

Diagnoseausgleichung SAPOS®: Integration von SAPOS®-Stationen in Internationale Netze

Yüksel Altiner

Zusammenfassung

In diesem Beitrag werden als Beispiel einer Integration des SAPOS®-Netzes in internationale Netze (hier: EUREF) die Resultate der Diagnoseausgleichung SAPOS® vorgestellt, die zur Bestimmung neuer amtlicher Koordinaten für die ca. 260 permanenten SAPOS®-Stationen in Deutschland dienen. Die Auswirkungen der eingeführten relativen und absoluten Kalibrierwerte für die Antennenphasenzentrumsvariationen auf die geschätzten Koordinaten werden untersucht. Die Notwendigkeit einer kontinuierlichen Überwachung der Koordinaten der SAPOS®-Stationen auf Qualität und Stabilität wird in einer Regressionsanalyse sowie in einer Zeitreihendarstellung diskutiert.

Summary

In the present contribution the results of the SAPOS® diagnostic adjustment are presented as an example of an integration of the SAPOS® network into international networks (in this case: EUREF), which serve the purpose of determining new official coordinates referring to the approx. 260 permanent SAPOS® stations situated in Germany. The effects of the introduced relative and absolute calibration values on the estimated coordinates with respect to the antenna phase centre variations are examined more closely. Further, the necessity of continuous monitoring of the coordinates of the SAPOS® stations for quality and stability is discussed both by means of a regression analysis and a representation of the time series.

1 Einleitung

Von 1995 an begann die Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) mit dem Aufbau eines DGPS-Dienstes (Differential-GPS), des Deutschen Nationalen Satellitenpositionierungsdienstes (SAPOS®), der mittlerweile aus ca. 260 über ganz Deutschland verteilten permanenten GNSS-Referenzstationen (Global Navigation Satellite System) besteht und der die Beobachtungskorrekturdaten in einem standardisierten und erzeugerunabhängigen RTCM-Format (Radio Technical Commission for Maritime Services) für präzise Positionierung und Navigation zu Lande, zu Wasser und in der Luft flächendeckend bereitstellt (Faulhaber 2003).

Die Methode des DGPS basiert auf dem Gedanken, dass die Messungen zu den Satelliten von nahe gelegenen Stationen langsam variierenden und korrelierten Fehlerkomponenten unterworfen sind. Bei der Schätzung der Unbekannten nach dem relativen Verfahren wird ein

großer Teil dieser Fehlerkomponenten aus den Messungen eliminiert und dadurch dem Nutzer eine enorme Genauigkeitssteigerung bei der Berechnung der Stationskoordinaten ermöglicht. Bei der Anwendung des DGPS wird vorausgesetzt, dass die Position der Referenzstation genau bekannt ist. Mit Hilfe bekannter Koordinaten schätzt die Referenzstation die Fehlerkomponenten aus Code- und Trägerphasenmessungen zu jedem sichtbaren Satelliten und erstellt Mess-Korrekturdaten, die mittels Kommunikationsgeräten an den Nutzer übertragen werden (Parkinson und Enge 1995, Çelik 2001). Die Genauigkeit der Nutzerposition hängt von der Erfassung der stationsabhängigen und entfernungsabhängigen Fehleranteile ab. Zu den stationsabhängigen Fehlern zählen die Phasenzentrumsvariationen der Antenne (PCV), die Mehrwegeausbreitung des empfangenen Signals (Multipath) und das Messrauschen. Der Einfluss der Mehrwegeausbreitung der empfangenen Signale kann durch die geeignete Auswahl des Standortes der Referenzstation vermieden und der Effekt der PCV durch die Kalibrierung der Antennen vermindert werden.

Um den Effekt der entfernungsabhängigen Fehlereinflüsse zu mindern, werden bei großen Entfernungen mehrere Referenzstationen in Betracht gezogen (Wide Area Differential GPS (WADGPS)). Dazu übermittelt der Nutzer seine Position der nächstgelegenen Referenzstation (Masterstation). Die Masterstation empfängt von den in der Umgebung liegenden weiteren Referenzstationen die gemessenen Code- und Trägerphasen und berechnet mittels Interpolation ein flächendeckendes Beobachtungsfehlermodell, das für eine beliebige Nutzerposition Beobachtungskorrekturen liefert. Bei dem Local Area Differential GPS (LADGPS) werden dagegen die Korrekturwerte nur aus einer Referenzstation berechnet. Mit steigender Anzahl der Referenzstationen bei WADGPS erhöht sich die zeitliche Dauer (Latency) von der Berechnung und Sendung der Korrekturwerte durch die Masterstation bis zum Empfang und der Bearbeitung bei den Nutzern zu Ungunsten der Echtzeit. Die gesendeten Korrekturwerte gelten dagegen für einen großen Empfangsbereich.

2 Koordinatensysteme

Ein Referenzsystem (reference system) definiert in theoretischer Form das Koordinatensystem (Bezugssystem), während ein Referenzrahmen (reference frame) die Realisierung dieses Systems auf der Grundlage eines Satzes aus Koordinaten bestimmter Stationen bedeutet.

Das Internationale Terrestrische Referenzsystem (ITRS) ist ein globales, rechts ausgerichtetes, erdgebundenes orthogonales Koordinatensystem, dessen Kriterien bei McCharty (1996) dargestellt und in Wien bei der 20. Vollversammlung der IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) im Jahre 1991 als 2. Resolution angenommen wurden (<http://lareg.ensg.ign.fr/ITRF/>). Jeder ITRF (International Terrestrial Reference Frame) ist die Realisierung des ITRS, der entweder direkt oder nach einer Transformation der Koordinaten bestimmt wurde (Heitz 1988, Boucher und Altamimi 2001). Der Nachteil globaler ITRF-Lösungen ist die Änderung der Stationskoordinaten im Laufe der Zeit aufgrund der Plattenbewegungen. Um diesen Nachteil bei den geodätischen Anwendungen zu beseitigen, wurde das ETRS89 für die Fläche Europas aus dem ITRS abgeleitet. Das ETRS89 fällt in der Epoche 1989.0 mit dem ITRS zusammen und ist auf dem festen Teil der eurasischen Platte fixiert. Da das ETRS89 mit der eurasischen Platte rotiert, wird der Einfluss der Plattenbewegungen auf die Stationskoordinaten weitgehend eliminiert und eine Grundlage für ein in der Praxis anwendbares Referenzsystem geschaffen, wobei innere Bewegungen der Platten außer Acht gelassen werden (<http://lareg.ensg.ign.fr>). Das Bezugsellipsoid für die geografischen ellipsoidischen Koordinaten beim ETRS89 ist das Geodätische Referenzsystem 1980 (GRS80). Für jeden Rahmen des ITRF_{yy} kann im ETRS89 ein entsprechender Rahmen berechnet und als ETRF_{yy} bezeichnet werden. Die Indizes (_{yy}) hinter der Bezeichnung ITRF oder ETRF, z. B. ITRF2000 und ETRF89, drücken das Jahr der für die Realisierung des Referenzrahmens verwendeten Datensätze aus. Werden nicht nur die Koordinaten der Stationen in einer bestimmten Realisierungsepoche, sondern auch deren Geschwindigkeiten berücksichtigt, spricht man von einem dynamischen Referenzsystem. Die Realisierungen des ITRS gehören zu den dynamischen Referenzsystemen. Die Realisierung des ITRF2000 ist eine Verbesserung des ITRF97, unter anderem durch die größere Anzahl der Messpunkte (Datensätze) und bessere Bahndaten der Satelliten.

3 Berechnung aktueller Koordinaten für SAPOS®-Stationen

Für die Festlegung und Änderung der amtlichen Koordinaten der Referenzstationen sind die Vermessungsverwaltungen der 16 Länder der Bundesrepublik Deutschland zuständig. Die Bestimmung amtlicher Koordinaten der SAPOS®-Stationen fand von 1995 bis heute unter Verwendung verschiedener ITRF-Realisierungen und Auswahl unterschiedlicher geometrischer Konfiguration der Datumsunkte statt. Dies erschwerte die Einhaltung der Einheitlichkeit der Koordinaten der Referenzstationen, deren unsichere Bestimmung an den Grenzgebieten der Bundesländer besonders zu spüren war. Die Einschaltung

neuer Referenzstationen in das Netz eines Bundeslandes geschah in der Regel über eine lange Zeitspanne durch Hinzunahme weiterer Stationen zu Lasten innerer Homogenität des Netzes, wodurch auch die geschätzten amtlichen Koordinaten der Referenzstationen unterschiedliche Genauigkeiten aufwiesen. Als Folge zeigten die amtlichen Koordinaten der SAPOS®-Stationen, mit deren Hilfe Korrekturwerte aus Code- und Trägerphasenbeobachtungen berechnet wurden, Diskrepanzen von 2 bis 5 cm in der Lage und Höhe zu aktuell berechneten Koordinaten im ETRS89. Somit wurde eine zuverlässige Echtzeitpositionierung mit SAPOS® im cm-Bereich in Frage gestellt.

Zur Beseitigung des o. g. Nachteils hat die AdV das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) beauftragt, eine Diagnoseausgleichung aller SAPOS®-Stationen in Deutschland mit den Daten der 42. Kalenderwoche 2002 (GPS-Woche 1188: 13.10.–19.10.2002) durchzuführen und einen homogenen Satz von spannungsfreien und genauen Koordinaten für die Echtzeitpositionierung mit SAPOS® im ETRS89 abzuleiten. Die neuen Koordinaten sollen durch ihre Berücksichtigung in der bei den Referenzstationen benutzten Software die Präzision der aus Code- und Trägerphasen-Beobachtungen ermittelten Korrekturwerte verbessern.

3.1 Antennenproblematik

Das Phasenzentrum einer Antenne (eigentlicher Empfangspunkt), das in Abhängigkeit von Azimut und Elevation der Einfallsrichtung des Satellitensignals variiert, wird grundsätzlich durch den so genannten Antennen-Offset für die Lage und Höhe und die Phasenzentrumsvariationen erfasst, wobei der Antennen-Offset den mittleren Einfluss der Phasenzentrumsvariationen wiedergibt (Wübbena et al. 1997). Der mittlere Offset und die Variationen des Phasenzentrums sind einheitlich zu behandeln. Bei der Änderung des mittleren Offsets (Höhenänderung) müssen die Phasenzentrumsvariationen entsprechend an den Offset angepasst werden.

Zur Kalibrierung des Phasenzentrums von GNSS-Antennen werden drei verschiedene Methoden angewendet: Kammermessungen, relative Feldmessungen und absolute Feldmessungen. Bei den Kammermessungen wird in einem mikrowellentoten Raum (anechoic chamber) mit künstlichen Mikrowellensignalen gearbeitet. Aufgrund des hohen Aufwandes bei den Kammermessungen haben sich in der Praxis die Methoden der relativen und absoluten Feldkalibrierungen durchgesetzt.

Die Methode der relativen Feldkalibrierung der Antennen beschreibt die Phasenzentrumsvariationen in Bezug auf eine Referenzantenne (beim International GPS Service (IGS) die »Dorne Margolin T«-Antenne (AOAD/M_T)), wobei die Phasenzentrumsvariation der Referenzantenne auf »Null« gesetzt wird (Mader 1999). Bei der absoluten Feldkalibrierung werden die Phasenzentrumsvariationen der Antennen mittels eines Roboters, der sich in jede

Richtung dreht und kippt, unabhängig von einer Referenzantenne in Abhängigkeit von Elevation und Azimut vollständig ermittelt, wobei auch der Effekt der Mehrwegeausbreitung weitgehend eliminiert wird (Wübbena et al. 1997). Während eine Mischung absoluter und relativer Kalibrierwerte der Antennen bei der Datenverarbeitung aufgrund unterschiedlicher Ermittlungsmethoden zu einer Verzerrung der inneren Geometrie des Netzes führt, können die absoluten Kalibrierwerte durch eine Umrechnung in die relativen Kalibrierwerte gewandelt und bei einer gemeinsamen Auswertung bearbeitet werden.

Bei der Einführung der Werte individueller Absolutkalibrierung der Antennen in die Berechnung müssen sowohl die Kalibrierwerte der Bodenantennen als auch die Kalibrierwerte der Satellitenantennen bekannt sein. Die entsprechenden Daten der Satellitenantennen stehen allerdings noch nicht vollständig zur Verfügung (es ist nur ein Antennenoffset pro Satellitentyp bekannt). Aus diesem Grund scheidet die Einführung der absoluten Kalibrierwerte in die Berechnung derzeit aus. Die Nichtberücksichtigung der Kalibrierwerte bei den Satellitenantennen führt in globalen Netzen zu einem Maßstabsfaktor, dessen Betrag gegenüber der Lösung mit relativen Kalibrierwerten im Kapitel 5 (Ermittlung des Maßstabsfaktors) diskutiert wird.

Eine andere Problematik besteht darin, dass die relativen Korrekturwerte der Antennen, die für die Auswertung von den Bundesländern bereitgestellt wurden, aus unterschiedlichen Feldverfahren stammen und u. U. systematische Differenzen aufzeigen. Die Verfahren sind (Wübbena 1997, Campbell et al. 1999, Bilajbegovic et al. 1999, Wanninger 2002):

- Individuelle Kalibrierwerte der Antennen, die an den Geodätischen Instituten der TU Dresden und der Universität Bonn sowie beim Landesvermessungsamt NRW nach dem relativen Feldverfahren bestimmt wurden,
- individuelle relative Kalibrierungen, die aus der absoluten Echtzeit-Feldkalibrierung mittels Roboter (Geo++ GmbH und Institut für Erdmessung der Universität Hannover) umgerechnet wurden,
- relative Kalibrierwerte eines bestimmten Antennentyps nach dem IGS-Standard für bislang nicht individuell kalibrierte Antennen.

Eine alternative Vorgehensweise für die Festlegung der Antennenkorrekturwerte ist die Auswahl aller Kalibrierwerte nach demselben Verfahren. In diesem Fall werden die individuellen relativen Kalibrierwerte der Antennen für die Bundesländer Brandenburg, Nordrhein-Westfalen und Sachsen mit den Typwerten der Antennen ersetzt, die aus den absoluten Korrekturwerten des Roboterverfahrens (Geo++) umgerechnet wurden. Diese Problematik wurde zugunsten des ersten oben beschriebenen Verfahrens entschieden, wobei gewisse Nachteile wegen fehlender Einheitlichkeit der Kalibrierwerte in Kauf genommen wurden, um die Individualität zu bewahren. Damit wurden in die Diagnoseausgleichung die relativen ele-

vationsabhängigen Kalibrierwerte der Antennen für die SAPOS®-Referenzstationen eingeführt. Hier bilden die IGS-Stationen sowie die Referenzstationen im Bundesland Sachsen-Anhalt eine Ausnahme. Dort wurden anstelle der individuellen Werte die Typwerte der Antennen aus der IGS-Tabelle übernommen, weil die individuellen Werte nicht vorhanden waren (erhältlich über: http://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/station/general/rcvr_ant.tab).

3.2 Diagnoseausgleichung SAPOS®

Die Verarbeitung der GPS-Daten wurde beim BKG mit der Version 4.3 der GPS-Auswertungssoftware des Astronomischen Instituts der Universität Bern durchgeführt (Hugentobler et al. 2001). In die Berechnungen wurden die Messdaten von insgesamt 259 SAPOS®-Stationen einbezogen, wobei zusätzliche acht IGS-Stationen (BOR1, BRUS, GRAZ, KOSG, ONSA, POTS, WTZR und ZIMM) zur Definition des geodätischen Datums und damit zur Einbindung des SAPOS®-Netzes in das EUREF-Netz (European Reference Frame) dienten. Um die Positionierungsgenauigkeit, die durch den SAPOS®-Dienst angeboten wird, auch an den Grenzgebieten zu den Nachbarstaaten zu gewähren, wurden neun zusätzliche Stationen aus den Nachbarländern (Niederlande, Frankreich und die Schweiz) mitbestimmt. Aufgrund der großen Datenmenge wurde das gesamte Netz in zwei Teilnetze aufgeteilt (Teilnetz-Nord und Teilnetz-Süd), wobei beachtet wurde, dass sich alle Stationen eines Bundeslandes im selben Teilnetz befanden. Um die Korrelationen zwischen den Koordinaten der Stationen in beiden Teilnetzen zu bestimmen, wurden in jedem Teilnetz zehn Stationen aus dem jeweils anderen Teilnetz eingeführt (Abb. 1). Somit standen neben den acht Datumpunkten zusätzlich 20 identische Stationen in beiden Teilnetzen zur Verfügung.

Die Auswertung fand unter Verwendung der EUREF-Kriterien statt, die bei Boucher und Altamimi (2001) beschrieben werden. Zusätzlich zu diesen Kriterien wurden die ozeanischen Auflasteffekte für die eingeführten Datumpunkte berücksichtigt. Die endgültigen Koordinaten der SAPOS®-Stationen wurden mit einer hohen Gewichtung der Koordinaten der IGS-Stationen (0.1 mm a priori Standardabweichung) in einer ionosphärenfreien Lösung durch die Kombination der Tageslösungen beider Teilnetze im ITRF2000 (Epoche 2002.79) berechnet, wobei die Troposphärenparameter nach der Methode von Saastamoinen alle zwei Stunden ohne elevationsabhängige Gewichtung der Beobachtungen geschätzt wurden (Relativ-Lösung I). Zur Kontrolle der Höhen wurde die Auswertung der Daten für die Bestimmung der Troposphärenparameter durch die Einführung der Dry-Niell-Mapping-Funktion und mit elevationsabhängiger Gewichtung der Beobachtungen wiederholt (Saastamoinen 1972, Niell 1996). Eine elevationsabhängige Gewichtung der Beobachtungen kann in bestimmten Fällen zu einem Unterschied bis zu einigen cm in der Höhe führen. Hier werden

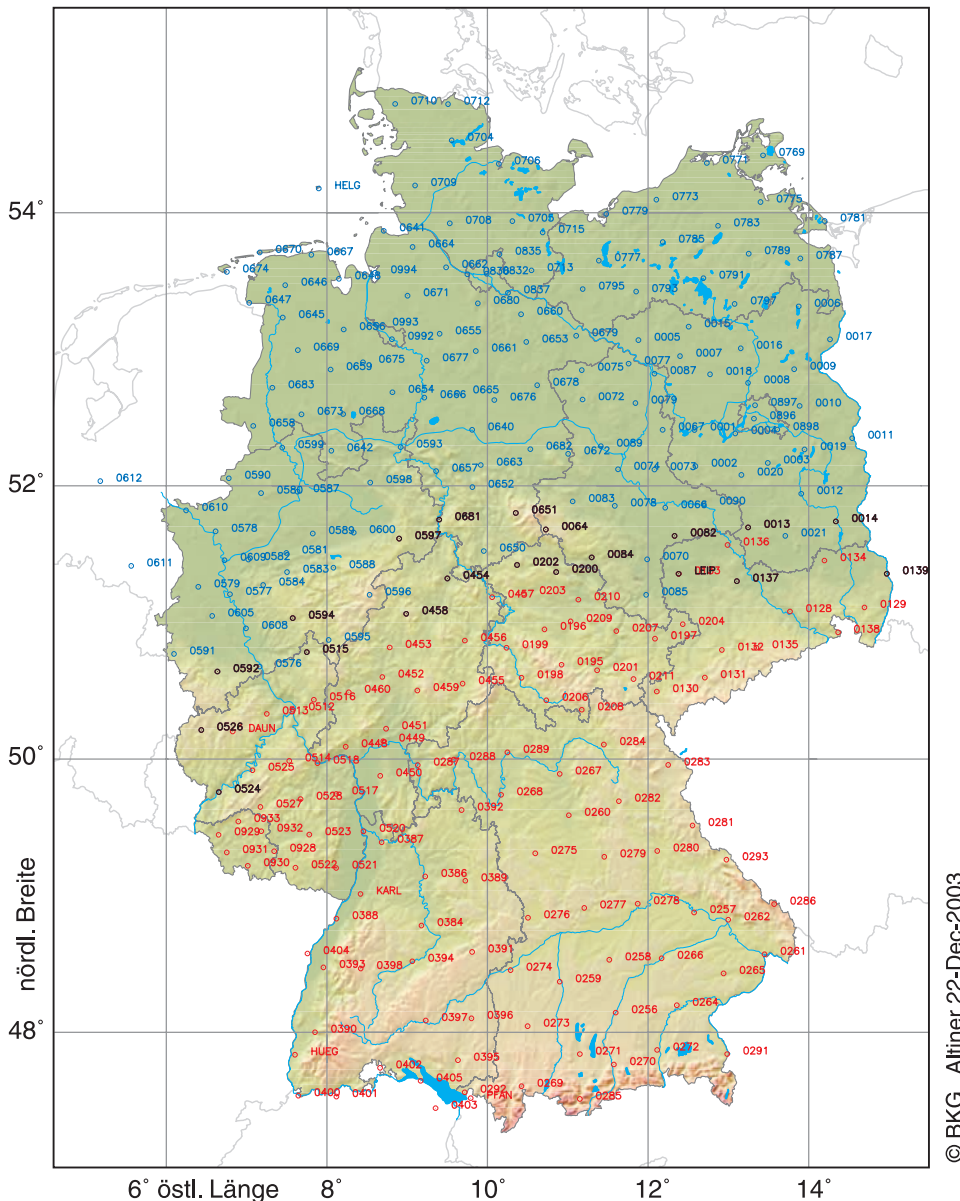


Abb. 1: Die Punktnummern in Blau geben die Stationen im Teilnetz-Nord an, die in Rot die Stationen im Teilnetz-Süd. Die Punktnummern in Schwarz sind die identischen Stationen in den beiden Teilnetzen

© BKG Altiner 22-Dec-2003

nur die Resultate der ersten Lösung (Relativ-Lösung I) in Betracht gezogen. Die Stufen der Auswertung der Daten wurden in Abb. 2 zusammengefasst.

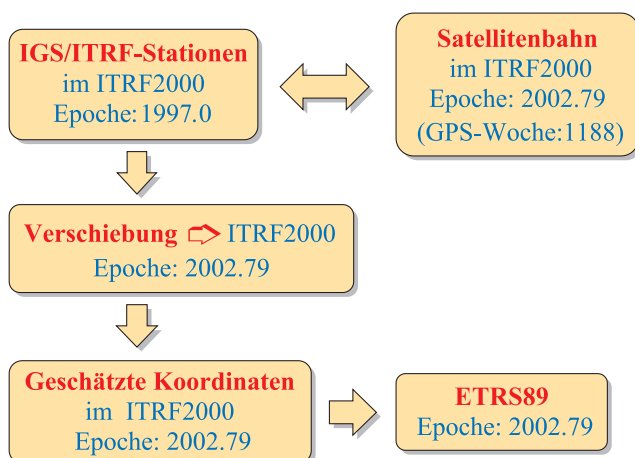


Abb. 2: Stufen der Datenauswertung

3.3 Genauigkeitskriterien

Die RMS der geschätzten Koordinaten bei der kombinierten Lösung beider Teilnetze ist entsprechend der Anforderung des DGPS-Dienstes der SAPOS®-Stationen deutlich geringer als 1 cm für alle Koordinaten (Abb. 3). Die Koordinatendifferenzen identischer Stationen in beiden Teilnetzen liegen bei ca. 1 mm für die Lage und bei ca. 2 bis 8 mm für die Höhe.

3.4 Transformation ins ETRS89

Die amtlichen Koordinaten der SAPOS®-Stationen beziehen sich auf das ETRS89. Daher ist für die Überprüfung der Qualität der amtlichen Koordinaten eine Koordinatentransformation ins ETRS89 notwendig.

Zur Transformation der geschätzten Koordinaten der SAPOS®-Stationen vom ITRF2000 in das ETRS89 wurde

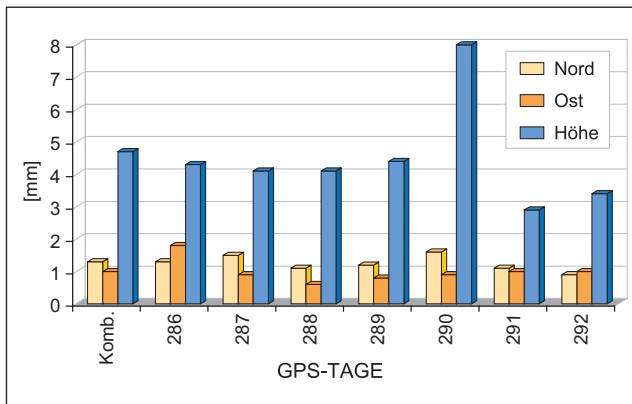


Abb. 3: RMS der Kombinations- und Tageslösungen

folgende Formel angewandt (Seeger und Altiner 1999, Boucher und Altamimi 2001):

$$X_{i,E}(t_c) = X_{i,yy}(t_c) + T_{i,yy} + R_{ij,yy} X_{j,yy}(t_c) (t_c - 1989.0) \quad 3.1$$

mit $i, j = 1, 2, 3$ und

$$R_{ij,yy} = \begin{bmatrix} 0 & -R_{3,yy} & R_{2,yy} \\ R_{3,yy} & 0 & -R_{1,yy} \\ -R_{2,yy} & R_{1,yy} & 0 \end{bmatrix}, \quad 3.2$$

wobei $X_{i,E}(t_c)$ und $X_{i,yy}(t_c)$ die Koordinaten im ETRS89 bzw. im ITRF_{yy} für die Realisierungsepoche der Messungen (t_c) beschreiben. $T_{i,yy}$ und $R_{ij,yy}$ geben die Verschiebungs- bzw. Rotationsparameter zwischen dem ITRF_{yy} und ETRS89 an. Die Verschiebungs- und Rotationsparameter, die in 3.1 und 3.2 berücksichtigt wurden, sind in der Tab. 1 aufgelistet (Boucher und Altamimi 2001).

Für die Verschiebung der Koordinaten im ETRS89 aus der Realisierungsepoche t_c zur Null-Epoche (1989.0) werden die Eigengeschwindigkeiten der Beobachtungsstationen im ETRS89 benötigt:

$$X_{i,E}(1989.0) = X_{i,E}(t_c) v_{i,E}(1989.0 - t_c) \quad 3.3$$

mit $i = 1, 2$ und 3 ,

wobei der Geschwindigkeitsvektor $v_{i,E}$ die Eigengeschwindigkeiten der Stationen im ETRS89 ausdrückt. Da die Eigengeschwindigkeiten der SAPOS®-Stationen im ETRS89 nicht bekannt sind, können sie nicht in die Null-Epoche transformiert werden. Somit werden die Koordinaten der Referenzstationen mit der Annahme ($v_{i,E} = 0$) nur in der Realisierungsepoche der Messungen t_c (2002.79) berechnet.

Tab. 1: Werte für die Verschiebungs- bzw. Rotationsparameter aus der Koordinatentransformation vom ITRF2000 ins ETRS89

Verschiebung cm/Jahr			Rotation mas/Jahr		
$T_{1,yy}$	$T_{2,yy}$	$T_{3,yy}$	$R_{1,yy}$	$R_{2,yy}$	$R_{3,yy}$
5.4	5.1	-4.8	0.081	0.490	-0.792

3.5 Vergleich der Koordinaten

Die Resultate der Koordinatenvergleiche im ETRS89 wurden aus Gründen der Klarheit als horizontale und vertikale Koordinatendifferenzen separat angezeigt (Abb. 4 bzw. Abb. 5).

Die Koordinatendifferenzen im ETRS89 variieren von wenigen mm bis 4 cm für die Lage und mit Ausnahme der Stationen Kiel (69 mm) und Wissen (72 mm) von 0.2 bis 5 cm für die Höhe. Aufgrund unterschiedlicher Größe und Vorzeichen der Koordinatendifferenzen in jedem Bundesland ist kein systematischer Trend festzustellen. Dies beruht darauf, dass die Koordinaten der SAPOS®-Stationen in den Bundesländern abhängig vom Zeitpunkt der GPS-Messungen unter Benutzung verschiedener ITRF_{yy}-Realisierungen mit unterschiedlichen Genauigkeiten und durch Festlegung unterschiedlicher geometrischer Konfiguration der Datumsunkte über einen langen Zeitraum berechnet wurden. Dies störte die Homogenität der GPS-Netze der Bundesländer sowie die Einheitlichkeit der Koordinatengenauigkeit der Referenzstationen. Aus diesem Grunde sind die amtlichen Koordinaten bezüglich ihrer Genauigkeit nicht miteinander vergleichbar und die in Abb. 4 und Abb. 5 angegebenen Koordinatendifferenzen geben nicht die Qualität der Koordinaten in jedem Bundesland wieder.

4 Überwachung der Koordinaten

Abgesehen von den täglichen, saisonalen und jährlichen Schwankungen aufgrund der Gravitationseffekte der Sonne und des Mondes sowie atmosphärischer, hydrologischer und ozeanischer Strömungseinflüsse, sind die Positionen der Referenzstationen den lokalen und globalen Erdkrustenbewegungen und den Deformationen der Gebäude, an denen die Antennen befestigt sind, unterworfen. Während sich globale Erdkrustenbewegungen im Bereich Deutschlands erst langfristig bemerkbar machen, können Gebäude- und lokale Erdkrustendeformationen, die sich aus inneren Deformationen der Platten sowie aus den lokalen Rutschungen und Hebungen summieren, kurz und mittelfristig zu Bewegungen des Antennenstandpunktes bis zu wenigen cm führen. Aufgrund des methodischen Ansatzes des DGPS geht die Änderung der Antennenposition der Referenzstationen zwischen dem undeformierten und dem deformierten Zustand voll auf die zu bestimmenden Koordinaten einer neuen Station im Netz über. Dies kann die Homogenität des Netzes verzerren und langfristig gesehen die Einhaltung der vom SAPOS®-Dienst garantierten Genauigkeit im cm-Bereich erschweren. Zur Kontrolle dieser Störfaktoren ist die Überwachung der Koordinaten der Referenzstationen im Hinblick auf die Genauigkeit und Stabilität notwendig.

Seit 1999 liefern die Vermessungsverwaltungen der Bundesrepublik Deutschland GPS-Daten ausgewählter

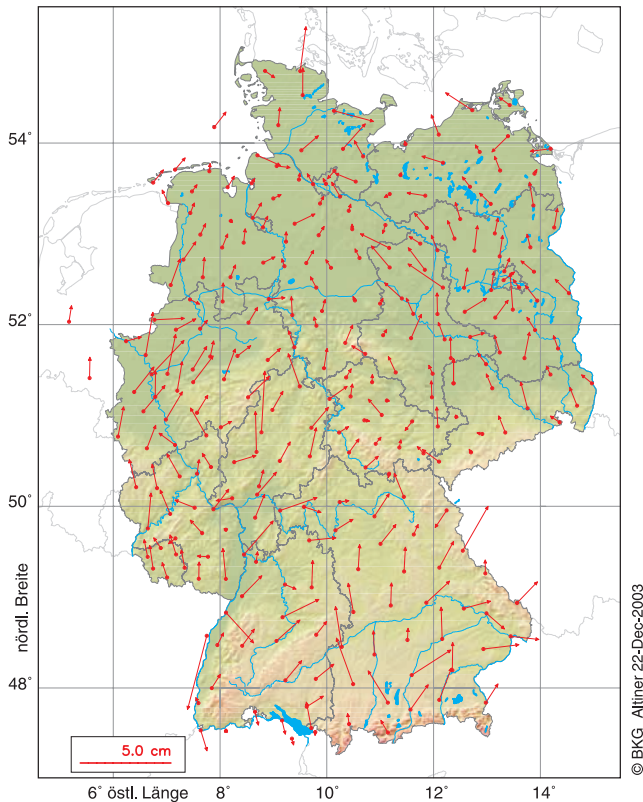


Abb. 4: Koordinatendifferenzen für die Lage zwischen den amtlichen und den geschätzten Koordinaten im ETRS89

Wochen im RINEX-Format an das BKG zur vierteljährlichen Überprüfung der Qualität und Stabilität der amtlichen Koordinaten der Referenzstationen. Mit Hilfe einer linearen Regressionsanalyse können saisonale und jährliche Schwankungen der Koordinaten einer Station untersucht werden (Niemeier 2002):

$$y_i = a + bx_i + e_i, \quad 4.1$$

wobei y_i und x_i Koordinatendifferenzen bzw. die Zeitpunkte der Messungen, a und b die Regressionsparameter sowie e_i die Residuen ausdrücken. Nach der Methode der kleinsten Quadrate wird die Quadratsumme der Residuen (Q) in Abhängigkeit von den Parametern a und b wie folgt gegeben:

$$Q(x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_n, a, b) = \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2 \quad 4.2$$

Die Ableitungen der Formel 4.2 nach den Regressionsparametern a und b ergeben sich für

$$\frac{\partial}{\partial a} Q = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i) \quad 4.3$$

und für

$$\frac{\partial}{\partial b} Q = -2 \sum_{i=1}^n x_i (y_i - a - bx_i). \quad 4.4$$

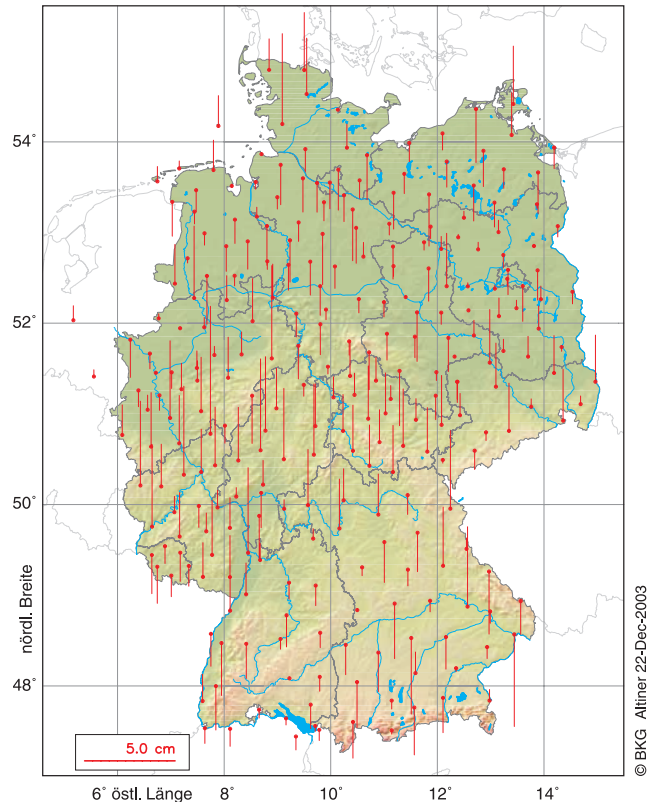


Abb. 5: Koordinatendifferenzen für die Höhe zwischen den amtlichen und den geschätzten Koordinaten im ETRS89

Für die Minimierung von 4.3 und 4.4 wird gefordert

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial a} Q &= \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i) \\ &= n \bar{y} - n a - n b \bar{x} = 0; \end{aligned} \quad 4.5$$

$$a = \bar{y} - b \bar{x}$$

und

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial b} Q &= \sum_{i=1}^n (x_i y_i - ax_i - bx_i^2) \\ &= n \bar{x} \bar{y} - n a \bar{x} - n b \bar{x}^2 = 0; \end{aligned} \quad 4.6$$

$$b = \frac{\text{Cov}(xy)}{\text{Var}(x)}$$

mit

$$\text{Cov}(xy) = \overline{xy} - \bar{x} \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\overline{xy} - x_i y_i)^2$$

bzw.

$$\text{Var}(x) = (\overline{x^2} - \bar{x}^2) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2. \quad 4.7$$

Mit den aus 4.2-4.7 geschätzten Regressionsparametern \hat{a} und \hat{b} können der lineare Trend

$$\hat{y}_i = \hat{a} + \hat{b}x_i \quad 4.8$$

sowie die Residuen

$$\hat{e}_i = y_i - \hat{y}_i \quad 4.9$$

berechnet werden.

Hierzu werden als Beispiel die erzielten Koordinatendifferenzen gegenüber den alten amtlichen Koordinaten für die Station 0202 (Worbis in Thüringen) mit den meisten aller Quartalsauswertungen (17 Quartalsauswertungen vom 3.1.1999 bis zum 13.7.2003) in Abb. 6 illustriert (seit 1.7.2003 führt das Bundesland Thüringen die Resultate der Diagnoseausgleichung SAPOS® von der GPS-Woche 1188 als neue amtliche Koordinaten für seine Referenzstationen). Die Koordinatendifferenzen wurden nach den Formeln 4.1 bis 4.9 in einer linearen Regressionsanalyse verarbeitet. Der Bezugsrahmen der geschätzten Koordinaten der Station 0202 ist bis zur GPS-Woche 1136 (14.10.–20.10.2001) ITRF97 und ab der GPS-Woche 1143 (2.12.–8.12.2001) ITRF2000.

Die Variation der Lage-Komponenten beträgt ± 5 mm, was im Genauigkeitsbereich der berechneten Koordinaten liegt und damit keine weitere Untersuchung im Sinne eines möglichen systematischen Effektes auf die Koordinaten benötigt. Dagegen zeigen die Höhen einen Koordinatenunterschied bis zu 3 cm, der ab der GPS-Woche 1136 auftritt und mit einem positiven Vorzeichen auf den ersten Blick einen systematischen Effekt andeutet. Unter der Annahme, dass die Genauigkeit der geschätzten Höhenkoordinaten bei ca. 1 cm liegt, deutet ein Höhenunterschied von 3 cm auf eine signifikante Bewegung hin (Faustregel: Nach der Normalverteilung mit 5% Signifikanzniveau sind die Bewegungen signifikant, wenn die Koordinatendifferenz das 2,5-fache der eigenen Genauigkeit übersteigt). Da auch bei den anderen Referenzstationen im Bundesland Thüringen ähnliche Zyklen in der Höhe beobachtet wurden, scheiden lokale Erdkrustenbewegungen sowie Deformationen an Gebäuden, an denen die Antennen angebracht waren, als Grund für die Höhenänderungen aus. Ab der GPS-Woche 1136 wurden für die Stationen in Thüringen die individuellen Kalibrierwerte der Antennen anstelle der Typkalibrierungen in die Auswertung eingeführt. Mit der Annahme, dass der Einfluss des Überganges vom ITRF97 auf den ITRF2000 ab der GPS-Woche 1143 auf die Koordinaten vernachlässigbar klein ist (wenige mm in positiver Richtung), ist der Sprung der Höhendifferenzen ab der GPS-Woche 1136

mit den geänderten Antennenkalibrierwerten zu begründen. Diese Aussage wird auch dadurch verstärkt, dass die Höhenunterschiede der Koordinaten für den Zeitraum von der GPS-Woche 1136 bis zur GPS-Woche 1227 nur um 1,5 cm differieren.

Abgesehen von einer Regressionsanalyse, die bei signifikanten Änderungen der Koordinaten der Referenzstationen durchgeführt wird, geschieht die Überprüfung der Stabilität einzelner Stationen mittels einer Zeitreihendarstellung der Koordinaten der SAPOS®-Stationen im ETRS89 für alle verfügbaren Messepochen, wobei die Resultate der Quartalsauswertung mit den amtlichen Koordinaten der SAPOS®-Stationen verglichen werden. Die Resultate der Zeitreihenanalyse werden für alle SAPOS®-Stationen auf der Web-Seite des BKG (<http://www.bkg.bund.de>) den Landesvermessungsämtern zur Verfügung gestellt. Die Schwankungen der neuen amtlichen Koordinaten der Station 0202 (Worbis) im Bundesland Thüringen sind für die Lage und Höhenkomponente ab der GPS-Woche 1188 bis heute im Bereich der Genauigkeit der GPS-Methode (5 mm für die Lage und 10 mm für die Höhe).

5 Ermittlung des Maßstabsfaktors

Die Einführung der individuellen Korrekturwerte der Antennen in die Auswertung bildet einen der Schwerpunkte der DGPS-Problematik. Diese so genannte Antennenproblematik ist noch nicht in vollem Umfang gelöst. In Zukunft, wenn die Korrekturwerte für die Satellitenantennen vollständig vorliegen, werden die nach dem absoluten Verfahren gewonnenen Korrekturwerte der Bodenantennen mehr Gewicht erhalten, weil diese unabhängig von einer Referenzantenne sind und die Eigenschaft der Antennen in Abhängigkeit von Elevation und Azimut vollständig wiedergeben. Die Bestimmung der vollständigen Korrekturwerte der Satellitenantennen wird auch in naher Zukunft als ein schwieriges Problem weiter bestehen. Aus diesem Grund ist die Ermittlung eines Maß-

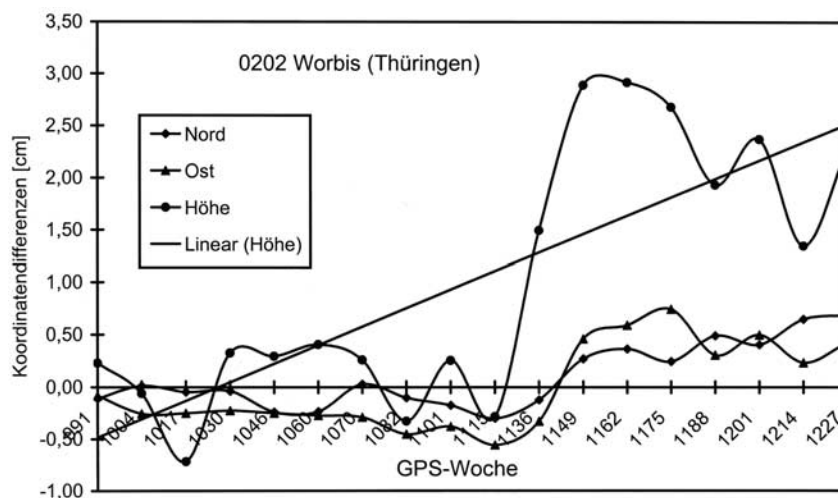


Abb. 6: Der Sprung der Höhenkoordinaten ab der GPS-Woche 1136 ist auf die Einführung der individuellen Korrekturwerte der Antennen zurückzuführen.

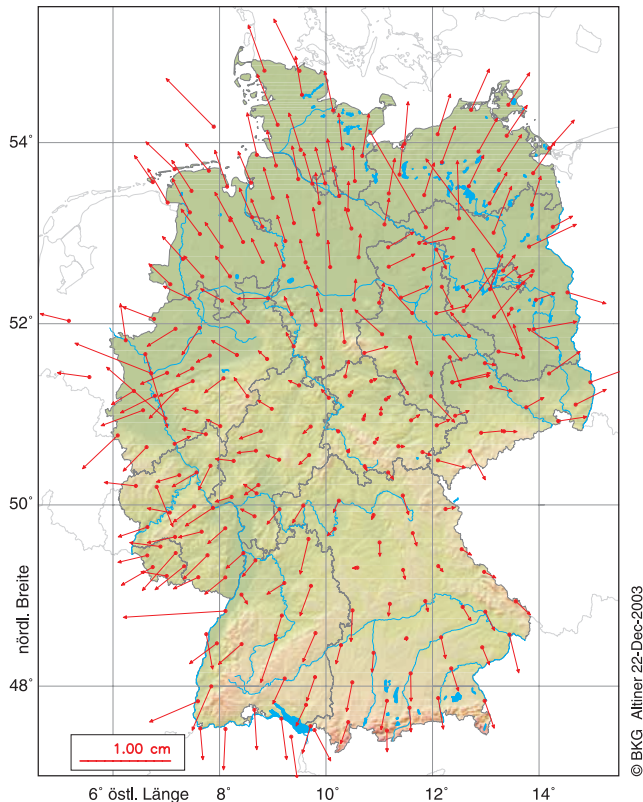


Abb. 7: Vergleich der Lage-Koordinaten, berechnet mit den relativen bzw. absoluten Kalibrierwerten für die Antennen

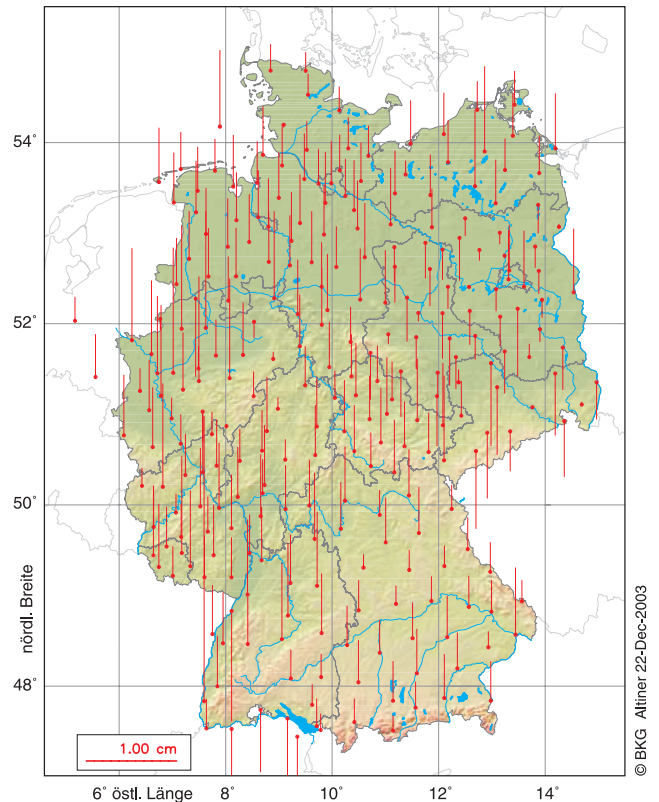


Abb. 8: Höhendifferenzen, berechnet mit den relativen bzw. absoluten Kalibrierwerten für die Antennen

stabsfaktors zwischen der Verwendung der absoluten und der relativen Korrekturwerte der Antennen für praktische Anwendungen im Hinblick auf die so genannte Nullantenne (quasi fehlerfreie GNSS-Antenne) von großer Bedeutung. Zu diesem Zweck wurden die gleichen Daten der GPS-Woche 1188 unter Berücksichtigung der absoluten Korrekturwerte der Bodenantennen (keine Korrekturen für die Satellitenantennen) nach der gleichen Strategie, wie sie im Kapitel 3.2 beschrieben wurde, erneut ausgewertet (Absolut-Lösung I) und die erzielten Koordinatendifferenzen zur Lösung der Diagnoseausgleichung mit den relativen Korrekturwerten der Antennen (Relativ-Lösung I) in Abb. 7 für die Lagekomponente bzw. in Abb. 8 für die Höhen illustriert [(Absolut-Lösung I) minus (Relativ-Lösung I)]. Nach einer Helmert-Transformation der abgeleiteten Stationskoordinaten beider Fälle wurde festgestellt, dass die Berücksichtigung der absoluten Korrekturwerte der Bodenantennen eine Ausdehnung des Netzes (d. h. die Strecken werden länger) veranlasst. Der ermittelte Maßstabsfaktor beträgt 11.4 ppb.

Die Bildung aller Streckenkombinationen im SAPOS®-Netz von 268 Referenzstationen ergibt insgesamt 35778 einzelne Raumstrecken, wobei 8.7% der Raumstrecken ein negatives Vorzeichen aufweisen. Nach Elimination der Raumstrecken mit negativen Vorzeichen aus der Berechnung ergeben die verbleibenden Raumstrecken als Mittelwert einen Maßstabsfaktor von 15 ppb, der mit der Angabe in Rothacher (2001) übereinstimmt.

Wenn den Koordinaten der Datumsunkte bei der Auswertung mit den absoluten Kalibrierwerten der An-

tennen durch Festhalten ihrer Koordinaten die gleichen Werte zugewiesen werden wie bei der Auswertung mit den relativen Kalibrierwerten der Antennen (Absolut-Lösung II), geben die Koordinatendifferenzen zwischen beiden Lösungen den Einfluss des so genannten Maßstabsfaktors für die Lage-Koordinaten (Abb. 9) bzw. für die Höhe (Abb. 10) anschaulich wieder [(Absolut-Lösung I) minus (Absolut-Lösung II)].

6 Schlussfolgerung

Eine schnelle und präzise Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten ist das Ziel aller DGPS-Anwendungen im Bereich der Echtzeit-Positionierung. Dies erfordert eine genaue Bestimmung sowie die Überwachung der Koordinaten der Referenzstationen. Die ermittelten Abweichungen bis zu 5 cm für die Lage und Höhe zwischen den aktuellen und den amtlichen Koordinaten der Referenzstationen erschweren die Einhaltung der angeforderten Genauigkeit bei den präzisen geodätischen Anwendungen. Daher wurden die Resultate der Diagnoseausgleichung von allen Bundesländer als neue amtliche Koordinaten der Referenzstationen eingeführt.

Zum Schluss sei hier betont, dass sich die berechneten Koordinaten der Referenzstationen im ETRS89 auf die jeweilige Messepoche (t_c) beziehen. Aufgrund eventueller Eigenbewegungen der Referenzstationen können sich die Koordinaten im Laufe der Zeit stark ändern. Dies er-

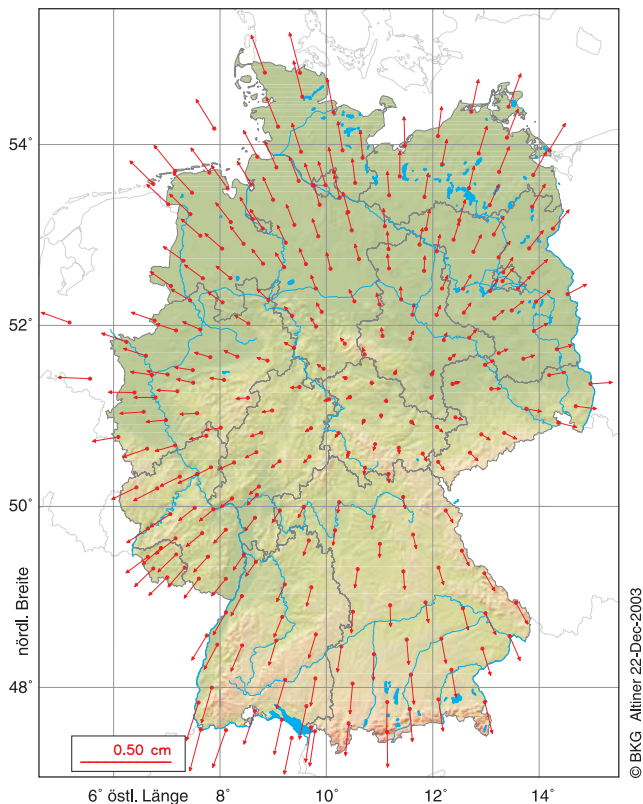


Abb. 9: Der Einfluss des Maßstabsfaktors für die Lage-Koordinaten

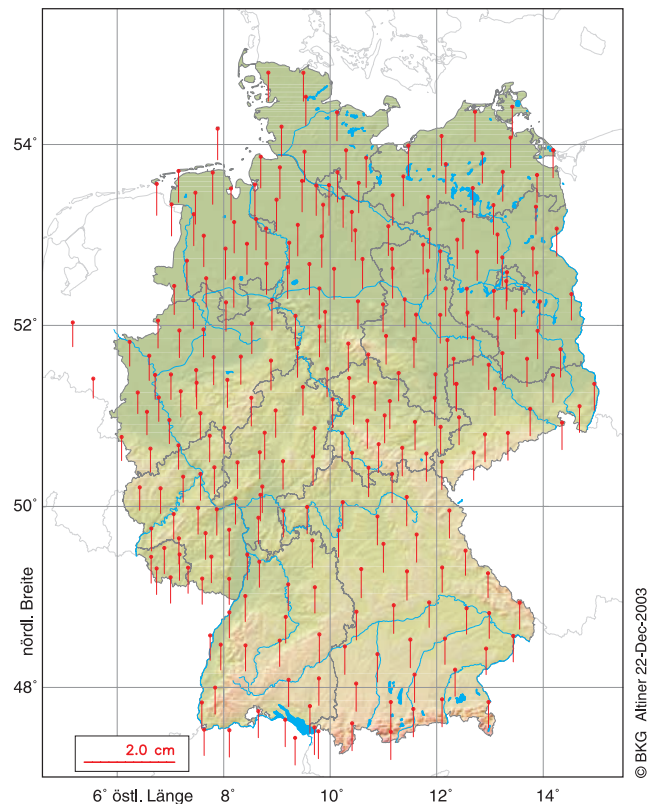


Abb. 10: Der Einfluss des Maßstabsfaktors für die Höhe

schwert deren Verwendung für geodynamische Aufgaben. Für eine Deformationsanalyse aus längeren Zeitreihen muss dieser Anteil aus den Koordinaten eliminiert oder modelliert werden.

Dank

Für die Bereitstellung der absoluten Korrekturwerte der Antennen bedanke ich mich bei den Herren Dipl.-Ing. Feldmann-Westendorff und Dipl.-Ing. Strerath von der LGN. Ein herzliches Dankeschön geht auch an Herrn Kunz vom BKG für die Überarbeitung der Abbildungen.

Literatur

- Bilajbegovic, A., Groetchen, T., Vierus, M., Weber, T.: Untersuchungen der hybriden GPS-GLONASS-Empfänger Ashtech GG 24 RTK für Praxiseinsätze. AVN 8-9, S. 274–283, 1999.
- Boucher, C., Altamimi, Z.: Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign, (<http://lareg.ensg.ign.fr/EUREF/>), 2001.
- Campbell, J., Görres, B., Kotthoff, H. und Wohlleben, R.: Definition von Antennenphasenzentren und Signifikanz der Ergebnisse aus Kammer- und Feldverfahren Teil I und II. 1. Antennenworkshop in Bonn, (<http://www.sapos.de>), 1999.
- Çelik R. N.: Real Time Large Structure Monitoring Using The Inclination Sensor, Strong Motion Instrumentation for Civil Engineering Structures. In: NATO Asi Series E, Vol. 397, S. 397–406, 2001.
- Faulhaber, U.: Satellitenpositionierungsdienst SAPOS®, Stand und Tendenz. (unveröffentlicht, erhältlich über: <http://www.sapos.de>), 2003.
- Heitz, S.: Coordinates in Geodesy. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York, 1988.

- Hugentobler, U., Schaer, S., Fridez, P.: Bernese GPS Software Version 4.2. Astronomical Institute of the University of Berne, Switzerland, 2001.
- Mader, G.: GPS Antenna Calibration at the National Geodetic Survey. GPS Solutions, Vol. 3, No. 1, John Wiley & Sons Inc, 1999.
- McCarthy, D. D. (Eds.): IERS Conventions 1996. In: IERS Technical Note 21, Observatoire de Paris, 1996.
- Niell, A. E.: Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. Journal of Geophysical Research, Vol. 11, S. 3227–3245, 1996.
- Niemeier, W.: Ausgleichungsrechnung, Walter de Gruyter, Berlin/New York, 2002.
- Parkinson, B. W., Enge, P. K.: Differential GPS. In: Zarchan P. (Eds.): Global Positioning System: Theory and Applications, Volume II, S. 3–49, 1995.
- Rothacher, M.: Kombination absoluter und relativer Antennenkalibrierungen. 3. Antennenworkshop in Bonn (<http://www.sapos.de>), 2001.
- Saastamoinen, J.: Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites. In: The Use of African Satellites for Geodesy, Geophys. Monogr. Ser., vol. 15, edited by S. W. Henriksen, A. Mancini, and B. H. Chovitz, S. 47–63, Washington, D. C., 1972.
- Seeger, H., Altiner, Y.: Stand und Perspektiven von EUREF. DVW-Schriftenreihe 35, S. 238–250, 1999.
- Wanninger, L.: Möglichkeiten und Grenzen der relativen GPS-Antennenkalibrierung. zfv 127, S. 51–58, 2002.
- Wübbena, G., Schmitz, M., Menge, F., Seeber, G., Volksen, C.: A New Approach for Field Calibration of Absolute GPS Antenna Phase Center Variations. Navigation, Vol. 44/2, S. 247–255, 1997.

Anschrift des Autors

Dr. Yüksel Altiner
Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
Richard-Strauss-Allee 11
60598 Frankfurt am Main