

Automatisiertes GNSS-basiertes Bewegungsmonitoring am Black Forest Observatory (BFO) in Nahezu-Echtzeit

Xiaoguang Luo und Michael Mayer

Zusammenfassung

Bei geowissenschaftlichen Fragestellungen wie beispielsweise der Analyse von regionalen zeitlichen Höhen- und Schwereänderungen werden höchste Genauigkeitsanforderungen an die Positionen, die z. B. unter Verwendung von Beobachtungen globaler Satellitennavigationssysteme (GNSS) ermittelt werden, gestellt. In diesem Artikel wird ein automatisierter GNSS-basierter Ansatz zum Bewegungsmonitoring der GNSS-Permanentstation des in Schiltach/Schwarzwald gelegenen Geowissenschaftlichen Gemeinschaftsobservatoriums (Black Forest Observatory; BFO) in Nahezu-Echtzeit präsentiert. Die basierend auf Tageslösungen erhaltenen Auswertergebnisse zeigen, dass die Koordinaten dieser Permanentstation trotz ungünstiger Beobachtungsbedingungen (Bewaldung) mit einer inneren Genauigkeit von wenigen Millimetern bestimmt werden können. Der in dieser Arbeit vorgestellte Softwareansatz zur Automatisierung der GNSS-Auswertung sowie der anschließenden Ergebnisaufbereitung ist auf ähnliche Anwendungen übertragbar.

Summary

Geodynamic investigations, such as the analysis of time-dependent regional height and gravity variations, require ultra-precise positions using observations of global navigation satellite systems (GNSS). This paper presents an automated GNSS-based approach to monitor the GNSS permanent site located at Black Forest Observatory (BFO) in Schiltach/Black Forest in near real-time. The results show that, in spite of the non-ideal observation conditions due to strong afforestation, the site coordinates can be estimated with a precision of several millimetres based on daily network solutions. The presented software approach to automate the GNSS data processing as well as the subsequent result preparation in near real-time can be easily transferred to similar applications.

1 Einleitung

Mit der Leistungssteigerung und Modernisierung von globalen Satellitennavigationssystemen (GNSS) wuchsen auch die Ansprüche der Nutzer an Genauigkeit und Zuverlässigkeit GNSS-basierter Anwendungen. Dadurch wurden weitere Einsatzmöglichkeiten der Satellitenpositionierungstechnik entwickelt, die z. B. im Bereich geodynamischer und geophysikalischer Forschung angesiedelt sind (z. B. Dietrich et al. 2000). Bei diesen Anwendungen werden Positionen von GNSS-Beobachtungsstationen in

der Regel mit Genauigkeiten von wenigen Millimetern oder besser benötigt. Dazu werden vor allem GNSS-Phasenbeobachtungen erfasst und anschließend zeitversetzt (Post-Prozessierung) ausgewertet. Um geophysikalische Ereignisse frühzeitig aufdecken und mögliche Folgeereignisse präzisieren zu können, werden im Gegensatz dazu die von geophysikalischen Sensoren (z. B. Seismometer) erfassten Messdaten in Echtzeit bzw. Nahezu-Echtzeit verarbeitet und deren Resultate – teilweise automatisiert – analysiert. Soll diese Vorgehensweise auf GNSS-Auswertungen übertragen werden, resultieren daraus unter Berücksichtigung der zu gewährleistenden Genauigkeiten zum einen zeitliche Restriktionen und zum anderen neue Herausforderungen hinsichtlich der Auswertestrategie. Aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten erscheint hierbei eine automatisierte Auswertung mit anschließender Ergebnisanalyse und -präsentation ebenfalls sinnvoll.

In der vorliegenden Arbeit wird eine im geophysikalischen Forschungsbereich angesiedelte Fallstudie betrachtet. Hierzu werden GNSS-Daten automatisch verarbeitet, die am Geowissenschaftlichen Gemeinschaftsobservatorium BFO (Black Forest Observatory), das bei Schiltach/Schwarzwald gelegen ist, kontinuierlich erfasst wurden.

Das BFO ist eine interdisziplinäre und -universitäre Forschungseinrichtung der Universitäten Karlsruhe und Stuttgart und wird von den Geodätischen und Geophysikalischen Instituten beider Universitäten betrieben. Die Ziele der geowissenschaftlichen Arbeiten am BFO bestehen insbesondere darin, in einem breiten Spektrum Schwingungen und Deformationen des Erdkörpers zu registrieren und zu analysieren (BFO 2007; Emter et al. 1999). Die Aufnahme einer GNSS-Station in die am BFO betriebenen Sensoren erfolgte unter anderem in Vorbereitung der für das Jahr 2008 geplanten Installation eines Supraleitenden Gravimeters, das den am BFO bisher erfassten Periodenbereich wesentlich – bis über die Periode des Chandler Wobble (433 Tage) hinaus – erweitern und darüber hinaus die Beobachtung trendartiger Schwereänderungen ermöglichen wird. Die kontinuierlichen Beobachtungen des Supraleitenden Gravimeters werden durch regelmäßige Messungen der Absolutschwere, die bereits aktuell erfolgen (Amalvict 2004), und durch präzise Messungen der absoluten Stationshöhe, wozu die permanente GNSS-Station beitragen soll, begleitet.

Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse der Voruntersuchungen basierend auf Daten einer knapp dreijährigen Erprobungsphase präsentiert, die Aussagen hinsichtlich der Datenqualität der GNSS-Station des BFO unter Berücksichtigung der örtlichen Bewaldungssituation ermöglichen. Anschließend wird ein Ansatz zur Au-

tomatisierung der GNSS-Auswertung in Nahezu-Echtzeit vorgestellt und die damit erhaltenen Resultate einer ca. 200-tägigen, erfolgreichen Testphase werden präsentiert und diskutiert.

2 Voruntersuchungen



Abb. 1: GNSS-Station BFO1 (Stand: 2005)

Die Örtlichkeit in direkter Umgebung der GNSS-Station des BFO ließ auf Grund der vorherrschenden ungünstigen Bewaldungssituation starke Abschattungen und den Empfang von qualitativ schlechten Signalen (vermehrte Signalabrisse, Beugungseffekte) erwarten. Deshalb wurde zunächst untersucht, ob die Errichtung einer GNSS-Permanentstation unter diesen Bedingungen sinnvoll ist. Für diese Qualitätsuntersuchungen wurden GPS-Beobachtungen des Zeitraums DOY2002: 095 – DOY2003: 365 verwendet und analysiert.

Während der Erprobungsphase wurde die GNSS-Station des BFO (Stationskennung: BFO1) auf dem Dach der Magnetikmesshütte auf einem Holzstativ mit ausziehbaren Stativbeinen errichtet (Abb. 1). Die GNSS-Ausrüstung umfasste einen Trimble 4700 Empfänger und eine mit einem Radome (TCWD) ausgestattete Trimble Choke-Ring-Antenne (TRM29659.00).

2.1 Auswertestrategie der Voruntersuchungen

Zur Erarbeitung einer optimalen und angepassten Auswertestrategie wurden, wie in Abb. 2 dargestellt, GNSS-Daten eines Netzes umliegender, qualitativ hochwertiger Permanentstationen des IGS (International GNSS Service; Dow et al. 2005) und des EPN (European Permanent Network; Bruyninx 2004) verwendet, um Basislinien von den

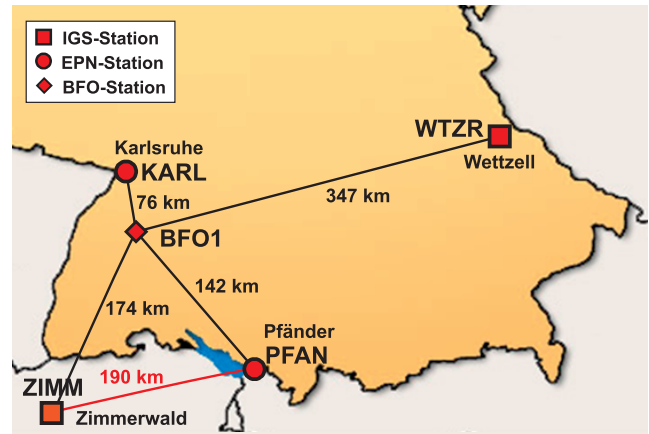


Abb. 2: Netzkonfiguration der Voruntersuchung

Permanentstationen KARL (Karlsruhe), WTZR (Wetzell), PFAN (Pfänder) und ZIMM (Zimmerwald) zur BFO1-Station zu bilden und auszuwerten. Die Koordinaten und Geschwindigkeiten der umliegenden Permanentstationen sind im Referenzrahmen ITRF2000 (International Terrestrial Reference Frame; Altamimi et al. 2002) genau bekannt und wurden deshalb im Rahmen der GNSS-Auswertung nach Extrapolation auf die Epoche des Auswertzeitpunkts festgehalten, um die BFO1-Station mittels Netzlösungen zu positionieren.

Zum Ergebnisvergleich wurde zusätzlich die Basislinie zwischen den Stationen PFAN und ZIMM ausgewertet. Die Basislinienlänge PFAN-ZIMM entspricht der mittleren Länge aller vier BFO1-bezogenen Basislinien. Die GNSS-Auswertung wurde mit der Berner GPS Software Version 5.0 (BS5; Dach et al. 2007) durchgeführt. Ausgewählte wichtige, im Folgenden verwendete Charakteristika der Datenprozessierung sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Tab. 1: Ausgewählte Parameter der Datenprozessierung der Voruntersuchung

Parameter	Charakteristika
Beobachtungsgröße	GPS-Phasenbeobachtung; Doppeldifferenz
Abtastrate	120 Sekunden
Beobachtungsgewichtung	Elevationsabhängige Gewichtung ($\sin^2 e$)
Minimale Elevation	10°
Orbits und Erdrotationsparameter	IGS-Produkte (Final)
Neutrosphärisches a priori Modell	Saastamoinen (1973), Abbildungsfunktion: Niell _{dry} (Niell 1996)
Neutrosphärische Zusatzparameter	Abbildungsfunktion: Niell _{wet} (Niell 1996); Gültigkeit: 2 Stunden
Phasenmehrdeutigkeitslösung	SIGMA-Strategie (L5, L3)
Antennenkorrektur	Relative Kalibrierwerte

2.2 Voruntersuchungen zur Datenqualität

Begründet in den ungünstigen örtlichen Empfangsbedingungen war zu erwarten, dass die GNSS-Beobachtungen der Station BFO1 im Vergleich zu den GNSS-Beobachtungen der umliegenden Permanentstationen ein geringeres Datenvolumen und eine größere Anzahl von Signalabbrüchen aufweisen würden. Abb. 3 stellt die ent-

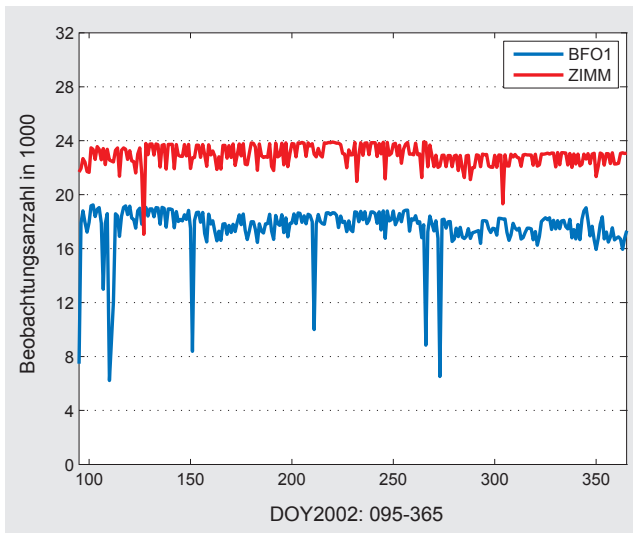


Abb. 3: Vergleich der Anzahl der täglich registrierten Codemessungen

sprechend Tab. 1 mit einem minimalen Elevationswinkel von 10° verarbeiteten täglichen Datenvolumina für die Stationen BFO1 und ZIMM basierend auf Codemessungen für den Zeitraum DOY2002: 095-365 gegenüber, wohingegen Abb. 4 die Anzahl der täglich detektierten Cycle Slips der Basislinien PFAN-BFO1 und PFAN-ZIMM der phasenbasierten Vorverarbeitung für denselben Zeitraum veranschaulicht.

Im Vergleich zur Permanentstation ZIMM ist die absolute Beobachtungszahl der Station BFO1 im Durchschnitt pro GPS-Tag um ca. 5000 geringer, was ca. 20%

der erfassten Daten entspricht. Trotz des geringeren Datenvolumens weist die BFO1-bezogene Basislinie PFAN-BFO1 durchschnittlich um den Faktor 7 mehr Cycle Slips auf. Die schlechte Datenqualität der Station BFO1 ist auf Abschattungen sowie Beeinflussung der empfangenen GNSS-Signale durch Bewaldung zurückzuführen und hat ebenso Auswirkungen auf die Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten, wodurch für die Basislinie

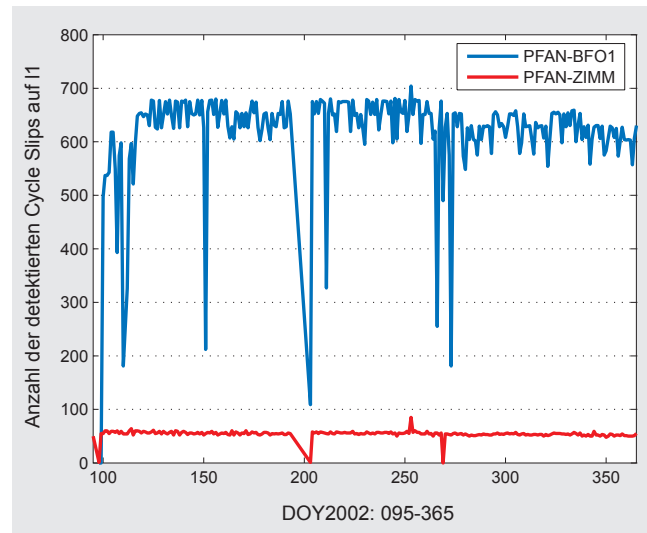


Abb. 4: Vergleich der Anzahl der täglich detektierten Cycle Slips

PFAN-ZIMM durchschnittlich 10% (20%) mehr Phasenmehrdeutigkeiten auf L5 (L3) gelöst werden konnten als vergleichend für die Basislinie PFAN-BFO1.

Unter Berücksichtigung der schlechteren Datenqualität, verursacht durch nicht-ideale Beobachtungsbedingungen, wurde anschließend der Frage nachgegangen, ob die abgeleiteten Koordinaten der BFO1-Station unter Verwendung einer angepassten Auswertestrategie die für die geplanten geophysikalischen Forschungsarbeiten notwendigen Genauigkeitsanforderungen im Millimeterbereich erfüllen. In Abb. 5 sind die auf die entsprechen-

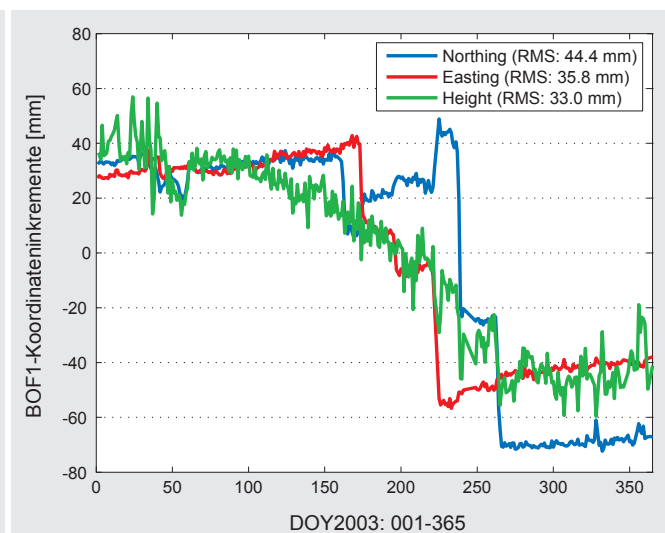
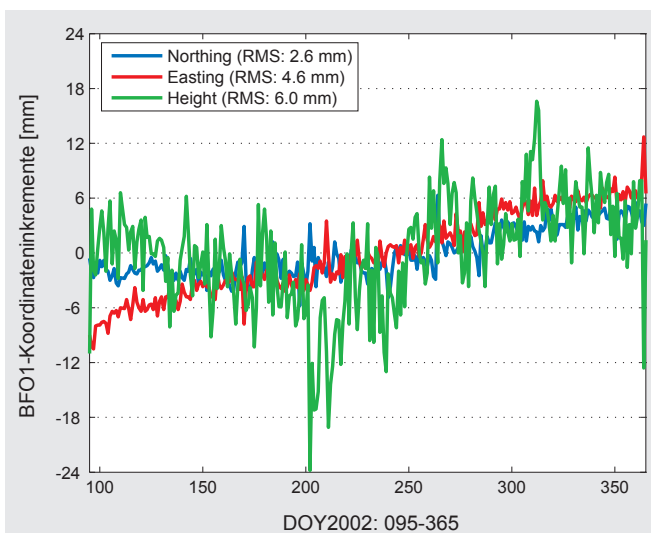


Abb. 5: Vergleich der BFO1-bezogenen Koordinateninkremente (Netzlösung); links: Jahr 2002, rechts: Jahr 2003

den Jahresmittelwerte bezogenen BFO1-Koordinateninkremente der Tageslösungen basierend auf Netzlösungen der Jahre 2002 und 2003 in einem lokalen topozentrischen Koordinatensystem (N: Northing; E: Easting; H: Height) vergleichend dargestellt.

Für die Beobachtungen des Jahres 2002 konnten Wiederholbarkeiten der Lagekomponenten von $\sigma_N = \pm 2.6$ mm bzw. $\sigma_E = \pm 4.6$ mm erhalten werden. Die in Abb. 5 dargestellten Zeitreihen zeigen für die Lagekomponenten den eurasischen Trend, der im ITRF2000 enthalten ist. Die innere Genauigkeit der Höhenkomponente, die bei GNSS-Auswertungen in der Regel systembedingt um einen Faktor von 2 bis 3 schlechter als die Lage bestimmt wird, beträgt für die Beobachtungsdaten des Jahres 2002 6.0 mm. Im Vergleich zu den Resultaten des Jahres 2002 sind in den Koordinatenzeitreihen des Jahres 2003 signifikante, vom eurasischen Trend des ITRF2000 abweichende Variationen zu beobachten. Dieses Verhalten ist jedoch nachweislich (photographische Dokumentation) auf Bewegungen der Holzstativbeine zurückzuführen (Abb. 1).

Basierend auf den Auswertergebnissen des Jahres 2002 konnte somit festgestellt werden, dass die BFO1-Koordinaten trotz ungünstiger örtlicher Beobachtungsbedingungen mit einer hohen inneren Genauigkeit von wenigen Millimetern bestimmt werden können, insofern bauliche Stabilität dieser Station vorausgesetzt werden kann.

2.3 Untersuchungen in Abhängigkeit von der minimalen Elevation

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit den zu erwartenden Störungen des Empfangs der GNSS-Signale an der Station BFO1, die im Wachstum der umstehenden Bäume begründet sind. Es ist anzunehmen, dass die Abschattungs- und Empfangssituation in der Umgebung der Station BFO1 mit fortschreitender Zeit zunehmend schlechter werden wird. Je mehr Signale niedrig stehender Satelliten durch Abschattung gestört werden, umso instabiler wird die Parameterschätzung der GNSS-Auswertung und desto mehr wird die Stabilität der BFO1-Koordinaten – im Besonderen der ellipsoidischen Höhe – verschlechtert. Ein isotroper Einfluss des Baumwachstums auf die Beobachtungsanzahl lässt sich durch Erhöhung der minimalen Elevation im Rahmen von GNSS-Auswertungen abschätzen. Durch diese Abschätzungen kann

beispielsweise die Elevationsgrenze, unter der die Höhenkomponente mit ausreichender Wiederholbarkeit zu bestimmen ist, festgestellt werden. Des Weiteren können somit die Auswirkungen der erhöhten minimalen Elevation auf die BFO1-Koordinaten, insbesondere auf die Stationshöhe, untersucht werden.

In Tab. 2 sind basierend auf den Netzlösungen aller Beobachtungstage des Jahres 2002 die ermittelten RMS-Werte der Koordinateninkremente der Station BFO1 in Abhängigkeit von der minimalen Elevation, die während der GNSS-Auswertung mit einer Schrittweite von 5° erhöht wurde, dargestellt.

Die Wiederholbarkeiten der Lagekomponenten wurden – wie erwartet – von der Variation der minimalen Elevation kaum beeinflusst, während für die Wiederholbarkeiten der Höhenkomponente mit zunehmender minimaler Elevation ab 20° deutliche Verschlechterungen detektiert werden konnten. Bei einer minimalen Elevation von 20° erreicht der RMS-Wert der Höhenkomponente das Minimum von 5.4 mm und ab 35° überschreitet der RMS-Wert der Höhenkomponente die Zentimetergrenze.

Zur detaillierten Untersuchung der Auswirkungen von Variationen der Elevationsmaske auf die Koordinaten der Station BFO1 wurden die mit unterschiedlichen minimalen Elevationen ermittelten BFO1-Koordinaten des Jahres 2002, bezogen auf die Ergebnisse, die mit einer minimalen Elevation von 10° erhalten wurden, reduziert. Diese reduzierten kartesischen Koordinaten wurden anschließend in ein lokales topozentrisches System transformiert (Heck 2003). Da die Einflüsse der Elevation auf die reduzierten Lagekoordinaten vernachlässigbar klein waren, sind in Abb. 6 nur die Einflüsse der Variation der Elevation auf die Höhenkomponente sowohl für die Permanentstation ZIMM als auch für die Station BFO1 vergleichend dargestellt. Dabei beziehen sich die reduzierten Koordinaten der Station ZIMM auf Basislinienlösungen (Basislinie PFAN-ZIMM); im Gegensatz dazu resultieren die reduzierten Koordinaten der Station BFO1 aus Netzlösungen. In Analogie zu Tab. 2 sind in Tab. 3 die ermittelten RMS-Werte der Koordinateninkremente der Station ZIMM in Abhängigkeit von der minimalen Elevation, die im Rahmen der GNSS-Auswertung ebenfalls mit einer Schrittweite von 5° erhöht wurde, dargestellt.

Die ZIMM-bezogene Kurve (Abb. 6, links) zeigt eine typische systematische Variation der ellipsoidischen Höhe in Abhängigkeit vom minimalen Elevationswinkel ϵ_{min} ,

Tab. 2: RMS-Werte der BFO1-Koordinateninkremente in Abhängigkeit von der minimalen Elevation der Netzlösungen des Jahres 2002

	Minimale Elevation								
RMS-Werte [mm]	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
Northing	2.6	2.6	2.6	2.7	2.7	2.7	2.6	2.6	2.5
Easting	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.5	4.5	4.4
Height	6.0	5.6	5.4	6.0	7.5	11.1	16.6	24.4	40.2

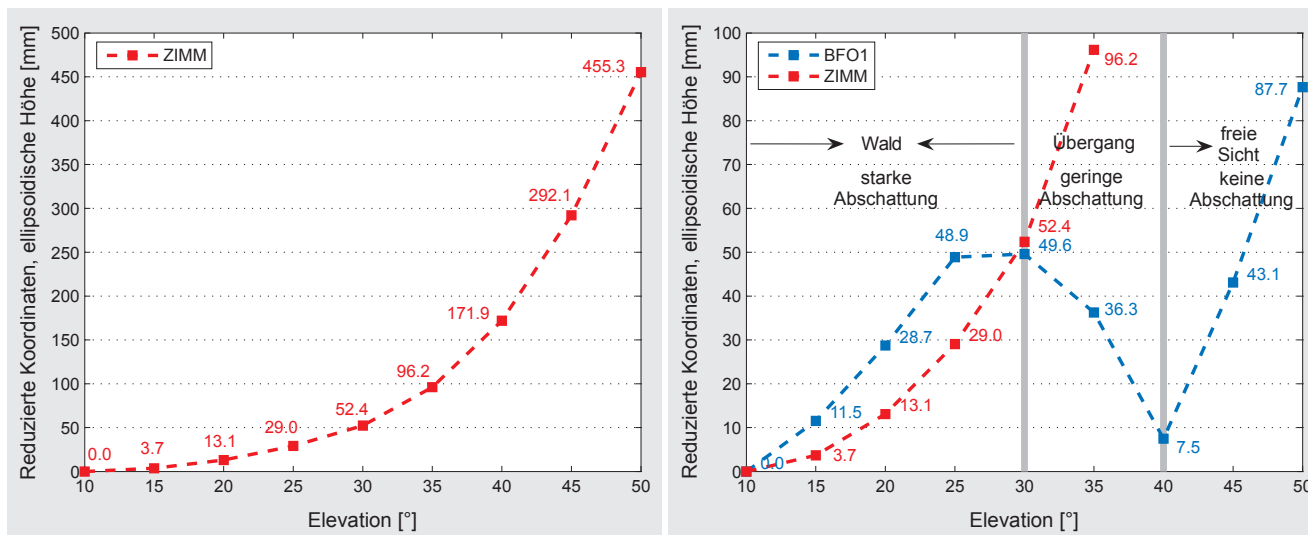


Abb. 6: Vergleich reduzierter ellipsoidischer Höhen in Abhängigkeit vom minimalen Elevationswinkel; links: ZIMM (Basislinienlösung PFAN-ZIMM), rechts: BFO1 (Netzlösung)

Tab. 3: RMS-Werte der ZIMM-Koordinateninkremente in Abhängigkeit von der minimalen Elevation der Basislinienlösungen des Jahres 2002

RMS-Werte [mm]	Minimale Elevation								
	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
Northing	3.4	3.4	3.4	3.4	3.5	3.6	3.8	3.9	4.2
Easting	4.7	4.7	4.8	5.1	5.4	5.8	6.1	6.7	7.7
Height	5.3	5.7	6.8	8.0	9.7	13.1	18.5	27.9	45.2

während der BFO1-bezogene Kurvenverlauf (Abb. 6, rechts) ein indifferentes Verhalten aufweist. Dieses Verhalten lässt auf drei Bereiche der Signalbeeinflussung bzw. Wechselwirkung der GNSS-Signale mit vorherrschender und simulierter Bewaldung schließen. Sowohl im Waldbereich ($10^\circ \leq e_{min} < 30^\circ$) als auch im Bereich mit freier Sicht ($e_{min} > 40^\circ$) nimmt die Abweichung der ellipsoidischen Höhe mit steigendem minimalem Elevationswinkel zu. Dies ist auf die Abnahme der Anzahl von Beobachtungen mit zunehmendem minimalem Elevationswinkel zurückzuführen. Im Übergangsbereich ($30^\circ \leq e_{min} \leq 40^\circ$) wirken zwei gegenseitig beeinflussende Faktoren auf die reale und die simulierte Situation ein. Einerseits nimmt die Beobachtungsanzahl mit zunehmendem Elevationswinkel ab, andererseits ist eine Verbesserung der durchschnittlichen Signalqualität der GNSS-Beobachtungen der Station BFO1 festzustellen, da mit zunehmender Elevation die Anzahl der auf Grund limitierender Einflüsse beeinträchtigten Signale geringer wird. Der Einfluss der verbesserten Signalqualität mit zunehmender Elevation scheint hierbei zu dominieren. Werden die beiden Kurven im Waldbereich miteinander verglichen (Abb. 6, rechts), weisen die BFO1-bezogenen Abweichungen trotz einer Netzlösung größere Zahlenwerte auf, wohingegen die Abweichungen im Bereich der freien Sicht durch die Berechnung von Netzlösungen weitgehend stabilisiert werden.

2.4 Resümee der Voruntersuchungen

Basierend auf den oben beschriebenen Ergebnissen der Voruntersuchungen konnte festgestellt werden, dass unter der Voraussetzung der baulichen Stabilität der Station BFO1 und unter Verwendung einer angepassten Auswertestrategie trotz schlechter Datenqualität (Bewaldung) die Koordinaten der Station BFO1 mit einer inneren Genauigkeit von wenigen Millimetern bestimmt werden können. Unter Berücksichtigung einer möglichen Verschlechterung der Bewaldungssituation, die auf Grund des Wachstums der Bäume hervorgerufen werden könnte und in dieser Studie durch Erhöhung der minimalen Elevation der GNSS-Auswertung simuliert wurde, beträgt die Variation der für die Station BFO1 ermittelten ellipsoidischen Höhen mit zunehmender minimaler Elevation bei 30° ca. 5 cm, obwohl die entsprechende Wiederholbarkeit der Höhenkomponente bei 30° unter 1 cm bleibt (vgl. Tab. 2 mit Abb. 6, rechts). Da die Variation der absoluten Höhe der Station BFO1 für die geplanten geophysikalischen Forschungsarbeiten von Interesse ist, kommt dem Baumwachstum für die Höhenbestimmung mittelfristig eine dominierende Rolle zu.

3 Automatisierung der GNSS-Auswertung in Nahezu-Echtzeit

Die zufriedenstellenden Auswertergebnisse der Daten des Jahres 2002 trugen dazu bei, dass die Permanentstation BFO1 endgültig errichtet und die bauliche Stabilität dieser Station verbessert wurde.

Im Herbst 2006 wurde mit der Modernisierung der GNSS-Permanentstation am BFO durch den Bau eines



Abb. 7: GNSS-Permanentstation BFO1 (Stand: 2007)

auf den anstehenden Granit betonierten Fundaments begonnen. Seit dem 11.11.2006 werden von der neu gebauten GNSS-Station BFO1, die im Bereich der Magnetmesshütte (Abb. 7) auf einem ca. 3.6 m hohen Dreibein aus Aluminium errichtet wurde, GNSS-Daten mit einer Taktrate von aktuell 15 s kontinuierlich registriert. Dieser Aufbau garantiert minimale Mehrwegeeffekte. Gleichzeitig besteht im Vergleich zu vielen anderen GNSS-Permanentstationen eine ungleich bessere Ankopplung an die feste Erde.

Nach der bautechnischen Modernisierung wurde mit der Etablierung einer automatisierten GNSS-Auswertung begonnen. Um künftig die Ergebnisse der GNSS-Auswertung mit den Daten des permanent operierenden Supraleitenden Gravimeters zeitnah vergleichen zu können, soll die GNSS-Auswertung in Nahezu-Echtzeit (NRT: Near-Real-Time) automatisch durchgeführt werden. Im Folgenden wird die Realisierung der Automatisierung vorgestellt. Des Weiteren werden repräsentative Auswertergebnisse beispielhaft präsentiert.

3.1 Strategie der NRT-Auswertung

Im Vergleich zur Auswertung im Post-Processing-Modus, die beispielsweise innerhalb der Voruntersuchungen zu dieser Arbeit herangezogen wurde, um bestmögliche Resultate für Abschätzungen und Vergleiche vorzuhalten, zeichnen sich NRT-Auswertungen vor allem durch die schnellere Verfügbarkeit der Auswertergebnisse aus. Somit unterliegt die NRT-Auswertung zeitlichen Restriktionen. Da die qualitativ hochwertigsten Produkte des

IGS (z. B. Satellitenbahndaten), die in der Regel mit einer zeitlichen Verzögerung von ca. zehn Tagen zur Verfügung stehen, im hier behandelten Fall nicht verfügbar sind, müssen die entsprechenden NRT-Produkte verwendet werden.

Neben der BFO1-bezogenen Netzauswertung wird zusätzlich tageweise eine konsekutive Basislinienauswertung der umliegenden Permanentstationen (KARL-bezogene Schleife: KARLO → ZIMM → PFAN → WTZR → KARL1), die im Rahmen der GNSS-Auswertung festgehalten werden und somit die Positionsbestimmung der BFO1-Station stark beeinflussen, ohne die qualitativ schlechtere Station BFO1 durchgeführt. Die resultierenden gut interpretierbaren, vom Nivellement adaptierten Schleifenschlussfehler der KARL-Koordinaten (KARL1-KARLO) können zur Kontrolle der Datenqualität aller berücksichtigten Permanentstationen ebenfalls in NRT verwendet werden. Des Weiteren wird für die NRT-Auswertung die Abtastrate unter Berücksichtigung der Beobachtungsanzahl auf 30 s gesenkt. Statt relativer Kalibrierung werden typspezifische absolute Kalibrierwerte sowohl für die Satelliten- als auch für die Empfängerantennen verwendet, vergleiche hierzu Tab. 1.

3.2 Voruntersuchungen für NRT-Auswertung

Im Rahmen der Voruntersuchungen für die automatisierte NRT-Auswertung wurden zunächst die Einflüsse der verwendeten NRT-Produkte auf die BFO1-Koordinaten analysiert. Hierfür wurden die Einflüsse der präzisen Endprodukte und der Ultrarapid-Produkte der Satellitenbahndaten in einem Zeitraum von drei Wochen (DOY2007: 112-132) verglichen. Um die maximalen Einflüsse der im Rahmen der L5-basierten Mehrdeutigkeitslösung verwendeten ionosphärischen Informationen auf die Koordinatenbestimmung zu detektieren, wurden ebenso GNSS-Auswertungen mit und ohne ionosphärische Informationen des CODE (Center for Orbit Determination in Europe) für das oben genannte Zeitintervall durchgeführt. Basierend auf den nahezu identischen Ergebnissen konnte festgestellt werden, dass weder die untersuchten Satellitenbahndaten noch die verwendeten ionosphärischen Informationen einen signifikanten Einfluss auf die BFO1-bezogenen Inkremente der Höhenkomponente haben, wobei die Unterschiede der Koordinateninkremente in den Lagekomponenten (Northing, Easting) deutlich kleiner als die der Höhenkomponente sind. Somit führt im behandelten Anwendungsfall die Verwendung der NRT-Produkte nicht zu einem Qualitätsverlust bei der Koordinatenbestimmung. Für die automatisierte NRT-Auswertung werden deshalb die Ultrarapid-Bahndaten des IGS und die prädierten (siehe Abb. 8; Durchlauf 9:00 Uhr) bzw. Rapid-Ionosphären Daten (siehe Abb. 8; Durchlauf 17:00 Uhr) des CODE (Hugentobler et al. 2004) verwendet.

3.3 Automatisierung der NRT-Auswertung

Insbesondere da die Beobachtungsdaten sowie die für die GNSS-Auswertung notwendigen IGS- bzw. CODE-Produkte in Nahezu-Echtzeit im Internet zur Verfügung stehen, ist es aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten sinnvoll, die täglich durchzuführende NRT-Auswertung zu automatisieren. Die Automatisierung umfasst nicht nur die erstmalige Implementierung einer problemtoleranten und robusten GNSS-Auswertung unter Berücksichtigung der am Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe (TH) bestehenden Restriktionen (z.B. Netzwerkarchitektur), sondern insbesondere auch die Analyse, Aufbereitung und Präsentation der Auswertergebnisse. Hierbei stellt die im Folgenden vorgestellte Strategie in Abhängigkeit von den zu automatisierenden Prozessen sowie den verfügbaren Ressourcen (z.B. Softwareprodukte) lediglich eine mögliche Automatisierungsvariante dar. In dieser Arbeit wurde die Automatisierung in den folgenden vier Schritten

- Daten vorbereiten,
- Daten auswerten,

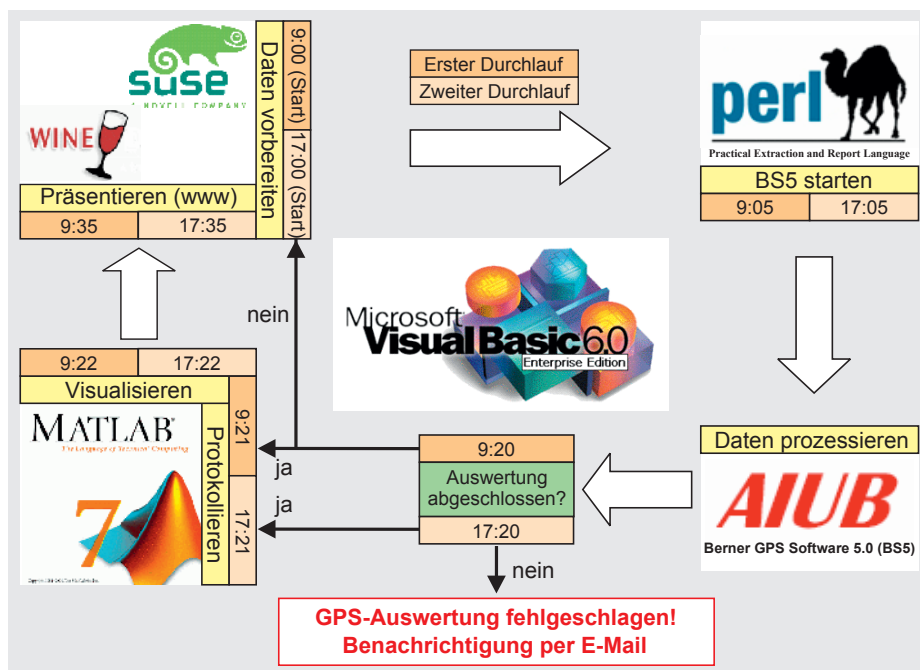


Abb. 8: Schematische Darstellung des Ablaufs der automatisierten NRT-Auswertung

- Protokolle erstellen und
 - Ergebnisse darstellen
- realisiert. In Tab. 4 sind die verwendeten Softwareprodukte und deren jeweiliger Anwendungszweck zusammengestellt.

Die automatisierte NRT-Auswertung wird durch eine zentrale Einheit, die unter Verwendung von Microsoft Visual Basic 6.0 realisiert ist, gesteuert. Mit einer benutzerfreundlichen Oberfläche lässt sich die GNSS-Auswertung sowohl im automatischen als auch im manuellen Modus durchführen. Des Weiteren ist es einfach möglich, Server-Einstellungen z.B. Datendienste betreffend zu ändern. Um das Kompatibilitätsproblem zwischen der unter Windows erstellten Steuereinheit und der Linux-Umgebung der GNSS-Auswertung zu lösen, wird die Software WINE (<http://winehq.org>), die eine Windows-kompatible Laufzeitumgebung für Linux- und Unix-Betriebssysteme zur Verfügung stellt, verwendet.

Da die Dateinamen der für die GNSS-Auswertung notwendigen Beobachtungsdaten sowie der NRT-Produkte im GPS-Datum (GPS-Tage, GPS-Woche, Wochentag) gegeben sind, ist für die Datenvorbereitung eine Umrechnung des Kalenderdatums in das

GPS-Datum notwendig (Meeus 2000). Diese Umrechnung wird von der zentralen Steuereinheit übernommen und täglich automatisch durchgeführt. Mit einer zeitlichen Verzögerung von in der Regel maximal zehn Stunden werden Shell-Skripte zum automatischen Herunterladen von Daten (z.B. GNSS-Beobachtungen) erstellt, wobei eine Formatierung der Skripte zur Anpassung der Linux-Umgebung notwendig ist. Zum Starten der BS5 wird ein Perl-Skript generiert, das täglich automatisiert zur Ausführung der aktuellen Sessionauswertung aufgerufen wird. Das Protokollieren und Darstellen der Auswertergebnisse wird mittels MATLAB

Tab. 4: Zusammenstellung der verwendeten Softwareprodukte für die Automatisierung der NRT-Auswertung

Software	Version	Systemumgebung	Anwendungszweck
SuSe	10.0	Linux	Betriebssystem
Visual Basic	6.0	Windows XP	Grafische Oberfläche
WINE	20050725	Linux	Windows-kompatible Laufzeitumgebung für Linux
Berner GPS Software	5.0	Linux	GNSS-Auswertung
perl	5.8.7	Linux	BS5 starten (tageweise)
MATLAB	7.0	Linux	Protokollieren und darstellen

durchgeführt. Um bei der automatischen Ausführung der MATLAB-Routinen die MATLAB-Programmumgebung nicht starten zu müssen, werden unter Anwendung des MATLAB-Compilers ausführbare Programme für die entsprechenden Routinen erstellt. Bei der Protokollierung wird besonders auf die Selektion von geeigneten Ausgabeinformationen der GNSS-Auswertung geachtet, so dass Probleme – beispielsweise die Datenqualität betreffend – schnellstmöglich aufgedeckt werden können. Zur Veranschaulichung der Auswertergebnisse werden die BFO1-bezogenen Koordinateninkremente sowohl aus der Basislinienlösung als auch aus der Netzlösung dargestellt. Des Weiteren werden die KARL-bezogenen Schleifenschlussfehler zur Kontrolle der Datenqualität der Permanentstationen visualisiert. Abschließend werden die Ausgabedateien der GNSS-Auswertung archiviert und die Protokolle sowie die Visualisierungsergebnisse für eine Internetpräsentation aufbereitet.

In der aktuellen Realisierung führt das Programm den ersten Auswertversuch täglich morgens um neun Uhr durch. Ist diese Auswertung beispielsweise auf Grund fehlender Daten gescheitert, startet ein zweiter Versuch nachmittags um 17 Uhr. Falls auch der zweite Versuch nicht erfolgreich durchgeführt werden konnte, wird der Sachbearbeiter per automatisch erzeugter E-Mail benachrichtigt. In Abb. 8 ist der Ablauf der automatisierten NRT-Auswertung schematisch dargestellt.

3.4 Ausgewählte Ergebnisse der automatisierten NRT-Auswertung

Für die automatisierte NRT-Auswertung wurde DOY2007: 112 (GPS-Woche: 1424.0) als Starteopoche festgelegt. Bei der Visualisierung der Auswertergebnisse werden im Speziellen sowohl Lage- als auch Höhen-schwankungen bezüglich der jeweiligen Mittelwerte im visualisierten Zeitraum in Form von lokalen topo-zentrischen Koordinateninkrementen veranschaulicht. Dabei werden sowohl die BFO1-bezogenen Koordinateninkremente der Basislinien- als auch der Netzlösung dargestellt. In Abb. 9 und Abb. 10 sind für eine repräsentative Zeitspanne (DOY2007: 112-318) ausgewählte graphische Produkte der automatisierten NRT-Auswertung visualisiert. Die präsentierten Zeitreihen der Basislinienlösung sind hinsichtlich des eurasischen Trends der eurasischen Plattenbewegung, der im ITRF2000 enthalten und in den Lagekomponenten deutlich zu erkennen ist, nicht bereinigt.

Abb. 9 betrachtend ist festzustellen, dass jede Basislinie die Koordinaten der Station BFO1 mit einer Wiederholbarkeit besser als 1 cm bestimmt, wobei die Höhenkomponente um einen Faktor von ca. 2 schlechter als die Lage bestimmt wird. Werden die Resultate der vier verwendeten Basislinien verglichen, weist die Basislinie WTZR-BFO1 auf Grund der größten Basislinienlänge

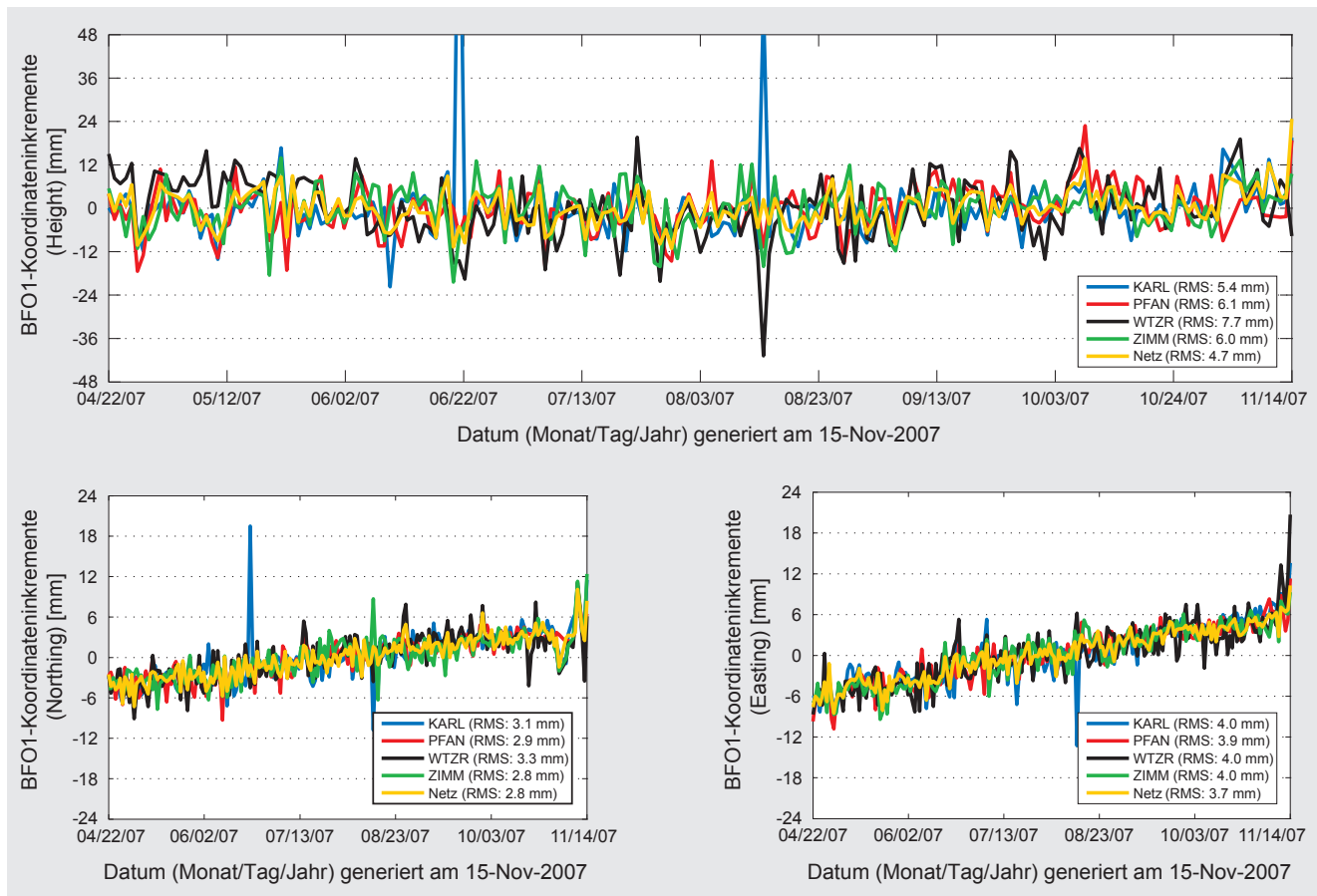


Abb. 9: Automatisch erzeugte BFO1-Koordinateninkremente der täglichen Basislinien- und Netzlösung (DOY2007: 112–318) im ITRF2000; oben: Höhe, unten links: Northing, unten rechts: Easting

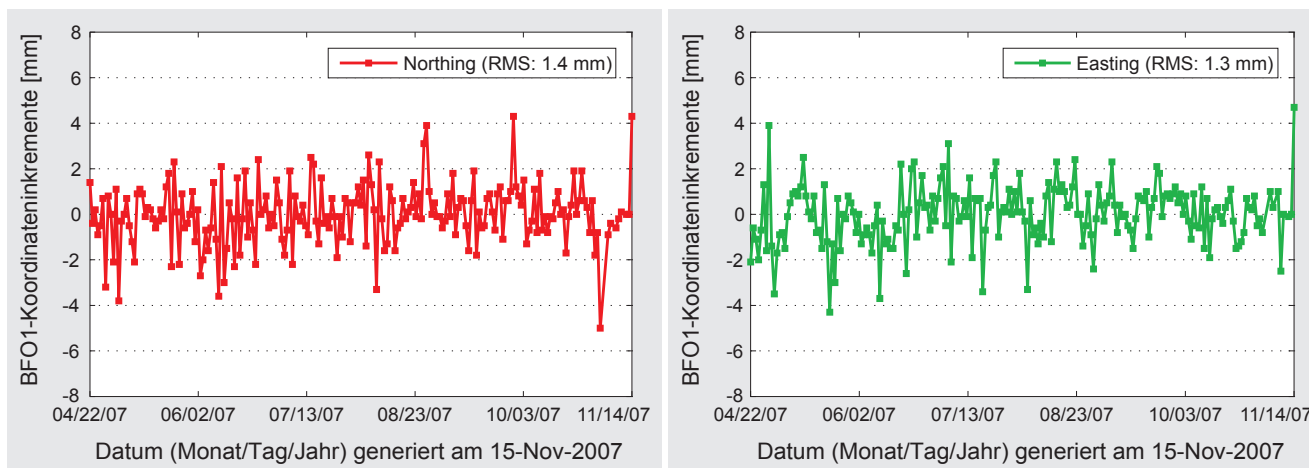


Abb. 10: Automatisch erzeugte BFO1-Koordinateninkremente der täglichen Netzlösung (DOY2007: 112–318), ITRF2000-Trend beseitigt; links: Northing, rechts: Easting

die schlechtesten Genauigkeiten insbesondere für die Höhenkomponente auf. Des Weiteren kann mittels Netzlösung im Vergleich zur Basislinienlösung eine Genauigkeitsverbesserung der geschätzten Höhe von ca. 1 bis 3 mm erzielt werden.

In den visualisierten Zeitreihen der Netzlösung (Abb. 10) ist der im ITRF2000 enthaltene, die Lagekomponenten betreffende eurasische Trend mittels einer basislinienlängenabhängigen Gewichtung komponentenweise eliminiert. Insbesondere die Lagekomponenten weisen für den untersuchten Zeitraum mit $\sigma_N = \pm 1.4 \text{ mm}$ bzw. $\sigma_E = \pm 1.3 \text{ mm}$ eine sehr gute Wiederholbarkeit auf, während der RMS-Wert der nicht dargestellten Höhenkomponente 4.9 mm beträgt. Es ist zu beachten, dass die in Abb. 10 dargestellten Koordinatenschwankungen neben den Eigenbewegungen der Station BFO1 noch durch andere Faktoren wie z. B. unmodellierete atmosphärische Einflüsse sowie im ITRF nicht berücksichtigte unregelmäßige Bewegungen der Permanentstationen beeinflusst sind.

Aus Abb. 9 sind Aussagen hinsichtlich der Reproduzierbarkeit der Koordinaten der Station BFO1 in Abhängigkeit von einzelnen Basislinienlösungen ableitbar. Um die Eigenschaften der einzelnen Basislinien leichter interpretieren zu können, wird jede Basislinienlösung um das Resultat der täglichen Netzlösung reduziert und die resultierenden Koordinatendifferenzen werden anschließend in einem lokalen topozentrischen Koordinatensystem in Abb. 11 veranschaulicht. Da die Koordinaten (ITRF2000, zeitabhängige lineare Extrapolation) aller umliegenden Permanentstationen im Rahmen der GNSS-Auswertung festgehalten wurden, enthalten die in Abb. 11 vergleichend dargestellten Abweichungen unter anderem Informationen über die Realitätsnähe der verwendeten ITRF2000-Koordinaten der jeweiligen Permanentstation sowie Aussagen hinsichtlich der regionalen Repräsentativität des ITRF2000.

Trotz kürzester Basislinienlänge weisen die in Abb. 11 dargestellten BFO1-Koordinaten der Basislinie KARL-BFO1 im Durchschnitt die größten Abweichungen auf. Dies ist, wie Tab. 5 zu entnehmen ist, durch die schlechten Genauigkeiten der ITRF2000-Koordinaten der Station KARL begründbar. Die im ITRF2000 angegebenen Genauigkeiten der kartesischen Koordinaten der Permanentstationen wurden für die Epoche 1997.0 unter strenger Fehlerfortpflanzung in ein lokales topozentrisches System transformiert (Heck 2003), wobei die Kovarianzmatrix der ITRF2000-Lösung (Altamimi et al. 2002) berücksichtigt wurde. Die großen Höhenabweichungen der Basislinie WTZR-BFO1 sind vor allem auf die große Basislinienlänge und die dadurch resultierenden unmodellierten atmosphärischen Einflüsse zurückzuführen.

Als ein weiteres Produkt der automatisierten NRT-Auswertung werden aktuell die Schleifenschlussfehler zur Beurteilung der Datenqualität aller berücksichtigten Permanentstationen generiert. Wie Abb. 12 zeigt, schwanken die Schleifenschlussfehler der Lage im Bereich von wenigen Millimetern, wohingegen ein Offset von ca. 3 mm in der dargestellten Zeitreihe der Höhenkomponente zu erkennen ist. In der vorliegenden Studie werden absolute typspezifische Korrekturmodelle der Empfangsantenne verwendet, wodurch dieser Offset der Höhenkomponente erklärt werden kann. Da diese Schleife jedoch innerhalb des ITRF2000 tageweise ausgewertet wird, ist der im ITRF2000 enthaltene eurasische Trend eliminiert. Der auffällige Ausreißer am 22.6.2007, der in einem sehr kleinen Datenvolumen (Beobachtungszeitraum: eine Stunde) der Station KARL begründet ist, stellt ein repräsentatives Beispiel für die Effizienz dieser visuellen und schnellen Datenkontrolle dar.

Neben den oben aufgeführten Resultaten der NRT-Auswertung werden aktuell beispielsweise abweichend zu Tab. 1 die mit einer zeitlichen Gültigkeit von einer Stunde geschätzten stationspezifischen Neutrosphärenparameter aufbereitet und analysiert. Auf Grund der hohen Korrelation zwischen den geschätzten Höhen und

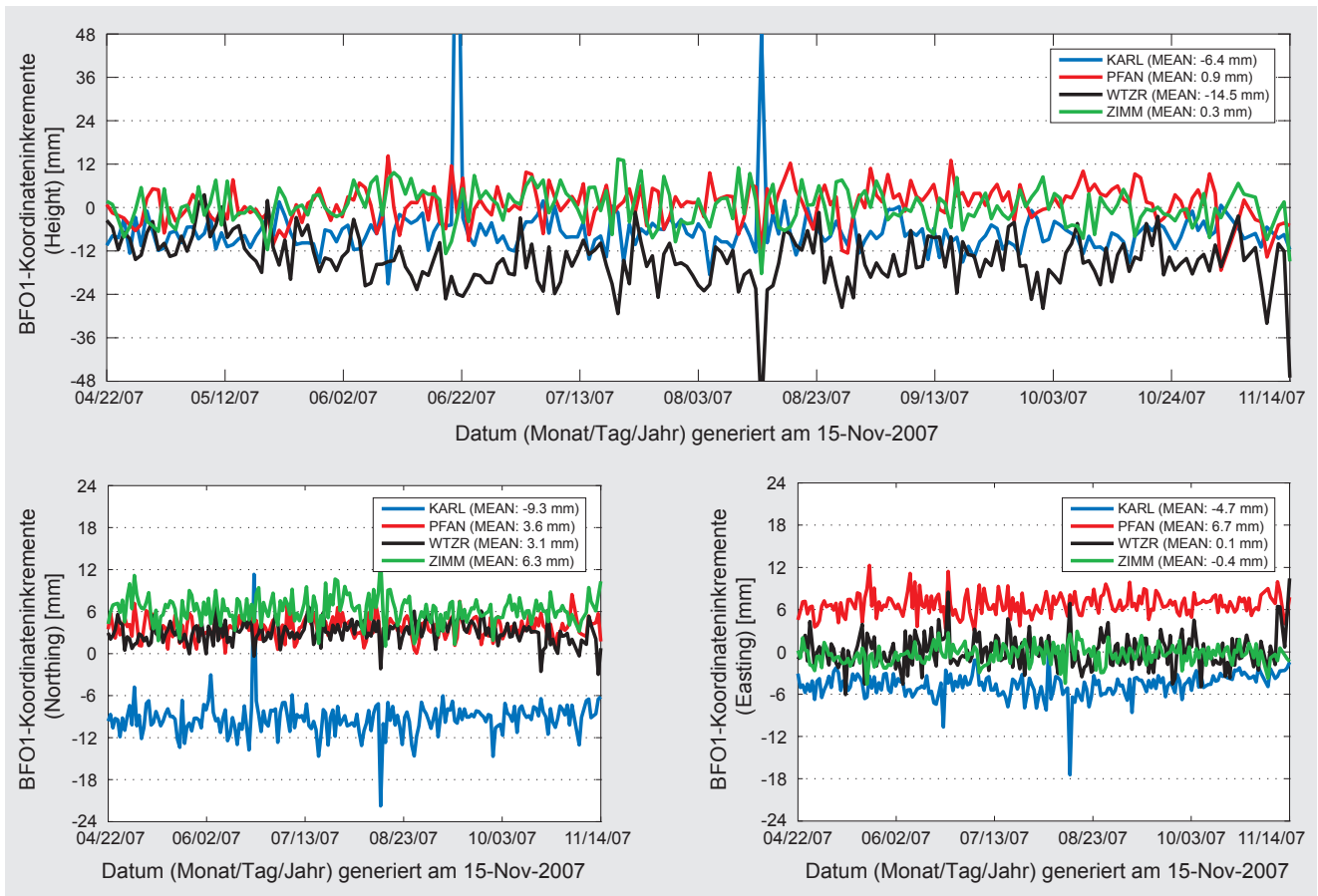


Abb. 11: Vergleich der BFO1-Koordinatendifferenzen, Basislinienlösungen reduziert um tägliche Netzlösungen (DOY2007: 112–318); oben: Höhe, unten links: Northing, unten rechts: Easting

Tab. 5: Koordinatengenauigkeiten der Permanentstationen im ITRF2000 (Epoche: 1997.0)

Permanentstation	Kartesisches System			Lokales topozentrisches System		
	σ_X [mm]	σ_Y [mm]	σ_Z [mm]	σ_N [mm]	σ_E [mm]	σ_U [mm]
KARL	37	9	41	10	7	55
PFAN	8	2	9	2	2	12
WTZR	1	1	2	1	1	2
ZIMM	2	1	2	1	1	3

der neutrosphärischen Laufzeitverzögerung (Rothacher und Beutler 1998) können daraus Rückschlüsse auf Höhenschwankungen der Station BFO1 in Abhängigkeit von variierenden neutrosphärischen Bedingungen gezogen werden.

Alle Auswertergebnisse (z.B. Koordinatenzeitreihen, Genauigkeitsmaße) werden auf der Webseite www-gpi.physik.uni-karlsruhe.de/pub/widmer/BFO/recent_data.html zeitnah und kostenfrei zur Verfügung gestellt.

4 Schlussfolgerung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden die am BFO (Black Forest Observatory) in Schiltach/Schwarzwald erfassten GNSS-Besobachtungen sowohl mittels Post-Prozessierung als auch in Nahezu-Echtzeit (NRT: Near-Real-Time) ausgewertet. Hierzu wurde eine Steuereinheit zur Datenauswertung entwickelt, die speziell auf die Bedingungen von NRT-Auswertungen abgestimmt ist. Diese Software kann jedoch auch zur Post-Prozessierung genutzt werden.

Basierend auf Voruntersuchungen wurde die Datenqualität der Station BFO1 und die Reproduzierbarkeit der BFO1-Stationskoordinaten im Speziellen unter Berücksichtigung der Bewaldungssituation untersucht. Im

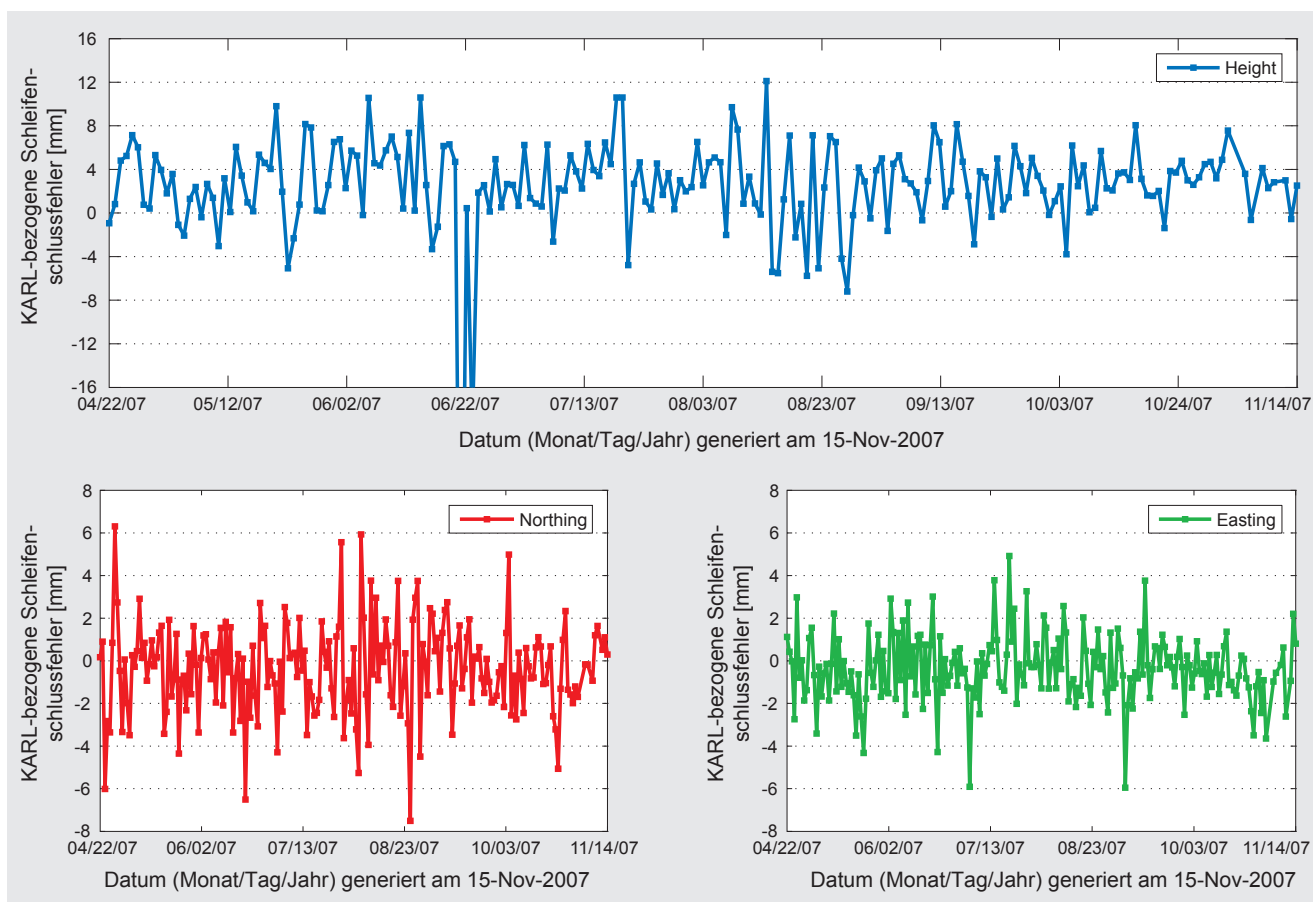


Abb. 12: KARL-bezogene Schleifenschlussfehler (DOY2007: 112–318); oben: Höhe, unten links: Northing, unten rechts: Easting

Bezug auf die NRT-Auswertung wurde eine Strategie zur Automatisierung der Auswerte-, Analyse- und Präsentationsprozesse vorgestellt.

Die Auswerteergebnisse zeigen, dass die BFO1-Koordinaten trotz schlechter Datenqualität (Bewaldung) mittels Netzlösung mit einer Wiederholbarkeit von wenigen Millimetern bestimmt werden können. Eine komplette Abschattung des Bereichs unter einem Elevationswinkel von 30° – beispielsweise durch wachsende Bäume – kann zu einer Änderung der ermittelten ellipsoidischen Höhe von ca. 5 cm führen, obwohl die entsprechende innere Genauigkeit unter 1 cm bleibt. Weiterhin können statt präzisen IGS-Endprodukten (z.B. Satellitenbahndaten) NRT-Produkte ohne signifikanten Qualitätsverlust bei der Ermittlung der Stationskoordinaten verwendet werden.

Unter Anwendung der automatisierten NRT-Auswertung, die mittels Kombination verschiedener Softwarepakete mit einer nutzerinteraktiven Oberfläche realisiert wurde, stehen die mittleren BFO1-Koordinaten im Untersuchungszeitraum mit einer Lagestabilität $\sigma_N = \pm 1.4$ mm bzw. $\sigma_E = \pm 1.3$ mm und einer Höhenwiederholbarkeit $\sigma_H = \pm 4.9$ mm zeitnah (in der Regel mit einer zeitlichen Verzögerung von maximal zehn Stunden) zur Verfügung.

Beim Vergleich von Basislinien- mit Netzlösungen weist die Basislinie KARL-BFO1 auf Grund der schlechteren ITRF2000-Festlegung der Permanentstation KARL die größten systematischen Koordinatenabweichungen auf. Begründet in der größten Basislinienlänge liefert die Basislinie WTZR-BFO1 für die ellipsoidischen Höhen der Station BFO1 die schlechtesten Ergebnisse. Zur Kontrolle der Datenqualität der umliegenden Permanentstationen wird neben den BFO1-bezogenen Netzauswertungen eine zusätzliche Schleife mittels Basislinienlösungen für die Anschlusspunkte ausgewertet. Die daraus resultierenden KARL-bezogenen Schleifenschlussfehler schwanken im Millimeterbereich, was die hohe Datenqualität der Permanentstationen belegt.

Die in dieser Arbeit präsentierten Ergebnisse und Genauigkeitsangaben sind von den in der Bernese GPS Software 5.0 realisierten funktionalen und stochastischen Modelle abhängig, ebenso jedoch von der angewandten Auswertestrategie. Deshalb sind neben Eigenbewegungen dieser Station Modellrestfehler (z.B. Atmosphäre, Empfangsantenne, Schneeakkumulation) in den dargestellten BFO1-Koordinateninkrementen enthalten. In diesem Kontext ist die Bestimmung von absoluten individuellen Kalibrierwerten für die GNSS-Antenne der Station BFO1 vorgesehen. Darüber hinaus sollen detaillierte Studien die Minimalelevation betreffend durchgeführt werden,

um den systematischen Einfluss von geändertem Baumbewuchs zu validieren.

Für weiterführende Untersuchungen ist die Integration einer weiteren Permanentstation im westlichen Bereich des bestehenden Netzes geplant, so dass eine bessere Netzgeometrie mit homogen verteilten Permanentstationen garantiert werden kann. Begründet in den schlechten ITRF2000-Koordinaten der Station KARL werden aktuell Untersuchungen hinsichtlich der stochastischen Handhabung der umliegenden Permanentstationen durchgeführt. In diesem Zusammenhang erscheint ebenfalls der Übergang zu einer alternativen Datenanalyse zweckmäßig, bei der problembehaftete Referenzstationen der Tagesnetzlösungen unmittelbar identifiziert werden können, (z.B. no-net-Translationslagerungen der Tageslösungen).

Des Weiteren wird ein Übergang auf das ITRF2005 (Altamimi et al. 2007) und eine anschließende Reprozessierung aller bisher erfassten Daten angestrebt. Dies erscheint wichtig, da insbesondere für die Station KARL die Unterschiede der ITRF-Realisierungen signifikante Änderungen der Basislinienergebnisse erwarten lassen. Im Zuge dieser Maßnahme sollen unter anderem ebenso zeitlich höher aufgelöste Koordinatenschätzungen für die Station BFO1 erzeugt werden.

Dank

Die Autoren danken allen Mitarbeitern des BFO für die tatkräftige Unterstützung und die wertvollen Anregungen während der gesamten Forschungsarbeit. Ebenso danken die Autoren einem anonymen Reviewer sowie Prof. Dr.-Ing. Jürgen Müller für konstruktives und zielgerichtetes Feedback.

Literatur

- Altamimi, Z., Collilieux, X., Legrand, J., Garayt, B., Boucher, C.: ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters. *Journal of Geophysical Research* 112 (B09401), doi:10.1029/2007JB004949, 2007.
- Altamimi, Z., Sillard, P., Boucher, C.: ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for earth science applications. *Journal of Geophysical Research* 107 (B10) S. 2214 ff., doi:10.1029/2001JB000561, 2002.
- Amalvict, M., Hinderer, J., Rozsa, S.: Absolute gravity measurements and GPS observations along a profile crossing the Rhine Graben from the Vosges to the Black Forest. *EOS. Transactions AGU* 85 (17), Joint Assembly Suppl., Abstract G41C-06, 2004.

- BFO: www.gik.uni-karlsruhe.de/bfo.html, zuletzt besucht am 1.4.2008, 2007.
- Bruyninx, C.: The EUREF Permanent Network: a multi-disciplinary network serving surveyors as well as scientists. *GeoInformatics* 7, S. 32–35, 2004.
- Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P., Meindl, M.: *Bernese GPS Software Version 5.0*. Astronomisches Institut, Universität Bern, Schweiz, 2007.
- Dietrich, R., Dach, R., Engelhardt, G., Ihde, J., Korth, W., Kutterer, H., Lindner, K., Mayer, M., Menge, F., Miller, H., Mueller, C., Niemeier, W., Perl, J., Pohl, M., Salbach, H., Schenke, H.-W., Schoene, T., Seeber, G., Veit, A., Voelksen, C.: Ergebnisse der SCAR GPS Kampagnen – ITRF-Koordinaten und Geschwindigkeiten. In: Dietrich, R. (Hrsg.): *Deutsche Beiträge zu GPS-Kampagnen des Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR) 1995–1998*. DGK B 310, München, S. 11–20, 2000.
- Dow, J.M., Neilan, R.E., Gendt, G.: The International GPS Service (IGS): Celebrating the 10th Anniversary and Looking to the Next Decade. *Advances in Space Research* 36 (3) S. 320–326, doi:10.1016/j.asr.2005.05.125, 2005.
- Emter, D., Wenzel, H.-G., Zürn, W.: *Das Observatorium Schiltach*. DGG Mitteilungen 3, S. 2–15, 1999.
- Heck, B.: *Rechenverfahren und Auswertemodelle der Landesvermessung, Klassische und moderne Methoden*, 3. neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2003.
- Hugentobler, U., Meindl, M., Beutler, G., Bock, H., Dach, R., Jäggi, A., Urschl, C., Mervart, L., Rothacher, M., Schaer, S., Brockmann, E., Ineichen, D., Wiget, A., Wild, U., Weber, G., Habrich, H., Boucher, C.: *CODE IGS Analysis Center Technical Report 2003/2004*, 2004. Quelle: www.aiub-download.unibe.ch/papers/codar_0304.pdf.
- Meeus, J.: *Astronomical Algorithms*. Willmann-Bell, Richmond (2. Aufl.), 2000.
- Niell, A.E.: Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. *Journal of Geophysical Research* 101 S. 3227–3246, 1996.
- Saastamoinen, J.: Contributions to the theory of atmospheric refraction. *Bulletin Géodésique* 48 (105) S. 279–298, 48 (106) S. 383–397, 49 (107) S. 13–34, 1973.
- Rothacher, M., Beutler, G.: The Role of GPS in the Study of Global Change, Physics and Chemistry of the Earth 23 (9–10) S. 1029–1040, 1998.

Anschrift der Autoren

Dipl.-Ing. Xiaoguang Luo | Dr.-Ing. Michael Mayer
 Geodätisches Institut
 Universität Karlsruhe (TH)
 Englerstraße 7, 76128 Karlsruhe
 Tel.: 0721 608-3668
luo@gik.uni-karlsruhe.de | mmayer@gik.uni-karlsruhe.de