

Diagnoseausgleichung SAPOS® – Homogenisierung des Raumbezugs im System ETRS89 in Deutschland

Hanno Beckers, Klaus Behnke, Heinrich Derenbach, Uwe Faulhaber, Johannes Ihde, Wolfgang Irsen, Jürgen Lotze und Martin Strerath

Zusammenfassung

Mit der Einführung der Echtzeitvernetzung beim Satellitenpositionierungsdienst SAPOS® der Landesvermessung in Deutschland im Jahre 2002 waren höhere Genauigkeiten für die Stationskoordinaten erforderlich. Deshalb wurden mit einer Diagnoseausgleichung aktuelle, über Ländergrenzen hinweg homogene Koordinaten für die SAPOS®-Referenzstationen im ETRS89 abgeleitet. Die erreichte innere Genauigkeit ist besser als 1 cm für die Lage. Für die Verdichtungsnetze der Landesvermessungen ergeben sich daraus Konsequenzen, die diskutiert und erläutert werden.

Summary

With the introduction of the real-time networking for the satellite positioning service SAPOS® of the national survey in Germany in 2002 higher accuracies for the station coordinates were necessary. Therefore, with a diagnosis adjustment current coordinates that are homogeneous across boundaries of the Federal states were derived for the SAPOS® reference stations in the ETRS89. The achieved inner accuracy is better than 1 cm for position. For the densification networks of the state surveys, consequences result that are discussed and explained.

1 Begründung und Zielsetzung für die Diagnoseausgleichung SAPOS®

Die Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) hat im Jahre 1991 beschlossen, den Raumbezug auf das European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89) umzustellen. Grundlage war das im Jahr 1991 mit dem Global Positioning System (GPS) gemessene Deutsche Referenznetz (DREF91), das 1994 fertig gestellt wurde (Lindstrot 1999). Alle nachfolgenden Arbeiten in Verdichtungsnetzen (Länderreferenznetze) zur Einführung des neuen Systems bezogen sich auf das DREF91. Die Messungsanordnungen und Auswertekonzepte des DREF91 entsprachen dem damaligen Stand der Technik. Aus heutiger Sicht ist festzustellen, dass sowohl die Auswahl der Punkte als auch die Konstellationen der GPS-Satelliten keine optimale Genauigkeit der Koordinatenbestimmung insbesondere hinsichtlich der Höhe gewährleisten konnten. Auch war die Qualität der aufgezeichneten Messdaten der 1991 benutzten GPS-Empfänger deutlich schlechter als bei modernen Geräten. Die Modellierungsgenauigkeit der Auswertesoftware hat sich seitdem spürbar verbessert.

Bereits bei den 1995 begonnenen GPS-Messungen zum satellitengeodätisch-nivellistischen Quasigeoid wur-

de festgestellt, dass im DREF91 insbesondere in der Höhenkomponente Spannungen bis zu einigen Zentimetern auftraten. Trotzdem wurden die Verdichtungsnetze mit wenigen Ausnahmen in das DREF91 unter Zwang eingerechnet, um den Bezug des Quasigeoides zur Realisierung des ETRS89 in Deutschland zu gewährleisten.

Der Aufbau des Satellitenpositionierungssystems SAPOS® der Landesvermessung in Deutschland begann 1995. Seit 2002 ist SAPOS® flächendeckend zu einem Echtzeitpositionierungssystem mit vernetzten Referenzstationen ausgebaut. Die Koordinaten der SAPOS®-Referenzstationen wurden mit unterschiedlich genauen Messanordnungen im DREF91 bestimmt, von Einzelpunkteinschaltungen mit wenigen Stunden Messzeit bis hin zu frei ausgeglichenen Netzen in Landesgröße mit längeren Messzeiten. Darüber hinaus erfolgte die Bestimmung der Koordinaten der SAPOS®-Referenzstationen nicht immer länderübergreifend, was zu Inhomogenitäten an den Landesgrenzen führte.

Erste Anwendungen mit vernetzten SAPOS®-Referenzstationen im Servicebereich SAPOS®-HEPS (Hochpräziser Echtzeitpositionierungsservice) zeigten, dass die Koordinatenbestimmung der SAPOS®-Referenzstationen nicht immer mit ausreichender innerer Genauigkeit erfolgt war. SAPOS®-Nutzer, die länderübergreifend tätig sind, verlangen bundesweit hochgenaue und homogene Koordinatensätze für alle SAPOS®-Referenzstationen. Deshalb war es erforderlich, die Homogenität von SAPOS® über die Ländergrenzen hinweg zu gewährleisten. Außerdem setzen die zur Echtzeitvernetzung verwendeten Programme Zentimetergenauigkeit für die Referenzstationskoordinaten voraus. Diese Genauigkeit war bei den Länderreferenznetzen und deren Lagerung im DREF91 nicht überall gegeben.

Auf der Sondertagung der AdV am 20.9.2002 in Hannover wurde deshalb beschlossen, zur Diagnose der SAPOS®-Netze die GPS-Daten aller Stationen einer Woche (GPS Woche 1188, 42. Kalenderwoche 2002) auszuwerten und gemeinsam auszugleichen. Ein spannungsfreier Koordinatensatz im System ETRS89 für alle SAPOS®-Referenzstationen ist sowohl für die eigenen Aufgaben der Länder als auch für die deutschlandweite Abgabe der SAPOS®-Daten an Nutzer außerhalb des amtlichen Vermessungswesens zwingend erforderlich. Als Ergebnis sollte für die SAPOS®-Referenzstationen ein homogener Koordinatensatz mit einer inneren Genauigkeit (2σ) von etwa einem Zentimeter im ETRS89 abgeleitet werden. Die AdV legte des Weiteren fest, die Neuausgleichung im DREF91 zu lagern, um möglichst geringe Koordinatenabweichungen für die bereits früher im

ETRS89 aus dem vermarkten Punktfeld oder von SAPOS®-Referenzstationen im ETRS89 koordinierten Punkte zu erhalten. Diesem Vorteil steht der Nachteil gegenüber, dass mögliche Spannungen zu den Nachbarstaaten Deutschlands in Kauf genommen werden.

Das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) führte die Diagnoseausgleichung aus; der Arbeitskreis Raumbezug hatte das Resultat der Ausgleichung zu werten und über sein Ergebnis der AdV zu berichten.

2 Das European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89)

In Astronomie und Geodäsie unterscheidet man raumfeste und erdfeste bzw. zälestische und terrestrische Bezugssysteme. Für die Referenzierung von Objekten auf und nahe der Erdoberfläche ist das Terrestrial Reference System (TRS) optimal geeignet. Das TRS rotiert mit dem Erdkörper. Beim terrestrischen Referenzsystem ist die Lage und Orientierung des mathematischen Koordinatensystems in Bezug auf den Erdkörper definiert und wird als Geodätisches Datum bezeichnet. Der Bezug zwischen terrestrischen und zälestischen Referenzsystemen wird durch die Erdrotationsparameter, die Polbewegungskomponenten, Erdrotationsgeschwindigkeit sowie Präzession und Nutation hergestellt (Seeber 1989).

Die Realisierung von Referenzsystemen erfolgt durch physische Punkte, für die Koordinaten und Bewegungsgeschwindigkeiten sowie weitere Parameter bestimmt sind. Die Realisierung bezeichnet man als Frame, die Realisierung des Terrestrischen Referenzsystems damit als Terrestrial Reference Frame (TRF). Die Bestimmung der Positionen von Referenzstationen auf der Erdoberfläche erfolgt heute maßgeblich mit Satellitenpositionierungsverfahren. Nur in der Detailmessung finden noch terrestrische Verfahren Anwendung. Für das zälestische Referenzsystem bilden ausgewählte Radioquellen (Quasare) diese physischen Punkte, deren Richtung mittels Very Long Baseline Interferometry (VLBI) von Fundamentalstationen auf der Erde gemessen werden. Mit der VLBI wird auch die Verknüpfung zwischen terrestrischen und zälestischen Referenzsystemen hergestellt (Boucher et al. 2004).

Seit 1988 wird nach internationalen Vereinbarungen das globale International Terrestrial Reference System (ITRS) für jeweils definierte Epochen realisiert, die als International Terrestrial Reference Frame ITRF_{yy} bezeichnet werden. Der Zusatz yy gibt das letzte Jahr an, aus dem die Daten stammen, die für die Berechnung der Realisierung genutzt wurden. ITRF-Lösungen liegen für die Jahre 1988 bis 1994 jährlich sowie für 1996, 1997 und 2000 vor. Die Realisierung der ITRF-Lösung 2004 befindet sich in Vorbereitung (Angermann et al. 2003). Der International Earth Rotation and Reference System Service (IERS) ist für die Definition, Realisierung und Veröffent-

lichung des ITRS entsprechend den Festlegungen durch die Resolution No. 2, die zur IUGG-Generalversammlung 1991 in Wien angenommen wurde, verantwortlich. Der IERS ist eine Einrichtung der International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) und der International Astronomical Union (IAU). Im Jahre 2003 hat der IERS neue Konventionen herausgegeben. Mit den Konventionen werden die Definition des Datums vom ITRS und die ITRF-Produkte festgelegt (McCarthy et al. 2004). Die ITRS-Definition erfüllt die folgenden Bedingungen:

1. Das ITRS ist geozentrisch gelagert. Das Massenzentrum ist definiert für die gesamte Erde einschließlich der Ozeane und der Atmosphäre.
2. Die Einheit der Länge ist das Meter (SI). Diese Skala ist konsistent mit der Geocentric Coordinate Time (TCG) für ein geozentrisches lokales System in Übereinstimmung mit IAU- und IUGG-Resolutionen.
3. Die Orientierung ist durch Festlegungen des Bureau International de l'Heure (BIH) für die Epoche 1984.0 definiert.
4. Die zeitliche Änderung der Orientierung ist unter Nutzung einer No-net-rotation-Bedingung in Bezug auf die horizontalen tektonischen Bewegungen über die gesamte Erde festgelegt. (Bem.: Die vertikalen Bewegungen finden keine Berücksichtigung)

Das ITRS wird durch verschiedene Produktzentren (Dick et al. 2003) unter dem Namen International Terrestrial Reference Frame (ITRF) realisiert. Bei der bis zum ITRF2000 angewandten Vorgehensweise werden individuelle Lösungen der geodätischen Beobachtungstechniken VLBI, GPS, Laserbeobachtungen nach Satelliten und zum Mond (SLR, LLR) und des französischen Dopplersystems DORIS kombiniert. Für das ITRF2000 wurden zuletzt Daten des Jahres 2000 verwendet (Altamimi et al. 2002, Campbell 2004). Für das ITRF2004 werden kombinierte Lösungen der geodätischen Techniken mit den Beobachtungen bis Ende 2004 bereitgestellt und vom ITRS-Produktzentrum zu einer Gesamtlösung zusammengeführt. Die ITRF-Lösungen im SINEX-Format enthalten Stationspositionen und Stationsgeschwindigkeiten sowie die volle Varianz/Kovarianz-Matrix. Die ITRF-Lösungen werden durch das ITRS-Produktzentrum dokumentiert und vom Zentralbüro des IERS in Technical Notes publiziert.

Die terrestrischen Stationen, die mit ihren Koordinaten zur Realisierung des ITRF gehören, folgen den Bewegungen der Platten der Erdkruste. Die Plattenbewegungen werden im ITRF mit dem globalen Modell der Plattenbewegungen NUVEL-1A modelliert (DeMets et al. 1994). Die Bewegungen der Platten der Erdkruste sind nicht regelmäßig; an den Plattengrenzen ist die Bewegung von Stationen oft nicht linear. Die europäische Platte bewegt sich jährlich 2 bis 3 cm im ITRF in nordöstlicher Richtung (Abb. 1). Da die kontinentalen Platten in sich nicht vollständig stabil sind, treten Intraplattenbewegungen auf, die aber viel geringer als die Gesamtbewegung der Platte

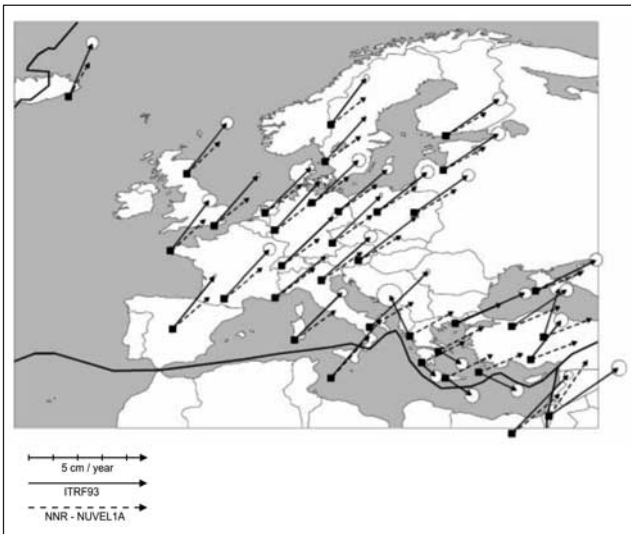


Abb. 1: Differenzen zwischen dem globalen NUVEL-1A Modell und horizontalen ITRF93-Geschwindigkeiten

sind. Bindet man nun das geodätische Datum an die Position der Platte, so eliminiert man damit die Plattenbewegungen. Das ist die Motivation für die Definition und Einführung des ETRS89. Das ETRS89 ist die europäische Realisierung des International Terrestrial Reference System (ITRS). Das Geodätische Datum des ETRS89 ist an die Lage der europäischen Platte im ITRF89 gebunden. D.h., das ETRS89 bewegt sich mit der europäischen Platte im ITRS. Damit wird erreicht, dass die Koordinaten im ETRS89 nicht von der kontinentalen Bewegung beeinflusst sind. Intrakontinentale Bewegungen auf der europäischen Platte betragen einige Millimeter pro Jahr. Die größten vertikalen Bewegungen in Europa treten in Skandinavien durch die fennoskandische Landhebung auf. Es handelt sich um eine isostatische Ausgleichsbewegung aus der Auflast der letzten Eiszeit. Im Zentrum beträgt die Hebung 1 cm/Jahr. Ähnliche Bewegungsraten treten regional in Europa in den Karpaten, der Balkanregion und im Kaukasus auf. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die europäische Platte in sogenannte Mikroplatten zerfällt, die vor allem im Mittelmeerraum auftreten. Diese können sich bis zu 1 cm/Jahr anders als die Kontinentalplatte bewegen. Es besteht also bei hohen Genauigkeitsforderungen an europäische Bezugssysteme zukünftig die Notwendigkeit, die inneren Bewegungen der europäischen Platte zu berücksichtigen.

Die Subkommission der International Association of Geodesy (IAG) für das Regional Reference Frame Europe (EUREF) realisiert das ETRS89 mit dem Europäischen Permanentstationsnetz EPN. Es umfasst ca. 150 Punkte und wird wöchentlich im ITRF2000 und im ETRS89 in der aktuellen Epoche berechnet (<http://www.epncb.oma.be/>). Die Genauigkeit der Stationskoordinaten beträgt wenige Millimeter. Die weitere Verdichtung des EPN im ETRS89 liegt in der Verantwortung der europäischen Staaten. Für die EPN-Verdichtung bestehen EUREF-Guidelines. Nationale EUREF-Punkte sind durch die EUREF-Technical Working Group zu validieren. Sie müssen eine Genauig-

keit von 1 cm haben. Für die Referenzierung von Geodaten der Europäischen Kommission sind vier Koordinatenreferenzsysteme definiert. Sie beziehen sich alle auf das Datum ETRS89, das mit unterschiedlichen Koordinatensystemen bzw. Abbildungen kombiniert ist (siehe hierzu <http://crs.bkg.bund.de/crs-eu/>).

In der Bundesrepublik Deutschland wurde mit dem Deutschen Referenznetz 1991 (DREF91) erstmals das ETRS89 realisiert. Diese Realisierung hat eine Genauigkeit von 1 bis 2 cm in der Lage und 2 bis 4 cm in der Höhe zur Messepoche 1991. In diese Realisierung wurden auch die Stationen des Satellitenpositionierungssystems SAPOS® der Landesvermessung in Deutschland und weitere Verdichtungsnetze eingerechnet. Mit der Diagnoseausgleichung der SAPOS®-Referenzstationen im Jahr 2002 wurde eine neue Realisierung des ETRS89 geschaffen, die sich auf die Epoche 2002.79 bezieht. Die Lagerung der Diagnoseausgleichung durch Transformation auf das DREF91 ist eine spezifische Realisierung des Datums ETRS89. Die innere Genauigkeit für Lage und Höhe liegt bei 1 cm.

3 Ergebnis der Diagnoseausgleichung SAPOS®

Die Daten der GPS-Woche 1188 von 259 SAPOS®-Referenzstationen (siehe Abb. 2) wurden im Rahmen der Dia-

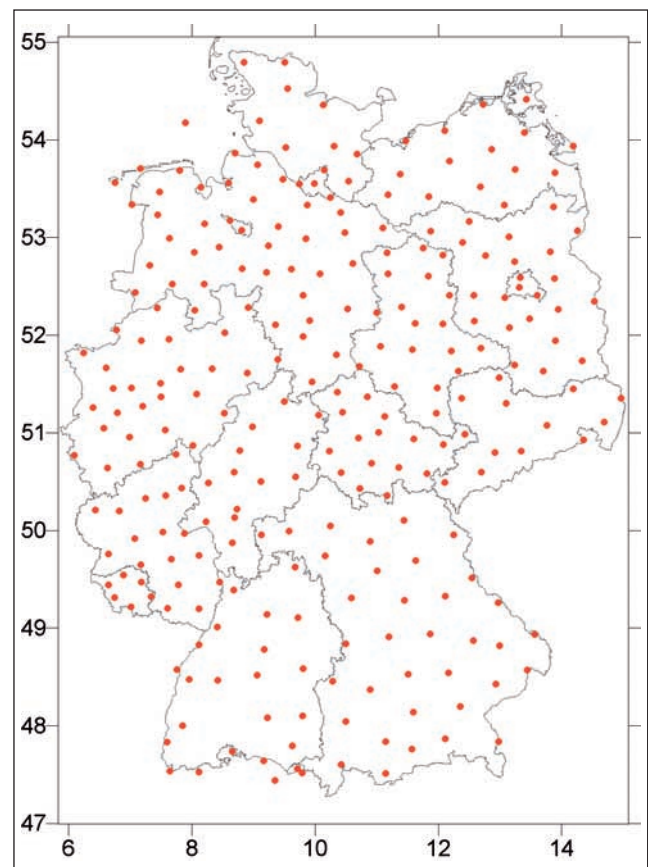


Abb. 2: Verteilung der SAPOS®-Referenzstationen und Stationen der Nachbarländer

gnoseausgleichung vom BKG ausgewertet und in einem Guss (zwei Teilnetze) ausgeglichen.

Parallel dazu führte die Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN) eine Kontrollberechnung durch.

3.1 Erstberechnung des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG)

Die Diagnoseausgleichung des SAPOS®-Netzes wurde mit der Berner Software vom BKG berechnet (Altiner 2005). Die Lagerung des Netzes erfolgte durch die Einführung von acht Datumsstationen (IGS-Stationen) im ITRF2000 (Epoche 2002.79). Anschließend wurden die Koordinaten nach Boucher/Altamimi (2001) mit Hilfe einer 7-Parameter-Transformation vom ITRF2000 ins ETRS89 (Epoche 2002.79) überführt. Der bis hierher vom BKG beschrittene Rechenweg entspricht der üblichen EUREF-Auswertestrategie. Das Ergebnis der Diagnoseausgleichung zeigt, dass mit den simultanen Messdaten aller Referenzstationen für den Zeitraum einer Woche homogene Koordinaten mit der geforderten Genauigkeit von besser 1 cm bestimmt werden konnten.

Um eine Integration in internationale Netze (EUREF) langfristig sicherzustellen, diskutierte eine Projektgruppe intensiv eine Einführung dieser Koordinaten. Die AdV bestand jedoch letztendlich auf einer Lagerung im DREF91. Die Abweichung gegenüber der Menge der bereits früher im DREF91 und von SAPOS®-Referenzstationen abgeleiteten Koordinaten sollte möglichst gering gehalten werden. Die endgültige Lagerung der SAPOS®-Referenzstationen erfolgte deshalb durch die Transformation auf die bisherigen amtlichen Koordinaten sämtlicher SAPOS®-Referenzstationen im DREF91. Dabei betragen die maximalen Differenzen zwischen der Lagerung im ETRS89 (Epoche 2002.79) und der Lagerung im DREF91 im Rechtswert 4 mm, im Hochwert 9 mm und in der Höhe 8 mm.

3.2 Zweitberechnung des Landesbetriebes Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN)

Entsprechend den Erfahrungen bei der DREF-Auswertung wurde neben der BKG-Auswertung eine Zweitberechnung der Diagnoseausgleichung SAPOS® durch die LGN mit der Software GEONAP durchgeführt. In der Auswertung der Messdaten wurden für die Satellitenbahnen und die Geschwindigkeitsvektoren die gleichen Vorgaben wie bei der BKG-Auswertung gemacht. Ein wesentlicher Unterschied der beiden GPS-Auswertungen liegt in der Anwendung des Antennenmodells: Die Auswertung des BKG erfolgte mit elevationsabhängigen Kalibrierwerten aus verschiedenen Quellen für die Phasenzentrumsvariationen (PCV) auf relativem Niveau, die Auswertung der LGN wurde mit Kalibrierwerten aus einer

Quelle auf Absolutniveau unter Berücksichtigung von azimut- und elevationsabhängigen PCV durchgeführt. Lagern keine individuellen Kalibrierwerte vor, wurden Typmittel eingeführt.

3.3 Vergleich der Ergebnisse BKG mit LGN

Trotz des unterschiedlichen Auswertansatzes und der Verwendung unterschiedlicher Programme betragen die Differenzen bei der überwiegenden Anzahl der SAPOS®-Referenzstationen in der Lage weniger als 6 mm (siehe Abb. 3) und in der Höhe weniger als 10 mm (siehe Abb. 4). Die Ursache für größere Differenzen in Lage und Höhe können überwiegend auf die unterschiedlichen Auswertansätze der benutzten Programme zurückgeführt werden. Dennoch wurde diesen Differenzen im Detail nachgegangen; an einzelnen Stationen konnten dadurch Fehler aufgedeckt und im Nachgang behoben werden.

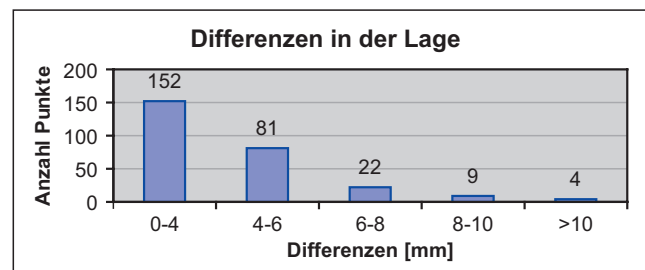


Abb. 3: Lagedifferenzen zwischen der BKG und der LGN Auswertung

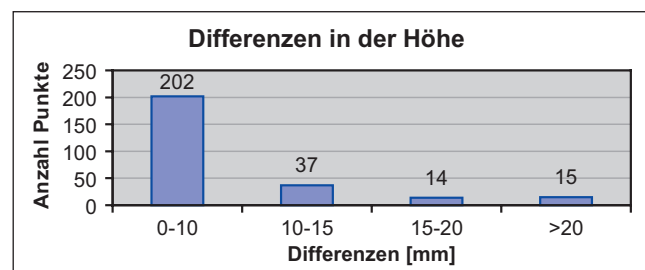


Abb. 4: Höhendifferenzen zwischen der BKG und der LGN Auswertung

Der Vergleich der Auswertungen zeigt, dass das vorgegebene Ziel eines homogenen spannungsfreien Koordinatensatzes der SAPOS®-Referenzstationen im ETRS89 im Sinne einer wesentlichen Verbesserung der bisherigen Situation erreicht wurde.

3.4 Einführung neuer Koordinaten für die SAPOS®-Referenzstationen

Aufgrund der Ergebnisse der Diagnoseausgleichung hat die AdV auf ihrer 112. Tagung im Mai 2003 beschlossen, die Koordinaten der Diagnoseausgleichung des BKG als neue amtliche Koordinaten der SAPOS®-Referenzstationen einzuführen (Beschluss 112/14). In den einzelnen

Tab. 1: Einführungszeitpunkte für die neuen Koordinaten

Land	Datum der Einführung
Baden-Württemberg	01.07.2003
Bayern	01.10.2003
Berlin	05.09.2003
Brandenburg	01.09.2003
Bremen	01.09.2003
Hamburg	01.07.2003
Hessen	01.07.2003
Mecklenburg-Vorpommern	26.09.2003
Niedersachsen	01.09.2003
Nordrhein-Westfalen	01.09.2003
Rheinland-Pfalz	01.07.2003
Saarland	01.07.2003
Sachsen	01.01.2004
Sachsen-Anhalt	01.12.2003
Schleswig-Holstein	10.09.2003
Thüringen	01.07.2003

Bundesländern wurden die neuen Koordinaten zu unterschiedlichen Zeitpunkten eingeführt (Tab. 1).

Da auch an den SAPOS®-Referenzstationen im Laufe der Zeit bauliche Änderungen vorgenommen und somit Koordinaten geändert werden müssen, sind die jeweils amtlichen Koordinaten aller SAPOS®-Referenzstationen in einer bei der Zentralen Stelle SAPOS® geführten Datei erfasst.

3.5 Bestätigung der Erwartungen

Eine in Nordrhein-Westfalen durchgeführte Untersuchung (Dieterle 2005) hat gezeigt, dass die Einführung der spannungsfreien Koordinaten der Diagnoseausgleichung die Lösungsqualität der Vernetzung tatsächlich verbessert. Anhand von ca. 69.000 ausgewerteten Logdateien des zentralen Vernetzungsrechners vor und nach der Koordinatenumstellung zeigte sich, dass die Dauer bis zur Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten (Time-to-fix) von durchschnittlich 97 Sekunden auf durchschnittlich 78 Sekunden zurückging. Gleichzeitig stieg die Anzahl der Time-to-fix-Lösungen innerhalb der ersten Minute von durchschnittlich 52% vor der Einführung der neuen Koordinaten auf 65% mit den neuen spannungsfreien Koordinaten. Testmessungen in Baden-Württemberg haben gezeigt, dass sich die vor der Koordinatenumstellung noch erkennbare Entfernungsabhängigkeit der Positionierungsgenauigkeit (Seitz et al. 2005) nach der Einführung der Koordinaten der Diagnoseausgleichung deutlich reduziert hat. Damit hat sich die Forderung der Hersteller der Vernetzungssoftware nach homogeneren Referenzstationskoordinaten als richtig erwiesen.

4 Auswirkungen auf bestehende Netze

Die SAPOS®-Diagnoseausgleichung zur Epoche 2002.79 ist die derzeit genaueste Realisierung des ETRS89 deutschlandweit. Die Diagnoseausgleichung hat die Inhomogenitäten der bisherigen amtlichen Koordinaten in einer Größenordnung bis 3 cm in der Lage und bis 7 cm in der Höhe beseitigt. Mit Einführung der neuen amtlichen Koordinaten im ETRS89/2002.79 können deshalb zu den Koordinaten der hierarchisch entstandenen Festpunktfelder im ETRS89/DREF91 Spannungen auftreten. Um Übereinstimmung zwischen SAPOS® und dem vermarkten Punktfeld zu erreichen, wurde den Ländern empfohlen, alle bisher im ETRS89 bestimmten Koordinaten aller Hierarchiestufen dem durch die SAPOS®-Referenzstationen realisierten ETRS89/2002 anzupassen. Falls die Differenzen gering sind, d. h. der Raumvektor kleiner als 15 mm ist, können die bisherigen Koordinaten belassen werden. Sind die Differenzen größer, erfolgt eine Anpassung.

An zwei Beispielen soll die unterschiedliche Vorgehensweise bei der Einführung der neuen Koordinaten dargestellt werden:

In Niedersachsen wurden die Ergebnisse der Diagnoseausgleichung bezüglich der Höhenkomponente (Höhenstatus 300) übernommen. In der Lagekomponente wurden sie nur für die Punkte Rotenburg (0655) und Cuxhaven (0641) eingeführt. Für diese Stationen betrug die 2D-Differenz zu den amtlichen Koordinaten mehr als 10 mm. Für die Übertragung der Koordinaten der Diagnoseausgleichung auf die 250 Punkte des niedersächsischen Grundnetzes wurden 21 niedersächsische Referenzstationen, 5 Referenzstationen in Sachsen-Anhalt, 3 Referenzstationen in Bremen, 1 Referenzstation in Hamburg, 6 Grundnetzpunkte in Niedersachsen und 4 Grundnetzpunkte in Nordrhein-Westfalen als identische Punkte genutzt. Für die Referenzstationen lagen Koordinaten aus der Diagnoseausgleichung und der Bestimmung des niedersächsischen Grundnetzes bzw. des gleichzeitig 1997 gemessenen SatNiv-Netzes vor. Die Grundnetzpunkte waren in Abhängigkeit von den Referenzstationen im Datum der Diagnoseausgleichung koordiniert worden. Von den 250 Punkten des niedersächsischen Grundnetzes erfolgte die 3D-Koordinierung aller Netzpunkte der 1. bis 4. Ordnung in Niedersachsen. Wegen der durch Kleintektonik bedingten lokalen Punktveränderungen bedarf dieses Punktfeld der ständigen Überwachung und Fortführung. Die Sicherung der SAPOS®-Referenzstationen wird durch die benachbarten vermarkten Grundnetzpunkte realisiert.

Bayern hat die Ergebnisse der Diagnoseausgleichung am 1. Oktober 2003 für alle SAPOS®-Referenzstationen eingeführt. Um optimale Übereinstimmung zwischen dem Messsystem SAPOS® und dem vermarkten Punktfeld zu erreichen, wurde anschließend entschieden, alle bisher im ETRS89 bestimmten Koordinaten aller Hierarchiestufen dem durch die neuen Koordinaten der SAPOS®-

Referenzstationen realisierten ETRS89 anzupassen. Im Frühjahr 2003 wurden daraufhin in Zusammenarbeit mit den regional zuständigen Vermessungsämtern das gesamte bayerische geodätische Grundnetz (Hierarchiestufen A bis C) sowie die Verbindungen zu den SAPOS®-Referenzstationen neu gemessen. In sechs Kampagnen wurden jeweils ca. 25–30 TP der Hierarchiestufen A bis C synchron zwei mal sechs Stunden beobachtet. Alle Beobachtungen wurden zusammen mit den 2 × 24-Stundenmessungen der SatNiv-Kampagnen der Jahre 1999 und 2000 mit der Berner Software ausgeglichen. Die neuen homogenen Koordinaten der SAPOS®-Referenzstationen dienten dabei als Ausgangspunkte. Die Hierarchiestufe D wurde anschließend mit vorhandenen Beobachtungen neu gerechnet. Alle hierarchisch folgenden trigonometrischen Punkte (TP) und Katasterfestpunkte (KFP) wurden durch Transformation an das übergeordnete Festpunktfeld angepasst. Dabei war, ihrer Entstehung entsprechend, zwischen zwei unterschiedlichen Realisierungen des ETRS89 zu unterscheiden:

- Die ursprünglichen Koordinaten der SAPOS®-Referenzstationen in Bayern waren frei ausgeglichen und im EUREF gelagert. Gegenüber den Ergebnissen der Diagnoseausgleichung ergaben sich minimale Höhendifferenzen. Die Lage wich in konstanter Richtung um 15 mm ab. Die Koordinaten aller ursprünglich mit SAPOS® bestimmten Punkte wurden somit einheitlich um 15 mm verschoben.
- Das hierarchisch verdichtete vermarktete Festpunktfeld war gegenüber den neuen Koordinaten der Diagnoseausgleichung um bis zu 3 cm in der Lage und bis zu 6 cm in der Höhe verspannt. Deshalb wurden für ganz Bayern aus 2500 identischen Punkten für ein 5 × 5 km-Gitter multiquadratisch 3D-Shiftparameter berechnet. Die aus dem benachbarten Festpunktfeld differentiell abgeleiteten Positionen wurden mittels dieses Gitters linear interpoliert.

Nach der im Februar 2004 abgeschlossenen Aktion stimmen damit in Bayern alle ETRS89-Punktfelder innerhalb der Messgenauigkeit mit dem Messsystem SAPOS® überein. Um über das tägliche und wöchentliche Monitoring hinaus die Stabilität der SAPOS®-Antennen mit möglichst geringem Aufwand überwachen zu können und um damit die Qualität der Ergebnisse der Diagnoseausgleichung langfristig zu sichern, wurden in Bayern in unmittelbarer Nähe der SAPOS®-Referenzstationen GPS-gereignete 3D-Bodenpunkte bestimmt.

5 Ausblick

Die Einheitlichkeit des Raumbezuges innerhalb der EU ist gewährleistet durch die Einbettung der Diagnoseausgleichung SAPOS® in den EUREF-Rahmen, wobei bedingt durch unterschiedliche Lagerung in EUREF sowie die ge-

schilderte Lagerung in DREF Spannungen bis zu 1 cm auftreten können. Um die Qualität des mit der Diagnoseausgleichung SAPOS® realisierten Referenzrahmens auch in Zukunft gewährleisten zu können, wird derzeit von der AdV ein Konzept für ein regelmäßiges Monitoring der Koordinaten der SAPOS®-Referenzstationen erarbeitet. Dabei soll insbesondere die Forderung nach bundesweit homogenen Koordinaten berücksichtigt werden. Ein ausführlicher Abschlussbericht über die Diagnoseausgleichung SAPOS® findet sich in www.adv-online.de; die Arbeiten des BKG zur Diagnoseausgleichung SAPOS® werden in dem folgenden Bericht von Herrn Dr. Altiner dargestellt.

Dank

Die AdV bedankt sich bei den beiden Auswertestellen, dem BKG und der LGN, für die Durchführung der umfangreichen Berechnungen und für die intensiven Diskussionen sowie bei Herrn Feldmann-Westendorff für die Bereitstellung der Antennenkalibrierungen.

Literatur

- Angermann, D. and Drewes, H.: Status and future of ITRF combination. In: Geotechnologien Science Report No. 3, 12–16, Koordinierungsbüro Geotechnologien, Potsdam, 2003.
- Altamimi, Z., Sillard, P. and Boucher, C.: ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for earth science applications. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 107, No. B10, doi:10.1029/2001JB000561, 2002.
- Altiner, Y.: Diagnoseausgleichung SAPOS®: Integration von SAPOS®-Stationen in internationale Netze, zfv (in diesem Heft), 2005.
- Boucher, C., Altamimi, Z., Sillard, P. and Feissel-Vernier, M.: The ITRF2000. IERS Technical Note No. 31, Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, 2004.
- Campbell, J.: VLBI for geodesy and geodynamics. In: *The Role of VLBI in Astrophysics, Astrometry and Geodesy*, Mantovani, F. and A. Kus, pp. 359–381, Kluwer Academic Publishers, 2004.
- DeMets, C., Gordon, R.G., Argus, D.F. and Stein, S.: Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions: *Geophysical Research Letters*, v. 21, s. 2191–2194, 1994.
- Dick, W.R. and Richter, B.: IERS Annual Report 2003. Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main (in print), pp. 75–77, 91–105.
- Dieterle, B.: Lösungsverhalten der Nutzersysteme im SAPOS®-HEPS nach Einführung der Stationskoordinaten aus der Diagnoseausgleichung, Nachrichten aus dem öffentlichen Vermessungsdienst NRW, 2005.
- Lindtrot, W. (ed.): *Das Deutsche Referenznetz 1991, DREF91*. Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Band 9, Frankfurt am Main, 1999.
- McCarthy, D.D. and Petit, G. (eds.): *IERS Conventions (2003)*. IERS Technical Note No. 32, Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, 2004.
- Seeber, G.: *Satellitengeodäsie: Grundlagen, Methoden, Anwendungen*, pp. 12–29, de Gruyter, 1989.
- Seitz, K., Urakawa, M.J., Heck, B. und Krueger, C.: Zu jeder Zeit an jedem Ort – Studie zur Verfügbarkeit und Genauigkeit von GPS-Echtzeitmessungen im SAPOS®-Service HEPS, zfv Heft 1, 2005.

Anschrift der Autoren

Arbeitskreis Raumbezug der AdV
c/o Landesvermessungsamt Baden-Württemberg
– Abteilung Geodäsie in Karlsruhe –
Kapellenstraße 17, 76131 Karlsruhe
uwe.faulhaber@vermbw.bwl.de