

Spuren der Satellitengeodäsie in Deutschland

Yüksel Altiner

Zusammenfassung

Künstliche Erdsatelliten ermöglichen Messungen in einem globalen geodätischen Bezugsrahmen zwischen weit entfernten Punkten über Länder- und tektonischen Plattengrenzen hinweg. In einer kurzen Zeitspanne kann eine hohe Anzahl von Beobachtungen gesammelt werden. Dies bietet die Möglichkeit für eine Analyse der Veränderungen und Reaktionen, welche aus den Wechselwirkungen zwischen der inneren Dynamik, der äußeren Atmosphäre und der planetaren Umgebung der Erde entstehen.

Dieser Beitrag befasst sich mit der Entwicklung der Satellitengeodäsie und stellt ihre Anwendungen im Bereich der mittels Satellitenbeobachtungen bestimmten geodätischen Netze in Deutschland vor, die für die nationalen und internationalen Dienste zur präzisen Positionierung, Echtzeit-Anwendung, Bodenbewegung, Wettervorhersage, Klimaänderung und für die Steuerung autonomer Systeme die Grundlage bilden.

Summary

Artificial Earth satellites enable measurements in a global geodetic reference frame between very distant points over countries and tectonic plate boundaries. In a short period of time, a large number of observations can be collected. This provides the opportunity for an analysis of the changes and reactions arising from the interactions between the inner dynamics, the external atmosphere, and the planetary surroundings of the Earth.

This paper deals with the development of satellite geodesy and presents its applications in the area of geodetic networks established in Germany using satellite observations, which form the basis for national and international services for precise positioning, real-time application, ground movement, weather forecasting, climate change, and control of autonomous systems.

Schlüsselwörter: Satellitengeodäsie, Plattentektonik, RETrig, ETRS89, SAPOS

1 Einleitung

Das Zentraleuropäische Dreiecksnetz (ZEN), das mit dem Namen (des späteren ordentlichen Professors in Bonn) Helmut Wolf verbunden ist, entstand zwischen 1945 und 1947 aus der Ausgleichung aller verfügbaren Daten der Triangulationsnetze erster Ordnung mehrerer mittel- und südosteuropäischer Länder, die vom Reichsamt für Landesaufnahme in Berlin gesammelt worden waren. Aufgrund negativer Effekte bedingt durch die Kettenauswahl beim ZEN beschloss die IAG (International Association of Geodesy) 1951 die Durchführung einer Neuausgleichung. Das neue Netz RETrig (Réseau Européen des Triangula-

tions) deckte die Triangulationsnetze von west-, mittel- und südeuropäischen Ländern ab; die Ausgleichung der Daten des RETrig führte zur Datumbezeichnung ED50 (European Datum 1950). Es wurde auf dem Internationalen Ellipsoid der IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) von 1924 berechnet und stützt sich auf 106 Laplace- und 77 Lotabweichungspunkte (Schödlbauer 2000).

Bei den Generalversammlungen in Brüssel 1951 und Rom 1954 beschloss die IAG, das Projekt RETrig durch zusätzliche Messungen zur Verbesserung der Netzkonfiguration fortzusetzen. Zu diesem Zweck wurden in den Jahren 1958 bis 1967 Streckenmessungen mit dem Geodimeter NASM-IIA sowie mit verschiedenen Typen des Tellurometers im Deutschen Hauptdreiecksnetz durchgeführt. Zusätzlich fanden zur Bestimmung eines einheitlichen Netzmaßstabes vier Basismessungen mittels Invardrähten bei München (1958), Heerbrugg (1959), Meppen (1960) und Göttingen (1961) statt. Darüber hinaus wurden von 1957 bis 1977 auf mehr als 200 Punkten des Hauptdreiecksnetzes Lotabweichungen mit dem Wild-Prismenastrolab und dem Ni2-Astrolabium gemessen (Richter und Seeger 1997). Später wurde das RETrig unter Einbeziehung von NNSS- (Navy Navigation Satellite System), VLBI- (Very Long Baseline Interferometry) und SLR-Messungen (Satellite Laser Ranging) in den Triangulationsnetzen erster Ordnung der westeuropäischen Länder weiter verbessert (Torge 2001, Drewes 2012). Diese Weiterentwicklungen führen die Datumbezeichnungen ED79 (European Datum 1979) und ED87 (European Datum 1987). Das ED87 wurde 1989 fertiggestellt, umfasste wegen der damaligen politischen Verhältnisse allerdings nur die westeuropäischen Länder (Sigl 1989). Nach der politischen Wende 1989 wurde das ED87 mit den zusätzlichen terrestrischen und GPS-Messungen (Global Positioning System) auf die trigonometrischen Netze einiger osteuropäischer Länder ausgedehnt (Ehrnsperger 1996).

Das ED87 war homogener als das ED50, wurde allerdings nicht für Vermessungen eingesetzt, da es zu diesem Zeitpunkt aufgrund der Entwicklung des GPS nicht mehr zeitgemäß war, während das seit 1954 betriebene ED50 in mehreren Ländern eingeführt wurde und bis in die 1990er Jahre als militärisches System der NATO diente (Seeger et al. 1998). *Heute werden geodätische Netze nicht mehr trigonometrisch, sondern grundsätzlich durch geodätische Raumverfahren wie VLBI, SLR, GNSS (Global Navigation Satellite System) und DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite) realisiert, die keine Unterstützung durch Beobachtungen der geodätischen Astronomie benötigen* (Wolf 1985, Seeber 1993, Schödlbauer 2000, Torge 2001, Witte und Sparla 2015).

2 Die Satellitengeodäsie

Die Ära des Satellitenzeitalters begann am 4. Oktober 1957 mit dem Empfang des Signals des russischen Satelliten Sputnik auf der Erdoberfläche und erlebte eine rasche Entwicklung bis hin zu Multi-Konstellationen von GNSS. Abb. 1 zeigt die Entwicklungsschritte von Multi-GNSS von 1957 bis 2018 sowie die vorgesehenen Services bis 2020.

da traditionell terrestrische Systeme hierarchisch in ein globales raumfestes Bezugssystem eingebettet sind. Daher umfasst gemäß Rummel (2002) die Aufgabe der Geodäsie bzw. der Satellitengeodäsie drei grundlegende Bereiche: Geometrie, Orientierung (oder Erdrotation) und Schwerkraft/Geoid. Dazu kommen noch die verschiedenen Fernerkundungsmethoden sowie Satellitenmissionen zur Beobachtung der Erde und des Universums durch Schall- und elektromagnetische Wellen.

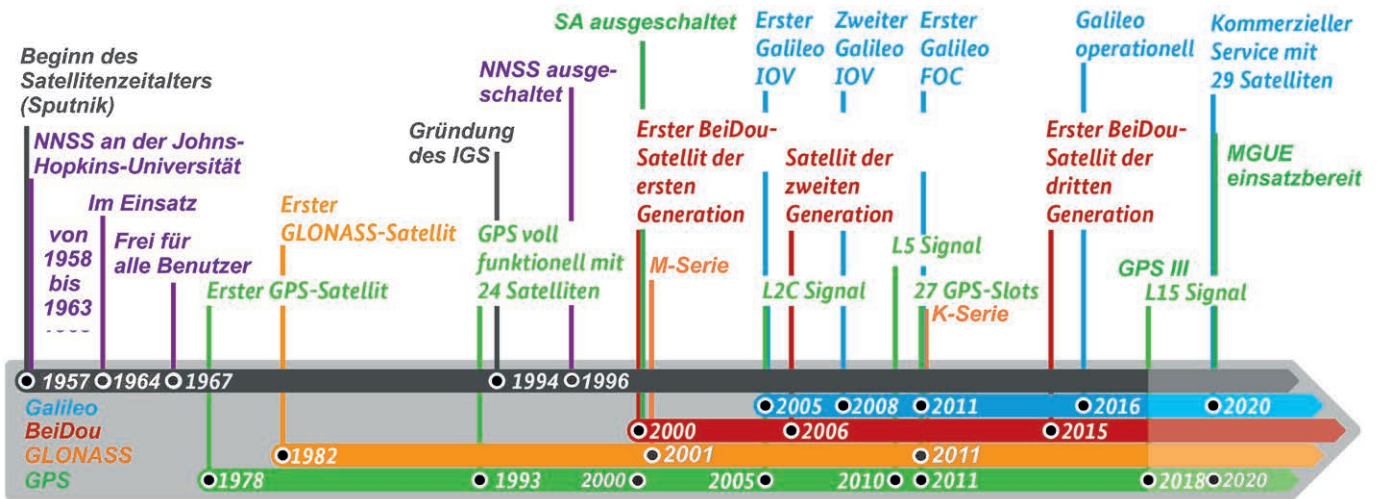


Abb. 1: Entwicklungsstufen der Multi-GNSS-Konstellationen von 1957 bis 2018 sowie die geplanten Services bis 2020. Die Abkürzungen IGS, SA und MGUE bezeichnen den International GNSS Service (vormals International GPS Service for Geodynamics), die Selective Availability und das Military GPS User Equipment.

Ausgehend von der klassischen Definition der Geodäsie von Friedrich Robert Helmert als »die Wissenschaft zur Bestimmung der Figur und des Schwerefeldes der Erde« dient die Satellitengeodäsie zur Lösung dieser Aufgaben durch Messungen mittels künstlicher Satelliten. Nach Rummel (2002) beschränkt sich die Bestimmung der Erdfigur nicht nur auf die Bestimmung der Geometrie des Erdkörpers und seiner temporalen Veränderungen, sondern sie umfasst auch die Messungen der Orientierung der Erde im Weltraum (Variationen der Erdrotation),

Künstliche Erdsatelliten ermöglichen Messungen in einem globalen geodätischen Bezugsrahmen zwischen weit entfernten Punkten über Länder- und tektonische Plattengrenzen hinweg. In einer kurzen Zeitspanne kann eine hohe Anzahl von Beobachtungen gesammelt werden. Dadurch wird eine Analyse der Veränderungen und Reaktionen ermöglicht, welche aus den Wechselwirkungen zwischen der inneren Dynamik, der äußeren Atmosphäre und der planetaren Umgebung der Erde entstehen. Während des Tohoku-Erdbebens am 11. März 2011 in Japan wurde bei Messungen festgestellt, dass der GOCE-Satellit (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer) in einer Höhe von ca. 270 km aufgrund der Dichtestörung in der Atmosphäre ca. 6 Minuten lang in seiner Bahn beschleunigt wurde (ESA 2013). Somit wird mit der Satellitengeodäsie nicht nur die Grundlage zur globalen und homogenen 3D-Positionierung auf einem dynamischen Körper wie der Erde geschaffen, sondern auch ein kontinuierliches Monitoring der Veränderungen ermöglicht (Abb. 2).

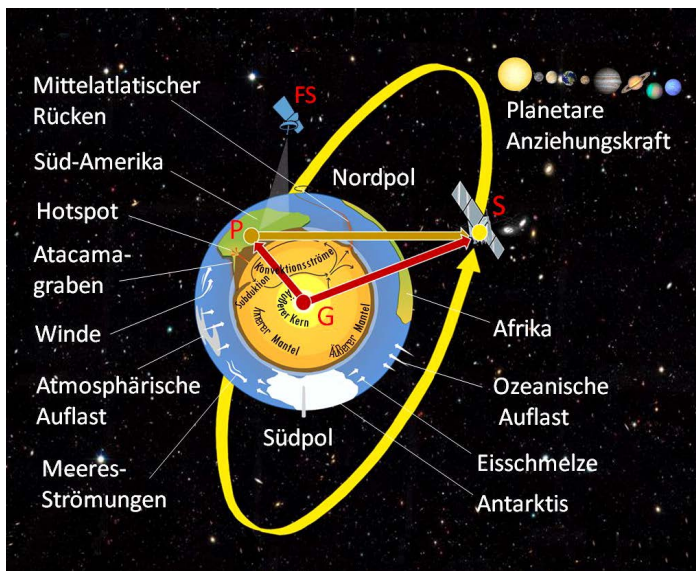


Abb. 2: Die Satellitengeodäsie ermöglicht die Analyse der Wechselwirkungen der Erde mit ihrer inneren Dynamik, der äußeren Atmosphäre und der planetaren Umgebung. Durch die Koordinaten des Geozentrums (G), des Messpunkts (P) und des Satelliten (S) kann ein entsprechender Ortsvektor gebildet werden. FS bedeutet hier Fernerkundungssatellit.

3 Frühe Anwendungen mit NNSS

Der Begriff »Navigation« für die Bestimmung von 3D-Koordinaten etablierte sich erst mit der Bereitstellung des amerikanischen NNSS, das auch als NAVSAT, DOPPLER oder TRANSIT bekannt ist. Das NNSS-Bodensegment TRANET (Transit Network) umfasste 40 global verteilte Bodenempfänger, während das NNSS-Bodensegment OPNET (Operations Network) 4 Bodenempfänger auf dem amerikanischen Kontinent und Hawaii abdeckte (Seeber 1993). Die beiden Bodensegmente wurden zur Bestimmung der Satellitenbahnen (Präzise Ephemeriden mit TRANET und Broadcast Ephemeriden mit OPNET) genutzt, woraus das gängige Konzept eines globalen terrestrischen Bezugsrahmens entstanden ist. Ab 1970 bis zu seiner Ausschaltung durch das US-amerikanische Verteidigungsministerium am 31. Dezember 1996 wurde das System aufgrund der Vorteile im Messverfahren (wetter- und entfernungsunabhängige Beobachtungen), in der Di-

mension und in der globalen Homogenität der erzielten Koordinaten weltweit im Bereich der Landesvermessung eingesetzt. Die ersten NNSS-Kampagnen (auch als Doppler-Kampagnen – kurz DOC – bezeichnet) dienten überwiegend zum Aufbau eines neuen geodätischen Landesnetzes, zur Verdichtung von geodätischen Punktfeldern sowie zur Bestimmung der Transformationsparameter vom WGS72 (World Geodetic System 1972) zu den Landesnetzen – wie beispielweise EDOC-I (1975) und EDOC-II (1977) zur Überprüfung des ED50 und RETDOC (1984) zur Verdichtung des ED87 sowie DÖDOC (1977 und 1979) zur Bestimmung der Transformationsparameter (Schlüter 1982, Wolf 1985, Seeber 1993, Torge 2001, Witte und Sparla 2015). In den 1980er Jahren wurden in einer Zusammenarbeit der Bundesländer Satelliten-Dopplermessungen im DHDN (Deutsches Hauptdreiecksnetz) zu verschiedenen Zwecken durchgeführt (Abb. 3). Zu diesen Kampagnen gehören u. a. HARZDOC, NIEDOC, ALGEDOP, INNDOC und RPDOC. Ein Vergleich der Lösungen der o. a.



Abb. 3: Die Abbildung zeigt die Lage der Punkte sowie die Messungsjahre ausgewählter NNSS-Kampagnen, die zu unterschiedlichen Zwecken in den Landesnetzen europäischer Länder durchgeführt wurden. Die Zahlen in den Klammern geben die Anzahl der Messpunkte an. Bei ALGEDOP befanden sich nur 2 von insgesamt 12 Punkten in Deutschland.

Kampagnen mit den offiziellen Koordinaten des DHDN ergab, dass die erreichte Lagegenauigkeit der Punkte unter Verwendung präziser Ephemeriden etwa zwischen 50 und 100 cm (bzw. über 100 cm für die ellipsoidische Höhe) lag, wobei die Koordinaten der DHDN-Stationen als fehlerfrei angenommen wurden. Bei der Analyse wurde festgestellt, dass die mit NNSS erreichbare Genauigkeit aufgrund der geringen Satellitenanzahl und deren



Bildquelle: Dr. Gerhard Soltau

Abb. 4: Prof. Dr. Siegfried Heitz, der damalige Abteilungsleiter beim IfAG und späterer ordentlicher Professor in Berlin und Bonn, sowie Dr. Gerhard Soltau und Walter Etling (von links nach rechts) im Herbst 1971 bei der ersten örtlichen Inaugenscheinnahme des für die geplanten SLR-Messungen des IfAG gepachteten Grundstücks im bayerischen Wald, wo sich der heutige Observatoriumskomplex der Fundamentalstation Wettzell befindet. Das Institut für Angewandte Geodäsie (IfAG) wurde 1997 in Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) umbenannt.

Konstellation von der Beobachtungszeit abhängig ist (Altiner 1986). Das Dopplerverfahren wird heutzutage noch beim DORIS angewandt.

GPS wurde zur TP-Bestimmung in Deutschland erstmals 1983 eingesetzt. Die Landesvermessungsämter von Nordrhein-Westfalen, Hessen und Niedersachsen erprobten das GPS im TP-Feld über Distanzen von 5 bis 200 km Länge. Für die Messungen wurden vier aus den USA geliehene Einfrequenzempfänger vom Typ »Macrometer Interferometry Surveyor« benutzt (Lindstrot 1988). Eine erste Messkampagne zur Kontrolle des DHDN mit Macrometer-Messungen erbrachte eine Übereinstimmung mit den Koordinaten von ca. 30 TP bis auf drei Dezimeter (Schmidt 1986). Anfangs basierten GPS-Bahnen auf WGS72 und erst seit 1987 auf WGS84 (World Geodetic System 1984).

Ein wichtiger Schritt in Richtung Satellitengeodäsie begann in Deutschland im Jahr 1972 mit dem Aufbau der Fundamentalstation Wettzell im bayerischen Wald (Abb. 4). Dies führte zur Bereitstellung verschiedener präziser Messsysteme der Weltraumtechniken und der Zeitbestimmung. Die Fundamentalstation wurde im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 78 der Deutschen Forschungsgemeinschaft (SFB 78) aufgebaut und 1983

in die Forschungsgruppe Satellitengeodäsie (FGS) als Dauereinrichtung überführt. Sie wird gemeinsam durch das BKG und die Technische Universität München betrieben (www.bkg.bund.de, www.bgu.tum.de).

4 Die Entstehung des ETRS89

Die Organisationen IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) und IAG haben 1987 den International Earth Rotation Service (IERS) eingerichtet, welcher aus SLR- und VLBI-Messungen einen gemeinsamen Satz von Koordinaten für die physischen Stationen eines globalen Netzes ableitet. Diese globalen kartesischen Koordinaten (X, Y und Z) wurden unter dem Begriff ITRF (International Terrestrial Reference Frame) geführt (<http://itrf.ensg.ign.fr>, Koenig 2018). Ein dynamischer Referenzrahmen, bei dem sich die Koordinaten von Stationen an der Erdoberfläche aufgrund der Plattentektonik und internen Verzerrungen der Platten im Laufe der Zeit ändern, verkompliziert jedoch die Anwendungen in der Kataster- und Landvermessung. Solche Nachteile eines dynamischen ITRF erfordern die Bereitstellung eines Bezugssystems, bei dem die zeitlichen Variationen der Punktfelder (insbesondere die Geschwindigkeit der Punkte) vorab berücksichtigt worden sind.

Aus diesem Grund wurde 1987 während der XIX. IUGG/IAG-Generalversammlung in Vancouver (Kanada) nach der Auflösung der RETrig-Kommission eine neue Organisation unter dem Namen EUREF (European Reference Frame) gebildet (Gubler et al. 1992). Dies führte zur Einstellung der Arbeiten an den zweidimensionalen terrestrischen Bezugsrahmen ED50 und ED87, die hinsichtlich der Genauigkeit die erforderlichen Positionierungsanforderungen in Logistik, Transport und Luftfahrt nicht erfüllten (Seeger et al. 1998). Zur Festlegung des ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989) benutzte EUREF die geodätischen Weltraumtechniken, was zu diesem Zeitpunkt durch die Entwicklung des GPS sowie des ITRF zeitgemäß war. Die anfängliche Tätigkeit von EUREF bestand darin, eine GPS-Kampagne in Europa zu organisieren, die einen primären regionalen Rahmen aus dem ITRF ableitet, welcher ein neues geodätisches Datum für Europa festlegt und mit dem ITRS (International Terrestrial Reference System) unmittelbar verbunden ist (Boucher 2013). Abb. 5 zeigt die Stationen der EUREF-Kampagne des Jahres 1989.

Die Ausgangselemente des ETRS89 sind die ITRF-Koordinaten, die zur Epoche 1989.0 für alle SLR- und VLBI-Stationen in Europa abgeleitet wurden (Boucher und Altamimi 1991). Dieser Satz von Koordinaten definiert das Punktfeld des ETRS89, welches in der Epoche 1989.0 mit dem ITRS89 zusammenfällt und sich mit dem stabilen Teil der Eurasischen Platte bewegt. 1992 wurde auf dem EUREF-Symposium in Bern festgelegt, dass als Bezugsfläche des ETRS89 das GRS80-Ellipsoid (Geodetic Reference System 1980) zu benutzen ist.

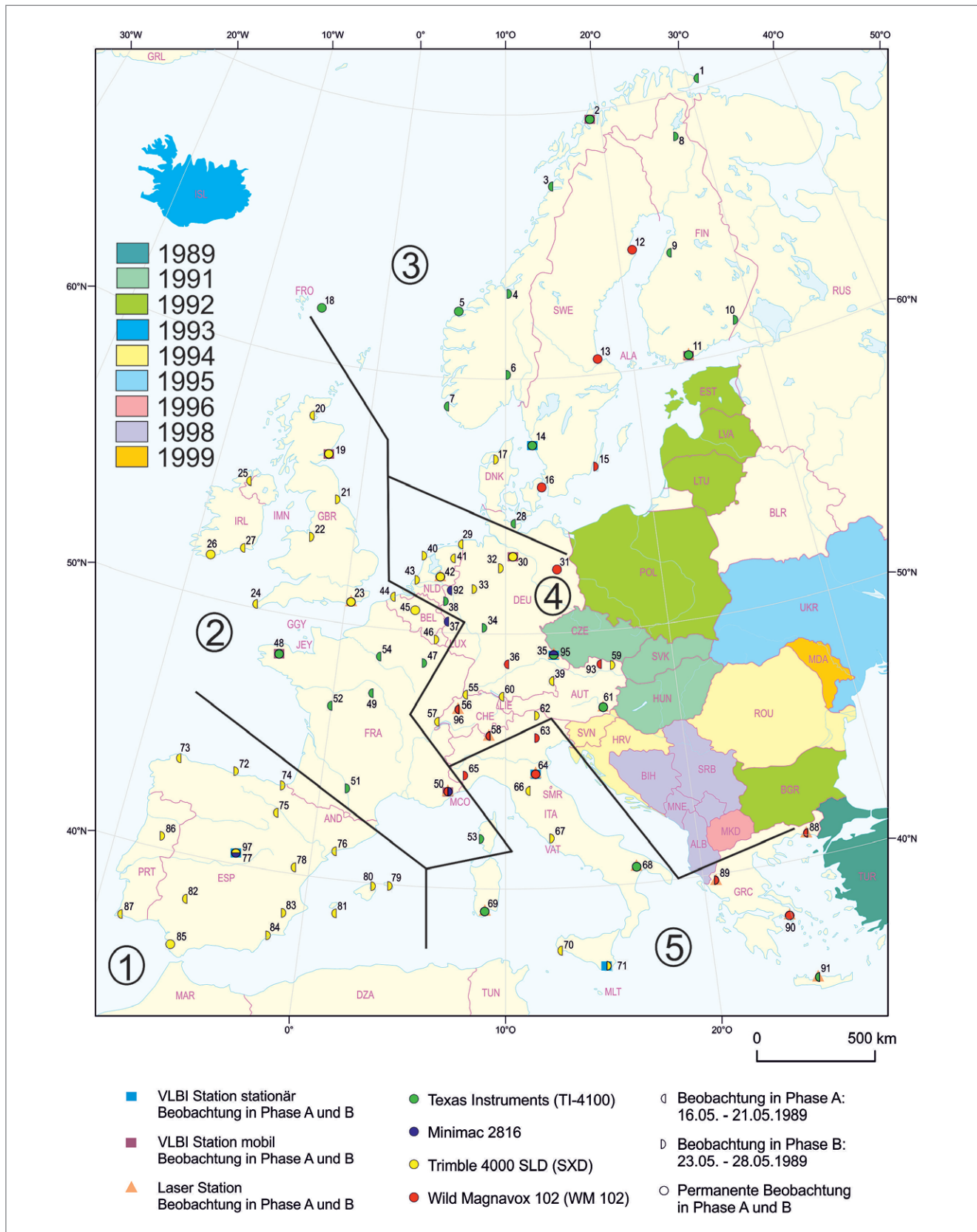
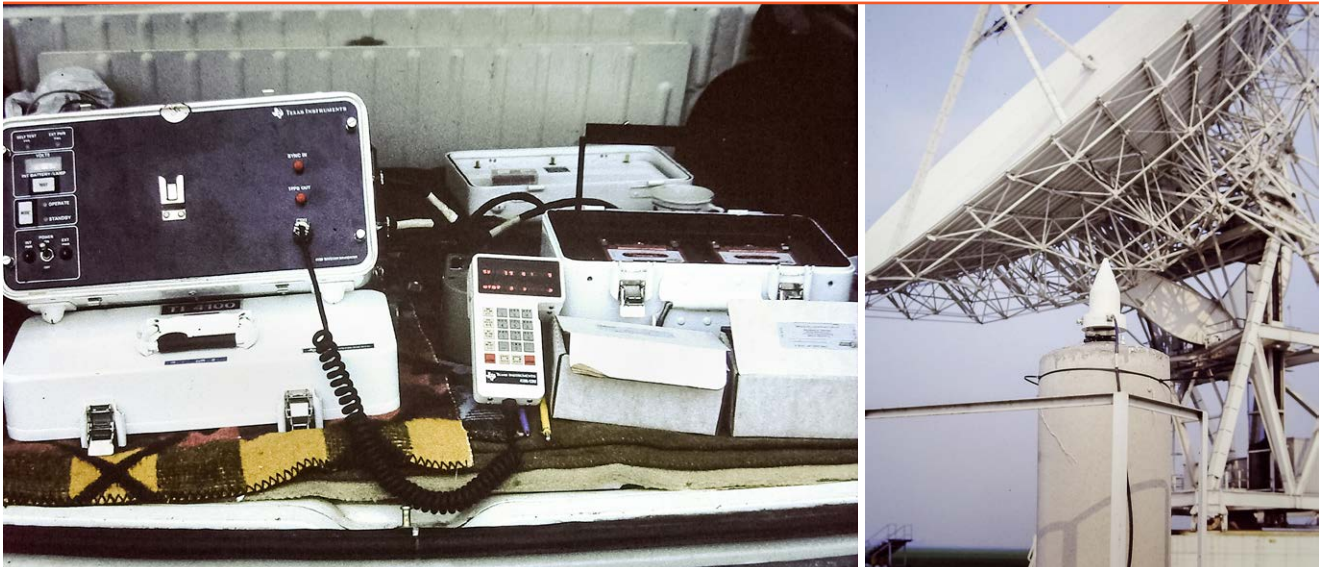


Abb. 5: Stationen der EUREF-Kampagne 1989. Die Punktnumerierung entspricht der offiziellen Nummerierung der Kampagne (Gurtner et al. 1992). Die endgültige Schätzung der Stationskoordinaten erfolgte aus der Kombination von 5 Teilnetzlösungen, die mit jeweiligen Teilnetznummern in einem Kreis dargestellt sind. 1990 wurde in einer Zusammenarbeit des norwegischen Statens Kartverk mit dem BKG (damals IfAG) eine Ergänzungskampagne im nordwestlichen Teil von Europa (Spitzbergen, Island, Faröer, Hopen, Jan Mayen, Bjernoya und Grönland) durchgeführt (Seeger et al. 1998). Diese zusätzlichen Messpunkte sind auf der Graphik nicht abgebildet. Nach der politischen Wende 1989 wurde das EUREF-Netz durch zusätzliche GPS-Kampagnen auf das Territorium osteuropäischer Länder erweitert.



Bildquellen: Yüksel Altiner

Abb. 6: Das Bild zeigt das GPS-Gerät vom Typ TI-4100 Navstar Navigator (Texas Instrument) mit der dazu gehörigen Spiralhelix-Antenne (rechts). Es wurde 1988 während einer GPS-Kampagne in Medicina (Medicina Radio-Observatorium in Italien, ca. 30 km von Bologna entfernt) zur Datensammlung eingesetzt. Die Messdaten wurden auf Kassetten mit einer 30-minütigen Aufnahmekapazität aufgezeichnet. Im Laufwerk befanden sich zwei Kassetten. Sobald die erste Kassette fertig aufgezeichnet wurde, startete die zweite Kassette zur Datenspeicherung automatisch. Das »TI-4100 Navstar Navigator« war das erste kommerzielle GPS-Gerät auf dem Markt. Es besaß eine einkanalige Hardware mit einer mehrfach zwischen den Satelliten umschaltenden Software (Multiplexempfänger) zur gleichzeitigen Registrierung der Daten von bis zu 4 Satelliten.

Die o. a. EUREF-Kampagne, die hauptsächlich zur Bestimmung der Transformationsparameter für die Verknüpfung der nationalen Landesnetze mit dem neuen Bezugssystem ETRS89 diente, fand in der Zeit vom 16. bis zum 28. Mai 1989 statt. Während der Kampagne standen 69 Zweifrequenzempfänger (29 Trimble 4000 SLD (SXD), 21 TI-4100 Navstar Navigator, 15 Wild Magnavox 102 und 4 Minimac 2816) für 93 Messpunkte zur Verfügung (Abb. 6). Die erzielte Genauigkeit der Gesamtkampagnenlösung beträgt ± 13 mm für die Lage bzw. ± 23 mm für die Höhe der SLR- und VLBI-Stationen. Für die GPS-Stationen liegt die Genauigkeit bei ± 40 mm für die Lage und ± 60 mm für die Höhe (Gurtner et al. 1992).

Später wurden mehrere SLR- und GPS-Kampagnen in Gebieten mit tektonisch komplexen Aktivitäten (beispielsweise im östlichen Mittelmeerraum) durchgeführt, um die gegenwärtige Geodynamik sowie den Widerspruch gegenüber den Modellen NNR-NUVEL-1 (No Net Rotation-Northwestern University Velocity Model-1) und NNR-NUVEL-1A zu bestimmen (Wilson und Reinhart 1993, Altiner und Seeger 1993, Ambrosius et al. 1998).

5 DREF91: Ein Referenzrahmen für die Landesvermessung in Deutschland

Die DREF-GPS-Kampagne fand im Zeitraum 8. bis 30. April 1991 statt (Abb. 7). Aufgrund von Empfänger- und Datenspeicherungsproblemen wurden in der Zeit vom 3. bis 7. Juni 1991 Nachmessungen durchgeführt (Lindstrot 1999). Nach der Auswertung der GPS-Messungen lagen die berechneten Stationskoordinaten der DREF-Kampagne im ITRF91 zur Epoche 1991.3 vor. Sie

wurden danach unter Verwendung der Geschwindigkeit der Punkte im Modell NNR-NUVEL-1 in die Beobachtungsepoche 1993.4 der Ergänzungskampagne EUREF-D/NL93 verschoben. Anschließend wurden die Koordinaten der Stationen durch die bekannten Transformationsparameter ins ETRS89 zur Epoche 1993.4 überführt (Engelhardt 1999). Somit liegen die endgültigen Koordinaten der DREF-Kampagne im ETRS89 bzw. im ETRS89/DREF91 zur Epoche 1993.4 vor.

Gemäß Beschluss der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) aus dem Jahr 1991 bildeten die Resultate der o. a. EUREF-Kampagne die 3D-Hierarchiestufe A des ETRS89. Mit der DREF-Kampagne wurde das ETRS89 in der Stufe B im nationalen Rahmen verdichtet. Somit bildete das DREF91 die Grundlage zur weiteren Verdichtung der Punktfelder in der Stufe C sowie zur Einführung des ETRS89 in Landesvermessung und Liegenschaftskataster (Lindstrot 1999).

Hierbei ist jedoch zu erwähnen, dass die damals berechneten Stationskoordinaten der EUREF- und DREF-Kampagnen von 1989 bzw. 1991 aus technischen und wissenschaftlichen Gründen nicht mehr dem heutigen Stand entsprechen würden. Für die Dynamik des ITRS89, worauf sich die Resultate der EUREF-Kampagne beziehen, wurde für die Winkelgeschwindigkeit der Platten das Modell »AM0-2« eingesetzt, das vom relativen Plattengeschwindigkeitsmodell »RM-2« ohne die Berücksichtigung einer globalen Drehung abgeleitet wurde (Minster und Jordan 1978). Die Dynamik des ITRS91, mit dem die Punktkoordinaten für die Realisierung der DREF91-Kampagne ermittelt wurden, bezieht sich dagegen auf das Modell »NNR-NUVEL-1« (DeMets et al. 1990).



Abb. 7: Die Beobachtungsstationen der DREF-Kampagne 1991. Die Zahlen in Klammern geben die Anzahl der gemessenen Punkte wieder.

Die Unterschiede zwischen dem NNR-NUVEL-1 und dem AMO-2 betragen bis zu 15 mm/y (Argus und Gordon 1991). Später wurde die Winkelgeschwindigkeit der Platten im NNR-NUVEL-1-Modell aufgrund der Überarbeitung der geomagnetischen Umkehrzeitskala durch Multiplikation mit einer Konstanten von 0,9562 modifiziert (DeMets et al. 1994, Altiner 1999). Das modifizierte Modell »NNR-NUVEL-1A« bildet die Grundlage der Winkelgeschwindigkeit der Platten ab ITRS94 (<http://itrf.ensg.ign.fr>). Weitere Entwicklungen wie die ständig wachsende Anzahl der Permanentstationen des ITRF und IGS sowie die Fortschritte bei der Modellierung der zeitabhängigen Effekte auf die Erde und Satelliten haben die Präzision der Positionierung erhöht (Abb. 2). Die absolute Kalibrierung der Bodenantennen führte zur zusätzlichen Verbesserung bei der Genauigkeit der Stationskoordinaten (www.geopp.de). Heute (letzter Zugriff 03/2019) wird das ETRS89 durch die ständige Bestimmung der Koordinaten von 335 GNSS-Stationen (3 davon nicht aktiv)

des EPN (EUREF-Permanent Network) überwacht (www.epncb.oma.be).

6 SAPOS®: Ein Dienst zur präzisen Positionierung

Auf der 95. Tagung des Plenums der AdV im Oktober 1994 wurde eine Expertengruppe »GPS-Referenzstationen« (welche dem Arbeitskreis »Raumbezug« bzw. vor dem 1. Januar 2002 dem Arbeitskreis »Grundlagenvermessung« unterstand) eingesetzt, um ein Netz von Referenzstationen mit technisch standardisierten Ausrüstungen und Ausgabeformaten für SAPOS® aufzubauen. Zu diesem Zweck hat die Expertengruppe über einen Zeitraum vom 18. Oktober 1994 bis zur ihrer Auflösung am 8. November 2001 insgesamt 33 Sitzungen gehalten. Von der 1. bis zur 31. Sitzung war Peter Hankemeier (vom Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung in Hamburg) Leiter der Expertengruppe; anschließend hatte Gerd

Rosenthal (von der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen in Berlin) kommissarisch die Leitung bis zur Auflösung der Gruppe inne (Elsner et al. 2004). SAPOS® wird als Gemeinschaftsprodukt der AdV betrieben (www.adv-online.de). Die permanenten Referenzstationen und deren Koordinaten im amtlichen Referenzsystem ETRS89/DREF91 bilden dabei die Grundlage des SAPOS®-Dienstes. Ein Nutzer erhält über verschiedene Übertragungsmedien die Koordinaten seiner Position im ETRS89/DREF91 in Echtzeit bzw. die Messdaten für das Postprocessing (Riecken und Kurtenbach 2017). Gemäß der am 14. März 2007 verabschiedeten Richtlinie 2007/2/EG des Europäischen Parlaments und des Rates ist das ETRS89 das Datum für die Infrastruktur von Geodaten in der Europäischen Union (<https://inspire.ec.europa.eu>).

Aufgrund innerer Dynamik und äußerer Effekte unterliegt die Erde elastischen und plastischen Deformationen (Altiner 2018). Um diese Verzerrungen rechtzeitig zu erfassen, werden die Stationskoordinaten der geodätischen Netze permanent oder periodisch überprüft. Nach der derzeitigen Richtlinie für den einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens in der Bundesrepublik Deutschland (Rili-RB-AdV vom 16. Mai 2017) werden die amtlichen Koordinaten der Stationen geändert, wenn der Änderungsbetrag der Koordinaten gegenüber dem amtlichen Nachweis den Grenzwert von 10 mm für die Lage bzw. 15 mm für die ellipsoidische Höhe überschreitet (AdV 2017). In diesem Zusammenhang wurden 2002 (Altiner 2005) und 2016 (Feldmann-Westendorff et al. 2016, Altiner und Perl 2018) die Koordinaten der Referenzstationen des SAPOS® sowie der Stationen anderer geodätischer Netze in Deutschland nach dem jeweiligen Stand aktualisiert. Die AdV hat 2020 eine neue GNSS-Kampagne zur Überprüfung der Koordinaten der relevanten Stationen der Netze wie GGN (Geodätisches Grundnetz) und SAPOS® unter Einbeziehung aller verfügbaren Multi-GNSS-Daten geplant.

7 Ausblick

Um der zunehmenden Mobilität von Menschen und Gütern sowie dem schnellen Wachstum der Nutzer mobiler Geräte mit Ortungsdiensten begegnen zu können, ist die Integrität von Multi-GNSS zu den Positionierungsdiensten von hoher Bedeutung. Für die Steuerung autonomer Systeme im Bereich selbstfahrender Fahrzeuge und mobiler Robotik werden solche Dienste benötigt, deren Ortungsparameter auf den satelliten- und stationsabhängigen Korrekturwerten basieren. Zur Gewährleistung der Leistungskriterien derartiger Dienste (Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Parameter sowie Größe des Deckungsgebietes) scheint insbesondere bzgl. der Steuerung autonomer Systeme eine Datenübertragung über Satelliten sinnvoller zu sein. Die Herausforderung für Anbieter und Nutzer besteht heute darin, mit den gesammelten Daten rentable Verfahren im öffentlichen und

privaten Bereich zu ermitteln, um hinsichtlich Sicherheit, Umwelt, Ressourcen, Transport und Risikobewertung den Ort zu lokalisieren und das Geschehen zu visualisieren.

Literatur

- AdV (2017): Richtlinie für den einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens in der Bundesrepublik Deutschland (Rili-RB-AdV). Version 3.0 – Stand 16.05.2017. <http://mobile.adv-online.de>, letzter Zugriff 03/2019.
- Altiner, Y. (1986): Zeitabhängigkeit des Doppler Systems. <http://library.fes.de/opac/id/7772100>, letzter Zugriff 01/2019.
- Altiner, Y., Seeger, H. (1993): Is the motion of the Mediterranean region faster than expected. *Geological journal*, Heft 28, 319–325. DOI: 10.1002/gj.3350280310.
- Altiner, Y. (1999): *Analytical Surface Deformation Theory for Detection of Earth's Crust Movements*. Springer, Berlin, New York.
- Altiner, Y. (2005): Diagnoseausgleichung SAPOS®: Integration von SAPOS®-Stationen in international Netze. In: *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Heft 4/2005, 130. Jg., 209–217.
- Altiner, Y. (2018): Positioning on the dynamic Earth. In: *Geodetski Glasnik*, Heft 52(49), 44–54.
- Altiner, Y., Perl, J. (2018): Geodätischer Raumbezug von GNSS-Messungen – Der Beitrag des BKG zur Realisierung 2016. In: *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Heft 2/2018, 143. Jg., 114–120. DOI: 10.12902/zfv-0201-2018.
- Ambrosius, B. A. C., Beutler, G., Blewitt, G., Neilan, R. E. (1998): The role of GPS in the WEGENER Project. In: *Journal of Geodynamics*, Heft 25, 213–240.
- Argus, D. F., Gordon, R. G. (1991): No-net-rotation model of current plate velocities incorporating plate motion model NUVEL-1. In: *Geophysical Research Letters*. Heft 18, 2039–2042.
- Boucher, C., Altamimi, Z. (1991): IERS Technical Note No. 6. www.iers.org/IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/tn06.html, letzter Zugriff 01/2019.
- Boucher C. (2013): Geodetic Reference Frames: 40 Years of Technological Progress and of International Cooperation: 1970–2010. In: Altamimi Z., Collilieux X. (Hrsg.): *Reference Frames for Applications in Geosciences*. IAG Symposia, Band 138, 1–4, Springer-Verlag.
- DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F., Stein, S. (1990): Current plate motions. In: *Geophysical Journal International*, Heft 101, 425–478. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1990.tb06579.x.
- DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F., Stein, S. (1994): Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. In: *Geophysical Research Letters*, Band 21, 2121–2194. DOI: 10.1029/94GL02118.
- Drewes, H. (2012): Current Activities of the International Association of Geodesy (IAG) as the Successor Organisation of the Mitteleuropäische Gradmessung. In: *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Heft 3/2012, 137. Jg., 175–184.
- Ehrnsperger, W. (1996): Einfluss von GPS-Messungen und neuer Netzteile auf ein bestehendes trigonometrisches Netz 1. Ordnung, dargestellt am ED87 im Bereich von Österreich. In: *Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Geoinformation*, Heft 4/96, 84. Jg., 339–348.
- Elsner, C., Hankemeier, P., Pahler, K., Rosenthal, G., Sorge, B. (2004): SAPOS Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung – Ergebnisbericht der Expertengruppe GPS-Referenzstationen im Arbeitskreis Raumbezug. AdV-Veröffentlichung.
- Engelhardt, G. (1999): Transformation ins ETRS89 und endgültige DREF-Koordinaten. In: Lindstrot, W. (1989): *Das Deutsche Referenznetz 1991 – DREF 91*. Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Band 9, 157.
- ESA 2013: www.esa.int/spaceimages/Images/2013/03/Earthquake_felt_by_GOCE, letzter Zugriff 03/2019.
- Feldmann-Westendorff, U., Liebsch, G., Sacher, M., Müller, J., Jahn, C. H., Klein, W., Liebig, A., Westphal, K. (2016): Das Projekt zur Erneuerung des DHHN: Ein Meilenstein zur Realisierung des integrierten Raumbezugs in Deutschland. In: *zfv – Zeitschrift für Geodäsie*,

- Geoinformation und Landmanagement, Heft 5/2016, 141. Jg., 354–367. DOI: 10.12902/zfv-0140-2016.
- Gubler, E., Poder, K., Hornik, H. (1992): Preface. In: Gubler, E., Poder, K., Hornik, H. (Hrsg.): *Astronomisch-Geodätische Arbeiten*, Band 52, 3–4, München.
- Gurtner, W., Fankhauser, S., Ehrspenger, W., Wende, W., Friedhoff, H., Habrich, H., Botron, S. (1992): EUREF-89 GPS Campaign – Results of the Processing by the »Berne Group«. In: Gubler, E., Poder, K., Hornik, H. (Hrsg.): *Astronomisch-Geodätische Arbeiten*, Band 52, 146–169, München.
- Koenig, D. (2018): A terrestrial Reference Frame realised on the observation level using a GPS-LEO satellite constellation. *Journal of Geodesy*, vol. 92, 1299–1312. DOI: 10.1007/s00190-018-1121-7.
- Lindstrot, W. (1988): Macrometermessungen in der Eifel. *Nachrichten aus dem öffentlichen Vermessungsdienst Nordrhein-Westfalen (NÖV)*, Heft 1/1988.
- Lindstrot, W. (1999): Das Deutsche Referenznetz 1991 – DREF 91. *Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie*, Band 9, Frankfurt am Main.
- Minster, J.B., Jordan, T.H. (1978): Present-day plate motions. In: *Journal of Geophysical Research*, Band 83(10), 5331–5354.
- Richter, B., Seeger, H. (1997): Die Geodäsie am IfAG – eine Abteilung im Wandel der Zeiten (Teil I). *Vermessung Brandenburg*, Nr. 2/97, 40–53.
- Riecken, J., Kurtenbach, E. (2017): Der Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung – SAPOS®. In: *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Heft 5/2017, 142. Jg., 293–300. DOI: 10.12902/zfv-0180-2017.
- Rummel, R. (2002): Space Geodesy and Earth Sciences. In: *Ádám J., Schwarz, K.-P. (Hrsg.): Vistas for Geodesy in the New Millennium*. IAG Symposia, Band 125, 584–589, Springer-Verlag.
- Schödlbauer, A. (2000): *Geodätische Astronomie: Grundlagen und Konzepte*. Walter de Gruyter, Berlin New York.
- Schlüter, W. (1982): Vergleich der DÖDOC-Ergebnisse (deutscher Anteil) mit terrestrischen Koordinaten. In: *Die Deutsch-Österreichische Dopplerkampagne*. DGK Reihe B, Heft 260, 91–112.
- Schmid, R. (1986): Kontrolle des Deutschen Hauptdreiecknetzes durch Macrometer-Messungen 1983–1985 – KONMAC. DGK Reihe B, Heft 282.
- Seeber, G. (1993): *Satellite Geodesy*. Verlag De Gruyter, Berlin New York.
- Seeger, H., Altiner, Y., Engelhardt, G., Franke, P., Habrich, H., Schlüter, W. (1998): EUREF – 10 Jahre Aufbauarbeit an einem neuen geodätischen Bezugssystem für Europa. In: *Geodätische Vernetzung Europas. Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie*, Band 1, 9–51.
- Sigl, R. (1989): The European Datum 1987 (ED87). In: Poder, K., Hornik, H. (Hrsg.): *The European Datum 1987 (ED87)*. IAG Subcommittee RETrig, Publication No. 18, 26–31, München.
- Torge, W. (2001): *Geodesy*. Walter de Gruyter, Berlin, New York.
- Wilson, P., Reinhart, E. (1993): Determination of the Geokinematics of the Eastern Mediterranean. In: Smith, D.E., Turcotte, D.L. (Hrsg.): *Contributions of Space Geodesy to Geodynamics*. Geodynamic series, Band 23, 299–310, American Geophysical Union.
- Witte, B., Sparla, P. (2015): *Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen*. Herbert-Wichmann-Verlag, Berlin, Offenbach am Main.
- Wolf, H. (1985): Fortschritte der Geodäsie: Satelliten- und terrestrische Methoden mit ihren Möglichkeiten. In: *Vorträge Rheinisch-Westfälische Akademie der Wissenschaften: Natur-, Ingenieur- und Wirtschaftswissenschaften*, Heft 338, 7–41, Westdeutscher Verlag, Opladen.

Kontakt

Dr. Yüksel Altiner
 Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
 Richard-Strauss-Allee 11, 60598 Frankfurt am Main
 yueksel.altiner@bkg.bund.de

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter www.geodaesie.info.