

Samen meten, beter weten

Voordrachten gehouden ter gelegenheid van de opening van
het Astrometrisch-Geodetisch Observatorium te Westerbork, 24 september 1999

L. Aardoom (redactie)

Nederlandse Commissie voor Geodesie

Delft, december 2000

Colofon

Samen meten, beter weten

Voordrachten gehouden ter gelegenheid van de opening van het Astrometrisch-Geodetisch Observatorium te Westerbork, 24 september 1999

L. Aardoom (redactie)

Nederlandse Commissie voor Geodesie 38

ISBN 90 6132 272 3

Uitgegeven door: Nederlandse Commissie voor Geodesie, Delft

Vormgeving en productie: Bureau Nederlandse Commissie voor Geodesie, Delft

Druk en bindwerk: Meinema Drukkerij, Delft

Omslag: Schema van een zeespiegelobservatiesysteem en de daarbij gebruikte meettechnieken, A.B. Smits, TU Delft

Bureau van de Nederlandse Commissie voor Geodesie

Bezoekadres: Thijsseweg 11, 2629 JA Delft

Postadres: Postbus 5030, 2600 GA Delft

Tel.: 015-278 28 19

Fax: 015-278 17 75

E-mail: ncg@geo.tudelft.nl

Website: www.ncg.knaw.nl

De Nederlandse Commissie voor Geodesie (NCG) is een instituut van de Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen (KNAW).

Inhoudsopgave

Voorwoord v

Prof.dr.ir. L. Aardoom

Preface vii

Prof.dr.ir. L. Aardoom

Welcome word 1

Prof.dr. H.R. Butcher

Astronomy applied to Land Surveying 2

Prof.dr.ir. M.J.M. Bogaerts

Astronomy, Geodesy and The Netherlands Geodetic Commission 4

Prof.dr.ir. P.J.G. Teunissen

VLBI – an astrometric technique with geodetic unknowns 8

Prof.dr. R.T. Schilizzi

Lengte, breedte en hoogte met satellieten 13

Prof.dr.ir. L. Aardoom

De hoogte, Rijkswaterstaat een zorg . . . 17

Ir. E.J. Riedstra

Het Astrometrisch-Geodetisch Observatorium

te Westerbork als fundamenteel referentiestation 21

Prof.dr.-Ing.habil. R. Klees

Aanhangsel 29

Bestuurlijke samenvatting van het rapport

'De wetenschappelijke rol van het astrometrisch-geodetisch observatorium te Westerbork.

Uitkomsten van een verkenning door de Taakgroep Geodetisch-Astronomisch Station Wes-

terbork'

Voorwoord

De inrichting van het Astrometrisch-Geodetisch Observatorium te Westerbork was een belangrijke stap naar een doeltreffender gebruik van geavanceerde sterrenkundige en geodetische meetapparatuur in Nederland. De geografische vereniging van deze apparatuur, ingegeven door een streven naar een doelmatiger gebruik van middelen aan de zijde van de Technische Universiteit Delft, bood mogelijkheden voor vernieuwend geodetisch en geodynamisch onderzoek en tot verbetering van de individuele meetprocessen. Een meer intensief gebruik van de buitenaardse ruimte, mogelijk gemaakt door kunstmatige satellieten, had de geodesie in een hernieuwde functionele relatie met de sterrenkunde gebracht. Deze nieuwe relatie komt voort uit het gezamenlijk gebruik van deze ruimte en van het meetplatform: de Aarde. De in Nederland in de Commissie voor Geodesie (NCG) bestaande lange traditie van samenspraak tussen beide vakgebieden vroeg om een gezamenlijke verkenning van de toegevoegde waarde die genoemde geografische vereniging van waarnemingsapparatuur in wetenschappelijk opzicht zou kunnen hebben. Dit bracht de Commissie in mei 1997 tot de instelling van een taakgroep om zo'n verkenning uit te voeren.

De taakgroep rapporteerde in november 1998 haar bevindingen inzake een uit te voeren wetenschappelijk beleid. Centraal in deze bevindingen staat de inzet van het observatorium voor mondiale geometrische verankering van Nederland, met de hoogtecomponent daarvan als primair punt van aandacht. In verband met een vermoedelijk voortgaande en mogelijk versnelde relatieve stijging van het Noordzeepil is deze component speciaal voor ons land actueel. Maar juist de hoogte is tot nu toe de minst nauwkeurig bepaalde component bij ruimtegeodetische plaatsbepaling. Aanscherping van de meet-, analyse- en interpretatieprocessen zou dus in de eerste plaats op de hoogte moeten worden gericht. Lange continue meetreeksen, zij aan zij, met de diverse technieken bieden hiertoe de beste mogelijkheden. Het programma van het observatorium moet daarbij aansluiting vinden bij mondiale inspanningen gericht op de vorming en instandhouding van geodetische referentiesystemen en -stelsels. Het parallelle gebruik van waarnemingstechnieken zal mede gericht moeten zijn op geodetische ondersteuning van het meet- en analyseproces bij de astronomische VLBI in het algemeen. Het observatorium zal een facilitaire rol vervullen bij gerelateerd onderzoek via de ruimte, bijvoorbeeld van de dampkring, die als parameter optreedt in de ruimtemetingen vanaf de aarde. Een belangrijk aspect van de vereniging van de instrumenten is dat zij de mensen die er mee werken samenbrengt en daarmee de kennis die zij bezitten. De integratie van die kennis belooft een grote meerwaarde.

24 september 1999 werd gekozen als datum voor de officiële inwijding van het observatorium. De partners hierin - de Stichting Astronomisch Onderzoek Nederland (ASTRON), de Stichting Joint Institute for VLBI in Europe (JIVE), de Technische Universiteit Delft (TUD) en de Meetkundige Dienst van de Rijkswaterstaat (MD) - besloten deze gelegenheid niet ongemerkt voorbij te laten gaan en belegden in de hoofdvesting van ASTRON te Dwingeloo een symposium met sprekers die de diverse aspecten van de voorziene samenwerking belichtten. Aansluitend aan dit symposium tekenden de partners een overeenkomst ter opstelling van een wetenschappelijk programma volgens de lijnen door de taakgroep uitgestippeld. Het zakelijk gedeelte van de dag, die ongeveer 60 belangstellenden trok, werd afgesloten met een bezoek aan het observatorium te Westerbork.

De voordrachten op het symposium gehouden, zijn hierna onverkort weergegeven, deels in het Nederlands, deels in het Engels. Prof.dr. H.R. Butcher en prof.dr.ir. M.J.M. Bogaerts belichten de plannen van bestuurlijke zijde namens ASTRON, respectievelijk de TUD. Prof.dr.ir. P.J.G. Teunissen memoreert de traditionele samenwerking tussen sterrenkundigen en geodeten, in het bijzonder in NCG-verband. Prof.dr. R.T. Schilizzi geeft een exposé over VLBI. Prof.dr.ir. L. Aardoom blikt terug op de geschiedenis van de satellietgeodesie. Ir. E.J. Riedstra presenteert het NAP in relatie tot het observatorium. Prof.dr.-Ing.habil. R. Klees gaat in op het voorgenomen wetenschappelijk programma van het observatorium.

Een bestuurlijke samenvatting van het verslag van de taakgroep is als aanhangsel aan de voorliggende 'proceedings' van het symposium toegevoegd.

De heer F.H. Schröder verzamelde het materiaal, maakte het gereed voor publicatie en zorgde voor de vormgeving van deze 'proceedings'.

L. Aardoom,
redactie

Preface

The installation of the Westerbork Astrometric-Geodetic Observatory was an important step to a more effective use of advanced astronomic and geodetic equipment in The Netherlands. The geographic junction uniting this equipment, prompted by a strive for a more efficient spending of funds on behalf of the Delft University of Technology, offered possibilities of renewed geodetic and geodynamic research and of improvement of the individual measurement techniques. A more intensive use of extra-terrestrial space, enabled by artificial satellites, had brought geodesy in a renewed functional relationship to astronomy. This new relationship emanates from the joint utilization of space and of the platform of measurement: the Earth. The long standing tradition of dialogue between both sciences in the Netherlands Geodetic Commission (NCG) called for a joint exploration of the added value the geographic junction of equipment as mentioned could have scientifically. In May 1997 this led the Commission to setting up a taskforce to perform such exploration.

In November 1998 the taskforce reported its findings as regards a scientific policy to follow. The deployment of the observatory for geometric anchoring of The Netherlands in a global context with emphasis on the height component involved is the central item of these findings. Noting the probably ongoing and possibly increasing rate of relative rise of the North Sea level, this component is presently particularly important to our country. It is precisely the height component however, which has up till now been determined least accurate in space geodetic positioning. Improvement of the measuring, analysis and interpretation procedures should therefore primarily focus on height. Long continuous datarecords, acquired side-by-side from the individual techniques offer the best possibilities in this respect. The observatory's programme should meanwhile be associated with global efforts to establish and maintain geodetic reference systems and frames. The parallel application of observing techniques will also provide geodetic support to the measurement and analysis procedures of astronomic VLBI in general. The observatory will support related investigations in space, e.g. of the atmosphere, which interferes in Earth based space measurements. An important aspect of the junction of instrumentation is that it brings together the people who work with the instruments and with them the knowledge they have. The integration of that knowledge promises a great deal of added value.

September 24, 1999 was the date of the official inauguration of the observatory. Partners - the Foundations of Astronomisch Onderzoek Nederland (ASTRON) and of the Joint Institute for VLBI in Europe (JIVE), the Delft University of Technology (TUD) and the Meetkundige Dienst van de Rijkswaterstaat (MD) - decided that this occasion should not pass unnoticed and they convened a symposium at the main office of ASTRON at Dwingeloo, inviting speakers to talk on various aspects of the co-operation as foreseen. After this symposium partners were to sign an agreement to work out a scientific programme along the lines traced out by the taskforce. The formal part of the convention, which attracted about 60 participants, was concluded by a visit to the observatory at Westerbork.

The lectures presented at the symposium are reproduced hereafter, partly in Dutch, partly in English. Prof.Dr. H.R. Butcher and Prof.Dr.ir. M.J.M. Bogaerts touch upon the plans from the management points of view on behalf of ASTRON and TUD, respectively. Prof.Dr.Ir. P.J.G. Teunissen memorize de traditional co-operation between astronomers and geode-

sists, in NCG-circles in particular. Prof.Dr. R.T. Schilizzi gives an outline of VLBI. Prof.Dr.Ir. L. Aardoom reviews the history of satellite geodesy. Ir. E.J. Riedstra presents the NAP height system as related to the observatory. Prof.Dr.-Ing.habil. R. Klees elaborates on the planned scientific programme of the observatory.

An executive summary (in Dutch) of the taskforce's report is appended to the present symposium proceedings.

Mr. F.H. Schröder collected the material, prepared it for publication and took care of the layout of these proceedings.

L. Aardoom

Welcome word

Prof.dr. H.R. Butcher
Executive Director - Algemeen Directeur ASTRON

Ladies and Gentlemen

On behalf of the astronomical community in general and of the ASTRON Institute in particular, it is a pleasure to welcome you here today, to be able to host this opening ceremony for the Astrometric-Geodetic Observatorium Westerbork.

For ASTRON, this new facility represents an appropriate extension of our service and support role in Dutch science generally. But it also promises involvement in another kind of science, that at least in principle has much relevance to our main activity, radio astronomy.

I have understood that the move of the geodetic activities from Kootwijk to Westerbork was motivated initially by financial problems. We are of course familiar with such problems and are only too glad to lend a helping hand.

But there is a natural relation generally between astronomy and the geo-sciences, and in particular between interferometric radio astronomy, VLBI, and geodesy. That is, on the one hand we all rely to a great extent on the techniques of remote sensing to study of the world around us. On the other, to make the highest quality pictures of the heavens we astronomers need to know to great precision where our telescopes are, while in turn, geodesists need those positions as a check on their several other methods of determining precise positions and as an absolute datum over the longest distances across the Earth's surface.

Bringing our two activities together in one location, therefore, can in principle mean more than pretty words, more than a reaction to unfortunate circumstances. If in the coming months and years we directors and committee chairmen do our jobs well, if we take steps to bring not only our facilities together but also our two communities, both programs should be significantly strengthened by what we are doing here today.

While our sciences have much in common operationally, geodesy is a particularly practical activity, relevant to every day life. Astronomy on the other hand is one of the least directly useful of the hard sciences, and the geodetic program in Westerbork will bring a new dimension to our interaction with the wider society. We do not see exactly where this new road will take us, but we are very curious to explore it nevertheless. Maybe we can even use it to make astronomy seem more relevant to society generally.

You will note on the program for today that after the speeches, there is a tour of the JIVE facilities. I hope you will also take the time to walk around the rest of our building. We have a strong technical team at ASTRON and a well-equipped technical laboratory, not only in advanced electronics and integrated circuit development but also in optical and mechanical design and prototyping capabilities. We would hope that as this new scientific cooperation gathers momentum, the collaboration can also be extended to include joint development of advanced instrumentation.

On that note, let me repeat my word of welcome, and let me wish us all an interesting day today and a profitable collaboration in the years to come.

Astronomy applied to Land Surveying

Prof.dr.ir. M.J.M. Bogaerts

Chairman Department of Geodesy, TU Delft - voorzitter Afdeling Geodesie, TU Delft

A number of years ago IBM, the large computer company, decided to pay attention to academic education and research. Probable the idea behind this initiative was that the students of today are the clients of tomorrow. For this purpose an organization was established in London, which duty it was to establish study-contracts with universities. Therefore an investigation was carried out to find out which sciences and disciplines are outstanding performers in the different European countries. From every country three disciplines were selected. For the Netherlands these were agriculture, astronomy and geodesy. I have no idea what this investigation has brought the other branches of science. It gave us the possibility to change the old fashioned cartographic laboratory into a modern, well-equipped GIS-center. I am mentioning this fact, because today we are dealing with a combination of two of the disciplines that are doing very well in the eyes of outsiders. The possible synergy of this combination is a very promising one.

After all the co-operation between astronomy and geodesy is not something new. When I was invited to give a short introduction on this Seminar I was also asked for a title. The first thing that came to my mind was 'Astronomy applied to Land Surveying'. This is the title of a book that played an important role in our geodetic education. The lessons of Prof. Roelofs were accompanied by practical exercises. The basic knowledge that a land-surveyor should have of astronomy was the following.

In principal all land-surveying measurements are related to the national co-ordinate system. To carry out a survey the availability of co-ordinates on the spot is a necessity. Nowadays, with the availability of GPS, it is not a problem anymore. In the past - when there were no satellites circling around the earth - we had to locate our position by means of co-ordinates of a number of church-towers divided over the horizon. These so-called 'Snellius-points' could not always be measured, e.g. on the moorland of Dwingeloo you will probably not see any church-tower around.

In such a case the land-surveyor could reach the same result by measuring the directions to a number of stars of which the position is known in co-ordinates. Therefore our practical exercises had to be carried out during the night, preferably in the winter with a clear starry sky. In my memory it was always freezing during these exercises. Our teacher kept us moving with coffee mixed with so much cognac that the precision of the measurements was not too high. The effect was that we had a positive feeling towards astronomy. A new element of this survey was that we measured on moving objects and that our observations were in fact time-measurements.

One other technique, which was used by land-surveyors, was the measurement of a polygon that had to be closed at the beginning and at the end with a measurement of the direction to a far away point, known in co-ordinates. Because again church-towers were involved, which are not always available or visible, the alternative was to aim at the sun. At that time mylar for eclipse-glasses was not invented yet. So the only protection came from a

piece of coloured glass. Therefore I take it for granted that many land-surveyors have eye-damages.

These practical exercises had a strange outcome. The exercises on the roof of the old building of Geodesy (Kanaalweg 4, Delft) could not be carried out, because we were too much hindered by the indirect lighting of the city. For that reason the new building of Geodesy (Thijsseweg 11, Delft) was situated as far away as possible from the city of Delft at the far end of the campus.

So in fact both locations of our Department of Geodesy in Delft and in Westerbork are strongly influenced by Astronomy.

With the development of Satellite Geodesy the necessity for geodesists to make use of Astronomy in a traditional way became less and less important. Nevertheless there have also been interfaces between these two sciences, e.g. the Hipparcos Project of ESA and our activities in the field of Very Long Baseline Interferometry (VLBI). The purpose of the Hipparcos Project was the calculation of the co-ordinates of a large number of stars.

One of our excellent geodesists made his Ph.D. thesis on VLBI. This theme comes back in our joint programme.

The location of our present building in Delft is not ideal either. It is true that the indirect lighting did not influence the work anymore. Unfortunately now we have problems with vibrations. On one side of our building the highway to Rotterdam is situated and on the other side Delft Hydraulics that is causing sometimes enormous vibrations. For these reasons the present location is not vibration-proof at all. To carry out research in the field of Satellite Geodesy a new building was created in Kootwijk. As time went by this laboratory, which was a showpiece of our research programme, turned out to have more and more disadvantages. Without going to deep into the problems, the financial situation for our small department became pressing, whereas a number of researchers had to carry out their work too isolated.

The solution was to bring back a part of the activities to Delft and to move the remaining part to Westerbork. We hope that these combinations will influence the future of Space Geodesy in a positive way. I have high expectations for the programme, which has been prepared by a task group of the Netherlands Geodetic Commission. Other speakers will discuss this programme more in detail. I like to conclude with special thanks to the members of the board of ASTRON and JIVE for the fascinating opportunities that they provided for the further development of Space Geodesy in the Netherlands.

Astronomy, Geodesy and The Netherlands Geodetic Commission

Prof.dr.ir. P.J.G. Teunissen

Chairman Netherlands Geodetic Commission - voorzitter Nederlandse Commissie voor Geodesie

Summary

Historically astronomy and geodesy have much in common. Both face the problem of finding unique and optimum numerical solutions for unknown quantities from redundant observations. In the 18th century several procedures for solving this adjustment problem were presented, notably: T. Mayer's method of averages, R.J. Boscovich's method of least absolute deviations and A.-M. Legendre's method of least squares. Legendre's approach became the standard adjustment tool among European astronomers and geodesists. In The Netherlands common interests brought Dutch astronomers and geodesists in 1879 together in the then established Netherlands Geodetic Commission. Outstanding Dutch astronomers had always a prominent role in the activities of the Commission. The use of artificial satellites in geodesy and the development of radio-astronomy caused profound changes in both fields of science, changes which brought about an even closer co-operation. The establishment of the Westerbork Astrometric-Geodetic Observatory opens up new opportunities for tackling problems to-day's astronomers and geodesists are faced with. (red.)

Astronomy and Geodesy at the roots of statistics

Astronomy and geodesy are always bracketed together in studies on the early history of mathematical statistics¹. In fact, the first methods of combining redundant measurements originate from three major problems in geodesy and astronomy, namely to determine the size and shape of the Earth, to explain the long-term inequality in the motions of Jupiter and Saturn, and to find a mathematical representation of the motions of the Moon. The two main reasons for performing redundant measurements are the wish to increase the accuracy of the results computed and the requirement to be able to check for errors. However, due to the intrinsic uncertainty in measurements, measurement redundancy generally leads to an inconsistent system of equations. Without additional criteria, such a system of equations is not uniquely solvable. In the middle of the 18th century, this adjustment problem had attracted the attention of many leading scientists, from both astronomy and geodesy.

The first scientist who formulated a solution to the adjustment problem was the astronomer Tobias Mayer (1723-1762). Mayer made numerous observations of the Moon with the purpose of determining the characteristics of the Moon's orbit. In 1750 Mayer proposed a new method for adjusting his lunar data. Given a set of m equations in n unknowns, Mayer proposed to separate the m equations in n groups, followed by a group wise averaging. Mayer's *method of averages* soon became popular, since it used all observations and was very simple to apply.

The first adjustment method that made use of an objective criterion is due to the geodesist Roger Joseph Boscovich (1711-1787). He proposed in 1757 to solve the inconsistent system of equations by minimizing the sum of absolute residuals. Boscovich applied his method,

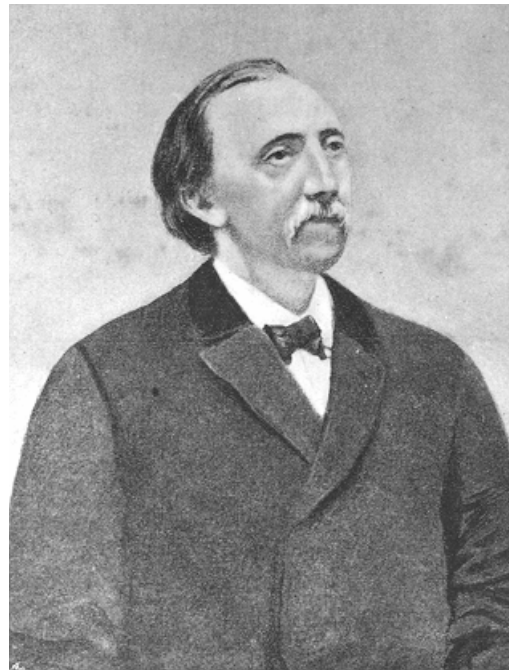
now known as the *method of least absolute deviations* or L_1 -adjustment, to the data of French and Italian arc measurements. Since the method was difficult to apply at that time, it never reached the same level of popularity as Mayer's method. In the second half of the 20th century however, the method gained in popularity due to its property of being resistant (robust) to outliers.

The most popular adjustment method is due to Adrien-Marie Legendre (1752-1833). Legendre's *method of least squares* solves an inconsistent system of equations by minimizing the sum of squares of the residuals. Legendre, who worked on many astronomical and geodetic projects, proposed his method in 1805 and applied it to the geodetic measurements of the French meridian arc from Barcelona to Dunkirk (1795). These measurements formed the basis of the metric system, whereby the meter was defined as 10^{-7} times the length of the terrestrial meridian quadrant through Paris at mean sea level. Legendre's method met with almost immediate success. His method used all the observations, had an objective criterion and most importantly, resulted in a solvable linear system of equations. Within ten years after Legendre's publication, the method of least-squares became a standard tool in astronomy and geodesy in various European countries.

Astronomy and Geodesy at the roots of the NCG

The above brief account on the history of adjustment theory, is one example of the many research topics that astronomy and geodesy share of old. Other examples are the minute execution of astronomical measurements and the continuous struggle of limiting the effects of atmospheric refraction. It is these and other areas of mutual interest that often made astronomers and geodesists pull together. It is therefore not surprising that astronomers from various Dutch research institutes (e.g. Leiden, Utrecht and Groningen) have been members of the Netherlands Geodetic Commission (NCG) from the moment the commission was set up².

Following the advise of the Royal Netherlands Academy of Sciences (KNAW), the Netherlands Geodetic Commission was set up by Royal Decree of 20th February 1879. Prof.Dr. F.J. Stamkart, at that time responsible for the Dutch contribution to the European arc-measurements, became the Commission's first President. The other members were: Prof.Dr. J. Bosscha, professor of physics at the Polytechnical School, the forerunner of the present Delft University of Technology (DUT), Prof.Dr. J.A.C. Oudemans, director of the Utrecht Observatory, Prof.Dr. H.G. van de Sande Bakhuyzen, director of the Leiden Observatory and Dr. G. van Diesen, senior engineer of the Department of Public Works. The Royal Decree defined the duties of the Commission as follows: to continue and complete the triangulation measurements on behalf of the European arc-measurements; to continue and complete the precise levelling network; to coordinate the work for these two surveys. The work of the commission was



Prof.Dr. H.G. van de Sande Bakhuyzen.

divided among its members as follows: triangulation, Stamkart and Oudemans, astronomical measurements, Van de Sande Bakhuyzen and Oudemans, and levelling, Van de Sande Bakhuyzen and Van Diesen³.

The success of the Commission in this early period is in a large part due to the work of Van de Sande Bakhuyzen. He succeeded Stamkart in 1882 as President and led the Commission until his death in 1923. For over forty years he led the Commission with great ability and took an active part in several of its scientific projects. These projects were concerned with primary and first order levelling as well as with geodetic-astronomical measurements. He contributed significantly to the European arc-measurement through his astronomical longitude-, latitude-, and azimuth determinations, which were also connected to the primary triangulation of the Netherlands. Apart from his work as President of the Commission, he was also active internationally. From 1900 to the end of 1916, he was Secretary General of the International Association of Geodesy (IAG) and from 1916 onwards, he held the same high office at the Reduced Geodetic Association of Neutral Nations, which was set up to continue the geodetic and astronomical measurements during the 1st World War.

If we view the complete 120-year period of the Commission's existence, we come to the conclusion that geodetic-astronomical measurements played a prominent role in the Commission's work, especially in the time frame preceding the 1970s. Some typical and important examples hereof are:

- The above mentioned longitude-, latitude-, and azimuth measurements (end of the 19th century).
- Astronomical measurements contributing to the international research on Earth rotation (beginning of the 20th century).
- Measurement of Laplace stations for the re-adjustment of the European triangulation network (shortly after the 2nd World War).
- With reference to the International Geophysical Year (1957), the development of a geodetic-astronomical observatory in Curaçao.
- Measurement of the deflections of the vertical for the purpose of geoid determination with Vening Meinesz' integral (1974-1977).

The traditional ties between astronomy and geodesy changed with the advent and operationalization of satellite geodesy. Instead of relying on astronomical direction measurements, geodesists started to make an increasing use of artificial satellites. First spatial triangulation by means of photographic satellite tracking, then spatial trilateration by means of satellite laser ranging, which finally was followed by the use of 'active' satellites for precise positioning, first based on the Transit Doppler System, but nowadays very successfully based on the Global Positioning System. Despite the adoption of these new measurement techniques, the co-operation in the Netherlands between astronomers and geodesists continued. Although the co-operation was perhaps not as frequent as before, important examples can be given of the continued co-operation between the two sciences. One example is the geodetic usage of Very Long Baseline Interferometry (VLBI), a measurement technique originally developed for radioastronomy. Another example is the contribution of Dutch geodesists and astronomers to the astrometric satellite mission *Hipparcos* of the European Space Agency (ESA). And a third example is the joint organisation of two successful international scientific symposia on atmospheric refraction⁴.

Astronomy and Geodesy reunited at the Westerbork Observatory

With the recent transfer of DUT's space geodetic measurement equipment from Kootwijk to the astronomical observatory in Westerbork, a new opportunity has arisen to strengthen the traditional ties between the Dutch astronomers and geodesists. In order to take this opportunity, the NCG felt it necessary - in accordance with its tradition - to take the initiative of exploring the scientific added value of this unification. To that end, the NCG established the taskforce 'Geodetic-Astronomical Station Westerbork' under the leadership of Prof. Aardoom. This taskforce was given the task to draw up a first plan showing how the surplus value, of having the astronomical and geodetic measurement techniques united at the same geographic location, could be employed for the benefit of both sciences⁵. Although the proposals of the taskforce will need further elaboration and execution, it has already become clear to all parties concerned that the scientific infrastructure now available at Westerbork indeed provides for important new challenges and opportunities. It is therefore now up to the scientific groups involved, to take these opportunities and to formulate concrete scientific projects that make use of this unique infrastructure as well as of the combined astronomical and geodetic expertise. In closing, the NCG sincerely thanks Prof. Aardoom and all the taskforce members for a job well done and expresses the wish that the scientific joint venture initiated by the taskforce may be successfully continued.

¹ P.J.G. Teunissen (2000): 'A brief account on the early history of adjusting geodetic and astronomical observations'. *De Hollandse Cirkel*, 2(1/2), 12-17.

² Astronomers that were or are member of the NCG (in alphabetical order): Prof.Dr. W.N. Brouw (1976-1991), Prof.Dr. W. de Sitter (1923-1934), Dr. G. van Herk (1952-1958, 1963-1973), Prof.Dr. J.C. Kapteyn (1907-1915), Prof.Dr. A.A. Nijland (1915-1936), Prof.Dr. J.H. Oort (1937-1969), Prof.Dr. J.A.C. Oudemans (1879-1906), Prof.Dr. R.T. Schilizzi (1997-present) and Prof.Dr. H.G. van de Sande Bakhuyzen (1879-1923).

³ For this presentation the author made a liberal use of the excellent paper: 'History of the Netherlands Geodetic Commission' by N. van der Schaaf, published in '*The Centenary of the Netherlands Geodetic Commission*' (Editor: N. van der Schaaf), 1979, pp. 51-129.

⁴ *Electromagnetic Distance Measurement and the Influence of Refraction* (1977), P. Richardus (ed.), Publications on Geodesy, Green Series, No. 21, and *Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy* (1992), J.C. de Munck and T.A.TH. Spoelstra (eds.), Publications on Geodesy, New Series, No. 36.

⁵ *De wetenschappelijke rol van het astrometrisch-geodetisch observatorium Westerbork* (The scientific role of the astrometric-geodetic observatory Westerbork), Uitkomsten van een verkenning door de Taakgroep Geodetisch-Astronomisch Station Westerbork van de Nederlandse Commissie voor Geodesie, Delft, 2 november 1998.

VLBI – an astrometric technique with geodetic unknowns

Prof.dr. R.T. Schilizzi
Director - directeur Joint Institute for VLBI in Europe

Summary

In Very Long Baseline Interferometry (VLBI) co-observing radio telescopes are separated by such large distances that they cannot be connected by cable or microwave link. The magnetic tapes on which the telescope signals were recorded are transported to a central computer where the 'interference' is generated off-line. This 'correlation'-process requires a model in which astronomic and geodetic parameters interact. The European VLBI Network (EVN), controlling 16 telescopes, is one of three regional VLBI-arrays in the world. The Westerbork Synthesis Radio Telescope is a major instrument in the EVN. The Joint Institute for VLBI in Europe (JIVE) is the central research institute for the EVN. Focussing on the structure of radio sources, VLBI was invented for astronomy. The detailed description of the relative geometry of the radio sources and the telescopes by astrometric and geodetic parameters in the correlation model is the basis for a promising co-operation between the two disciplines. This underlines the importance of the Westerbork Astrometric-Geodetic Observatory. (red.)

Let me start by saying that I remember a meeting in Delft organised by Frits Brouwer in 1981, and supported by the Netherlands Geodetic Commission, where the possibilities of VLBI for geodesy in this country were discussed. Clearly we needed some time to let the idea mature, so it is with great delight that I take part in this ceremony today to celebrate the opening of the Westerbork Astrometric-Geodetic Observatory as representative of one of the partners, the Joint Institute for VLBI in Europe. My remarks today are aimed at giving you a broad brush view of VLBI in Europe from the astronomers point of view, with a few examples of the scientific results that can be achieved.

VLBI

A radio interferometer is an analogue of the Michelson optical interferometer in which the signals from a cosmic radio source detected by radio telescopes separated by tens of metres to tens of thousands of kilometres are allowed to interfere with each other to provide information on the structure and position of the radio source. A very long baseline interferometer is one in which the radio telescopes are separated by such large distances that it is no longer feasible to connect the

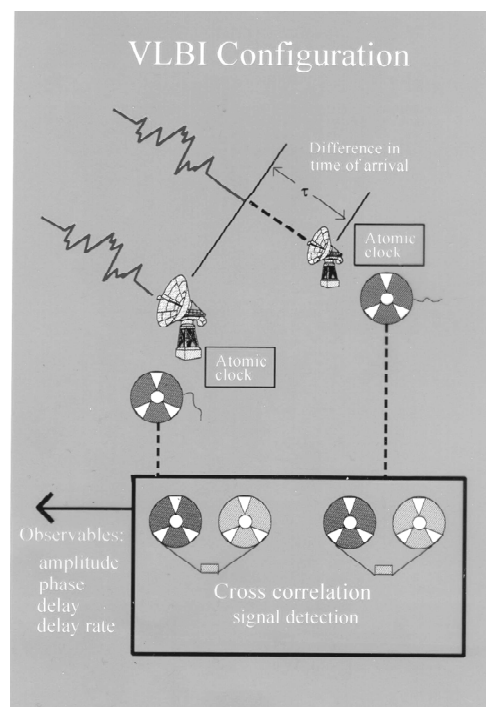


Figure 1. Major elements of a VLBI configuration.

telescopes by cable or microwave link. In this case, the signals are recorded on special purpose magnetic tapes and transported to a central location where the 'interference' takes place. During the interference process the signals replayed from the tapes are pair-wise multiplied together in a special purpose super-computer to search for correlations which indicate that there is compact structure in the radio source. During correlation, a model of the interferometer system including the positions of the radio telescopes and the orientation parameters of the Earth, is used to reduce the frequency of the interference fringes to close to zero to allow the correlated signal to be integrated. The construction of the model is where the astronomical and geodetic disciplines interact; it is an astronomical technique with geodetic unknowns. A VLBI interferometer is shown schematically in figure 1.

The combination of simultaneous observations made by a widespread network of radio telescopes generates images of cosmic radio sources with a detail which would otherwise only be achievable by a hypothetical single telescope of continental, intercontinental, or greater dimensions. The importance of VLBI to astronomy and astrometry lies in the extremely high angular resolving power achieved which is unequalled by measurements in any other part of the electromagnetic spectrum.

The European VLBI Network

Radio telescopes spread over the globe take part in VLBI observations (figure 2). Three regional arrays make astronomical observations, the European VLBI Network (EVN), the Very Long Baseline Array (VLBA) in the USA, and the Asia Pacific Telescope (APT) involving telescopes in Australia, Japan, and China. Most VLBI observations in Europe are carried out by the European VLBI Network (EVN) which was formed in 1980 by a consortium of five of the major radio astronomy institutes in Europe. Since then, the EVN and the Consortium has grown to include 14 institutes who, between them, control 16 telescopes in Finland, France, Germany, Italy, the Netherlands, Spain, Sweden, the UK, Poland, Ukraine and China. Together, these individual centres form a distributed large-scale facility, a continent-wide radio telescope.

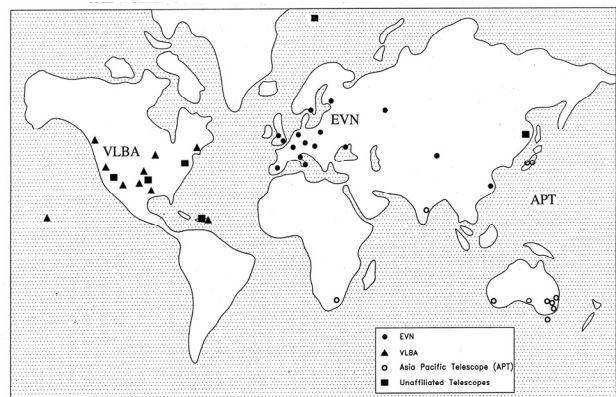


Figure 2. The world of Very Long Baseline Interferometry.

The Westerbork Synthesis Radio Telescope operated by ASTRON is one of the most important telescopes in the EVN because of its large collecting area and flexible receiver system. The EVN actually includes three of the world's largest radio telescopes which, together with the recent implementation of a new, wide-band recording system at all telescopes in the network, provides the most sensitive VLBI network in the world. Geodetic observations in Europe are made with networks consisting partly of astronomy telescopes including EVN telescopes and partly of special purpose geodetic VLBI telescopes.

Interferometers can also be created with radio telescopes in Earth orbit working in concert with the ground arrays. Figure 3 shows schematically the HALCA radio telescope launched by Japan in February 1997. The combination generates interferometer baselines up to 30000 km long, three times longer than on the ground alone, resulting in images with angu-

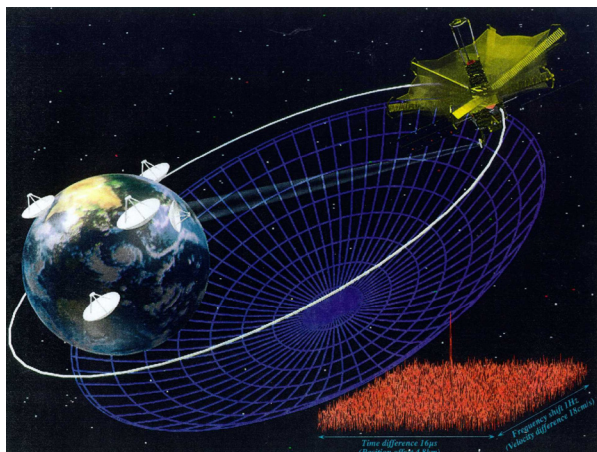


Figure 3. The HALCA space radio telescope.

to Hubble Space Telescope) to less than one milli-arcsec. When the EVN combines with the US Very Long Baseline Array for 'global' observations, resolutions approaching 100 micro-arcsec are achieved.

Correlation takes place in centres like the Joint Institute for VLBI in Europe (JIVE), the central institute for the EVN. JIVE operates a 16-station data processor (figure 4), and provides support for the operation of the EVN as well as for individual users of the network. Correlator operation began in September 1999. JIVE is associated with the International VLBI Service (IVS) that provides geodetic and Earth orientation data to users, but does not play an active role at the moment. On the other hand, the first astrometric observations have recently been correlated at JIVE.



Figure 4. Data processor at JIVE.

lar resolutions of 0.25 milli-arcseconds. The position of the radio telescope in space is known to an accuracy of ~2 metres which makes it unsuitable for geodetic work, but in some circumstances it is useful for relative astrometric measurements.

In general, the more telescopes in the VLBI network the better the image quality; the regular combination of data from the 7-element Jodrell Bank MERLIN array in the UK with the EVN gives an unequalled range in resolution from about 0.1 arc seconds (comparable

Astronomy

An example of the sort of image of a radio source that can be made with a VLB interferometer is given in figure 5 (top). Here the radio emission in the very centre of a distant radio galaxy, called 3C236, is shown. This is the largest radio source ever found in the universe. It is 39 minutes of arc across as measured by Westerbork (figure 5 right). At a distance from the Earth of 1.3 billion light years, this apparent size is equivalent to a physical size of 12 million light years. For comparison, the Moon has a similar size as seen from the Earth, but is a factor of 4×10^{16} smaller in physical size. The radio source measured by Westerbork is far larger than the optical galaxy and is probably 100 million years old. The bright central radio component in figure 5 (right) shows where you would find the optical galaxy if you took an astronomical photograph.

Figure 5 (top) shows a VLBI image of the central component of the source structure on a scale 2400 times smaller than the Westerbork image and made with a combined European and US array of 18 telescopes. The level of detail now seen allows us for the first time to study features of the radio structure close to the central black hole, located in the brightest

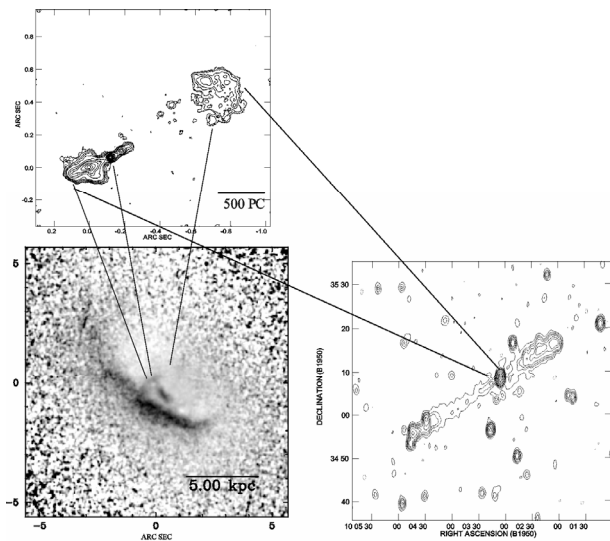


Figure 5. Radio and optical images of the galaxy, 3C236.

parameters affecting the positions of the telescopes on the Earth's surface (see the cartoon sketch in figure 6). Clearly the Earth is not a very stable platform from which to conduct precise measurements of radio source positions, but one man's noise is another man's signal and that is what makes VLBI measurements of quasars at the edge of the universe an attractive technique for geodesists.

Some of the more important effects to be modelled include precession, nutation, aberration, gravitational deflections by the Sun and Earth, rate of rotation of the Earth, polar motion, solid Earth tides, ocean loading, atmospheric loading, crustal motion, plate tectonics, tropospheric and ionospheric effects, source structure, and instrumental effects. But other speakers today will go into these in more detail in discussing the contribution of VLBI to precise measurements of the rate of rotation of the Earth and the terrestrial reference frame amongst other topics.

VLBI plays an important role in astrometry because it provides the most precise measurement of celestial positions of any technique. The most important applications can be found in the definition of the Celestial Reference Frame; measurement of the proper motions and parallax of radio stars, pulsars, OH, H₂O, and SiO masers; determination of binary star orbits and the search for planets; precise determination of the distance to the centre of our Galaxy using trigonometric parallax measurements; and measurements of, or limits to, transverse motions of galaxies and quasars.

component in the middle of the complex in the lower part of the image. The figure on the bottom left shows an absorption model of the dust in the nucleus of 3C236 based on measurements with the Hubble Space Telescope. Here we can see a dust ring at an angle of 60° to the direction of the source, which probably forms the outer part of a rotating accretion disk around the black hole in the centre of the galaxy.

Astrometry and Geodesy

For most astronomers, making images occurs without having to think about the correlation process in detail. But for astrometry and geodesy, the science is in the details of the correlator model describing the radio source position and all the geophysical

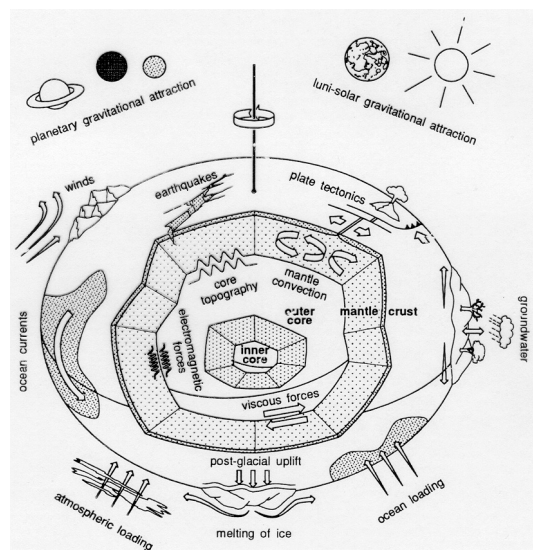


Figure 6. Geophysical parameters affecting the positions of radio telescopes.

Figure 7 shows a series of measurements over 4 years by van Langevelde, Vlemmings et al (2000) of the motion of a giant star called U Herculis. These were made by observing the change in the positions of OH masers in a shell around the star with respect to a nearby calibrator source whose position is accurately known. The proper motions are consistent with those measured with the Hipparcos astrometry satellite operated by ESA in the 1980s. The VLBI measurements are in the process of defining the parallax and through this, the distance to the star, something that eluded Hipparcos because the star is too faint in optical light. A number of similar stars are on the VLBI program and with precise measurements of their distances, astronomers will be able to determine their physical rather than their observed characteristics.

The combination of geodetic and astronomical interests in the Westerbork Astrometric-Geodetic Observatory promises to be a source of fascinating cross-disciplinary science. I wish us all well in this endeavour.

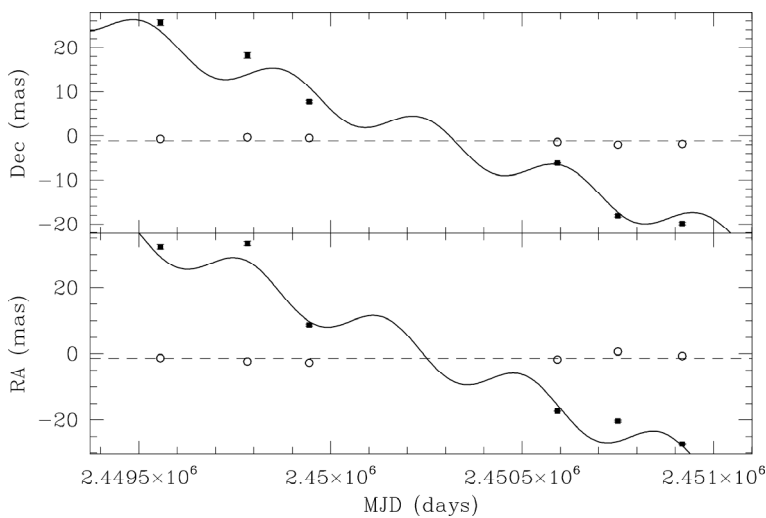


Figure 7. The proper motion of the giant star, U Herculis, over a period of 4 years measured with VLBI.

Lengte, breedte en hoogte met satellieten

Prof.dr.ir. L. Aardoom
Emeritus hoogleraar Satellietgeodesie, TU Delft

Summary

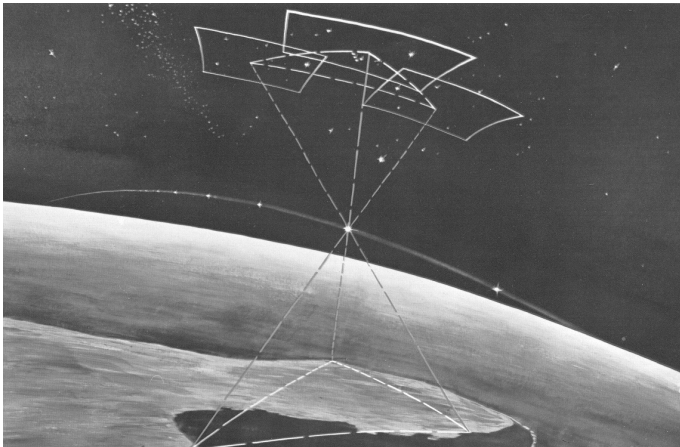
In geodesy the years prior to 1957 marked a period of inventions to free itself from limitations set by the curvature of the Earth's surface and by atmosphere refraction: stellar triangulation by means of rockets and balloons and the exploitation of the moon during total solar eclipses and occultations. Artificial satellites caused a break-through, firstly for sounding the global gravitational field of the Earth, later also for truly spatial global determination of station positions. Theory and instruments were developed rapidly. As accuracy improved, geodetic modelling had to take care of phenomena related to the non-rigidity of the Earth, opening up new challenges in the field of geodynamics. Jointly with astronomers using VLBI. Laser ranging became the most precise geodetic tool. Most practical became all-weather GPS. The Active GPS Reference System (AGRS) is the latest Dutch development in instrumentation. The present co-location of geodetic instrumentation with VLBI offers new opportunities for geodynamic research. (red.)

Zoals u zult begrijpen, dames en heren, behoor ik tot een generatie die zich nog kan herinneren dat de geodesie het zonder satellieten moest stellen. Niet dat ik de geodesie ten tijde van het oplaten van de eerste kunstmaan al daadwerkelijk beoefende - zo erg is het ook weer niet - maar wel dat mij geleerd werd hoe moeizaam de beoefening van het vak in groot verband toen was. In klein verband herinner ik mij de Delftse tweedejaars landmeetkundige terreinoefeningen in de zomer van 1954 op Terschelling. Als studenten werd ons wijs gemaakt dat wij verantwoordelijk waren voor de kartering van de Bosplaat aldaar. Voordat wij de ochtend van 30 juni met onze Wild RDS tachymeter - nu antiek, maar toen een technisch hoogstandje - op pad gingen reikte de wetenschappelijk ambtenaar ir. C. Koeman - later Utrechts hoogleraar cartografie - ons een vrijwel ondoorzichtig stukje glas uit, waardoor wij, geplaatst voor het objectief van ons instrument de zonsverduistering van vroeg in de middag zouden kunnen volgen. Met een grootte van zo'n kleine 90% werd de eclips een boeiende ervaring. Wij wisten toen niet dat elders, langs het totaliteitspad, vakgeodeten zich zouden kunnen opmaken om de tijdstippen van passage van de centrale maanschaduw te registreren om daaruit door onderlinge vergelijking de afstand tussen Canada en Europa te berekenen, al was het maar op 100 meter nauwkeurig. En als er geen satellieten waren gekomen, of als geodeten die niet hadden weten te benutten, dan hadden zij zich op 11 augustus j.l. mogelijk opgesteld om de breedte van het Kanaal te meten en om verder op het Europese continent zekerheidshalve nog een paar maatjes te nemen. Op wereldschaal was 100 meter in de jaren vijftig al netjes.

Op wereldschaal moest de geodesie zich immers behelpen met een gebrekkige meetkunde, gebaseerd op geodetisch-astronomisch bepaalde lengte en breedte, en met een hoogte bepaald via het slecht bekende zwaartekrachtsveld. Een nette ruimtelijke, driedimensionaal meetkundige, plaatsbepaling zonder omwegen was niet mogelijk. Twee omstandigheden zaten de geodesie dwars: het zwaartekrachtsveld en de dampkring. Het zwaartekrachtsveld bood wel hulp, maar was onbetrouwbaar en leidde geodeten op het moeilijk begaanbare pad van de potentiaaltheorie; de dampkring was goed voor de ademhaling, maar brak het

licht dat geodeten houvast bood bij hun optische metingen, een euvel dat zich vooral in verticale richting manifesteerde. Dat laatste maakte mondiale hoogtemeting tot een fundamenteel vraagstuk.

De Finse sterrenkundige Y. Väisälä voelde de geodetische problemen aan en had in 1946 al zijn gedachten over de oplossing ervan. Een geniaal idee: de kruisdraden hoog, zo mogelijk, buiten de dampkring! In de vorm van objecten als ballonnen, vliegtuigen, raketten, de maan; zo mogelijk kunstmanen. Zo zouden zonder tussenkomst van de dampkring grote afstanden, door richtingsmeting ten opzichte van de sterrenhemel, ruimtelijk meetkundig kunnen worden overbrugd. De maan was het goedkoopste, maar door haar grote afmetingen en onbekende hoogtetopografie, tevens het lastigste meetobject. Naast de zonsverduistering werd gebruik gemaakt van de in ruimer mate beschikbare sterbedekking of, nog flexibeler, van de maancamera uitgevonden door W. Markowitz, de directeur van het Amerikaanse Naval Observatory, die - dit er zijde - ook enkele termen in het rotatiespectrum van de aarde op zijn naam bracht. Ballonnen met flietslampen; raketten waren voor het grotere werk. Het is allemaal geprobeerd. Väisälä was een vroege vertegenwoordiger van de



Ruimtelijke triangulatie met satellieten.

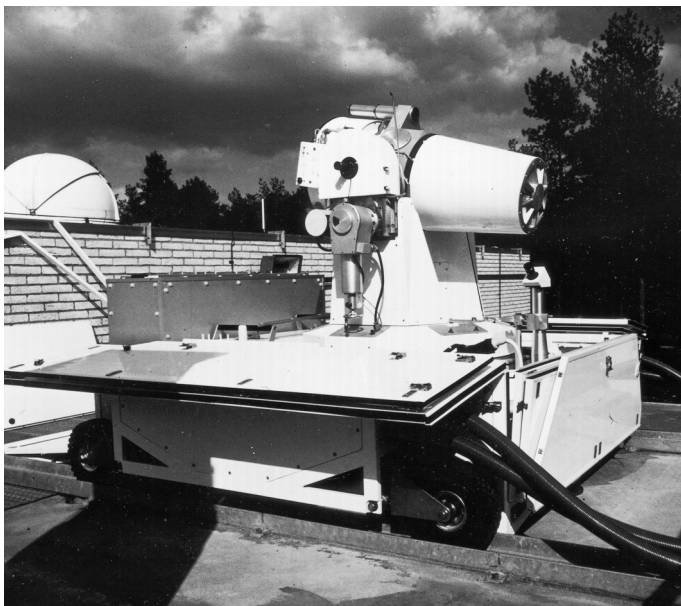
ondernemende universiteit en leverde via zijn eigen fabriek de benodigde telescopen en camera's. De al in 1946 door hem voorziene kunstmanen zorgden in 1957 en daarna voor de grote doorbraak. Zij konden niet alleen dienen als hoog ruimtelijk meet- of mikpunt voor de Euclidisch-meetkundige overbrugging van grote afstanden - afhankelijk van de baanhoogte - tot duizenden kilometers, maar ook voor de wereldwijde bepaling en detaillering van het zwaartekrachtsveld.

Verder - maar dat kwam pas later - konden satellieten dienen als geodetische instrumentendragers om de aarde van buitenaf aan te meten of te observeren. De wereldwijde meting van het zwaartekrachtsveld was het eerste satellietgeodetische wapenfeit. Een satellietbaan is immers in eerste benadering een valtraject in het veld en door ruwe visuele waarneming van een satelliet kon de kennis omtrent het veld in zijn geheel al snel worden uitgebreid. Men ontdekte dat de aarde een iets kleinere afplatting had dan men dacht en dat de aarde niet rotatiesymmetrisch was. Dat was slechts het begin. Met behulp van speciale satellietcamera's werden steeds meer onregelmatigheden in het zwaartekrachtsveld ontdekt. Maar naarmate de nauwkeurigheid van de metingen toenam en kleinere gravitatie-effecten konden worden gemeten, gingen ook niet-gravitationele invloeden hun bijdragen opeisen: de dampkring, de stralingsdruk van het zonlicht enz.

Gedreven door de ontwikkeling van de techniek moest de bijpassende theorie worden ontwikkeld, bijvoorbeeld om uit de baanverstoringen het zwaartekrachtsveld te kunnen afleiden en om dit te scheiden van andere velden. Daarbij schoten sterrenkundigen te hulp, want van hemelmechanica wisten geodeten anno 1960 weinig. Dat moesten zij, gebruik makend van de opkomende automatisering van het rekenproces, nog leren. De rekenautomaten boden ook hulp bij het uitmeten van de satellietfoto's en de verwerking van de uit-

komsten tot ruimtelijke triangulaties. Die hadden al gauw een nauwkeurigheid van een 25 meter in mondiaal verband, maar waren niet op schaal omdat er geen afstanden werden gemeten. De laserafstandsmeter, uitgevonden in 1965, bracht daarin verandering. En die afstandsmeting bood al spoedig nog grotere nauwkeurigheid, zodat geodeten in 1970 met fysische aardwetenschappers om de tafel gingen zitten om zich te beraden op het optimale wetenschappelijk gebruik van de mogelijkheden. De metingen werden allang niet meer zuiver-meetkundig, maar dynamisch verwerkt, waarbij in één rekenopzet, zowel het zwaartekrachtsveld als de coördinaten van de meetstations werden opgelost. Maar nú diende zich het probleem van de vervormbaarheid van het aardoppervlak, dus van de onderlinge verplaatsing van meetstations, aan; en van een aarde die anders draaide dan klassieke astronomische metingen leken uit te wijzen. De satellietgeodesie zou dus kunnen dienen voor het monitoren van deze bewegingen en onregelmatigheden en zou op termijn kunnen gaan bijdragen tot het bestand van waarnemingen waarop fysische aardwetenschappers hun theorieën funderen. De geokinematica, een uitdaging voor de geodesie, deed haar intrede. Ook een probléem, want wat blijft er over van een geodetisch referentiestelsel dat verankerd is aan een vervormbare aarde? Als geodetisch meetplatform boden satellieten vooreerst plaats aan de radarhoogtemeter, waarmee het zeeniveau vanuit de ruimte actueel kan worden gepeild. Een uiterst belangrijke bron van gegevens over het zwaartekrachtsveld op zee en - geokinematisch gezien - voor onderzoek naar de variabiliteit van het oceanoppervlak.

Een belangrijke doorbraak was de ontwikkeling van radioplaatsbepalingstechnieken met satellieten, eerst die van het doppler-navigatiesysteem, later - en nog - van het Global Positioning System (GPS).



De transportabele laserafstandsmeter in Kootwijk.

Aanvankelijk minder nauwkeurig dan de optische laserafstandsmeting - tegenwoordig 1 centimeter en beter - maar door op slimme wijze metingen van elkaar af te trekken of op andere wijze wetenschappelijk te manipuleren, tegenwoordig een geduchte concurrent daarvan. Maar concurrenten kunnen, tot wederzijds en algemeen nut, ook samenwerken. De laserafstandsmeting levert daarbij het mondiaal nauwkeurigste raamwerk; GPS, daarentegen, zorgt voor de geografische en tijdmatige continuïteit. Samen en in samenspel met de sterrenkundige VLBI, heeft het gebruik van de ruimtegeodetische apparatuur via daarop afgestemde wetenschappelijke analyses belangrijke toepassingen in het veld van de aardwetenschappen.

Nederland, en met name de hogeschool - tegenwoordig universiteit - in Delft heeft zich vanaf het begin toegelegd op de ontwikkeling en het gebruik van satellietgeodetische waarnemingsapparatuur. Aanvankelijk - vanaf ongeveer 1960 - ging het om de fotografische richtingsmeting met omgebouwde luchtverkenningcamera's; later - vanaf ongeveer 1975 - om de laserafstandsmeting, waarbij nauw werd samengewerkt met de Technisch Fysische Dienst (TPD), eveneens in Delft. Deze samenwerking leidde in 1984 tot een voor die tijd uniek transportabel instrument, dat er thans in aangepaste vorm nog is. Met de Delftse la-

serafstandsmeting werd het Veluwe dorp Kootwijk op de geodetische wereldkaart gezet, doordat de universiteit daar in 1974 haar satellietgeodetisch observatorium in gebruik had genomen, niet ver van de plaats waar in Nederland de radiosterrenkunde haar eerste proefterrein had. De activiteiten werden door de jaren rijkelijk gesubsidieerd via de Commissie voor Geofysica en Ruimteonderzoek (GROC) van de KNAW en later door de Stichting Ruimteonderzoek Nederland (SRON) van NWO.



De GPS-antenne van het AGRS.NL (rechts) en één van de antennes van de syntheseradiotelescoop in Westerbork (foto: H.J. Stiepel, Stichting ASTRON).

tenschappelijke leiding heeft en dat een gezamenlijk initiatief is van de Afdeling Geodesie en de Faculteit Luchtvaart- & Ruimtevaarttechniek, een faculteit waarmee Geodesie inzake de satellieten al 20 jaar samenwerkt.

In Westerbork staat de geodetische apparatuur nu zij aan zij met de VLBI. Deze vereniging biedt voor Nederland nieuwe en unieke kansen voor diepgaand geodetisch en geokinematisch onderzoek via de ruimte.

In de laatste jaren heeft de Afdeling Geodesie van de universiteit ook naam gemaakt met de ontwikkeling van een GPS-meetstrategie, die prof. Teunissen heeft bedacht: het Actief GPS Referentiesysteem (AGRS), een gebruiksvriendelijk nationaal netwerk voor plaatsbepaling dat zelfs een 'web-site' heeft, waarop operationele informatie over het systeem te vinden is. Als AGRS.NL wordt het systeem aan gebruikers ter beschikking gesteld door een consortium van Kadaster, Meetkundige Dienst van de Rijkswaterstaat en de TU Delft. Een van de stations van AGRS.NL is gevestigd te Westerbork, dat inmiddels ook de thuisbasis is van andere satellietgeodetische apparatuur, te weten de laserafstandsmeter en een GPS-ontvanger van het internationale wetenschappelijke netwerk.

De satellietgeodetische activiteiten van de TU Delft vallen tegenwoordig onder het Delft Institute for Earth Oriented Space Research (DEOS), waarover prof. Klees thans de we-

De hoogte, Rijkswaterstaat een zorg . . .

Ir. E.J. Riedstra

Hoofdingenieur-Directeur van de Meetkundige Dienst van de Rijkswaterstaat

Summary

In The Netherlands height is one of the key attributes in geo-information systems for support of water management, safety and traffic. Height is measured relative to Normaal Amsterdams Peil (NAP). NAP and height are monitored by the Meetkundige Dienst van de Rijkswaterstaat (MD). NAP has a history of over 300 years. The present database provides height for over 50.000 user benchmarks. As part of the geometric infrastructure of the country, NAP is maintained by a number of underground monuments. Two of these are situated at Westerbork. The underground monuments are checked by repeated precise levellings, recently also by GPS. In direct relation to NAP, the MD also monitors the national gravity network. Sea surface monitoring is a contemporary research subject of Rijkswaterstaat's Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ). Discrimination between sea surface change and land subsidence - or rise - is an issue which may be resolved by monitoring vertical motion of tide gauges around the North Sea and beyond. This is one of the exciting programme items of the Westerbork observatory. (red.)

Als onderdeel van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat staat de Rijkswaterstaat voor droge voeten, voldoende en schoon water, wegen en vaarwegen en veilig verkeer. De Meetkundige Dienst is binnen Verkeer en Waterstaat onder meer dé expert op het gebied van geo-informatievoorziening, en draagt de zorg voor de geo-informatie en bijbehorende 'tools' waar Verkeer en Waterstaat voor de uitvoering van haar kerntaken behoefte aan heeft.



Figuur 1. Natte infrastructuur en droge voeten.

Onderdelen van de productportfolio van de Meetkundige Dienst zijn ondermeer NAP-hoogten, het AHN, het met laseraltimetrie ingewonnen Actuele Hoogte Bestand van Nederland en de De Min-geoïde. Juist deze producten zijn in de context van het Astrometrisch-Geodetisch Observatorium Westerbork (AGOW) interessant omdat ze één ding gemeen hebben, ze hebben allemaal met de hoogte-dimensie te maken. Het meest bijzondere onderwerp uit dit rijtje voorop, die van de instandhouding van het NAP, het Normaal Amsterdams Peil.

Op 4 en 5 november 1675 stonden door een stormvloed grote delen van Amsterdam onder water. Nadat in de daaropvolgende jaren, zie de parallel met recentere gebeurtenissen, de waterkering was ver-

beterd, werden in 1684 gedurende een jaar de waterstanden precies gemeten. Deze metingen vormen de oudste verwijzing naar het Amsterdams Peil, het huidige NAP.

Ruim 300 jaar later, op de rand van de 21^e eeuw, is het NAP een essentieel onderdeel van de nationale Geometrische Infrastructuur. Het NAP wordt wel getypeerd als dé werkvloer van Nederland. Denk maar eens aan het aanleggen van gebouwen of infrastructurele voorzieningen, beheer van waterkwaliteit en kustbescherming, in alle gevallen is NAP dé hoogterefereentie. Met name de strijd tegen het water is al eeuwenlang een niet weg te denken onderdeel in ons bestaan. Het werken met, en het kennen van hoogtegegevens is in Nederland nog steeds onmisbaar om droge voeten te houden. Het is dan ook niet verwonderlijk dat, om verwarring bij gebruik van meerdere peilen te voorkomen, het gebruik van het (N)AP bij het beheer van de grote rivieren in 1818 zelfs bij Koninklijk Besluit werd geregeld.



Figuur 2. Het NAP nulpunt zichtbaar gemaakt in het Stadhuis/Muziektheater in Amsterdam.

Waar het NAP gepubliceerd wordt aan de hand van hoogten van peilmerken, maakt de Meetkundige Dienst voor het in stand houden van het NAP echter gebruik van zogenaamde ondergrondse merken. Deze ondergrondse merken, in het algemeen gefundeerd in Pleistocene zandlagen, vormen sinds het begin van deze eeuw de meest stabiele vastlegging van het NAP. Een deel van deze stabiele merken is geplaatst bij belangrijke peilmeetstations van Nederland waar waterstanden worden gemeten. De waterstanden van zowel de kustwateren als rivieren worden in Nederland altijd ten opzichte van NAP weergegeven. Ook op de locatie van het Observatorium in Westerbork zijn twee ondergrondse merken geplaatst. Voor het observatorium dienen deze als stabiel referentiemerk en hoogprecieze koppeling van hier uitgevoerde metingen aan het NAP.

Gegeven de betekenis van het NAP en hoogte in het algemeen voor Nederland, is betrouwbaarheid en actualiteit letterlijk van levensbelang. Zorg dragen voor voldoende en recente metingen is daarvoor een noodzakelijke voorwaarde. Daarbij spelen zowel beproefde als moderne meettechnieken een rol. Een goede illustratie hiervan is de in de afgelopen jaren uitgevoerde Vijfde Nauwkeurigheidswaterpassing. Doel

Het NAP wordt voor de gebruikers gepubliceerd in de vorm van hoogten van de bekende peilmerken. In de database van de Meetkundige Dienst zijn meer dan 50000 van deze peilmerken opgenomen, resulterend in enkele tienduizenden NAP-hoogten. Niet al deze peilmerken worden door de Meetkundige Dienst zelf onderhouden. Maar een gebruiker kan gemiddeld op maximaal twee kilometer afstand altijd een door de Meetkundige Dienst gecontroleerde hoogte vinden. De regelmaat waarmee de hoogte gecontroleerd wordt, is grotendeels afhankelijk van de regio waarin de peilmerken zich bevinden. Zo wordt een peilmerk in de regio Groningen gemiddeld veel vaker gecontroleerd dan een peilmerk in Midden-Nederland, waar de herhalingsfrequentie ongeveer eens per tien jaar is.

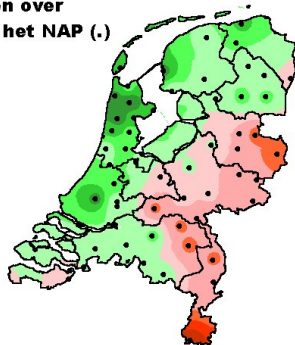
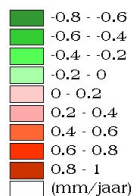
van dit project is vooral de homogeniteit en de kwaliteit van het NAP te waarborgen. De belangrijkste bijdrage daartoe wordt geleverd door de meer dan 6200 kilometer optische en hydrostatische waterpassing. Daarnaast zijn ook GPS-metingen en relatieve en absolute zwaartekrachtmetingen uitgevoerd. GPS- en zwaartekrachtmetingen worden als zeer waardevol beschouwd om in de toekomst, en wellicht efficiënter dan nu, grip te krijgen op hoogteveranderingen van en in Nederland.

Bij het uitvoeren van de Vijfde Nauwkeurigheidswaterpassing is al gebruik gemaakt van een deel van de faciliteiten van het observatorium in Westerbork. Zo is het zwaartekrachtplatform in de afgelopen jaren regelmatig gebruikt voor absolute zwaartekrachtmetingen. Daarnaast vormde het Actief GPS Referentiesysteem van Nederland (AGRS.NL) een rugengraat bij de uitgevoerde GPS-campagne. Het hart van het AGRS wordt daarbij - zeker vanuit de hoogte optiek - gevormd door het GPS-station op Westerbork.

Het AGRS GPS-station op Westerbork is een van de geodetische componenten die al geruime tijd operationeel is. Het beheer van het AGRS, GPS-stations en rekencentrum, is in handen van de Meetkundige Dienst en het Kadaster. Voor onderzoek en ontwikkeling wordt daarnaast een essentiële bijdrage geleverd door de TU Delft.

Binnen Rijkswaterstaat is het Rijksinstituut voor Kust en Zee, het RIKZ, verantwoordelijk voor het monitoren en voorspellen van de zeespiegelhoogten. Bij het onderzoek naar de grootte en oorzaken van absolute en relatieve zeespiegelvariaties speelt de Meetkundige Dienst echter ook een rol. Met name door het bewerkstelligen van een goede geodetische koppeling van peilmeetstations rond de Noordzee. Dit geeft uiteindelijk de mogelijkheid om zeespiegelvariaties en bodembeweging te scheiden. Immers, een stijgende zeespiegel en/of een dalende beweging van het land heeft per saldo hetzelfde gevolg: natte in plaats van droge voeten.

**Vertikale bewegingen Pleistoceen
bepaald uit waterpassingen over
ondergrondse merken van het NAP (-)**



RWS Meetkundige Dienst 1997

Figuur 3. Bodembeweging afgeleid van de ondergrondse merken van het NAP.

Het grote aantal waterpassingen in de afgelopen 75 jaar maakt het mogelijk om inzicht te krijgen in hoogteverandering, of anders gezegd, in het bewegingsgedrag van de Nederlandse ondergrond. Ongeveer tien jaar geleden is de eerste uitgebreide analyse gemaakt van historische nauwkeurigheidswaterpassingen. Daaruit mag geconcludeerd worden dat Nederland grofweg een kantelende beweging maakt, waarbij het Westen van Nederland zakt ten opzicht van het Oosten met een snelheid van ruim vijf centimeter per eeuw. Voor de rekenaars, het duurt dan bijna vijf miljoen eeuwen voordat Nederland op zijn kant staat.

Het gegeven dat onze ondergrondse merken gefundeerd zijn in dezelfde bewegende ondergrond is de belangrijkste reden voor het uitvoeren van de eerder genoemde Vijfde Nauwkeurigheidswaterpassing. Omdat altijd van stabiliteit van ondergrondse merken en Pleistocene ondergrond is uitgegaan, is het immers niet denkbeeldig dat ook in gepubliceerde NAP-hoogten een regionale vervorming aanwezig is. Nog dit jaar wordt duidelijk of dit aanleiding zal zijn om gepubliceerde NAP-hoogten of zelfs de definitie van het NAP te herzien. Voor de goede orde, waar al eerder gerept werd over de samenwerking met het Kadaster op het gebied van het AGRS geldt dat ook voor deze discussie. In het stelsel van de Rijksdriehoeksmeting, beheert door het Kadaster, is met GPS een duidelijk regionale

vervorming aan te tonen. Het Kadaster en de Meetkundige Dienst zullen nog dit jaar gezamenlijk aan de Nederlandse Commissie voor Geodesie advies vragen over onze voorname ten aanzien van de herziening van RD en NAP.

Wat de Meetkundige Dienst betreft is zeker op het gebied van het bewaken van het bewegingsgedrag van Nederland en dus ook van de kwaliteit van de Geometrische Infrastructuur, een belangrijke rol weggelegd voor het observatorium in Westerbork. Met het observatorium ontstaat immers een unieke mogelijkheid om Nederland zeer stevig te verankeren ten opzichte van de ons omringende landen en werelddelen. Internationale samenwerking is hier dan ook noodzakelijk. De toepassing van een grote variëteit aan verschillende, moderne meettechnieken is daarbij een unieke kans voor Nederland, vooropgesteld dat ook werkelijk een tijdreeks wordt opgebouwd. Het AGRS-station heeft voor GPS daartoe al een goede aanzet gegeven.

Het mag duidelijk zijn dat zowel voor de operationele als meer beleidsmatige activiteiten van de Rijkswaterstaat de hoogte een belangrijk thema is. In de eindrapportage van de Taakgroep Geodetisch-Astronomisch Station Westerbork van de NCG is richting gegeven aan het uitvoeren van een meetprogramma en diverse toekomstige onderzoeksprojecten. Hierbij speelt het thema hoogte een centrale rol. Het is een uitdaging voor alle betrokkenen om de in dit rapport beoogde doelen te realiseren. De Meetkundige Dienst zal daar waar mogelijk een bijdrage aan leveren. Want, naast de hoogte, is ook het AGOW ons een zorg!

Het Astrometrisch-Geodetisch Observatorium te Westerbork als fundamenteel referentiestation

Prof.dr.-Ing.habil. R. Klees

Afdeling Geodesie, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, TU Delft
Delft Institute for Earth-Oriented Space Research (DEOS)

Summary

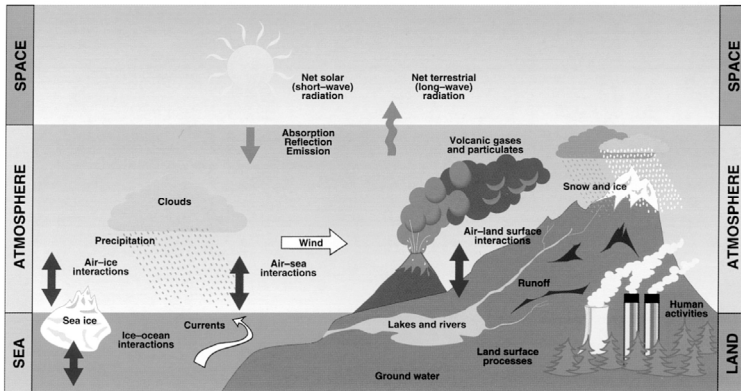
Presently there is an increasing public interest in the System Earth. To understand this system as a whole, subsystems, e.g. the Earth's interior, its surface and its atmosphere should be modelled and their interaction should be studied. This calls for global observing networks. A global network of fundamental geodetic reference stations can contribute to programmes of observing networks dedicated to individual subsystems. The International Space Geodetic and Gravimetric Network (ISGN) will ultimately be such global geodetic network. The ISGN consists of three components: Geometry and kinematics, Earth rotation and Gravity field and geoid. ISGN is supported by several operational services, e.g. the International Earth Rotation Service (IERS), the International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS) and the Permanent Service for Mean Sea Level. Space techniques like VLBI, Satellite Laser Ranging (SLR) and GPS will be among the most important within ISGN. In addition to these techniques, gravimetry is represented in the Westerbork observatory. All this renders the observatory a candidate in the ISGN. The observatory's activities will fall within two categories: global and regional. Its present participation in IERS and in the International GPS Service (IGS) are examples of global involvement. The observatory's main role as a fundamental reference station will be regional however. The monitoring of sea level changes in the North Sea area in combination with ongoing crustal motion will be one such challenge. The co-location of observing systems (VLBI, SLR, GPS and others) offers excellent opportunities to calibrate and improve such systems. Co-location requires painstaking geometric interconnection of the co-located, but spatially separated instruments. Continuity of work will be an all-important prerequisite for the success of the observatory's programme. (red.)

Deze korte bijdrage beoogt een idee te geven van de rol van het Astrometrisch-Geodetisch Observatorium Westerbork (WAGO) als fundamenteel referentiestation. Als uitgangspunt is gekozen even stil te blijven staan bij de rol die een mondiaal netwerk van fundamentele referentiestations speelt in het bestuderen van het Systeem Aarde. De aanpak is vrij schematisch en beperkt zich tot de hoofdlijnen.

De context

In het laatste decennium hebben onderwerpen zoals mondiale opwarming, zeespiegelstijging, aardbevingen, El Niño, bosbranden in Azië en overstromingen in Europa in toenemende mate aandacht gevonden bij het publiek. Daardoor is de behoefte aan informatie over en het begrijpen van de processen, die in het Systeem Aarde spelen aanzienlijk toegenomen. Voor het beter begrijpen van het Systeem Aarde moeten modellen worden ontwikkeld van de verschillende subsystemen, zoals bijvoorbeeld het inwendige van de aarde, het aardoppervlak (cryosfeer, oceanen, landoppervlak) en de atmosfeer; en moet de interactie tussen de verschillende subsystemen worden beschreven (zie figuur 1). Daarin worden waarnemingen uit verschillende bronnen geïntegreerd. De uitdagingen liggen voornamelijk

op het gebied van de datavalidatie, de modelvalidatie en de data-assimilatie. Globale aardobservatiesystemen zijn daarbij onmisbaar. Ten eerste geven ze een indicatie over de toestand en de trend van het Systeem Aarde. Ten tweede is zonder waarnemingen de ontwikkeling en validatie van een geïntegreerd model van het Systeem Aarde niet mogelijk.



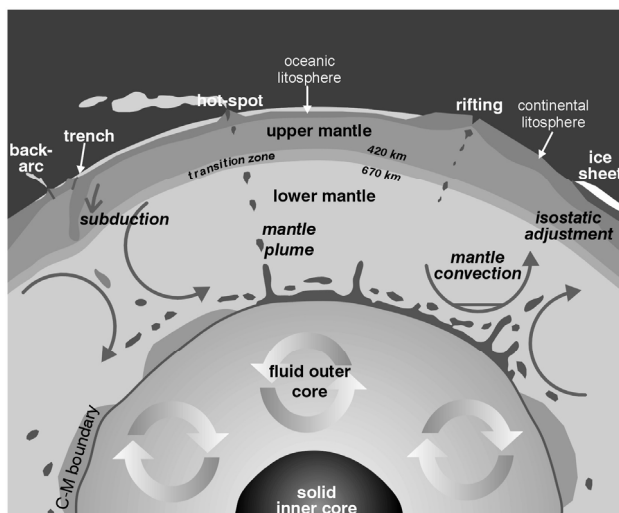
FIGUUR 1. Schema van het Systeem Aarde (FSA, 1998).

Tegenwoordig is het monitoren van het Systeem Aarde nog georganiseerd langs disciplines, waarbij zich iedere discipline bezig houdt met de studie van een individueel subsysteem. Een uitzondering hierop is een mondiaal netwerk van geodetische fundamentele referentiestations. Want aan de ene kant draagt dit netwerk bij aan het monitoren van verschillende subsystemen, zoals bijvoorbeeld 'het inwendige van de aarde', het 'aardoppervlak' en

de 'oceanen' en hun interactie. Aan de andere kant levert het netwerk een referentie ten opzichte waarvan veranderingen in het Systeem Aarde (met name het aardoppervlak en het inwendige van de aarde) kunnen worden gemeten en beschreven. Deze veranderingen zijn het gevolg van dynamische processen in het Systeem Aarde. In figuur 2 zijn een aantal soortgelijke processen schematisch weergegeven.

Het geodetisch/geodynamisch observatiesysteem

De functie van een mondiaal netwerk van referentiestations wordt in de toekomst toegerekend aan een mondiaal geïntegreerd geodetisch/geodynamisch observatiesysteem, het zogenaamde International Space Geodetic and Gravimetric Network (ISGN). Het WAGO zou hier deel van kunnen uitmaken. Als onderdeel van het ISGN bestaat de taak uit de meting van de kinematica van het aardoppervlak, dat wil zeggen alle temporele veranderingen in het land, ijs en zeeoppervlak; de kinematica te koppelen aan de fysica van de onderliggende geofysische processen; het geïntegreerde effect van alle veranderingen in het impulsmoment van de aarde, dat wil zeggen de aardrotatieveranderingen, te bepalen en tenslotte het transport van water en warmte in de oceanen te bepalen en schattingen te doen over de balans van land- en ijsmassa.



FIGUUR 2. Verschillende dynamische processen in het Systeem Aarde.

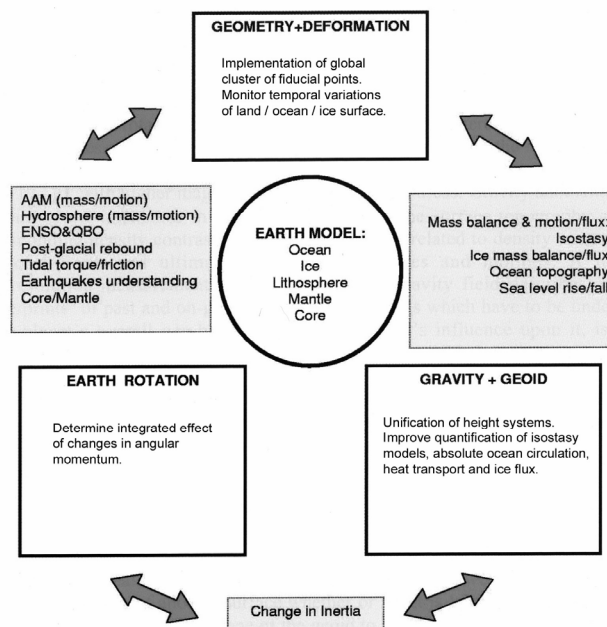
De componenten

Om aan deze eisen te kunnen voldoen bestaat het ISGN uit 3 componenten zoals in figuur 3 is aangetoond: (1) geometrie en kinematica, (2) aardrotatie en (3) zwaartekrachtsveld en geïde.

Het geometrisch-kinematisch gedeelte heeft als taak een globale cluster van referentiepunten in te richten ten opzichte waarvan veranderingen in de tijd van het land-, ijs- en oceaanooppervlak worden gemeten. Deze zijn een gevolg van een aantal verschillende dynamische processen in het Systeem Aarde zoals platen tektoniek, postglaciale opheffing, aardbevingen, en zeespiegelveranderingen (figuur 2). Het aardrotatiegedeelte bepaalt het geïntegreerde effect van veranderingen in het impulsmoment van de aarde veroorzaakt door onder andere massaverplaatsingen in de atmosfeer, cryosfeer en de oceanen, kern-mantel dynamica en impulsmomentuitwisseling tussen verschillende subsystemen. Tenslotte dient het zwaartekrachtgedeelte ter kwantificatie van isostatische modellen, de absolute oceaancirculatie, het transport van warmte in de oceanen en flux van ijsmassa's.

Om aan deze doelstelling te kunnen voldoen moeten alle drie de componenten hetzelfde nauwkeurniveau en een vergelijkbare voldoende dichte resolutie in ruimte en tijd hebben bereikt. De vereiste nauwkeurniveaus zijn hoog, in de orde van grootte van 10^{-8} t/m 10^{-9} . In dit geval zal de combinatie van de drie componenten het monitoren en modelleren van een aantal geodynamische, ijs- en oceaanprocessen en hun interactie mogelijk maken.

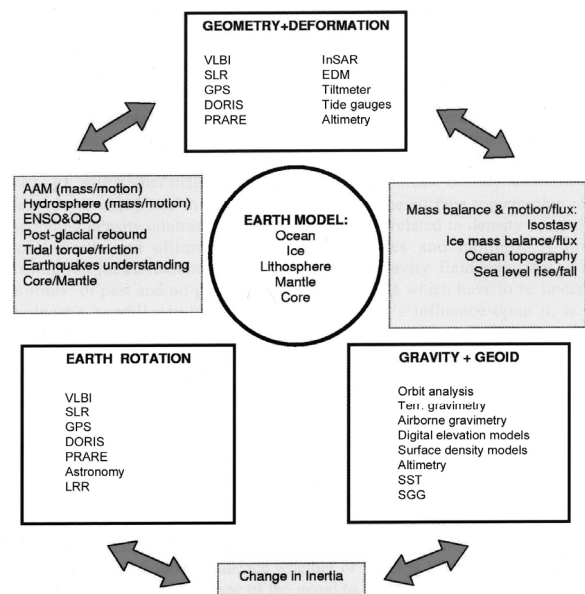
Het ISGN is niet helemaal nieuw; op enkele onderdelen is het al operationeel. Het maakt gebruik van verschillende al bestaande diensten zoals de International Earth Rotation Service (IERS), de International GPS Service (IGS), de International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS), de International Laser Ranging Service (ILRS) en de Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL). Daarnaast steunt dit systeem ook op een serie van altimetersatellieten en, als nieuw element, op de SAR-interferometrie. Het element dat op dit moment zeker nog ontbreekt is een nauwkeurig en gedetailleerd homogeen model van het aardse zwaartekrachtsveld. De verwachtingen zijn dat dit in de volgende tien jaar volledig zal veranderen met de komst van de zwaartekrachtmissies CHAMP, GRACE en GOCE.



Figuur 3. De rol van de drie onderdelen van het International Space Geodetic and Gravimetric Network (ISGN) (ESA, 1999).

De meettechnieken

De meest belangrijke technieken binnen het International Space Geodetic and Gravimetric Network (ISGN) zijn de ruimte-geodetische meettechnieken zoals Very Long Baseline Interferometry (VLBI), Satellite Laser Ranging (SLR), Lunar Laser Ranging (LLR), Global Positioning System (GPS), Doppler Orbitography and Radiolocation Integrated by Satellite (DORIS), en Precise Range And Range Rate Equipment (PRARE) en de absolute en relatieve gravimetrie met vrije-val gravimeters, lasergyroscopes en supergeleidende gravimeters (figuur 4). Voor ISGN stations zijn een aantal randvoorwaarden gedefinieerd met betrekking tot de geografie, geologie, omgeving, monumenten, en instrumentatie. Voor de instrumentatie is bijvoorbeeld een vereiste dat een minimum aantal voldoende moderne technieken en faciliteiten aanwezig moeten zijn, bijvoorbeeld SLR of VLBI, GPS of DORIS, meteorologische datasystemen, en absolute of relatieve zwaartekrachtmeters.



Figuur 4. Geodetische meettechnieken van de drie onderdelen van het International Space Geodetic and Gravimetric Network (ISGN) (ESA, 1999).

De rol van het Astrometrisch-Geodetisch Observatorium

Met de op Westerbork aanwezige faciliteiten moet het mogelijk zijn aan de meest belangrijke eisen te kunnen voldoen. De *geodetische VLBI infrastructuur* bestaat uit een van de Synthese Radiotelescoop te Westerbork (SRT) elementen in de directe omgeving van de overige geodetische instrumenten. De thans beschikbare randapparatuur omvat S/X-ontvangers (3.6 en 13 cm golflengtes), een MkIV-bandrecorder en een waterstof maser als plaatselijke frequentiestandaard. Daarmee is een deelname aan de International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS) mogelijk. De *infrastructuur voor laserafstandsmetingen* bestaat op dit moment uit een SLR-platform, een gemodificeerd ontwerp van NASA. Het voldoet volgens de stabiliteits- en ontwerpisen aan de internationale normen en laat reguliere metingen van zowel mobiele laserafstandsmetsystemen als ook mobiele VLBI-systemen toe. De *infrastructuur voor zwaartekrachtmetingen* bestaat uit een zwaartekrachtplatform waar periodiek absolute zwaartekrachtmetingen worden uitgevoerd. Het is een vrij speciaal ontwerp om in voldoende mate stabiliteit te waarborgen. Bovendien is het ondergebracht in een eigen behuizing zodat er zo min mogelijk last wordt ondervonden van de invloed van de omgeving. De *GPS infrastructuur*, tenslotte, bestaat uit een stalen mast van 24 m hoogte, die door middel van een speciaal ontwerp beter dan 2 mm stabiel kan worden gehouden, zelfs bij windsnelheden van 20 m/s (windkracht 8). Twee GPS-ontvangers van het type Turbo-Rogue vormen het onderdeel van het IGS- en het AGRS-netwerk. Een Rubidium normaal en een waterstofmaser als plaatselijke frequentiestandaard completeren de GPS-infrastructuur. Daarnaast beschikt het station nog over de nodige apparatuur voor het automatisch meten en registreren van luchtdruk, temperatuur, vochtigheid, windsnelheid en windrichting. De datacommunicatie verloopt via een lokaal glasvezelnetwerk en heeft natuurlijk een internetaansluiting. Bovendien is een communicatie via het ISDN-telecomnetwerk mogelijk. Denkbaar is dat de infrastructuur in de toekomst wordt uitgebreid

met bijvoorbeeld een GLONASS-ontvanger, een supergeleidende gravimeter, een DORIS-grondstation en/of een autonoom laserafstandsmeetsysteem.

Het mondiale aspect

De bijdrage van het WAGO aan het bestuderen van het Systeem Aarde heeft een mondiale component en een regionale component. Het mondiale aspect komt tot uitdrukking in de deelname van het WAGO aan de wereldwijde diensten International GPS Service (IGS, tegenwoordig bestaande uit ongeveer 200 stations wereldwijd) en International Earth Rotation Service (IERS). Het IGS levert onder andere hoognauwkeurige banen van de GPS-satellieten, aardrotatieparameters, coördinaten en snelheden van de IGS-stations en ionosfeer- en troposfeerparameters. Door zijn participatie in het IERS draagt het WAGO bij aan de doelstelling van deze dienst, namelijk de definitie en realisatie, het bijhouden en het toegankelijk maken van het International Terrestrial Reference System (ITRS) (een terrestrisch referentiestelsel), de definitie en realisatie, het bijhouden en het toegankelijk maken van het International Celestial Reference System (ICRS) (gebaseerd op de richtingen naar extragalactische radiobronnen) en zijn verbinding met andere 'celestial reference systems' (een extraterrestrisch stelsel) en het monitoren van de rotatieas van de aarde, dat wil zeggen van de parameters die de relatie tussen ITRS en ICRS beschrijven zoals precessie, nutatie, poolbeweging, daglengte en wereldtijd.

Het IERS maakt daarbij gebruik van de ruimtegeodetische technieken VLBI, LLR, SLR, GPS en DORIS. Het mondiale aspect van het WAGO zou in de toekomst kunnen worden versterkt door deelname in de International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS) en de International Laser Ranging Service (ILRS). Dit veronderstelt een goed doordacht onderzoeksplan, de beschikking over voldoende middelen voor personeel en operaties en het aantrekken van geschikt personeel. Daardoor zou de verankering van Nederland in de internationale diensten en netwerken aanzienlijk verbeterd kunnen worden.

Het regionale aspect

Alhoewel het mondiale aspect niet mag worden onderschat zou men wel kunnen stellen dat het WAGO daarbij geen kritische rol zal spelen omdat er in Europa nog een aantal andere stations bestaan met een bijna volledige verzameling van technieken zoals Wettzell (Duitsland) en Matera (Italië). Daarom ligt de toekomstige rol van het WAGO als fundamenteel referentiestation voornamelijk in de verankering van regionale netwerken voor het monitoren van zeespiegelveranderingen en aardkorstdeformaties en van landelijke geodetische referentiestelsels voor landmeetkundig werk in de mondiale netwerken.

Het monitoren van zeespiegelveranderingen vereist de onderlinge verbinding van de peilschaalstations tot een regionale cluster, de verbinding van de regionale cluster met de mondiale netwerken (de aansluiting aan de mondiale netwerken is onmisbaar voor het inzicht krijgen in de fysica van het zeespiegelfenomeen) en het identificeren/meten van verticale bodembewegingen (zie figuur 5). De rol van het WAGO als fundamenteel referentiestation bestaat erin om, samen met een aantal andere stations, het regionale raamwerk (frame) te definiëren voor een Europees zeespiegelobservatiesysteem en de integratie van dit Europees systeem in het mondiale zeespiegelobservatiesysteem te bewerkstelligen. Daarvoor zijn de faciliteiten voor laserafstandsmeting, VLBI, GPS en absolute zwaartekrachtmetingen bedoeld. De verbinding tussen de regionale clusters en het raamwerk (frame) wordt dan door GPS respectievelijk relatiefgravimetrie bewerkstelligd. Het AGRS, waarin het WAGO deelneemt, is bijvoorbeeld in 1997 al ingezet als Nederlands aandeel in een GPS-campagne ter realisatie van het European Vertical Network (EUVN), waar o.a. een aantal stations nabij peilmeetstations werden gemeten. Daarnaast wordt de verbinding van de peilschaalstations

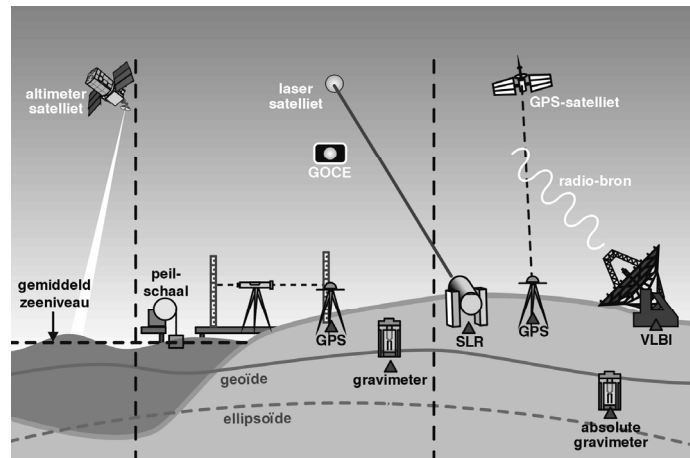
tot een regionale cluster door middel van GPS bewerkstelligd. Tenslotte moet een koppeling worden gemaakt tussen de hoogterefereentiepunten ('nulpalen') nabij de peilmeetstations en de lokale vastlegging van registratieapparatuur van de peilmeetstations aan deze hoogterefereentie. Het laatste kan worden voorkomen als in de toekomst een GPS-antenne fysisch met de peilschaal kan worden verbonden.

Een ander aspect, dat bovendien een directe relatie heeft met zeespiegelveranderingen, is het monitoren van verticale bodembewegingen. Alhoewel de natuurlijke verticale bodembeweging in Nederland relatief klein is (minder dan 0,8 mm/jaar) vergeleken met de tegenwoordige en toekomstige eustatische zeespiegelverandering van 2-15 mm/jaar (afhankelijk van het gekozen scenario en de gebruikte modellen), is het monitoren van verticale bewegingen voor Nederland een uitermate belangrijk aspect. Geometrisch gebeurt dit door GPS. Daarbij vormt het WAGO samen met de overige AGRS-stations het raamwerk voor andere stations, die regelmatig gemeten en met het raamwerk verbonden worden. Fysisch gebeurt dit door zwaartekrachtmetingen. Ook daarbij vormt het WAGO, samen met de overige drie operationele absolute zwaartekrachtmeetstations in Nederland (het satellietobservatorium in Kootwijk, het seismisch station van het KNMI in Epen, de brandweerkazerne van Zundert), het raamwerk voor andere stations; voor de onderlinge verbinding en de aansluiting worden relatiefgravimeters gebruikt. De kwaliteit van het zwaartekrachtnetwerk zal daarbij aanzienlijk verbeteren als in de toekomst op de absolute zwaartekrachtstations ook permanente relatiefgravimeters (supergeleidende gravimeters) worden geïnstalleerd voor het scheiden van kortperiodieke effecten (aardgetijden, oceaantijden, loadingeffecten, grondwaterveranderingen, lokale deformaties) en langperiodieke effecten.

Tenslotte maakt het WAGO als een AGRS-station deel uit van de Nederlandse geometrische infrastructuur en zal een sleutelrol vervullen bij een herdefinitie van de nationale geometrische infrastructuur.

De toekomst

Een van de toekomstige uitdagingen is zeker de collocatie van verschillende technieken op WAGO. In principe maken de aanwezige faciliteiten een collocatie van VLBI, SLR en GPS mogelijk. Door middel van collocatie kunnen de verschillende ruimtegeodetische methoden in één systeem worden geïntegreerd. Bovendien is collocatie de primaire methode voor de beoordeling van de nauwkeurigheid van het ITRS. Tenslotte verbetert collocatie de wetenschappelijke modellen voor de verschillende technieken. Alhoewel het aantal stations met GPS-apparatuur exponentieel toeneemt zijn er wereldwijd tot nu toe maar een klein aantal stations die over meer dan twee van de genoemde meettechnieken beschikken. In het bijzonder bestaat er een behoefte aan meer stations met SLR en VLBI faciliteiten; bovendien is het aantal stations met een lange continue kwalitatief hoogwaardige tijdsreeks van GPS-metingen schaars. Kootwijk is tot nu toe één van de weinige stations op aarde die over een soortgelijke tijdsreeks beschikt, met een ruisniveau dat wereldwijd tot het laagste behoort.



Figuur 5. Schema van een zeespiegelobservatiesysteem en de daarbij gebruikte geodetische meettechnieken.

Daarnaast dient collocatie ook voor de verbetering van de modellen die voor de verschillende technieken worden toegepast. Een voorbeeld is de verticale component, gezien het belang in nauwkeurige hoogtes in samenhang met onderzoek naar bodemdalingen en zeespiegelveranderingen en de daarvoor noodzakelijke verticale referentie. De verticale component wordt in het bijzonder door de invloed van de atmosfeer op de uitbreiding van de elektromagnetische golven minder goed bepaald. Door collocatie van VLBI, SLR en GPS op één station zou het mogelijk zijn de tijd- en richtingsafhankelijke fluctuaties van de neutrale atmosfeer te analyseren en daarmee de kwaliteit van de geodetische en astrometrische metingen te verbeteren.

Randvoorwaarde hiervoor is dat lokale geodetische metingen worden uitgevoerd om de nodige aansluitingen nauwkeurig vast te leggen: ten eerste gaat het om de ruimtelijke meetkundige koppeling van het referentiepunt van de metingen (bijvoorbeeld het fasecentrum van de ontvangstantenne in geval van VLBI en GPS) met het referentiepunt van het meetinstrument (dat wil zeggen een vast punt van het meetinstrument, bijvoorbeeld het mechanische antennerferentiepunt in geval van GPS) en vervolgens met het referentiepunt van de lokale opstelling (een externe vastlegging in het betreffende meetplatform). Ten tweede gaat het om de koppeling tussen de referentiepunten van de lokale opstellingen met een gezamenlijk referentiepunt. Daardoor is het mogelijk de ruimtegeodetische metingen met VLBI, SLR en GPS om te rekenen naar één gemeenschappelijk referentiepunt 'Westerbork'. Bovendien moeten de excentriciteiten regelmatig worden gecontroleerd om locale deformaties en onderlinge verplaatsingen in kaart te kunnen brengen. Tenslotte moet de meetkundige koppeling worden gemeten aan een aantal vastleggingen op afstand van Westerbork om lokale bodembewegingen te Westerbork te monitoren.

Omdat de precisie van de diverse ruimtegeodetische technieken van de orde van grootte van enkele millimeters is, zal de nauwkeurigheid van alle beoogde koppelingen beter moeten zijn dan één millimeter. Om die redenen is het niet verbazend dat de kwaliteit van de aansluitingsmetingen tegenwoordig de beperkende factor is voor de collocatie van verschillende ruimtegeodetische technieken en de vergelijkende analyse hiervan.

Naast de beschikking over een aantal technieken is continuïteit de meest belangrijke randvoorwaarde om in de toekomst een bijdrage te kunnen leveren aan het bestuderen van het Systeem Aarde op mondiale en regionale schaal en voor de verankering van Nederland in de mondiale netwerken. Aan deze randvoorwaarde werd in het verleden voldaan dankzij de royale financiële ondersteuning van de Faculteit der Geodesie (nu Afdeling Geodesie), van de Technische Universiteit Delft en van de Stichting Ruimteonderzoek Nederland (SRON). Ook in de toekomst zullen nieuwe investeringen nodig zijn voor het bijhouden en de verbetering van de verankering van Nederland in de internationale diensten en netwerken.

Literatuur

Kootwijk Observatory for Satellite Geodesy (KOSG), *Position on Kootwijk: The role of the Observatory of Satellite Geodesy at Kootwijk in the nineties*. Sectie Fysische, Meetkundige en Ruimtegeodesie (FMR), Faculteit der Geodesie, Technische Universiteit Delft, 1990.

European Space Agency (ESA), *The science and research elements of ESA's Living Planet Programme*, ESA-SP-1227, ESA Publication Division, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 1998.

European Space Agency (ESA), *Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Mission*, ESA-SP-1233(1), ESA Publication Division, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 1999.

R. Rummel, 'Global Integrated Geodetic and Geodynamic Observing System (GIGGOS)'. In: R. Rummel, H. Drewes, W. Bosch, H. Hornik (Eds.), *Towards an Integrated Global Geodetic Observing System (IGGOS)*, IAG, Symposia Volume 120, 253-260, Springer, Berlin, 2000.

De wetenschappelijke rol van het astrometrisch-geodetisch observatorium te Westerbork

Uitkomsten van een verkenning door de Taakgroep Geodetisch-Astronomisch Station Westerbork van de Nederlandse Commissie voor Geodesie

Bestuurlijke samenvatting

Delft, 18 november 1998

Inhoud

- Ten geleide 30
- 1. Inleiding 31
- 2. De ruimtegeodetische instrumentele ontwikkelingen in Nederland 31
- 3. Nederlandse partijen in het ruimtegeodetisch onderzoek 32
- 4. Kennis en ervaring 33
- 5. Geometrische infrastructuur 34
- 6. Het astrometrisch-geodetisch observatorium te Westerbork 35
- 7. De toegevoegde waarde van het astrometrisch-geodetisch observatorium 36
- 8. Het programma voor het astrometrisch-geodetisch observatorium 37
- 9. Waarnemingstechnisch onderzoek 38
- 10. Nieuwe mogelijkheden, nieuwe wensen 39
- 11. Om niet te vergeten 40
- Afkortingen 40

Ten geleide

Ruim vijf jaar geleden zag de toenmalige Faculteit der Geodesie van de TU Delft zich genoodzaakt zich te beraden op de toekomst van haar Observatorium voor Satellietgeodesie te Kootwijk. Deze vestiging was twintig jaar eerder in gebruik genomen als onderkomen voor de, toen voornamelijk optische en stationaire, satellietgeodetische waarnemingsactiviteiten van de faculteit. Technische ontwikkelingen sedertdien, waarbij in toenemende mate gebruik wordt gemaakt van transportabele en verregaand geautomatiseerde waarnemingsapparatuur, boden kansen voor een meer doelmatige bedrijfsvoering, zonder dat de uitvoerbaarheid van het wetenschappelijk programma daardoor in gevaar zou komen. De verhoogde doelmatigheid werd gevonden in overplaatsing van de dagelijkse werkzaamheden van het personeel naar Delft en de verhuizing van de stationaire voorzieningen naar de radiosterrenwacht van de NWO Stichting Astronomisch Onderzoek in Nederland (ASTRON) te Westerbork. Hierdoor werd de geodetische waarnemingsapparatuur van het observatorium geografisch verenigd met de sterrenkundige, te weten met de synthese radiotelescoop ter plaatse en de bijbehorende voorzieningen. Door deze uitnodigende omstandigheden aangesproken, besloot de Nederlandse Commissie voor Geodesie (NCG) op 22 mei 1997 tot instelling van de Taakgroep Geodetisch-Astronomisch Station Westerbork, met als algemeen gestelde opdracht na te gaan hoe de wetenschappelijke meerwaarde van deze vereniging optimaal kan worden benut.

Meer specifiek diende de taakgroep:

1. een inventarisatie te maken van de interne en externe programma's/projecten waaraan met de voorhanden apparatuur wordt (of zal worden) deelgenomen;
2. aan te geven welk nieuw onderzoek met de combinatie van de samengebrachte apparatuur kan worden uitgevoerd;
3. aan te geven aan welke nieuwe programma's/projecten met de combinatie van samengebrachte apparatuur zou kunnen worden deelgenomen;
4. een schatting te maken van de looptijden van de betreffende onderzoeks- of andere programma's/projecten;
5. te inventariseren welke personele en materiële middelen, naast de apparatuur, voorhanden zijn;
6. te ramen welke extra middelen nodig zouden zijn voor de uitvoering van het aangegeven nieuwe onderzoek en/of de deelname aan nieuwe programma's/projecten;
7. een voorstel te doen hoe die middelen zouden kunnen worden verworven.

De taakgroep kreeg als leden: prof.dr.ir. L. Aardoom (voorzitter, bestuurslid van de NCG), dr.ir. F.J.J. Brouwer (Meetkundige Dienst, Rijkswaterstaat), prof.dr. H.R. Butcher (ASTRON), prof.dr.-Ing. R.A.P. Klees (Subfaculteit Geodesie, TUD), prof.dr. R.T. Schilizzi (Joint Institute for VLBI in Europe), prof.dr.ir. P.J.G. Teunissen (Subfaculteit Geodesie, TUD) en prof.ir. K.F. Wakker (Faculteit Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek, TUD).

Dr. Brouwer verliet op 1 juli 1998 de Meetkundige Dienst; zijn werk in de taakgroep werd overgenomen door ir. R.E. Molendijk. Prof. Butcher, prof. Teunissen en prof. Wakker, lieten zich sedert begin 1998 vertegenwoordigen door, respectievelijk, dr.ir. W.A. Baan, dr.ir. H. van der Marel en prof.ir. B.A.C. Ambrosius.

De heer F.H. Schröder (adjunct-secretaris van de NCG) woonde de vergaderingen bij en bood bestuurlijke ondersteuning.

De taakgroep heeft op 2 november 1998 verslag uitgebracht over de punten 1 t/m 4 van de verstrekte opdracht. Het voorliggende is een samenvatting van dit verslag.

1. Inleiding

De geometrische beschrijving van de omgeving is een gemeenschappelijke taak voor de astrometrie en de geodesie. Voor de geodesie beperkt die omgeving zich tot de planeet Aarde; voor de astrometrie ligt het werkterrein daarbuiten. In de 19de eeuw was de planeet Aarde ook onderwerp van sterrenkundig onderzoek, maar als gevolg van specialisatie heeft de geodesie zich, met de aardwetenschappen, van de astronomie verwijderd. Voor de geodesie bleef samenwerking met de astrometrie onontbeerlijk bij de beoefening van het vak in groot verband, zoals bij de geografische plaatsbepaling en de oriëntering van geodetische netwerken.

Aanvankelijk was de sterrenkunde de geodesie behulpzaam bij het gebruik van kunstmatige satellieten: de *satellietgeodesie*. Dit heeft echter geen blijvende toenadering tussen beide disciplines teweeggebracht. Doordat sommige geofysische parameters met haar nieuwe ruimtelijke en nauwkeurige methoden beter konden worden geschat, kon de geodesie wél haar aardwetenschappelijke relaties aanhalen.

De intrede in de radiosterrenkunde van de interferometrie met onafhankelijke klokken (*VLBI*) opende een nieuw perspectief voor samenwerking met de geodesie. Door de geometrische parameters uit de VLBI te combineren met de uitkomsten van de satellietgeodesie ontstond de *ruimtegeodesie*.

Afgezien van incidentele samenwerking werden in Nederland de beide ruimtegeodetische componenten - de satellietgeodetische en de radiosterrenkundige - structureel onafhankelijk van elkaar ontwikkeld. De Technische Universiteit Delft (TUD) opende in 1974 haar Observatorium voor Satellietgeodesie nabij Kootwijk met aanvankelijk optische, maar later ook radiotechnieken. De VLBI werd sedert 1976, onder de hoede van NWO-ASTRON, te Dwingeloo en later te Westerbork beoefend.

Budgettaire en inhoudelijke overwegingen bewogen de TUD zich te beraden op de toekomst van het Observatorium voor Satellietgeodesie en in overleg met ASTRON werd besloten de apparatuur over te brengen naar de Radiosterrenwacht te Westerbork en de vestiging Kootwijk op termijn te sluiten.

Het navolgende spitst zich toe op een verkenning van de nieuwe mogelijkheden die de vereniging van instrumenten te Westerbork voor de wetenschapsbeoefening biedt.

2. De ruimtegeodetische instrumentele ontwikkelingen in Nederland

In Nederland werd de satellietgeodesie in 1960 opgepakt door de toenmalige Onderafdeling der Geodesie van de Technische Hogeschool (thans Subfaculteit Geodesie van de TUD). Deze ontwikkelde een camerasysteem voor de *fotogrammetrische richtingsmeting*. Met een opstelling in Delft en later op de Vliegbasis Ypenburg, nam zij deel aan de internationale satelliettriangulatieprogramma's van die tijd. In 1974 werd nabij Kootwijk (gemeente Apeldoorn) het Observatorium voor Satellietgeodesie in gebruik genomen.

In 1976 kwam in het observatorium Kootwijk ook een in samenwerking met de Technisch Fysische Dienst (TPD) ontwikkeld systeem voor *laserafstandsmeting* (Satellite Laser Ranging: SLR) in gebruik. Met dit instrument werd met succes deelgenomen in internationaal georganiseerde meetcampagnes ten behoeve van wetenschappelijk onderzoek de fysica van de aarde betreffende. In de jaren 1982-1985 werd, wederom in samenwerking met de TPD, een compact, transportabel SLR-systeem ontwikkeld: het Modular Transportable Laser Ranging System (MTLRS-2, naast het in opdracht van en voor het Duitse Institut für An-

gewandte Geodäsie gebouwde MTLRS-1). MTLRS-2 nam, onder meer, met succes deel aan de meting van aardkorstbewegingen in en rond het oostelijk deel van de Middellandse Zee, als onderdeel van het door NASA geleide Crustal Dynamics Project (CDP).

In het begin van de 80-er jaren onderkende de internationale geodetische gemeenschap de potentiële wetenschappelijke betekenis van het Global Positioning System (*GPS*). Voor civiel gebruik werden hiertoe speciale ontvangers ontwikkeld. In Nederland wordt uitsluitend gebruikt gemaakt van commercieel verkrijgbare GPS-ontvangers, maar met name de TUD heeft een grote bijdrage geleverd aan de ontwikkeling van procedures voor het geodetisch gebruik van GPS. Het Actief GPS Referentie Systeem (AGRS), waartoe in 1994 het initiatief werd genomen, is hiervan een opmerkelijk voorbeeld. Het AGRS-concept dat voorziet in een landelijke GPS-dienst, waarmee gebruikers de relatieve plaats van hun GPS-ontvangers nauwkeurig kunnen bepalen, werd inmiddels als *AGRS.NL* gerealiseerd. Hierbij namen het Kadaster (en de Openbare Registers) en de Meetkundige Dienst van de Rijkswaterstaat (RWS-MD) gezamenlijk de verantwoordelijkheid voor de operationele aspecten van het systeem; de TUD blijft verantwoordelijk voor de ontwikkeling van wetenschappelijke toepassingen.

De *VLBI* ontwikkelde zich in de jaren zestig vanuit de astronomische wens om een hoger oplossend vermogen te bereiken voor studies van variabele kosmische radiobronnen. In 1967 slaagden Canadese en Amerikaanse onderzoekers erin om waarnemingen van extragalactische bronnen te doen met interferometers met basislijnen van enkele duizenden kilometers. De toepassingsmogelijkheden voor de geodesie en de astrometrie en voor klok-synchronisatie lagen voor de hand: in 1969 zijn de eerste metingen voor deze doeleinden uitgevoerd. VLBI werd in 1979 door NASA opgenomen in het CDP. In Nederland werden in 1976 de eerste astronomische VLBI-activiteiten ondernomen met de ASTRON radiotelescoop te Dwingeloo; vanaf 1980 is alleen Westerbork voor de VLBI in gebruik.

In de jaren tachtig is vanuit ASTRON actief gewerkt aan de ontwikkeling van een 'data processor' voor de verwerking van de metingen van het Europese VLBI-netwerk; deze activiteit werd in 1993 een primair aandachtspunt van het Joint Institute for VLBI in Europe (JIVE).

3. Nederlandse partijen in het ruimtegeodetisch onderzoek

In Nederland zijn thans vier partijen direct betrokken bij wetenschappelijk onderzoek, waarbij de ruimtegeodetische instrumentatie te Westerbork, een essentiële functie heeft: DEOS, ASTRON, JIVE en de RWS-MD.

Sedert omstreeks 1978 bestond er inzake de satellietgeodesie een intensieve samenwerking tussen de faculteiten der Geodesie en der Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek van de TUD. Deze werd per 1 januari 1997 geformaliseerd met de oprichting van het Delft Institute for Earth-Oriented Space Research (*DEOS*). DEOS werd opgenomen in de een jaar daarvoor - met de Faculteit Aardwetenschappen van de Universiteit Utrecht als initiatiefneemster - opgerichte Vening Meinesz Onderzoeksschool voor Geodynamica (VMSG). Het accent van de samenwerking van DEOS in VMSG ligt op de bepaling van het aardse zwaartekrachtsveld, meting van bewegingen in de aardkost (geokinematica) en de geofysische interpretatie van de met geodetische methodieken verkregen informatie. DEOS en VMSG nemen deel in de 'toponderzoeksschool' ISES (Netherlands Research Centre for Integrated Solid Earth Sciences). DEOS participeert via VMSG ook in het Netherlands Environmental Earth System Dynamics Initiative (NEESDI) en is ook nauw betrokken bij het Delft Interfacultair Onderzoekcentrum (DIOC) voor Aardobservatie en Observatie van de Ondiepe Ondergrond.

De VLBI vertegenwoordigt een belangrijk punt op het programma van *ASTRON*. *JIVE*, in 1992 opgericht als Nederlandse stichting gefinancierd door een aantal Europese radio-sterrenkundige instituten, is ondergebracht bij *ASTRON* te Dwingeloo. *JIVE* heeft tot taak het Europese VLBI-Netwerk (EVN) te ondersteunen. Tussen *ASTRON* en *JIVE* bestaat een nauwe functionele samenwerking. Enkele van de EVN-telescopen maken deel uit van een door NASA geleid internationaal geodetisch VLBI-netwerk. Minder formeel georganiseerd bestaat er een Europese samenwerking voor geodetische VLBI, een verband waarmee *ASTRON* en *JIVE*, samen met de RWS-MD, contacten onderhouden.

De *RWS-MD* ontwikkelde zich, in nauwe samenwerking met de Faculteit der Geodesie en *ASTRON*, in de loop der jaren tot het Nederlandse kenniscentrum voor het geodetisch gebruik van VLBI. De *RWS-MD* neemt ook deel in NEESDI.

4. Kennis en ervaring

Bij *ASTRON*, *JIVE*, *DEOS* en de *RWS-MD* zijn (eind 1998) een aantal instrumenteel-operationele, dan wel interpretatief-wetenschappelijke programma's terzake onderhanden.

ASTRON en *JIVE* hebben diverse *astrometrische VLBI-meetprogramma's*. Wat de geodetische VLBI betreft, wordt in Europa samengewerkt in het kader van een door de EU ondersteund programma. Hierbij staat de toepasbaarheid van geodetische VLBI voor het meten van verticale bodembeweging, al dan niet in combinatie met GPS, centraal. *RWS-MD* is partner in dit programma. Afhankelijk van de ontvangstmogelijkheden in Westerbork en van besluitvorming met betrekking tot het programma van het astrometrisch-geodetisch observatorium aldaar, wordt daadwerkelijke deelname van de synthese radiotelescoop (SRT) voorzien.

Zwaartekrachtmetingen vormen in wereldwijd verband het uitgangsmateriaal voor de bepaling van de geoïde als equipotentiaalvlak van het veld op gemiddeld zeeniveau, traditioneel een kerntaak voor de geodesie. Inzake de berekening van het zwaartekrachtveld uit metingen met verschillende typen sensoren beschikt *DEOS* over een aanzienlijke theoretische kennis en praktische ervaring. *DEOS* neemt ook deel in studies ter voorbereiding van missies voor de in-situ meting van zwaartekrachtsgradiënten in satellieten.

Nauwkeurige *baanbepaling* van satellieten is een deskundigheid waarover *DEOS*, met een jarenlange onderzoekservaring, beschikt. Het op hogere nauwkeurigheid gerichte onderzoek wordt uitgevoerd in samenwerking met instituten in het buitenland.

DEOS participeert al sinds vele jaren in het Europese WEGENER-project. Dit was een belangrijk onderdeel van het inmiddels afgesloten CDP en de daarop volgende Dynamics of the Solid Earth (DOSE) programma's. De belangrijkste doelstelling is om door middel van ruimtegeodetische- en zwaartekrachtmetingen een nauwkeurig beeld te krijgen van *aardkorstdeformaties* ten gevolge van tektonische plaatbewegingen in het oostelijk deel van de Middellandse Zee en elders en van de effecten van postglaciale bodemrijzing in noord Europa. Het verband met de problematiek van de mondiale en continentale geodetische referentienetwerken ligt voor de hand. In verband met het mondiale onderzoek naar de relatieve zeespiegelvariatie geniet de verticale bewegingscomponent in toenemende mate de aandacht. Vooral in verband met aardkorstvervormingen in geografisch kleinere context, besteedt *DEOS* in samenwerking met de *RWS-MD*, het Fysisch en Elektronisch Laboratorium TNO (TNO-FEL) en het Internationaal Instituut voor Lucht- en Ruimtekaartering en Aardkunde (ITC) aandacht aan Interferometrische Synthetische Apertuur Radar (*InSAR*).

De primair voor aardkorstdeformatieonderzoek gegenereerde en verzamelde GPS- en SLR-waarnemingen worden, in relatie met het werk aan de *geodetische referentiestelsels*, door DEOS tevens gebruikt voor de productie van parameters die de *draaiing van de aarde* beschrijven. Op dit gebied is door DEOS in de loop der jaren een grote mate van ervaring opgedaan.

De techniek van de *radarhoogtemeting* boven zee vanuit satellieten heeft aanleiding gegeven tot *oceanografisch onderzoek*, waaraan ook vanuit DEOS al jarenlang actief wordt deelgenomen. Het onderzoek richt zich ook op de mariene geïde en voortschrijdende veranderingen van het zeeniveau. Dit laatste onderwerp zal mede steunen op de verankering van de Europese en mondiale ruimtelijke referentiestelsels. Het oceanografisch onderzoek bij DEOS vindt plaats in samenwerking met het Instituut voor Mariene- en Atmosferisch Onderzoek van de Universiteit Utrecht (IMAU) en het Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee (NIOZ) en met enkele buitenlandse partners.

Om de nauwkeurigheid van de resultaten te verhogen verdient de *refractieve invloed van de dampkring* op de ruimtegeodetische metingen speciale aandacht. Omgekeerd kan GPS - en onder gunstige omstandigheden InSAR - worden gebruikt om de dampkringsbestanden die de refractie veroorzaken te schatten. Het dampkringsonderzoek wordt daarom verricht in samenwerking met meteorologen, in Nederland bij het KNMI.

5. Geometrische infrastructuur

Om de aarde en de ruimte in geometrisch opzicht te beschrijven, of om locale of regionale verschijnselen of metingen in grotere geometrische samenhang te brengen, bedient men zich van een *geometrische infrastructuur*.

Bestudeerde verzamelingen van punten worden met praktisch voordeel beschreven ten opzichte van coördinaten- of *referentiestelsels*. We onderscheiden buitenaardse (extraterrestrische) van aardse (terrestrische) stelsels. Zowel in de astrometrie als in de geodesie is het realiseren en in onderling verband brengen van stelsels een belangrijk onderwerp op zichzelf.

De *astrometrie* kent het Conventional Celestial Reference Frame (CCRF); gangbaar is het IERS Celestial Reference Frame (ICRF), een stelsel dat per veronderstelling een onveranderlijke stand in het heelal heeft.

Op *landelijk* niveau kent Nederland twee klassieke *geodetische referentiestelsels*: één voor de horizontale ligging van punten (het stelsel van de Rijksdriehoeksmeting; RD) en één voor hoogte (gebaseerd op het Normaal Amsterdams Peil: NAP). Als voorbeeld van een *wereldwijd* Conventional Terrestrial Reference Frame (CTRF) is er het IERS Terrestrial Reference Frame (ITRF), dat wordt gerealiseerd en bijgehouden met behulp van moderne ruimtegeodetische technieken. Het European Reference Frame (EUREF) is te beschouwen als de *Europese verdichting* daarvan, die sinds 1989 volledig met GPS wordt gerealiseerd. NEREF (Netherlands Reference Frame) is weer de Nederlandse verdichting van EUREF.

De VLBI is het aangewezen middel voor de realisatie en bijhouding van een quasi-inertieel *extraterrestrisch stelsel*, gedefinieerd door de richtingen naar buiten onze Melkweg gelegen radiobronnen. Door haar lopende VLBI inspanningen ondersteunt ASTRON het extraterrestrische ICRF. Het ICRF wordt mede gerealiseerd door de posities van optisch waarneembare sterren. De optische Hipparcos-catalogus met de posities, eigenbewegingen en parallaxen van ongeveer 120.000 sterren is in het ICRF geïntegreerd door VLBI-metingen aan radiobronnen met een goed gedefinieerde optische component.

Het door IERS gedefinieerde ITRF (aanvankelijk uitsluitend gerealiseerd via een complementaire combinatie van VLBI- en SLR-stations) werd verdicht door inschakeling van GPS, in het bijzonder van het IGS-net (International GPS Service). In de realisatie en bijhouding van ITRF vervult GPS inmiddels een onmisbare rol. De bijhouding is nodig ter actualisering van het net, waarvan de punten verbonden zijn met de beweeglijke aardkorst. Met de VLBI-inspanning van ASTRON, het SLR-programma van DEOS en de deelname van DEOS in IGS geeft Nederland een bijdrage aan het mondiale geodetische referentiestelsel. De Nederlandse IGS-bijdrage omvat niet alleen de bijdrage van metingen in Nederland, maar ook ondersteuning van metingen elders en operationele analyse.

In 1989 werd de eerste EUREF GPS-campagne georganiseerd, met Nederlandse deelname van stations te Kootwijk, Westerbork, Delft en Huisduinen. Door deelname aan EUREF-campagnes beantwoordt DEOS Europese initiatieven tot de versteviging en bijhouding van het continentale ruimtelijke referentienetwerk en daarmee eveneens van het mondiale ITRF. In de toekomst zal gebruik worden gemaakt van AGRS.NL. AGRS.NL is in 1997 al ingezet als Nederlands aandeel in een GPS-campagne ter realisatie van het EUVN (European Vertical Network), met hoogtewaarnemingen op knooppunten van het United European Leveling Net (UELN). De ruimtegeodetische metingen in het Europese - en daarmee in het mondiale - geodynamische netwerk, worden ondersteund door relatieve en absolute zwaartekrachtmetingen, in de toekomst met het observatorium te Westerbork als Nederlands referentiepunt.

Het net van de vier Nederlandse EUREF-stations is in enkele NEREF-campagnes verdicht. In deze campagnes werd ook een aantal peilmeetstations langs de Nederlandse kust betrokken om tevens te onderzoeken in hoeverre GPS-metingen een bijdrage kunnen leveren aan de meting van zeespiegelvariatie in combinatie met bodemdaling. Deze activiteit werd in 1997 met AGRS.NL voortgezet in het kader van de EUVN-campagne.

6. Het astrometrisch-geodetisch observatorium te Westerbork

In 1996 ging de TUD over tot de bouw van het *satellietgeodetisch* deel van het observatorium en de installatie van de daaronder vallende apparatuur. Dit deel van het observatorium werd rondom - deels met gebruikmaking van - het bestaande dienstgebouw bij de SRT binnen een gebied van ongeveer $200 \times 200 \text{ m}^2$ gerealiseerd en omvat de volgende voorzieningen.

- Een universeel $9 \times 9 \text{ m}^2$ betonnen platform waarop met transportabele VLBI- en SLR-systemen kan worden gemeten.
- GPS-ontvangers van het type TurboRogue SNR 12RM, als onderdelen van de IGS- en AGRS.NL-netwerken, staan opgesteld in de kelder van het dienstgebouw van de radio-sterrenwacht. Deze ontvangers maken gebruik van een gemeenschappelijke antenne.
- Een 24 m hoge, op beton gefundeerde, stalen mast als opstelpunt voor de antenne ten behoeve van de permanente GPS-metingen. Deze bijzondere voorziening is getroffen opdat de antenne, ondanks de aanwezigheid van de 24 m hoge elementen van de SRT en het thans bijna even hoge geboomte in de directe omgeving, de horizon onbelemmerd kan bestrijken.
- Een ondergronds betonnen blok van $3 \times 3 \times 3 \text{ m}^3$ in een behuizing met klimaatregeling, als platform voor zowel absolute als relatieve zwaartekrachtmetingen.
- Een door de RWS-MD nabij het zwaartekrachtplatform aangebracht ondergronds NAP-hoogte-merk.

Met het geodetisch medegebruik van de SRT ter plaatse ontstaat *het astrometrisch-geodetisch observatorium*. Daarbij zal één van de SRT-elementen in de directe omgeving van

de geodetische instrumenten worden gebruikt voor VLBI-metingen ten behoeve van de geodesie. De technische infrastructuur van de radiosterrenwacht omvat ook meteorologische apparatuur benodigd voor de registratie van luchtdruk, temperatuur, luchtvochtigheid, windrichting en windkracht.

Naast de bestaande ruimtetechieken (SLR, GPS en VLBI) en zwaartekrachtmeting, zal het observatorium onderdak kunnen bieden aan gerelateerde alternatieve, al dan niet *nieuwe ontwikkelingen*; hetzij permanent of incidenteel. Te denken is hierbij vooreerst aan het Russische GLONASS satellietnavigatiesysteem, aan het Europese Global Navigation Satellite Services (GNSS) concept en aan het in Frankrijk ontwikkelde baan- en plaatsbepalingssysteem DORIS.

7. De toegevoegde waarde van het astrometrisch-geodetisch observatorium

Het observatorium verenigt apparatuur en andere voorzieningen van uiteenlopende aard. Deze kunnen worden gebruikt voor onderzoek op geodetisch gebied, op astrometrisch terrein en/of van wederzijds belang. Het observatorium moet zijn betekenis in de eerste plaats ontleen aan de betere mogelijkheden tot onderzoek van laatstbedoelde soort.

De geografische vereniging van de geodetische apparatuur met de radiosterrenkundige biedt mogelijkheden tot *doelmatiger gebruik*. Ten dele zijn de modellen voor de analyse van de waarnemingen, verkregen met de diverse sensoren, met elkaar verweven. De waarnemingen worden immers gedaan vanaf hetzelfde stukje Aarde en door een gemeenschappelijk deel van de dampkring, zodat, voor de diverse instrumenten, atmosferische refractie en bodembeweging met elkaar in nauw verband staan. Wat bij het ene apparaat geldt als de primaire meetgrootte is een onbekende parameter in het waarnemingsmodel bij het andere. Zo zullen de diverse sensoren elkaar kunnen aanvullen, maar ook de betrokken onderzoekers. Dat met de vereniging van apparatuur ook de bijbehorende onderzoekers vanuit verschillende disciplines elkaar treffen, mag worden gezien als een kans op verrijking van kennis en verhoging van doelmatigheid.

Evenals de radiosterrenkunde, beschikt de (satelliet)geodesie over een ruime specifieke kennis en vaardigheid. Deze kan over en weer worden ingebracht bij de beantwoording van onderhanden onderzoeksvragen. Enerzijds zal de geodesie, met haar vaardigheid ten aanzien van de kinematiek van de aarde, de opbouw van het VLBI-correlatiemodel kunnen ondersteunen; anderzijds ondersteunt de VLBI de satellietgeodesie in haar streven een wereldwijd geodetisch referentiestelsel voor geodynamisch onderzoek te realiseren en op basis daarvan de kinematiek van de aarde in kaart te brengen. Er dienen zich ook *gemeenschappelijke vraagstellingen* op, die in nauwe samenwerking doeltreffender zullen kunnen worden beantwoord.

De bepaling, in wereldwijd verband, van de *eigentijdse bewegingen van de aardkorst en van het zeeniveau* geldt als een van de grootste uitdagingen voor de hedendaagse ruimtegeodesie. De resultaten van zulke bepaling vormen het uitgangspunt voor of stimuleren in belangrijke mate vernieuwing van aardwetenschappelijk onderzoek in diverse (sub)disciplines. In dit verband zijn in het bijzonder te noemen onderzoek gericht op het beter begrijpen van de mechanismen achter de beweging van lithosferische platen (aardschollen), verticale (postglaciale) bewegingen als gevolg van de terugtrekking van landijsbedekking en een veronderstelde mondiale trendmatige verandering van het zeeniveau.

De nauwkeurigheid van de verticale component van de plaatsbepaling met ruimtetechieken is vrijwel steeds beduidend slechter dan de horizontale. Daarom vraagt bij vernieuwend onderzoek in de ruimtegeodesie - zeker waar dat bodembeweging als thema heeft - de *verticale component van de plaatsbepaling* bijzondere aandacht. In Nederland is de

verticale component (de hoogte) nog eens extra belangrijk omdat die beslissend is bij de behandeling van de maatschappelijk relevante vraagstelling over de relatieve zeespiegelverandering als resultante van een veronderstelde regionale rijzing van de zeespiegel en een daling van het land. Om de verticale plaatscomponent - en de kleine veranderingen daarin - voldoende nauwkeurig te kunnen bepalen is een beheersing van de atmosferische refractie een eerste vereiste.

Om de bewegingen van de aardkorst en de verandering van het zeeniveau in wereldwijd (mondiaal) verband te kunnen nagaan is een consistent *mondiaal 3-dimensionaal referentiestelsel* voor plaatsbepaling nodig, ten opzichte waarvan de eventuele bewegingen eenduidig in beeld kunnen worden gebracht. De realisatie en bijhouding van een mondiaal referentiestelsel op aarde hangt ten nauwste samen met de problematiek van de mondiale en regionale beweging van lithosferische platen en met de draaiing van de aarde als geheel. Bij de studie van de verandering van de zeespiegel in mondiaal verband is het van belang dat het mondiale referentiestelsel is verankerd aan het massamiddelpunt van de aarde. Dynamische methoden van de satellietgeodesie zijn van nature geschikt om dit doel te bereiken. Daarnaast is absolute zwaartekrachtmeting het aangewezen middel voor het in absolute zin doorlopend bijhouden van plaatselijke hoogteveranderingen.

Samenvattend, bestaat de toegevoegde waarde van de instrumentele vereniging te Westerbork in het kunnen meten op en vanaf hetzelfde stukje Aarde en door een gemeenschappelijk deel van de dampkring. Dit laatste biedt de mogelijkheid om een grotere doelmatigheid te bereiken in de gezamenlijke aanpak van de refractieproblematiek. De ruimtemetingen hebben in geodetisch opzicht als belangrijkste doel een nauwkeuriger doorlopende bepaling van de locatie Westerbork in mondiaal verband, waardoor 'Nederland' in dat verband kinematisch beter wordt verankerd. Nauw verweven hiermee is het leveren van een Nederlandse bijdrage aan de realisatie en bijhouding van een mondiaal referentiestelsel voor plaatsbepaling. Voor Nederland is het onderzoek naar de trendmatige relatieve verandering van het zeeniveau van bijzondere betekenis. Daarom verdient bij de mondiale kinematische verankering van Westerbork de verticale component speciale aandacht. De vereniging van specialistische apparatuur te Westerbork biedt in beginsel ook gelegenheid tot uitvoering van experimenten die weliswaar buiten het primaire aandachtsveld van de samenwerkende instellingen vallen, maar waarvoor de apparatuur toch bij uitstek geschikt is.

8. Het programma voor het astrometrisch-geodetisch observatorium

De geografische vereniging van apparatuur te Westerbork biedt nieuwe mogelijkheden voor het ruimtegeodetisch onderzoek in Nederland. Om deze kansen te benutten is met het observatorium in eerste aanleg aansluiting te zoeken bij onderzoeksthema's die in Nederland ruime wetenschappelijke aandacht genieten en waarop reeds een zekere expertise aanwezig is. Driedimensionale beweging van het aardoppervlak in mondiaal verband - met relatieve zeespiegelvariatie als bijzonder aandachtspunt - dient zich hierbij als eerste aan.

Een betere kennis omtrent de relatieve *verandering van het zeeniveau* langs de Nederlandse kust kan van beslissende betekenis zijn bij het opstellen van strategieën om ons lage land onbedreigd bewoonbaar te houden. Daarom geniet dit onderwerp, in combinatie met *bodembeweging* in het algemeen, in Nederland wetenschappelijk en technisch ruime aandacht. Het is te verwachten dat dit onderzoek nieuwe impulsen zal ondervinden van de bundeling van de activiteiten in het astrometrisch-geodetisch observatorium.

Door de vorming van doorlopende *meetreeksen* heeft het observatorium gelegenheid de numeriek kleine bewegingen van de bodem te registreren. Het leveren van deze meet-

reeksen is te beschouwen als de primaire bijdrage van het astrometrisch-geodetisch observatorium aan wetenschappelijk onderzoek. Het ter beschikking hebben van een eigen, doelgericht verzameld, bestand aan waarnemingen zal de uitvoerbaarheid van het gerelateerde interpretatieve onderzoek in Nederland tastbaar bevorderen.

Om optimaal van de ruimtemetingen te kunnen profiteren zijn aanvullende metingen gewenst, in het bijzonder van de *absolute zwaartekracht* te Westerbork.

Om de ruimtetechnieken voor de veeleisende toepassing voor bodembeweging doeltreffend te kunnen inzetten, zal gericht moeten worden gezocht naar methoden om de fysische begrenzings van de gevolgde meetprocessen aan te spreken en, waar mogelijk, te verleggen. Hierbij is in de eerste plaats te denken aan de *atmosferische refractie*, die een grote invloed heeft op de belangrijk geachte hoogtecomponent van de plaatsbepaling.

De ruimtetechnische voorzieningen te Westerbork en de metingen daarmee zijn ook inzetbaar voor andere wetenschappelijke taken dan het onderzoek van mondiale bodembeweging. In de eerste plaats zij hier genoemd onderzoek naar onregelmatigheden in de *draaiing van de aarde*; een onderwerp nauw verwant met de problematiek van de wereldwijde referentiestelsels.

Het voorgestelde onderzoek naar de invloed van de dampkring op de ruimtemetingen heeft een wisselwerking met *meteorologisch onderzoek* naar de samenstelling van de dampkring. *Tijd* is een essentiële factor bij de dynamische ruimtemetingen. De aanwezige ruimtemeetapparatuur is niet alleen gebruiker van de tijdsinformatie, maar kan tevens worden gebruikt om tijdsinformatie te leveren.

9. Waarnemingstechnisch onderzoek

Het ontvouwde programma geeft aanleiding voorstellen te doen voor nader onderzoek inzake de volgende *onderwerpen*:

- de ruimtelijke meetkundige koppeling van de meetsystemen;
- het monitoren van de locale bodembeweging;
- de geometrische koppeling van peilmeetstations langs de Nederlandse kust;
- de invloed van de refractie op de hoogtecomponent, verkregen uit ruimtemetingen.

De ruimtelijke meetkundige koppeling van de meetsystemen

Het astrometrisch-geodetisch observatorium ontleent zijn betekenis vooral aan de gelegenheid tot het gecoördineerde gebruik van complementaire ruimtegeodetische meetsystemen (VLBI, SLR en GPS) vanaf een zelfde locatie: Westerbork. Deze meetsystemen hebben elk een referentiepunt waarop de metingen betrekking hebben, evenals de zwaartekrachtsapparatuur en het NAP-hoogtemerk. De apparatuur mag dan binnen de grenzen van het observatorium zijn verenigd, zij heeft daar toch een zekere geografische spreiding. Om de metingen met de diverse apparatuur te kunnen vergelijken en representatieve waarnemingsreeksen te kunnen vormen voor geïntegreerd gebruik, is het noodzakelijk de referentiepunt en met een passende nauwkeurigheid ruimtelijk meetkundig te koppelen.

Het monitoren van de locale bodembeweging

Om optimaal een geïntegreerd gebruik te kunnen maken van de precieze ruimtegeodetische apparatuur is het wenselijk dat eventuele onderlinge bewegingen van deze apparatuur doorlopend in beeld worden gebracht. Daartoe is het continue meten (monitoren) van de locale bodembeweging rond het observatorium noodzakelijk, vooral in de aanvangsfase als over het optreden van zulke bewegingen in het geheel nog geen duidelijkheid is. De beoogde bewegingsmetingen sluiten aan bij de bovengenoemde 'ruimtelijke meetkundige koppeling van de meetsystemen'.

De geometrische koppeling van peilmeetstations langs de Nederlandse kust

Waar de locatie Westerbork borg zal staan voor de verbinding van Nederland met regionale en mondiale referentiestelsels zal, ter onderlinge scheiding van zeespiegelvariatie en bodembeweging, speciale aandacht moeten worden besteed aan de geometrische koppeling van Westerbork met de belangrijkste peilmeetstations langs de Nederlandse kust. Hierbij is onderscheid te maken tussen de koppeling aan Westerbork van de 'stabiele' hoogterefereentiepunten nabij de peilmeetstations en de lokale vastlegging van de registratieapparatuur van de peilmeetstations aan deze hoogterefereentie.

De invloed van de refractie op de hoogtecomponent, verkregen uit ruimtemetingen

De dampkring beïnvloedt alle in het observatorium te Westerbork aanwezige ruimtegeodetische meettechnieken. Daarbij is juist de hoogtecomponent het meest gevoelig voor onnauwkeurigheden in de modellering van de dampkring. De ruimtelijk en temporaal sterk variabele en moeilijk te bepalen of te elimineren hoeveelheid waterdamp in de atmosfeer is hierbij de kritische factor. De vereniging van meettechnieken in Westerbork biedt een unieke gelegenheid om deze effecten te onderzoeken. De uitkomsten zullen ook van meteorologische betekenis zijn.

10. Nieuwe mogelijkheden, nieuwe wensen

Om de mogelijkheden van de te Westerbork samengebrachte apparatuur ten volle te benutten, is uitbreiding met enkele aanvullende voorzieningen te overwegen.

Voor het onderzoek naar de beweging van de bodem in Nederland in wereldwijd verband is aanvullende meting van de *absolute zwaartekracht* van groot belang. Nederland heeft absolute zwaartekrachtmeetstations in Kootwijk, Epen (Zuid-Limburg), Westerbork en Zundert (Noord-Brabant), die periodiek door buitenlandse absolute zwaartekrachtmeters worden bezocht. Dit net dient als uitgangspunt voor het nationale net van relatieve zwaartekrachtmetingen. Absolute zwaartekrachtmeting biedt de lange termijn stabiliteit die nodig is voor het meten van absolute hoogteveranderingen als gewenste onafhankelijke verificatie van de uitkomsten van de ruimtegeodetische metingen. In het bijzonder kan via absolute zwaartekrachtmeting onderscheid worden gemaakt tussen de beweging van de bodem en de verandering van het zeeniveau. Om de invloed van plaatselijke storingen op de periodieke absolute metingen in rekening te kunnen brengen, zullen deze metingen moeten worden aangevuld met nauwkeurige continue metingen met een zogenaamde SG-zwaartekrachtmeting, waarvan de sensor gebruikt maakt van het beginsel van de supergeleiding (SG). Absolute- en SG-zwaartekrachtmeting vormen het ideale duo om verschijnselen, die zich doen voelen in kleine, langzame variaties van de zwaartekracht te registreren.

Bij het onderzoek naar de invloed van de atmosferische refractie is de hoeveelheid waterdamp in de dampkring een kritische grootheid. De actuele hoeveelheid waterdamp langs het traject van de metingen heeft niet alleen een grote invloed; zij is ook moeilijk te meten of te elimineren. Een '*waterdamp radiometer*' (Engels: Water Vapor Radiometer, WVR) zou een aanvullend hulpmiddel bij het voorgestelde onderzoek zijn. Mede afhankelijk van de bevindingen bij het onderzoek, zou daarom in de toekomst de aanschaf van een WVR overwogen moeten worden. Een WVR zou niet alleen een goede aanvulling zijn op het onderzoek, maar kan ook in operationele zin een bijdrage leveren.

Het GPS-station te Westerbork ontleent de plaatselijk benodigde stabiele frequentie aan de standaard van de radiosterrenwacht. Om de continuïteit van de GPS-metingen te waarborgen is op termijn een eigen *frequentiestandaard* als reserve nodig.

Afhankelijk van de uitkomsten van het onderzoek naar de mobiliteit van de bodem te Westerbork, zou het gewenst kunnen zijn aanvullende sensoren, zoals een meetput voor de *registratie van de grondwaterstand* te installeren.

11. Om niet te vergeten

Om de gemaakte investeringen en de voorgestelde uitbreidingen optimaal te kunnen benutten en het te ondernemen onderzoek betreffende het astrometrisch-geodetisch observatorium tot zijn recht te laten komen, zijn nog enkele punten van organisatorische en beleidsmatige aard in de aandacht aan te bevelen.

In bestuurlijk en wetenschappelijk constructief overleg tussen de diverse partijen zijn en/of worden nieuwe voorwaarden geschapen voor een doelmatig gebruik van kostbaar instrumentarium ten behoeve van waardevol astrometrisch en geodetisch wetenschappelijk onderzoek. Het is van primair belang dat de geboden en eventueel nog te maken voorzieningen in operationele zin ter beschikking komen en in stand worden gehouden. Hiertoe zal door partijen, bijvoorbeeld in de vorm van een *meerjarige samenwerkingsovereenkomst*, een regeling moeten worden getroffen.

De instrumentele bundeling die met het astrometrisch-geodetisch observatorium is gerealiseerd, ontleent zijn wetenschappelijke waarde in de eerste plaats aan de geografische vereniging van geodetische apparatuur met voorzieningen tot beoefening van de VLBI. Deze bundeling zal daarom wetenschappelijk het vruchtbaarst zijn als, van geodetische zijde, de VLBI-voorziening daadwerkelijk en programmatisch wordt benut. Daarom zullen *nieuwe initiatieven voor geodetische VLBI* moeten worden ontplooid.

Het overleg tussen partijen dat heeft geleid tot de oprichting van het astrometrisch-geodetisch observatorium en tot de formulering van een wetenschappelijk programma daarvoor, is zeer constructief en vruchtbaar gebleken. Om het rendement van de onderneming te maximaliseren is het gewenst dat in de toekomst structureel een vorm van werkinhoudelijk overleg inzake het observatorium blijft bestaan. Het is daarom aan te bevelen dat een *permanent overlegorgaan* wordt gevormd, waarin met name het waarnemingsprogramma en de daartoe gewenste voorzieningen aan de orde blijven.

Afkortingen

(voor zover niet ter plaatse verklaard)

AGRS.NL	Actief GPS Referentie Systeem in Nederland
ASTRON	Stichting Astronomisch Onderzoek in Nederland (NWO)
CCRF	Conventional Celestial Reference Frame
CDP	Crustal Dynamics Project (NASA)
DEOS	Delft Institute for Earth-Oriented Space Research (TUD)
GPS	Global Positioning System
IGS	International GPS Service
InSAR	Interferometrische Synthetische Apertuur Radar
JIVE	Joint Institute for VLBI in Europe
KNMI	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut
NAP	Normaal Amsterdams Peil
NASA	National Aeronautics and Space Administration (USA)
NWO	Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek
RWS-MD	Meetkundige Dienst van de Rijkswaterstaat
SLR	Satellite Laser Ranging
SRT	Synthese Radiotelescoop te Westerbork
TNO	Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek
TUD	Technische Universiteit Delft
VLBI	Very Long Baseline Interferometry
VMSG	Vening Meinesz Onderzoekschool voor Geodynamica
WEGENER	Working Group of European Geoscientists for the Establishment of Networks for Earthquake Research