

GNSS-Auswertung mittels Precise Point Positioning (PPP)*

Anja Heßelbarth

Zusammenfassung

Precise Point Positioning (PPP) ist eine GNSS-Auswertetechnik zur präzisen Positionsbestimmung, die im Gegensatz zu herkömmlichen, differenziellen Auswertansätzen ohne unmittelbare Verfügbarkeit von Beobachtungen einer Referenzstation bzw. eines Referenzstationsnetzes auskommt. Allerdings erfordert dieses Verfahren neben der Berücksichtigung zahlreicher Korrekturen die Einführung präziser Satellitenbahn- und Uhrinformationen. Die notwendigen Modelle und die Anforderungen an diese Informationen werden in diesem Artikel beschrieben. Anhand von statischen und kinematischen GPS- und GLONASS-Zweifrequenzdatensätzen wurde die Qualität der PPP-Lösungen hinsichtlich Konvergenzzeit und Koordinatengenauigkeit untersucht. Die Ergebnisse beweisen, dass bei kontinuierlichen GPS- und GLONASS-Beobachtungen sowohl bei statischen als auch bei kinematischen Anwendungen cm-genaue Positionen erreichbar sind.

Summary

Precise Point Positioning (PPP) is a GNSS analysis technique for precise GNSS positioning without using observations from a reference station or reference station network, as conventional differential basic algorithms do. Therefore this method requires the introduction of precise satellite orbits and clock information beside consideration of numerous further corrections. The paper describes the necessary models and the condition for this information. The quality of PPP solutions in terms of convergence time and coordinate accuracy was analysed with static and kinematic GPS and GLONASS dual-frequency data. Using continuous GPS and GLONASS observations, positioning with centimeter precision is possible for static and kinematic applications.

1 Einführung

Im Allgemeinen beruhen präzise Positionsbestimmungen auf differenziellen Auswertungen, d. h. es sind neben den Beobachtungen der zu bestimmenden Station auch die von einer oder mehreren Referenzstationen notwendig. Schon seit mehreren Jahren gibt es ein alternatives Verfahren, das *Precise Point Positioning* (PPP), das ohne Referenzstationen im klassischen Sinne auskommt (Zumberge 1997, Kouba und Heroux 2000). Liegen kontinuierliche Zweifrequenz- (Code- und) Phasenbeobachtungen vor und werden präzise Satellitenbahn- und Uhrdaten eingeführt sowie die zahlreichen erforderlichen Korrekturen verwendet, sind cm-genaue Positionen erreichbar.

Für PPP ergeben sich zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten. Es kann zur präzisen statischen Punktbestimmung oder zur kinematischen Positionsbestimmung von bewegten Plattformen wie z. B. Satelliten, Flugzeugen, Schiffen und Bojen eingesetzt werden. Der vom *Natural Resources Canada* (NCR) betriebene Dienst ermöglicht die Berechnung von PPP-Positionen. Dieser PPP-Service (www.geod.nrcan.gc.ca/products-produits/ppp_e.php) nutzt die präzisen Ephemeriden und Uhrkorrekturen des *International GNSS Service* (IGS). Allerdings sind bisher keine Auswertungen von GLONASS-Beobachtungen möglich.

Der vorliegende Beitrag gibt zunächst einen Überblick über die erforderlichen präzisen Ephemeriden und Uhrinformationen. Weiterhin werden die notwendigen Korrekturen bzw. Korrekturenmodelle sowie der Ausgleichsalgorithmus behandelt. Die anschließenden Ergebnisse zeigen das Potenzial von PPP für GPS bzw. kombinierte GPS/GLONASS-Auswertungen anhand von statisch und kinematisch gemessenen Datensätzen. Für die Auswertungen wurden am Geodätischen Institut der TU Dresden entwickelte Software-Module verwendet.

2 Präzise Ephemeriden und Uhrkorrekturen

Bei einer relativen Positionsbestimmung wirken Abweichungen der Satellitenbahn und der Satellitenuhr auf beiden Stationen und werden durch Differenzbildung deutlich minimiert bzw. eliminiert. Bei einer PPP-Auswertung wirken sich diese Fehler im vollen Umfang auf die Positionsberechnung aus. Deshalb sind präzise Ephemeriden und Uhrkorrekturen unabdingbar. Diese Produkte werden vom IGS und von den verschiedenen *Analytical Centers* (ACs) des IGS zur Verfügung gestellt. Derzeit bestimmen acht bzw. sechs ACs präzise Ephemeriden bzw. Uhrkorrekturen (Senior u. a. 2008). Das IGS kombiniert die einzelnen Lösungen und stellt sie dem Nutzer kostenfrei zur Verfügung (Kouba 2009). Tab. 1 zeigt die Genauigkeiten, Verfügbarkeiten und die Intervalle dieser Orbits und Uhrkorrekturen (IGS 2009).

Um für jeden Beobachtungszeitpunkt eine Satellitenposition und Uhrkorrektur zu erhalten, ist eine Interpolation zwischen den sogenannten Stützpunkten notwendig. Werden die 30-sekündigen IGS-Uhrkorrekturen

* Überarbeitete Fassung des Vortrages beim 83. DVW-Seminar »GNSS 2009: Systeme, Dienste, Anwendungen« am 18. und 19. März 2009 in Dresden. Die Seminarbeiträge sind als Band 57 in der Schriftenreihe des DVW erschienen und können beim Wißner-Verlag bestellt werden.

Tab. 1: IGS-Produkt Tabelle

		GNSS-System	Genauigkeit	Verfügbarkeit	Intervall
Ultra-Rapid (predicted half)	Orbits	GPS	~ 10 cm	Echtzeit	15 min
	Sat. Uhren	GPS	< 5 ns		
Ultra-Rapid (observed half)	Orbits	GPS	~ 5 cm	3 Stunden	15 min
	Sat. Uhren	GPS	~ 0,2 ns		
Rapid	Orbits	GPS	< 5 cm	17 Stunden	15 min
	Sat. Uhren	GPS	0,1 ns		5 min
Final	Orbits	GPS/ GLONASS	< 5 cm	13 Tage	15 min
	Sat. Uhren	GPS	< 0,1 ns		5 min/30 s

verwendet und ist das Intervall der Beobachtungen gleich oder größer als 30 Sekunden, ist keine Interpolation erforderlich.

Ein Nachteil dieser IGS-Produkte ist, dass es für GLONASS keine Uhrkorrekturen gibt und somit nur GPS-Beobachtungen ausgewertet werden können. Das einzige AC, welches derzeit GLONASS-Ephemeriden zusammen mit Uhrkorrekturen anbietet, ist das European Space Operations Center (ESOC) in Darmstadt (Springer u. a. 2008). Allerdings liegen die Uhrkorrekturen nur in einem fünf Minuten Intervall vor. Die Ephemeriden sind wie die IGS-Produkte in einem Intervall von 15 Minuten erhältlich.

3 Korrektionsmodelle für PPP

Die Korrekturen, die neben den atmosphärischen Modellierungen für eine präzise Positionsbestimmung mit Code- und Phasenbeobachtungen notwendig sind, können in zwei Gruppen unterteilt werden. Zum einen sind die verschiedenen Effekte am Satelliten zu korrigieren. Zum anderen müssen die ständigen Verformungen der Erde, die direkt auf die Beobachtungsstation wirken, modelliert und berücksichtigt werden. Tab. 2 gibt einen Überblick über die einzelnen Korrekturen. Deren Auswirkungen auf die Positionsbestimmung wurden mithilfe zahlreicher Testdatensätze empirisch ermittelt und bestätigen die Untersuchungen von Kouba (2009). Es wird deutlich,

Tab. 2: Korrektionsmodelle

	Ursache	Korrektionsparameter	Auswirkung bei Nichtkorrektur
Satellitenantennenoffset	Differenz zwischen Phasenzentrum (Messzentrum) und Massenzentrum (Bezugspunkt der präz. Ephemeriden)	Korrektur der geometrischen Distanz und der Satellitenkoordinaten	Höhenfehler von bis zu 10 cm, wenige cm in der Lage
Satellitenphasenzentrumsvariationen	Abweichung zwischen tatsächlicher und realer Phasenfront	Korrektur der Phasenbeobachtungen	Höhenfehler von max. einem mm
Phase Wind Up	Rotationsbewegung des Satelliten führt zur Verdrehung der Trägerphase	Korrektur der Phasenbeobachtungen	Lage- und Höhenfehler von einigen mm
Erdgezeiten	Verformung der Erde durch Anziehungskräfte von Sonne und Mond, Unterscheidung in periodische und permanente Anteile sowie Polgezeiten	Korrektur der Stationskoordinaten	Höhenfehler von bis zu einigen dm, Lagefehler von bis zu einigen cm
Ozeanische Auflasten	Reaktion der Erdoberfläche auf die Belastung der ozean. Gezeiten	Korrektur von küstennahen Stationen, vor allem bei kinematischen Auswertungen	Höhenfehler von bis zu 5 cm
Subtägliche Erdrotationsparameter (Polbewegung)	Verlagerung der Erdachse bezüglich der Erdkruste, bezogen auf das erdfeste Koordinatensystem	Korrektur der Stationskoordinaten	Lagefehler von wenigen cm

dass die meisten Effekte bei Nichtkorrektur die Höhe um mehrere cm, und teilweise sogar dm, verfälschen könnten. Ihre genaue Modellierung und Berechnung ist daher entscheidend für die Qualität einer PPP-Lösung.

Korrekturen der Phasenzentrumsoffsets und -variationen an der Empfangsantenne, die auch bei einer relativen Positionsbestimmung notwendig sind, werden in diesem Abschnitt nicht speziell aufgeführt, sind aber genauso erforderlich. Informationen dazu sind in Schmid u. a. (2006) zu finden.

Weitere Informationen zu Satellitenantennenoffsets, Phasenzentrumsvariationen und *Phase Wind Up* und deren Berechnung sind u. a. in Xu (2003), Rothacher (2006), Schmid und Rothacher (2003), Kouba (2009) und Leick (2004) enthalten. Die Modellierung der Erdgezeiten, ozeanischen Auflasten und der Erdrotationsparameter sind ausführlich in den *International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) Convention* (McCarthy und Petit 2003) sowie Kouba (2009) beschrieben.

4 Atmosphärische Korrektur

4.1 Ionosphäre

Mithilfe von Zweifrequenz-Messungen können die ionosphärischen Laufzeitverzögerungen erster Ordnung berechnet und so nahezu vollständig eliminiert werden. Folgende Gleichung zeigt die ionosphärenfreie Linearkombination Φ_0 für die Phasenbeobachtungen Φ_1 und Φ_2 auf beiden Frequenzen f_1 und f_2 (Xu 2003):

$$\Phi_0 = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \Phi_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \Phi_2. \quad (1)$$

Gl. (1) kann für die Codebeobachtungen entsprechend übernommen werden. Stehen nur Einfrequenz-Messungen zur Verfügung, müssen Modelle verwendet werden, die die Ionosphärenkorrekturen nur ungenau wiedergeben und für PPP daher eher ungeeignet sind.

4.2 Troposphäre

Die Berechnung der troposphärischen Laufzeitverzögerung unterteilt sich in eine Modellierung des feuchten und hydrostatischen Anteils. Beide Anteile ergeben sich aus einer Laufzeitverzögerung im Zenit und einer sogenannten Projektionsfunktion (engl. *Mappingfunction*). Die vollständige troposphärische Laufzeitverzögerung $T(E)$ in Abhängigkeit der Elevation E lautet demnach wie folgt (Leick 2004):

$$T(E) = Z_h m_h(E) + Z_f m_f(E). \quad (2)$$

Z_h, Z_f sind definiert als Laufzeitverzögerungen im Zenit für den hydrostatischen und feuchten Anteil. Diese werden durch die Standardatmosphärenparameter atmosphärischer Druck, Wasserdampfpartialdruck und Temperatur bestimmt. Modelle sind u. a. von Saastamoinen (1973) entwickelt worden (Leick 2004). Um die Verzögerungen im Zenit auf die jeweilige Elevation umrechnen zu können, werden Projektionsfunktionen für den hydrostatischen $m_h(E)$ und feuchten $m_f(E)$ Anteil verwendet. Die folgende Gleichung ist Grundlage für die feuchten und hydrostatischen Projektionsfunktionen von Niell (NMF) (Niell 1996), die *Global Mapping Function* (GMF) von Boehm (Boehm u. a. 2006a) und die *Vienna Mapping Function 1* (VMF1) von Boehm (Boehm u. a. 2006b).

$$m_{h/f}(E) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1 + c}}}{\sin(E) + \frac{a}{\sin(E) + \frac{b}{\sin(E) + c}}} \quad (3)$$

Für die Berechnung der Parameter a, b und c sind bei den Modellen der NMF und der GMF nur Informationen zu den Stationskoordinaten (Breite und Höhe) und der Tag des Jahres notwendig. Die NMF basiert auf Radiosondendaten der nördlichen Halbkugel. Die GMF-Parameter werden mittels Kugelflächenfunktionen aus Daten numerischer Wettermodelle (z. B. *European Centre for Medium-Range Weather Forecast* ECMWF) empirisch ermittelt (Boehm u. a. 2006a). Die VMF1 basiert ebenfalls auf den Daten des ECMWF. Die Parameter b und c werden weiterhin empirisch bestimmt. Der Parameter a wird über eine Strahlverfolgung bei einer Elevation von 3° ermittelt und ist in einem globalen Gitter ($2,5^\circ \times 2,0^\circ$) bzw. für ausgewählte Stationen in einer sechsständigen Auflösung verfügbar (Boehm u. a. 2006b).

Bei einer PPP-Auswertung ist es sinnvoll, zunächst den hydrostatischen Anteil der troposphärischen Laufzeitverzögerung über eine Standardmodellierung im Zenit unter Verwendung einer Projektionsfunktion zu berechnen und die Code- und Phasenbeobachtungen entsprechend zu korrigieren. Der feuchte Anteil (und der hydrostatische Restfehler) werden später im Ausgleichsprozess als Unbekannte mitbestimmt.

5 Auswertung

Die Grundlage für die Auswertung sind die Beobachtungsgleichungen für die ionosphärenfreie Linearkombination der Code- und Phasenbeobachtungen P_0 und Φ_0 (Kouba 2009):

$$P_0 = \rho + c(dt - dT) + T(E) + \varepsilon_p \quad (4)$$

$$\Phi_0 = \rho + c(dt - dT) + T(E) + N\lambda + \varepsilon_\phi. \quad (5)$$

Die geometrische Distanz ρ bestimmt sich aus den Näherungskoodinaten der Beobachtungsstation sowie den korrigierten Satellitenkoodinaten. Die Parameter dt und dT beschreiben die Empfänger- bzw. Satellitenuhrabweichung der GPS-Systemzeit. Der Parameter c ist die Lichtgeschwindigkeit und $T(E)$ ist die troposphärische Laufzeitverzögerung in Abhängigkeit der Elevation E . Die Parameter N und λ sind die Mehrdeutigkeiten sowie

wichtung sind die Elevation und der Interpolationsfehler zwischen den Stützpunkten der Satellitenuhrkorrekturen. Anhand von umfangreichen Untersuchungen wurde folgende Gewichtungsfunktion p empirisch ermittelt (Heßelbarth und Wanninger 2008):

$$p = \frac{1}{s_E^2 + s_{\Delta t}^2 + s_M^2} \tag{6}$$

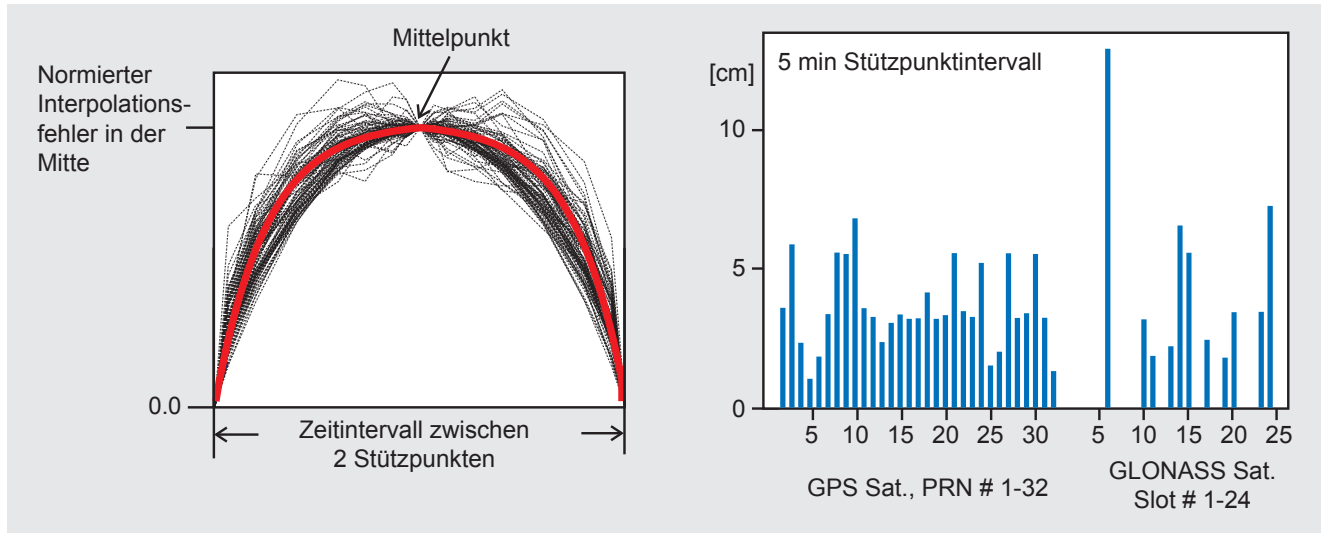


Abb. 1: Interpolationsfehler der Satellitenuhrkorrektur

die Wellenlänge der Trägerphasen bzw. Trägerphasenkombination. Das Messrauschen und Mehrwegeeffekte für die Code- und Phasenbeobachtungen sind in ϵ_P bzw. ϵ_ϕ enthalten.

Das Ergebnis des Ausgleichsprozesses ist der Vektor der Unbekannten. Darin enthalten sind die Koordinatendifferenzen zu den Näherungskoodinaten, die geschätzten Troposphärenparameter, die Mehrdeutigkeiten und der Empfängeruhrfehler. Da die Mehrdeutigkeiten im Ausgleichsprozess als reelle Werte mitgeschätzt werden (*Float-Lösung*), sollten kontinuierliche Beobachtungen vorliegen. Signalunterbrechungen oder *Cycle Slips* erfordern die Schätzung von zusätzlichen Mehrdeutigkeitsparametern.

Der Unterschied zwischen einer statischen und kinematischen Auswertung liegt in der Anzahl der zu bestimmenden Unbekannten. Bei der Berechnung einer statischen Messung werden die Koordinaten während der gesamten Ausgleichung als unveränderlich angenommen. In einer kinematischen Auswertung müssen diese für jede Epoche als unbekannte Parameter neu bestimmt werden.

Für jede Beobachtung wird in der Hauptdiagonalen der Gewichtsmatrix P ein Gewicht eingeführt. Zunächst sind die Beobachtungsgrößen Code und Phase zu unterscheiden. Die Codebeobachtungen haben eine größere Standardabweichung und erhalten dementsprechend ein niedrigeres Gewicht. Weitere Einflussgrößen für die Ge-

Die Abhängigkeit zwischen Elevation E und Beobachtungsgenauigkeit wird beschrieben durch die Standardabweichung s_E (7). Beobachtungen in niedrigen Elevationen weisen größere Messabweichungen auf und werden dementsprechend abgewichtet.

$$s_E = \begin{cases} \frac{1}{\sin(E)} \cdot 0,063 \text{ m} & E \leq 25^\circ \\ 0,015 & E > 25^\circ \end{cases} \tag{7}$$

Der zweite Term in (6) beschreibt den Einfluss der Uhrinterpolation. Dabei bestimmt sich $s_{\Delta t}$ aus der Zeitdifferenz zum nächsten Uhrkorrektionsstützpunkt und s_M ist der empirisch ermittelte Interpolationsfehler in der Mitte zwischen zwei Stützpunkten.

In Abb. 1 ist der Zusammenhang zwischen Interpolationsfehler und Zeitdifferenz zum nächsten Stützpunkt sowie der Interpolationsfehler in der Mitte zweier Stützpunkte bei einem fünf Minuten Uhrkorrektionsintervall für die GPS und GLONASS-Satelliten dargestellt.

In Abb. 1/links ist zu erkennen, dass der Interpolationsfehler mit zunehmender Entfernung zum Stützpunkt größer wird. Wie groß dieser wird, ist abhängig von der Stabilität der jeweiligen Satellitenuhr (Abb. 1/rechts). Die Interpolationsfehler bei GPS-Satelliten, die Rubidiumuhren nutzen, sind deutlich geringer als diejenigen, die mit Cäsiumuhren arbeiten. Ursache dafür ist die höhere Kurzzeitstabilität der Rubidiumuhren. Alle GLONASS-Satelliten nutzen Cäsiumuhren. In diesem Fall ist die Kurzzeitstabilität und demzufolge der Interpolationsfeh-

ler abhängig vom Alter der Uhr. Die neueren Uhren der GLONASS-M Satelliten arbeiten genauso stabil wie GPS-Uhren (HeBelbarth und Wanninger 2008).

Beträgt der Stützpunktabstand der Uhrkorrekturen nur 30 Sekunden ist dieser Interpolationsfehler ca. fünfmal geringer als bei einem Intervall von fünf Minuten und es kann eventuell nur eine Elevationsabhängigkeit in die Gewichtung einfließen. Die Gewichtungsfunktion vereinfacht sich dann zu:

$$p = \frac{1}{s_E^2} \tag{8}$$

6 Ergebnisse

Die beschriebenen Korrekturen, Atmosphärenmodelle, Ausgleichungen und Gewichtungen wurden in verschiedenen PPP-Software-Modulen (Wapp + TripleP) umgesetzt. Um die Qualität des PPP-Algorithmus zu untersuchen, wurden kinematische und statische Zweifrequenz-Datensätze (Code und Phase) ausgewertet. Kriterien für die Beurteilung der Qualität waren die Konvergenzzeit und die erreichte Genauigkeit am Ende einer Beobachtungszeit von ca. vier Stunden. Bei den statischen und kinematischen Auswertungen wurden jeweils folgende Varianten gegenübergestellt und getestet:

- GPS- und kombinierte GPS/GLONASS-Beobachtungen,
- 30-sekündige und fünfminütige Uhrkorrektionsintervalle,
- elevationsabhängige (Gl. 8) und komplette Gewichtungen (Gl. 6).

Da neben einer alleinigen GPS-Auswertung auch eine kombinierte GPS/GLONASS-Auswertung mit statischen

und kinematischen Daten durchgeführt wurde, konnten nur die präzisen Ephemeriden und Uhrkorrekturen von ESOC verwendet werden. Um möglichst genaue Uhrkorrekturen im 30 Sekunden Intervall zu erhalten, wurden die fünfminütigen Uhrdaten mittels Phaseninterpolation verdichtet (HeBelbarth und Wanninger 2008). Alle Datensätze wurden im Juni 2008 gemessen. Zu diesem Zeitpunkt waren 14 GLONASS-Satelliten einsatzfähig (IAC 2009).

6.1 Statische Auswertung

Um das Konvergenzverhalten zu untersuchen, wurden in einem abschattungsfreien Gebiet in Dresden mit einem Zweifrequenzempfänger (Leica GRX 1200 GG Pro) GPS- und GLONASS-Beobachtungen für mehrere Stunden und in einem Intervall von einer Sekunde aufgezeichnet. Die Elevationsmaske wurde in der späteren Auswertung auf 15° festgesetzt. Mittels einer Basislinienauswertung zu einer nahen Referenzstation konnte die Sollkoordinate dieser Station bestimmt werden. Durchschnittlich waren 7,5 GPS und 3,5 GLONASS Satelliten verfügbar. Der vorhandene Datensatz wurde im nächsten Schritt in verschiedene Beobachtungsblöcke (5, 10, 15 min usw.) unterteilt. Die errechneten Positionen wurden der Sollkoordinate gegenübergestellt. Aus diesen einzelnen Differenzen (Nord, Ost und Höhe) konnten anschließend die mittleren quadratischen Abweichungen als RMS-Werte berechnet werden. Abb. 2 zeigt den 3D RMS-Wert für die jeweils vier verschiedenen Varianten getrennt nach GPS- und kombinierter GPS/GLONASS-Auswertung.

Der Vergleich der linken und rechten Abbildung zeigt, dass die GLONASS-Beobachtungen die Konvergenzzeiten bei allen Lösungstypen verkürzen. Es kann verallgemeinert werden, dass eine große Anzahl von Beobachtungen

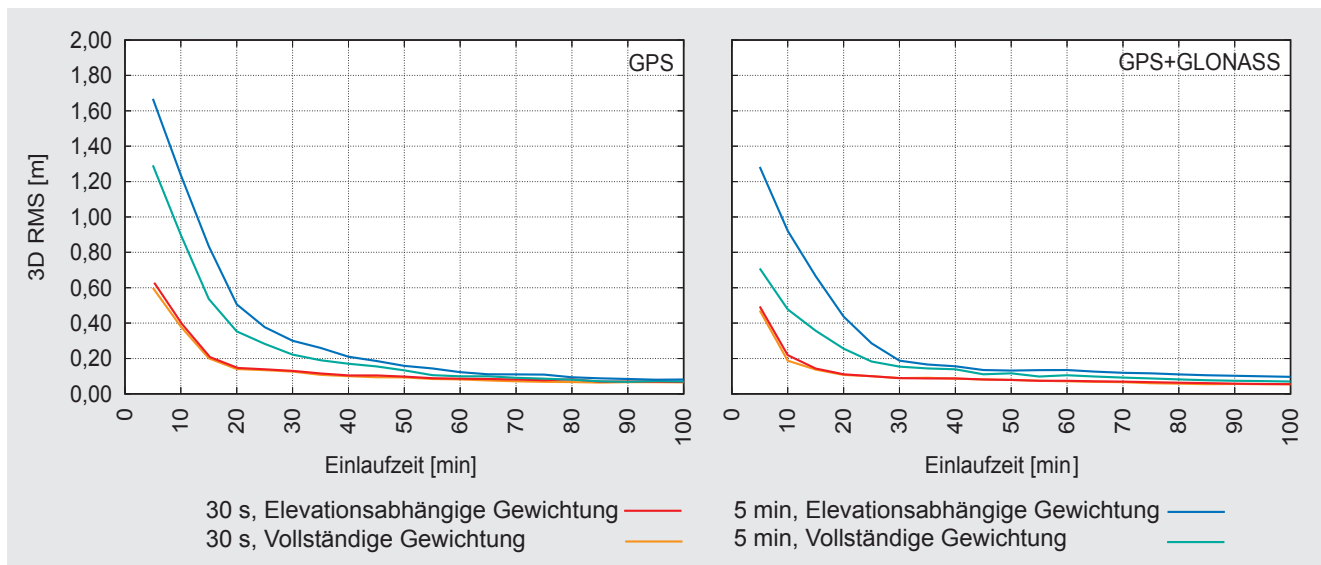


Abb. 2: Konvergenzverhalten einer statischen Messung

zu einer Genauigkeitssteigerung, besonders in der ersten Stunde, beiträgt. Bei einem 30-sekündigen Uhrintervall ist nach 100 Minuten die kombinierte GPS/GLONASS-Lösung mit einem 3D RMS-Wert von 0,055 m besser als eine reine GPS-Lösung mit 0,065 m. Seit Juni 2009 sind 18 GLONASS-Satelliten betriebsbereit (IAC 2009). Die zusätzlichen Beobachtungen werden die Konvergenzzeit noch weiter verkürzen.

und Höhe ermittelt. Die Tab. 3 und 4 stellen die acht Lösungen dar.

Insgesamt ist festzustellen, dass bei allen acht Lösungen ein hohes Genauigkeitsniveau erreicht wird. Alle Varianten haben sich gegenüber der Lösung nach 100 Minuten weiter verbessert. Die Nordkomponente wird am genauesten bestimmt. Die Höhe ist die am schlechtesten bestimmte Komponente. Die typischen Merkmale

Tab. 3: RMS-Werte für Nord/Ost/Höhe nach einer statischen PPP-Auswertung für GPS

Uhrintervall	Gewichtsfunktion	RMS _N [m]	RMS _E [m]	RMS _H [m]
30 s	vollständig	0,015	0,023	0,024
30 s	elevationsabhängig	0,016	0,022	0,027
5 min	vollständig	0,014	0,024	0,031
5 min	elevationsabhängig	0,015	0,023	0,035

Tab. 4: RMS-Werte für Nord/Ost/Höhe nach einer statischen PPP-Auswertung für GPS/GLONASS

Uhrintervall	Gewichtsfunktion	RMS _N [m]	RMS _E [m]	RMS _H [m]
30 s	vollständig	0,013	0,019	0,021
30 s	elevationsabhängig	0,013	0,017	0,023
5 min	vollständig	0,013	0,021	0,025
5 min	elevationsabhängig	0,015	0,024	0,028

Bei beiden Auswertungen führt ein verdichtetes Uhrintervall zu einer deutlich besseren Konvergenzzeit. Mit Verwendung von GLONASS-Beobachtungen kann mit den 30-sekündigen Satellitenuhrkorrekturen schon nach ca. zehn Minuten ein 3D RMS-Wert von 0,2 m erreicht werden. Die Interpolationsfehler der Satellitenuhrkorrekturen wirken sich demnach gerade am Anfang einer Messung, bei einer noch schwachen Geometrie, negativ auf die Positionsbestimmung aus. Im Gegensatz zu reinen GPS-Beobachtungen existieren bei einer kombinierten Messung auch nach 100 Minuten geringe Unterschiede in der erreichten Genauigkeit bei der Verwendung verschiedener Uhrintervalle. Möglicherweise beeinflussen die größeren Interpolationsfehler der älteren Cäsiumuhren der GLONASS-Satelliten das Ergebnis auch nach 100 Minuten noch negativ.

Während bei 30-sekündigen Uhrintervallen die elevationsabhängige Gewichtung ausreichend ist, sollte bei einem fünfminütigen Stützpunktstand eine vollständige Gewichtung angewandt werden, wie ein Vergleich der beiden Einlaufzeiten zeigt.

Neben dem Einlaufverhalten wurde auch untersucht, welche Genauigkeiten nach vier Stunden Beobachtungszeit erreicht werden. Dazu wurden 24 Stunden Beobachtungsdatensätze von verschiedenen europäischen IGS Stationen in vier Stunden-Blöcke unterteilt, ausgewertet und mit den Solllösungen verglichen. Aus den Abweichungen wurden die RMS-Werte in Nord, Ost

eine Float-Lösung werden somit bestätigt (Santerre und Lavoie 1991).

Die kombinierte Lösung liefert etwas bessere Resultate als die alleinige GPS-Auswertung. Eine vollständige Gewichtung nach Gl. 6 und ein 30-sekündiger Stützpunktstand der Uhrkorrektur führen zu weiteren, allerdings geringen, Genauigkeitsverbesserungen.

6.2 Kinematische Auswertung

Für die kinematische Auswertung stand ein knapp vierstündiger kinematischer Datensatz mit GPS/GLONASS-Beobachtungen und einem Intervall von einer Sekunde zur Verfügung. Die Aufzeichnung der Zweifrequenzdaten erfolgte mit einem Leica-Empfänger der Serie GRX 1200 in einem abschattungsfreien Gebiet in Dresden. Die Referenzlösung war die aus diesem Datensatz erzeugte relative Lösung zu einer nahen Referenzstation. Um Mehrwegeeffekte und troposphärische Restfehler zu minimieren, wurde die Elevationsmaske auf 15° gesetzt. In dem Zeitraum von vier Stunden waren durchschnittlich 7,5 GPS und 3,5 GLONASS Satelliten sichtbar.

Wie in Kapitel 6.1 beschrieben, wurde auch für die kinematische Lösung das Konvergenzverhalten untersucht. Der Beobachtungsdatensatz wurde wieder unterteilt und nach jeweils 5, 10, 15 min usw. wurden die RMS-Werte in Nord, Ost und Höhe berechnet und als 3D-Wert in Abb. 3 dargestellt. Auch hier zeigt der Vergleich der linken und rechten Abbildung, dass die zusätzlichen GLONASS-

Beobachtungen die Einlaufzeit verkürzen, dies sogar deutlicher als bei einer statischen Messung. Da bei einer kinematischen Messung deutlich mehr Unbekannte zu bestimmen sind, führen gerade diese zusätzlichen Beobachtungen zu einem schnelleren Erreichen der hohen Genauigkeit. Nach 100 Minuten erreichen GPS- und kombinierte GPS/GLONASS-Beobachtungen das gleiche Genauigkeitsniveau.

einer Beobachtungszeit von 100 Minuten bessere Ergebnisse erreicht werden. Bei einem Stützpunktabstand von 30 Sekunden werden mit der vollständigen Gewichtung nur bei kombinierten Messungen geringfügige Verbesserungen erreicht.

Ein Vergleich der Einlaufzeiten in Abb. 2 und 3 zeigt, dass aufgrund der deutlich höheren Anzahl von Unbekannten bei der kinematischen Auswertung bei einer stati-

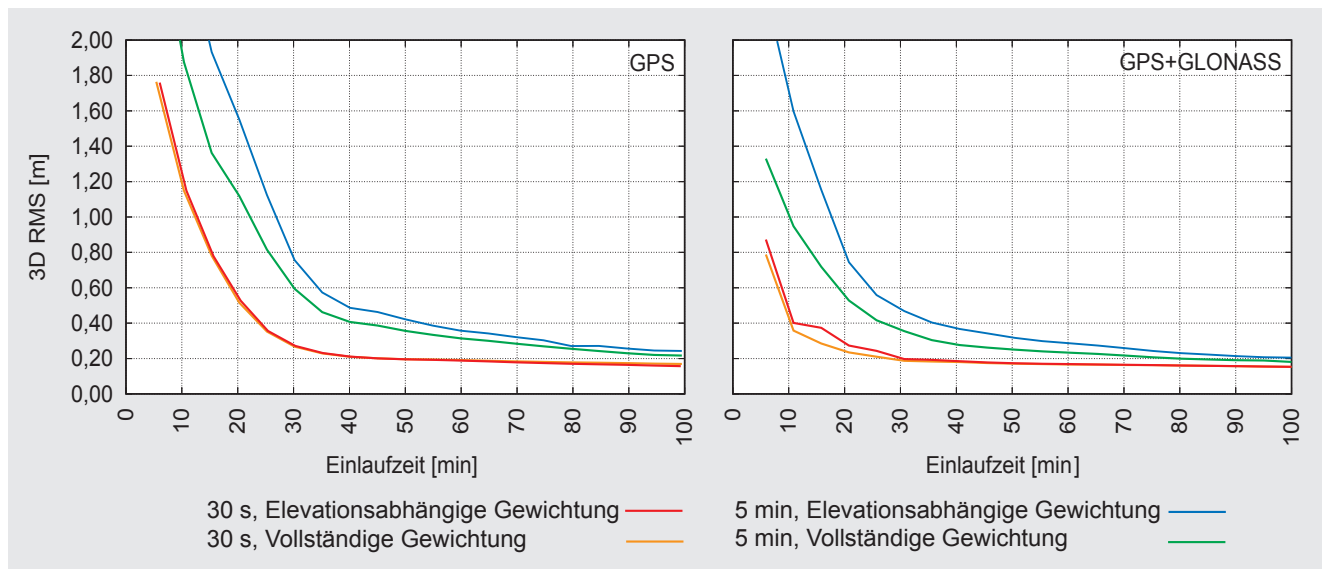


Abb. 3: Konvergenzverhalten einer kinematischen Messung

Auch das 30-sekündige Uhrintervall verbessert die Einlaufzeit deutlich und nach 30 bzw. 20 Minuten wird ein 3D RMS-Wert von 0,2m erreicht. Im Gegensatz zur statischen Messung ist der RMS-Wert auch nach 100 Minuten immer noch deutlich besser. Die Interpolationsfehler der Satellitenuhrkorrektur eliminieren sich demnach nicht mit zunehmender Beobachtungsdauer. Bei einem fünfminütigen Intervall der Uhrkorrektur sollte wieder die vollständige Gewichtungsfunktion (Gl. 6) verwendet werden, da damit auch nach

schen Messung die gleiche Genauigkeit nach einer deutlich kürzeren Beobachtungszeit erreicht wird.

Im zweiten Schritt wurde von diesem Datensatz die Genauigkeit der Koordinaten nach der kompletten Beobachtungszeit untersucht. Die RMS-Werte der einzelnen Berechnungsvarianten zur Referenzlösung sind in den Tab. 5 und 6 aufgeführt.

Auch in einer kinematischen Auswertung werden beim Vorhandensein von kontinuierlichen Phasendaten und einem Uhrintervall von 30 Sekunden hohe Genauigkei-

Tab. 5: RMS-Werte für Nord/Ost/Höhe nach einer kinematischen PPP-Auswertung für GPS

Uhrintervall	Gewichtsfunktion	RMS _N [m]	RMS _E [m]	RMS _H [m]
30 s	vollständig	0,013	0,019	0,031
30 s	elevationsabhängig	0,013	0,020	0,031
5 min	vollständig	0,027	0,025	0,054
5 min	elevationsabhängig	0,029	0,028	0,064

Tab. 6: RMS-Werte für Nord/Ost/Höhe nach einer kinematischen PPP-Auswertung für GPS/GLONASS

Uhrintervall	Gewichtsfunktion	RMS _N [m]	RMS _E [m]	RMS _H [m]
30 s	vollständig	0,012	0,017	0,029
30 s	elevationsabhängig	0,015	0,019	0,030
5 min	vollständig	0,024	0,024	0,049
5 min	elevationsabhängig	0,030	0,030	0,059

ten erreicht. Gerade die Lagegenauigkeit erreicht ungefähr das Niveau einer statischen Messung. Die Merkmale von *Float*-Lösungen werden auch für die kinematischen Auswertungen bestätigt.

Im Gegensatz zu einer statischen Messung werden alle RMS-Werte in Nord, Ost und Höhe bei einem

Wenn nur Uhrkorrekturen im fünf Minuten Intervall zur Verfügung stehen, sollte deshalb bei der Gewichtung, neben der Elevationsabhängigkeit, auch der Stützpunkt-Abstand mit beachtet werden. Wie in Tab. 5 und 6 zu erkennen ist, führt dies zu einer deutlichen Genauigkeitssteigerung.

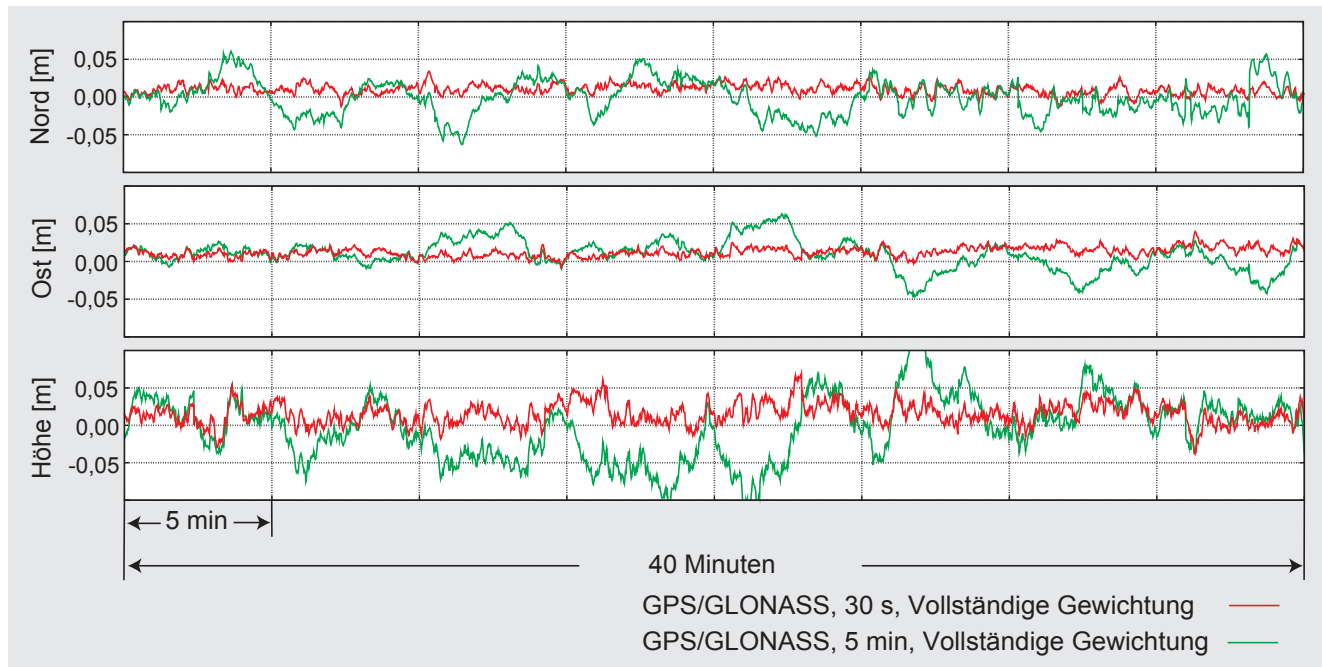


Abb. 4: Koordinatenfehler bei einer kinematischen PPP-Auswertung

30-Sekunden-Intervall um den Faktor 1,4 bis 2 verbessert. Die Interpolationsfehler der Satellitenuhrkorrekturen bei einem Intervall von fünf Minuten haben eine größere Auswirkung auf eine kinematische Messung, da sie sich auf jede einzelne Koordinatenberechnung direkt auswirken.

Abb. 4 vergleicht die einzelnen Abweichungen zur Solllösung in einem Zeitraum von 40 Minuten. Beide Varianten verwenden GPS/GLONASS-Beobachtungen sowie eine vollständige Gewichtungsfunktion. Der einzige Unterschied zwischen beiden Lösungen ist, dass bei Variante 1 das Intervall der Satellitenuhrkorrektur 30 Sekunden und bei Variante 2 fünf Minuten beträgt. Mit größerem zeitlichen Abstand zum Stützpunkt wachsen die Koordinatenfehler von Variante 2 deutlich an und können vor allem in der Höhe mehr als 0,1 m betragen. Die Differenzen zur Solllösung würden sich noch weiter verstärken, wenn bei dem Fünf-Minuten-Intervall nur eine elevationsabhängige Gewichtung verwendet wird. An den fünf Minuten Stützpunkten der Uhrkorrekturen selbst zeigen beide Lösungen in etwa die gleichen, sehr geringen Abweichungen. Der Zusammenhang zwischen Interpolationsfehler der Satellitenuhren und Koordinatenfehler einer kinematischen PPP-Auswertung wird in Abb. 4 sehr gut wiedergegeben.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Wie die statischen und kinematischen Auswertungen zeigten, hat PPP ein hohes Genauigkeitspotenzial. Bei kontinuierlichen Beobachtungen können statische, aber auch kinematische Messungen schon nach einer Stunde Genauigkeiten auf dem 1 dm-Niveau erreichen. Nach vier Stunden sind Genauigkeiten von in der Lage 1 bis 2 cm und in der Höhe 2 bis 3 cm für statische und 3 bis 4 cm für kinematische Anwendungen erzielbar. Um dieses Genauigkeitsniveau zu erreichen, sind zahlreiche Korrekturmodelle sowie präzise Ephemeriden und Uhrkorrekturen notwendig. Vor allem bei kinematischen Anwendungen sollte ein 30-sekündiges Intervall der Satellitenuhrkorrektur verwendet werden.

Die zusätzlichen GLONASS-Beobachtungen sollten, da sie insbesondere die Einlaufzeit deutlich verbessern, mit genutzt werden. Da ab 2010 die GLONASS-Konstellation mit 24 Satelliten komplett sein soll (Hofmann-Wellenhopf u. a. 2008), können weitere Verbesserungen erwartet werden. Aus diesem Grunde wären zukünftig 30-sekündige Uhrkorrekturen für GLONASS wünschens- und empfehlenswert.

Weitere Verkürzungen in der Konvergenzzeit sind bei einer Festsetzung der Phasenmehrdeutigkeiten auf ganzzahlige Werte zu erwarten (Mervart u. a. 2008). Dafür sind Korrekturen für instrumentell bedingte Signalverzögerungen in den Satelliten notwendig (Ge u. a. 2008).

Untersuchungen zeigten, dass diese Verzögerungen mit einer hohen Genauigkeit und Zuverlässigkeit aus Netzen von Referenzstationen bestimmt werden können (Ge u. a. 2008). Ein schnelleres Erreichen hoher Positionsgenauigkeiten durch eine Mehrdeutigkeitsfestsetzung würde, neben den bisherigen, neue Anwendungen ermöglichen. Zum einen sind kinematische Messungen in Gebieten mit höherer Abschattung vorstellbar. Zum anderen würde eine starke Verkürzung der Messzeit ohne Genauigkeitsverlust wirtschaftliche Vorteile bei statischen Messungen bringen.

Literatur

- Boehm, J., Niell, A.E., Tregoning, P., Schuh, H.: Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data. *Geophysical Researches Letter*, Vol. 33, L07304, doi: 10.129/2005GL025546, 2006a.
- Boehm, J., Werl, B., Schuh, H.: Troposphere mapping functions for GPS and VLBI from ECMWF operational analysis data. *J. Geophys. Res.*, 111, B02406, doi:10.1029/2005JB003629, 2006b.
- Ge, M., Gendt, G., Rothacher, M., Shi, C., Liu, J.: Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations. *Journal of Geodesy*, DOI 10.1007/s00190-007-0187-4, 2008.
- Heßelbarth, A., Wanninger, L. (2008): Short-term stability of GNSS satellite clocks and its effect on Precise Point Positioning. *Proceedings of ION GNSS 2008*, 1855–1863.
- Hofman-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Wasle, E.: *GNSS – Global Navigation Satellite Systems*. Springer Verlag, Wien, New York, 1991.
- IAC: GLONASS constellation status. 09.06.2009. Information-Analytical Center. www.glonass-ianc.rsa.ru, 2009.
- IGS: IGS products. International GNSS Service. <http://igsb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>, 2009.
- Kouba, J.: A guide to using International GNSS Service (IGS) products. www.igs.org/igsb/resource/pubs/UsingIGSProductsVer21.pdf, 2009.
- Kouba, J., Heroux, P.: GPS Precise Point Positioning using IGS orbit products. *GPS Solutions*, Vol. 5, No. 2, 12–28, DOI 10.1007/PL00012883, 2000.
- McCarty, D., Petit, G.: IERS Convention 2003. IERS Technical Note No. 32. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, www.iers.org/documents/publications/tn/tn32/tn32.pdf, 2003.
- Leick, A.: *GPS Satellite Surveying*. 3rd Ed. John Wiley & Sons, Inc, 2004.
- Mervart, L., Zdenek, L., Rocken, C., Iwabuchi, T.: Precise Point Positioning with ambiguity resolution in real-time. *Proceedings of ION GNSS 2008*, 397–405, 2008.
- Niell, A.E.: Global mapping function for the atmosphere delay at radio wavelengths. *Journal of Geophysical Research* 101 (B2), 3227–3246, 1996.
- Rothacher, M., Schmid, R.: ANTEX: The Antenna Exchange Format Version 1.3. <ftp://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/station/general/antex13.txt>, 2006.
- Saastamoinen, J.: Contributions to the theory of atmospheric refraction, Part II. *Bulletin Geodesique*, Vol. 107, 13–34, 1972.
- Santerre, R., Lavoie, M.: Propagation of GPS errors for ambiguities-fixed and ambiguities-free solutions. IUGG XX General Assembly, Vienna. [www.scg.ulaval.ca/gps-rs/pdf/20thIUGG_91\(8\).pdf](http://www.scg.ulaval.ca/gps-rs/pdf/20thIUGG_91(8).pdf), 1991.
- Schmid, R., Steigenberger, P., Gendt, G., Ge, M., Rothacher, M.: Generation of a consistent absolute phase center correction model for GPS receiver and satellite antennas. *Journal of Geodesy* 81: 781–798 DOI 10.1007/s00190-007-0148-y, 2006.
- Schmid, R., Rothacher, M.: Estimation of elevation-dependent satellite antenna phase center variations of GPS satellites. *Journal of Geodesy* 77: 440–446 DOI 10.1007/s00190-003-0339-0, 2003.
- Senior, K.L., Ray, J.R., Beard, R.L.: Characterization of periodic variations in the GPS satellite clocks. *GPS Solutions*, Vol. 12, 211–225, DOI 10.1007/s10291-008-0089-9, 2008.
- Springer, T.A., Dilssner, F., Schoenemann, E., Otten, M., Romero, I., Tegedor, J., Pereira, F., Dow, J.: ESOC new developments and innovations. Poster at the IGS Workshop 2008. Miami Beach, USA, 2008. www.ngs.noaa.gov/IGSWorkshop2008/docs/otherAC-springer.ppt
- Xu, G.: *GPS Theory, Algorithms and Application*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2008.
- Zumberge, J.F., Heflin, M.B., Jefferson, D.C., Watkins M.M., Webb, F.H.: Precise Point Positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Researches*, 102, 5005–5017, 1997.

Anschrift der Autorin

Anja Heßelbarth
 Geodätisches Institut, TU Dresden
 Helmholtzstraße 10
 01069 Dresden
anja.hesselbarth@tu-dresden.de