vertraging die het signaal ondergaat bij het doorlopen van de atmosfeer. Bij het gebruik van een enkele GPS-ontvanger, ook wel absolute plaatsbepaling genoemd, worden deze onbekende verstoringen direct doorgegeven aan de berekende positie van de ontvanger. In dat geval is er dus nog steeds geen sprake van nauwkeurige plaatsbepaling, ondanks de zeer precieze fasemetingen.

Dit probleem kan nu voor een belangrijk deel worden ondervangen door, in plaats van met een enkele GPS-ontvanger, met twee GPS-ontvangers te werken. Daar beide ontvangers simultaan de uitgezonden signalen van dezelfde satellieten ontvangen, zijn de verstoringen voor beide ontvangers nagenoeg gelijk en worden ze dus voor een belangrijk deel uit het positieverschil, de zogenaamde basislijn, van de twee ontvangers geëlimineerd. Relatieve plaatsbepaling is dus nauwkeuriger dan absolute plaatsbepaling. Door nu één van de twee ontvangers, de zogenaamde referentie-ontvanger, op een in



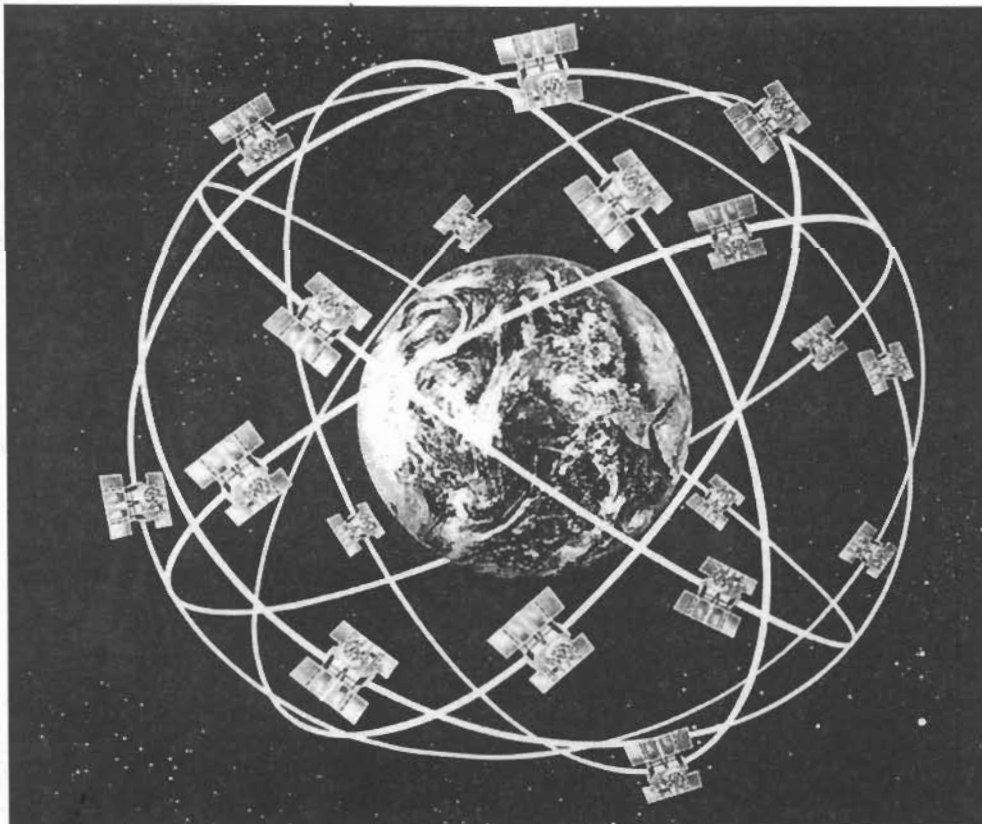
FIGUUR 1: GPS-plaatsbepaling op basis van afstandsmeting.

coördinaten bekend punt op te stellen en de andere ontvanger, de zogenaamde mobiele, achtereenvolgens op verschillende in coördinaten te bepalen punten, kunnen de posities van deze nieuwe punten dus met een hogere nauwkeurigheid bepaald worden, dan mogelijk zou zijn geweest als slechts een enkele ontvanger zou worden gebruikt (zie figuur 2).

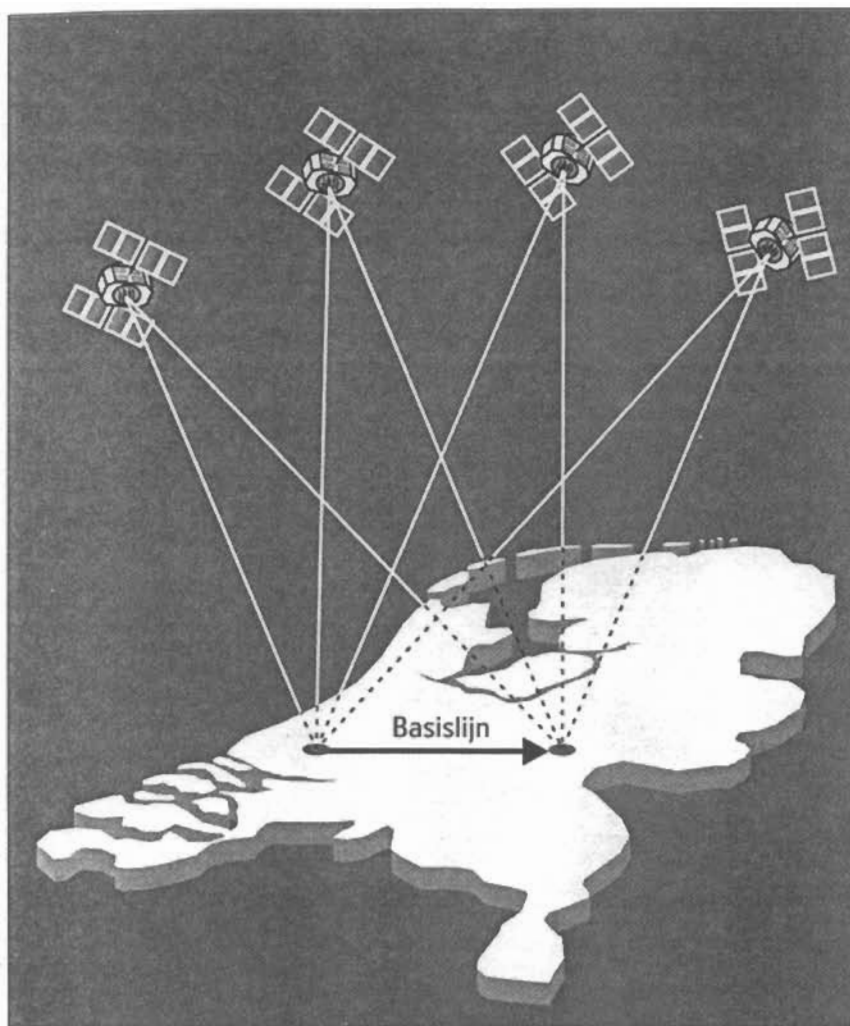
Aansluiting van de GPS-plaatsbepaling De driedimensionale coördinaatverschillen van de twee ontvangers worden in hetzelfde stelsel verkregen als waarin de coördinaten van de GPS-satellieten zijn gegeven, namelijk het World Geodetic System 84 (WGS'84). Voor de verdere toepassing echter, wensen veel gebruikers dat hun plaatsbepalingsresultaten in coördinaten van het nationale referentiestelsel worden uitgedrukt. In Nederland zijn dit het RD- en NAP-stelsel. Het RD-stelsel is een tweedimensionaal, vlak coördinatenstelsel, verkregen door projectie op een kaartvlak van een geheel Nederland bedekkende terrestrische triangulatie. De realisatie in het terrein vindt plaats via zo'n zesduizend RD-punten waarvan de x- en y-coördinaten zijn bepaald door middel van terrestrische hoek- en afstandmetingen. Het vormt daarmee het nationale referentiestelsel voor de horizontale plaatsbepaling.

Het NAP-stelsel is het nationale referentiestelsel voor de verticale plaatsbepaling. Dit door middel van waterpassingen bepaalde hoogtestelsel wordt in het terrein gerealiseerd via meer dan vijftigduizend waterpasbouten, peilschalen en ondergrondse merken. Daar het RD en NAP van origine echter twee gescheiden stelsels zijn, werd het met de intrede van het puur driedimensionale GPS noodzakelijk de terreinsrealisatie van beide stelsels uit te breiden.

Dit heeft er toe geleid dat nu van een groot aantal nieuw gerealiseerde punten zowel de RD- als de NAP-coördinaten bekend zijn, terwijl tevens op deze punten GPS-metingen kunnen worden verricht. Op deze punten is de hemelbol dan ook vrij van obstakels



Constellatie van de 24 satellieten die deel uitmaken van het wereldomvattend GPS-systeem. De satellieten bevinden zich op 20.000 kilometer van het aardoppervlak, daarom zijn ze op een groot deel van het aardoppervlak zichtbaar voor de GPS-ontvangers.

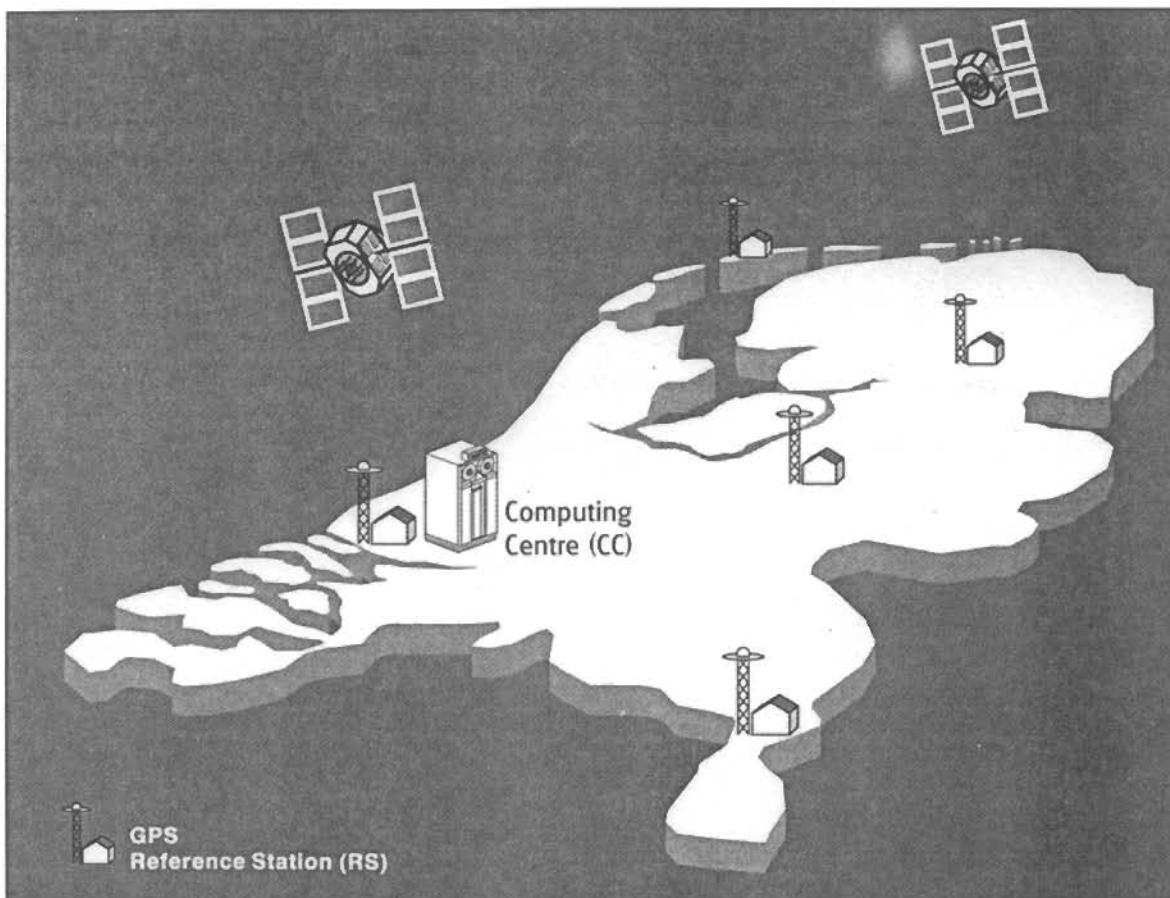


FIGUUR 2: Relatieve plaatsbepaling met twee GPS-ontvangers.

en is de kans op signaalreflecties gering. Met deze nieuw gerealiseerde punten is tevens de transformatie van het mondiale WGS'84-stelsel naar het nationale RD/NAP-stelsel mogelijk gemaakt.

HET ACTIEVE GPS REFERENTIE SYSTEEM De realisatie van het nationale referentiestelsel kan als een passief referentiesysteem worden aangeduid. Immers, hoewel de punten in driedimensionale RD/NAP-coördinaten gegeven zijn en geschikt zijn gemaakt voor het doen van GPS-metingen, zijn het toch de gebruikers zelf die voor de registratie van alle actuele GPS-gegevens met bijbehorende integriteit moeten zorgdragen. In feite verzorgt iedere gebruiker in deze opzet, vanwege het noodzakelijk gebruik van een eigen referentie-ontvanger, zelf een deel van de realisatie van de benodigde referentie. In 1991 heeft de auteur dan ook voorgesteld om ons land uit te rusten met een Actief GPS Referentie Systeem (AGRS). Het voorstel luidde [2-4] om een gelijkmatig over ons land verspreid netwerk van permanent opererende GPS-referentiestationen te installeren, die elk in directe verbinding staan met een centraal rekencentrum, alwaar de verwerking, de analyse, de opslag en de verdere distributie van de data zou kunnen plaatsvinden.

De zorgvuldig uitgekozen en stabiele referentiestationen zouden elk behuisd moeten worden met geavanceerde GPS-ontvangers en computerapparatuur, waarmee dan continu de aan de hemelbol 'zichtbare' satellieten konden worden gevolgd en waargenomen. Originale danwel bewerkte data zou dan door gebruikers van het systeem kunnen



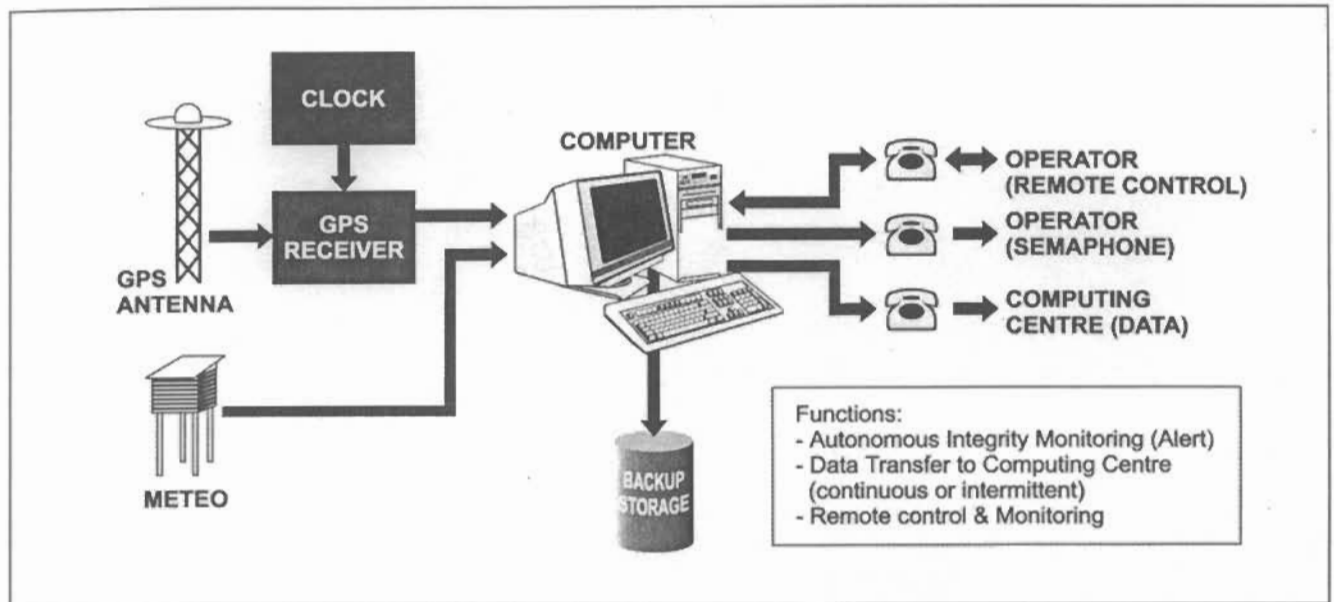
FIGUUR 3: De AGRS-referentiestations.

worden opgevraagd via een 'data retrieval systeem', daarbij onder andere gebruik makend van de mogelijkheden die de 'elektronische snelweg' biedt.

Door gebruikers' over deze gegevens te laten beschikken, zou dan op ieder moment, met een eenvoudiger logistieke ondersteuning en zonder tussenkomst van zelf te installeren referentie-ontvangers, de precieze en betrouwbare plaatsbepaling van nieuw te bepalen punten kunnen worden uitgevoerd. Op deze wijze zou het te ontwikkelen AGRS dus zelf de rol van een landelijke 'digitaliseertafel' kunnen gaan spelen, waarbij dan de GPS-ontvangers van de gebruikers te velde de rol van 'digitizer' krijgen toebedeeld.

Volgend op dit voorstel heeft de Sectie Mathematische Geodesie en Puntsbepaling van de TU Delft, met steun van de Koninklijke Nederlandse Academie van Wetenschappen, het initiatief genomen de technische haalbaarheid van zo'n systeem te onderzoeken. De resultaten hiervan hebben ertoe geleid dat de Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat en het Kadaster zich als partners bij het onderzoek hebben aangesloten, met daarbij als essentiële inbreng de logistieke, financiële en praktische ondersteuning [5]. Inmiddels is de eerste fase in de ontwikkeling van het AGRS afgerond. In oktober 1997 is het prototype AGRS opgeleverd, dat nu door de Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat en de Rijksdriehoeksmeting van het Kadaster in onderlinge coördinatie wordt geëxploiteerd. Het prototype bestaat uit een in Delft gelokaliseerd rekencentrum en vijf referentiestations:

- in Delft bij de faculteit Geodesie van de technische universiteit
- in Kootwijk bij het voormalig satellietlaser-observatorium
- in Westerbork bij het observatorium voor radio-astronomie van SRON (Stichting Ruimte Onderzoek Nederland)
- in Eijsden en
- op Terschelling.



FIGUUR 4: De componenten van een AGRS-referentiestation.

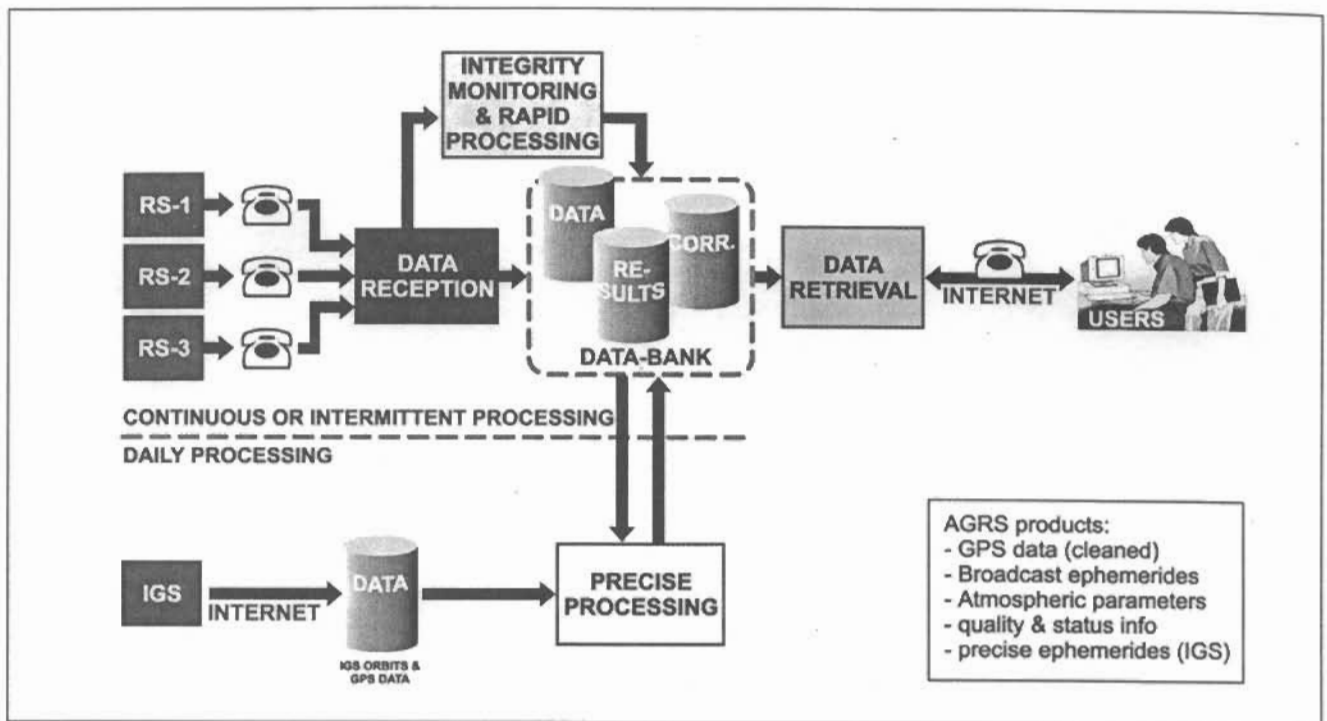
De laatste twee locaties zijn tevens peilschaalstations van Rijkswaterstaat (zie figuur 3).

De vanuit het rekencentrum op afstand aanstuurbare referentiestationen zijn onder andere uitgerust met 12-kanaals dubbele frequentie TurboRogue ontvangers, meteo-apparatuur en een nauwkeurige kwartsklok (zie figuur 4). Voor ontvangst van de signalen worden speciale GPS-antennes met choke-ring gebruikt, die op goed gefundeerde antennemasten met voldoende stijfheid zijn gemonteerd. De computers van de referentiestationen verzorgen het inlezen, opslaan en verzenden van de GPS- en meteo-data. Per referentiestation vindt tevens al een real-time kwaliteitscontrole van de data plaats. Daarbij wordt gebruik gemaakt van de aan de TU Delft ontwikkelde DIA-procedure voor de detectie, identificatie en adaptatie van optredende fouten.

Nadat de gegevens van alle referentiestationen zijn verzameld, vindt in het rekencentrum de centrale gegevensverwerking van het gehele netwerk plaats. Deze netwerkverwerking omvat onder andere de kwaliteitscontrole van de netwerkdata, de stabiliteittoetsing van referentiestationen, de tot een sluitend geheel vereffenen van redundante data, het voor landmeetkundige gebruikers geschikt maken van deze data en het bepalen van atmosferische parameters.

De netwerkverwerking vindt plaats via twee cycli, de zogenaamde rapid processing cycle en de daily processing cycle. De eerste cyclus is gericht op de praktische gebruiker, terwijl de tweede meer gericht is op de wetenschappelijke gebruiker van het systeem (zie figuur 5).

DE AGRS-TOEPASSINGEN Met het AGRS wordt als nulde-orde infrastructuur zowel beoogd de integriteit van het nationale referentiestelsel te garanderen, als Rijkswaterstaat en overige gebruikersgroepen in staat te stellen efficiënt en met hoge kwaliteit eigen GPS-campagnes uit te voeren. Als infrastructurele ondersteuning richt het AGRS zich dus qua toepassing op een uitgebreide gebruikersmarkt, van real-time navigatie en positiebepaling via een breed landmeetkundig en civieltechnisch toepassingsgebied tot hoge precisie plaatsbepaling voor geodetisch onderzoek. Van de vele toepassingen worden er drie hieronder kort belicht.



FIGUUR 5: De componenten van het AGRS-rekencentrum.

AGRS EN HOOGTEMETINGEN: DE VIJFDE NAUWKEURIGHEIDSWATERPASSING

Instandhouding van het peilmerknet van het NAP is één van de kerntaken van de Meetkundige Dienst (MD) van Rijkswaterstaat. Een directe aanleiding voor het gebruik van het AGRS is de inmiddels ten behoeve van het NAP door de MD gestarte 5de nauwkeurigheidswaterpassing [6]. Deze nauwkeurigheidswaterpassing heeft als doel de kwaliteit van het huidige primaire peilmerknet, de ruggegraat van het NAP, te controleren. Het grote belang hiervan moge duidelijk zijn als men denkt aan de vele essentiële toepassingen die het NAP voor ons land kent, zoals onder andere het gebruik ervan voor de waterhuishouding (peilhandhaving in polders door Waterschappen), het gebruik bij de aanleg van grote infrastructurele werken (rijkswegen, kunstwerken) en het gebruik ervan als referentievlak voor waterstandsmetingen ('Nederland beschermen tegen overstromingen' is één van de kerntaken van Rijkswaterstaat).

Bij de 5de nauwkeurigheidswaterpassing, die naar verwachting in 1998 zal zijn voltooid, worden voor de eerste keer in de Nederlandse geschiedenis de conventionele optische-, hydrostatische- en ijswaterpassingen gecombineerd met GPS-hoogtemetingen. De belangrijkste redenen hiervoor zijn dat met GPS efficiënter hoogtemetingen kunnen worden uitgevoerd, waardoor in de toekomst ook met een hogere frequentie kan worden gemeten, en het feit dat met GPS de hoogteverschillen over langere afstanden preciezer kunnen worden gemeten dan met de conventionele methoden het geval is. Dit laatste is zowel van belang voor de sterkte van het net als geheel, als voor de aansluiting van het NAP-peilmerknet aan de netwerken van de ons omringende landen.

Gecombineerd met de voorgaande vier primaire waterpassingen, waarvan de eerste in de periode 1875-1885 is uitgevoerd, zal met de 'vijfde' ook een beter inzicht verkregen worden in de beweging van de 'vaste bodem' onder Nederland. Analyses van voorgaande waterpassingen hebben aangetoond dat de ondergrondse merken van het netwerk significant ten opzichte van elkaar bewegen, het zuidoosten van ons land stijgt daarbij ten opzichte van het noordwesten (zie figuur 6). De resultaten van de 5de nauwkeurigheidswaterpassing zullen dus niet alleen de actuele hoogteligging van ons land vastleggen, maar tevens een nauwkeurig en gevarieerd beeld kunnen gaan geven

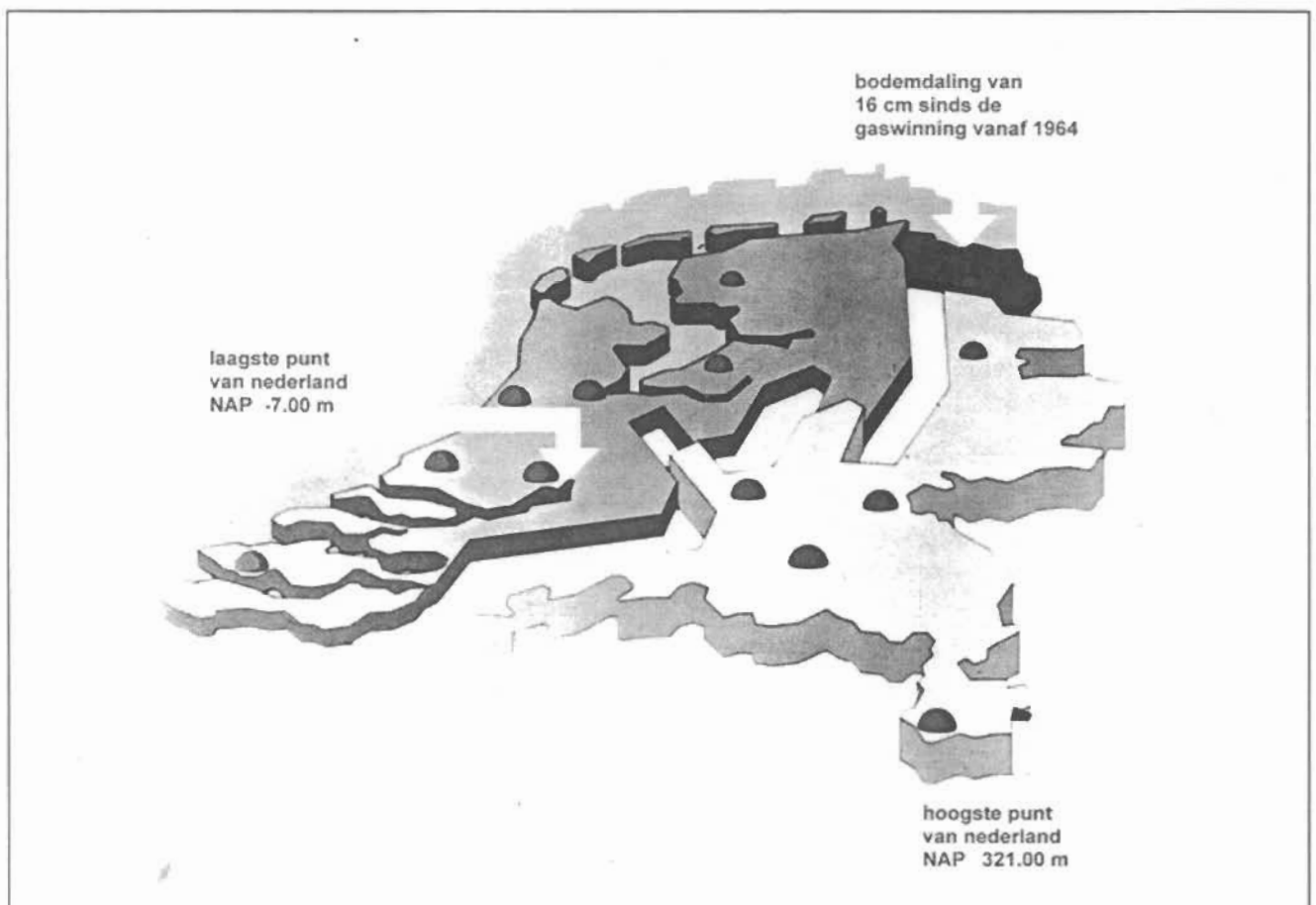
van de Nederlandse bodembeweging. Dit laatste is van groot belang om het NAP als hoogwaardig referentievlak te kunnen handhaven voor het gebruik bij de zeer nauwkeurige waterstandsmetingen.

AGRS EN LANDMEETKUNDE: SNELLE PLAATSBEPALING

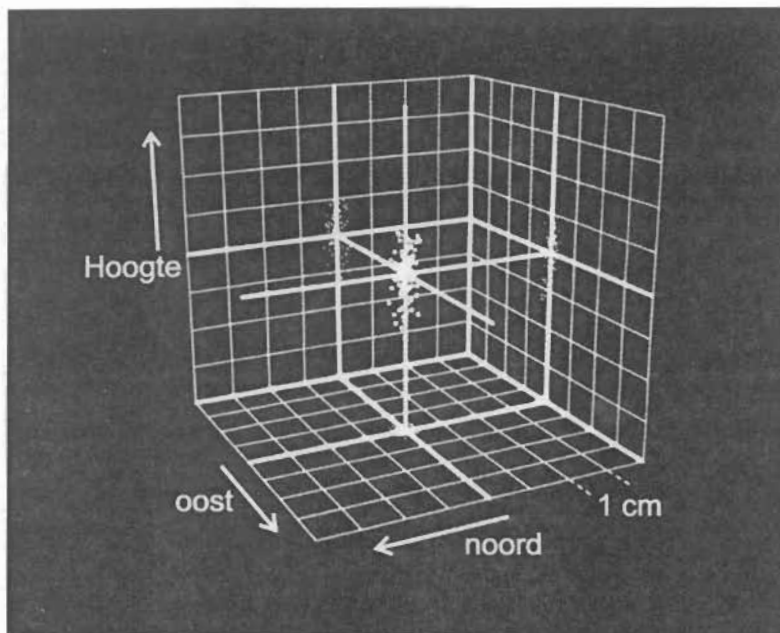
Behalve dat GPS specifiek wordt gebruikt voor de verticale plaatsbepaling, wordt GPS door Rijkswaterstaat ook op grote schaal voor meer algemeen landmeetkundige doeleinden toegepast. Zoals eerder aangegeven, is het gebruik van fasemetingen met meer dan één ontvanger een noodzakelijke voorwaarde voor nauwkeurige plaatsbepaling. Het is echter voor veel toepassingen, om redenen van kostenbesparing, tevens van belang dat de plaatsbepaling in een zo kort mogelijk tijdsbestek kan worden uitgevoerd. Om dit te realiseren, dienen weer speciale maatregelen getroffen te worden.

GPS-ontvangers zijn niet in staat volledige faseverschillen te meten. Zij kunnen slechts fractionele faseverschillen waarnemen. Dit betekent dan ook dat de fasemeting nog is behept met een onbekende fase-meerduidigheid. De fractionele fase geeft immers geen uitsluitel over het aantal gehele golflengten dat in de afstand van satelliet naar ontvanger past. Het is alsof men met een meetlat een afstand in millimeters meet zonder het gehele aantal centimeters te kennen.

Deze onbekende fase-meerduidigheden kunnen in principe met een voldoende nauwkeurigheid worden bepaald wanneer men een voldoende aantal satellieten over een voldoende lange periode waarneemt. De oorzaak hiervan is gelegen in de grote baanhoogte van de satellieten. Daardoor verandert de relatieve satellieten-ontvanger geometrie slechts langzaam in de tijd, zodat bij te korte waarnemingsperiodes de op te lossen stelsels vergelijkingen slecht geconditioneerd zijn, met als gevolg dat de ontvan-



FIGUUR 6: Het kantelen van Nederland om de zuidwest-noordoost-as.



Figuur 7: Driedimensionale weergave van herhaalde positiebepalingen (noord, oost, en hoogte), verkregen uit GPS-metingen. De beperkte spreiding van de punten geeft de hoge kwaliteit van het GPS als plaatsbepalingssysteem aan.

gercoördinaten en de fase-meerduidigheden niet voldoende nauwkeurig bepaald kunnen worden.

Verlenging van de waarnemingsperiode, zoals dat dan ook in het verleden werd toegepast, is hiertegen een voor de hand liggende remedie. Hiervoor heeft men echter niet de tijd als snelle plaatsbepaling is gewenst. De slechte geconditioneerdheid van het stelsel vergelijkingen kan echter sterk verbeterd worden als het geheeltallige karakter van de fase-meerduidigheden erin wordt verdisconteerd. Het ontbreken van strenge, efficiënte en dus ook snelle zoekmethoden voor het vinden van de juiste geheeltallige fase-meerduidigheden, heeft in het verleden echter een praktische toepassing van deze aanpak een geruime tijd in de weg gestaan.

Gelukkig is daar inmiddels verandering in gekomen en kunnen, onder andere door de aan de TU Delft ontwikkelde Lambda-methode [7], de onbekende fase-meerduidigheden nu wél snel worden bepaald.

Met het bepalen van de geheeltallige fase-meerduidigheden is nu nauwkeurige en directe plaatsbepaling mogelijk tot afstanden van zo'n 15 kilometer (zie figuur 7). Het is één van de huidige uitdagingen om deze maximale afstand te kunnen vergroten. En ook hier zal weer een beroep op het AGRS worden gedaan.

De reden waarom de geheeltallige waarden van de fase-meerduidigheden nog niet voldoende goed zijn te bepalen voor de zeer lange basislijnen, is gelegen in de atmosferische verstoringen. Voor lange basislijnen vertroebelen deze verstoringen het schattingsproces van de geheeltallige fase-meerduidigheden zodanig, dat met zeer korte waarnemingsperiodes nog onvoldoende betrouwbare resultaten verkregen kunnen worden.

Het is daarom nodig de gebruikers te velde te voorzien van informatie die hen in staat stelt hun data voor deze verstoringen te corrigeren. De aanpak die dan ook wordt voorgestaan, is om het permanent opererende AGRS te gebruiken als instrument voor het aanleveren van gebiedsbedekkende correcties voor deze verstoringen.

Tot slot een geheel andere toepassing van het AGRS. Zoals bekend is de waterdamp één van de belangrijkste samenstellende delen van onze atmosfeer. Nauwkeurige, dichte en frequente bemonstering van de waterdamp is daarom van belang voor klimatologisch onderzoek en voor de operationele weersvoorspelling. De traditionele wijze van waterdampmeting is gebaseerd op het gebruik van radiosondes en waterdampradiometers.

Deze technieken zijn echter nogal kostbaar en kennen daarnaast zo hun beperkingen. Hoewel met radiosondes een nauwkeurig profiel van de waterdamp is te bepalen, is de ruimtelijke en temporele resolutie laag. En terrestrische radiometers zijn slecht te gebruiken als het regent, terwijl zij, wanneer in de ruimte geplaatst, weer slecht te gebruiken zijn in de aanwezigheid van een wolkendek. Met de proliferatie van het all-weather GPS hebben meteorologen zich dan ook in toenemende mate geïnteresseerd getoond in de mogelijkheden die het systeem biedt voor waterdampsbepalingen.

Het principe van de GPS-waterdampmetingen luidt in het kort als volgt. Zoals eerder aangegeven, ondergaan de door de GPS-satellieten uitgezonden signalen een vertraging bij het doorlopen van de atmosfeer. Deze vertraging kan in drie componenten worden uitgesplitst. De eerste component wordt veroorzaakt door het geïoniseerde deel van de atmosfeer, de ionosfeer, die een ondergrens kent van 50 tot 200 kilometer en een bovengrens van 1000 tot 2000 kilometer. Daar de ionosfeer een dispersief medium is voor radiogolven, kan de ionosferische vertraging worden bepaald als de signalen, zoals dat met GPS het geval is, op twee verschillende frequenties worden uitgezonden. De ionosferische vertraging is bij benadering omgekeerd evenredig met het kwadraat van de signaalfrequentie.

Na eliminatie van de ionosferische vertraging blijven de twee overige vertragingcomponenten over. Deze worden veroorzaakt door de neutrale atmosfeer, vaak ook aangeduid als troposfeer. De dikte van de troposfeer is minder dan 9 kilometer boven de polen en meer dan 16 kilometer boven de equator. De troposferische vertraging hangt af van de refractie-index langs het looppad van het signaal en is daarmee dus afhankelijk van de droge en vochtige lucht langs dit looppad. De twee overblijvende componenten zijn dan ook de hydrostatische of 'droge' component en de 'natte' component.

Deze twee componenten zijn weer te scheiden doordat met behulp van temperatuur- en drukmetingen de 'droge' component nauwkeurig is te bepalen. Met de overblijvende 'natte' component kan dan ten slotte, na afbeelding op de lokale verticaal, de geïntegreerde waterdamp worden bepaald. Om tot een nauwkeurige waterdampsbepaling te komen, is het van belang dat van de meest precieze GPS-waarnemingen, de fasemetingen, gebruik kan worden gemaakt en dat de overige parameters in het model, zoals de positie-coördinaten van de ontvangers en de baanparameters van de satellieten, al voldoende bekend zijn. Daar dit met het AGRS het geval is, beschouwt het KNMI dit systeem nu als de meest geschikte GPS-infrastructuur voor het doen van GPS-waterdampmetingen in Nederland [8]. Daarmee is een verrassende toepassing van het AGRS gevonden, een die de auteur in zijn oorspronkelijke voorstel nog niet voor mogelijk had gehouden.

WOORD VAN DANK Niet zelden zitten bij complexe projecten vele jaren tussen de 'ideeëvorming' en 'realisatie'. Dat geldt ook voor het AGRS. Dat deze periode echter nog overzichtelijk is gebleven is zeker te danken aan de vele collegae, bestuurders en onderzoekers, die op enthousiaste wijze hebben meegewerkt aan de nieuwe ontwikkeling. De dank van de auteur gaat met name uit naar ir. R. Olierook en ir. E.J. Riedstra, voormalig en huidig Hoofd Ingenieur Directeur van de Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat en mr. J. Besemer, voorzitter van de Raad van Bestuur van het Kadaster. Beiden hebben het belang van het AGRS onderkend en de ontwikkeling ervan, samen met hun medewerkers, sterk ondersteund. Van de enthousiaste onderzoeksgroep moeten in het bijzonder worden genoemd dr.ir. H. van der Marel, de 'bouwer' zonder wie het huidige systeem nooit was gerealiseerd, en dr.ir. C. de Jong, die de monitoring en kwaliteitscontrole van de referentiestationen verzorgde.

Een korte geschiedenis van het RD en NAP

De eerste triangulatie van Nederland heeft in het begin van de 19de eeuw (1802-1811) plaatsgevonden. Dit gebeurde onder leiding van generaal Krayenhoff en had als doel de vervaardiging van de eerste topografische kaart. Vanaf 1885 werd een hernieuwde triangulatie uitgevoerd, onder leiding van professor Schols. Dit was ten behoeve van de kadastrale hermetingen en tevens om te kunnen voldoen aan de eisen van de Europese Graadmeting. De lengten en breedten van het 77 punten tellende eerste-orde net van deze triangulatie zijn via een vereffening op de ellipsoïde van Bessel berekend. Hieruit zijn de twee dimensionale RD coördinaten afgeleid in het vlak van de stereografische kaartprojectie, met als centraal punt de stang van de Lieve-Vrouwetoren in Amersfoort.

In opeenvolgende perioden is het eerste-orde net verder verdicht tot het niveau van de zogenaamde vierde-orde punten. Bij benadering zijn de onderlinge afstanden van eerste- tot vierde-orde punten respectievelijk, 30 km, 10 km, 4 km en 2 km. Met het operationeel worden van GPS is het RD-netwerk uitgebreid met punten die speciaal geschikt zijn voor het gebruik van GPS.

Deze punten hebben een onderlinge afstand van 10 à 15 km en zijn lokaal verbonden met de omliggende terrestrisch bepaalde RD-punten.

De eerste nauwkeurigheidswaterpassing van Nederland heeft in de periode 1875-1885 plaatsgevonden. Dit gebeurde onder leiding van professor Cohen Stuart en heeft in 1891 geleid tot de invoering van het Normaal Amsterdams Peil, dit ter onderscheiding van het 'Amsterdamsch Peil' wat omstreeks 1700 was bepaald als het niveau van de gemiddelde vloed op het Amsterdams IJ. Het referentievlak van het NAP wordt door een bout in een speciale funderingspaal onder het plaveisel op de Dam in Amsterdam gematerialiseerd.

De tweede nauwkeurigheidswaterpassing had plaats in de periode 1926-1940 en stond onder leiding van professor Schermerhorn. De hernieuwde waterpassing was noodzakelijk geworden vanwege zakking en het verloren gaan van peilmerken. Als remedie hiertegen is bij de tweede nauwkeurigheidswaterpassing dan ook besloten tot het plaatsen van granieten zuilen op stabiele ondergrond, de zogenaamde ondergrondse merken. Ter controle van deze peilmerken zijn later nog de derde (1950-1959) en de vierde (1965-1978) nauwkeurigheidswaterpassing uitgevoerd.

Inmiddels is men toegekomen aan de vijfde nauwkeurigheidswaterpassing, waarbij nu voor het eerst ook het GPS wordt ingeschakeld.

NOTEN

- 1 A. Kleusberg, P.J.G. Teunissen (1996): GPS for Geodesy, Earth Science Series, Springer Verlag, Vol. 60.
- 2 P.J.G. Teunissen (1991): De geodetische lijn. De Ingenieur, Orgaan van het Koninklijk Instituut van Ingenieurs, Vol. 103, No. 6/7, pp. 24-30.
- 3 P.J.G. Teunissen (1991): Kwaliteitszorg in geodetisch perspectief. NGT Geodesia, No. 12, 1991, pp. 526-530.
- 4 C. de Jong e.a. (1994): Een actief GPS-referentiesysteem in Nederland. Nederlandse Commissie voor Geodesie, GPS-nieuwsbrief, No. 9/1, 1994, pp. 1-18.
- 5 M. Hofman e.a. (1995): Actief GPS-referentiesysteem voor Nederland. NGT Geodesia, No. 5, 1995, pp. 227-230.
- 6 M.E.E. Haagmans e.a. (1996): Actief GPS-referentiesysteem voor Nederland - een tussentijdse stand van zaken. NGT Geodesia, No. 12, 1996, pp. 517-521.
- 7 P.J.G. Teunissen e.a. (1995): A new way to fix carrier-phase ambiguities. GPS-World, Vol. 6, No. 4, pp. 58-61.
- 8 H. Derks e.a. (1997): GPS water vapour meteorology. Scientific report WR 97-04, KNMI, De Bilt.