

De geodetische referentiestelsels van Nederland

Geodetic reference frames in the Netherlands

Arnoud de Bruijne, Joop van Buren, Anton Kösters, Hans van der Marel

De geodetische referentiestelsels van Nederland

Definitie en vastlegging van ETRS89, RD en NAP en hun onderlinge relaties

Geodetic reference frames in the Netherlands

Definition and specification of ETRS89, RD and NAP, and their mutual relationships

Arnoud de Bruijne (Rijkswaterstaat AGI)
Joop van Buren (Kadaster)
Anton Kösters (Rijkswaterstaat AGI)
Hans van der Marel (TU Delft / Delft University of Technology)

Met bijdragen van / With contributions from:

Gert Brand (Rijkswaterstaat AGI)
Arnoud de Bruijne (Rijkswaterstaat AGI)
Joop van Buren (Kadaster)
Marc Crombaghs (Rijkswaterstaat AGI)
Anton Kösters (Rijkswaterstaat AGI)
Jochem Lesparre (Kadaster)
Hans van der Marel (TU Delft / Delft University of Technology)
Ronald Molendijk (Rijkswaterstaat AGI)
Kyra van Onselen (Rijkswaterstaat AGI)
Herman Quee (NCG)
Ted Schut (Kadaster)

De geodetische referentiestelsels van Nederland
Definitie en vastlegging van ETRS89, RD en NAP en hun onderlinge relaties
Geodetic reference frames in the Netherlands
Definition and specification of ETRS89, RD and NAP, and their mutual relationships
Arnoud de Bruijne, Joop van Buren, Anton Kösters, Hans van der Marel
Nederlandse Commissie voor Geodesie Netherlands Geodetic Commission 43
ISBN 90 6132 291 X

Published by: NCG, Nederlandse Commissie voor Geodesie, Netherlands Geodetic Commission,
Delft, The Netherlands

Printed by: Optima Grafische Communicatie, Optima Graphic Communication, Rotterdam,
The Netherlands

Cover illustration: GPS-kernet / GPS network, Net van de 5e Nauwkeurigheidswaterpassing / The grid
used for the 5th precise levelling programme

NCG, Nederlandse Commissie voor Geodesie, Netherlands Geodetic Commission
P.O. Box 5058, 2600 GB Delft, The Netherlands
T: +31 (0)15 278 28 19
F: +31 (0)15 278 17 75
E: nCG@lr.tudelft.nl
W: www.ncg.knaw.nl

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

The NCG, Nederlandse Commissie voor Geodesie, Netherlands Geodetic Commission is part of
the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences (KNAW)

Inhoudsopgave / Contents

| | |
|---|------|
| Voorwoord | ix |
| Foreword | x |
| Samenvatting | xi |
| Summary | xiii |
| | |
| 1 Inleiding | 1 |
| | |
| 2 Historische achtergronden | 4 |
| 2.1 ETRS89 | 4 |
| 2.1.1 Inleiding | 4 |
| 2.1.2 International Terrestrial Reference System (ITRS) | 5 |
| 2.1.3 European Terrestrial Reference System (ETRS89) | 7 |
| 2.1.4 Realisatie van ETRS89 in Nederland | 10 |
| 2.1.5 Het Actief GPS Referentiesysteem voor Nederland (AGRS.NL) | 11 |
| 2.1.6 World Geodetic System 1984 (WGS84) | 12 |
| 2.2 RD | 12 |
| 2.2.1 De primaire driehoeksmeting 1885 – 1904 | 12 |
| 2.2.2 Secundaire en lagere-orde metingen 1898 – 1928 | 13 |
| 2.2.3 Oprichting Bijhoudingsdienst der Rijksdriehoeksmeting 1930 | 13 |
| 2.2.4 Herziening en verschuiving van de oorsprong van het RD-net 1960 – 1978 | 14 |
| 2.2.5 Het gebruik van GPS en het GPS-kernetnet | 14 |
| 2.2.6 De huidige taken van de RD | 15 |
| 2.2.7 Relatie met het NAP | 16 |
| 2.3 NAP | 16 |
| 2.3.1 Voorlopers van het NAP | 16 |
| 2.3.2 De vroege nauwkeurigheidswaterpassingen | 17 |
| 2.3.3 De 5e Nauwkeurigheidswaterpassing | 20 |
| 2.3.4 Bijhouding van het NAP | 21 |
| 2.3.5 De geoïde van Nederland | 22 |
| | |
| 3 De status van de referentiestelsels per 1-1-2005 | 24 |
| 3.1 De realisatie van ETRS89 | 24 |
| 3.2 Het stelsel van de Rijksdriehoeksmeting | 25 |
| 3.2.1 De overwegingen tot herziening in 2000 | 25 |
| 3.2.2 De kwaliteit van het RD-puntenveld | 27 |
| 3.2.3 Verschillen in de GPS-kernetpunten | 28 |
| 3.2.4 Interpolatie van de verschillen | 29 |
| 3.2.5 De RD2000-definitie van het RD-stelsel | 31 |
| 3.2.6 Geldigheidsgebied van de definitie RD2000 | 33 |

| | |
|---|----|
| 3.2.7 Herziening van de parameters van de gelijkvormigheidstransformatie in 2004 | 34 |
| 3.3 De nieuwe NAP-publicatie per 1 januari 2005 | 35 |
| 3.3.1 De 5e Nauwkeurigheidswaterpassing | 35 |
| 3.3.2 Uitgangshoogte van het ondergronds merk in Amsterdam | 36 |
| 3.3.3 Herberekening van het primaire net | 38 |
| 3.3.4 Berekening van peilmerkhooftes | 39 |
| 3.3.5 Het geoidemodel van Nederland (NLGEO2004) | 40 |
| 3.4 RDNAPTRANS TM , de relaties tussen de stelsels | 44 |
| | |
| 4 Toekomstige bijhoudingen | 46 |
| 4.1 ETRS89-realisatie | 46 |
| 4.2 RD | 47 |
| 4.3 RDNAPTRANS TM | 47 |
| 4.4 NAP | 50 |
| | |
| 5 Referenties | 52 |
| 5.1 Literatuur | 52 |
| 5.2 Software | 55 |
| 5.3 Websites | 56 |
| 5.4 Gebruikte afkortingen | 56 |
| | |
| 6 Bijlagen | 58 |
| 6.1 Datumtransformaties | 58 |
| 6.2 Van geografische (φ, λ, h) naar geocentrische coördinaten (X, Y, Z) | 59 |
| 6.3 Van geocentrische (X, Y, Z) naar geografische coördinaten (φ, λ, h) | 59 |
| 6.4 Datumtransformatie van stelsel I naar stelsel II | 60 |
| 6.5 De kaartprojectie van de Rijksdriehoeksmeting | 61 |
| | |
| 1 Introduction | 65 |
| | |
| 2 The historical backgrounds | 68 |
| 2.1 ETRS89 | 68 |
| 2.1.1 Introduction | 68 |
| 2.1.2 International Terrestrial Reference System (ITRS) | 69 |
| 2.1.3 European Terrestrial Reference System (ETRS89) | 70 |
| 2.1.4 Realisation of ETRS89 in the Netherlands | 72 |
| 2.1.5 The Active GPS Reference System for the Netherlands (AGRS.NL) | 73 |
| 2.1.6 World Geodetic System 1984 (WGS84) | 74 |
| 2.2 The RD | 74 |
| 2.2.1 The primary triangulation of 1885 – 1904 | 75 |
| 2.2.2 Secondary and lower-order measurements, 1898 – 1928 | 75 |
| 2.2.3 Foundation of the Rijksdriehoeksmeting Maintenance department, 1930 | 75 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 2.2.4 | The revision and shift of the origin of the RD grid, 1960 – 1978 | 76 |
| 2.2.5 | The use of GPS and the GPS base network | 76 |
| 2.2.6 | The current duties of the RD | 77 |
| 2.2.7 | Relationship with the NAP | 77 |
| 2.3 | Normaal Amsterdams Peil (NAP) | 78 |
| 2.3.1 | Predecessors of the NAP | 78 |
| 2.3.2 | Early precise levelling | 78 |
| 2.3.3 | The 5th precise levelling | 81 |
| 2.3.4 | Maintenance of the NAP | 82 |
| 2.3.5 | The geoid of the Netherlands | 83 |
| 3 | The status of the reference frames as at 1-1-2005 | 84 |
| 3.1 | The realisation of ETRS89 | 84 |
| 3.2 | The Rijksdriehoeksmeting frame | 85 |
| 3.2.1 | The reasons for the revision in 2000 | 85 |
| 3.2.2 | The quality of the RD field of points | 87 |
| 3.2.3 | Differences in the GPS base network points | 87 |
| 3.2.4 | Interpolation of the differences | 88 |
| 3.2.5 | The RD2000 definition of the RD frame | 89 |
| 3.2.6 | Validity region of the RD2000 definition | 90 |
| 3.2.7 | Revision of the parameters of the similarity transformation in 2004 | 91 |
| 3.3 | The new NAP publication of 1 January 2005 | 92 |
| 3.3.1 | The 5th precise levelling | 92 |
| 3.3.2 | Basis height of the underground benchmark in Amsterdam | 93 |
| 3.3.3 | Recalculation of the primary grid | 94 |
| 3.3.4 | Calculation of the height benchmarks | 95 |
| 3.3.5 | The geoid model of the Netherlands (NLGEO2004) | 96 |
| 3.4 | RDNAPTRANS TM , the relationships between the frames | 98 |
| 4 | Future maintenance | 100 |
| 4.1 | ETRS89 realisation | 100 |
| 4.2 | RD | 101 |
| 4.3 | RDNAPTRANS TM | 101 |
| 4.4 | NAP | 104 |
| 5 | References | 106 |
| 5.1 | Literature | 106 |
| 5.2 | Software | 110 |
| 5.3 | Websites | 110 |
| 5.4 | Abbreviations | 111 |
| 6 | Appendices | 112 |
| 6.1 | Datum transformations | 112 |
| 6.2 | Conversion of geographic coordinates (φ , λ , h) into geocentric coordinates (X , Y , Z) | 113 |

| | |
|--|-----|
| 6.3 Conversion of geocentric coordinates (X, Y, Z) into geographic coordinates (φ, λ, h) | 113 |
| 6.4 Datum transformation from Frame I to Frame II | 114 |
| 6.5 The map projection of the Rijksdriehoeksmeting | 115 |

Voorwoord

Deze publicatie van de Nederlandse Commissie voor Geodesie (NCG) behandelt de nieuwe inrichting van de geodetische referentiestelsels van Nederland. De NCG heeft deze uitgave verzorgd om te bereiken dat alle aspecten op één plaats en in onderlinge samenhang toegankelijk zijn voor alle belanghebbenden en geïnteresseerden, en om verantwoording af te leggen over de besluitvorming. Er wordt ingegaan op de motieven voor de herziening van de klassieke stelsels Rijksdriehoeksmeting (RD) en Normaal Amsterdams Peil (NAP), op de noodzaak het stelsel uit te breiden met een geoïde met centimeterprecisie en op het verloop van het herzieningstraject in de jaren 1998 – 2004. En tenslotte wordt de vernieuwde inrichting van de Nederlandse stelsels voor planimetrische en hoogteligging beschreven die hun eigensoortige karakter behouden, maar onderdeel zijn van de Europese en wereldwijde stelsels. Met de koppeling aan de internationale stelsels is de geodetische referentie van Nederland in wezen dynamisch geworden – een geheel nieuwe eigenschap –, terwijl het uitgangspunt blijft dat RD- en NAP-coördinaten zo constant mogelijk gehouden moeten worden.

Het besluitvormingstraject is afgelegd in intensief overleg met het beroepsveld. Hoogtepunten hierin waren de NCG-themavergadering op 14 april 1999 in Delft, de presentatie door het Kadaster, Rijkswaterstaat AGI (voorheen de Meetkundige Dienst) en de NCG op 27 september 2000 in Hoevelaken, het themanummer van Geodesia in die maand, en de door het Kadaster en AGI georganiseerde themadag *De inrichting van de GPS-infrastructuur van Nederland – wat vindt u ervan?* op 17 april 2002 in Apeldoorn. Telkens gaven daar vele tientallen aanwezigen blijk van hun interesse en actieve inbreng. Het is op zijn plaats om ter gelegenheid van het verschijnen van deze publicatie nog eens aan te geven dat Nederland niet alleen een bijzondere inrichting van de geodetische referentiestelsels kent, maar dat ook de organisatorische achtergrond daarvan uniek is. In tegenstelling tot alle andere (Europese) landen kent Nederland hiervoor geen nationaal of overheidsinstituut, maar wordt dit gebied behartigd door een intensieve en permanente samenwerking van twee overheidsdiensten met een geodetische kerntaak (Kadaster en AGI) en de TU Delft, gecoördineerd door de NCG. Op het eerste gezicht een gecompliceerde constellatie? Zij heeft in ieder geval een toekomstvast stelsel ontworpen en gerealiseerd; dit is wetenschappelijk verantwoord én doet recht aan de wensen van de operationele gebruikers.

Dr.ir. Herman Quee,
Voorzitter Subcommissie Geometrische Infrastructuur NCG

Foreword

This publication from the Netherlands Geodetic Commission (NCG) reviews the new design of the Dutch geodetic reference frames. The NCG drew up this publication to ensure that all aspects of the issue are accessible – in one document and brought into relationship with each other – to all those involved and interested in the subject; it also serves to give account of the relevant decision-making. The publication reviews the motives for the revision of the classical frames used in the Netherlands, i.e. the Rijksdriehoeksmeting (RD) and the Normaal Amsterdamse Peil (NAP); it also explains the need for the expansion of the frame to incorporate a geoid offering a precision of centimetres, and discusses the course of the revision programme carried out in the years 1998 – 2004. The publication concludes with a description of the renewed design of the Dutch frames for planimetric and height positioning, each of which have retained their specific character but have also been integrated in the European and global frames. On the creation of a link with the international frames the geodetic reference of the Netherlands has, in essence, acquired a dynamic character – an entirely new property – whilst it continues to be based on RD and NAP coordinates that remain as constant as possible.

The decision-making was effected in close consultations with the field – the highlights of which were the NCG thematic meeting of 14 April 1999 in Delft, the presentation by the Kadaster, Rijkswaterstaat AGI (formerly the Survey Department) and the NCG on 27 September 2000 in Hoevelaken, the theme issue of *Geodesia* in that same month, and the *De inrichting van de GPS-infrastructuur van Nederland - wat vindt u ervan?* ('The design of the Dutch GPS infrastructure – what's your opinion?') theme day organized by the Kadaster and AGI on 17 April 2002 in Apeldoorn. All meetings were attended by dozens of visitors, all of whom were extremely interested in the subject and made an active contribution to the proceedings. The publication of this report also offers an opportunity to draw attention to the fact that the Netherlands' geodetic reference frames are not only of an unusual design; they are also organized in a unique manner. The Netherlands, in contrast to all other (European) countries, has not assigned the duties to one national or government institution; the country has instead opted for an organization in which two government departments assigned a core geodetic duty (the Kadaster and the AGI) work together in close and permanent collaboration with the Delft University of Technology, whereby the NCG plays a coordinative role. This might initially seem to be a rather complex constellation; however, it has in any case succeeded in designing and realising a system that can cater for future changes – and, moreover, in arriving at a new system that is both justifiable from a scientific perspective and accommodates the needs of the operational users.

Dr Herman Quee,
Chairman of the Subcommittee Geometric Infrastructure NCG

Samenvatting

Voor een goede bepaling van ligging en hoogte wordt gebruik gemaakt van eenduidige en homogene geodetische referentiestelsels. In Nederland zijn dit de stelsels van de Rijksdriehoeksmeting (RD) voor de ligging en het Normaal Amsterdams Peil (NAP) voor de hoogte. Traditioneel wordt het RD beheerd door het Kadaster en het NAP door Rijkswaterstaat.

Ten gevolge van de opkomst van satellietplaatsbepaling hebben er ingrijpende veranderingen plaatsgevonden aan deze geodetische referentiestelsels. Een landmeter kan met gebruikmaking van GPS (Global Positioning System) met hetzelfde instrument op hetzelfde moment zowel ligging als hoogte meten. Hiertoe wordt van één driedimensionaal geodetisch referentiestelsel gebruik gemaakt, te weten het European Terrestrial Reference System (ETRS89), dat in Nederland gezamenlijk wordt bijgehouden door het Kadaster en Rijkswaterstaat.

Voor het praktisch gebruik van GPS als meettechniek is de definitie van het RD-stelsel gekoppeld aan ETRS89. Het gebruik van GPS bracht echter vervormingen van het RD-stelsel aan het licht, die gemodelleerd worden in de transformatie RDNAPTRANSTM2004. Verder is de geoïde cruciaal geworden door de inzet van GPS bij hoogtebepaling ten opzichte van NAP. Door verticale bodembeweging wordt de ruggengraat van het NAP verstoord en is grootschalige bijstelling van de hoogtes van ondergrondse merken – en daarom ook van peilmerken – nodig gebleken. Sinds 2005 gelden dan ook nieuwe NAP-hoogtes en al sinds 2000 geldt een nieuwe definitie van het RD-stelsel, opnieuw aangepast in 2004.

Twee subcommissies van de NCG hebben zich de laatste jaren uitvoerig bezig gehouden met de herzieningen. Deze publicatie vormt de vastlegging van ETRS89, RD en NAP en hun onderlinge relaties. Naast een beschrijving van de historie van de referentiestelsels en de wijze van bijhouding ervan (met onder meer het AGRS.NL als basis van de geometrische infrastructuur van Nederland), wordt de status van de stelsels per 1 januari 2005 beschreven. Dit omvat de realisatie van ETRS89 via het AGRS.NL, de herziening en de nieuwe definitie van het RD-stelsel in 2004 en de nieuwe NAP-publicatie in 2005. De onderlinge relaties tussen de stelsels worden beschreven door de vernieuwde transformatie RDNAPTRANSTM2004, waarvan het nieuwe geoïdemodel NLGEO2004 en een model voor de vervormingen van het RD-stelsel deel uitmaken.

Tenslotte wordt aandacht besteed aan toekomstige bijhoudingen van ETRS89, RD en NAP. De continuïteit van de koppeling tussen enerzijds de traditionele stelsels en anderzijds de driedimensionale stelsels is van groot belang en ETRS89 zal die rol blijven vervullen. Het GPS-kernet en de AGRS.NL-referentiestations zullen steeds meer de centrale rol in de bijhouding van het RD-stelsel gaan vormen. Bijhouding van het

NAP blijft nodig, maar de primaire hoogtes zullen de komende decennia niet herzien hoeven te worden. Daarmee is de goede kwaliteit van de geodetische referentiestelsels voor het praktisch gebruik gegarandeerd.

Summary

Unambiguous and homogeneous geodetic reference frames are essential to the proper determination of locations and heights. The reference frames used in the Netherlands are the Rijksdriehoekmeting (RD) for locations and the Normaal Amsterdamse Peil (NAP) for heights. The RD has traditionally been managed by the Kadaster; the NAP by Rijkswaterstaat.

The emergence of satellite positioning has resulted in drastic changes to these geodetic reference frames. A surveyor is now offered one instrument, GPS (the Global Positioning System), capable of the *simultaneous* determination of locations and heights. This is possible by virtue of one three-dimensional geodetic reference system – the European Terrestrial Reference System (ETRS89) – which in the Netherlands is maintained in a collaborative arrangement between the Kadaster and Rijkswaterstaat.

GPS has been advanced as a practical measurement technique by linking the definition of the RD grid to ETRS89. Nevertheless the introduction of GPS also revealed distortions in the RD grid, which are modelled in the RDNAPTRANSTM2004 transformation. Furthermore, the use of the geoid model has become essential to the use of GPS in determining the height in comparison to NAP. Subsidence that has disrupted the backbone of the NAP gave cause to the need for a large-scale adjustment of the heights of the underground benchmarks and, in so doing, of the grid. Consequently new NAP heights have been introduced at the beginning of 2005; a new definition of the RD grid that had already been introduced in 2000 was once again modified in 2004.

During the past few years two NCG subcommissions have devoted a great deal of time to these modifications. This publication lays down ETRS89, the RD and the NAP, together with their mutual relationships. In addition to reviewing the history of the reference frames and the manner in which they are maintained (including, for example, the use of AGRS.NL as the basis for the Dutch geometric infrastructure), the publication also discusses the status of the frames as at 1 January 2005. This encompasses the realisation of ETRS89 via AGRS.NL, the revision and new definition of the RD grid in 2004, and the new NAP publication in 2005. The publication also describes the mutual relationships between the frames in the modernized RDNAPTRANSTM2004 transformation consisting of the new NLGEO2004 geoid model and a model for the distortions of the RD grid.

In conclusion, the publication also devotes attention to the future maintenance of the ETRS89, RD and NAP. The continuity of the link between the traditional frames and the three-dimensional frames is of great importance, and ETRS89 will continue to fulfil this linking role. The GPS base network and AGRS.NL reference stations will increasingly assume the leading role in the maintenance of the RD frame. The maintenance

of the NAP will continue to be necessary, although during the coming decades the the primary heights will not need revision. In so doing the high quality of the geodetic reference frames required for their use in actual practice will continue to be guaranteed.

1 Inleiding

De stelsels van de Rijksdriehoeksmeting (RD) en het Normaal Amsterdams Peil (NAP) zijn de meest bekende referentiestelsels van Nederland. Een geodetisch of landmeetkundig referentiestelsel is een norm voor ligging- en hoogtebepaling. Ligging en hoogte¹ worden weergegeven ten opzichte van een bepaalde referentie. Bijvoorbeeld: kadastrale grenzen worden weergegeven in RD, waterstanden worden weergegeven ten opzichte van het NAP. Een referentiestelsel biedt degene die tot taak heeft de ligging of hoogte van een object vast te leggen een middel om altijd en overal van dezelfde referentie gebruik te maken. Het referentiestelsel wordt traditioneel vastgelegd door aanwijsbare punten in het terrein en de beschrijvingen van deze punten, onder andere met coördinaten. Men kan hierbij denken aan GPS-kernetpunten en NAP-peilmerken.

Aan de basis van het referentiestelsel ligt de definitie van het stelsel, ook wel het referentiesysteem² genoemd. Dit is een verzameling afspraken, nodig voor de totstandkoming van het referentiestelsel. Voor degene die verantwoordelijk is voor de bijhouding van het referentiestelsel is het referentiesysteem van belang; voor de dagelijkse gebruiker minder, zolang de definitie maar eenduidig is en niet onnodig en merkbaar wijzigt. Referentiestelsels zijn van belang voor een eenduidige ligging- en/of hoogtebepaling. Immers, men wil altijd en overal ten opzichte van dezelfde referentie kunnen werken. In Nederland is dit zelfs 'wettelijk' vastgelegd.

Het totaal van (geodetische of landmeetkundige) referentiestelsels wordt ook wel de *geometrische infrastructuur* genoemd. Sinds 1930 is de geometrische infrastructuur in Nederland gescheiden bijgehouden; het RD-stelsel door het Kadaster en het NAP door Rijkswaterstaat. Deze scheiding had voornamelijk een praktische reden, namelijk omdat het referentiestelsel een middel is in het primaire proces van de desbetreffende diensten: de vastlegging van kadastrale grenzen en het waterbeheer. Bovendien bleken de gewenste vastleggingen van het referentiestelsel in het terrein (kerktorens versus ondergrondse merken) en de technieken voor de bijhouding van beide referentiestelsels (triangulatie versus waterpassen) voor beide toepassingen bijna volledig complementair, zodat beide referentiestelsels los van elkaar konden worden ingericht.

Door de opkomst van satellietplaatsbepaling is dit veranderd. Het Global Positioning System (GPS) stelt de landmeter in staat met hetzelfde instrument op hetzelfde moment

¹ In deze publicatie wordt horizontale positie telkens aangeduid met ligging; een positie bestaat dus uit een ligging en een hoogte.

² In Engelstalige literatuur wordt gesproken van *Reference Systems* en *Reference Frames*, waar hier gesproken wordt van respectievelijk referentiesystemen en referentiestelsels. In het Nederlands wordt in het algemeen vaak de term coördinaatsysteem gebruikt.

zowel ligging als hoogte te meten. Ondanks het feit dat het uiteindelijke doel van een meting vaak toch nog slechts een horizontale positie of een hoogte betreft, wordt wel van vastleggingen van punten in één driedimensionaal referentiestelsel gebruik gemaakt. Het European Terrestrial Reference System (ETRS89) is het Europese referentiestelsel voor toepassingen van satellietplaatsbepaling en is daarmee ook van belang voor Nederland. De vastleggingen in het terrein van ETRS89 zijn anders dan voor RD en NAP. ETRS89 kent namelijk de vorm van punten in open gebied, geschikt voor het tijdelijk opstellen van GPS-meetapparatuur (GPS-kernet) en permanente opstellingen (AGRS.NL, RTK-referentiestationen). De bijhouding van ETRS89 in Nederland is een taak die het Kadaster en Rijkswaterstaat gezamenlijk hebben opgepakt, in het verlengde van hun meer traditionele taken. Ook private initiatieven voor het gebruik van GPS komen in Nederland voor, waarbij de taken zich vooral richten op dienstverlening aan de eindgebruikers.

Deze publicatie beschrijft de definitie en de vastlegging van de belangrijkste geodetische referentiestelsels in Nederland, te weten het stelsel van de RD, het NAP en ETRS89. Aanleiding hiervoor zijn vooral de veranderingen die sinds 1990 hebben plaatsgevonden aan deze stelsels. Deze veranderingen zijn veroorzaakt door externe factoren, die hun weerslag hebben gehad op de kwaliteitseisen aan de referentiestelsels.

Op de eerste plaats is GPS een goed en onafhankelijk controlemiddel op de geometrische kwaliteit van het RD-net gebleken. Mede hierdoor zijn vervormingen tot circa 25 cm in het RD-net aangetoond. Deze vervormingen zijn een te verwachten resultaat van de traditionele meettechnieken, maar staan een goed gebruik van GPS als meettechniek in de weg. Daarom is de definitie van het RD-stelsel gekoppeld aan ETRS89, dat voor praktische (GPS-)toepassingen binnen Nederland geen merkbare vervormingen heeft. Verder heeft het gebruik van GPS ertoe geleid, dat de geoïde, die in de praktische landmeetkunde met waterpassing niet van belang was, een onmisbare rol is gaan vervullen bij de inzet van GPS bij hoogtebepaling ten opzichte van het NAP.

Een tweede invloed is het fenomeen van verticale bodembeweging³. De aarde is een dynamisch geheel. Onder invloed van geofysische processen (zie onder andere [Kooi et al., 1998a], [Brand et al., 2002a]) veranderen hoogtes van het maaiveld en van objecten op het aardoppervlak, zeker bezien over een tijdsspanne van tientallen tot honderd jaar. Meer specifiek verandert de ondergrond in hoogte, wat resulteert in verticale beweging van vastleggingen door ondergrondse merken. Dit betekent dat een referentiestelsel voor hoogte onderhoud vraagt, dat wil zeggen dat hoogtes regelmatig gecontroleerd en waar nodig bijgesteld moeten worden.

Het onderwerp van herdefinitie van de referentiestelsels is de afgelopen jaren een centraal thema geweest voor de Subcommissie Geometrische Infrastructuur en de Subcommissie Bodembeweging en Zeespiegelvariatie van de Nederlandse Commissie voor Geodesie (NCG). Daarnaast is een flink aantal artikelen verschenen over deze onder-

³ Horizontale bodembeweging is vooralsnog niet van belang in dit verband.

werpen, waaronder een speciaal themanummer van Geodesia (nr. 2000-9). Gezien het belang dat het Kadaster en Rijkswaterstaat hechten aan de ingevoerde herzieningen en de vastlegging er van, leek het wenselijk om hierover een gezamenlijke publicatie uit te geven. Vanwege de sterke betrokkenheid van de NCG, met name haar Subcommissie Geometrische Infrastructuur, was een publicatie in de NCG-reeks voor de hand liggend.

Het doel van deze publicatie is vooral een goede vastlegging te maken van de referentiestelsels van Nederland, peildatum 1 januari 2005. Na deze inleiding worden in hoofdstuk 2 nog eens kort de achtergronden van de referentiestelsels ETRS89, RD en NAP beschreven. In hoofdstuk 3 komt dan de feitelijke definitie van de referentiestelsels aan bod, inclusief hun onderlinge relaties. Vervolgens wordt in hoofdstuk 4 de toekomstige bijhouding geschetst.

2 Historische achtergronden

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste referentiestelsels van Nederland en de wijze van bijhouding. Allereerst wordt (conform de indeling van meerdere hoofdstukken, niet conform de chronologie van de stelsels) ingegaan op ETRS89, de Europese realisatie van een referentiestelsel voor satellietplaatsbepaling. In dit verband zal ook het Actief GPS ReferentieSysteem voor Nederland (AGRS.NL) worden besproken. Vervolgens komt het stelsel van de RD ter sprake en tot slot het NAP, inclusief de geoïde van Nederland.

2.1 ETRS89

2.1.1 Inleiding

De moderne satellietpuntsbepaling heeft een revolutie in wereldwijde referentiestelsels teweeggebracht. Sinds 1980 spelen Satellite Laser Ranging (SLR) en Very Long Baseline Interferometry (VLBI) een belangrijke rol bij de definitie van het International Terrestrial Reference System (ITRS). Echter, het ITRS is pas in 1992 wereldwijd toegankelijk geworden met de komst van het GPS-systeem en het wereldwijde 'tracking'-netwerk van de International GPS Service (IGS) en de verschillende regionale en nationale verdichtingen van het IGS-netwerk, waaronder het EUREF Permanent GPS Network (EPN) en AGRS.NL. De jaarlijkse oplossingen van het IGS-netwerk en de regionale verdichtingen vormen de omvangrijkste bijdrage aan de verschillende realisaties van ITRS. Ook het zeer bekende World Geodetic System 1984 (WGS84), dat gebruikt wordt voor de door de GPS-satellieten uitgezonden baanparameters, is sinds 1996 gekoppeld aan ITRS.

Het ITRS vervult een belangrijke rol bij het bestuderen van de geodynamica van de aarde. Het is echter niet geschikt als een Europees systeem voor 'georeferencing' (coördinaatbepaling). Alle punten in Europa hebben namelijk in ITRS een min of meer dezelfde beweging van enkele centimeters per jaar (zie figuur 1). Daarom heeft de European REference Frame (EUREF, de subcommissie voor Europa van commissie 1.3 van de International Association of Geodesy (IAG)) in 1989 het ETRS89, dat met de Europese plaat meebeweegt, ingevoerd. Op het tijdstip 1989.0 komen de posities in ETRS89 en ITRS89 overeen. Posities en snelheden in ETRS89 zijn om te rekenen naar ITRS, en omgekeerd, door middel van transformatieformules [Altamimi en Boucher, 2001]. Echter, voor praktisch gebruik kan in ETRS89, zeker in Nederland, de snelheid meestal worden verwaarloosd. Met behulp van diverse GPS-campagnes en het EPN is ETRS89 verdicht naar alle Europese landen. Met behulp van de campagnes van het NEtherlands REference Frame (NEREF), het GPS-kernnet en AGRS.NL is ETRS89 verder verdicht in Nederland en zijn transformatieparameters voor RD bepaald. Aangezien

Het ITRS is gedefinieerd in IUGG-resolutie No. 2, Wenen, 1991. De belangrijkste kenmerken zijn [McCarthy, 1996]:

- een geocentrisch systeem, waarbij de oorsprong samenvalt met het massacentrum van de aarde, inclusief oceanen en atmosfeer;
- de eenheid van lengte is de meter (SI), overeenkomstig IAU- en IUGG-resoluties;
- op het tijdstip 1984.0 is de oriëntatie van de assen gelijk aan die van BIH;
- het systeem is kinematisch (positie en snelheid);
- het tektonisch model NNR-NUVEL1A ('no net rotation') geldt;
- de GRS80-ellipsoïde en aanverwante IUGG-/IAG-definities gelden.

Het ITRS wordt gerealiseerd door de coördinaten en snelheden van een set van goed gedefinieerde waarnemingsstations te publiceren (zie figuur 1). Dit heet het International Terrestrial Reference Frame (ITRF). Daarbij wordt gebruik gemaakt van verschillende waarnemingstechnieken: VLBI, SLR, Lunar Laser Ranging (LLR), het Franse DORIS-systeem (Doppler Orbitography and Radiolocation Integrated by Satellite) en GPS (IGS en EUREF). De waarnemingen worden door diverse analysecentra verwerkt tot 'techniek'-oplossingen. Deze oplossingen, die bestaan uit coördinaten, snelheden en de bijbehorende covariantie- (of normaal-)matrix, worden door IERS gecombineerd tot een homogene set coördinaten en snelheden. Op deze manier kwamen tussen 1992 en heden (2004) zes nieuwe, verbeterde, realisaties van ITRS beschikbaar. In tabel 1 is het aantal oplossingen aangegeven dat aan de laatste zes realisaties van ITRS heeft bijgedragen.

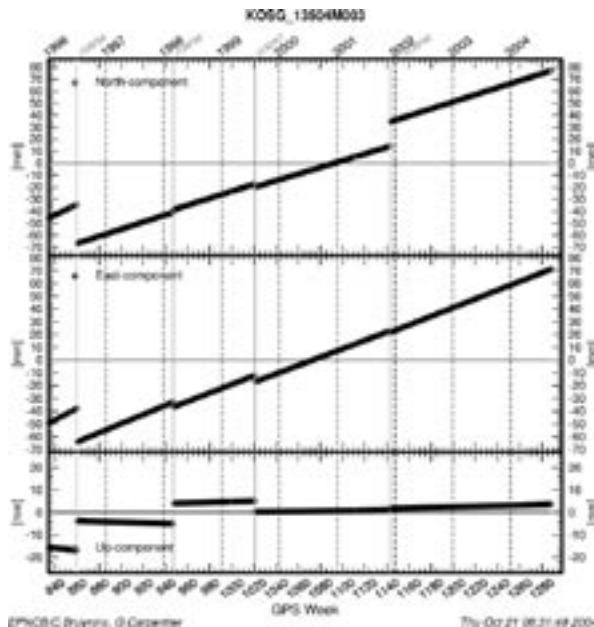
Het onderscheid tussen de begrippen referentiesysteem ('reference system') en referentiestelsel ('reference frame') is belangrijk, hoewel deze begrippen vaak door elkaar gebruikt worden. Een referentiestelsel is een set van punten met coördinaten, snelhe-

| | VLBI | SLR | LLR | IGS | EUREF | DORIS | Overige | Totaal |
|----------|------|-----|-----|-----|-------|-------|---------|--------|
| ITRF2000 | 3 | 9 | 2 | 6 | 2 | 3 | 12 | 37 |
| ITRF97 | 4 | 5 | | 5 | 1 | 3 | 1 | 19 |
| ITRF96 | 4 | 2 | | 6 | 2 | 3 | | 17 |
| ITRF94 | 4 | 2 | | 3 | | 3 | | 12 |
| ITRF93 | 6 | 2 | 4 | 1 | | | 1 | 14 |
| ITRF92 | 5 | 6 | 3 | 6 | | | | 17 |

Tabel 1. Het aantal oplossingen dat is gebruikt voor ITRF. In ITRF94 zijn 2 VLBI-, 5 SLR-, 4 LLR- en 3 IGS-oplossingen, die zijn aangemerkt als 'secondary solutions', niet meegeteld. De coördinaten worden gegeven ten opzichte van een referentietijdstip. Met behulp van de gepubliceerde snelheid is voor elk station de positie op ieder willekeurig tijdstip uit te rekenen. Het referentietijdstip is verschillend: voor ITRF2000, ITRF97 en ITRF96 is dat 1997.0; voor ITRF94 1993.0; voor ITRF93 1993.0 en 1988.0; voor ITRF92 en alle voorgaande realisaties 1988.0.

den, etc., die een ideaal referentiesysteem realiseren. De coördinaten van de diverse realisaties zullen over het algemeen verschillen, omdat vaak voor recente realisaties nieuw waarnemingsmateriaal beschikbaar is, of doordat het datum opnieuw gereali-seerd is. Maar ze zullen in principe, binnen de ruis van de metingen, hetzelfde systeem beschrijven.

De verschillende definities en conventies zijn duidelijk terug te vinden in figuur 2. Deze figuur geeft de coördinaten van het IGS-station Kootwijk als functie van de tijd. Duidelijk zichtbaar zijn discontinuïteiten ten gevolge van verschillende realisaties van ITRF.



Figuur 2. De coördinaten van Kootwijk in ITRF.

2.1.3 European Terrestrial Reference System (ETRS89)

ETRS89 is een Europees referentiesysteem voor geodesie en navigatie in Europa voor de uitwisseling van (inter)nationale GIS-datasets en voor geodynamische studies in Europa. ETRS89 is identiek aan ITRF89 op 1989.0, maar in tegenstelling tot ITRF89 beweegt ETRS89 mee met de Europese plaat. Dit heeft het grote voordeel dat het merendeel van de Europese punten, zeker in Nederland, een te verwaarlozen snelheid heeft in ETRS89 (zie figuur 4). Voor veel praktische toepassingen volstaat het daarom alleen de coördinaten te publiceren. Coördinaten in ETRS89 zijn om te rekenen naar de verschillende ITRF-realisaties met behulp van een eenvoudige transformatieformule.

Het ETRS89-systeem wordt onderhouden door EUREF (EUropean REference Frame). EUREF is de subcommissie voor Europa van IAG-commissie 1.3 voor regionale referentiestelsels en is voortgekomen uit RETRIG (Réseau Européen de Triangulation) en UELN (Unified European Levelling Network) en is een voortzetting van een lange Europese samenwerking sinds 1950. De EUREF-lidstaten komen jaarlijks bijeen. Tussentijdse activiteiten worden behartigd door de EUREF Technical Working Group, die drie keer per jaar bijeenkomt. De belangrijkste activiteiten van EUREF zijn [Adam et al., 1999]:

- verdichting van het ETRS89 door middel van GPS-campagnes;
- EUREF Permanent GPS Network (EPN, regionale verdichting van het IGS-netwerk);
- United European Levelling Network (UELN-95/88);
- European Vertical GPS Reference Network (EUVN);
- European Vertical Reference System (EVRS).

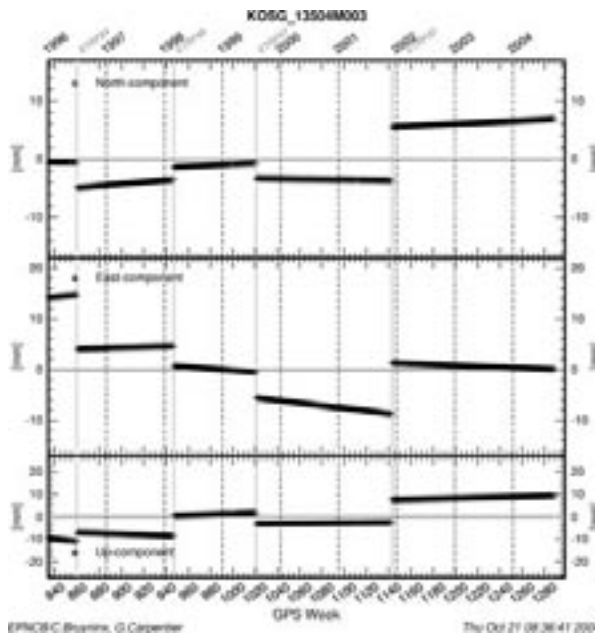
Het doel van EPN is het IGS-netwerk in Europa verder te verdichten. Het EPN bestaat uit bijna honderd GPS-stations (zie figuur 3). Slechts een deel daarvan is ook een IGS-station. Voor Nederland nemen de IGS-stations Kootwijk en Westerbork en de AGRS. NL-referentiestationen Delft, Eijsden en Terschelling deel aan het netwerk. Elk station wordt minstens door drie (van het totaal van vijftien) EUREF-analysecentra verwerkt. De oplossingen worden wekelijks berekend en vormen daarmee de meest nauwkeurige en actuele realisatie van ITRS en ETRS in Europa. De wekelijkse oplossingen worden verder gecombineerd tot jaarlijkse oplossingen en vervolgens gebruikt bij de berekening van ITRF (zie tabel 1). Het centrale bureau voor EPN is in Brussel gevestigd.



Figuur 3. Het netwerk van EPN-stations. Bron: Carine Bruyninx, ORB.

Posities en snelheden in ITRS zijn om te rekenen naar ETRS89 en omgekeerd door middel van transformatieformules [Altamimi en Boucher, 2001]. Daarbij wordt gebruik gemaakt van verschillende transformatieparameters voor de verschillende realisaties van ITRS, zoals ITRF2000, ITRF97, etc. Figuur 4 geeft de tijdserie van Kootwijk in ETRS89. Deze figuur is berekend uit figuur 2 door de transformaties uit [Altamimi en Boucher, 2001] te gebruiken. Dit zijn dus de officiële ITRF-coördinaten getransformeerd naar ETRS89. De naar ETRS89 getransformeerde ITRFyy-coördinaten worden ook wel aangeduid met ETRFyy ('yy' staat voor het jaartal). Let wel, gebruik van de aanduiding ETRFyy is alleen toegestaan voor de getransformeerde ITRFyy-coördinaten. Wat direct opvalt in de figuur is dat, hoewel de snelheid vrijwel nihil is (wat natuurlijk de bedoeling was), de sprongen in de tijdserie, in tegenstelling tot wat men misschien zou verwachten, niet (geheel) verdwenen zijn. Dit komt doordat de ITRS-coördinaten van individuele stations in de loop van de tijd steeds verbeterd zijn. Tevens is met de overgang van ITRF97 naar ITRF2000 voor de snelheid van de Eurasische plaat uitgegaan van de ITRF-waarde in plaats van de NUVEL1A-waarde. Dit heeft natuurlijk de nodige consequenties bij het terugrekenen naar epoche 1989.0 die gebruikt wordt voor ETRS89.

De andere stations in Nederland vertonen gelijksoortige sprongen in ETRS89 als Kootwijk. De verleiding is daarom groot om nieuwe realisaties van ETRS89 in Nederland door een gelijkvormigheidstransformatie aan te sluiten op oudere realisaties. Toch is deze aanpak fundamenteel onjuist. Het doel is namelijk een homogeen Europees en mondiaal stelsel te creëren. De alternatieve aanpak leidt onherroepelijk weer tot



Figuur 4. De coördinaten van Kootwijk in ETRS89.

een verzameling eilandjes, doet alle huidige en toekomstige verbeteringen in ITRS en ETRS89 teniet en blijft in de toekomst leiden tot problemen met de uitwisseling van data. Een dergelijke aanpak is wel aan te raden voor louter nationale stelsels, zoals RD. Ook is het aan te raden om bij de uitwisseling en het gebruik van ETRS89-coördinaten te vermelden op welke realisatie van ITRS de coördinaten zijn gebaseerd; bijvoorbeeld "coördinaten in ETRS89 voor epoche 2000.10 op basis van ITRF2000".

2.1.4 Realisatie van ETRS89 in Nederland

In Europa werd in 1989 met de EUREF89-GPS-campagne de basis gelegd voor ETRS89. Tijdens de EUREF89-campagne werd in Nederland gedurende een week op vier punten (Delft, Kootwijk, Westerbork en Huisduinen) gemeten. De vier EUREF-punten in Nederland werden vervolgens in NEREF-campagnes in 1990 en 1991 tot dertien punten verdicht. Op basis van deze punten werden transformatieparameters bepaald tussen RD/NAP en ETRS89. De Nederlandse EUREF-punten zijn in 1993 voor een tweede maal waargenomen tijdens de EUREF-D/NL-93-campagne. In 1994 werd een gecombineerde NEREF/MAREO-campagne uitgevoerd, waarbij de NEREF-punten en een aantal peilmeetstations langs de Nederlandse kust nogmaals werden waargenomen. De gecombineerde oplossing van NEREF/MAREO90, NEREF91 en NEREF/MAREO94 werd in 1997 gepubliceerd [Brand et al., 1997]. Deze werd gebruikt voor het bepalen van de officiële transformatieparameters voor het Nederlandse datum, bij de berekening van de 'De Min-geoïde' [De Min, 1996] en voor de aansluiting van het GPS-kernet.

Met behulp van het GPS-kernet is ETRS89 verder verdicht in Nederland. Het GPS-kernet omvat 415 punten in Nederland die speciaal geschikt zijn voor het uitvoeren van GPS-metingen. De punten van het GPS-kernet zijn aangesloten aan omliggende RD- en NAP-punten, terwijl het net als geheel is aangesloten aan ETRS89 door middel van NEREF- en AGRS.NL-punten.

De meest nauwkeurige realisatie van ETRS89 in Nederland wordt echter gevormd door het in 1997 operationeel geworden AGRS.NL, dat bestaat uit vijf referentiestations die permanent GPS-signalen registreren. De GPS-data worden via het internet beschikbaar gesteld. Dit stelt een GPS-gebruiker in staat om op vrijwel iedere locatie in Nederland posities in ETRS89 te bepalen.

Het AGRS.NL en de nieuwste realisatie van de coördinaten van de referentiestations van het AGRS.NL worden beschreven in paragraaf 2.1.5 en 3.1. Na de voltooiing van het GPS-kernet in 1997 worden de punten van dit net bijgehouden door periodieke bepalingen per punt ten opzichte van de AGRS.NL-referentiestations en waterpassingen volgens de tweede-orde normen (zie ook paragraaf 2.2.5).

2.1.5 Het Actief GPS Referentiesysteem voor Nederland (AGRS.NL)

In Nederland is een vijftal referentiepunten uitgerust met permanent opererende GPS-ontvangers. Deze punten vormen het AGRS.NL en is in 1997 in eerste instantie opgezet in een samenwerkingsverband tussen de NCG, het Kadaster, de Meetkundige Dienst (nu: AGI) van Rijkswaterstaat en de faculteit der Geodesie van de Technische Universiteit Delft (TU Delft). Sinds 1997 wordt het AGRS.NL geëxploiteerd door het Kadaster en Rijkswaterstaat AGI. AGRS.NL bestaat uit vijf referentiestations (Apeldoorn, Delft, Eijsden, Terschelling en Westerbork) en een centraal rekencentrum bij het Kadaster in Apeldoorn. Het rekencentrum draagt zorg voor de opslag en de verspreiding van de metingen en de daaruit afgeleide informatie aan de samenwerkende diensten en overige klanten.

Het AGRS.NL is de basis voor het ETRS89 in Nederland en wordt gebruikt voor de bewaking van de kwaliteit van het nationale referentiestelsel (zowel RD als NAP), de koppeling van het RD en NAP aan ETRS89, de bepaling van punten van het GPS-kernet en de certificatie van overige actieve referentiestations. Daarnaast zijn de GPS-metingen van het AGRS.NL beschikbaar voor wetenschappelijke doeleinden. Sinds de herziening van het RD-stelsel in 2000 is het AGRS.NL de basis van dat stelsel en waarborgen de permanente metingen de koppeling met het Europese coördinatenstelsel ETRS89.

Gezien de hoofddoelstelling van het AGRS.NL als basis van de geometrische infrastructuur van Nederland, bestaat het hoofdproduct uit dagbestanden van 24 uur met metingen per 30 seconde. De lange meettijden en de lage frequentie van de metingen maken deze bij uitstek geschikt voor het uitvoeren van metingen met de hoogste precisie over grote afstanden. Voor snellere meettechnieken zoals 'rapid static' of 'real time kinematic' (RTK) GPS zijn metingen met hogere meetfrequenties gewenst, maar deze diensten worden overgelaten aan andere netwerken. Wel wordt het AGRS.NL gebruikt om de coördinaten te bepalen van lagere-orde referentiestations, bijvoorbeeld de GPS-kernetpunten of te certificeren referentiestations van commerciële GPS-providers.

De doelstelling (basis van de geometrische infrastructuur) maakt een degelijke constructie van de AGRS.NL-referentiestations noodzakelijk. Bij deze constructie wordt vooral gelet op de continuïteit van de locatie. Het is van het grootste belang dat een zo groot mogelijk aantal stations door de jaren heen op dezelfde plaats blijft staan. Het referentiestation Kootwijk is gesitueerd op een gebouw dat voorheen toebehoorde aan de TU Delft, maar nu verkocht is en naar verwachting op korte termijn gesloopt gaat worden. Het station is om deze reden in 2000 verlaten ten gunste van het nieuwe station Apeldoorn op het Kadastergebouw 'De Grift' aldaar, maar doet in de dagelijkse berekeningen nog mee als IGS-station voor de aansluiting op het ITRF. De antennes op de AGRS.NL-referentiestations Terschelling, Westerbork en Eijsden zijn geplaatst op verzinkte stalen masten. Deze masten worden jaarlijks gekeurd door de KPN, vergelijkbaar met de keuring van GSM-masten.

De AGRS.NL-referentiestations lijken onderling over een goede stabiliteit te beschikken met uitzondering van Terschelling. Dat laatste station werd verworpen in een gelijkvormigheidstransformatie tussen de ETRS89-oplossingen voor de AGRS.NL-referentiestations in 1996 en die uit 2002. De AGRS.NL-software is standaardsoftware van de ontvangerfabrikant op de stations, aangevuld met door het Kadaster in eigen beheer ontwikkelde software voor het rekencentrum.

De beleids- en bedrijfsmatige sturing van AGRS.NL vindt plaats door een jaarlijkse cyclus van een werkplan en een jaarverslag. De operationele sturing vindt plaats in het RDNAP-overleg, bestaande uit vertegenwoordigers van het Kadaster voor RD en AGI voor NAP.

2.1.6 World Geodetic System 1984 (WGS84)

WGS84 is vooral bekend van GPS. WGS84 is het referentiesysteem dat gebruikt wordt voor de door de GPS-satellieten uitgezonden baanelementen. Toch hebben we daar voor de geodetische referentie in Nederland niet zo veel aan: de nauwkeurigheid van autonome GPS-plaatsbepaling is namelijk niet erg hoog. Weliswaar is met relatieve GPS-puntsbepaling een veel hogere nauwkeurigheid haalbaar, maar dat levert coördinaten op in het referentiesysteem van het GPS-basisstation. Dit is meestal geen WGS84, maar ITRS, ETRS89 of een transformatie van een nationaal systeem.

WGS84 wordt onderhouden door het National Imagery and Mapping Agency (NIMA) in de USA (voorheen DMA). WGS84 is in 1996 herzien door de coördinaten van de twaalf NIMA- en Air Force 'tracking'-stations opnieuw te bepalen. De tracking-stations zijn in een tiendaagse campagne op achttien IGS-stations aangesloten. WGS84 is daarmee gebaseerd op ITRF94. Het herziene stelsel heet officieel WGS84 (G893), omdat het tijdstip van herziening vastgesteld is op GPS-weeknummer 893. Derhalve is WGS84 consistent met ITRS en kan beschouwd worden als een realisatie van ITRS.

2.2 RD

Het stelsel van de Rijksdriehoeksmeting (het RD-stelsel) en het bureau Rijksdriehoeksmeting van het Kadaster (de RD) hebben een geschiedenis die teruggaat tot in de 19e eeuw. Na een eeuw van 'klassieke' driehoeksmeting is sinds 1987 GPS de basismetmethode. In 2000 heeft vooral het toenemende gebruik van GPS geresulteerd in een herdefinitie van het RD-stelsel.

2.2.1 De primaire driehoeksmeting 1885 – 1904

In 1879 werd op initiatief van de Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen (KNAW) de Rijkscommissie voor Graadmeting en Waterpassing opgericht voor de voortzetting van de nauwkeurigheidswaterpassing en om een driehoeksmeting uit te

voeren met voldoende nauwkeurigheid voor een Europese graadmeting. In de jaren 1885 tot 1904 werd het eerste-orde driehoeksnet gemeten. De noodzakelijke afstands-meting werd afgeleid uit de basis bij Bonn (Duitsland), die in 1892 was gemeten. Ter controle werd in 1913 bij Stroe een basismeting uitgevoerd. Het verschil met de afstand uit de basis bij Bonn was slechts 1 mm/km, daarom werden de resultaten van de basismeting bij Bonn niet gewijzigd. Voor de ligging van het net op de ellipsoïde werden de geografische lengte en breedte van Amersfoort en de oriëntering van het net bepaald. Op dertien punten verspreid over Nederland werden daartoe in de periode 1896 tot 1899 geodetisch-astronomische metingen uitgevoerd. Het net werd in drie gedeelten vereffend, een noordelijk deel, een zuidelijk deel en de zuidwesthoek. De resultaten van deze vereffeningen vormen de basis voor het coördinatenstelsel van de RD.

2.2.2 Secundaire en lagere-orde metingen 1898 – 1928

Voor het praktische gebruik van het RD-stelsel, vooral ten behoeve van het Kadaster, werd in de jaren 1898 – 1928 het eerste-orde net verdicht. In 1929 werd de publicatie 'Rechthoekige Coördinaten 1885 – 1928' uitgegeven, waarin 3732 driehoekspunten waren opgenomen. Daarvan waren 1548 punten verzekerd. Van de niet verzekerde punten was alleen de torenspits bekend.

2.2.3 Oprichting Bijhoudingsdienst der Rijksdriehoeksmeting 1930

In 1928 bleken al 290 punten van het net te zijn verdwenen, terwijl er vermoedelijk 75 punten waren verstoord door bijvoorbeeld restauratie. Daarom werd op 1 januari 1930 de Bijhoudingsdienst der Rijksdriehoeksmeting opgericht als onderdeel van het Kadaster. Deze dienst kreeg tot taak het oorspronkelijke net van punten in stand te houden en zonodig nieuwe punten aan het net toe te voegen.

Na de Tweede Wereldoorlog stond de RD voor de taak de omvangrijke door de oorlog veroorzaakte schade te herstellen; bijna 500 torens waren beschadigd. Tevens werd de medewerking gevraagd voor de vereffening van een groot deel van Midden- en West-Europa, waartoe in de jaren na de oorlog nog een aantal astronomische metingen werd uitgevoerd. Uiteindelijk bleek de kwaliteit van het eerste-orde netwerk nog uitstekend. De omvang van het netwerk was echter onvoldoende, vooral in het noordoosten, waar het tot 30 km van de landsgrens verwijderd bleef. De verdichting van het puntenveld had in de steden geleid tot opeenhopingen van, vaak onafhankelijk van elkaar bepaalde, punten. Daarnaast waren er grote aantallen niet (of pas vele jaren na de bepaling) gecentreerde punten die als onbetrouwbaar moesten worden aangemerkt. Bovendien waren veel punten verloren gegaan. Dit alles was aanleiding om het net geheel te herzien.



Figuur 5. Het oorspronkelijke eerste-orde net van de RD.

2.2.4 Herziening en verschuiving van de oorsprong van het RD-net 1960 – 1978

Het eerste-orde net werd aan de landsgrenzen uitgebreid en aangesloten aan de netten van de ons omringende landen. Vooral in stedelijke gebieden werd het puntenveld uitgedund tot onderlinge afstanden van ongeveer 4 km. Als onderdeel van de herziening werden de coördinaten vastgesteld in een nieuw assenstelsel dat, in navolging van de Topografische Dienst, werd verkregen door een verschuiving van het oorspronkelijke stelsel over 155 en 463 km in westelijke respectievelijk zuidelijke richting. Dit had ten doel om te bewerkstelligen dat alle coördinaatgetallen positief zijn en dat de y-coördinaat altijd groter is dan de x-coördinaat, zodat vergissingen bij handmatige verwerking worden voorkomen.

2.2.5 Het gebruik van GPS en het GPS-kernet

Sinds 1987 maakt de RD zelf intensief gebruik van GPS. Om het voor andere GPS-gebruikers mogelijk te maken op eenvoudige wijze aan te sluiten op het coördinatenstelsel van de RD, is het GPS-kernet gerealiseerd. Op een punt van het GPS-kernet is de hemel vrij van obstakels en blijft dat ook naar verwachting voor langere tijd. Bovendien zijn de punten goed bereikbaar met de auto. Ze zijn gemakkelijk te vinden door de aanwezigheid van opvallende terreinkenmerken en de kans op verstoring is gering. De onderlinge afstanden van de kernnetpunten bedragen 10 à 15 km. Deze

afstanden zijn zo gekozen dat een gebruiker met korte meettijden, ook real time, naar omliggende kernnetpunten kan meten. Elk punt van het GPS-kernnet is ingemeten ten opzichte van de omliggende RD-punten. Zo is de verbinding met het bestaande netwerk gelegd. Daarnaast worden de punten van het GPS-kernnet in hoogte bepaald door middel van waterpassing. Sinds 2002 zijn alle kernnetpunten in hoogte bepaald met een tweede-orde waterpassing overeenkomstig de specificaties van het NAP. Het GPS-kernnet is aangesloten aan punten van het Europese referentiestelsel. Daardoor zijn van alle kernnetpunten coördinaten bekend in het Europese coördinatenstelsel ETRS89.

Het aantal GPS-kernnetpunten wordt na medio 2004 op verzoek van klanten uitgebreid in de omgeving van grote infrastructurele werken. De hoogtebepaling wordt verbeterd door het zoveel mogelijk tegelijkertijd uitvoeren van waterpassing en GPS-meting en een betere verzekering van de punten met bijvoorbeeld grondankers.



Figuur 6. Overzicht van het oorspronkelijke, tot 1997 gemeten, GPS-kernnet; later werden de GPS-kernnetpunten niet meer onderling, maar ten opzichte van het AGRS.NL bepaald.

2.2.6 De huidige taken van de RD

De naam Bijhoudingsdienst der Rijksdriehoeksmeting is inmiddels veranderd in Rijksdriehoeksmeting, een onderdeel van de eenheid Vastgoedinformatie en Geodesie van het Kadaster. De huidige taak heeft in eerste instantie betrekking op de instandhouding van het RD-puntenveld, bestaande uit de stations van het AGRS.NL, de punten van het GPS-kernnet en de richtpunten, opstelbouten en richtbouten. Het RD-puntenveld bestaat uit ongeveer 6000 punten verspreid over Nederland met een onderlinge afstand van ongeveer 2,5 km. Na de herziening van 2000 (zie paragraaf 3.2) onderhoudt de RD in Nederland twee referentiestelsels:

- RD voor de ligging;
- het driedimensionale Europese ETRS89 voor ligging en hoogte (positie).

De bijhouding van ETRS89 in Nederland voert de RD uit in nauwe samenwerking met AGI. De bijhouding van het RD-stelsel gebeurt in ETRS89 omdat dit nu het nauwkeurigste stelsel is, waaruit het RD-stelsel is afgeleid. De gegevens van de RD worden sinds 1999 gepubliceerd in digitale vorm via het internet (www.rdnap.nl). Ook zijn nu nog papieren coördinatenlijsten verkrijgbaar. De RD publiceert gegevens over drie soorten punten:

1. referentiestations van het AGRS.NL;
2. punten van het GPS-kernet;
3. overige punten (richtpunten, opstelbouten en richtbouten).

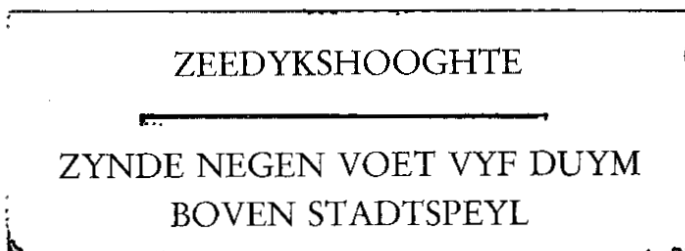
2.2.7 Relatie met het NAP

Met de introductie van ETRS89 als driedimensionaal referentiestelsel en het toenemende gebruik van GPS is ook de hoogte belangrijk geworden voor de RD. Publicatie en bepaling van de NAP-hoogtes van de punten van het GPS-kernet is afgestemd met AGI. De RD en Rijkswaterstaat onderhouden gezamenlijk ETRS89 in Nederland en exploiteren samen het AGRS.NL. Periodiek vindt RDNAP-overleg plaats met als vaste agendapunten het GPS-kernet, het AGRS.NL en de website www.rdnap.nl. Het doel van dit overleg is de operationalisering van één geometrische infrastructuur voor Nederland.

2.3 NAP

2.3.1 Voorlopers van het NAP

In [Van der Weele, 1971] is een uitgebreide beschrijving gegeven van de geschiedenis van het NAP. Hieruit blijkt onder andere dat reeds in 1556 in de scheepsbouwuurt de Lastage (vlak buiten de stadsmuur van Amsterdam) een hoogtepeil werd aangegeven



Figuur 7. Dijkpeilsteen.

door middel van een ijzeren hakkelbout. In 1682 zijn acht dijkpeilstenen aangebracht in de toen nieuwe sluizen in de verhoogde dijk langs het IJ.

Deze stenen lagen op een hoogte van negen voet en vijf duim (2,6789 m) boven de gemiddelde zomervloed, het zogeheten Amsterdamse (Stads)peyl. In de 18e en begin 19e eeuw werd dit AP langs de Zuiderzee en de grote rivieren verspreid. Op 18 februari 1818 werd bij Koninklijk Besluit door Koning Willem I het Amsterdams Peil (AP) voorgeschreven als algemeen vergelijkingsvlak voor waterstanden en werd de Minister van den Waterstaat en der Publieke Werken belast met de uitvoering van dit besluit.

2.3.2 De vroege nauwkeurigheidswaterpassingen

De eerste nationale waterpassing stamt uit de periode 1875 –1885. Zie hiervoor onder meer [Van der Weele, 1971] en [Waalewijn, 1979]. Dit project werd uitgevoerd onder auspiciën van de Rijkscommissie voor Graadmeting en Waterpassing, de voorloper van de NCG. Uitgangspunten bij deze 1e Nauwkeurigheidswaterpassing (1e NWP) waren vijf dijkpeilstenen in Amsterdamse sluizen, overgebleven van de oorspronkelijke acht. Bij de afronding van de 1e NWP werd besloten om de uitkomsten van de 1e NWP te onderscheiden van eerdere waterpassingen. Daarom werd de naam Normaal Amsterdams Peil ingevoerd.

Het meetnet van de 1e NWP bestond uit twaalf kringen met een totale lengte van circa 2100 km doorgaande waterpassing. Tijdens de 1e NWP zijn 410 al bestaande punten (oude verkenmerken, nulpunten van peilschalen en dergelijke) en hulppunten opnieuw in hoogte bepaald. Daarnaast zijn 566 nieuwe merken geplaatst, voornamelijk in openbare gebouwen. De standaardafwijking na vereffening bedroeg 0,75 mm/ $\sqrt{\text{km}}$. Helaas is het niet meer mogelijk de berekeningen te reconstrueren aangezien het grootste deel van de metingen verloren is gegaan [Wijnterp, 1992]. Alleen de berekende hoogtes zijn bewaard gebleven.

In 1926 werd het Geodetisch Bureau van ir. Schermerhorn belast met "de herziening van de nauwkeurigheidswaterpassing, volgens te geven voorschriften, onder toezicht van de Rijkscommissie voor Graadmeting en Waterpassing", zie [Waalewijn, 1979]. De 2e Nauwkeurigheidswaterpassing (2e NWP) werd in 1926 begonnen en uiteindelijk afgerond in 1940. Om het NAP zo stabiel mogelijk in heel Nederland vast te leggen werd bij het begin van de 2e NWP besloten om een aantal ondergrondse merken (OM) verspreid over het hele land aan te leggen. Gezien de eenvoudige constructie van deze merken kon dit slechts gebeuren op plaatsen waar draagkrachtige geologische lagen aan de oppervlakte kwamen, dus vooral in het midden en oosten van het land. In de periode tot 1930 zijn in totaal 18 ondergrondse merken van de eerste orde aangebracht. Voor een betere verspreiding van NAP werden na 1928 nog eens 29 ondergrondse merken van de tweede orde geplaatst [Waalewijn, 1979].

Het meetnet van de 2e NWP is zodanig ontworpen dat alle trajecten van de 1e NWP opnieuw bepaald konden worden. Het bevat daarnaast een flink aantal extra trajecten,

waaronder één over de (in 1932 gereed gekomen) Afsluitdijk. De totale lengte van de 2e NWP is 4592 km. In 1940 bleek het aantal kringen van het net te groot om, gezien de beschikbare technologie, het geheel in één keer te vereffenen. De berekende hoogtes zijn daarom gebaseerd op een vereffening van 26 kringen, waaraan de overige kringen zijn aangesloten. Het vereffende net, met een totale lengte van 2768 km, bevatte zoveel mogelijk ondergrondse merken (16 van de 18 eerste-orde merken en 15 van de 29 tweede-orde merken). De standaardafwijking na vereffening bedroeg 0,4 tot 0,7 mm/ $\sqrt{\text{km}}$, afhankelijk van de gekozen berekeningsmethode.

Het nulpunt te Amsterdam was overigens bij de vereffening niet als knooppunt opgenomen. De hoogte ten opzichte van het NAP werd overgebracht via een klein hulpmiddel. Ten tijde van de metingen in Amsterdam (1928) waren nog slechts twee van de oorspronkelijke acht dijkpeilstenen bruikbaar (in de Nieuwe Brugsluis en in de West-Indische Sluis). Deze zijn beide benut teneinde het nulniveau van het NAP zo goed mogelijk te handhaven. Men kan echter wel vraagtekens zetten bij de stabiliteit van dergelijke dijkpeilstenen.

De veldwerken en resumptiestaten van de 2e NWP (en van de latere 3e en 4e NWP) zijn veelal bewaard gebleven. Ze zijn opgeslagen in het Rijksarchief. Daarnaast zijn in 2000 en 2001 bij de Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat (nu: AGI) alle historische gegevens opgeschoond en opgeslagen in de centrale database met NAP-hoogtegegevens van Rijkswaterstaat [Brand et al., 2002b].

Relatief snel na de afronding van de 2e NWP is in 1950 begonnen aan de 3e NWP. Hiervoor bestond een aantal redenen, waaronder het verloren gaan van een groot aantal peilmerken tijdens de oorlog en de behoefte aan inzicht in de betrouwbaarheid van de ondergrondse merken. Voor de 3e NWP is het netwerk met ondergrondse merken uitgebreid met een aantal zogenaamde De Waal-palen in het westen van het land [Murre, 1985]. Tijdens de 3e NWP zijn ook enkele proefmetingen uitgevoerd met de methode van hydrostatisch waterpassen. Met behulp van deze methode zijn onder andere de Waddeneilanden met elkaar en met het vasteland verbonden en enkele grote rivierovergangen gemeten.

Bij de 3e NWP was nog slechts één Amsterdamse dijkpeilsteen (Nieuwe Brugsluis) beschikbaar om als uitgangspunt voor het primaire net van het NAP te dienen. Door verbouwingen van de sluis kon echter ook deze laatste steen niet behouden blijven. Daarom is de hoogte van deze dijkpeilsteen overgebracht naar een nieuw geplaatst ondergronds merk op de Dam in Amsterdam (OA2350). Daarbij is aan dit ondergronds merk de hoogte NAP +1,4278 m toegekend. Omdat de 3e en 4e NWP uiteindelijk niet tot een herberekening van het primaire net hebben geleid, is dit OM echter tot op heden nooit als rekenkundige basis van het NAP gebruikt. Vanuit een geologische invalshoek zijn later vraagtekens gesteld bij de geschiktheid van dit ondergronds merk. De reden is dat er in de ondergrond van Amsterdam tot op een diepte van meer dan 60 m, dikke samendrukbare lagen voorkomen. In 1953 was het nog niet mogelijk om het punt te funderen op de stabielere derde zandlaag die hier onder ligt. In plaats

daarvan is voor het merk op de Dam (0A2350) een relatief ondiepe fundering gebruikt, waarbij er ook onder de fundering van de paal nog samendrukbare lagen voorkomen. Het is dus mogelijk dat het ondergronds merk OA2350 niet stabiel is.

Uit de experimenten met hydrostatisch waterpassen, uitgevoerd tijdens de 3e NWP, bleek deze methode zeer nauwkeurige resultaten op te leveren. In de periode 1965 – 1974 is daarom een net gemeten bestaande uit zeven grote kringen, waarmee ongeveer 30 ondergrondse merken werden aangesloten. Vervolgens is dit netwerk uitgebreid met optisch gemeten trajecten plus nog een aantal extra hydrostatische trajecten. Dit geheel vormt de 4e NWP, uitgevoerd tussen 1965 en 1978. De vereffening van de metingen van de 4e NWP (1965 – 1978) is in 1980 uitgevoerd door Murre en beschreven in [Murre, 1985]. Ter controle van de 4e NWP is in 1979 ook een ijswaterpassing uitgevoerd over het IJsselmeer.

Naast de al genoemde ondergrondse merken is vanaf de jaren zeventig van de vorige eeuw ook een groot aantal zogenaamde nulpalen (speciaal 'ondergronds merk') geplaatst. Deze nulpalen bevinden zich in of nabij peilmeetstations van Rijkswaterstaat en vormen een stabiele referentie voor waterstandsmetingen langs de Nederlandse kust en binnenwateren en langs de grote rivieren. Deze nulpalen (67 in aantal) maken deel uit van het primaire net van het NAP (zie figuur 8).

Tegenwoordig worden alleen nog maar ondergrondse merken van het type LGM geplaatst. Deze zijn ontwikkeld door het Laboratorium voor Grondmechanica in Delft (nu: GeoDelft). Door de speciale constructie van dit type ondergronds merk en de grote diepte waarop deze gefundeerd kunnen worden, zijn dit de meest stabiele ondergrondse merken.



Figuur 8. Ligging van de nulpalen.

2.3.3 De 5e Nauwkeurigheidswaterpassing

In de jaren negentig van de vorige eeuw werd duidelijk dat bewegingen in de ondergrond van Nederland van belangrijke invloed zijn op de kwaliteit van het primaire net van het NAP. Tot die tijd werd verondersteld, dat bewegingen van ondergrondse merken klein waren, zodat ze voor de instandhouding van het NAP verwaarloosd konden worden. De hoogtes van de ondergrondse merken werden daarom in principe ook niet meer aangepast nadat ze eenmaal waren vastgesteld. Op basis van geologisch en geofysisch onderzoek wordt verondersteld dat in Noordwest-Europa de oudste afzettingen in de ondergrond nog steeds beïnvloed worden door het wegtrekken van de ijsmassa's van de laatste IJstijd, circa 10.000 jaar geleden. Door het wegvallen van het gewicht van het ijs kent Scandinavië een opwaartse beweging van enige centimeters in tien jaar. Volgens geofysische modellen zou het westen van Nederland, dat op de rand van het gebied van ijsmassa's lag, juist een bescheiden neerwaartse beweging moeten kennen. Dit fenomeen staat in de geologie bekend onder de naam Post-Glacial Uplift (onder andere [Kooi et al., 1998a]). Door analyses van de eerdere Nauwkeurigheidswaterpassingen werd dit vermoeden van daling in het westen bevestigd. Echter de verwachte omvang van deze daling (circa 3 cm per eeuw) is dusdanig klein in relatie tot de kwaliteit van de waterpassingen, dat een bevestiging hiervan uit meetgegevens niet gegeven kon worden.

Naast de meer praktische taak van Rijkswaterstaat, "het onderhoud van het NAP", is kennis over bodembeweging van belang bij de beleidsmatige aspecten van het waterbeheer in Nederland en de beveiliging tegen overstromingen. Om de juiste beslissingen en maatregelen te kunnen nemen is het noodzakelijk een goed zicht te hebben op de maximale groottes van de bewegingen die in de komende tijd (50 – 100 jaar) verwacht kunnen worden. Met de 5e NWP werd beoogd om via analyse van hoogteveranderingen van ondergrondse merken een beter beeld te krijgen van de grootte van de bodembeweging die momenteel optreedt. Zie figuur 9 voor een beeld van het net van de 5e NWP.

In de 5e Nauwkeurigheidswaterpassing (1996 – 1999) zijn voor het eerst in Nederland de meettechnieken optische en hydrostatische waterpassing, satellietplaatsbepaling (GPS) en zwaartekrachtmeting gecombineerd. Daarnaast zijn ijswaterpassingen uitgevoerd op het IJsselmeer en het Markermeer [Van Brussel en Kleijer, 1997]. De waterpassingen vormen uiteraard de basis van het primaire net van het NAP. De zwaartekrachtmetingen hadden als belangrijkste doel het onafhankelijk aantonen van de bodembeweging. Feitelijk vormen de zwaartekrachtmetingen van de 5e NWP de 2e epoeche van de meting van het Nederlandse Zwaartekrachtsnet NEDZWA99. De GPS-metingen tot slot dienden (1) ter versteviging van het waterpasnet over grote afstanden en (2) als verbindingpunten tussen enerzijds het referentiestelsel ETRS89 voor satellietplaatsbepaling en anderzijds de gewaterpaste hoogtes van het NAP.

Het netwerk van de 5e NWP is zodanig ontworpen dat hierin zoveel mogelijk punten en gelijke trajecten uit eerdere NWP's zijn meegenomen. Alle eerste-orde ondergrondse



Figuur 9. Het net van de 5e Nauwkeurigheidswaterpassing.

merken zijn meegenomen plus een selectie van tweede- en derde-orde ondergrondse merken. Tevens is een aantal nieuwe ondergrondse merken geplaatst en is een doorgaande waterpasroute langs de kust gemeten. Aan de grenzen is het netwerk van de 5e NWP aangesloten op het Duitse en Belgische netwerk. Het hydrostatische net is opgebouwd uit een viertal hoofdkringen, die zoveel mogelijk de hydrostatische trajecten uit de 4e NWP volgen. Tevens zorgen twee hydrostatische lijnen voor een verbinding tussen het hydrostatische en het optische deel van het netwerk.

De vereffening van de 5e NWP is uitgevoerd in 2000, waarna de resultaten zijn opgeslagen in de centrale hoogtedatabase. In 2001 is nog één kleine bijmeting toegevoegd aan de dataset van eind 2000, namelijk de reconstructie van het ondergrondse merk Westerbork.

De uitvoering van de optische en hydrostatische waterpassingen wordt beschreven in [Brand en Ten Damme, 2004a]. De uitvoering van de zwaartekrachtmetingen wordt beschreven in [Crombaghs, 2002]. Van de GPS-metingen is geen apart rapport gepubliceerd, wel is een intern dossier beschikbaar bij AGI en zijn de resultaten opgenomen in de rapportage bij het berekenen van NLGEO2004 [Crombaghs, 2004].

2.3.4 Bijhouding van het NAP

In de loop der jaren heeft de wijze van bijhouding van het NAP zich ontwikkeld volgens het principe van het voortschrijdende inzicht. Dit is onder andere te zien in de wijze van materialisatie van de punten en in de wijze van bijmeting. Tegenwoordig wordt een onderscheid gemaakt tussen het zogenaamde primaire net van het NAP en het secundaire net.

Het primaire net van het NAP bestaat uit de zogenaamde ondergrondse merken en nulpalen. Dit zijn de hoofdpunten van het NAP. Begin 2004 waren er 362 hoofdpunten: 295 ondergrondse merken (waaronder 19 clusters van enkele merken die vlakbij elkaar staan gegroepeerd; opgeteld zijn dit 80 merken) en 67 nulpalen. Ondergrondse merken worden geplaatst met het oogpunt om een zo stabiel mogelijke uitgangshoogte te creëren voor secundaire metingen. Ondergrondse merken zijn in principe niet voor het publiek toegankelijk. De meeste zijn daadwerkelijk verstopt onder de grond en worden uitsluitend gebruikt voor de bijhouding van het primaire en secundaire net. Nulpalen zijn speciale ondergrondse merken en bevinden zich nabij peilmeetstations langs de kust en de grote rivieren.

Bij een nauwkeurigheidswaterpassing worden de ondergrondse merken en nulpalen door metingen verbonden teneinde hoogteverschillen tussen deze merken (opnieuw) vast te stellen. Er is geen vaste herhalingsfrequentie voor nauwkeurigheidswaterpassingen, de geschiedenis heeft geleerd dat deze gemiddeld iedere 20 tot 25 jaar zijn uitgevoerd. De doorlooptijd van een nauwkeurigheidswaterpassing heeft gevarieerd van 3 tot 15 jaar.

In de jaren zeventig van de vorige eeuw is de bijhoudingscyclus van het secundaire net van het NAP door middel van de Planperiodes ontstaan. Een Planperiode is een meerjarenplan voor de bijhouding van het secundaire net. Het secundaire net bestaat uit peilmerken, dat wil zeggen een bronzen bout met een kop met een diameter van 20 – 25 mm, die geplaatst wordt in (de gevel van) een huis, gebouw of een ander bouwwerk met een goede stabiliteit. Deze peilmerken zijn de uitgangspunten bij het vaststellen van de hoogte van objecten in het terrein door ingenieursbureaus, waterschappen, gemeenten, provincies, Rijkswaterstaat en andere overheden. De zijdelengte van de kringen van het secundaire net bedraagt gemiddeld 2 km, waarbij na iedere kilometer een peilmerk is of wordt geplaatst. De bovengrens voor de precisie van het secundaire net bij bijhoudingsprojecten voor het NAP bedraagt $1 \text{ mm}/\sqrt{\text{km}}$.

2.3.5 De geoïde van Nederland

Al in 1828 gebruikte Gauss een equipotentiaalvlak voor de zwaartekracht als definitie voor de vorm van de aarde [Torge, 1991]. Vervolgens is door Stokes in 1849 aangetoond dat, om daadwerkelijk de geoïde te kunnen berekenen, een wereldwijde en regelmatige bedekking met zwaartekrachtmetingen (gemeten op deze geoïde zelf) benodigd is. Het vlak van punten met hoogte 0 m ten opzichte van het NAP is de in Nederland gebruikte realisatie van de geoïde, althans van een vlak dat daaraan evenwijdig ligt.

In 1934 is voor het eerst een wereldwijde geoïde berekend door Hirvonen. In de periode 1970 – 1985 zijn de theorieën rond geoïdemodellering dusdanig aangescherpt dat ook lokale geoïdemodellen met een decimeterprecisie berekend konden worden. In Nederland zijn geoïdeberekeningen met een relatieve decimeterprecisie uitgevoerd

door Van Willigen [Van Willigen, 1985]. Dit geoidemodel is in 1996 vervangen door de 'De Min-geoid' [De Min, 1996].

Voor het bepalen van deze geoid voor Nederland is in de periode 1990 – 1994 door Rijkswaterstaat een tweede-orde zwaartekrachtmeting net gemeten, bestaande uit bijna 8.000 punten (1 punt per 5 km²), waarop ongeveer 13.000 relatieve zwaartekrachtmetingen zijn uitgevoerd. De 'De Min-geoid' geeft voor heel Nederland geoidhoogtes met een precisie van één tot enkele centimeters. Vooruitlopend op paragraaf 3.3.5 wordt hier ook verwezen naar [Crombaghs, 2004].

3 De status van de referentiestelsels per 1-1-2005

3.1 De realisatie van ETRS89

Sinds 1997 is AGRS.NL de basis van de realisatie van het referentiesysteem ETRS89 in Nederland. ETRS89 is in Europa de primaire referentie voor veel (al dan niet grensoverschrijdende) toepassingen van inwinnen en vastleggen van ligging- en hoogtegegevens. Daarnaast verbindt ETRS89 de diverse nationale referentiestelsels, doordat de transformaties tussen deze nationale stelsels en ETRS89 goed bekend zijn.

Het AGRS.NL bestaat uit de referentiestationen Delft, Eijsden, Kootwijk (in 2000 vervangen door Apeldoorn), Terschelling en Westerbork. De oorspronkelijke ETRS89-coördinaten van deze referentiestationen waren berekend uit meetgegevens van de AGRS.NL-referentiestationen uit de eerste helft van 1996. Dit netwerk bestond uit de IGS-stations Brussel, Delft, Herstmonceux, Kootwijk, Onsala, Wettzell en uiteraard de AGRS.NL-referentiestationen. Deze coördinaten zijn de *gepubliceerde* ETRS89-coördinaten van AGRS.NL in de realisatie ETRF96. De berekeningen zijn uitgevoerd met de Bernse Software, versie 4.0 (dit is wijdverspreide programmatuur voor het verwerken van GPS-data). Sindsdien zijn er geen nieuwe coördinaten voor de AGRS.NL-referentiestationen meer gepubliceerd. Halverwege het jaar 2000 heeft er aan het AGRS.NL een aantal configuratiewijzigingen plaatsgevonden. Zo is het station Kootwijk vervangen door het station Apeldoorn en zijn de GPS-ontvangers en antennes op een aantal stations vernieuwd.

Voor de bewaking van de coördinaten van de stations van het AGRS.NL is vanaf januari 2000 een tijdserie opgebouwd van de coördinaten van de AGRS.NL-referentiestationen. Dagoplossingen van deze coördinaten worden berekend in een netwerk dat bestaat uit de IGS-stations Brussel, Kootwijk, Herstmonceux, Onsala, Potsdam, Westerbork, Wettzell en Zimmerwald, de BKG-stations Borkum, Euskirchen en Helgoland en de AGRS.NL-referentiestationen (zie figuur 10) en [Van der Marel, 2002]).

Uit deze dagoplossingen worden per kalenderjaar jaaroplossingen berekend in ETRS89, gebaseerd op de realisatie ITRF2000 van het ITRS. Deze jaaroplossingen wijken significant af van de oorspronkelijke coördinaten uit 1996. In [Pol en Kösters, 2004] is beschreven hoe de verbeterde ETRS89-coördinaten van de referentiestationen van het AGRS.NL tot stand zijn gekomen. Het beleid ten aanzien van de bijhouding van de coördinaten van het AGRS.NL is als volgt.

De coördinaatbepaling van de AGRS.NL-referentiestationen gebeurt op basis van dagoplossingen en jaaroplossingen. Teneinde de invloed van periodieke fluctuaties te minimaliseren worden besluiten tot vaststelling van ETRS89-coördinaten van de AGRS.NL-referentiestationen uitgevoerd op basis van jaaroplossingen, berekend uit dagoplossingen. De ETRS89-coördinaten van de AGRS.NL-referentiestationen zijn



Figuur 10. AGRS.NL binnen West-Europa, uit [Van der Marel, 2002].

per 1 januari 2005 vastgesteld op de waarden van de jaaroplossing 2002 en worden genoemd: ETRS89, gebaseerd op de realisatie ITRF2000 van ITRS op epoche 2002.5. Jaarlijks worden nieuwe jaaroplossingen berekend in de op dat moment meest actuele realisatie van ETRS89. De ETRS89-coördinaten van de AGRS.NL-referentiestations worden aangepast zodra de meest recente jaaroplossing van de coördinaten van één of meer stations meer dan $3 \cdot \sigma$ ($\sim 99,7\%$ betrouwbaarheidsinterval) afwijkt van de gepubliceerde waarde (zie verder paragraaf 4.1).

In tabel 2 worden zowel de geocentrische (X, Y, Z) als geografische (φ, λ, h) ETRS89-coördinaten en de bijhorende standaardafwijkingen van de jaaroplossing 2002 gegeven. Hieruit kan worden afgeleid dat de tolerantie (driemaal de standaardafwijking) voor de verschillen tussen de diverse jaaroplossingen uitgedrukt in geocentrische coördinaten X, Y, Z varieert van 4 tot 9 mm en uitgedrukt in geografische coördinaten van 3 tot 5 mm in ligging en van 9 tot 12 mm in hoogte.

3.2 Het stelsel van de Rijksdriehoeksmeting

3.2.1 De overwegingen tot herziening in 2000

De gebruiksvriendelijkheid en de snelheid van het landmeten met GPS is in het laatste decennium van de 20e eeuw sterk verbeterd. Het aansluiten van GPS-metingen aan het GPS-kernet en het AGRS.NL is eenvoudig en snel. Vooral de ontwikkeling van snellere (RTK-)meetmethoden heeft ertoe geleid dat ook de gebruikers van het RD-net steeds vaker voor puntsbepaling met GPS kiezen. Voor een relatief gering bedrag kan men een GPS-ontvanger en de benodigde software aanschaffen waarmee het mogelijk

is om nauwkeurigheden te behalen van typisch enkele centimeters over afstanden van tientallen kilometers. Hierdoor werden gebruikers van GPS steeds vaker geconfronteerd met vervormingen in het bestaande RD-net, die voorheen niet werden opgemerkt omdat ze kleiner waren dan de ruis in de metingen. Dit was de aanleiding om een herziening van het RD-stelsel te overwegen.

Het draagvlak bij de gebruikers werd door het Kadaster van groot belang geacht voor een herziening. In grote lijnen waren de GPS-gebruikers voor een herziening van het

| Station | Marker | X (m) | Y (m) | Z (m) |
|---------|-----------|--------------|-------------|--------------|
| APEL | 13510M001 | 3895237,0810 | 406814,3266 | 5017378,0689 |
| DELFI | 13502M004 | 3924687,7072 | 301132,7715 | 5001910,7832 |
| EIJS | 13533M001 | 4023086,5361 | 400394,8790 | 4916655,3378 |
| TERS | 13534M001 | 3798580,8766 | 346993,8442 | 5094780,8308 |
| WSRA | 13506M005 | 3828736,1446 | 443304,7456 | 5064884,5120 |

| Station | Marker | σ_x (mm) | σ_y (mm) | σ_z (mm) |
|---------|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| APEL | 13510M001 | 2,2 | 1,8 | 2,3 |
| DELFI | 13502M004 | 2,2 | 1,3 | 2,8 |
| EIJS | 13533M001 | 2,6 | 1,2 | 2,6 |
| TERS | 13534M001 | 2,9 | 1,2 | 3,1 |
| WSRA | 13506M005 | 2,0 | 1,2 | 2,4 |

| Station | Marker | ϕ (dd mm ss) | λ (dd mm ss) | h (m) |
|---------|-----------|-------------------|----------------------|---------|
| APEL | 13510M001 | 52°12'42,9175" N | 5°57'44,2575" E | 115,899 |
| DELFI | 13502M004 | 51°59'10,0222" N | 4°23'15,3030" E | 74,369 |
| EIJS | 13533M001 | 50°45'29,6558" N | 5°41'00,9825" E | 103,792 |
| TERS | 13534M001 | 53°21'45,8491" N | 5°13'09,7880" E | 56,105 |
| WSRA | 13506M005 | 52°54'52,5893" N | 6°36'16,2065" E | 82,275 |

| Station | Marker | σ_ϕ (mm) | σ_λ (mm) | σ_h (mm) |
|---------|-----------|--------------------|-----------------------|-----------------|
| APEL | 13510M001 | 1,3 | 1,8 | 2,9 |
| DELFI | 13502M004 | 1,6 | 1,2 | 3,2 |
| EIJS | 13533M001 | 1,3 | 1,1 | 3,5 |
| TERS | 13534M001 | 1,3 | 1,2 | 4,0 |
| WSRA | 13506M005 | 1,2 | 1,2 | 2,9 |

Tabel 2. ETRS89-coördinaten van de AGRS.NL-referentiestationen en hun precisie; gebaseerd op de realisatie ITRF2000 van ITRS, op de epoche 2002.5.

RD-stelsel ter correctie van de gevonden vervormingen, terwijl de beheerders en de gebruikers van cartografische bestanden het bestaande RD-stelsel gehandhaafd wilden zien. De baten van een conversie van bestanden werden op korte en middellange termijn als te onzeker of te gering beschouwd in relatie tot de kosten (van de eigenlijke conversie en vooral van de organisatie daarvan). De grote verwevenheid van bestanden maakte een conversie van bestanden complex.

Uiteindelijk is daarom in 2000 een keuze gemaakt voor een beperkte herziening. Er is een nieuwe definitie van het RD-stelsel, gebaseerd op ETRS89, geïntroduceerd: de naam voor de *definitie* is RD2000. Deze definitie vervangt de definitie van Heuvelink die bekend staat als RD1918. De transformatie van ETRS89 naar RD is onderdeel van de definitie en heeft de naam RDNAPTRANS™ (deze naam is bij het Benelux-merkenbureau gedeponeerd). De gepubliceerde RD-coördinaten wijzigen niet door de nieuwe definitie. Daarom blijft in het spraakgebruik de naam RD-coördinaten, zonder toevoeging van een jaartal, gehandhaafd. Daarnaast is het Europese ETRS89-stelsel ingevoerd als het driedimensionale referentiestelsel voor Nederland. Dit gebeurt door publicatie van ETRS89-coördinaten voor de punten van het GPS-kernet en de stations van het AGRS.NL.

3.2.2 De kwaliteit van het RD-puntenveld

Bij de herziening werd duidelijk dat de traditionele indeling van de RD-punten in eerste-, tweede-, derde-orde en hoofdpunten, door het gebruik van GPS voor de bijhouding zijn betekenis had verloren. De stations van het AGRS.NL bijvoorbeeld hebben, door een lange reeks van GPS-waarnemingen een betere nauwkeurigheid gekregen dan de traditionele eerste-orde punten. Sinds 2000 wordt dan ook een nieuwe indeling gehanteerd. De kenmerkende kwaliteit van het puntenveld van de RD is voor de verschillende soorten punten:

| | |
|--|--|
| <i>Stations van AGRS.NL</i> | |
| Breedte en lengte in ETRS89 | $c_0 = 0,1 \text{ cm}^2; c_1 = 0,0 \text{ cm}^2/\text{km}$ |
| Ellipsoïdische hoogte in ETRS89 | $c_0 = 1,0 \text{ cm}^2; c_1 = 0,0 \text{ cm}^2/\text{km}$ |
| <i>Punten van het GPS-kernet</i> | |
| Breedte en lengte in ETRS89 | $c_0 = 1,0 \text{ cm}^2; c_1 = 0,0 \text{ cm}^2/\text{km}$ |
| Ellipsoïdische hoogte in ETRS89 | $c_0 = 9,0 \text{ cm}^2; c_1 = 0,0 \text{ cm}^2/\text{km}$ |
| Hoogte t.o.v. NAP (H) | $c_0 = 4,0 \text{ cm}^2; c_1 = 0,0 \text{ cm}^2/\text{km}$ |
| <i>Overige punten (richtpunten, opstelbouten, richtbouten)</i> | |
| Ligging in RD-coördinaten (x, y) | $c_0 = 0,0 \text{ cm}^2; c_1 = 1,0 \text{ cm}^2/\text{km}$ |

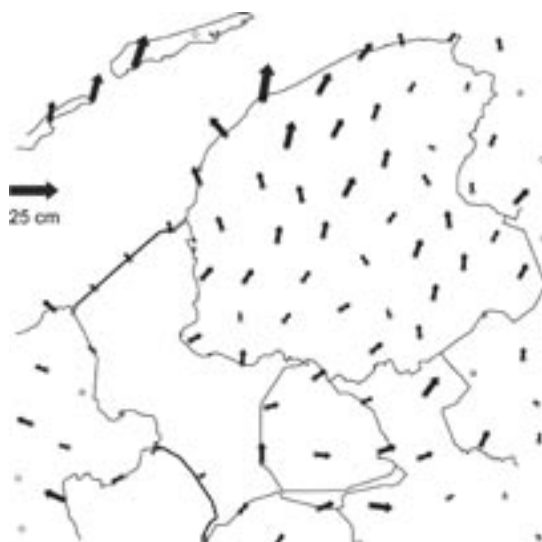
Tabel 3. Kenmerkende kwaliteit van het puntenveld van de RD.

De kenmerkende kwaliteit is het minimale niveau dat een gebruiker mag verwachten. De actuele kwaliteit (zie bijvoorbeeld paragraaf 3.1) moet tenminste gelijk of beter zijn.

3.2.3 Verschillen in de GPS-kernetpunten

In de jaren 1993 – 1997 is in Nederland het GPS-kernet gemeten en berekend, zie [van Buren, 1994] en [Bruinsma, 1997]. De ETRS89-coördinaten van het GPS-kernet zijn berekend in een vereffening waarbij de coördinaten van de vijf punten van het AGRS.NL werden vastgehouden terwijl de coördinaten van veertien NEREF-punten als stochastische waarnemingen werden meegenomen.

Zeer dicht bij elkaar gelegen GPS-kernetpunten ('dubbelpunten' met minder dan een km onderlinge afstand) werden geëlimineerd, waarna 418 punten overbleven met gemeten RD/NAP- en ETRS89-coördinaten. Volgens de procedure geschetst in figuur 25 worden uit de ETRS89-coördinaten pseudo-RD-coördinaten (zie paragraaf 3.2.5 en paragraaf 3.4) berekend. In deze procedure wordt de 7-parameter gelijkvormigheids-transformatie toegepast met parameters volgens de HTW 1996. De volledige lijst met verschillen tussen pseudo-RD-coördinaten uit ETRS89 en de bestaande, gepubliceerde, RD-coördinaten is beschikbaar via de website www.rdnap.nl. De verschillen vertonen een sterke regionale correlatie. Op enkele punten (Harlingen, Maasvlakte, Texel) lijkt het regelmatige beeld verstoord. Ook deze verschillen voldoen echter nog aan het kansmodel, zoals aangegeven in tabel 3 in paragraaf 3.2.2. Nader onderzoek aan het bestand van RD-punten in deze plaatsen liet zien dat het geen geïsoleerde 'fouten' betrof, maar dat de verschillen in alle omliggende RD-punten doorwerkten.

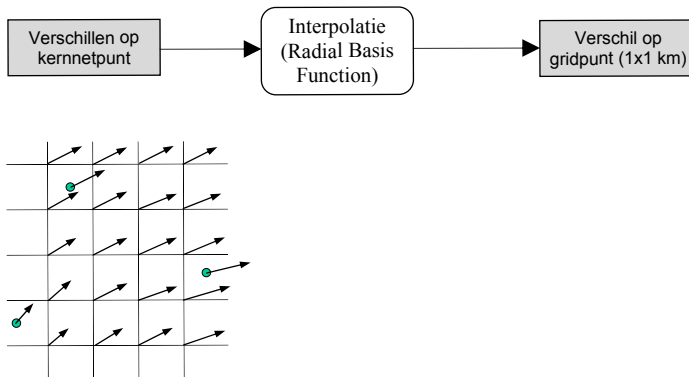


Figuur 11. Regionaal gecorreleerde verschillen in GPS-kernetpunten (Friesland en de Afsluitdijk).

3.2.4 Interpolatie van de verschillen

Voor de 415 GPS-kernetpunten in Nederland zijn RD-coördinaten berekend uit metingen naar omliggende RD-punten en uit ETRS89. De ETRS89-coördinaten werden gelijkvormig getransformeerd met de transformatieparameters zoals eerder al vastgelegd in de HTW. Vervolgens werden deze geocentrische coördinaten geprojecteerd volgens de RD-projectiemethode. De aldus gevormde pseudo-RD-coördinaten vertonen verschillen met de coördinaten uit de metingen naar omliggende punten. Deze verschillen vormen nu het model voor de omrekening van ETRS89 naar RD en vice versa.

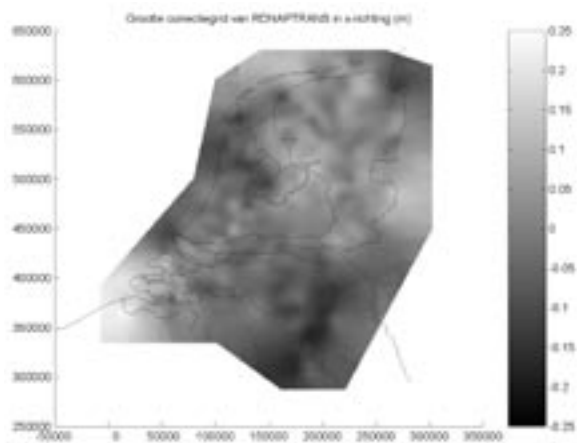
De verschillen kunnen voor een willekeurig punt in Nederland worden berekend uit een interpolatie. Deze interpolatie vindt plaats in twee stappen. Allereerst wordt een regelmatig vierkantennet (grid) aangemaakt. Dit vierkantennet wordt als twee bestanden, respectievelijk voor x- en y-coördinaten, verspreid en maakt onderdeel uit van RDNAPTRANSTM (zie verder paragraaf 3.4). De tweede stap is een interpolatie per punt tussen de zestien omliggende netpunten.



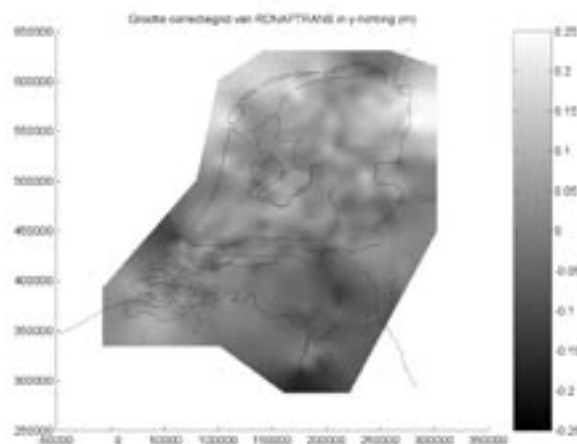
Figuur 12. Interpolatie van de verschillen in de GPS-kernetpunten naar een regelmatig kilometergrid.

Met diverse rekenmethoden kan een regelmatig vierkantennet gemaakt worden met waarden uit onregelmatig verspreid liggende punten met xyz-waarden (steunpunten). Vaak zijn deze rekenmethoden gebaseerd op het berekenen van een gewogen gemiddelde ten opzichte van alle punten, of de punten in de omgeving van het netpunt.

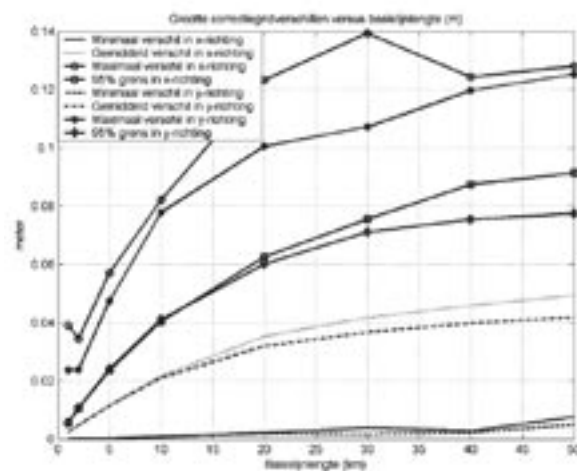
De Radial-Basis-Functies-groep van interpolatiemethoden geeft een glad oppervlak zonder scherpe breuklijnen (zie figuur 13, 14 en 15). Een 'smoothing factor' ('smoothing interpolator') bepaalt de gladheid. In een extreem geval kan de smoothing factor alle datapunten een gelijk gewicht geven. Het geïnterpoleerde oppervlak wordt dan een horizontaal vlak op de gemiddelde z-waarde van alle punten. Bij afwezigheid van een smoothing factor gaat het vlak exact door de datapunten.



Figuur 13. Correctiegrid in x-richting.

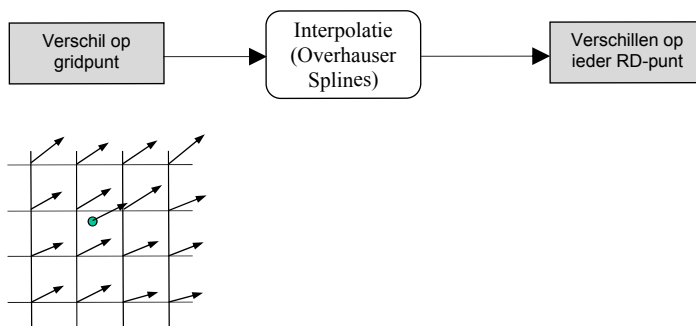


Figuur 14. Correctiegrid in y-richting.



Figuur 15. Correctiegridverschillen als functie van de lengte van de basislijn.

Voor de selectie van datapunten worden voor elk van de vier kwadranten maximaal zestien punten gekozen binnen 205 km van het te berekenen gridpunt. De afwijkingen in het RD-stelsel zijn het gevolg van zeer vele, met elkaar verbonden, metingen. Het RD-stelsel is altijd gebaseerd gebleven op de oorspronkelijke eerste-orde coördinaten. Deze coördinaten zijn verkregen uit triangulatie, een techniek die resulteert in coördinaten met een precisie zonder voorkeursrichting (bijvoorbeeld Noord-Zuid of Oost-West). Er wordt dan ook uitgegaan van het ontbreken van anisotropie. De afwijkingen in het RD-stelsel vormen geen fysiek vlak waarin alle punten ook fysiek met elkaar verbonden zijn. Voor een dergelijk noodzakelijk glad vlak (bijvoorbeeld een geoïde) is de methode 'minimum curvature' het meest geschikt. 'Polynomial regression' is een geschikte methode als er trends te verwachten zijn. De interpolatie tussen de netpunten gebeurt met de methode 'Overhauser Splines', analoog aan de interpolatie bij NLGEO2004 (zie ook [De Min, 1996]).

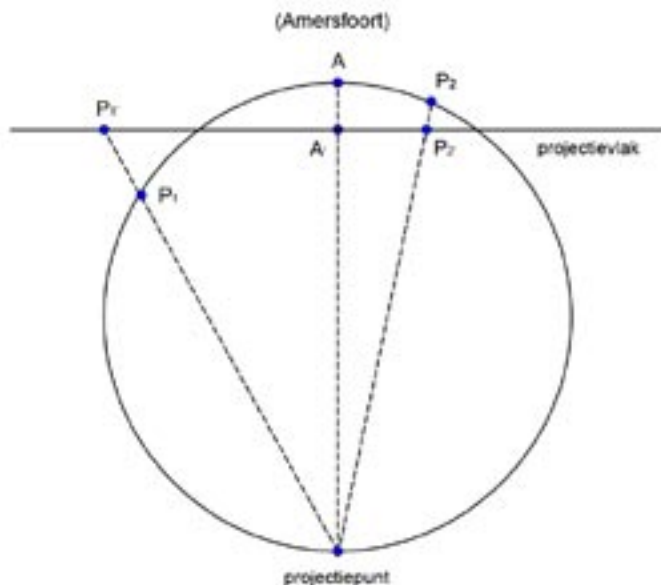


Figuur 16. Interpolatie met de methode 'Overhauser Splines' tussen zestien omliggende gridpunten.

3.2.5 De RD2000-definitie van het RD-stelsel

De nieuwe definitie van het stelsel van de RD met de naam RD2000 is afgeleid van het ETRS89. De transformatie van RD-coördinaten uit ETRS89 is een deel van de relaties tussen ETRS89, RD en NAP (zie figuur 25 in paragraaf 3.4; zie ook daar voor de procedures van de transformatie). Deze definitie (RD2000) vervangt de definitie van Heuvelink, die bekend staat als RD1918 [Heuvelink, 1918].

De voor de RD gebruikte kaartprojectie is de zogenaamde Dubbelprojectie van Schreiber: eerst een conforme Gauss-projectie van de ellipsoïde van Bessel(1841) naar een bol en daarna een conforme projectie van deze bol naar een plat vlak (zie figuur 17). Het centrale punt van beide projecties is de stang op de spits van de Onze Lieve Vrouwe toren in Amersfoort in 1895 (zie verder [Heuvelink, 1918]). Voor deze kaartprojectie zijn reeksen ontwikkeld, zoals bijvoorbeeld gepubliceerd in de Handleiding Technische Werkzaamheden (HTW, [Polman en Salzmann, 1996]). In RDNAPTRANS™ worden de strenge formules gehanteerd (zie ook paragraaf 3.4).



Figuur 17. Stereografische projectie; de punten P_1 en P_2 liggen op de rekenbol en worden als respectievelijk P_1' en P_2' afgebeeld in het kaartvlak.

Volgens de RD2000-definitie wordt de kaartprojectie uitgevoerd met dezelfde constanten als bij de RD1918-definitie, ook voor de coördinaten van het nulpunt (zie ook paragraaf 3.2.7). Het nulpunt met de zo geprojecteerde coördinaten $x = 155000.000$ en $y = 463000.000$ heeft de RD-coördinaten $x = 154999.990$ en $y = 462999.934$. De eerstgenoemde, geprojecteerde, coördinaten worden in het vervolg pseudo-RD genoemd. Formeel gezien is dit een wijziging van de RD-kaartprojectie. Numeriek heeft het geen gevolgen omdat het correctiegrid ook via deze gewijzigde projectie is berekend.

Geografische coördinaten, in figuur 25 aangegeven met Bessel(1841) als φ , λ , h , wijken in de RD2000-definitie af van die in de RD1918-definitie. Het gebruik van deze geografische coördinaten, in welke definitie dan ook, wordt sterk ontraden. Voor geografische coördinaten binnen Nederland (en Europa) dienen uitsluitend ETRS89-coördinaten te worden gebruikt. Een reden voor het niet gebruiken van Bessel(1841)'s φ , λ , h is ook dat de hoogteligging van de ellipsoïde in 1918 niet is gedefinieerd. Pas bij de vaststelling van de geoïde van De Min [De Min, 1996] is de hoogteligging van de ellipsoïde ten opzichte van het NAP-vlak vastgesteld.

3.2.6 Geldigheidsgebied van de definitie RD2000

Omdat de RD-coördinaten in de definitie RD2000 afgeleid zijn van ETRS89, zouden RD-coördinaten in geheel Europa (het EUREF-gebied) berekend kunnen worden. Ver buiten de GPS-kernetpunten die aan de transformatie van ETRS89 naar RD ten grondslag liggen, heeft dat echter geen praktische betekenis. Voor de geldigheid van de RD2000-definitie is daarom een gebied vastgesteld. Dit geldigheidsgebied omvat:

- alle RD-punten;
- alle kaartbladen van de Topografische Dienst Nederland;
- het geldigheidsgebied van het geoïdemodel van De Min.

Het geldigheidsgebied is weergegeven in figuur 18 (zie pagina 35). Het gebied wordt omsloten door een polygoon met elf hoekpunten met x,y-coördinaten in meters in pseudo-RD volgens tabel 4.

| Nr. | x (m) | y (m) |
|-----|---------|---------|
| 1 | 141.000 | 629.000 |
| 2 | 100.000 | 600.000 |
| 3 | 80.000 | 500.000 |
| 4 | -7.000 | 392.000 |
| 5 | -7.000 | 336.000 |
| 6 | 101.000 | 336.000 |
| 7 | 161.000 | 289.000 |
| 8 | 219.000 | 289.000 |
| 9 | 300.000 | 451.000 |
| 10 | 300.000 | 614.000 |
| 11 | 259.000 | 629.000 |

Tabel 4. Hoekpunten van het geldigheidsgebied van de RD2000-definitie.

Het geldigheidsgebied wordt praktisch vorm gegeven door het toekennen van een extreem grote waarde (2^{127}) aan gridpunten buiten het geldigheidsgebied. Omdat bij de interpolatiemethode de zestien omliggende gridpunten (zie paragraaf 3.2.4) gebruikt worden, liggen de uiterste punten van het grid steeds tenminste 1 km in x- en y-richting buiten het geldigheidsgebied.

De koppeling van het RD met buitenlandse coördinaatsystemen is gewaarborgd door de koppeling met ETRS89 en doordat vier stations van het AGRS.NL (Apeldoorn niet) deel uitmaken van het EPN en twee stations (Kootwijk en Westerbork) zelfs van de IGS. Door de koppeling met het standaardreferentiestelsel van Europa, ETRS89, is de gekozen oplossing toekomstvast. Het Europese systeem is op zijn beurt weer eenduidig gekoppeld aan de mondiale systemen en wordt permanent gemonitord. Ook een

eventuele opvolger van het ETRS89 (ETRS2###) zal door een transformatie verbonden blijven met het ETRS89.

3.2.7 Herziening van de parameters van de gelijkvormigheidstransformatie in 2004

Uit de continue metingen op de AGRS.NL-referentiestations worden steeds, per dag, nieuwe ETRS89-coördinaten berekend. Uit deze dagoplossingen over een periode van tenminste een jaar kunnen coördinaten worden berekend waar mogelijke seizoensinvloeden uit geëlimineerd zijn. In 1997 werd de ETRS89-realisatie berekend en gepubliceerd uit data van 1996. Deze realisatie, hier verder aangeduid als ETRS89(1997), werd gebruikt tot 1-1-2005.

In 2004 zijn nieuwe ETRS89-coördinaten bepaald uit de dagoplossingen over het jaar 2002 (zie ook paragraaf 3.1). Deze realisatie wordt hier verder aangeduid als ETRS89(2004). Deze realisatie verschilt ongeveer 1,5 cm met ETRS89(1997). Aanwijsbare oorzaken voor de geconstateerde verschillen zijn:

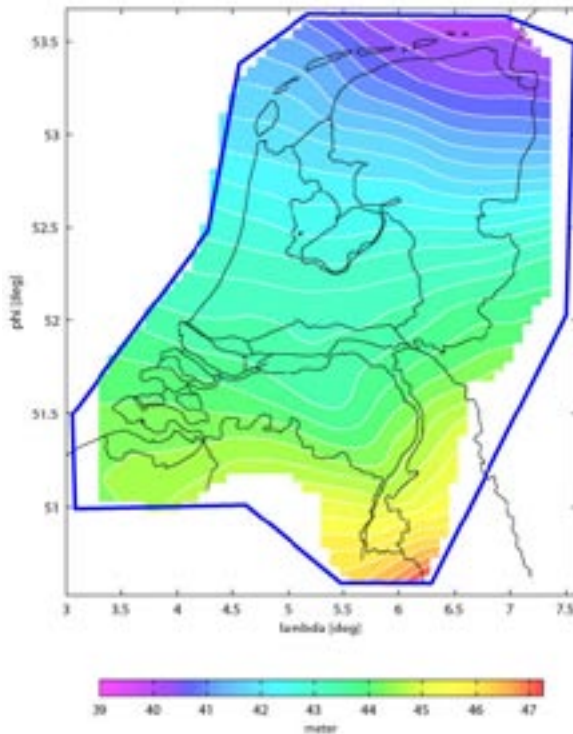
- de coördinaten uit 1997 zijn berekend in een ander netwerk;
- de GPS-apparatuur op de referentiestations is vervangen;
- er is een nieuwe realisatie van ETRS89.

Om de RD-coördinaten zo constant mogelijk te houden was een aanpassing van de transformatie tussen ETRS89 en RD, een onderdeel van RDNAPTRANSTM, noodzakelijk. Uitgegaan werd van een ongewijzigde relatieve ligging van de AGRS.NL-punten in ETRS89(1997) en ETRS89(2004). In RDNAPTRANSTM2004, de opvolger van het RDNAPTRANSTM uit 2000, werden daarom de parameters van de gelijkvormigheidstransformatie aangepast aan de nieuwe ETRS89(2004)-coördinaten van de AGRS.NL-punten, terwijl het RD-correctiegrid ongewijzigd bleef.

Een onderdeel van de berekening van de zeven parameters van de gelijkvormigheidstransformatie is een toetsing van de coördinaten. Als kansmodel werden onderstaande standaardafwijkingen gebruikt, afgeleid van de berekening van de geaggregeerde jaaroplossing van 2002:

| | σ_{ϕ} (mm) | σ_{λ} (mm) | σ_h (mm) |
|--------------|----------------------|-------------------------|-----------------|
| ETRS89(1997) | 1,3 | 1,3 | 3,3 |
| ETRS89(2004) | 1,3 | 1,3 | 3,3 |

Bij de toetsing bleek het punt Terschelling niet te voldoen. Vervolgens werden de zeven transformatieparameters berekend uit de overige vier AGRS.NL-punten. Er werd



Figuur 18. Geldigheidsgebieden van de RD2000-definitie en NLGEO2004. De blauwe lijnen geven de omtrek weer van het RD2000-geldigheidsgebied en het gekleurde vlak geeft het geldigheidsgebied weer van NLGEO2004.

aangenomen dat het punt Terschelling heeft bewogen ten opzichte van zijn directe omgeving. De locatie van de antenne op een twaalf meter hoge mast, gefundeerd op heipalen op een kade achter een damwand, is mogelijk een verklaring voor deze beweging.

3.3 De nieuwe NAP-publicatie per 1 januari 2005

3.3.1 De 5e Nauwkeurigheidswaterpassing

Bij de 5e Nauwkeurigheidswaterpassing (5e NWP) was het uitgangspunt om een landelijke hermeting uit te voeren van het primaire net van ondergrondse merken en nulpalen van het NAP met een precisie van $0,5 \text{ mm}/\sqrt{\text{km}}$ [Brand, 2004a]. Hiervoor is een grootschalige meetcampagne opgezet, waarbij circa 5000 km primaire waterpassing is uitgevoerd om van circa 360 ondergrondse merken en nulpalen de hoogtes te controleren. Na een eerste verwerking van de meetgegevens werden de volgende conclusies getrokken:

1. De verschillen tussen de op dat moment bekende hoogtes van ondergrondse merken en nulpalen en de nieuw berekende hoogtes vertoonden verschillen variërend van -3 tot +2 cm over het hele land. Dit kwam overeen met de reeds heersende verwachtingen.
2. De precisie van de hoogtes van het primaire net bedroeg slechts 0,8 mm/ $\sqrt{\text{km}}$. Dit werd onvoldoende geacht om de resultaten van de 5e NWP als enige basis te laten dienen voor een herberekening van het primaire net van het NAP.
3. De hoogte van het ondergrondse merk op de Dam OA2350 paste slecht bij de hoogtes van de overige ondergrondse merken in Nederland en is waarschijnlijk niet correct. Dit wordt vermoedelijk veroorzaakt door het feit dat de dijkpeilsteen in de Nieuwe Brugsluis in Amsterdam tussen de 2e NWP en de overbrenging van deze hoogte naar de Dam in 1955 nog verzakt is en dat deze zetting niet is verdisconteerd in de hoogte van het ondergronds merk op de Dam, of door zetting van dit ondergronds merk sindsdien (zie ook paragraaf 2.3.2).

Om aan de tweede en derde conclusie een gevolg te geven, is voor de herberekening van het primaire en secundaire net van het NAP een rekenstrategie ontwikkeld waarbij (1) de metingen van de 5e NWP worden gecombineerd met secundaire waterpassingen uit de 2e en 3e Planperiode en (2) de onzekerheden met betrekking tot het ondergrondse merk op de Dam worden beheerst.

Bij de herberekening van de NAP-hoogtes is op de volgende wijze te werk gegaan (zie ook [Brand, 2004b]):

- berekening van de hoogte van het ondergronds merk op de Dam in Amsterdam, zie paragraaf 3.3.2;
- berekening van het primaire net van ondergrondse merken en nulpalen, zie paragraaf 3.3.3;
- berekening van het secundaire net van peilmerken, zie paragraaf 3.3.4.

3.3.2 Uitgangshoogte van het ondergronds merk in Amsterdam

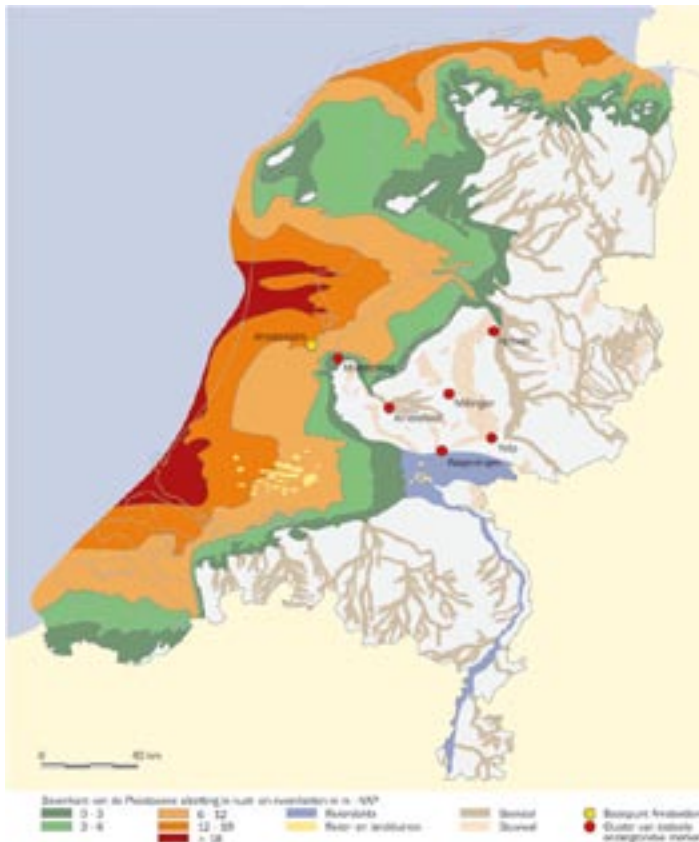
Voor de berekening van de hoogte van het ondergronds merk OA2350 op de Dam (zie paragraaf 2.3.2 voor de problematiek met betrekking tot de stabiliteit van dit merk) werd geconcludeerd dat de tot op heden gebruikte hoogte en de stabiliteit van dit ondergronds merk onvoldoende gegarandeerd is om zonder meer dit punt als basis voor het primaire net van het NAP te gebruiken.

Uit geologische gegevens kan worden afgeleid dat de ondergrondse merken in het oosten van Nederland, in het bijzonder op de Veluwe, wel stabiel zijn [Brand et al., 2002a]. De stabiliteit van deze punten kan benut worden voor de controle van het ondergronds merk in Amsterdam. Bij doorrekening van het primaire net van het NAP kan door middel van statistische toetsing eventuele beweging van het basispunt in Amsterdam ten opzichte van punten op de Veluwe geconstateerd worden. Op deze manier wordt bereikt dat het nulniveau van het NAP, zoals gedefinieerd door het pri-

maire net van de 2e NWP [Waalewijn, 1979], zo goed mogelijk wordt gehandhaafd, terwijl de hoogte van het basispunt in Amsterdam voldoende gecontroleerd wordt. Voor dit doel zijn zes ondergrondse merken geselecteerd op basis van de volgende criteria [Brand, 2004b]:

- de verwachte stabiliteit op grond van de geologie van de ondergrond;
- de onderlinge afstand;
- de afstand tot Amsterdam;
- het al dan niet opgenomen zijn in recente waterpassingen (5e NWP en 2e, 3e Planperiode) en in de 2e NWP.

In figuur 19 is de geologische situatie van Nederland geschetst, met name de diepte van de top van het Pleistoceen en de ligging van het geselecteerde cluster van stabiele ondergrondse merken en het basispunt in Amsterdam. Het geselecteerde cluster bestaat uit de volgende ondergrondse merken:



Figuur 19. De ligging van het cluster van stabiele ondergrondse merken en de geologische situatie van Nederland; bron NITG-TNO: [De Mulder e.a., 2003].

| Plaats | Nummer | Plaats | Nummer |
|------------|--------|------------|--------|
| Heerde | 0A1071 | Millingen | 0A2160 |
| Velp | 0A1092 | Wageningen | 0A2170 |
| Amersfoort | 0A1111 | Muiderberg | 0A2180 |

Tabel 5. Het cluster van stabiele ondergrondse merken van het NAP.

Een nieuwe hoogte voor het ondergronds merk OA2350 op de Dam in Amsterdam is berekend door een vereffening van de meetgegevens van de projecten vermeld in tabel 6, waarbij is aangesloten op de historische hoogtes (uit de 2e NWP) van het cluster van stabiele ondergrondse merken (zie tabel 5). De hoogte van het ondergronds merk OA2350 is vastgesteld op NAP + 1,408; dit is 2 cm lager dan de oude gepubliceerde hoogte. Door statistische toetsing van de aansluitingspunten is gecontroleerd of er aantoonbare deformaties binnen het cluster van stabiele ondergrondse merken hebben plaatsgevonden in de periode tussen de 2e en 5e NWP. Dit is niet het geval gebleken, zie [Brand, 2004b].

3.3.3 Herberekening van het primaire net

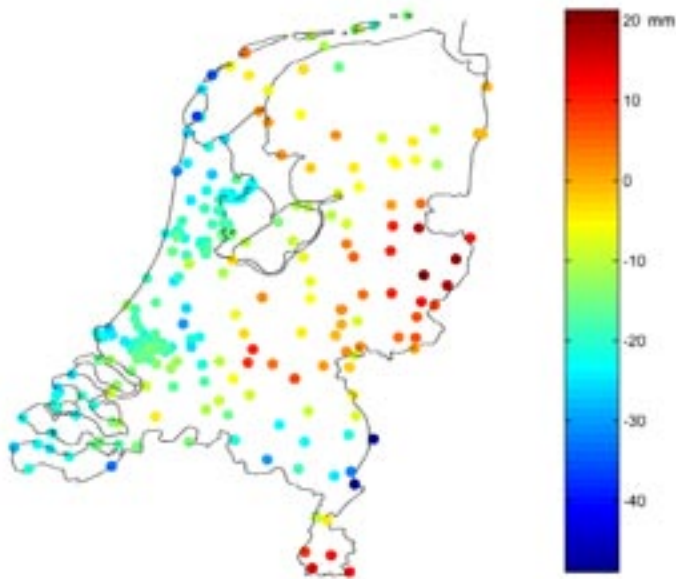
Als tweede stap zijn de hoogtes van het primaire net van het NAP (her)berekend met de meetgegevens van de projecten vermeld in tabel 6. Echter, nu is er een vrije vereffening uitgevoerd met als basispunt het ondergronds merk OA2350 in Amsterdam en de nieuw berekende hoogte van dit merk (NAP + 1,408 m).

In [Brand, 2004b] worden de verschillen tussen de oude en nieuwe hoogtes van het primaire net van het NAP geanalyseerd (zie figuur 20). Hier is te zien dat voor het merendeel van de ondergrondse merken de hoogte naar beneden wordt bijgesteld. Dit geldt vooral in het westen van Nederland, waar de correcties variëren van -1 tot -3 cm. Ook in het oostelijk deel van Brabant en Noord-Limburg zien we vergelijkbare correcties. In de rest van het land liggen de correcties tussen -1 en +1 cm, met alleen in Twente en Zuid-Limburg correcties tot +2 cm.

In [Brand, 2004b] is ook de precisie van het primaire net geanalyseerd. Omdat het primaire net een vrije vereffening is met Amsterdam als basis, loopt de standaardafwijking op van Amsterdam naar de grens. De relatieve precisie van het primaire net van het NAP kan worden benaderd met de formule:

$$\sigma_{\text{rel}} \text{ (mm)} = 2 \text{ mm} + 0,2 \text{ mm}/\sqrt{\text{km}}$$

Dit betekent dat voor twee nabijgelegen ondergrondse merken de relatieve precisie circa 2 mm bedraagt, oplopend tot 4 à 5 mm aan de grenzen van Nederland (onderlinge afstand meer dan 100 km).



Figuur 20. Verschillen tussen nieuwe en oude hoogtes van de ondergrondse merken van het primaire net van het NAP; uit [Brand 2004b].

3.3.4 Berekening van peilmerkhoogtes

Als derde stap is het secundaire net van het NAP (her)berekend. Verdichting van het NAP vindt lokaal of regionaal plaats. Hierbij wordt een regionale verdichting ingepast op alle in dit project opgenomen ondergrondse merken. Dit gebeurt door middel van een pseudo-kleinstekwadratenansluiting, dat wil zeggen dat de hoogtes van ondergrondse merken wel statistisch worden getoetst, maar geen correctie krijgen. Voor de nieuwe NAP-publicatie (ofwel de nieuw te publiceren NAP-hoogtes) zijn de volgende secundaire verdichtingen opnieuw berekend:

- Alle secundaire bijhoudingsprojecten voor het NAP uit de 2e en 3e Planperiode, met inbegrip van gecombineerde projecten in concessiegebied Groningen/Friesland, uitgevoerd met de NAM. Dit omvat circa 30 projecten over een periode vanaf 1987 tot heden en omvat circa 30000 peilmerken.
- Overige projecten in concessiegebieden (sinds 1989); dit zijn circa 75 projecten, variërend van 50 tot 1000 peilmerken.
- Bijhouding van het GPS-kernet van de RD; circa 425 punten, alleen de meest recente aanmeting.
- Alle verificatiemetingen op peilmeetstations van Rijkswaterstaat voor waterstandmetingen langs de kust, binnenwateren en grote rivieren.
- Lokale verdichtingen van het NAP in een aantal grote gemeenten en waterschappen.

Bij deze berekeningen is gebruik gemaakt van de meetgegevens van de 5e NWP (optische en hydrostatische waterpassingen, zie [Brand, 2004a]) en de meest recente projecten uit de 2e en 3e Planperiode (zie tabel 6).

| | | Jaar | Aantal OM |
|-----------------------|----------------------------|-------------|-----------|
| 5e NWP | | 1996 – 2000 | 270 |
| 2e Planperiode | Limburg | 1991/1992 | 9 |
| | Achterhoek | 1993/1994 | 15 |
| | Drenthe / Overijssel | 1994 | 19 |
| | Twente | 1995 | 13 |
| | Brabant-Oost | 1995/1996 | 8 |
| | Limburg-Noord | 1996 | 13 |
| | Veluwe-Noord | 1996 | 15 |
| 3e Planperiode | Noord-Holland Midden | 1997 | 31 |
| | Rivieren West deel A | 1998/1999 | 69 |
| | Rivieren West deel B | 1999/2000 | 33 |
| | Noord-Holland Noord | 1999 | 29 |
| | Holland Midden Oost + West | 2000/2001 | 43 |
| | Wadden | 2000 – 2002 | 20 |
| | Zeeland | 2001 | 34 |
| | Rivieren Oost | 2002 | 36 |
| | Friesland Zuidwest | 2003 | 8 |
| Groningen / Friesland | 2003 | 44 | |

Tabel 6. Projecten uit de 2e en 3e Planperiode, gebruikt voor de herberekening van het primaire net van het NAP.

3.3.5 Het geoidemodel van Nederland (NLGEO2004)

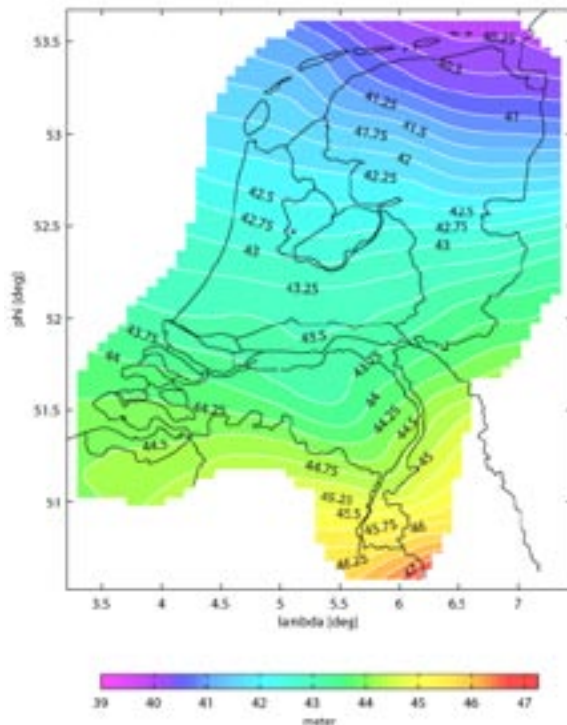
Een geoidemodel is noodzakelijk om NAP-hoogtes uit GPS-metingen te kunnen berekenen. Bij het bepalen van een nauwkeurig geoidemodel zijn drie factoren van groot belang:

1. de dichtheid en de kwaliteit van de beschikbare zwaartekrachtdata;
2. de beschikbaarheid van GPS-/waterpaspunten;
3. de berekeningsstrategieën.

De berekening is te verdelen in twee hoofdstappen:

1. de verwerking van de zwaartekrachtdata tot een gravimetrisch geoidemodel;
2. het toepassen van een correctievlak met behulp van de GPS-/waterpaspunten.

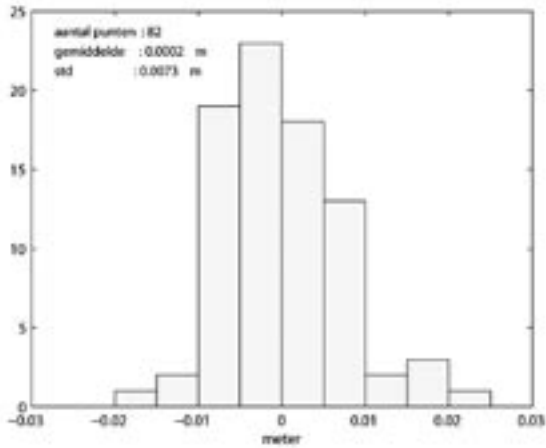
In 1996 is het eerste nauwkeurige geoidmodel voor Nederland berekend. Dit wordt beschreven in [De Min, 1996]. Voor de berekening van NLGEO2004 is gebruik gemaakt van dezelfde berekeningsmethode. De voornaamste verschillen zitten in de 'extra' toegevoegde meetgegevens: (1) extra zwaartekrachtmetingen op Belgisch en Duits grondgebied ter verbetering van de gravimetrische geoid en (2) gebruik van een set van 84 GPS-/waterpaspunten over heel Nederland (uit de 5e NWP) bij de aansluiting op NAP en ETRS89. Verdere details over de berekening van NLGEO2004 zijn te vinden in [Crombaghs, 2004]. In figuur 21 is het resultaat te zien.



Figuur 21. NLGEO2004, het geoidmodel voor Nederland; uit [Crombaghs, 2004].

De restfout na de aansluiting op de genoemde GPS-/waterpaspunten heeft een standaardafwijking van 7 mm (zie figuur 22).

Het verschil tussen NLGEO2004 en het geoidmodel van De Min bedraagt in het grootste deel van Nederland minder dan een centimeter. Vanaf de oostelijke helft van Noord-Brabant richting Limburg lopen de verschillen op tot ongeveer 6 cm. Net als het geoidmodel van De Min heeft NLGEO2004 niet als doel om het equipotentialvlak zo goed mogelijk te bepalen. Het doel is om het NAP = 0 vlak zo goed mogelijk te bepalen, om daarmee de bepaling van NAP-hoogtes en NAP-hoogteverschillen uit GPS mogelijk te maken.

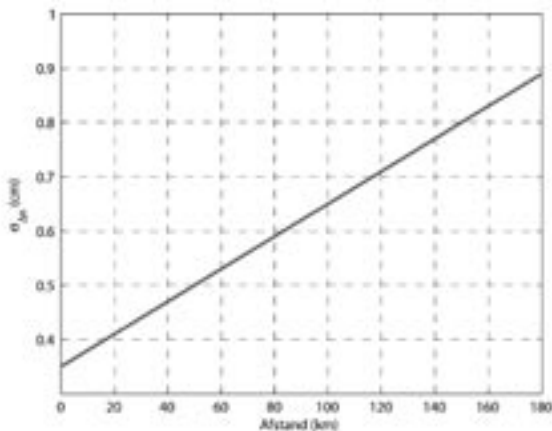


Figuur 22. Histogram van restverschillen op GPS-/waterpaspunten; uit [Crombaghs, 2004].

Volgens [Crombaghs, 2004] wordt de kwaliteit van NLGEO2004 beschreven met de volgende formule:

$$\sigma_{i,j} \text{ (cm)} = 0,35 + 0,003 \cdot d_{i,j}$$

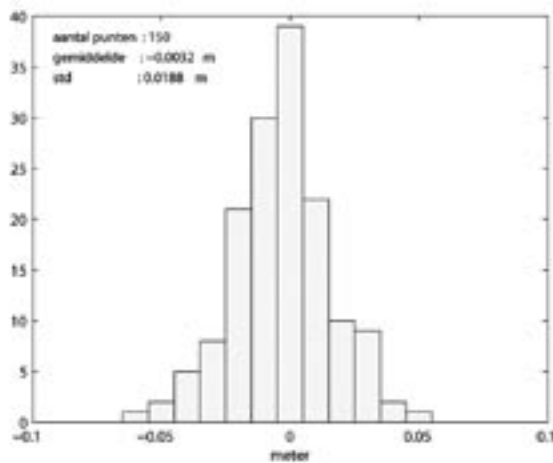
Deze formule beschrijft de te verwachten fout in een geoidhoogteverschil tussen twee punten, als functie van de afstand tussen deze punten. De precisie voor nabijgelegen punten i en j is dus circa 3,5 mm, oplopend tot 5 mm voor twee punten op 50 km afstand en circa 7 mm op 120 km afstand (zie figuur 23).



Figuur 23. Precisie van de geoid van Nederland NLGEO2004; uit [Crombaghs, 2004].

De verwachte stochastische fout ten gevolge van NLGEO2004 bij het transformeren van een hoogte in ETRS89 naar NAP bedraagt 3,5 mm. Dit betekent dat een transformatie van een met GPS gemeten hoogte in ETRS89 naar NAP omgerekend kan worden met een 95% betrouwbaarheidsinterval van $[-7 \text{ mm}, +7 \text{ mm}]$. Echter, de werkelijke nauwkeurigheid van een met GPS gemeten ETRS89-hoogte hangt in belangrijke mate ook af van de precisie van de GPS-meting.

De nauwkeurigheid van deze transformatie is onafhankelijk getoetst op circa 150 recent gemeten GPS-kernetpunten, verdeeld over Nederland, waarvan een nieuwe NAP-hoogte en een nieuwe ETRS89-hoogte is vastgesteld. Hierbij is een gemiddelde restfout van 3 mm geconstateerd met een standaardafwijking van 19 mm (zie figuur 24).



Figuur 24. Histogram van restverschillen op een selectie van GPS-kernetpunten; uit [Crombaghs, 2004].

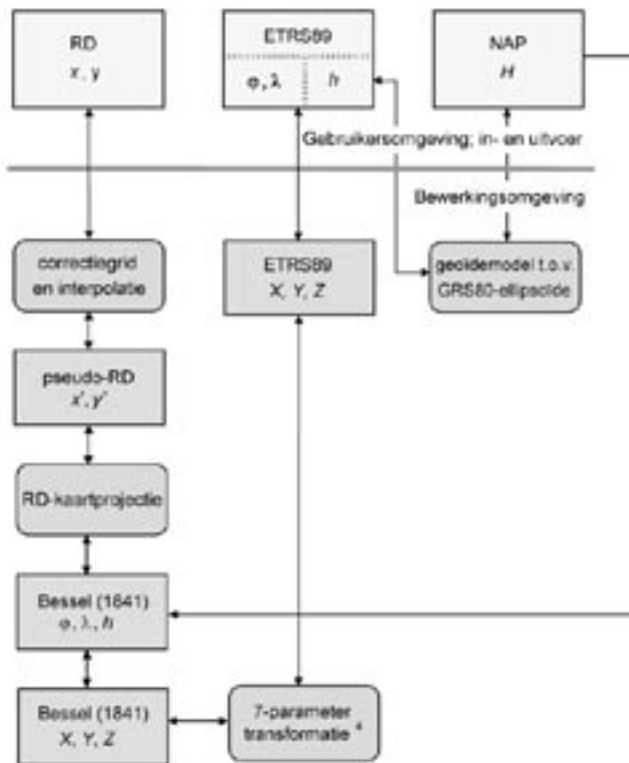
Geconstateerd kan worden dat er geen significante constante fout zit in de transformatie van ETRS89 naar NAP via NLGEO2004. De hoge standaardafwijking van 19 mm wordt verklaard uit het feit dat de gebruikte meetmethode voor de GPS-kernetpunten geoptimaliseerd is voor horizontale plaatsbepaling en niet volstaat voor nauwkeurige hoogtebepaling.

NLGEO2004 wordt gepubliceerd als onderdeel van RDNAPTRANSTM2004, de omrekenprocedure tussen ETRS89 en RD/NAP die vanaf 1 januari 2005 geldt.

3.4 RDNAPTRANS™, de relaties tussen de stelsels

In deze paragraaf worden de transformaties tussen ETRS89, RD en NAP gegeven. In figuur 25 worden de transformaties tussen ETRS89 en RD en de relatie met het NAP weergegeven. De rechthoeken geven (tussen)vormen van coördinaten aan, de ovalen de toepassing van (niet triviale) bewerkingen.

De kaartgebruiker en de landmeter gebruiken de coördinaten in de rechthoeken boven de horizontale lijn. Deze gegevens dienen als in- en uitvoer voor programmatuur. De totale transformatie van ETRS89 naar RD en NAP heeft de naam RDNAPTRANS™. Door het vastleggen van deze naam in het merkenregister kan afgedwongen worden dat het gebruik ervan beperkt blijft tot de door RD en NAP voorgeschreven berekening. De datumtransformatie tussen ETRS89 en Bessel(1841) wordt beschreven met een 7-parameter gelijkvormigheidstransformatie⁴ (zie ook paragraaf 6.1).



Figuur 25. De relaties tussen ETRS89, RD2000 en NAP.

⁴ Voor de 7-parameter gelijkvormigheidstransformatie werden in 2000 de in de HTW 1996 gepubliceerde waarden aangenomen. In 2004 zijn nieuwe waarden berekend, uitgaande van herziene ETRS89-waarden voor de AGRS.NL-referentiepunten.

In 1990, 1991 en 1994 werden GPS-meetcampagnes uitgevoerd onder de naam NEREF. Naast de vier punten van EUREF in Nederland werden negen NEREF-punten gebruikt. Een van de doelstellingen van de NEREF-campagnes was de bepaling van transformatieparameters tussen RD/NAP en ETRS89 [Brand et al., 1997].

Voor een goede aansluiting aan het RD werden de NEREF-punten verbonden met omliggende eerste-orde RD-punten. Voor een goede verbinding met het NAP werden waterpassingen uitgevoerd naar ondergrondse merken van het NAP. Uit voorlopige resultaten van de NEREF-berekeningen in 1991 zijn transformatieparameters bekend. Uit dertien NEREF-punten werden de zeven parameters voor een ruimtelijke gelijkvormigheidstransformatie berekend tussen ETRS89 en RD/NAP in Nederland. De restverschillen in de transformatie waren kleiner dan 17 cm in alle richtingen. Deze transformatieparameters zijn inmiddels opgenomen in de nieuwe Handleiding Technische Werkzaamheden 1996 van het Kadaster [Polman en Salzmann, 1996].

In 2004 bleek een herziening van RDNAPTRANSTM noodzakelijk wegens de berekening van de nieuwe geoid NLGEO2004 en een noodzakelijke aanpassing van de transformatieparameters tussen ETRS89 en RD door gewijzigde ETRS89-coördinaten van de AGRS.NL-referentiestations. De nieuwe transformatie kreeg de naam RDNAPTRANSTM2004. Het RD is sindsdien gedefinieerd met de nieuwe transformatie onder de naam RD2004. De RD-coördinaten wijzigen door deze overgang maximaal slechts enkele millimeters en de som van alle wijzigingen is praktisch gelijk aan nul. Daarom blijft de naam RD-coördinaten, zonder toevoeging van een jaartal, gehandhaafd. Van de gelegenheid werd gebruik gemaakt om de programmatuur te integreren en in één programma te schrijven in de taal C++. Vanwege deze integratie werden ook de geldigheidsgebieden van de geoid en het RD-grid (zie figuur 18 in paragraaf 3.2.6) geïntegreerd. Voor het geldigheidsgebied van RDNAPTRANSTM2004 geldt nu dat binnen dat gebied zowel geoidhoogtes als RD-correcties beschikbaar moeten zijn. Ook werden de formulieren die toestemming geven voor het gebruik van RDNAPTRANSTM2004 in die zin aangepast dat deze toestemming geldt totdat, rekening houdend met een zekere overgangstermijn, een nieuwe versie van de transformatie wordt gepubliceerd.

De software voor RDNAPTRANSTM2004 wordt door het Kadaster en Rijkswaterstaat ter beschikking gesteld aan producenten en distributeurs van geodetische software. Op www.rdnap.nl worden omrekenhulpsystemen beschikbaar gesteld.

4 Toekomstige bijhoudingen

4.1 ETRS89-realisatie

De gepubliceerde ETRS89-coördinaten van de AGRS.NL-referentiestations worden in de toekomst aangepast indien de meest recente jaaroplossing van de coördinaten van één of meer stations meer dan 3σ ($\sim 99,7\%$ betrouwbaarheidsinterval) afwijkt van de gepubliceerde waarde (zie [Pol en Kösters, 2004] en paragraaf 3.1).

Bij de berekening van nieuwe ETRS89-realisaties kan de hypothese dat een punt verstoord is, worden getoetst met een gelijkvormigheidstransformatie. Alternatieve hypothesen, bijvoorbeeld dat Nederland zou vervormen, kunnen met het geringe aantal van vijf stations echter niet worden geverifieerd.

De continuïteit van de AGRS.NL-referentiestations is een noodzakelijke voorwaarde voor de stabiliteit van het ETRS89-stelsel en daarmee ook van het RD-stelsel in Nederland. De continuïteit op lange termijn blijft echter onzeker, zoals bijvoorbeeld blijkt uit het na 16 jaar verdwijnen van het station Kootwijk.

Om in de toekomst de continuïteit van de koppeling tussen de traditionele stelsels RD en NAP enerzijds, en ETRS89 (en daarmee indirect ITRS) anderzijds te borgen, is een voldoende aantal permanente, hoogstabiele waarnemingstations voor satellietplaatsbepalingssystemen noodzakelijk. Dit zijn stations van een ander kwaliteitsniveau dan referentiestations voor RTK-diensten, die meer gericht zijn op operationele dienstverlening en waar de nadruk zal liggen op 100% beschikbaarheid.

De ontwikkelingen op het gebied van satellietplaatsbepaling (Galileo, single point positioning) zullen op termijn leiden tot een afname van dichte netwerken van referentiestations. Immers, absolute plaatsbepaling wordt steeds nauwkeuriger en daardoor voor meer gebruikers interessant. Daarnaast zullen de resterende netwerken van referentiestations steeds wijdmaziger worden, omdat de modellering van foutenbronnen (troposfeer, satellietbanen en -klokken, etc.) verbetert. Op het gebied van datacommunicatie zal het internet een belangrijke rol gaan spelen. Hiermee vervalt niet de behoefte aan een vaste koppeling tussen de traditionele stelsels (RD en NAP) en ETRS89.

Tot slot wordt de verwachting uitgesproken dat op termijn (over 10 tot 20 jaar) de rol van 'officieel datum voor continentaal Europa' zal verschuiven van ETRS89 naar ITRS. Immers door de bewegingen der continenten (circa 1 tot 3 cm/jaar) zullen de ETRS89-coördinaten zover uiteen gaan lopen met de actuele ITRS-coördinaten, dat voor een belangrijk aantal toepassingen een bijstelling noodzakelijk wordt. Echter weinigen zullen behoefte hebben aan een stelselwijziging van ETRS89 naar ETRS20XX. Ook is er bij gebruikers geen behoefte aan een dynamisch coördinaatstelsel voor praktische toepassingen. Een betere oplossingsrichting is om het model van de continentbeweging op te nemen in een soort RDNAPTRANS-procedure, waarmee dan getransformeerd wordt

tussen RD en NAP en ITRS, in plaats van ETRS89. Op deze wijze wordt softwarematig een koppeling met de lokale stelsels gerealiseerd.

4.2 RD

Gezien de afnemende vraag naar conventionele RD-punten en een toename van het GPS-gebruik voor plaatsbepaling, komt het accent in de bijhouding van het RD-stelsel steeds meer te liggen op het GPS-kernet en de AGRS.NL-referentiestations. Na consultatie van de Gebruikersraad van het Kadaster en de NCG en het informeren van de klanten is de Rijksdriehoeksmeting in 2004 gestopt met het preventief onderhoud van het klassieke RD-net, bestaande uit richtpunten en opstelbouten. Deze punten zullen alleen nog op verzoek worden herbepaald. Tegelijkertijd wordt gestreefd naar een verbetering van de kwaliteit van het GPS-kernet op de volgende punten:

- Stabieler verzekeringen, vooral in verticale zin, bijvoorbeeld door het gebruik van grondankers in plaats van ingegraven betonnen stenen.
- Uitbreiden van het aantal punten in stedelijke gebieden en infrastructurele zwaartepunten (uitgaande van de in de '5e nota ruimtelijke ordening' genoemde infrastructurele werken).
- De bijhoudingsfrequentie wordt verhoogd van eens per drie jaar naar eens per anderhalf jaar.
- Bij de locatie van nieuwe punten wordt rekening gehouden met de bereikbaarheid en ARBO-voorschriften.

De GPS-kernetpunten worden direct bepaald ten opzichte van de AGRS.NL-referentiestations. Uit GPS-metingen (typisch tweemaal anderhalf uur) op het GPS-kernetpunt en de data van de AGRS.NL-referentiestations worden de ETRS89-coördinaten van het punt berekend, waarna RD-coördinaten volgen met een actuele versie van RDNAPTRANSTM (zie paragraaf 4.3). De permanente GPS-infrastructuur, in de vorm van de op stabiliteit voor lange termijn gerichte AGRS.NL-referentiestations, vormen zo de operationele basis van het RD-stelsel in Nederland.

Zowel de ellipsoïdische hoogtes uit GPS-metingen in ETRS89 als de uit waterpassing gevonden orthometrische hoogtes van de GPS-kernetpunten worden naast elkaar gepubliceerd.

4.3 RDNAPTRANSTM

In 2000 is de transformatie tussen ETRS89 enerzijds en RD/NAP anderzijds vastgelegd in de RDNAPTRANSTM-procedure. Deze procedure bleek echter ook bijhouding te behoeven. Nieuwe versies worden aangeduid met de toevoeging van een jaartal. De eerste nieuwe versie na 2000 is RDNAPTRANSTM2004. De bijhouding van RDNAPTRANSTM dient twee doelen:

1. het beschikbaar stellen van de meest actuele ('beste') geoïde;
2. het stabiel houden van het RD-stelsel bij wijzigende ETRS89-coördinaten van de AGRS.NL-referentiestations.

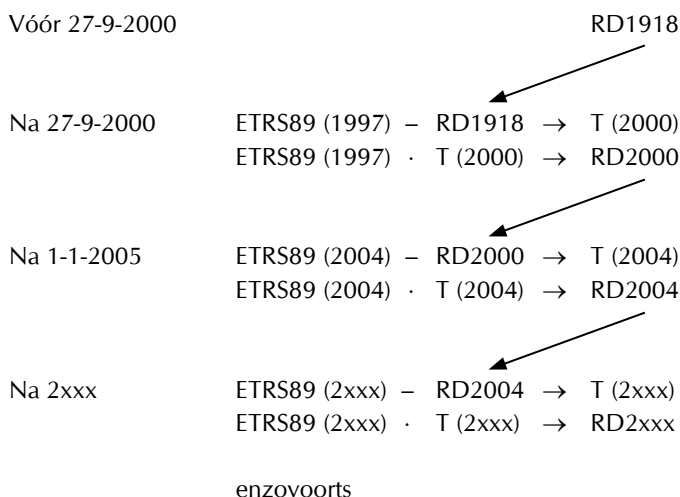
Ad 1. Door het beschikbaar komen van verbeterde en nieuwe technieken voor het bepalen van de geoïde (of pseudo-geoïde, of correctievlak) is de precisie ervan in het verleden steeds toegenomen. Ook in de toekomst zijn nog verbeteringen te verwachten, zoals door de gecombineerde resultaten van speciale satellietmissies (CHAMP, GRACE, GOCE) en door het beschikbaar komen van meer en betere verschilwaarden tussen de ellipsoïdische hoogte uit GPS-metingen en de hoogte uit waterpassing op GPS-kernetpunten. Het aantal GPS-kernetpunten wordt uitgebreid (zie ook paragraaf 2.2.6).

Ad 2. Als de ETRS89-coördinaten van een of meer AGRS.NL-punten wijzigen, wordt een nieuwe transformatie tussen ETRS89 en RD voor RDNAPTRANSTM berekend met als doel het constant houden van de RD-coördinaten. Deze transformatie wordt echter alleen gepubliceerd als de wijzigingen met de vorige versie significant zijn (zie de alinea hieronder over de significantie). In de nieuwe transformatie wordt het correctiegrid steeds ongewijzigd gelaten en, totdat het tegendeel wordt aangetoond, wordt Nederland beschouwd als één onvervormd geheel. De consequentie van dit laatste is dat steeds een aan de nieuwe ETRS89-coördinaten aangepaste gelijkvormigheids-transformatie wordt berekend tussen pseudo-RD en ETRS89. Omdat pseudo-RD en RD door het correctiegrid vastgekoppeld zijn, worden ze in onderstaand schema samen genomen als 'RD', voorzien van een jaartal voor de definitie. De totale transformatie tussen RD en ETRS89, bestaande uit de 7-parameter gelijkvormigheidstransformatie, het RD-grid en de kaartprojectie (wordt hier aangeduid met 'T'), ook weer aangevuld met een jaartal.

De verschillen tussen de verschillende RD-definities worden veroorzaakt door de restverschillen van de gelijkvormigheidstransformatie. Deze restverschillen, veroorzaakt door de ruis in de opeenvolgende ETRS89-bepalingen en 'echte', maar niet-significante bewegingen, zijn dermate klein (kleiner dan de RD-specificaties voor de precisie), dat naar buiten toe steeds eenvoudigweg over 'RD' zonder jaartal gesproken kan worden.

Voor de berekening van nieuwe transformatieparameters wordt steeds teruggeslagen naar de bij de vorige RD-definitie horende coördinaten. Het terug gaan naar de oorspronkelijke RD-waarden van de RD2000-definitie stuit op het grote praktische bezwaar dat verstoorde of niet meer beschikbare punten, zoals Terschelling en Kootwijk, niet meer meegenomen kunnen worden in toekomstige berekeningen.

Voor het berekenen van de transformatieparameters worden de aansluitingspunten getoetst met standaardafwijkingen voor φ , λ en h , volgens de uitkomsten van de geagreerde dagoplossingen. Verworpen punten worden vervolgens niet gebruikt voor de berekening van de transformatieparameters.



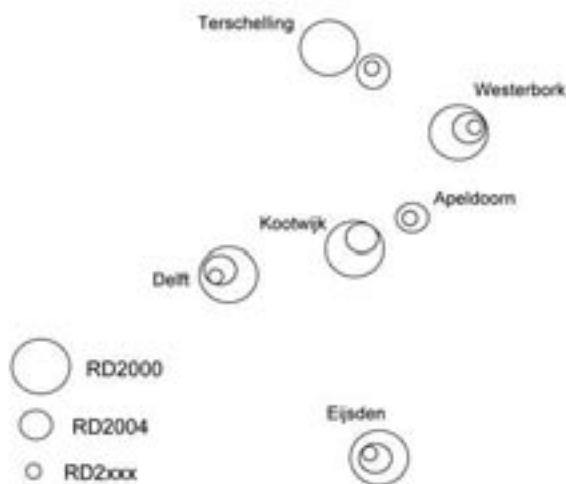
Figuur 26. Schematische weergave van de opeenvolgende realisaties van ETRS89 en de bijbehorende gelijkvormigheidstransformaties en RD-definities.

De significantie van nieuwe transformatieparameters wordt afgemeten aan de invloed op de RD-coördinaten. Als tolerantie wordt een coördinaatverschil van 1 cm aangehouden. Zo blijven de coördinaten binnen de specificaties van de GPS-kernetpunten, de eerste verdichting van AGRS.NL (zie ook paragraaf 3.2.2). Deze toleranties worden getoetst op de randen van het geldigheidsgebied van de RD2000-definitie (zie ook paragraaf 3.2.6). Op deze randen van het geldigheidsgebied is de invloed van een gewijzigde ETRS89-realisatie het grootst. De verschillen worden voor bijvoorbeeld ETRS89(1997) en ETRS89(2004) berekend uit:

$$T(2000) \cdot \text{ETRS89}(1997) - T(2000) \cdot \text{ETRS89}(2004)$$

Alleen als het verschil op enig punt van het RD-geldigheidsgebied de tolerantie overschrijdt, wordt de gewijzigde transformatie gepubliceerd.

Omdat verwacht wordt dat de precisie van de opeenvolgende ETRS89-oplossingen in de loop der tijd zal verbeteren als gevolg van betere meettechnieken en langere tijdseries, zullen de verschillen tussen de oplossingen alsnog kleiner worden. De transformatieparameters zullen zo convergeren naar stabiele waarden.



Figuur 27. Schematische weergave van opeenvolgende RD-definities met hun standaard-cirkels, afgeleid van de opeenvolgende ETRS89-realisaties. De systematische effecten zijn verwijderd door gelijkvormigheidstransformaties. Van het punt Terschelling wordt aangenomen dat het tussen 1996 en 2004 verstoord is; het punt Kootwijk is na 2004 niet meer beschikbaar.

4.4 NAP

Vanaf 1 januari 2005 is een grootscheepse vernieuwing van de NAP-publicatie een feit. Dit wil zeggen dat alle hoogtes van peilmerken van het NAP en hiervan afgeleide hoogtemerken gebaseerd zullen zijn op geactualiseerde hoogtegegevens van ondergrondse merken en nulpalen van het NAP. Hiermee zijn de effecten van bodembeweging op de hoogtes van de NAP-infrastructuur grotendeels geëlimineerd ofwel, nauwkeuriger geformuleerd, beperkt tot de invloed van de laatste vijftien jaar. Desalniettemin is en blijft bijhouding van het NAP noodzakelijk. De wijze waarop moet nog nader uitgewerkt worden. Hierbij speelt een aantal externe factoren een rol.

De belangrijkste factor is de mate waarin plaatsbepaling (en vooral hoogtebepaling) in de toekomst met satellietplaatsbepaling uitgevoerd kan gaan worden. Deze wordt bepaald door de mogelijkheden van het gebruik van GPS, Galileo en Glonass voor praktische hoogtebepaling ten behoeve van aanleg en onderhoud van infrastructuur enerzijds, en voor het beheer van de NAP-infrastructuur anderzijds.

Buiten discussie staat dat een stabiele verzekering van hoogtes slechts mogelijk is door aard vaste merken (onder- en bovengronds) en dat de gebruiker van hoogte-informatie vooral geïnteresseerd is in zwaartekrachtsgelateerde hoogtes (waar stroomt het water naar toe?) en minder in ellipsoïdische hoogtes. Een 100% overgang naar een infrastructuur die uitsluitend ingegeven is door voorzieningen voor satellietplaatsbepaling

is dan ook niet te verwachten. Eerder zal er sprake zijn van hybridisatie (combinatie van technieken). Verder is er een blijvende en cruciale rol weggelegd voor de geoiden als transformatiemodel tussen zwaartekrachtsgerelateerde hoogtes en hoogtes uit satellietplaatsbepaling.

Op basis van de huidige kennis over grootschalige bodembeweging in Nederland op dit moment is een herhalingsfrequentie voor bijhouding van het primaire net van het NAP van eens in de 20 tot 30 jaar verantwoord. Binnen deze periode is een meetbare hoogteverandering van een ondergronds merk (als gevolg van een grootschalig patroon van bodembeweging) niet te verwachten. Niet uit te sluiten valt echter dat hoogtes van individuele ondergrondse merken door lokale invloeden wel veranderen. Secundaire verdichtingsmetingen moeten in een goede controle hierop voorzien. Een nieuwe nauwkeurigheidswaterpassing echter is vóór 2015 niet te verwachten.

Van de bijhouding van het secundaire net van peilmerken is te verwachten dat (afhankelijk van de mate van gebruik van satellietplaatsbepaling bij inwinning van hoogtegegevens) in de toekomst met een wijdmazig netwerk kan worden volstaan. Hierbij wordt opgemerkt dat niet zozeer het aantal geplaatste peilmerken de kosten bepaalt, maar het aantal te waterpassen kilometers voor de bijhouding daarvan. De huidige bijhoudingscyclus (3e Planperiode) wordt eind 2006 afgerond. In de planning van een 4e Planperiode zullen de specificaties van het secundaire net worden geactualiseerd op basis van de verwachting van de ontwikkeling van het feitelijk gebruik van het secundaire net.

Verder is een versteviging van de koppeling tussen de GPS-infrastructuur (AGRS.NL en verdere verdichting daarvan) en stabiele (onder- en bovengrondse) hoogtemerken te verwachten. Permanente GPS-infrastructuur zal direct gekoppeld moeten zijn aan een stabiele NAP-infrastructuur.

Op het gebied van de geoiden van Nederland wordt verwacht dat onder invloed van satellietmissies als CHAMP, GRACE en GOCE in de komende tien tot twintig jaar verbeterde wereldwijde geoidmodellen beschikbaar komen met een nauwkeurigheid tot circa 1 dm. Voor nauwkeurige hoogtebepaling zal in de toekomst echter wel behoefte blijven aan lokale geoidmodellen, die mede gebaseerd zijn op lokale zwaartekrachtmetingen met een cm-precisie, zoals NLGEO2004.

5 Referenties

5.1 Literatuur

In deze paragraaf is getracht een onderverdeling te maken naar de onderwerpen ETRS89, RD, NAP, geöïde en overig. Deze indeling is niet geheel onderscheidend, maar is bedoeld om enige ordening te brengen in de lange lijst. Overigens wordt niet aan alles gerefereerd in de tekst.

ETRS89

- Adam, J., W., Augath, C. Boucher, C. Bruyninx, P. Dunkley, E. Gubler, W. Gurtner, H. Hornik, H. van der Marel, W. Schlüter, H. Seeger, M. Vermeer, J.B. Zielinski, The European Reference System coming of age. *Geodesy Beyond 2000*, IAG Symposia, Vol. 121, Springer, 1999.
- Altamimi, Z., C. Boucher, 2001. Memo: Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign, version 5, 2001, <http://lareg.ensg.ign.fr/EUREF/memo.pdf>.
- Brand, G.B.M., J. van Buren, H. van der Marel, R.E. Molendijk, De NEREF-Campagnes 1990, 1991 en 1994. Nederlandse Commissie voor Geodesie. No. 35, Delft, 1997.
- Bruyninx, C., G. Carpentier, F. Roosbeek, 2002, EPN monitoring: status and plans, presented at the EUREF symposium 2002, Azores.
- Buren, J. van, R. van der Velden, 1999, Praktijkervaringen met het actief GPS-referentiesysteem voor Nederland, *Geodesia*, no. 99(1), pp. 3-8.
- Haagmans, M.E.E., H. van der Marel, J. van Buren, 1996, Actief GPS-referentiesysteem voor Nederland, *Geodesia*, no. 95(5), pp. 227-230.
- Hofman, M., H. van der Marel, K. de Jong, J. van Buren, M.E.E. Haagmans, D. Odijk, 1995, Actief GPS-referentiesysteem voor Nederland, *Geodesia*, no. 96(12), pp. 227-230.
- Marel, H. van der, 2000, De plaats van RD en NAP in Europa – over internationale referentiestelsels, Europese samenwerking en de gevolgen voor RD en NAP, *Geodesia*, no. 2000(9), pp. 373-380
- Marel, H. van der, 2002, Processing of the AGRS.NL network with the Bernese GPS software (intern document).
- McCarthy, D. (ed.), The IERS Conventions. IERS Technical Note, No. 21, 1996.
- Molendijk, R.E., G.W. van Willigen, J. van Buren, M.A. Salzmann, 2000, De vernieuwing van de geometrische infrastructuur van Nederland, in: jaarverslag NCG 1999, pp. 41-51.
- Pol, A.H.F., A.J.M. Kösters, Nieuwe ETRS89-coördinaten voor het AGRS.NL, in GPS Nieuwsbrief, mei 2004.

Schut, T.G., 1991, Transformatieparameters voor RD naar WGS84, in GPS Nieuwsbrief, oktober 1991.

RD

Bruinsma, J., 1997, Laatste steen GPS-kernet geplaatst, *Geodesia*, no. 1997(11), pp. 517-518.

Buren, J. van, 1994, Het GPS-kernet: schakel tussen RD en GPS, *Geodesia*, no. 94(6), pp. 262-264.

Buren, J. van, 1998, Het RD-stelsel, wat schuift dat?, *Geodesia*, no. 98(7), pp. 333-334.

Heuvelink, H.J., 1918, De stereografische projectie en hare toepassing bij de Rijksdriehoeksmeting, Rijkscommissie voor Graadmeting en Waterpassing, Delft.

Kadaster, 2000, Het stelsel van de Rijksdriehoeksmeting en het European Terrestrial Reference System 1989 – gebruik en definities, Kadaster, Rijksdriehoeksmeting, Apeldoorn.

Polman, J., M.A. Salzmann, 1996, Handleiding voor de Technische werkzaamheden van het Kadaster, Kadaster, Apeldoorn.

Salzmann, M.A., J. van Buren, G.J.I.M. Lobé, 2000, De Rijksdriehoeksmeting sluit aan op Europa – RD is voorbereid op de toekomst, *Geodesia*, no. 2000(9), pp. 395-403.

Strang van Hees, G.L., 1997, Globale en lokale geodetische systemen, Nederlandse Commissie voor Geodesie, no. 30, 3e herziene druk.

NAP

Beusekom, W.A., R.E. Molendijk, G.W. van Willigen, 1999, Het NAP opnieuw bezien – notitie bij het verzoek om advies van de NCG over een herziening van het NAP, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Meetkundige Dienst, nr. NAP99 - 116, Delft.

Brand, G.B.M., W.A. van Beusekom, J.H. ten Damme, J.A. te Pas, A.J.Th. de Bruijne, R.E. Molendijk, 2001, Een nieuw basispunt voor het NAP, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Meetkundige Dienst, nr. MDGAP - 2001.31, Delft.

Brand, G.B.M., A.J.Th. de Bruijne, R.E. Molendijk, 2002a, Oorzaken van de bewegingen van de merken van het NAP, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Meetkundige Dienst, nr. MDGAP - 2002.26, Delft.

Brand, G.B.M., G. van Brussel, J.H. ten Damme, J.G. Gerritsen, R. Kamp, J.A. te Pas, P. van Vuuren, A.J.Th. de Bruijne, R.E. Molendijk, M.A. Koens, 2002b, De historische data van de primaire waterpassingen van het NAP, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Meetkundige Dienst, nr. MDGAP - 2002.3, Delft.

Brand, G.B.M., J.H. ten Damme, 2004a, De waterpasmetingen van de 5e NWP. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Adviesdienst Geo-informatie en ICT, nr. AGI-GAP-2004-15, Delft.

- Brand, G.B.M., G. van Brussel, J.H. ten Damme en J. Gerritsen, 2004b, Herberekening van het primaire net van het NAP, Verbetering precisie en betrouwbaarheid ten behoeve van de nieuwe NAP publicatie. AGI/GAP-04/004, Rijkswaterstaat AGI, augustus 2004.
- Brussel, G. van, F. Kleijer, 1997, Berekeningsverslag van de ijswaterpassingen 1996 en 1997, Rijkswaterstaat, Meetkundige Dienst, nr. MD-GAN-9747.
- Houtenbos, A.P.E.M., F. Kenselaar, 2001, Peilmerk hoogte variaties; stochastische analyse van peilmerkbewegingen in Nederland, gezamenlijk uitgegeven door Meetkundige Dienst Rijkswaterstaat en TU Delft.
- Kooi, H., P. Johnston, K. Lambeck, C. Smither, R. Molendijk, 1998a, Geological causes of recent (~ 100 yr.) vertical land movement in the Netherlands, *Tectonophysics* 299, pp. 297-316.
- Kooi, H., J.J. de Vries, 1998b, Land subsidence and hydrodynamic compaction of sedimentary basins, *Hydrology and Earth System Sciences*, 1(2-3), 159-171, EGS, 1998.
- Lambeck, K., P. Johnston, C. Smither, R. Molendijk, 1997, Sea level change in the North Sea, Meetkundige Dienst Rijkswaterstaat, nr. MDGAP-9769.
- Lambeck, K., P. Johnston and C. Smither (1998), Sea-level change, glacial rebound and mantle viscosity for northern Europe, *Geophysical Journal Int.*, volume 134 – issue 1 – pp. 102-144, 1998.
- Lange, G., A.N.M. Obdam, A.H.M. Kremers, 2000, Lokale stabiliteit ondergrondse merken NAP – inventarisatie, plan van aanpak en toetsing merk Hoogwoud – supplement, Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO, TNO-rapport NITG 99-285-B (supplement).
- Lorenz, G.K., W. Groenewoud, F. Schokking, M.W. van den Berg, H. Wiersma, S. Jelgersma, F. Brouwer, 1991, Heden en verleden – Nederland naar beneden ???, interim rapport over het onderzoek naar bodembeweging in Nederland, Rijkswaterstaat Delft/Rijswijk, Rijks Geologische Dienst, Haarlem.
- Lorenz, G.K., 1993, De eerste nauwkeurigheidswaterpassing van Nederland (1875-1885) – analyse, Rijkswaterstaat, Meetkundige Dienst, nr. MD-TNO-R-9331, Delft.
- Molendijk, R.E., W.A. van Beusekom, G.W. van Willigen, 2000, Het NAP, houvast in Nederland en Europa – de werkvloer van Nederland in beweging?, *Geodesia*, no. 2000(9), pp. 385-392.
- Mulder, E.F.J. de, M. C. Geluk, I. Ritsema, W.E. Westerhoff, T.E. Wong, 2003, De ondergrond van Nederland. *Geologie van Nederland deel 7*, TNO-NITG, Utrecht.
- Murre, L.M., 1985, Hervereffening van de tweede, derde en vierde nauwkeurigheidswaterpassing van Nederland en vergelijking van de resultaten, afstudeerscriptie, TU Delft, faculteit der Geodesie.
- Oude Elberink, S., 2001, Data-analyse Nauwkeurigheidswaterpassingen; visueel overzicht van de 2e, 3e, 4e en 5e Nauwkeurigheidswaterpassing, Rijkswaterstaat, Meetkundige Dienst.
- Waalewijn, A., 1979, De tweede nauwkeurigheidswaterpassing van Nederland 1926-1940, Rijkscommissie voor Geodesie, Delft.
- Waalewijn, A., 1987, Drie eeuwen normaal Amsterdams peil, Rijkswaterstaat, Hoofd-directie van de waterstaat, serie 48.

- Weele, P.I. van der, 1971, De geschiedenis van het N.A.P., Rijkscommissie voor Geodesie, Delft.
- Wijnterp, P., 1992, De eerste nauwkeurigheidswaterpassing (1875-1885), Rijkswaterstaat, Meetkundige Dienst, nr. MDTNO-R-9231.

Geoïde

- Bruijne, A.J.Th. de, R.H.N. Haagmans, E.J. de Min, 1997, A preliminary north sea geoid model GEONZ97, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Meetkundige Dienst, nr. MDGAP - 9735, Delft.
- Crombaghs, M., 2002, Zwaartekracht in de 5e NWP; de 2^e epoche van het Nederlands Zwaartekracht datum (NEDZWA99) ten behoeve van bodembewegingsonderzoek, Rijkswaterstaat, Meetkundige Dienst, nr. MD-GAP-2002.10.
- Crombaghs, M. 2004, NLGEO2004 – een nieuw geoidemodel voor Nederland. Rijkswaterstaat – Adviesdienst Geo-informatie en ICT, oktober 2004, rapportnummer AGI-GAP-2004-25.
- Dierikx, B.C., 1999, Geoïdehoogten voor Nederland bepaald uit inter-kernnetvectoren, GPS Nieuwsbrief, Jaargang 14, nr. 2.
- Hilferink, G.W., 2001, Correctievlakbepaling ten behoeve van geoiderekening, Stageverslag Meetkundige Dienst / TU Delft.
- Min, E.J. de, 1996, De geïde voor Nederland, proefschrift, Universiteit Delft, faculteit der Geodesie.
- Schreutelkamp, F.H., 2001, De geïde voor Nederland astrometrisch getoetst, Geodesia, no. 2001(9).
- Willigen, G.W. van, 1985, De berekening van de gravimetrische geïde van Nederland, afstudeerscriptie, TU Delft, faculteit der Geodesie.

Overig

- Bakker, G., J.C. de Munck, G.L. Strang van Hees, 1995, Radio Positioning at Sea, Universiteitsdrukkerij TU Delft.
- Torge, W., 1991, Geodesy, 2nd edition, Walter de Gruyter, Berlin New York.

5.2 Software

Actuele programmatuur voor de RDNAPTRANSTM-procedure, inclusief de benodigde bestanden zoals het RD-correctiegrid en het geïdegrid, en bronbestanden als de programmacode en de verschillen tussen pseudo-RD en RD in de GPS-kernnetpunten, zijn beschikbaar via www.rdnap.nl en worden beheerd door het Kadaster en Rijkswaterstaat AGI.

5.3 Websites

| | |
|---|---|
| http://crs.bkg.bund.de | Portaal voor Europese en nationale stelsels |
| http://hpiers.obspm.fr | International Earth Rotation Service (IERS) |
| http://igsb.jpl.nasa.gov | International GPS Service (IGS) |
| http://www.euref-iag.net | IAG-subcommissie voor Europa (EUREF) |
| http://www.ncg.knaw.nl | Nederlandse Commissie voor Geodesie (NCG) |
| http://www.epncb.oma.be | Centraal Bureau EPN |
| http://www.rdnap.nl | Actuele informatie over RD, NAP en AGRS; tevens de ingang voor de RD- en NAP-publicaties |

5.4 Gebruikte afkortingen

| | |
|---------|--|
| AGI | Rijkswaterstaat Adviesdienst Geo-informatie en ICT |
| AGRS.NL | Actief GPS ReferentieSysteem voor Nederland |
| BIH | Bureau International de l'Heure |
| DORIS | Doppler Orbitography and Radiolocation Integrated by Satellite |
| EPN | EUREF Permanent GPS Network |
| ETRS89 | European Terrestrial Reference System 1989 |
| EUREF | EUropean REference Frame |
| EUVN | EUropean Vertical GPS Reference Network |
| EVRS | European Vertical Reference System |
| GPS | Global Positioning System |
| GRS80 | Geodetic Refence System 1980 |
| HTW | Handleiding voor de Technische Werkzaamheden van het Kadaster |
| IAG | International Association of Geodesy |
| IAU | International Astronomical Union |
| ICRS | International Celestial Reference System |
| IERS | International Earth Rotation Service |
| IGS | International GPS Service |
| ITRF | International Terrestrial Reference Frame |
| ITRS | International Terrestrial Reference System |
| IUGG | International Union of Geodesy and Geophysics |
| LLR | Lunar Laser Ranging |
| NAP | Normaal Amsterdams Peil |
| NCG | Nederlandse Commissie voor Geodesie |
| NEREF | NEtherlands REference Frame |
| NIMA | National Imagery and Mapping Agency |
| NWP | Nauwkeurigheidswaterpassing |
| RD | Rijksdriehoeksmeting |
| RD1918 | Definitie van het RD-stelsel gebaseerd op [Heuvelink, 1918] |
| RD2000 | Definitie van het RD-stelsel 2000 – 2004 |
| RD2004 | Definitie van het RD-stelsel vanaf 2005 |
| RETRIG | Réseau Européen de Triangulation |

| | |
|-------|-----------------------------------|
| RTK | Real Time Kinematic |
| SLR | Satellite Laser Ranging |
| UELN | United European Levelling Network |
| VLBI | Very Long Baseline Interferometry |
| WGS84 | World Geodetic System 1984 |

6 Bijlagen

6.1 Datumtransformaties

Coördinaten zijn gedefinieerd in een referentiestelsel. De vastlegging van een referentiestelsel wordt datumdefinitie genoemd. Het is soms noodzakelijk de coördinaten, gegeven in het ene referentiestelsel, te transformeren naar een ander referentiestelsel. Een datumtransformatie is een coördinatentransformatie tussen twee referentiestelsels. Een datumtransformatie is gebaseerd op een 3D-gelijkvormigheidstransformatie. De parameters van deze transformaties worden (regelmatig) in nationaal en internationaal verband bepaald.

In de driedimensionale ruimte kunnen de coördinaten van een punt op verschillende manieren worden gerepresenteerd. De geografische coördinaten beschrijven de positie van een punt ten opzichte van een ellipsoïde en worden aangeduid als φ (geografische breedte), λ (geografische lengte) en h (ellipsoïdische hoogte). Voor elk referentiestelsel is een zo goed mogelijk passende ellipsoïde gekozen. Geocentrisch-cartesische, of kortweg geocentrische coördinaten, worden gespecificeerd ten opzichte van het middelpunt van de gekozen ellipsoïde. Deze coördinaten worden aangeduid met de kernletters (X, Y, Z) . Geocentrische coördinaten worden bijvoorbeeld gebruikt voor de coördinatentransformatie tussen twee referentiestelsels.

Een referentie-ellipsoïde kan aan de hand van twee van de volgende parameters worden gekarakteriseerd:

$$\begin{aligned} &a \\ &b \\ e^2 &= \frac{a^2 - b^2}{a^2} \\ f &= \frac{a - b}{a} \end{aligned}$$

met hierin:

- a: halve lange as (equator-as) van de ellipsoïde;
- b: halve korte as (pool-as) van de ellipsoïde;
- e^2 : eerste excentriciteit van de ellipsoïde;
- f: afplatting van de ellipsoïde.

In de praktijk gebruikt men doorgaans de parameters a en e^2 of a en $1/f$. De positie en oriëntering van de ellipsoïde is per referentiestelsel vastgelegd. Als gevolg hiervan zijn de geografische en geocentrische coördinaten van een punt in twee referentiestelsels verschillend.

Bij de beschrijving van de datumtransformatie wordt uitgegaan van de geografische coördinaten (φ, λ, h) in stelsel I (bijvoorbeeld RD). Resultaat zijn de geografische coördinaten in stelsel II (bijvoorbeeld ETRS89).

6.2 Van geografische (φ, λ, h) naar geocentrische coördinaten (X, Y, Z)

Geocentrische coördinaten worden als volgt uit geografische coördinaten berekend:

$$\begin{aligned} X &= (N + h) \cos \varphi \cos \lambda \\ Y &= (N + h) \cos \varphi \sin \lambda \\ Z &= (N(1 - e^2) + h) \sin \varphi \end{aligned}$$

met hierin:

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}$$

6.3 Van geocentrische (X, Y, Z) naar geografische coördinaten (φ, λ, h)

De berekening van geografische coördinaten uit geocentrische coördinaten wordt in drie stappen uitgevoerd:

1. Berekening van de geografische lengte:

$$\lambda = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right)$$

2. De geografische breedte wordt op een iteratieve manier berekend. In iteratiestap $i + 1$ wordt de geografische breedte berekend als:

$$\varphi^{(i+1)} = \arctan\left(\frac{Z}{r} + \frac{e^2 N^{(i)} \sin \varphi^{(i)}}{r}\right)$$

hierbij zijn:

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{X^2 + Y^2} \\ N^{(i)} &= \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi^{(i)}}} \end{aligned}$$

De iteratie wordt gestopt als aan het stopcriterium $\varphi^{(i+1)} - \varphi^{(i)} < \varepsilon$ is voldaan. Het stopcriterium ε wordt gespecificeerd in radialen ($\varepsilon = 1,6 \cdot 10^{-11}$ rad komt overeen met

0,1 mm op de ellipsoïde). Als beginwaarde in de eerste iteratiestap ($i = 1$) wordt gekozen voor $\varphi^{(0)} = 0$.

3. Tenslotte wordt de hoogte ten opzichte van de ellipsoïde berekend als:

$$h = r \cos \varphi + z \sin \varphi - a \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}$$

6.4 Datumtransformatie van stelsel I naar stelsel II

De datumtransformatie wordt uitgevoerd door een 3D-gelijkvormigheidstransformatie. De datumtransformatie houdt rekening met het verschil in schaal en het verschil in oriëntering tussen beide stelsels en de translatie tussen de oorsprongen van beide stelsels. De translaties worden in de literatuur veelal 'datumshift' genoemd.

Bij datumtransformaties valt het punt waar omgeroteerd wordt in de regel samen met het middelpunt van de ellipsoïde. Voor datumtransformaties die betrekking hebben op nationale stelsels wordt echter ook wel een rotatiepunt in het centrum van het puntenveld gekozen (bijvoorbeeld Amersfoort in Nederland). Het voordeel hiervan is dat kleine afwijkingen in de rotatiehoeken (bijvoorbeeld ten gevolge van het verwaarlozen van significante cijfers) weinig invloed hebben op (vooral de ligging van) de getransformeerde coördinaten. De keuze van het draaipunt heeft invloed op de translatieparameters. Men moet zich er dus rekenschap van geven op welke manier van transformeren de gepubliceerde transformatieparameters betrekking hebben.

Voor een punt i is de datumtransformatie van stelsel I naar stelsel II:

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}_{II} = \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}_I + \begin{bmatrix} \delta & \gamma & -\beta \\ -\gamma & \delta & \alpha \\ \beta & -\alpha & \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}_I + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}$$

Hierbij zijn α , β en γ de rotatiehoeken om respectievelijk de X-, Y- en Z-as en is $1 + \delta$ de schaalfactor tussen beide stelsels. Het punt waar omgeroteerd wordt, is het middelpunt van de ellipsoïde. Bij een rotatie om een centraal punt (X' , Y' , Z') is de datumtransformatie van stelsel I naar stelsel II:

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}_{II} = \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}_I + \begin{bmatrix} \delta & \gamma & -\beta \\ -\gamma & \delta & \alpha \\ \beta & -\alpha & \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i - X' \\ Y_i - Y' \\ Z_i - Z' \end{bmatrix}_I + \begin{bmatrix} t_x' \\ t_y' \\ t_z' \end{bmatrix}$$

Dit is een benaderingsformule voor kleine rotaties. In het geval van de transformatie tussen ETRS89 en RD is het verschil met de strenge formules ongeveer 0,2 mm.

De strenge formules voor de datumtransformatie van een punt i van stelsel I naar stelsel II zijn:

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}_{II} = \lambda R(\gamma, \beta, \alpha) \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}_I + \begin{bmatrix} t_X \\ t_Y \\ t_Z \end{bmatrix}_I$$

met: $\lambda = 1 + \delta$

$$R(\gamma, \beta, \alpha) = \begin{bmatrix} +\cos \gamma \cos \beta & +\cos \gamma \sin \beta \sin \alpha + \sin \gamma \cos \alpha & -\cos \gamma \sin \beta \cos \alpha + \sin \gamma \sin \alpha \\ -\sin \gamma \cos \beta & -\sin \gamma \sin \beta \sin \alpha + \cos \gamma \cos \alpha & +\sin \gamma \sin \beta \cos \alpha + \cos \gamma \sin \alpha \\ +\sin \beta & -\cos \beta \sin \alpha & +\cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix}$$

Bij een rotatie om een centraal punt (X', Y', Z') is de datumtransformatie van stelsel I naar stelsel II:

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}_{II} = \lambda R(\gamma, \beta, \alpha) \begin{bmatrix} X_i - X' \\ Y_i - Y' \\ Z_i - Z' \end{bmatrix}_I + \begin{bmatrix} t_X' \\ t_Y' \\ t_Z' \end{bmatrix}_I + \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix}_I$$

met:

$$\begin{bmatrix} t_X' \\ t_Y' \\ t_Z' \end{bmatrix}_I = \begin{bmatrix} t_X \\ t_Y \\ t_Z \end{bmatrix}_I + \lambda R(\gamma, \beta, \alpha) \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix}_I - \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix}_I$$

6.5 De kaartprojectie van de Rijksdriehoeksmeting

Voor het centrale punt zijn de volgende ellipsoïdische coördinaten aangenomen:

$$\begin{aligned} \varphi_0 &= 52^\circ 09' 22,178'' \\ \lambda_0 &= 5^\circ 23' 15,500'' \end{aligned}$$

en de volgende kaartcoördinaten:

$$\begin{aligned} x_0 &= 155.000,000 \text{ m} \\ y_0 &= 463.000,000 \text{ m} \end{aligned}$$

$$N_0 = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi_0}}$$

$$R_0 = \frac{N_0 (1 - e^2)}{1 - e^2 \sin^2 \varphi_0}$$

De straal van de rekenbol wordt berekend als het gemiddelde van N_0 en R_0 volgens:

$$R_{COL} = \sqrt{(N_0 \cdot R_0)}$$

De breedte en lengte van het centrale punt op de bol worden:

$$L_0 = \lambda_0$$

$$B_0 = \arctan\left(\left(\tan\varphi_0\right)\sqrt{\frac{R_0}{N_0}}\right)$$

De constanten n en m van de Gauss-projectie worden berekend met:

$$n = \sqrt{1 + e'^2 \cos^4 \varphi_0} \quad \text{met} \quad e'^2 = \frac{e^2}{1 - e^2}$$

$$m = w_0 - n \cdot q_0$$

met
$$w_0 = \text{Intan}\left(45^\circ + \frac{1}{2}B_0\right)$$

en
$$q_0 = \text{Intan}\left(45^\circ + \frac{1}{2}\varphi_0\right) - \frac{1}{2}e \cdot \ln\left(\frac{1 + e \sin\varphi_0}{1 - e \sin\varphi_0}\right)$$

Voor een punt met ellipsoïdische (Bessel) coördinaten φ en λ worden eerst de breedte en lengte op de bol berekend:

$$q = \text{Intan}\left(45^\circ + \frac{1}{2}\varphi\right) - \frac{1}{2}e \cdot \ln\left(\frac{1 + e \sin\varphi}{1 - e \sin\varphi}\right) \quad \text{(isometrische breedte op de ellipsoïde)}$$

$$w = n \cdot q + m \quad \text{(isometrische breedte op de bol)}$$

$$B = 2a \tan(\exp(w)) - 90^\circ \quad \text{(breedte op de bol)}$$

$$L = \lambda_0 + n(\lambda - \lambda_0)$$

De berekening van het azimut α en de afstand r op de conforme bol verloopt volgens:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\sin(\lambda - \lambda_0)}{\tan(B) \cdot \cos(B_0) - \sin(B_0) \cdot \cos(L - L_0)}\right)$$

$$r = 2kR_{COL} \cdot \tan\left(\frac{\Psi}{2}\right)$$

met $k = 0,9999079$ als de aangenomen schaalfactor in het centrale punt en ψ volgend uit:

$$\sin^2 \frac{1}{2}\Psi = \sin^2 \frac{1}{2}(B - B_0) + \sin^2 \frac{1}{2}(L - L_0) \cdot \cos B \cdot \cos B_0$$

De kaartcoördinaten worden dan:

$$x = r \sin \alpha + x_0$$

$$y = r \cos \alpha + y_0$$

1 Introduction

The Rijksdriehoeksmeting (RD) and the Normaal Amsterdamse Peil (NAP) are the Netherlands' best known reference systems. A geodetic or surveying reference system constitutes a standard for the determination of locations and heights. The location and height¹ are stated in terms of their relative positioning from a specific reference system; for example, cadastral boundaries are specified in relation to the RD, whilst water levels are stated in comparison to the NAP. A reference frame offers those needing to determine the location or height of an object a reference point that can be used for all their measurements. Traditional reference frames are laid down in the form of assigned points in the terrain, together with specifications of those points by means such as their coordinates; examples are the Dutch GPS base network and NAP height benchmarks.

All reference frames are based on the definition of a reference frame, also referred to as the reference system². This is comprised of a collection of agreements that are required to realise the reference frame. The reference system is primarily of importance to those responsible for the maintenance of the reference frame; the reference system is of less importance to the user, provided that the associated definitions are unequivocal and not subject to unnecessary or significant change.

Reference frames are of importance to the unequivocal determination of locations and heights, since those involved will always wish to be able to carry out their measurements based on one and the same reference system; in fact, this is a statutory requirement in the Netherlands.

The entirety of the (geodetic or surveying) reference frames is also referred to as the *geometric infrastructure*. The Netherlands' geometric infrastructure has been segregated since 1930; the RD frame is maintained by the Kadaster, and the NAP by Rijkswaterstaat. This segregation was implemented primarily for practical reasons, since each reference frame is required for the primary process of the relevant department: the specification of cadastral boundaries, and water management. Moreover, it transpired that the registration of each reference frame in the terrain (based on church towers and underground benchmarks, respectively) and the techniques involved in maintaining reference frames up to date (triangulation and level measurements) were virtually entirely complementary applications, as a result of which the two reference frames could be realised in autonomy from each other.

¹ This publication refers to the horizontal position as the location; consequently a position is comprised of a location and a height.

² English-language literature refers to *reference Systems* and *reference Frames*, terms which in Dutch are often translated as *referentiesystemen* and *referentiestelsels*; Dutch often makes use of the term *coördinaatsysteem* (*coordinate system*).

However, the situation changed on the emergence of satellite positioning; the Global Positioning System (GPS) enables surveyors to use the same instrument to make simultaneous measurements of both the location and the height. Although the ultimate objective of a measurement is often solely the determination of either the horizontal position or the height, the measurements are nevertheless made by determining the points in a three-dimensional reference frame. Europe has adopted the European Terrestrial Reference System (ETRS89) as the reference frame for the application of satellite positioning, and consequently ETRS89 is also of importance to the Netherlands. The reference points in the terrain used by ETRS89 differ from those used for the RD and the NAP, since ETRS89 uses points in open areas, suitable for the temporary deployment of GPS measurement equipment (the GPS base network) and permanent installations (AGRS.NL, RTK reference stations). The Kadaster and Rijkswaterstaat have assumed the joint responsibility for maintaining ETRS89 in the Netherlands, since this duty is in the continuation of their more traditional duties. In addition, private initiatives are also taken for the use of GPS in the Netherlands; these duties are primarily focused on the provision of service to end users.

This publication reviews the definitions and specifications of the most important geodetic reference frames in the Netherlands, i.e. the RD, NAP, ETRS89. The decision to draw up this publication was primarily due to the changes that have taken place in these systems since 1990. These changes have taken place as a result of external factors that have in turn exerted an influence on the quality requirements governing the reference frames.

In the first instance, it has transpired that GPS offers an appropriate and autonomous means of verifying the geometric quality of the RD grid; GPS has, in part, demonstrated distortions of a maximum of some 25 cm in the RD grid. Although these distortions are to be expected with traditional surveying techniques, they do nevertheless constitute an impediment to the use of GPS as a measurement technique. For this reason the definition of the RD grid has been linked to ETRS89, which does not exhibit any distortions of noticeable influence on (GPS) applications in the Netherlands. In addition, the use of GPS has resulted in the geoid – a concept that was not of relevance to practical surveying using levelling – assuming an essential role in the use of GPS to determine heights relative to NAP.

A second influence relates to the phenomenon of the vertical movement of the soil³; the Earth is a dynamic entity, and geophysical processes (cf. [Kooi et. al., 1998a], [Brand et al., 2002a], etc.) can result in changes in the height of both ground level and objects on the surface – and certainly when viewed over a period of several decades or a hundred years. More specifically, the height of the subsoil is subject to change, changes which in turn result in vertical movements of the heights specified by underground benchmarks. Consequently a reference frame for heights will require maintenance, i.e.

³ The horizontal movement of the ground is not, for the time being, of importance in this respect.

it will be necessary to inspect the heights at regular intervals and make any adjustments that may be required.

During the past few years the redefinition of the reference frames has been a central theme of the discussions held by the Subcommittee Geometric Infrastructure and the Subcommittee Land Subsidence and Sea Level Change of the Netherlands Geodetic Commission (NCG). In addition, these subjects have been addressed by a considerable number of articles, inclusive of the articles in a special theme issue of *Geodesia* (No. 2000-9). In view of the importance the Kadaster and Rijkswaterstaat attach to the revisions that have been implemented – and records of those revisions – a joint publication on this issue appeared to be desirable. In view of the close involvement of the NCG, in particular the Subcommittee Geometric Infrastructure, a publication in the NCG was a logical choice.

The primary objective of this publication is to ensure for a suitable specification of the reference frames in the Netherlands as at 1 January 2005. After this introduction the publication continues with a brief review of the background to the ETRS89, RD and NAP reference frames (Section 2) the precise definition of the reference frames, inclusive of their mutual relationships (Section 3), and the future maintenance of the reference frames (Section 4).

2 The historical backgrounds

This Section reviews the most important reference frames in the Netherlands, and the manner in which they are maintained. The Section begins with a discussion (in accordance with the layout used for several sections, and not in chronological sequence) of ETRS89, the European Terrestrial Reference System. Within this context this Section also discusses the Active GPS Reference System for the Netherlands (AGRS.NL); the review continues with the RD frame and concludes with the NAP, inclusive of the geoid of the Netherlands.

2.1 ETRS89

2.1.1 Introduction

Modern satellite positioning has revolutionized reference frames all over the world. In the years since 1980 Satellite Laser Ranging (SLR) and Very Long Baseline Interferometry (VLBI) have played a major role in the definition of the International Terrestrial Reference System (ITRS). However the ITRS only became available on a truly global scale in 1992 on the introduction of the GPS and the worldwide tracking network of the International GPS Service (IGS) in combination with the densification of the various regional and national components of the IGS network such as the EUREF Permanent GPS Network (EPN) and AGRS.NL. The annual solutions for the IGS network and the regional densification of the system constitute the major contribution to the various realisations of ITRS. The now very well-known World Geodetic System 1984 (WGS84), used for the orbital elements transmitted by the GPS satellites, has been linked to ITRS since 1996.

The ITRS plays an important role in studies of the Earth's geodynamics; however, it is not suitable for use as a European georeferencing system, since in ITRS all points in Europe exhibit a more-or-less similar velocity of a few centimetres a year (see Figure 1). For this reason, in 1989 the European Reference Frame (EUREF, the subcommission for Europe of Commission 1.3 of the International Association of Geodesy (IAG)) realised ETRS89, which moves with the European plate. At epoch 1989.0 the positions in ETRS89 and ITRS89 are coincident. The positions and velocities determined in ETRS89 can be converted into ITRS, and vice versa, using transformation formulae [Altamimi and Boucher, 2001]. However, in practice the velocity is not of significance to the use of ETRS89 – and certainly not in the Netherlands. A variety of GPS campaigns and the EPN have resulted in the densification of ETRS89 in all European countries. The campaigns carried out by the Netherlands Reference Frame (NEREF), the GPS base network and AGRS.NL have resulted in the further densification of ETRS89 in the Netherlands, and in the determination of the transformation parameters for the RD. On the comple-

tion of similar activities in all other European countries it is now possible to transform the various national frames into ETRS89 and to use ETRS89 to exchange geoinformation.

Figure 1. Map of the world with the velocity of ITRF stations in mm per year; source: Michael Hefflin, JPL (cf. p. 5).

ETRS89 has now evolved into the *de facto* European reference system. Eurocontrol has opted for ETRS89 in the European realisation of WGS84 for aviation applications. During a symposium held in 2000 various other European organizations, such as Euro-Geographics, EUROSTAT, the European Union, European Environment Agency and the Open GIS Consortium, recommended ETRS89 as the datum for continental Europe; in addition, all European national frames have now been linked to ETRS89 via GPS campaigns.

2.1.2 International Terrestrial Reference System (ITRS)

The duties of the International Earth Rotation Service (IERS) are to maintain the International Celestial Reference System (ICRS), the International Terrestrial Reference System (ITRS), and the associated reference frames, and to ensure for the timely provision of the Earth rotation parameters that constitute the link between both reference frames. The IERS, founded in 1988 by the International Astronomical Union (IAU) and the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG), is the successor to the Earth rotation Sector of the Bureau International de l'Heure (BIH) and the International Polar Motion Service.

The ITRS was specified in IUGG Resolution No. 2, Vienna 1991. The most important properties are [McCarthy, 1996]:

- it is geocentric, the centre of mass being defined for the whole Earth, including oceans and atmosphere;
- the unit of length is the meter (SI), in accordance with the IAU and IUGG resolutions;
- its orientation was initially specified by the BIH orientation at 1984.0;
- the system is kinematic (position and velocity);
- the NNR-NUVEL1A tectonic model ('no net rotation') is applicable;
- the GRS80 ellipsoid and associated IUGG/IAG definitions are applicable.

The ITRS is realised by means of the publication of the coordinates and velocities of a set of appropriately-defined observation stations (cf. Figure 1), the International Terrestrial Reference Frame (ITRF). This is effected using a number of different observation techniques, namely VLBI, SLR, Lunar Laser Ranging (LLR), the French DORIS system (Doppler Orbitography and Radiolocation Integrated by Satellite) and GPS (IGS and EUREF). A number of analysis centres process the observations to arrive at 'technique'

solutions. IERS combines these solutions – comprised of coordinates, velocities and the associated covariance (or normal) matrix – to obtain a homogenous set of coordinates and velocities. This procedure has resulted in the availability of six new and improved realisations of ITRS during the period from 1992 to date (2004). Table 1 lists the number of solutions that have contributed to the latest six realisations of ITRS.

| | VLBI | SLR | LLR | IGS | EUREF | DORIS | Other | Total |
|----------|------|-----|-----|-----|-------|-------|-------|-------|
| ITRF2000 | 3 | 9 | 2 | 6 | 2 | 3 | 12 | 37 |
| ITRF97 | 4 | 5 | | 5 | 1 | 3 | 1 | 19 |
| ITRF96 | 4 | 2 | | 6 | 2 | 3 | | 17 |
| ITRF94 | 4 | 2 | | 3 | | 3 | | 12 |
| ITRF93 | 6 | 2 | 4 | 1 | | | 1 | 14 |
| ITRF92 | 5 | 6 | 3 | 6 | | | | 17 |

Table 1. The number of solutions used for ITRF. ITRF94 does not include 2 VLBI, 5 SLR, 4 LLR and 3 IGS solutions that were designated as secondary solutions. The coordinates are stated relative to a reference time. The published velocity can be used to calculate the position of each station at any required time. Different reference times are used, namely 1997.0 for ITRF2000, ITRF97 and ITRF96, 1993.0 for ITRF94; 1993.0 and 1998.0 for ITRF93, and 1998.0 for ITRF92 and all previous realisations.

The distinction between the terms 'reference system' and 'reference frame' is significant, although in practice the two terms are often used as synonyms. A reference frame is a set of points with coordinates, velocities, etc., that realise an ideal reference system. In general the coordinates of the various realisations will differ, since new observations are often available for later realisations or a new datum has been realised; however within the noise of the measurements they will, in principle, specify the same system. The various definitions and conventions are clearly revealed by Figure 2, which lists the coordinates of the Kootwijk IGS station as a function of time. The data clearly exhibits discontinuities resulting from the different ITRF realisations.

Figure 2. Coordinates of Kootwijk in ITRS (cf. p. 7).

2.1.3 European Terrestrial Reference System (ETRS89)

ETRS89 is a European geodesy and navigation reference system for the exchange of (inter)national GIS datasets, and for European geodynamic studies. ETRS89 is identical to ITRS89 at 1989.0; however, and in contrast to ITRS89, ETRS89 shifts with the European plate. The major benefit offered by ETRS89 (cf. Figure 4) is the resultant negligible velocity of the majority of the European points, and certainly those in the Netherlands. For this reason the publication of only the coordinates will be sufficient for many practi-

cal situations. The coordinates in ETRS89 can be converted to the various ITRS realisations using a simple transformation formula.

The ETRS89 system is maintained by EUREF (EUropean REference Frame), the subcommission for Europe of IAG Commission 1.3 for regional reference frames, and originates from RETRIG (Réseau Européen de Triangulation) and UELN (Unified European Levelling Network); EUREF is a continuation of long-term European collaboration dating back to 1950. The EUREF member states meet once a year. Outside these meetings the work is carried out by the EUREF Technical Working Group, which meets three times a year. The most important activities of EUREF are [Adam et. al., 1999]:

- densification of ETRS89 by means of GPS campaigns;
- EUREF Permanent GPS Network (EPN, regional densification of the IGS network);
- United European Levelling Network (UELN-95/88);
- European Vertical GPS Reference Network (EUVN);
- European Vertical Reference System (EVRS).

EPN's objective is to ensure for the further densification of the European IGS. The EPN is comprised of almost one hundred GPS stations (cf. Figure 3), of which only a number are also IGS stations. In the Netherlands the Kootwijk and Westerbork IGS stations and the Delft, Eijsden and Terschelling AGRS.NL reference stations are members of this network. The data from each station is processed by at least three (of the total of fifteen) EUREF analysis centres. The solutions are calculated at weekly intervals, as a result of which they constitute the most accurate and up-to-date realisation of ITRS and ETRS in Europe. The weekly solutions are also combined to yield one-year solutions, which are then used in the calculations for the ITRF (cf. Table 1). EPN's central bureau is located in Brussels.

Figure 3. Network of EPN stations. Source: Carine Bruyninx, ORB (cf. p. 8).

The positions and velocities in ITRS can be converted to ETRS89, and vice versa, using transformation formulae [Altamimi and Boucher, 2001]. This involves the use of a variety of transformation parameters for the different realisations of ITRS, such as ITRF2000, ITRF97, etc. Figure 4 shows the time series for Kootwijk in ETRS89. The data used in this Figure has been calculated from Figure 2 using the transformations from [Altamimi and Boucher, 2001]; consequently these are the official ITRF coordinates transformed into ETRS89. ITRFyy coordinates transformed into ETRS89 are also referred to as ETRFyy (where 'yy' indicates the year). It should be noted that the use of the ETRFyy designation is permitted solely for transformed ITRFyy coordinates. When examining this Figure it is striking to note that although the velocity is virtually zero (which is, self-evidently, the intention), the discontinuities in the time series, and otherwise than might have been expected, have been (completely) eliminated. This latter is due to the continual improvements in the ITRS coordinates of individual stations over the course of time. In addition, on the transition from ITRF97 to ITRF2000 the velocity of the Eurasian plate

is based on the ITRF value rather than the NUVEL1A value, which self-evidently has consequences for the conversion to the epoch 1989.0 that was used for ETRS89.

Figure 4. Coordinates of Kootwijk in ETRS89 (cf. p. 9).

The other stations in the Netherlands also exhibit discontinuities in ETRS89 similar to those exhibited by Kootwijk. For this reason it would be very tempting to apply a similarity transformation in the Netherlands for new realisations of ETRS89 that renders them compatible with older realisations; however, it would be fundamentally incorrect to adopt such an approach, since the objective is to arrive at a homogenous European and global system. The adoption of this alternative approach would inevitably result in the reformation of a collection of islands, nullify all current and future improvements in ITRS and ETRS89, and give cause to continual problems with the future exchange of data. However, an approach of this nature is to be recommended for exclusively national frames such as the RD. It is also recommended that when exchanging and using ETRS89 coordinates the data is accompanied by a statement of the ITRS realisation on which the coordinates are based; for example "coordinates in ETRS89 for epoch 2000.10 on the basis of ITRF2000".

2.1.4 Realisation of ETRS89 in the Netherlands

In Europe the 1989 EUREF89 GPS campaign laid the basis for ETRS89. During the EUREF89 campaign measurements were made in the Netherlands at four points (Delft, Kootwijk, Westerbork and Huisduinen) during a period of one week. The four Dutch EUREF points were then subjected to a densification to thirteen points in the 1990 and 1991 NEREF campaigns. The data from these points was used to determine the transformation parameters for conversions between RD/NAP and ETRS89. Observations at the Dutch EUREF points were made for a second time during the EUREF D/NL 93 campaign, held in 1993. A combined NEREF/MAREO campaign was organized in 1994, whereby repeated observations were made at the NEREF points and a number of tide-gauge stations along the Dutch coast. The combined solution of NEREF/MAREO90, NEREF91 and NEREF/MAREO94 was published in 1997 [Brand et. al., 1997]. This solution was used for the determination of the official transformation parameters for the Dutch datum, for the calculation of the 'De Min-geoid' [De Min, 1996], and for the connection with the GPS base network.

The GPS base network was used for the further densification of ETRS89 in the Netherlands. The GPS base network encompasses 415 points in the Netherlands that are especially equipped to perform GPS measurements. The points of the GPS base network are connected to the neighbouring RD and NAP points, whilst the entire grid is connected to ETRS89 by means of the NEREF and AGRS.NL points.

However, the most accurate Dutch realisation of ETRS89 is comprised of AGRS.NL, which became operational in 1997 and consists of five reference stations that make

continual records of GPS signals. The GPS data is made available on the Internet, thereby enabling GPS users to determine positions in ETRS89 at almost every location in the Netherlands.

AGRS.NL and the latest realisation of the coordinates of the reference stations of AGRS.NL are discussed in sections 2.1.5 and 3.1. Subsequent to the completion of the GPS base network in 1997 the points in this grid are maintained by periodic determinations of each point relative to AGRS.NL reference stations and levelling in accordance with the second-order standards (cf. Section 2.2.5).

2.1.5 The Active GPS Reference System for the Netherlands (AGRS.NL)

Five reference points in the Netherlands have been equipped with continuously operating GPS receivers. In combination these points constitute AGRS.NL, which was in the first instance established in 1997 by a collaborative arrangement between the NCG, the Kadaster, the Survey Department (now AGI) of Rijkswaterstaat, and the Faculty of Geodesy of Delft University of Technology. AGRS.NL has been operated by the Kadaster and Rijkswaterstaat/AGI since 1997. AGRS.NL is comprised of five reference stations (Apeldoorn, Delft, Eijsden, Terschelling and Westerbork) and the Kadaster's central computing centre in Apeldoorn. The computing centre is responsible for the storage of the measurements and for the distribution of the information derived from the measurements to the collaborative services and other clients.

AGRS.NL constitutes the basis for the ETRS89 in the Netherlands, and is used to monitor the quality of the national frames (both the RD and NAP), the connections between the RD and NAP to ETRS89, the determination of the points of the GPS base network, and the certification of the other active reference stations. In addition, the GPS measurements from AGRS.NL are also made available for scientific purposes. Since the revision of the RD frame in 2000 AGRS.NL forms the basis of this frame; it also ensures for the continual measurements required in connection with the European ETRS89 coordinate system.

In view of AGRS.NL's primary objective of serving as the basis of the geometric infrastructure of the Netherlands the main product is comprised of one-day files of measurements made every 30 seconds during 24-hour periods. The long measurement times and the low frequency of the measurements render this data ideally suited to the performance of long-distance measurements of an extreme precision. Rapid measurement techniques such as 'rapid static' or 'real time kinematic' (RTK) GPS require measurements at a higher frequency; however these services are assigned to other networks. Nevertheless, AGRS.NL is used to determine the coordinates of lower-order reference stations such as the GPS base network points, or of the reference stations for commercial GPS providers requiring certification.

The achievement of this objective (the basis of the geometric infrastructure) gives cause to the need for a sound structure of the AGRS.NL reference stations. The primary issue requiring attention with respect to the structure is the continuity of the individual loca-

tions; it is very important that as many of the stations as possible remain at the same location for many years. The Kootwijk reference station is positioned on a building that was formerly owned by Delft University of Technology, but which has since been sold and is expected to be demolished within the near future. For this reason the station was discontinued in 2000 and replaced by the new station on the Kadaster's 'De Griff' offices in Apeldoorn; however, Kootwijk still takes part in the daily calculations as an IGS station for the connection to the ITRF. The antennae of the AGRS.NL reference stations at Terschelling, Westerbork and Eijsden have been installed on galvanized steel masts. These masts are subjected to annual inspections by the KPN according to a procedure similar to that used for the inspection of GSM masts.

The AGRS.NL reference stations would, with the exception of the Terschelling station, also appear to exhibit an excellent mutual stability. The latter station was rejected in a similarity transformation of the ETRS89 solutions for the AGRS.NL reference stations dating from 1996 and 2002. The AGRS.NL software is comprised of the receiver manufacturer's standard software at the stations, supplemented with in-house software developed by the Kadaster for the computing centre.

The operational management of AGRS.NL is based on an annual business plan and report. The operational management is effected by the RDNAP consultative body, comprised of representatives from the Kadaster for the RD and AGI for the NAP.

2.1.6 World Geodetic System 1984 (WGS84)

WGS84, primarily known by virtue of GPS, is the reference system used for the orbital elements transmitted by the GPS satellites. However, this is of little use for the geodetic reference in the Netherlands, since autonomous GPS positioning is not very accurate. Although a much greater accuracy is feasible with relative GPS point positioning, this yields coordinates in the reference system of the GPS basis station – which are not usually WGS84, but rather ITRS, ETRS89, or a transformation of a national system.

WGS84 is maintained by the US National Imagery and Mapping Agency (NIMA, formerly DMA). WGS84 was revised in 1996 by means of the re-determination of the coordinates of the twelve NIMA and Air Force tracking stations. A ten-day campaign resulted in the connection of the tracking stations to eighteen IGS stations, as a result of which WGS84 is based on ITRF94. The revised frame is officially referred to as WGS84 (G893), since the time of the revision was set at GPS week number 893. Consequently WGS84 is consistent with ITRS, and can be regarded as a realisation of ITRS.

2.2 The RD

The Rijksdriehoeksmeting (RD) frame and the Kadaster's Rijksdriehoeksmeting department (the RD) have a history dating from the 19th Century. Following a century of 'traditional' triangulation GPS was adopted as the basic measurement in 1987. The

increasing use of GPS was largely the reason for the redefinition of the RD frame in 2000.

2.2.1 *The primary triangulation of 1885 – 1904*

In 1879 the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences (KNAW) took the initiative to set up the *Rijkscommissie voor Graadmeting en Waterpassing* ('National Commission for Arc Measurement and Levelling') for the continuation of the precise levelling and for the performance of a triangulation with sufficient accuracy for European arc measurement. The first-order triangulation grid was measured in the years between 1885 and 1904. The necessary distance measurement was derived from the base near Bonn (Germany), which had been measured in 1892. A base measurement for the verification of the data carried out at Stroe in 1913 revealed a difference from the Bonn-base distance of no more than 1 mm/km, and for this reason no changes were made to the results from the Bonn base measurement. The location of the grid on the ellipsoid was established by determining the geographical longitude and latitude of Amersfoort together with the orientation of the grid; to this end, between the years from 1896 to 1899 geodetic-astronomic measurements were carried out at thirteen points throughout the Netherlands. The grid was adjusted in three sections, namely a Northern section, a Southern section, and a South-West section. The results from this adjustments constitute the basis of the system of coordinates for the RD.

2.2.2 *Secondary and lower-order measurements, 1898 – 1928*

During the years between 1898 – 1928 a densification programme was carried out on the first-order grid so as to render the RD frame suitable for practical use, in particular by the Kadaster. This resulted in the publication of the *Rechthoekige Coördinaten 1885 – 1928* ('Rectangular Coordinates 1885 – 1928') Report in 1929; this included 3732 triangulation points of which 1548 points were monumented. Only the steeple was known for the non-anchored points.

2.2.3 *Foundation of the Rijksdriehoeksmeting Maintenance department, 1930*

In 1928 it transpired that 290 points in the grid had already disappeared, and that a further 75 had been disrupted as a result of restorations, etc. For this reason, on 1 January 1930 the *Bijhoudingsdienst der Rijksdriehoeksmeting* ('Rijksdriehoeksmeting Maintenance department') was set up as a part of the Kadaster. This new department was assigned the duty of maintaining the original grid of points and, if necessary, incorporating new points in the grid.

After the Second World War the RD found itself confronted with the major task of repairing the damage caused by the war; almost 500 towers had suffered damage. In

addition, collaboration was also requested in the adjustment of a large part of Mid and Western Europe, for which purpose an additional number of astronomic measurements were carried out in the years after the war. It ultimately transpired that the first-order grid was still of an excellent quality. However the grid was of an inadequate scope, especially in the North-East where the grid stopped by as much as 30 km short of the national border. The densification of the field of points in the cities had resulted in an accumulation of points that had often been determined independently from each other. In addition, a large number of points that had either not been centred or had been centred only many years after their determination had to be regarded as unreliable. Moreover a large number of points had been lost. For these reasons it was decided to carry out a comprehensive revision of the grid.

Figure 5. The original first-order grid of the RD (cf. p. 14).

2.2.4 The revision and shift of the origin of the RD grid, 1960 – 1978

The first-order grid was extended to the country's borders and connected to the grids of the surrounding countries. In addition, the field of points was thinned out, especially in the urban areas, to arrive at mutual distances of about 4 km. The revision also encompassed the determination of the coordinates in a new system of coordinates that was, in line with the Topographical Service, obtained by shifting the original frame 155 km to the West and 463 km to the South. This shift was implemented to arrive at solely positive coordinates and y-coordinates that were always larger than the x-coordinates, thereby precluding errors in the manual processing of the data.

2.2.5 The use of GPS and the GPS base network

The RD has been making intensive use of GPS since 1987. The GPS base network was realised to offer other GPS users a simple means of connecting to the RD's system of coordinates. Each point in the GPS base network has an unobstructed view of the sky that is expected to remain free of obstacles for a longer period of time. All points are also easily accessible by car, can readily be located by virtue of their clear marking in the landscape, and are exposed to a low risk of disruption. The points in the base network are located at distances of 10 to 15 km from each other, a distance which has been adopted to enable users to make short (real-time) measurements to surrounding points in the base network. Each point in the GPS base network has been surveyed relative to the neighbouring RD points, thereby connecting with the existing grid. In addition, the heights of the points in the GPS base network have been determined by levelling. Since 2002 all points in the base network have been determined using a second-order levelling in accordance with the NAP specifications. The GPS base network is connected to points in the European reference frame, as a result of which the coordinates of all the points in the base network are expressed in terms of the European ETRS89 system of coordinates.

Figure 6. Summary of the original GPS network as measured until 1997. Subsequent to this date the measurements are no longer made between the points in the GPS base network; they are now made in comparison to AGRS.NL (cf. p. 15).

After 2004, on demand of clients, the number of GPS base network points is increased in the vicinity of large infrastructural works. The height determination is improved due to improved measurements, the simultaneous performance of levelling and GPS measurements whenever possible, and the improved anchoring of the points resulting in, for example, the use of ground anchors.

2.2.6 The current duties of the RD

The *Bijhoudingsdienst der Rijksdriehoeksmeting* name has now been changed to *Rijksdriehoeksmeting*, a department of the Kadaster's *Vastgoedinformatie en Geodesie* ('Real-estate information and Geodesy') division. The department's primary duty is the maintenance of the RD field of points, comprised of the AGRS.NL stations, the points in the GPS base network and the sighting points, set-up marks, and sighting marks. The RD field of points is comprised of about 6000 points distributed throughout the Netherlands at mutual distances of some 2.5 km. Subsequent to the revision in 2000 (cf. Section 3.2) the RD maintains two reference frames in the Netherlands:

- RD for the location;
- the three-dimensional European ETRS89 for the location and height (position).

The RD carries out the maintenance of ETRS89 in the Netherlands in close collaboration with the AGI. The maintenance of the RD frame makes use of ETRS89 since this is now the accurate frame from which the RD frame is derived.

As from 1999 the RD data is published in digital form on the Internet (www.rdnap.nl), although printouts of lists of coordinates are still available. The RD publishes data about three categories of points:

1. AGRS.NL reference stations;
2. points in the GPS base network;
3. other points (sighting points, set-up marks, and sighting marks).

2.2.7 Relationship with the NAP

The introduction of ETRS89 as a three-dimensional frame and the increasing use of GPS have resulted in height also becoming of importance to the RD. The publication and determination of the NAP heights of the points in the GPS base network is harmonized with the AGI. The RD and Rijkswaterstaat are jointly responsible for the maintenance of ETRS89 in the Netherlands, and collaborate in the operation of AGRS.NL. Periodic RDNAP consultations are held in which the GPS base network, AGRS.NL and the

www.rdnap.nl are all permanent items on the agenda. The objective of these consultations is to ensure for the realisation of one geometric infrastructure for the Netherlands.

2.3 Normaal Amsterdams Peil (NAP)

2.3.1 Predecessors of the NAP

[Van der Weele, 1971] gives a comprehensive description of the history of the NAP from which it appears, for example, that a height gauge in the form of an iron hacked bolt had been installed in Amsterdam's *Lastage* shipbuilding district (just outside the city walls) in as early as 1556. In 1682 eight stone benchmarks were incorporated in the then new locks in the raised dike along the IJ waterway.

Figure 7. Stone benchmark in a dike (cf. p. 16).

These stones were located at a height of nine Amsterdam feet and five inches (2.6789 m) above the average summer high tide, what was referred to as the *Amsterdamse (Stads)peyl* ('Amsterdam (City) water level'). During the 18th Century and the beginning of the 19th Century this benchmark was extended to include the Zuiderzee and the large rivers. In a Royal Decree of 18 February 1818 King William I prescribed the use of the Amsterdam water level (AP) as the general reference for water levels, and the Minister of Water Management and Public Works was assigned the duty of implementing the Decree.

2.3.2 Early precise levelling

The first national levelling dates from the period 1875 –1885 cf. [Van der Weele, 1971], [Waalewijn, 1979] and others. This project was carried out under the auspices of the *Rijkscommissie voor Graadmeting en Waterpassing* ('National Commission for Arc Measurement and Levelling'), the predecessor of the NCG. This first precise levelling (1st NWP) was based on the five datum stones in the Amsterdam locks remaining from the original eight. On the conclusion of the 1st NWP it was decided to distinguish the results from the 1st NWP from earlier levelling, a decision which resulted in the introduction of the term *Normaal Amsterdamse Peil*.

The measurement grid used for the 1st NWP was comprised of twelve circles with a total length of about 2100 kilometres of levelling. During the 1st NWP the heights of 410 already existing points (older reference points at tide gauges, and elsewhere) and secondary points were re-determined. In addition, 566 new points were installed, the majority of which were installed in public buildings. The standard deviation after adjustment amounted to 0.75 mm/ $\sqrt{\text{km}}$. Unfortunately it is no longer possible to reconstruct the calculations, since the majority of the measurements have been lost [Wijn-terp, 1992]. Only the calculated heights have been preserved.

In 1926 Mr Schermerhorn's Geodetic Bureau was entrusted with "the revision of the precise levelling, in accordance with the relevant instructions yet to be issued, and under the supervision of the *Rijkscommissie voor Graadmeting en Waterpassing* ('National Commission for Arc Measurement and Levelling')", cf. [Waalewijn, 1979]. The second Precise levelling (2nd NWP) started in 1926 and was ultimately concluded in 1940. So as to ensure for a stable as possible specification of the NAP throughout the Netherlands it was decided at the beginning of the 2nd NWP that a number of underground benchmarks would be installed throughout the country. In view of the simple construction of these reference points it was possible to install them only in locations at which stable geological strata reached the surface, i.e. primarily in the middle and Eastern regions of the country. During the period until 1930 a total of 18 first-order underground benchmarks were installed. So as to improve the distribution of the NAP a further 29 second-order underground benchmarks were installed after 1928 [Waalewijn, 1979].

The measurement grid for the 2nd NWP was designed in a manner such that all the routes included in the 1st NWP could be re-surveyed. The grid also included a large number of additional routes, inclusive of one over the Afsluitdijk (completed in 1932). The total length of the 2nd NWP was 4592 kilometres. In 1940 it transpired that the number of circles in the grid was, in view of the technology available at the time, too large to allow for the adjustment of the entire grid. For this reason the calculated heights are based on the adjustment of 26 circles, to which the other circles are connected. The adjusted grid, with a total length of 2768 kilometres, incorporated as many of the underground benchmarks as possible (16 of the 18 first-order points and 15 of the 29 second-order points). The standard deviation after adjustment ranged, depending on the selected method of calculation, from 0.4 to 0.7 mm/ $\sqrt{\text{km}}$.

It should be noted that the zero point in Amsterdam was not included as a node in the adjustment. The height relative to NAP was transferred using a small ancillary grid. At the time of the measurements in Amsterdam (1928) only two of the original stone benchmarks could still be used (those in the *Nieuwe Brug* Lock and the *West-Indische* Lock). Both these benchmarks were used so as to ensure for maximum compliance with the zero level of the NAP. However, the stability of stone benchmarks of this nature is open to discussion.

The majority of the field-work documents and summaries collected during the 2nd NWP (and from the later 3rd and 4th NWP) have been preserved; they are stored in the *Rijksarchief* national archives. In addition, in 2000 and 2001 Rijkswaterstaat's Survey Department (now the AGI) cleaned up and stored all historical data in Rijkswaterstaat's central NAP-level database [Brand et. al., 2002b].

Work on the 3rd NWP began relatively soon after the completion of the 2nd NWP in 1950. This decision was taken for several reasons, such as the loss of a large number of height benchmarks during the war and the need for an insight into the reliability of the underground benchmarks. For the 3rd NWP the network of underground benchmarks was expanded by a number of what are referred to as 'De Waal posts' in the West of

the country [Murre, 1985]. During the 3rd NWP a number of trial measurements were made using the hydrostatic levelling method. This method was used for a series of measurements such as those connecting the West-Frisian islands to each other and to the mainland, and for measurements of a number of major river crossings.

During the 3rd NWP only one stone benchmark in Amsterdam (the *Nieuwe Brug* Lock) was still available to serve as the basis for the primary NAP grid. However, as a result of the alteration of the lock it was also impossible to retain this last stone; for this reason the level of this last stone benchmark was transferred to a new underground benchmark on the Dam Square in Amsterdam (OA2350), whereby this underground benchmark was assigned the height of NAP +1.4278 m. However since the 3rd and 4th NWP did not ultimately lead to a recalculation of the primary grid this underground benchmark has not, to date, served as the computational reference for the NAP. From a geological perspective questions have since arisen as to the suitability of this underground benchmark, since thick compressible strata are present in the soil under Amsterdam to a depth of in excess of 60 metres. In 1953 it was not yet possible to construct foundations on the more stable third sand layer below these compressible strata. Instead, the reference point on the Dam Square (OA2350) was constructed on relatively shallow foundations; moreover, compressible strata are located under the piles. Consequently it is possible that the underground benchmark OA2350 is unstable.

The experiments with hydrostatic levelling carried out during the 3rd NWP revealed that this method is capable of yielding extremely accurate results. For this reason in the period between 1965 – 1974 measurements were carried out on a grid comprised of seven large circles, to which some 30 underground benchmarks were connected. This grid was then expanded to include a number of optically-surveyed routes as well as a number of additional hydrostatic routes. This entire programme constituted the 4th NWP, which was carried out between 1965 and 1978. The measurements from the 4th NWP (1965 – 1978) were levelled by Murre in 1980, and described by [Murre, 1985]. The measurements from the 4th NWP were verified by ice levelling measurements across the IJsselmeer carried out in 1979.

In addition to the installation of the aforementioned underground benchmarks, a large number of what are referred to as *nulpalen* ('zero posts', special underground benchmarks) have been installed since the seventies. These *nulpalen* are similar to underground benchmarks, but are designed to permit easy access for measurements. They are located at or in the vicinity of Rijkswaterstaat's tide-gauge stations, and serve to provide a stable reference for water-level measurements along the Dutch coast, inland waters, and major rivers. These *nulpalen* (a total of 67) are incorporated in the primary NAP grid (cf. Figure 8).

Figure 8. Location of the nulpalen ('zero posts') (cf. p. 19).

Nowadays exclusively LGM underground benchmarks are installed. The LGM type was developed by the *Laboratorium voor Grondmechanica* in Delft (now GeoDelft);

their special construction and the great depth of their foundations render them the most stable type of underground benchmarks.

2.3.3 *The 5th precise levelling*

In the nineties of the previous Century it became clear that in the subsidence of the Netherlands' subterranean strata exert a major influence on the quality of the primary NAP grid. Until that time it had been assumed that any subsidence of the location of the underground benchmarks would be small, and would consequently not be of significance to the maintenance of the NAP. For this reason the heights of the underground benchmarks were not, in principle, adjusted once they had been determined. It is, on the basis of geological and geophysical research, assumed that the oldest deposits in the subterranean strata of North-West Europe are still influenced by the contraction of the glaciers at the end of the last Ice Age of about 10,000 years ago. Following the removal of the weight of this ice Scandinavia is rising by a few centimetres a decade; conversely, geophysical models indicate that the West of the Netherlands (which was at the edge of the glaciers) is sinking very slightly. This phenomenon is referred to by geologists as the 'Post-Glacial Uplift' (cf. [Kooi et. al., 1998a] and others). Analyses of the earlier precise levelling measurements confirmed the subsidence of the West of the Netherlands. However, in comparison with the quality of the levelling measurements the expected magnitude of this decrease (approx. 3 cm per century) is such that it was not possible to confirm its existence from the measurement data.

In addition to Rijkswaterstaat's more practical duty, "the maintenance of the NAP", knowledge of subsidence is of importance to the policy-oriented issues of Dutch water management and protection from floods. A full insight into the maximum magnitude of the movements that can be expected in the coming period (the next 50-100 years) is required if it is to be possible to arrive at the appropriate decisions and implement the requisite measures. The objective of the 5th NWP was to employ an analysis of the changes in heights of the underground benchmarks to obtain an improved insight into the current magnitude of the subsidence. Figure 9 gives an impression of the grid used for the 5th NWP.

Figure 9. The grid used for the 5th precise levelling programme (cf. p. 21).

The 5th precise levelling programme (1996 – 1999) was the first Dutch programme to make use of a combination of optical and hydrostatic levelling, satellite positioning (GPS) and gravitational measurements. In addition, ice levelling measurements were carried out on the IJsselmeer and the Markermeer [Van Brussel and Kleijer, 1997]. Self-evidently, the levelling measurements constitute the basis for the primary NAP grid. The most important objective of the gravitational measurements was to provide independent data about subsidence. In fact, the gravitational measurements carried out during the 5th NWP constitute the 2nd epoch of the measurements of the *Nederlandse Zwaartekrachtsnet* ('Netherlands' Gravitational Grid') NEDZWA99. In conclusion, the

GPS measurements served (1) to enhance the levelling net over greater distances, and (2) as connection points between the ETRS89 reference frame for satellite positioning and the levelled heights of the NAP.

The network of the 5th NWP was designed such that it included as many of the points and identical routes from earlier NWPs as was possible. The network incorporated all first-order underground benchmarks and a selection of second and third-order underground benchmarks. In addition, a number of new underground benchmarks were installed, and a levelling route was measured along the coast. The boundaries of the network of the 5th NWP were connected to the German and Belgian networks. The hydrostatic net was comprised of four primary circles that followed the hydrostatic routes used in the 4th NWP as closely as possible. In addition, two hydrostatic lines provided for a connection between the hydrostatic and optical sections of the network.

The adjustment of the 5th NWP was carried out in 2000, after which the results were stored in the central database. In 2001 a minor additional measurement was added to the 2000 dataset on the reconstruction of the Westerbork underground benchmark.

The performance of the optical and hydrostatic levelling measurements is described in [Brand and Ten Damme, 2004a]. The performance of the gravitational measurements is described in [Crombaghs, 2002]. A separate report of the GPS measurements was not published, although the internal file is available for inspection at AGI and the results are included in the report on the calculations for NLGEO2004 [Crombaghs, 2004].

2.3.4 Maintenance of the NAP

Over the years the method used to maintain the NAP has developed in line with the continually-improving insights – a development which is manifested by, for example, the approach adopted to the implementation of the points and the method used for the secondary measurements. Nowadays a distinction is made between what are referred to as the primary and secondary NAP grids.

The primary NAP grid is comprised of the underground benchmarks and the *nulpalen*, i.e. the primary points of the NAP. At the beginning of 2004 there were 362 primary points: 295 underground benchmarks (inclusive of 19 clusters of single benchmarks that are grouped close to each other, a total of 80 benchmarks) and 67 *nulpalen*. Underground benchmarks are installed with the objective of ensuring for an as stable as possible basis height for the secondary measurements. In principle the underground benchmarks are not accessible to the public. The majority actually are below ground level, and are used solely for the maintenance of the primary and secondary grid. The *nulpalen* are special underground benchmarks located in the vicinity of tide-gauge stations along the coast and the major rivers.

During a precise levelling programme the underground benchmarks and *nulpalen* are connected together so as to (re)determine the differences in heights between the points. There is not a fixed frequency for successive precise levelling programmes, although history has revealed that the programmes are on average carried out once every 20 to 25 years. The duration of the precise levelling programmes has varied between 3 to 15 years.

The maintenance cycle of the secondary NAP grid using Plan periods developed during the seventies of the previous Century. A Plan period is comprised of a multi-annual plan for the maintenance of the secondary grid. The secondary grid is comprised of height benchmarks referred to as *peilmerken*, i.e. bronze bolts with a head of between 20 – 25 mm in diameter that are fitted to the (façade) of a house, building or other structure with an appropriate stability. These height benchmarks serve as the basis for the determination of structures by consulting engineers, water boards, municipalities, provinces, Rijkswaterstaat, and other authorities. The circles in the secondary grid have an average length of 2 km, whereby a height benchmark is installed after every kilometre. The upper limit for the precision of the secondary grid during NAP maintenance projects is 1 mm/ $\sqrt{\text{km}}$.

2.3.5 *The geoid of the Netherlands*

Gauss employed an equipotential gravitational surface as a definition for the shape of the Earth in as early as 1828 [Torge, 1991]. In 1849 Stokes demonstrated that the calculation of the geoid required a regular coverage of gravitational measurements over the entire Earth (and measured at the geoid itself). The surface of points with a height of 0 m relative to NAP constitutes the realisation of the geoid in the Netherlands – or at least a surface parallel to the geoid.

In 1934 Hirvonen was the first to calculate a global geoid. During the period 1970 – 1985 the geoid-modelling theories were refined to an extent that also enabled local geoid models to be calculated to decimetre precision. In the Netherlands geoid calculations with a relative decimetre precision were carried out by Van Willigen [Van Willigen, 1985]. In 1996 this geoid model was replaced by the 'De Min geoid' [De Min, 1996].

During the period 1990-1994 Rijkswaterstaat carried out measurements in a second-order gravitational grid for the determination of the Dutch geoid. Some 13,000 relative gravitational measurements were carried out in a grid of almost 8,000 points (1 point per 5 km²). The 'De Min geoid' specifies geoid heights for the entire Netherlands at a precision of one to a few centimetres. More information is given in Section 3.3.5, as well as [Crombaghs, 2004].

3 The status of the reference frames as at 1-1-2005

3.1 The realisation of ETRS89

AGRS.NL, realised in 1997, is the basis of the ETRS89 reference system in the Netherlands. In Europe ETRS89 serves as the primary reference for many (national and cross-border) applications for the collection and recording of location and height data. In addition, in view of the clearly-defined transformations between the various national frames and ETRS89, ETRS89 also connects the various reference frames used by European countries.

AGRS.NL is comprised of the reference stations Delft, Eijsden, Kootwijk (replaced by Apeldoorn in 2000), Terschelling, and Westerbork. The original ETRS89 coordinates of these reference stations had already been calculated from the measurement data from the AGRS.NL reference stations dating from the first half of 1996. This network was comprised of the IGS stations at Brussels, Delft, Herstmonceux, Kootwijk, Onsala and Wettzell together with, self-evidently, the AGRS.NL reference stations. These coordinates are the *published* ETRS89 coordinates of AGRS.NL in the ETRF96 realisation. The calculations were performed using Bern Software, Version 4.0 (the widely-used program for processing GPS data). Since this date no new coordinates for the AGRS.NL reference stations have been published. A number of configuration changes in AGRS.NL were implemented in mid 2000; for example, the Kootwijk station was replaced by the Apeldoorn station, and the GPS receivers and antennae of a number of stations were renewed.

Figure 10. AGRS.NL in West Europe, from [Van der Marel, 2002] (cf. p. 25).

Since January 2000 a time series of the coordinates of the AGRS.NL reference stations has been built up to provide for the monitoring of those coordinates. One-day solutions of these coordinates are calculated in a network comprised of the IGS stations at Brussels, Kootwijk, Herstmonceux, Onsala, Potsdam, Westerbork, Wettzell and Zimmerwald, the BKG stations at Borkum, Euskirchen and Helgoland, and the AGRS.NL reference stations (cf. Figure 10) and [Van der Marel, 2002]).

These one-day solutions are used to calculate one-year solutions (per calendar year) in ETRS89; these are based on the ITRF2000 realisation of ITRS. These one-year solutions exhibit a significant difference from the original coordinates determined in 1996. [Pol en Kösters, 2004] describe how the improved ETRS89 coordinates of the AGRS.NL reference stations were obtained. The policy with respect to the maintenance of the AGRS.NL coordinates is as follows.

The coordinates of the AGRS.NL reference stations are determined on the basis of one-day and one-year solutions. So as to minimize the influence of periodic fluctuations the decisions to adopt the ETRS89 coordinates of the AGRS.NL reference stations are implemented on the basis of one-year solutions calculated from the one-day solutions. As of 1 January 2005 the ETRS89 coordinates of the AGRS.NL reference stations are set at the values for the 2002-year solution; they are referred to as ETRS89, based on the ITRF2000 realisation of ITRS for epoch 2002.5. Every year new one-year solutions are calculated using the latest ETRS89 realisation. The ETRS89 coordinates of the AGRS.NL reference stations are adjusted once the latest one-year solution of the coordinates of one or more stations deviates from the published value by more than $3 \cdot \sigma$ ($\sim 99.7\%$ confidence interval) (cf. Section 4.1).

Table 2 lists both the geocentric (X, Y, Z) and geographic (φ, λ, h) ETRS89 coordinates and the associated standard deviations for the 2002-year solution. From this data it can be concluded that the tolerance (three times the standard deviation) for the differences between the various one-year solutions varies between 4 and 9 mm for the geocentric coordinates X, Y, Z ; for the geographic coordinates the tolerance is between 3 and 5 mm for the location, and between 9 and 12 mm for the height.

3.2 The Rijksdriehoeksmeting frame

3.2.1 *The reasons for the revision in 2000*

Both the user-friendliness and the speed of surveying using GPS improved greatly during the last decade of the 20th Century. The connection of GPS measurements to both the GPS base network and AGRS.NL can be completed rapidly, and with ease. The development of more rapid (RTK) measurement methods has, in particular, resulted in users of the RD grid also increasingly opting for GPS point positioning. For a relatively small outlay a GPS receiver and the necessary software can now be purchased which enable the user to measure distances over dozens of kilometres at an accuracy that is often of the order of a few centimetres. As a result, GPS users are increasingly confronted with distortions in the existing RD grid that had not previously been noticed with earlier less accurate equipment. This gave cause to a review of the need to revise the RD grid.

The Kadaster attached great importance to the users' support for a revision. Broadly-speaking, GPS users were in favour of a revision of the RD grid that would correct the distortions they had encountered; however, the managers and users of mapping files favoured the retention of the current RD frame. The short and medium-term benefits of a conversion of the files were considered to be too uncertain or too small in comparison with the costs that would be incurred (in the actual conversion and, above all, in the organization of that conversion). The great number of links between the files would render the conversion a complex operation.

| Station | Marker | X (m) | Y (m) | Z (m) |
|---------|-----------|--------------|-------------|--------------|
| APEL | 13510M001 | 3895237.0810 | 406814.3266 | 5017378.0689 |
| DELFL | 13502M004 | 3924687.7072 | 301132.7715 | 5001910.7832 |
| EIJS | 13533M001 | 4023086.5361 | 400394.8790 | 4916655.3378 |
| TERS | 13534M001 | 3798580.8766 | 346993.8442 | 5094780.8308 |
| WSRA | 13506M005 | 3828736.1446 | 443304.7456 | 5064884.5120 |

| Station | Marker | σ_x (mm) | σ_y (mm) | σ_z (mm) |
|---------|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| APEL | 13510M001 | 2.2 | 1.8 | 2.3 |
| DELFL | 13502M004 | 2.2 | 1.3 | 2.8 |
| EIJS | 13533M001 | 2.6 | 1.2 | 2.6 |
| TERS | 13534M001 | 2.9 | 1.2 | 3.1 |
| WSRA | 13506M005 | 2.0 | 1.2 | 2.4 |

| Station | Marker | φ (dd mm ss) | λ (dd mm ss) | h (m) |
|---------|-----------|----------------------|----------------------|---------|
| APEL | 13510M001 | 52°12'42.9175" N | 5°57'44.2575" E | 115.899 |
| DELFL | 13502M004 | 51°59'10.0222" N | 4°23'15.3030" E | 74.369 |
| EIJS | 13533M001 | 50°45'29.6558" N | 5°41'00.9825" E | 103.792 |
| TERS | 13534M001 | 53°21'45.8491" N | 5°13'09.7880" E | 56.105 |
| WSRA | 13506M005 | 52°54'52.5893" N | 6°36'16.2065" E | 82.275 |

| Station | Marker | σ_φ (mm) | σ_λ (mm) | σ_h (mm) |
|---------|-----------|-----------------------|-----------------------|-----------------|
| APEL | 13510M001 | 1.3 | 1.8 | 2.9 |
| DELFL | 13502M004 | 1.6 | 1.2 | 3.2 |
| EIJS | 13533M001 | 1.3 | 1.1 | 3.5 |
| TERS | 13534M001 | 1.3 | 1.2 | 4.0 |
| WSRA | 13506M005 | 1.2 | 1.2 | 2.9 |

Table 2. ETRS89 coordinates for the AGRS.NL reference stations and their precision; based on the ITRF2000 realisation of ITRS for epoch 2002.5.

For this reason it was ultimately decided in 2000 that the revision would be limited in scope. A new definition of the RD grid, based on ETRS89, was introduced: the definition has been assigned the name RD2000. This definition replaces Heuvelink's definition, which was referred to as RD1918. The transformation from ETRS89 to RD, which is part of the definition, has been assigned the name RDNAPTRANSTM (the name has been filed with the Benelux Trademarks Office). The new definition has not changed the published RD coordinates, and for this reason frequent reference continues to be made to 'RD coordinates' without the year as a suffix. In addition, the European ETRS89

frame was introduced as the three-dimensional reference frame for the Netherlands. This was effected by the publication of the ETRS89 coordinates for the points in the GPS base network and the AGRS.NL stations.

3.2.2 The quality of the RD field of points

The revision made clear that the use of GPS to maintain the RD grid has resulted in the traditional classification of the RD points into first, second and third-order points and primary points losing its significance. For example, the long series of GPS observations had resulted in an accuracy for the AGRS.NL stations which was higher than the traditional first-order points. Consequently a new classification was introduced in 2000. The characteristic quality of the various categories of points in the RD field of points is as follows:

AGRS.NL stations

| | |
|----------------------------------|--|
| Latitude and longitude in ETRS89 | $c_0 = 0.1 \text{ cm}^2; c_1 = 0.0 \text{ cm}^2/\text{km}$ |
| Ellipsoidal height in ETRS89 | $c_0 = 1.0 \text{ cm}^2; c_1 = 0.0 \text{ cm}^2/\text{km}$ |

GPS base network points

| | |
|----------------------------------|--|
| Latitude and longitude in ETRS89 | $c_0 = 1.0 \text{ cm}^2; c_1 = 0.0 \text{ cm}^2/\text{km}$ |
| Ellipsoidal height in ETRS89 | $c_0 = 9.0 \text{ cm}^2; c_1 = 0.0 \text{ cm}^2/\text{km}$ |
| Height relative to NAP (H) | $c_0 = 4.0 \text{ cm}^2; c_1 = 0.0 \text{ cm}^2/\text{km}$ |

Other points (sighting points, set-up marks, and sighting marks)

| | |
|---------------------------------------|--|
| Location in RD coordinates (x, y) | $c_0 = 0.0 \text{ cm}^2; c_1 = 1.0 \text{ cm}^2/\text{km}$ |
|---------------------------------------|--|

Table 3. Characteristic quality of the RD field of points.

The characteristic quality is the minimum quality that may be expected by the users. In practice the quality (cf., for example, Section 3.1) must be at least equal to or better than the characteristic quality.

3.2.3 Differences in the GPS base network points

Measurements and calculations of the Dutch GPS base network were carried out during the period between 1993 – 1997, cf. [van Buren, 1994] and [Bruinsma, 1997]. The ETRS89 coordinates of the GPS base network were calculated in an adjustment whereby the coordinates of the five AGRS.NL points were fixed and the coordinates of fourteen NEREF points served as stochastic observations.

GPS base network points which were located extremely close to each other ('duplicate points' separated from each other by less than 1 kilometre) were eliminated, leaving 418 points with measured RD/NAP and ETRS89 coordinates. The procedure outlined in Figure 25 was then used to calculate pseudo RD coordinates from the ETRS89 coordinates (cf. Section 3.2.5 and Section 3.4). This procedure used a 7-parameter similarity transformation with parameters in accordance with the HTW 1996. The complete list with the differences between the pseudo RD coordinates from ETRS89 and the existing published RD coordinates is available from the www.rdnap.nl website. The differences exhibit a marked regional correlation, whilst at a number of points (Harlingen, Maasvlakte, Texel) the regular grid would appear to be disrupted. However these differences still comply with the probability model as shown in Table 3 of Section 3.2.2. A further study of the files of RD points in these regions revealed that these are no isolated 'errors', but are in fact differences which extend to all the surrounding RD points.

Figure 11. Regionally correlated differences in GPS base network points (Friesland and the Afsluitdijk) (cf. p. 28).

3.2.4 Interpolation of the differences

RD coordinates for the 415 Dutch GPS base network points were calculated from surrounding RD points, and from ETRS89. The ETRS89 coordinates were subjected to a similarity transformation using the transformation parameters previously specified in the HTW. These geocentric coordinates were then projected using the RD projection method. The resultant pseudo RD coordinates exhibit differences from the coordinates derived from the measurements to surrounding points. These differences in turn constitute the model for the conversion from ETRS89 to RD, and vice versa.

The differences for any desired point in the Netherlands can be calculated by interpolation. This interpolation is carried out in two steps. The first step is to prepare a regular grid. This grid is distributed as two files, for the x-coordinates and y-coordinates respectively, and is part of RDNAPTRANSTM (cf. Section 3.4). The second step is an interpolation of each point to the sixteen surrounding grid points.

Figure 12. Interpolation of the differences in the GPS base network points into a regular kilometre grid (cf. p. 29).

A variety of computational methods can be used to prepare a regular grid from measurements at surrounding points located at irregular distances; this involves the use of xyz values (support points). Often these computational methods are based on the calculation of a weighted average relative to all points, or relative to the points in the vicinity of the grid point.

The Radial Basis Functions group of interpolation methods yields a smooth surface without sharp fracture lines (cf. figures 13, 14 and 15). An adjustment factor (adjustment interpolator) determines the smoothness. In extreme instances the adjustment

factor can assign an equal weighting to all data points, when the interpolated surface will be a horizontal surface lying at the average z value of all points. In the absence of an adjustment factor the surface will pass exactly through the data points.

Figure 13. Correction grid in x direction (cf. p. 30).

Figure 14. Correction grid in y direction (cf. p. 30).

Figure 15. Correction-grid differences as a function of the length of the base line (cf. p. 30).

The data points are selected by choosing a maximum of sixteen points for each of the four quadrants that are all within 205 km from the grid point to be calculated. The distortions in the RD grid are due to the extremely large number of mutually-connected measurements. The RD frame has always been based on the original first-order coordinates. These coordinates were obtained from triangulation, a technique that resulted in coordinates with a precision without a preferential direction (for example, North-South or East-West). Consequently it is assumed that anisotropy is absent.

The distortions in the RD frame do not form a physical surface in which all points are also physically connected to each other. The minimum curvature method is the most suitable method for a necessarily smooth surface (such as a geoid) of this nature. The polynomial regression method is suitable when trends are to be expected.

The interpolation between the grid points is performed using the Overhauser Splines method, in analogy with the NLGEO2004 interpolation (cf. [De Min, 1996]).

Figure 16. Interpolation between sixteen surrounding grid points using the Overhauser Splines method (cf. p. 31).

3.2.5 The RD2000 definition of the RD frame

The new RD2000 definition of the RD frame is derived from ETRS89. The transformation of RD coordinates from ETRS89 is an element of the relationships between ETRS89, RD and NAP (cf. Figure 25 in Section 3.4, which also reviews the procedures used for the transformation). This definition (RD2000) replaces Heuvelink's definition, which is referred to as RD1918 [Heuvelink, 1918].

The map projection for the RD employs what is referred to as Schreiber's Double projection: this entails an orthomorphic Gaussian projection of Bessel's ellipsoid (1841) to yield a sphere, followed by an orthomorphic projection of this sphere to obtain a flat surface (cf. Figure 17). The central point of both projections is the rod on the steeple of the Onze Lieve Vrouwe church tower at Amersfoort in 1895 (cf. [Heuvelink, 1918] for more details). Series have been developed for this map projection, such as those published in the Handleiding Technische Werkzaamheden ('Technical Work Manual',

HTW, [Polman and Salzmann, 1996]). RDNAPTRANS™ employs the stringent formulae (cf. Section 3.4 for more details).

Figure 17. Stereographic projection; points P_1 and P_2 lie on the computational sphere, and are shown as P_1' and P_2' respectively on the map surface (cf. p. 32).

In the RD2000 definition the map projection is effected using the same constants used for the RD1918 definition, inclusive of the coordinates for the zero point (cf. Section 3.2.7). The zero point in the projection with the coordinates $x = 155000.000$ and $y = 463000.000$ has the RD coordinates $x = 154999.990$ and $y = 462999.934$. Hereinafter the aforementioned projected coordinates are referred to as 'pseudo RD'. In a formal sense this constitutes an amendment of the RD map projection; however from a numerical perspective this is without consequence, since the correction grid is also calculated using this amended projection.

In Figure 25 the geographic coordinates – indicated as Bessel(1841) as φ , λ , h – of the RD2000 definition differ from those of the RD1918 definition. The use of these geographic coordinates is certainly not recommended in any form of definition. Solely ETRS89 coordinates should be used for the geographic coordinates within the Netherlands (and Europe). Moreover a further reason for abstaining from the use of Bessel(1841)'s φ , λ , h is the absence of a definition of the height in the 1918 ellipsoid. The height of the ellipsoid in comparison with the NAP surface was set only on the determination of the De Min geoid [De Min, 1996].

3.2.6 Validity region of the RD2000 definition

Since the RD coordinates employed in the RD2000 definition are derived from ETRS89 it should be possible to calculate RD coordinates for any location in Europe (the EUREF region). However, this will have no practical significance at distances far from the GPS base network points on which the transformation of ETRS89 to RD is based. For this reason a validity region has been specified for the RD2000 definition that encompasses:

- all RD points;
- all map sheets from the Topographical Service of the Netherlands;
- the validity region of the De Min geoid model.

The validity region is shown in Figure 18. The region is enveloped by a polygon with eleven corners at the x and y coordinates in metres (pseudo RD) listed in Table 4.

Figure 18. Validity regions of the RD2000 definition and NLGEO2004. The blue lines indicate the outline of the RD2000 validity region and the coloured plane indicates the NLGEO2004 validity region (cf. p. 35).

| No. | x (m) | y (m) |
|-----|---------|---------|
| 1 | 141,000 | 629,000 |
| 2 | 100,000 | 600,000 |
| 3 | 80,000 | 500,000 |
| 4 | -7,000 | 392,000 |
| 5 | -7,000 | 336,000 |
| 6 | 101,000 | 336,000 |
| 7 | 161,000 | 289,000 |
| 8 | 219,000 | 289,000 |
| 9 | 300,000 | 451,000 |
| 10 | 300,000 | 614,000 |
| 11 | 259,000 | 629,000 |

Table 4. Corners of the validity region for the RD2000 definition.

In practice the validity region has been implemented by means of the assignment of an extremely large value (2^{127}) to grid points outside the validity region. Since the interpolation method used the sixteen grid points (cf. Section 3.2.4) the border points of the grid all lie at least 1 km outside the validity region in the x- and y-directions.

The link between the RD and the foreign coordinate frames is assured by the connection with ETRS89, the incorporation of four AGRS.NL stations (Apeldoorn not included) in the EPN, and the actual inclusion of two stations (Kootwijk and Westerbork) in the IGS. This connection with Europe's standard reference frame, ETRS89, ensures for the continued applicability of the system in the future. The European system is in turn connected to the global systems, and is subjected to permanent monitoring. Any successor to ETRS89 (ETRS2###) will also remain connected to ETRS89 via a transformation.

3.2.7 Revision of the parameters of the similarity transformation in 2004

The continuous measurements at the AGRS.NL reference stations are used for new daily calculations of the ETRS89 coordinates. The one-day solutions collected during a period of at least one year should be capable of use in calculations that eliminate any seasonal influences that may be involved. The ETRS89 realisation was calculated and published using data from 1996. This realisation, hereinafter referred to as ETRS89(1997), was used until 1-1-2005.

In 2004 new ETRS89 coordinates were determined using the one-day solutions collected in 2002 (cf. Section 3.1). Hereinafter this realisation is referred to as ETRS89(2004). This realisation differs by about 1.5 cm from ETRS89(1997). This difference is probably due to the following causes:

- the 1997 coordinates were calculated using a different network;
- the GPS equipment at the reference stations has been replaced;
- there is a new realisation of ETRS89.

The need to retain as constant as possible RD coordinates gave cause to a modification of the transformation between ETRS89 and RD, part of RDNAPTRANSTM. This modification was based on the unchanged relative locations of the AGRS.NL points in ETRS89(1997) and ETRS89(2004). For this reason the parameters of the similarity transformation used for RDNAPTRANSTM2004, the successor to RDNAPTRANSTM from 2000, were adjusted to the new ETRS89(2004) coordinates of the AGRS.NL points, whilst the RD correction grid remained unchanged.

The calculation of the seven parameters for the similarity transformation includes a test of the coordinates. The probability model employed the following standard deviations, which were derived from the calculation of the aggregated one-year solution of 2002:

| | σ_ϕ (mm) | σ_λ (mm) | σ_h (mm) |
|--------------|--------------------|-----------------------|-----------------|
| ETRS89(1997) | 1.3 | 1.3 | 3.3 |
| ETRS89(2004) | 1.3 | 1.3 | 3.3 |

The test revealed the non-compliance of the Terschelling point. The seven transformation parameters were then calculated from the other four AGRS.NL points. It was assumed that the Terschelling point has shifted in comparison with its immediate surroundings, a shift which could have been caused by the location of the antenna on a twelve-meter mast constructed on piles on a quay behind sheet piling.

3.3 The new NAP publication of 1 January 2005

3.3.1 *The 5th precise levelling*

The 5th precise levelling (5th NWP) was used as the basis for a new national survey of the NAP's primary grid with a precision of 0.5 mm/ $\sqrt{\text{km}}$ [Brand, 2004a]. To this end a large-scale surveying campaign was implemented involving approximately 5000 km of primary levelling to verify the heights of some 360 underground benchmarks. Subsequent to the initial processing of this measurement data it was possible to arrive at the following conclusions:

1. The difference between the heights of the underground benchmarks as known at that time and the newly-calculated heights varied from -3 to $+2$ cm over the entire country. This was in line with the prevailing expectations at the time.

2. The precision of the heights of the primary grid was no more than 0.8 mm/√km. This was deemed to be inadequate for the use of the results from the 5th NWP as the sole basis for a recalculation of the NAP's primary grid.
3. The height of the underground benchmark at Amsterdam's Dam Square, OA2350, was incompatible with the other Dutch underground benchmarks, and is probably incorrect. This is probably due either to the failure to take account of the subsidence of the stone benchmark in Amsterdam's *Nieuwe Brug* Lock during the time interval between the 2nd NWP and the transfer of this height to the Dam in 1955, or to the subsequent subsidence of this underground benchmark (cf. Section 2.3.2).

In view of the second and third conclusions it was decided to develop a computational strategy for the recalculation of the primary and secondary grid of the NAP that (1) combined the measurements from the 5th NWP with the secondary levelling from the 2nd and 3rd Plan periods and (2) took due account of the uncertainty with respect to the underground benchmark at the Dam.

The recalculation of the NAP heights made use of the following procedure (cf. [Brand, 2004b]):

- calculation of the height of the underground benchmark at Amsterdam's Dam Square, cf. Section 3.3.2;
- calculation of the primary grid;
- calculation of the secondary grid.

3.3.2 Basis height of the underground benchmark in Amsterdam

The calculation of the height of the underground benchmark OA2350 at the Dam (cf. Section 2.3.2 for the problems with the stability of this benchmark) was based on the conclusion that the height used to date and the stability of this underground benchmark did not offer sufficient assurance for the suitability of this point as the basis for the NAP's primary grid.

The relevant geological data give cause to the conclusion that the underground benchmarks in the East of the Netherlands, in particular those on the Veluwe, are stable [Brand et al., 2002a]. The stability of these points can be used for a verification of the underground benchmark in Amsterdam. The application of a statistical test during the calculation of the NAP's primary tests provides for the detection of any shift that may have occurred in the Amsterdam reference point as compared to the reference points on the Veluwe. The adoption of this approach ensures both for the maximum possible retention of the NAP's benchmark as defined by the primary net of the 2nd NWP [Waalewijn, 1979] and for an appropriate verification of the height of the Amsterdam reference point. For the purposes of this verification six underground benchmarks were selected on the basis of the following criteria [Brand, 2004b]:

- the expected stability as based on the geological strata;
- the mutual distances from each other;
- the distance from Amsterdam;
- their inclusion in / exclusion from recent levelling (5th NWP and 2nd and 3rd Plan periods) and the 2nd NWP.

Figure 19. The location of the cluster of the stable underground benchmarks and the geology of the Netherlands; from [Brand, 2004b] (cf. p. 37).

Figure 19 outlines the geology of the Netherlands, in particular the depth of the upper limit of the Pleistocene stratum, and the locations of the selected cluster of stable underground benchmarks and the Amsterdam benchmark. The selected cluster was comprised of the following underground benchmarks:

| Location | Number | Location | Number |
|------------|--------|------------|--------|
| Heerde | 0A1071 | Millingen | 0A2160 |
| Velp | 0A1092 | Wageningen | 0A2170 |
| Amersfoort | 0A1111 | Muiderberg | 0A2180 |

Table 5. The cluster of the stable NAP underground benchmarks.

A new height of the underground benchmark OA2350 at the Dam in Amsterdam was calculated by the adjustment of the measurement data from the projects listed in Table 6, whereby a connection was made to the historical heights (from the 2nd NWP) of the cluster of stable underground benchmarks (cf. Table 5). The height of the underground benchmark OA2350 was determined as NAP + 1.408, 2 cm lower than the former published height. Statistic tests of the connection points were carried out to assess whether any demonstrable deformations had occurred within the cluster of stable underground benchmarks during the period between the 2nd and 5th NWP. It transpired that this was not the case, cf. [Brand, 2004b].

3.3.3 Recalculation of the primary grid

The second step involved the (re)calculation of the NAP's primary grid using the measurement data from the projects listed in Table 6. However, in this step a free adjustment was now carried out on the basis of the underground benchmark OA2350 in Amsterdam and the newly-calculated height of the reference point (NAP + 1.408 m).

Figure 20. Differences between the new and old heights of the underground benchmarks in the NAP's primary grid, from [Brand 2004b] (cf. p. 39).

[Brand, 2004b] analysed the differences between the old and new heights of the NAP's primary grid (cf. Figure 20). This reveals that the majority of the heights of the underground benchmarks have been adjusted downwards. This is, in particular, applicable to the West of the Netherlands where the corrections vary between -1 and -3 cm. Corrections of a similar magnitude were also obtained for the Eastern regions of the provinces of Brabant and Noord-Limburg. The corrections in the remainder of the country lie between -1 and +1 cm, with the exception of the provinces of Twente and Zuid-Limburg where the corrections range to +2 cm.

[Brand, 2004b] also carried out an analysis of the precision of the primary grid. Since the primary grid was obtained using a free adjustment based on the Amsterdam reference point the standard deviation increases from Amsterdam towards the border. The relative precision of the NAP's primary grid can be approximated by the formula:

$$\sigma_{\text{rel}} \text{ (mm)} = 2 \text{ mm} + 0.2 \text{ mm}/\sqrt{\text{km}}$$

This formula reveals that the relative precision of two adjacent underground benchmarks is approximately 2 mm, increasing to 4 to 5 mm at the Dutch borders (at mutual distance in excess of 100 km).

3.3.4 Calculation of the height benchmarks

The third step was the (re)calculation of the NAP's secondary grid. The densification of the NAP is effected at a local or regional level, whereby a regional densification is incorporated on all underground benchmarks included in this project. This was effected by means of a pseudo least mean squares calculation, i.e. although the heights of the underground benchmarks were subjected to a statistical test no corrections were implemented.

The following secondary densifications were recalculated for the new NAP publication (i.e. the publication of the new NAP heights):

- All secondary maintenance projects for the NAP from the 2nd and 3rd Plan periods, inclusive of all combined projects in the Groningen/Friesland mining areas carried out with the NAM. This encompassed some 30 projects from the period since 1987 to date, and involved approximately 30000 height benchmarks.
- Other projects in mining areas (since 1989); this entailed about 75 projects, varying from 50 to 1000 height benchmarks.
- The maintenance of the RD's GPS base network; approximately 425 points, with solely the latest surveys.
- All height verification measurements at Rijkswaterstaat's tide-gauge stations along the coast, inland waters, and major rivers.
- Local densifications of the NAP in a large number of municipalities and water-board districts.

These calculations made use of the measurement data from the 5th NWP (optical and hydrostatic levelling, cf. [Brand, 2004a]) and the most recent projects from the 2nd and 3rd Plan periods (cf. Table 6).

| | | Year | No. of under-ground benchmarks |
|-----------------|----------------------------|-------------|--------------------------------|
| 5th NWP | | 1996 – 2000 | 270 |
| 2nd Plan Period | Limburg | 1991/1992 | 9 |
| | Achterhoek | 1993/1994 | 15 |
| | Drenthe / Overijssel | 1994 | 19 |
| | Twente | 1995 | 13 |
| | Brabant-Oost | 1995/1996 | 8 |
| | Limburg-Noord | 1996 | 13 |
| | Veluwe-Noord | 1996 | 15 |
| 3rd Plan Period | Noord-Holland Midden | 1997 | 31 |
| | Rivieren West deel A | 1998/1999 | 69 |
| | Rivieren West deel B | 1999/2000 | 33 |
| | Noord-Holland Noord | 1999 | 29 |
| | Holland Midden Oost + West | 2000/2001 | 43 |
| | Wadden | 2000 – 2002 | 20 |
| | Zeeland | 2001 | 34 |
| | Rivieren Oost | 2002 | 36 |
| | Friesland Zuidwest | 2003 | 8 |
| | Groningen / Friesland | 2003 | 44 |

Table 6. Projects from the 2nd and 3rd Plan periods used for the recalculation of the NAP's primary grid.

3.3.5 The geoid model of the Netherlands (NLGEO2004)

A geoid model is required for the calculation of NAP heights from GPS measurements. Three factors are of importance to the calculation of an accurate geoid model:

1. the density and quality of the available gravitational data;
2. the availability of GPS / levelling points;
3. the calculation strategies.

The calculation can be sub-divided into two main steps:

1. the processing of the gravitational data to arrive at a gravimetric geoid model;
2. the application of a correction surface using the GPS / levelling points.

The first accurate geoid model of the Netherlands was calculated in 1996; this is discussed in [De Min, 1996]. The same calculation method was used for the calculation of NLGEO2004. The primary differences relate to the addition of 'extra' measurement data, namely the use of (1) extra gravitational measurements on Belgian and German territory to improve the gravimetric geoid and (2) a set of 84 GPS / levelling points throughout the entire country (from the 5th NWP) in the connection to the NAP and ETRS89. More details about the calculation of NLGEO2004 are given in [Crombaghs, 2004]. Figure 21 shows the result of these calculations.

Figure 21. NLGEO2004, the geoid model for the Netherlands; from [Crombaghs, 2004] (cf. p. 41).

The residual error subsequent to the connection with the aforementioned GPS / levelling points exhibited a standard deviation of 7 mm (cf. Figure 22).

Figure 22. Histogram of the residual differences from GPS / levelling points; from [Crombaghs, 2004] (cf. p. 42).

The difference between NLGEO2004 and De Min's geoid model amounts to less than one centimetre in the majority of the Netherlands; the difference increases to about 6 centimetres from the Eastern half of the Province of Noord-Brabant towards the Province of Limburg. The objective of NLGEO2004 is, in analogy with De Min's geoid model, is to determine the equipotential surface as accurately as possible. The objective is to determine the NAP = 0 surface as accurately as possible so as to provide for the determination of NAP (differences in) heights from GPS.

According to [Crombaghs, 2004] the quality of NLGEO2004 can be described by the following formula:

$$\sigma_{i,j} \text{ (cm)} = 0.35 + 0.003 \cdot d_{i,j}$$

This formula describes the expected error in a geoid height difference between two points in terms of a function of the distance between those points. Consequently the precision for points i and j which lie close together will be approximately 3.5 mm, increasing to 5 mm for two points separated by a distance of 50 to approximately 7 mm for two points separated by a distance of 120 km (cf. Figure 23).

Figure 23. Precision of the geoid of the Netherlands, NLGEO2004; from [Crombaghs, 2004] (cf. p. 42).

The expected stochastic error arising from NLGEO2004 on the transformation of a height in ETRS89 to NAP amounts to 3.5 mm. Consequently the 95% confidence interval for the transformation of an ETRS89 height measured using GPS into NAP amounts to $[-7 \text{ mm}, +7 \text{ mm}]$. However, the actual accuracy of an ETRS89 height measured using GPS will largely depend on the precision of the GPS measurement.

The accuracy of this transformation was subjected to an independent test using the recently-measured heights of approximately 150 GPS base network points distributed over the Netherlands, whereby new NAP heights and new ETRS89 heights were determined. This revealed an average residual error of 3 mm, with a standard deviation of 19 mm; cf. Figure 24.

Figure 24. Histogram of the residual differences for a selection of GPS base network points; from [Crombaghs, 2004] (cf. p. 43).

It can be concluded that there is no significant constant error in the transformation from ETRS89 to NAP using NLGEO2004. The large standard deviation of 19 mm is due to the optimization of the GPS base network points measurement method for horizontal positioning, as a result of which it is not suitable for the accurate determination of heights.

NLGEO2004 is published as a part of RDNAPTRANSTM2004, the conversion procedure between ETRS89 and RD/NAP that is applicable from 1 January 2005.

3.4 RDNAPTRANSTM, the relationships between the frames

This Section specifies the transformations between ETRS89, RD and NAP. Figure 25 shows the transformations between ETRS89 and the RD, and the relationships with the NAP. The rectangles indicate (interim) forms of coordinates, the ovals the application of (non-trivial) calculations.

Map users and surveyors employ the coordinates in the rectangles above the horizontal line, whereby this data serves as input and output for software. The overall transformation from ETRS89 to RD and NAP has been assigned the name RDNAPTRANSTM. The filing of this name with the Trademarks Office ensures for the enforcement of the use of this name solely for the calculation prescribed by the RD and NAP. The datum transformation between ETRS89 and Bessel(1841) is specified in the form of a 7-parameter similarity transformation⁴ (cf. Section 6.1).

Figure 25. The relationships between ETRS89, RD2000 and NAP (cf. p. 44).

GPS measurement campaigns under the NEREF name were carried out in 1990, 1991 and 1994. In addition to the four Dutch EUREF points, nine NEREF points were also used. One of the objectives of the NEREF campaigns was the determination of the transformation parameters required for RD/NAP and ETRS89 [Brand et. al., 1997].

⁴ The values of the 7-parameter proportional transformation of 2000 were based on the values published in the HTW, 1996. New values were calculated in 2004 on the basis of the revised ETRS89 values for the AGRS.NL reference points.

So as to provide for appropriate connections to the RD the NEREF points were connected to the neighbouring first-order RD points. Appropriate connections with the NAP were obtained by carrying out levelling with underground NAP benchmarks. In 1991 transformation parameters were calculated from the provisional results from the NEREF calculations. Thirteen NEREF points were used to calculate the seven parameters for a spatial similarity transformation between ETRS89 and RD/NAP in the Netherlands. The residual differences in the transformation were smaller than 17 cm in all directions. These transformation parameters have since been incorporated in the Kadaster's new 1996 *Handleiding Technische Werkzaamheden* ('Technical Work Manual', HTW), [Polman and Salzmann, 1996].

In 2004 it transpired that a revision of RDNAPTRANS™ was required, both as a result of the calculation of the new NLGEO2004 geoid and as a result of the need for the modification of the transformation parameters between ETRS89 and RD following the amended ETRS89 coordinates of the AGRS.NL reference stations. The new transformation was assigned the name RDNAPTRANS™2004; since then the RD has been defined with the new transformation (RD2004). This transition has resulted in the modification of the RD coordinates by at most a few millimetres; moreover the sum of all modifications is practically zero. As a result, the 'RD coordinates' name has been retained without the addition of a year suffix.

Use was also made of this opportunity to integrate the software in one program, which was written in the C++ . This integration also resulted in the integration of the validity regions of the geoid and the RD grid (cf. Figure 18 in Section 3.2.6). The validity region of RDNAPTRANS™2004 is now governed by the availability of both geoid heights and RD corrections. The forms granting permission for the use of RDNAPTRANS™2004 have been amended in the sense that this permission is now granted, taking account of a certain transitional period, until such time as a new version of the transformation is published.

The Kadaster and Rijkswaterstaat make the software for RDNAPTRANS™2004 available to manufacturers and distributors of geodetic software. Conversion tools are also available from www.rd.nap.nl.

4 Future maintenance

4.1 ETRS89 realisation

In the future the published ETRS89 coordinates of the AGRS.NL reference stations will be amended in the event that the latest one-year solution of the coordinates of one or more stations differs by more than 3σ ($\sim 99.7\%$ confidence interval) from the published value (cf. [Pol and Kösters, 2004] and Section 3.1).

During the calculation of the new ETRS89 realisations a similarity transformation can be used to test the hypothesis that a point is disrupted. However, in view of the low number of five stations it will not be possible to test alternative hypotheses, such as the deformation of the Netherlands.

The continuity of the AGRS.NL reference stations is a necessary condition for the Dutch stability of the ETRS89 frame and, consequently, the RD frame. However the long-term continuity remains uncertain, as is evident from developments such as the disappearance of the Kootwijk station after a period of sixteen years.

So as to guarantee the future continuity of the link between the traditional RD and NAP frames and the link between these frames and ETRS89 (and, consequently, the indirect link with ITRS) it will be necessary to ensure for a sufficient number of permanent and extremely stable observation stations for satellite-positioning systems. The quality of these stations will be of a higher level than the quality of the reference stations for RTK services; these are focused more on the provision of operational services and place an emphasis on 100% availability.

In the longer term the developments in satellite positioning (Galileo, single point positioning) will result in fewer dense networks of reference stations. It should be noted that the continually increasing accuracy of absolute positioning renders the technology of more and more interest to users. In addition, the mesh of the remaining networks of reference stations will become increasingly larger as a result of the improvements in the modelling of sources of errors (the troposphere, satellite orbits and clocks, etc.). The Internet will come to play an important role in the data-communications field. However, these developments will not obviate the need for a permanent link between the traditional frames (the RD and NAP) and ETRS89.

In conclusion, it is expected that in the longer term (in 10 to 20 years' time) ETRS89 will lose its 'official datum for continental Europe' role to ITRS. It should be noted that the continental shifts (ranging from about 1 to 3 cm per annum) will result in a divergence between the ETRS89 coordinates and the ten ITRS coordinates of a magnitude such that an adjustment will be required for many of the frame's applications. However, few will exhibit a need for a change from ETRS89 to ETRS20XX; in addition, the users do not need a dynamic frame of coordinates for their practical applications. A more suitable

solution to this problem would be the incorporation of a model for the continental shifts in a form of RDNAPTRANS procedure whereby the transformation is effected between RD/NAP and ITRS rather than ETRS89. This approach will ensure for a software link with the local frames.

4.2 RD

The decreasing demand for conventional RD points and the increasing use of GPS for positioning are increasingly resulting in the emphasis of the maintenance of the RD frame shifting to the GPS base network and the AGRS.NL reference stations. Subsequent to consultations with the Users' Council of the Kadaster and the issue of information to its customers the Rijksdriehoeksmeting terminated its preventive maintenance of the classical RD grid (sighting points and set-up marks) in 2004; re-determinations of these points will from now on be carried out solely on request. At the same time, endeavours are being made to improve the quality of the GPS base network with respect to the following issues:

- More stable anchoring, especially in the vertical direction, for example by the use of ground anchors rather than concrete blocks buried in the ground.
- Expansion of the number of points in urban regions and infrastructural gravitational points (based on the infrastructural works cited in the '5th Spatial Planning Policy Document').
- The maintenance frequency will be increased from once every three years to once every eighteen months.
- The locations selected for new points shall take due heed of the availability and Occupational Safety and Health regulations.

The positions of the GPS base network points are determined directly in comparison with the AGRS.NL reference stations. GPS measurements (usually two series, each of ninety minutes) at the GPS base network point and the data from the AGRS.NL reference stations are used to calculate the ETRS89 coordinates of the relevant point, from which RD coordinates are derived using the current version of RDNAPTRANS™ (cf. Section 4.3). Consequently the permanent GPS infrastructure constitutes, in the form of the stability of longer-term oriented AGRS.NL reference stations, the operational basis for the Dutch RD frame.

The ellipsoidal heights from GPS measurements in ETRS89 and the orthometric heights of the GPS Base network points determined by levelling are published alongside each other.

4.3 RDNAPTRANS™

The transformation between ETRS89 and RD/NAP was specified in the RDNAPTRANS™ procedure of 2000. However, it has transpired that this procedure is also in need of

maintenance; later versions are indicated with a year suffix. The first new version after 2000 is RDNAPTRANSTM2004. The maintenance of RDNAPTRANSTM is intended to achieve two objectives:

1. the availability of the most up-to-date ('best') geoid;
2. the continued stability of the RD frame subsequent to amended ETRS89 coordinates for the AGRS.NL reference stations.

Re. 1. The emergence of improved and new technologies for the determination of the geoid (or pseudo geoid, or correction surface) has, in the past, resulted in continued improvements in the precision. Improvements are also to be expected in the future, for example due to the use of the combined results from special satellite missions (CHAMP, GRACE, GOCE) and the availability of more and improved differential values between the ellipsoidal height from GPS measurements and the height of GPS base network points obtained from levelling. The number of GPS-/levelling points will be expanded (cf. Section 2.2.6).

Re. 2. The modification of the ETRS89 coordinates of one or more AGRS.NL points is followed by the calculation of a new RDNAPTRANSTM transformation between ETRS89 and RD designed to ensure that the RD coordinates remain stable. However, this transformation is published solely in the event of significant changes from the previous version (cf. the following significance sub-section). These new transformations do not result in changes to the correction grid; in addition, and until the contrary is proven, the Netherlands is regarded as a non-deformable entirety. As a result of this latter principle each amended similarity transformation of the new ETRS89 coordinates is calculated on the basis of the pseudo RD and ETRS89. Since the pseudo RD and RD are linked via the correction grid they have been combined as 'RD' in the following diagram, whereby 'RD' is accompanied by a year for the definition. A year suffix is also added to the overall transformation between RD and ETRS89, comprised of the 7-parameter similarity transformation, the RD grid and the map projection (designated here by the letter 'T').

The differences between the various RD definitions are due to the residual differences of the similarity transformations. These residual differences, caused by the noise in the successive ETRS89 determinations and 'real' but insignificant movements, are of a magnitude (which is smaller than the RD specifications for the precision) such that in practice reference can be made to 'RD' without including the specific year.

All new transformation parameters are calculated on the basis of the coordinates for the previous RD definition. The use of the RD values for the RD2000 definition encounters a major practical objection – namely, that the data from disrupted or closed points, such as Terschelling and Kootwijk, can no longer be included in future calculations.

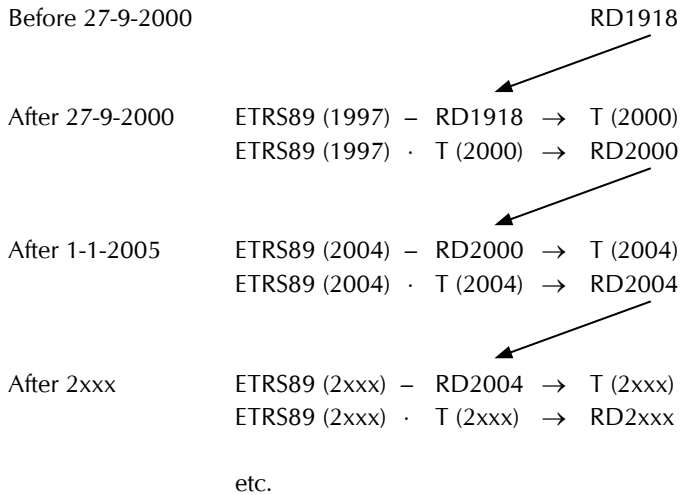


Figure 26. Diagrammatic representation of the successive realisations of ETRS89 together with the associated similarity transformations and RD definitions.

Prior to the calculation of the transformation parameters the connecting points are tested with the standard deviations for φ , λ and h derived from the aggregated one-day solutions. Any points rejected in these tests are not used for the calculation of the transformation parameters.

The significance of the new transformation parameters is assessed in terms of their influence on the RD coordinates, whereby the relevant tolerances are a coordinate differential of 1 cm in the horizontal plane. This results in the retention of the coordinates within the specifications for the GPS base network points, the initial densification of AGRS.NL (cf. Section 3.2.2). These tolerances are tested at the edges of the validity region of the RD2000 definition (cf. Section 3.2.6). Any influence of a revised transformation will be greatest at these extremities of the validity region; the differences between, for example, ETRS89(1997) and ETRS89(2004) are calculated from:

$$T(2000) \cdot ETRS89(1997) - T(2000) \cdot ETRS89(2004)$$

The revised transformation is published solely in the event that the difference exceeds the specified tolerance at any point within the RD validity region.

In the future improved measurement methods and longer time series are expected to result in the improved precision of successive ETRS89 solutions; this improved precision will, in turn, result in increasingly smaller differences between the solutions – and ultimately result in the convergence of the transformation parameters to stable values.

Figure 27. Diagrammatic representation of successive RD definitions with their standard circles, derived from successive ETRS89 realisations. Systematic effects are removed by means of similarity transformations. It is assumed that the Terschelling point suffered disruption between 1996 and 2004; the Kootwijk point is no longer available after 2004 (cf. p. 50).

4.4 NAP

The large-scale modernization of the NAP publication was completed on 1 January 2005, i.e. all heights of the NAP height benchmarks and the level marks derived from those benchmarks will be based on updated height data for the primary NAP grid. This will then result in the virtual elimination of ground movements on the heights registered with the NAP infrastructure - or, to be more precise, the influence will be restricted to that of the last fifteen years. However, maintenance of the NAP will continue to be necessary, both now and in the future. The approach to be adopted to this maintenance is yet to be worked out in detail, although it is clear that a number of external factors will play a role in the design.

The most important factor is the extent to which it will be possible to use satellite positioning to determine the location (and, in particular, the height) in the future. This feasibility is determined by the opportunities the use of GPS, Galileo and Glonass offer (1) for the practical determination of the height during the construction and maintenance of the infrastructure and (2) for the management of the NAP infrastructure.

It is beyond question that a stable anchoring of the heights is possible only with permanent markings (above and below ground level). It is equally certain that users of height information are, above all, interested in heights in terms of gravitational forces (which way will the water flow?); they are less interested in ellipsoidal heights. Consequently a full transition to an infrastructure based exclusively on facilities for satellite positioning is not to be expected; some form of hybridization (a combination of techniques) is much more likely. In addition, the geoid as a transformation model for conversions of heights obtained from gravitational measurements and satellite positioning will continue to play a permanent and crucial role in the future.

The current information about large-scale ground movements in the Netherlands gives reasonable cause to the decision to maintain the NAP's primary grid at 20 to 30-year intervals. A quantifiable change in the height of underground benchmarks (caused by large-scale ground shifts) is not to be expected during the intervening periods. However, the possibility cannot be excluded that heights of individual underground benchmarks change as a result of local influences. Consequently a control loop involving secondary densification measurements will be required. A new precise levelling is not to be expected before 2015.

It is to be expected that (depending on the extent to which satellite positioning is used to obtain height data) a coarse mesh of points will suffice for the future maintenance of the secondary height-benchmark grid. Within this context it should be noted that the maintenance costs are largely due to the number of kilometres involved in the levelling rather than the number of height benchmarks. The current maintenance cycle (3rd Plan Period) will be completed at the end of 2006. The planning of a 4th Plan Period will include updated specifications for the secondary grid as based on future expectations of developments in the actual use of the secondary grid.

Further, an enhancement of the link between the GPS infrastructure (AGRS.NL and its further densification) and stabile (underground and above-ground) benchmarks points is also to be expected in the future. It will be necessary for the permanent GPS infrastructure to be linked directly to a stable NAP infrastructure.

In the field of the geoid of the Netherlands satellite missions such as CHAMP, GRACE and GOCE will result in improved global geoid models with an accuracy of as high as about 1 dm becoming available within the coming ten to twenty years. However, there will continue to be a need for local geoid models, such as NLGEO2004, that are in part based on local gravitational measurements and offer a precision of centimetres.

5 References

5.1 Literature

This Section endeavours to arrive at a sub-classification on the basis of ETRS89, RD, NAP, geoid, and others. This classification, although not absolute, is intended to ensure for some form of arrangement in a long list of references. It should be noted that not all of the following are cited in the report.

ETRS89

Adam, J., W., Augath, C. Boucher, C. Bruyninx, P. Dunkley, E. Gubler, W. Gurtner, H. Hornik, H. van der Marel, W. Schlüter, H. Seeger, M. Vermeer, J.B. Zielinski, *The European Reference System coming of age. Geodesy Beyond 2000*, IAG Symposia, Vol. 121, Springer, 1999.

Altamimi, Z., C. Boucher, 2001. *Memo: Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign*, version 5, 2001, <http://lareg.ensg.ign.fr/EUREF/memo.pdf>.

Brand, G.B.M., J. van Buren, H. van der Marel, R.E. Molendijk, *De NEREF-Campagnes 1990, 1991 en 1994*. ('The NEREF Campaigns of 1990, 1991, and 1994'), Netherlands Geodetic Commission. No. 35, Delft, 1997.

Bruyninx, C., G. Carpentier, F. Roosbeek, 2002, *EPN monitoring: status and plans*, presented at the EUREF Symposium 2002, Azores.

Buren, J. van, R. van der Velden, 1999, *Praktijkervaringen met het actief GPS-referentiesysteem voor Nederland* ('Practical experiences with the active GPS reference system for the Netherlands'), *Geodesia*, no. 99(1), pp. 3-8.

Haagmans, M.E.E., H. van der Marel, J. van Buren, 1996, *Actief GPS-referentiesysteem voor Nederland*, ('Active GPS reference system for the Netherlands'). *Geodesia*, no. 95(5), pp. 227-230.

Hofman, M., H. van der Marel, K. de Jong, J. van Buren, M.E.E. Haagmans, D. Odijk, 1995, *Actief GPS-referentiesysteem voor Nederland* ('Active GPS reference system for the Netherlands'). *Geodesia*, no. 96(12), pp. 227-230.

Marel, H. van der, 2000, *De plaats van RD en NAP in Europa – over internationale referentiestelsels, Europese samenwerking en de gevolgen voor RD en NAP* ('The position of the RD and NAP in Europe – about international reference frames, European collaboration and the consequences for the RD and NAP'). *Geodesia*, no. 2000(9), pp. 373-380

Marel, H. van der, 2002, *Processing of the AGRS.NL network with the Bernese GPS software* (internal document).

McCarthy, D. (ed.), *The IERS Conventions*. IERS Technical Note, No. 21, 1996.

- Molendijk, R.E., G.W. van Willigen, J. van Buren, M.A. Salzmann, 2000, *De vernieuwing van de geometrische infrastructuur van Nederland* ('The modernization of the geometric infrastructure of the Netherlands'), in: NCG Annual Report, 1999, pp. 41-51.
- Pol, A.H.F., A.J.M. Kösters, *Nieuwe ETRS89-coördinaten voor het AGRS.NL* ('New ETRS89 coordinates for AGRS.NL'), in GPS Newsletter, May 2004.
- Schut, T.G., *Transformatieparameters voor RD naar WGS84* ('Transformation parameters between RD and WGS84'), GPS Nieuwsbrief, oktober 1991.

RD

- Bruinsma, J., 1997, *Laatste steen GPS-kernet geplaatst* ('Last stone in the GPS base network installed'), Geodesia, no. 1997(11), pp. 517-518.
- Buren, J. van, 1994, *Het GPS-kernet: schakel tussen RD en GPS* ('The GPS base network: link between the RD and GPS'). Geodesia, no. 94(6), pp. 262-264.
- Buren, J. van, 1998, *Het RD-stelsel, wat schuift dat?* ('The RD frame, how much is it shifting?'), Geodesia, no. 98(7), pp. 333-334.
- Kadaster, 2000, *Het stelsel van de Rijksdriehoeksmeting en het European Terrestrial Reference System 1989 – gebruik en definities* ('The Rijksdriehoeksmeting frame and the European Terrestrial Reference System 1989 – use and definitions'), Kadaster, Rijksdriehoeksmeting, Apeldoorn.
- Heuvelink, H.J., 1918, *De stereografische projectie en hare toepassing bij de Rijksdriehoeksmeting, Rijkscommissie voor Graadmeting en Waterpassing* ('Stereographic projection and its application in the Rijksdriehoeksmeting, National Commission for Arc Measurement and Levelling'), Delft.
- Polman, J., M.A. Salzmann, 1996, *Handleiding voor de Technische werkzaamheden van het Kadaster* ('The Kadaster's Technical Work Manual') Kadaster, Apeldoorn.
- Salzmann, M.A., J. van Buren, G.J.I.M. Lobé, 2000, *De Rijksdriehoeksmeting sluit aan op Europa – RD is voorbereid op de toekomst* ('The Rijksdriehoeksmeting links up with Europe – the RD is ready for the future'), Geodesia, no. 2000(9), pp. 395-403.
- Strang van Hees, G.L., 1997, *Globale en lokale geodetische systemen* ('Global and local geodetic systems'), Nederlandse Commissie voor Geodesie, no. 30, 3e herziene druk.

NAP

- Beusekom, W.A., R.E. Molendijk, G.W. van Willigen, 1999, *Het NAP opnieuw bezien – notitie bij het verzoek om advies van de NCG over een herziening van het NAP* ('A review of the NAP – memorandum accompanying the request for advice from the NCG about a review of the NAP'), Ministry of Transport, Public Works and Water Management, Rijkswaterstaat, Survey Department, No. NAP99 - 116, Delft.
- Brand, G.B.M., W.A. van Beusekom, J.H. ten Damme, J.A. te Pas, A.J.Th. de Bruijne, R.E. Molendijk, 2001, *Een nieuw basispunt voor het NAP* ('A new benchmark for the NAP'),

- Ministry of Transport, Public Works and Water Management, Rijkswaterstaat, Survey Department, No. MDGAP - 2001.31, Delft.
- Brand, G.B.M., A.J.Th. de Bruijne, R.E. Molendijk, 2002a, *Oorzaken van de bewegingen van de merken van het NAP* ('Causes of the subsidence of the NAP's reference points'), Ministry of Transport, Public Works and Water Management, Rijkswaterstaat, Survey Department, No. MDGAP - 2002.26, Delft.
- Brand, G.B.M., G. van Brussel, J.H. ten Damme, J.G. Gerritsen, R. Kamp, J.A. te Pas, P. van Vuuren, A.J.Th. de Bruijne, R.E. Molendijk, M.A. Koens, 2002b, *De historische data van de primaire waterpassingen van het NAP* ('The historical data from the primary levelling of the NAP'), Ministry of Transport, Public Works and Water Management, Rijkswaterstaat, Survey Department, No. MDGAP - 2002.3, Delft.
- Brand, G.B.M., J.H. ten Damme, 2004a, *De waterpasmetingen van de 5e NWP* ('The levelling measurements from the 5th NWP'). Ministry of Transport, Public Works and Water Management, Rijkswaterstaat, Geo-Information and ICT Department (AGI), No. AGI-GAP-2004-15, Delft.
- Brand, G.B.M., G. van Brussel, J.H. ten Damme en J. Gerritsen, 2004b, *Herberekening van het primaire net van het NAP, Verbetering precisie en betrouwbaarheid ten behoeve van de nieuwe NAP publicatie* ('Recalculation of the NAP's primary grid, improvement of the precision and reliability for the purposes of the new NAP publication') AGI/GAP-04/004, Rijkswaterstaat AGI, August 2004.
- Brussel, G. van, F. Kleijer, 1997, *Berekeningsverslag van de ijswaterpassingen 1996 en 1997* ('Calculation report of the ice-levelling of 1996 and 1997'), Rijkswaterstaat, Survey Department, nr. MD-GAN-9747.
- Houtenbos, A.P.E.M., F. Kenselaar, 2001, *Peilmerk hoogte variaties; stochastische analyse van peilmerkbewegingen in Nederland* ('Variations in the height benchmarks; stochastic analysis of height-benchmark movements in the Netherlands'), joint publication by the Rijkswaterstaat Survey Department and Delft University of Technology.
- Kooi, H., P. Johnston, K. Lambeck, C. Smither, R. Molendijk, 1998a, *Geological causes of recent (~ 100 yr.) vertical land movement in the Netherlands*, *Tectonophysics* 299, pp. 297-316.
- Kooi, H., J.J. de Vries, 1998b, *Land subsidence and hydrodynamic compaction of sedimentary basins*, *Hydrology and Earth System Sciences*, 1(2-3), 159-171, EGS, 1998.
- Lambeck, K., P. Johnston, C. Smither, R. Molendijk, 1997, *Sea level change in the North Sea*, Rijkswaterstaat Survey Department, No. MDGAP-9769.
- Lambeck, K., P. Johnston and C. Smither (1998), *Sea-level change, glacial rebound and mantle viscosity for northern Europe*, *Geophysical Journal Int.*, Volume 134 - issue 1 - pp. 102-144, 1998.
- Lange, G., A.N.M. Obdam, A.H.M. Kremers, 2000, *Lokale stabiliteit ondergrondse merken NAP – inventarisatie, plan van aanpak en toetsing merk Hoogwoud* ('Local stability of NAP underground benchmarks – inventory, plan of approach and testing of the Hoogwoud reference point') – supplement, Netherlands Institute for Applied Geosciences TNO, TNO report NITG 99-285-B (supplement).
- Lorenz, G.K., W. Groenewoud, F. Schokking, M.W. van den Berg, H. Wiersma, S. Jelgersma, F. Brouwer, 1991, *Heden en verleden – Nederland naar beneden ???, interim rapport over het onderzoek naar bodembeweging in Nederland* ('Past and

- present – is the Netherlands sinking ???, Interim report on the study of subsidence in the Netherlands'), Rijkswaterstaat Delft/Rijswijk, State Geological Service, Haarlem.
- Lorenz, G.K., 1993, *De eerste nauwkeurigheidswaterpassing van Nederland (1875-1885) – analyse* ('The first precise levelling of the Netherlands (1875-1885) – analysis'), Rijkswaterstaat, Survey Department, No. MD-TNO-R-9331, Delft.
- Molendijk, R.E., W.A. van Beusekom, G.W. van Willigen, 2000, *Het NAP, houvast in Nederland en Europa – de werkvloer van Nederland in beweging?* ('The NAP, reference point in the Netherlands and Europe – is the shopfloor of the Netherlands moving?'), *Geodesia*, No. 2000(9), pp. 385-392.
- Murre, L.M., 1985, *Hervereffening van de tweede, derde en vierde nauwkeurigheidswaterpassing van Nederland en vergelijking van de resultaten* ('Re-adjustment of the second, third and fourth precise levelling of the Netherlands, and a comparison of the results'), thesis, Delft University of Technology, Faculty of Geodesy.
- Oude Elberink, S., 2001, *Data-analyse Nauwkeurigheidswaterpassingen; visueel overzicht van de 2e, 3e, 4e en 5e nauwkeurigheidswaterpassing* ('Data analysis of precise levelling programmes; visual summary of the 2nd, 3rd, 4th and 5th precise levelling programmes'), Rijkswaterstaat, Survey Department.
- Waalewijn, A., 1979, *De tweede nauwkeurigheidswaterpassing van Nederland 1926-1940* ('The second precise levelling of the Netherlands, 1926-1940'), the Netherlands Geodetic Commission, Delft.
- Waalewijn, A., 1987, *Drie eeuwen normaal Amsterdams peil* ('Three centuries of the Normaal Amsterdamse Peil'), Rijkswaterstaat, Main Water-Management Directorate, Series 48.
- Weele, P.I. van der, 1971, *De geschiedenis van het N.A.P.* ('The history of the Normaal Amsterdamse Peil'), the Netherlands Geodetic Commission, Delft.
- Wijnterp, P., 1992, *De eerste nauwkeurigheidswaterpassing (1875-1885)* ('The first precise levelling (1875-1885)'), Rijkswaterstaat, Survey Department, No. MDTNO-R-9231.

Geoid

- Bruijne, A.J.Th. de, R.H.N. Haagmans, E.J. de Min, 1997, *A preliminary north sea geoid model GEONZ97*, Ministry of Transport, Public Works and Water Management, Rijkswaterstaat, Survey Department, No. MDGAP - 9735, Delft.
- Crombaghs, M., 2002, *Zwaartekracht in de 5e NWP; de 2e epoeche van het Nederlands Zwaartekrachtdatum (NEDZWA99) ten behoeve van bodembewegingsonderzoek* ('Gravity in the 5th NWP; the 2nd epoch of the Netherlands Gravity Datum (NEDZWA99) for ground-movement studies'), Rijkswaterstaat, Survey Department, No. MD-GAP-2002.10.
- Crombaghs, M. 2004, *NLGEO2004 – een nieuw geoidemodel voor Nederland*. ('NLGEO2004 – a new geoid model of the Netherlands'). Rijkswaterstaat – Geo-Information and ICT Department, October 2004, report number AGI-GAP-2004-25.

- Dierikx, B.C., 1999, *Geoïdehoogten voor Nederland bepaald uit inter-kernnetvectoren* ('Geoid heights of the Netherlands determined from inter-base network vectors'), GPS Newsletter, Volume 14, No. 2.
- Hilferink, G.W., 2001, *Correctievlakbepaling ten behoeve van geoïdeberekening* ('Correction-surface determination for geoid calculations'), Traineeship report, Survey Department / Delft University of Technology.
- Min, E.J. de, 1996, *De geoïde voor Nederland* ('The geoid of the Netherlands'), Ph.D. thesis, Delft University of Technology, Faculty of Geodesy.
- Schreutelkamp, F.H., 2001, *De geoïde voor Nederland astrometrisch getoetst* ('An astronomical test of the geoid of the Netherlands'). Geodesia, no. 2001(9).
- Willigen, G.W. van, 1985, *De berekening van de gravimetrische geoïde van Nederland* ('The calculation of the gravimetric geoid of the Netherlands'), thesis, Delft University of Technology, Faculty of Geodesy.

Other

- Bakker, G., J.C. de Munck, G.L. Strang van Hees, 1995, *Radio Positioning at Sea*, Universiteitsdrukkerij Delft University of Technology.
- Torge, W., 1991, *Geodesy*, 2nd edition, Walter de Gruyter, Berlin New York.

5.2 Software

The prevailing programs for the RDNAPTRANS™ procedure are available from www.rdnap.nl, together with the necessary files such as the RD correction grid and the geoid grid, as well as source files such as the program code and the differences between the pseudo RD and RD in the GPS base network points. This software is managed by the Kadaster and Rijkswaterstaat AGI.

5.3 Websites

| | |
|---|---|
| http://crs.bkg.bund.de | Portal for European and national frames |
| http://hpiers.obspm.fr | International Earth Rotation Service (IERS) |
| http://igscb.jpl.nasa.gov | International GPS Service (IGS) |
| http://www.euref-iag.net | IAG Sub Commission for Europe (EUREF) |
| http://www.ncg.knaw.nl | Netherlands Geodetic Commission (NCG) |
| http://www.epncb.oma.be | EPN Central Bureau |
| http://www.rdnap.nl | Current information about the RD, NAP and AGRS, and access to RD and NAP publications |

5.4 Abbreviations

| | |
|---------|---|
| AGI | Rijkswaterstaat (Directorate-General for Public Works and Water Management), Geo-Information and ICT Department |
| AGRS.NL | Active GPS Reference System for the Netherlands |
| BIH | Bureau International de l'Heure |
| DORIS | Doppler Orbitography and Radiolocation Integrated by Satellite |
| EPN | EUREF Permanent GPS Network |
| ETRS89 | European Terrestrial Reference System 1989 |
| EUREF | EUropean REference Frame |
| EUVN | EUropean Vertical GPS Reference Network |
| EVRS | European Vertical Reference System |
| GPS | Global Positioning System |
| GRS80 | Geodetic Reference System 1980 |
| HTW | Handleiding voor de Technische Werkzaamheden van het Kadaster ('The Kadaster's Technical Work Manual') |
| IAG | International Association of Geodesy |
| IAU | International Astronomical Union |
| ICRS | International Celestial Reference System |
| IERS | International Earth Rotation Service |
| IGS | International GPS Service |
| ITRF | International Terrestrial Reference Frame |
| ITRS | International Terrestrial Reference System |
| IUGG | International Union of Geodesy and Geophysics |
| LLR | Lunar Laser Ranging |
| NAP | Normaal Amsterdamse Peil (the Amsterdam Ordnance Datum) |
| NCG | Netherlands Geodetic Commission |
| NEREF | NEtherlands REference Frame |
| NIMA | National Imagery and Mapping Agency |
| NWP | Precise levelling |
| RD | Rijksdriehoeksmeting (National Triangulation System) |
| RD1918 | Definition of the RD frame based on [Heuvelink, 1918] |
| RD2000 | Definition of the RD frame 2000 - 2004 |
| RD2004 | Definition of the RD frame from 2005 |
| RETRIG | Réseau Européen de Triangulation |
| RTK | Real Time Kinematic |
| SLR | Satellite Laser Ranging |
| UELN | United European Levelling Network |
| VLBI | Very Long Baseline Interferometry |
| WGS84 | World Geodetic System 1984 |

6 Appendices

6.1 Datum transformations

Coordinates are defined in a reference frame; the specification of the reference frame is referred to as the 'datum definition'. On occasion it is necessary to transform the coordinates specified in one reference frame into those of another reference frame; a datum transformation is employed to transform the coordinates from one reference frame to another. The datum transformation is based on a 3-D similarity transformation. The parameters required for these transformations are (regularly) determined within a national and international context.

The coordinates of a point in three-dimensional space can be represented in a variety of manners. The geographical coordinates specify the position of a point in relationship to an ellipsoid; the coordinates are referred to as ϕ (the geographical latitude), λ (the geographical longitude) and h (the ellipsoidal height). The ellipsoid selected for each reference frame offers the best possible fit. Geocentric Cartesian, or geocentric coordinates, are specified in terms of the position from the centre of the selected ellipsoid. These coordinates are designated by the letters (X, Y, Z) . Geocentric coordinates are, for example, used in the transformation of the coordinates from one reference frame to another.

A reference ellipsoid can be characterized by two of the following parameters:

$$\begin{aligned} &a \\ &b \\ e^2 &= \frac{a^2 - b^2}{a^2} \\ f &= \frac{a - b}{a} \end{aligned}$$

where:

- a : half of the semi-major axis (equator axis) of the ellipsoid;
- b : half of the minor axis (polar axis) of the ellipsoid;
- e^2 : first eccentricity of the ellipsoid;
- f : flattening of the ellipsoid.

In practice most frequent use is made of the parameters a and e^2 or a and $1/f$. The position and orientation of the ellipsoid is specified for the relevant reference frame; as a consequence the geographical and geocentric coordinates of a point will differ in two reference frames.

The specification of the datum transformation is based on the geographic coordinates (φ, λ, h) in Frame I (for example, the RD). The transformation yields the geographic coordinates in Frame II (for example, ETRS89).

6.2 Conversion of geographic coordinates (φ, λ, h) into geocentric coordinates (X, Y, Z)

The geocentric coordinates are calculated from the geographic coordinates using the following formulae:

$$\begin{aligned} X &= (N + h) \cos \varphi \cos \lambda \\ Y &= (N + h) \cos \varphi \sin \lambda \\ Z &= (N(1 - e^2) + h) \sin \varphi \end{aligned}$$

where:

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}$$

6.3 Conversion of geocentric coordinates (X, Y, Z) into geographic coordinates (φ, λ, h)

The calculation of the geographic coordinates from geocentric coordinates is carried out in three steps:

1. Calculation of the geographic longitude:

$$\lambda = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right)$$

2. The geographic latitude is calculated by iteration. In the first iteration, $i + 1$, the geographic latitude is calculated as:

$$\varphi^{(i+1)} = \arctan\left(\frac{Z}{r} + \frac{e^2 N^{(i)} \sin \varphi^{(i)}}{r}\right)$$

where:

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{X^2 + Y^2} \\ N^{(i)} &= \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi^{(i)}}} \end{aligned}$$

The iteration is terminated once the stop criterion $\varphi^{(i+1)} - \varphi^{(i)} < \varepsilon$ is satisfied. The stop criterion ε is specified in radians ($\varepsilon = 1,6 \cdot 10^{-11}$ radian is equivalent to 0.1 mm on the

ellipsoid). Four iterations will usually be required. $\varphi^{(0)} = 0$ is selected as the initial value for the first iteration ($i = 1$).

3. In conclusion, the height relative to the ellipsoid is calculated using the formula:

$$h = r \cos \varphi + z \sin \varphi - a \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}$$

6.4 Datum transformation from Frame I to Frame II

The datum transformation is carried out using a 3-D similarity transformation. The datum transformation takes account of the differences in scale and orientation of the two frames, as well as the translation of the origins of the two frames. The literature often refers to these translations as 'datum shifts'.

In general, the point of rotation employed during datum transformations coincides with the centre of the ellipsoid. However, datum transformations relating to national frames can also make use of a point of rotation in the centre of the field of points (such as Amersfoort in the Netherlands). The benefit offered by this latter approach is the minimal influence minor deviations in the rotational angle (for example, as a result of neglecting significant figures) exert on the transformed coordinates (in particular, the location). The selection of the centre of rotation exerts an influence on the translation parameters, and consequently it is necessary to specify the transformation method for which the transformation parameters are applicable.

For point i the datum transformation from Frame I to Frame II is:

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}_{II} = \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}_I + \begin{bmatrix} \delta & \gamma & -\beta \\ -\gamma & \delta & \alpha \\ \beta & -\alpha & \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}_I + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}$$

Whereby α , β and γ are the rotational angles about the X, Y and Z axes respectively, and $1 + \delta$ is the scale factor between the two frames. The point of rotation is at the centre of the ellipsoid. In the event of a rotation about a central point (X' , Y' , Z') the datum transformation from Frame I to Frame II is as follows:

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}_{II} = \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}_I + \begin{bmatrix} \delta & \gamma & -\beta \\ -\gamma & \delta & \alpha \\ \beta & -\alpha & \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i - X' \\ Y_i - Y' \\ Z_i - Z' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x' \\ t_y' \\ t_z' \end{bmatrix}$$

This is an approximation formula for small rotations. In the case of the transformation between ETRS89 and RD the difference with the rigorous formula is approximately 0.2 mm.

The rigorous formulas for the datum transformation of a point i of frame I to frame II are:

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}_{II} = \lambda R(\gamma, \beta, \alpha) \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}_I + \begin{bmatrix} t_X \\ t_Y \\ t_Z \end{bmatrix}_I$$

with: $\lambda = 1 + \delta$

$$R(\gamma, \beta, \alpha) = \begin{bmatrix} +\cos \gamma \cos \beta & +\cos \gamma \sin \beta \sin \alpha + \sin \gamma \cos \alpha & -\cos \gamma \sin \beta \cos \alpha + \sin \gamma \sin \alpha \\ -\sin \gamma \cos \beta & -\sin \gamma \sin \beta \sin \alpha + \cos \gamma \cos \alpha & +\sin \gamma \sin \beta \cos \alpha + \cos \gamma \sin \alpha \\ +\sin \beta & -\cos \beta \sin \alpha & +\cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix}$$

In the event of a rotation about a central point (X', Y', Z') the datum transformation from Frame I to Frame II is as follows:

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}_{II} = \lambda R(\gamma, \beta, \alpha) \begin{bmatrix} X_i - X' \\ Y_i - Y' \\ Z_i - Z' \end{bmatrix}_I + \begin{bmatrix} t_X' \\ t_Y' \\ t_Z' \end{bmatrix}_I + \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix}_I$$

with:

$$\begin{bmatrix} t_X' \\ t_Y' \\ t_Z' \end{bmatrix}_I = \begin{bmatrix} t_X \\ t_Y \\ t_Z \end{bmatrix}_I + \lambda R(\gamma, \beta, \alpha) \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix}_I - \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix}_I$$

6.5 The map projection of the Rijksdriehoeksmeting

The following ellipsoidal coordinates are assumed for the central point:

$$\begin{aligned} \varphi_0 &= 52^\circ 09' 22.178'' \\ \lambda_0 &= 5^\circ 23' 15.500'' \end{aligned}$$

together with the following map coordinates:

$$\begin{aligned} x_0 &= 155,000.000 \text{ m} \\ y_0 &= 463,000.000 \text{ m} \end{aligned}$$

$$N_0 = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi_0}}$$

$$R_0 = \frac{N_0 (1 - e^2)}{1 - e^2 \sin^2 \varphi_0}$$

The radius of the computational sphere is determined as the average of N_0 and R_0 in the following formula:

$$R_{BOL} = \sqrt{(N_0 \cdot R_0)}$$

The latitude and longitude of the central point on the sphere are:

$$L_0 = \lambda_0$$

$$B_0 = \arctan\left(\left(\tan\phi_0\right) \sqrt{\frac{R_0}{N_0}}\right)$$

The constants n and m of the Gauss projection are calculated from:

$$n = \sqrt{1 + e'^2 \cos^4 \phi_0} \quad \text{with} \quad e'^2 = \frac{e^2}{1 - e^2}$$

$$m = w_0 - n \cdot q_0$$

with $w_0 = \text{Intan}\left(45^\circ + \frac{1}{2}B_0\right)$

and $q_0 = \text{Intan}\left(45^\circ + \frac{1}{2}\phi_0\right) - \frac{1}{2}e \cdot \ln\left(\frac{1 + e \sin\phi_0}{1 - e \sin\phi_0}\right)$

For a point with ellipsoidal (Bessel) coordinates ϕ and λ the first step involves the calculation of the latitude and longitude on the sphere.

$$q = \text{Intan}\left(45^\circ + \frac{1}{2}\phi\right) - \frac{1}{2}e \cdot \ln\left(\frac{1 + e \sin\phi}{1 - e \sin\phi}\right) \quad \text{(isometric latitude on the ellipsoid)}$$

$$w = n \cdot q + m \quad \text{(isometric latitude on the sphere)}$$

$$B = 2a \tan(\exp(w)) - 90^\circ \quad \text{(latitude on the sphere)}$$

$$L = \lambda_0 + n(\lambda - \lambda_0)$$

The calculation of the azimuth α and the distance r on the orthomorphic sphere is as follows:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\sin(\lambda - \lambda_0)}{\tan(B) \cdot \cos(B_0) - \sin(B_0) \cdot \cos(L - L_0)}\right)$$

$$r = 2kR_{BOL} \cdot \tan\left(\frac{\Psi}{2}\right)$$

whereby $k = 0.9999079$ is the assumed scaling factor at the central point and ψ is obtained from:

$$\sin^2 \frac{1}{2} \Psi = \sin^2 \frac{1}{2} (B - B_0) + \sin^2 \frac{1}{2} (L - L_0) \cdot \cos B \cdot \cos B_0$$

The map coordinates are then:

$$x = r \sin \alpha + x_0$$

$$y = r \cos \alpha + y_0$$