

GNSS *Precise Point Positioning* und seine Anwendung in der Hydrographie¹

Lambert Wanninger, Anja Heßelbarth
Geodätisches Institut, TU Dresden
Helmholtzstr. 10
01069 Dresden
lambert.wanninger@tu-dresden.de
anja.hesselbarth@tu-dresden.de

1 Einführung

Precise Point Positioning (PPP) ist eine im Vergleich zu anderen GNSS-Mess- und Auswerteverfahren recht junge Technik, die aber mehr und mehr für präzise (cm-genaue) Positionsbestimmung eingesetzt wird. PPP kommt ohne lokale oder regionale Referenzstationen aus und unterscheidet sich damit deutlich von den differentiellen Verfahren (Zumberge 1997, Kouba und Héroux 2000). Zur Erzielung hoher Genauigkeiten kann bei PPP – im Gegensatz zu einigen differentiellen Verfahren – auf Zweifrequenz-Beobachtungen nicht verzichtet werden. Weiterhin hängen die erzielbaren Genauigkeiten stark von der Dauer der kontinuierlichen Phasenmessungen ab.

Der vorliegende Beitrag beschreibt PPP im Vergleich zu den anderen Verfahren der cm-genauen GNSS-Positionsbestimmung. Er diskutiert die wichtigsten Aspekte der PPP-Datenauswertung und zeigt Beispiele für erzielbare Genauigkeiten. PPP ist für hydrographische Anwendungen besonders geeignet, welches an einem weiteren Beispiel belegt wird. Der Beitrag schließt mit einem Überblick über PPP-Dienste und einem Ausblick auf zukünftig zu erwartende technische Verbesserungen bei diesem Messverfahren.

¹ In: „Hydrographie – Neue Methoden von der Erfassung zum Produkt“, 89. DVW-Seminar, 06./07. Oktober 2009, Hamburg, DVW-Schriftenreihe Band 58/2009, S. 3-18, Wißner-Verlag, Augsburg, 2009

2 PPP im Vergleich zu anderen GNSS-Verfahren

Der *Standard Positioning Service* des GPS (DoD 2008) – und entsprechend auch der anderer GNSS – basiert auf der Auswertung von Einfrequenz-Code-Messungen, die im so genannten absoluten Modus verwendet werden (vgl. Abb. 1 links). Die heutzutage erzielbaren Genauigkeiten betragen einige bis viele Meter. Der Begriff „absolut“ ist dabei irreführend, zum einen da die durchgeführten Pseudostreckenmessungen zwischen Sendestationen (den Satelliten) und der Empfangsstation immer geometrische (Relativ-) Beziehungen herstellen und zum anderen sich alle Messauswertungen räumlich auf das globale Referenzstationsnetz am Erdboden und in der Zeitkomponente auf Referenzoszillatoren des jeweiligen GNSS-Kontrollsegments beziehen.

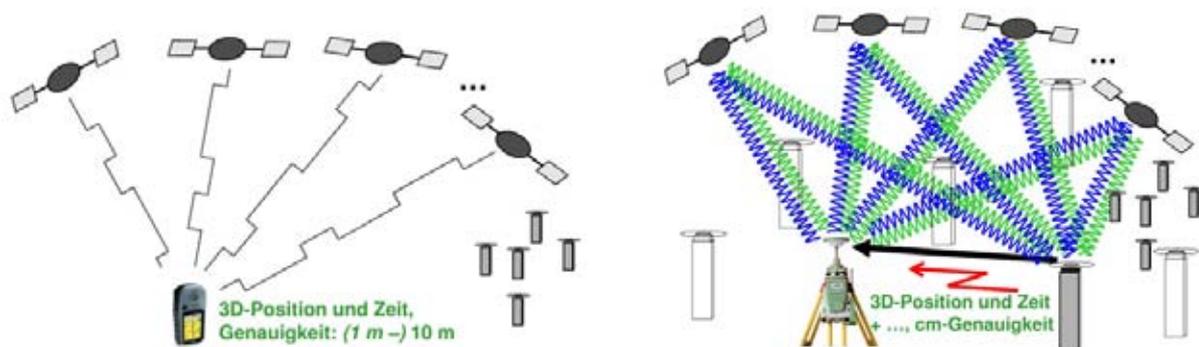


Abb. 1: Grundprinzipien der absoluten Positionsbestimmung mit GNSS (links) und RTK bzw. Netz-RTK (rechts)

Zur Genauigkeitssteigerung wurden so genannte Relativverfahren, bei denen auf mehreren Stationen simultan GNSS-Messungen durchgeführt werden, ausgetestet und in die Praxis eingeführt. Ein weiterer Schritt zur Genauigkeitssteigerung besteht darin, als primäre Messgrößen nicht die Code-Messungen, sondern die Phasenmessungen zu verwenden. Die dabei auftretenden Phasenmehrdigkeiten können bei Relativauswertungen auf Doppeldifferenz-Ebene auf ihre wahren Werte festgesetzt werden. Dieses Messverfahren ist heute unter dem Begriff *Real-Time Kinematic* (RTK) bekannt. Es wird meistens – aber nicht notwendigerweise – mit Zweifrequenz-Empfängern realisiert. Eine Erweiterung zum Netz-RTK wurde notwendig als RTK-Dienste flächendeckend angeboten werden sollten. Sie ermöglichen Nutzern, absolute Positionen mit cm-Genauigkeit auch nach kurzen Beobachtungsdauern (~1 Minute) zu erzielen. Bei RTK und Netz-RTK ist es unverzichtbar, neben den lokalen oder regionalen

Referenzstationen auch ein globales Referenzstationsnetz zu betreiben und global eine einheitliche Zeitreferenz zu verwirklichen, wie es vom Kontrollsegment des jeweiligen GNSS-Systems gemacht wird (Abb. 1 rechts).

Bei PPP verzichtet man auf die lokalen oder regionalen Referenzstationen. Trotzdem sind hohe Genauigkeiten erzielbar, da die Phasenbeobachtungen die primären Messgrößen darstellen. Das globale Referenznetz und die Zeitreferenz kommen hier nicht mehr vom jeweiligen GNSS-Kontrollsegment, sondern aus unabhängiger Quelle, nämlich z.B. vom International GNSS Service (IGS) in der Form von präzisen Ephemeriden und Satellitenuhrkorrekturen. Grundsätzlich wären auch die GNSS-Kontrollsegmente fähig, entsprechende PPP-geeignete Informationen zur Verfügung zu stellen. Die augenblicklich versendeten *broadcast*-Informationen haben aber nicht die gewünschte Genauigkeit (Tab. 1). Bei der PPP-Auswertung werden heute in den allermeisten Fällen die Phasenmehrdeutigkeiten als reelle Werte mitgeschätzt. Eine Mehrdeutigkeitsfestsetzung auf ganzzahlige Werte ist bei Erfüllung bestimmter Voraussetzungen möglich aber bisher nur ansatzweise getestet worden (Ge u.a. 2008, Laurichesse u.a. 2008, Mervart u.a. 2008).

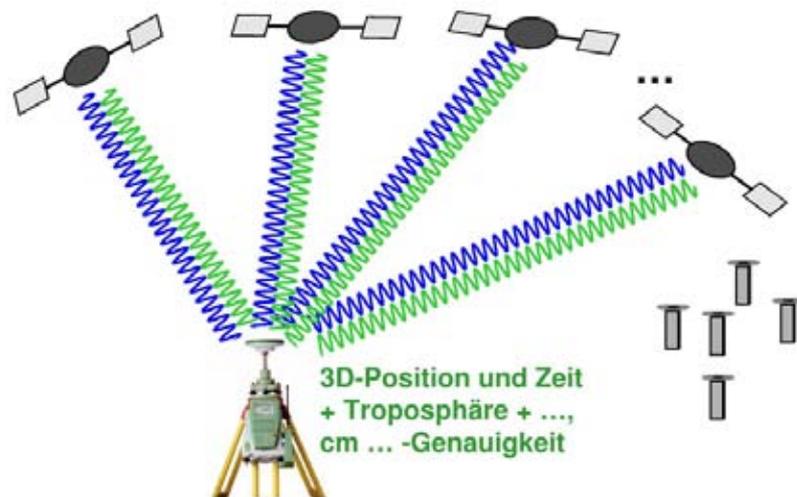


Abb. 2: Grundprinzip des Precise Point Positioning (PPP)

3 PPP-Datenauswertung

Im Gegensatz zu den relativen Positionsbestimmungsverfahren ist PPP immer auf präzise Satellitenbahn- und Satellitenuhrinformationen angewiesen. Weiterhin wirken etliche Einflüsse, die bei der relativen Positionsbestimmung eliminiert oder zumindest deutlich gemindert werden, so dass bei PPP-Datenauswertung zusätzliche Korrekturen und erweiterte Auswertemodelle notwendig sind.

Präzise Satellitenbahninformationen und -uhrkorrekturen 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) im Vergleich zu den weniger genauen *broadcast*-Informationen der GPS- und GLONASS-Kontrollsegmente.

Tab. 1: Ephemeriden und Satellitenuhrkorrekturen

		GNSS-System	Genauigkeit	Verfügbarkeit	Intervall
<i>broadcast</i>	Orbits	GPS	~ 1,6 m	Echtzeit	kontinuierlich
	Sat. Uhren	GPS	~ 7 ns		
<i>broadcast</i>	Orbits	GLONASS	~ 4 m	Echtzeit	kontinuierlich
	Sat. Uhren	GLONASS	~ 15 ns ?		
IGS <i>Ultra-Rapid</i>	Orbits	GPS	~ 10 cm	Echtzeit	15 min
	Sat. Uhren	GPS	< 5 ns		
IGS <i>Ultra-Rapid</i>	Orbits	GPS	~ 5 cm	3 Stunden	15 min
	Sat. Uhren	GPS	~ 0,2 ns		
IGS <i>Rapid</i>	Orbits	GPS	< 5 cm	17 Stunden	15 min
	Sat. Uhren	GPS	0,1 ns		5 min
IGS <i>Final</i>	Orbits	GPS/GLONASS	< 5 cm	13 Tage	15 min
	Sat. Uhren	GPS	< 0,1 ns		5 min 30 s
ESOC	Orbits	GPS/GLONASS	< 5 cm	13 Tage	15 min
	Sat. Uhren	GPS/GLONASS	< 0,1 ns		5 min (30 s)

Um für jeden Beobachtungszeitpunkt eine Satellitenposition und Uhrkorrektur zu erhalten, ist eine Interpolation zwischen den so genannten Stützpunkten notwendig. Während bei den Orbits Stützpunkte alle 15 Minuten vollkommen ausreichend sind, kann die mathematische Interpolation von Uhrkorrekturen zu

Genauigkeitsverlusten führen. Für kinematische Anwendungen mit Beobachtungshäufigkeiten von z.B. 1 Hz sind 30-sekündige Uhrkorrekturen zu empfehlen, um die Interpolationsfehler gering zu halten.

Dabei ist zu beachten, dass das IGS augenblicklich überhaupt gar keine GLO-NASS-Uhrkorrekturen zur Verfügung stellt und GPS-Uhrkorrekturen im 30 s-Abstand erst nach 13 Tagen. Um GLONASS-Uhrkorrekturen verwenden zu können, muss man auf Produkte einzelner *Analytical Center* zurückgreifen. Hervorzuheben sind hier die Produkte der *European Space Operations Center* (ESOC) in Darmstadt (Springer u.a. 2008), welches für GPS und GLONASS Produkte homogener Genauigkeit anbietet.

Auch bei der ESOC gehören augenblicklich Uhrkorrekturen im 30 s-Abstand nicht zu den Standardprodukten. Uhrkorrekturen im 5 min-Abstand und mathematische Interpolation führen aber in Abhängigkeit von der Stabilität der Satellitenuhren z.T. zu deutlichen Positionsabweichungen. Eine Verdichtung der Uhrkorrekturen durch phasengestützte Interpolation bietet sich an, bedeutet aber auch zusätzlichen Auswerteaufwand (Heßelbarth und Wanninger 2008). Dieser Arbeitsschritt wird hoffentlich in naher Zukunft entfallen, wenn das IGS oder ESOC GPS/GLONASS-Satellitenuhrkorrekturen für 30 Sekunden-Intervalle zur Verfügung stellen wird. Nur die 30-Sekunden Uhrkorrekturen garantieren, dass die weitere mathematische Interpolation auf die Signalaussendezeitpunkte nicht zu sich negativ auswirkenden Interpolationsfehler führt.

Die atmosphärischen Einflüsse auf die Signallaufzeiten werden wie folgt behandelt. Der Einfluss der ionosphärischen Refraktion wird durch die Auswertung von Zweifrequenz-Beobachtungen, also durch Bildung der ionosphärenfreien Linearkombination, weitestgehend beseitigt. Bei der troposphärischen Refraktion werden Korrekturmodelle mit Schätzung der troposphärischen Zenitverzögerung kombiniert.

Antennenkorrekturen sind sowohl für die Empfangsantennen als auch für die Satellitenantennen notwendig. Weitere notwendige Korrekturen betreffen die Drehung der Satelliten, welches zum so genannten *Phase Wind Up* führt, Erdgezeiten, ggf. ozeanische Auflasten und kurzperiodische Erdrotationsvariationen. Für die in diesem Abschnitt genannten Korrekturen gilt, dass sie genau so behandelt werden müssen, wie sie bei der Berechnung der Satellitenorbits und -uhrkorrekturen behandelt wurden. Diese Konsistenz der Korrekturen ist für die Erzielung hoher Positionsgenauigkeiten ausgesprochen wichtig. Weitere In-

formationen und weiterführende Literaturhinweise finden sich in Heßelbarth (2009).

Die PPP-Datenauswertung kann sowohl statisch als auch kinematisch erfolgen. Die bei der statischen Auswertung eingeführte Restriktion in Bezug auf die Empfängerposition führt zu kürzeren Konvergenzzeiten und höheren Genauigkeiten bei der Positionsbestimmung.

4 PPP-Beispielsergebnisse

Alle im Folgenden dargestellten PPP-Koordinatenergebnisse wurden mit am Geodätischen Institut der TU Dresden geschriebenen Auswertemodulen (Wapp + TripleP) erzeugt. Zwei Aspekte sollen hier im Detail diskutiert werden: die Konvergenzzeit der Koordinatenlösung und die erreichte Genauigkeit bei kontinuierlichen Phasemessungen über einen Zeitraum von 4 Stunden. Folgende Auswerte- und Anwendungsvarianten werden gegenübergestellt:

- statische und kinematische Beobachtungsdatenauswertung,
- Verwendung von GPS- und GPS/GLONASS-Beobachtungen,
- 30-sekündige und 5-minütige Uhrkorrektionsintervalle.

Da neben einer alleinigen GPS-Auswertung auch eine kombinierte GPS/GLONASS-Auswertung durchgeführt wurde, konnten nur die präzisen Ephemeriden und Uhrkorrekturen von ESOC Verwendung finden. Um möglichst genaue Uhrkorrekturen im 30 Sekunden Intervall zu erhalten, wurden die 5-minütigen Uhrdaten mittels phasengestützter Interpolation verdichtet (Heßelbarth und Wanninger 2008). Alle in diesem Abschnitt gezeigten Beispieldatensätze stammen aus Juni 2008. Zu diesem Zeitpunkt waren 14 GLONASS-Satelliten einsatzfähig (IAC 2009). Durchschnittlich wurden 7,5 GPS und 3,5 GLONASS Satelliten gemessen (Elevationsmaske 15°).

Als Sollkoordinatenlösungen wurden entweder direkt vorliegende ITRF05-Koordinatendatensätze verwendet (bei IGS/EPN-Referenzstationen) oder die Sollkoordinaten wurden mit Basislinienauswertungen zu lokalen Referenzstationen, deren Koordinaten im ITRF05 gegeben sind, erzeugt. Für diese Auswertungen wurde der Basislinienprozessor Wal verwendet.

Zur Darstellung der Konvergenzzeiten wurden die vorhandenen Datensätze in Beobachtungsböcke verschiedener Länge (5, 10, 15 Minuten usw.) unterteilt

und ausgewertet. Über die Koordinatenabweichungen zur Solllösung bei gleichlangen Beobachtungsböcken konnten dann quadratische Mittelwerte gerechnet werden (Abb. 3). Die hier gezeigten Genauigkeiten in Abhängigkeit von der Gesamtbeobachtungsdauer gelten bei einer Datenauswertung im Nachhinein für jeweils den gesamten Beobachtungszeitraum. Bei einer Echtzeitauswertung würden sich dagegen die Koordinatengenauigkeiten mit fortlaufend zunehmender Beobachtungsdauer wie in Abb. 3 gezeigt verbessern.

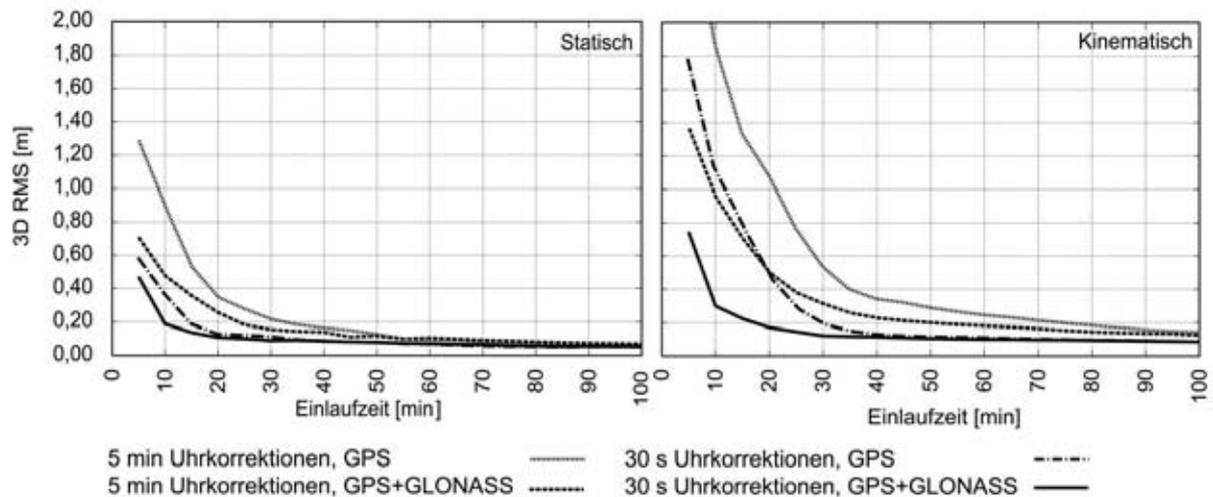


Abb. 3: Konvergenzverhalten statischer und kinematischer PPP-Koordinatenlösungen

Die wichtigsten Erkenntnisse aus den in Abb. 3 gezeigten Ergebnissen sind:

- Die Konvergenzzeiten fallen bei kinematischen Auswertungen deutlich länger aus als bei statischen Anwendungen.
- Die Hinzunahme weiterer Satellitensignale (hier GLONASS) führt zu einer deutlichen Verkürzung der Konvergenzzeiten. Dieser Effekt fällt heute (August 2009) noch größer aus, da jetzt noch mehr GLONASS-Satellitensignale zur Verfügung stehen.
- Interpolationsfehler bei Satellitenuhrkorrekturen im 5 Minuten-Intervall beeinflussen die erzielbaren Konvergenzzeiten und Genauigkeiten empfindlich. Mit Uhrkorrekturen im Abstand von 30 Sekunden erzielt man erkennbar bessere Ergebnisse. Zusätzliche Untersuchungen zeigten, dass eine weitere Verdichtung der Satellitenuhrkorrekturen kaum noch Konvergenzzeitverkürzungen und Genauigkeitssteigerungen bei den hier untersuchten Anwendungen zur Folge hat.

Weiterhin wurde untersucht, welche Genauigkeiten nach 4 Stunden Beobachtungszeit erreicht werden. Um eine statistisch relevante Stichprobengröße zu erreichen, wurden für den statischen Anwendungsfall Beobachtungsdatensätze von verschiedenen europäischen IGS Stationen in 4 Stunden-Blöcke unterteilt, ausgewertet und mit Solllösungen verglichen (Tab. 2). Für die kinematische Auswertung (Tab. 3) stand ein knapp 4-stündiger kinematischer Datensatz mit GPS/GLONASS-Beobachtungen und einem Beobachtungsintervall von einer Sekunde aus einem abschattungsfreien Gebiet in Dresden zur Verfügung. Die Solllösung stammt aus der kinematischen Basislinienlösung zu einer lokalen Referenzstation.

Tab. 2: Koordinatengenauigkeiten für Nord/Ost/Höhe einer statischen PPP-Auswertung mit 4 Stunden Beobachtungsdauer

Uhrintervall	GNSS-System	RMS_N [cm]	RMS_E [cm]	RMS_H [cm]
30 s	GPS+GLONASS	1,3	1,9	2,1
30 s	GPS	1,5	2,3	2,4
5 min	GPS+GLONASS	1,3	2,1	2,5
5 min	GPS	1,4	2,4	3,1

Tab. 3: Koordinatengenauigkeiten für Nord/Ost/Höhe einer kinematischen PPP-Auswertung mit 4 Stunden Beobachtungsdauer

Uhrintervall	GNSS-System	RMS_N [cm]	RMS_E [cm]	RMS_H [cm]
30 s	GPS+GLONASS	1,2	1,7	2,9
30 s	GPS	1,3	2,0	3,1
5 min	GPS+GLONASS	2,4	2,4	4,9
5 min	GPS	2,7	2,5	5,4

Die wichtigsten Erkenntnisse aus den in Tab. 2 und 3 gezeigten Ergebnissen sind:

- Mit 4 Stunden Dauer kontinuierlicher Beobachtungen sind Genauigkeiten von wenigen cm in allen drei Koordinatenkomponenten erzielbar. Die Nordkomponente ist im Allgemeinen am besten bestimmbar, die Ostkomponente erkennbar schlechter und die Höhenkomponente nur wenig schlechter als die Ostkomponente. Die typischen Merkmale einer Float-Lösung werden somit bestätigt (Santerre und Lavoie 1991).
- Die kinematischen Ergebnisse fallen bei Uhrintervallen von 30 Sekunden in den horizontalen Komponenten kaum schlechter aus als bei der statischen

Anwendung. Bei Uhrintervallen von 5 Minuten sind aber deutliche Qualitätsunterschiede zwischen Statik und Kinematik erkennbar.

- Die Hinzunahme von GLONASS-Beobachtungen führt in allen Fällen zu genaueren Koordinatenergebnissen.
- Dichtere Stützpunkte bei den Uhrkorrekturen (30 Sekunden anstatt 5 Minuten) wirken insbesondere bei der kinematischen Auswertung genauigkeitssteigernd (Standardabweichung um 20 – 50 % geringer).

Eine weitere Steigerung der kontinuierlichen Beobachtungsdauer hat eine weitere positive Wirkung auf statische Auswertungen aber kaum noch auf kinematische Anwendungen.

5 PPP-Anwendungen in der Hydrographie

Hydrographische Anwendungen sind im Allgemeinen sehr gut für den Einsatz von PPP-Mess- und Auswerteverfahren geeignet. Es liegen meist kontinuierliche Phasenbeobachtungen über eine bis viele Stunden vor, so dass Koordinatengenauigkeiten auf dem cm-Niveau erzielt werden können. Das im Folgenden gezeigte Beispiel einer Fahrt des Vermessungs-, Wracksuch- und Forschungsschiff Deneb des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) aus der Arkona See in ihren Heimathafen Rostock am 10.03.2009 (Abb. 4) soll dies verdeutlichen.

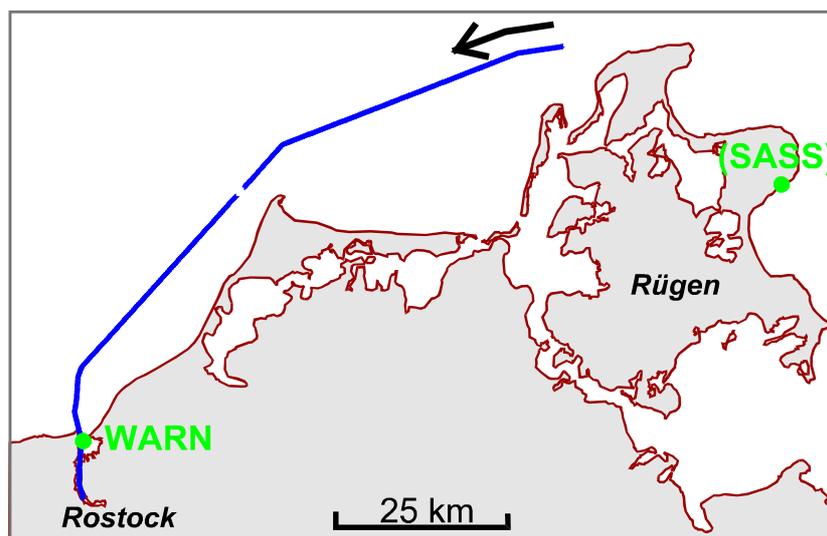


Abb. 4: GNSS-Messungen auf der Deneb-Fahrt am 10.03.2009

Die Zweifrequenz-GPS/GLONASS-Beobachtungen der Deneb wurden nach einer Voranalyse auf zwei Arten ausgewertet und die erzielten Ergebnisse verglichen. Die Solllösung entstand durch relative Auswertung mit Phasenmehrfachdeutigkeitsfestsetzung zur IGS-Referenzstation WARN in Warnemünde. Dabei wurden präzise Ephemeriden eingesetzt und für WARN Koordinaten im Referenzsystem IGS05 (entspricht praktisch ITRF05) festgehalten. Die Referenzstation SASS in Sassnitz lieferte in diesem Zeitraum deutlich schlechtere Beobachtungsdaten und wurde deswegen nicht verwendet. Die zweite Auswertung erfolgte nach dem PPP-Verfahren unter Verwendung der Satellitenbahninformationen und Satellitenuhrkorrekturen der ESOC. Die Koordinaten liegen somit auch im IGS05 vor. Da die Satellitenuhrkorrekturen nur im zeitlichen Abstand von 5 Minuten zur Verfügung standen, wurden sie in einem Vorverarbeitungsschritt mittels phasengestützter Interpolation auf 30 Sekunden verdichtet.

Die Voranalyse der Deneb-Beobachtungsdaten (Abb. 5) ergab, dass Beobachtungen von insgesamt 36 Satelliten (19 GPS- und 17 GLONASS-Satelliten) vorliegen. Dabei sendet der GLONASS-Satellit R09 nur Einfrequenz-Signale, so dass diese Signale hier nicht verwendet werden konnten. Es verbleiben in den einzelnen Epochen durchschnittlich 12 Satelliten. Der Blick auf die detektierten Cycle-Slips zeigt, dass deren Gesamtzahl recht gering ist. Leider trat aber ungefähr in der Mitte des Datensatzes ein kurzzeitiger Gesamtausfall des Empfängers und damit Cycle-Slips für alle Satellitensignale auf. Für die PPP-Auswertung bedeutet dies, dass zwei unabhängige Beobachtungsteilstücke von jeweils etwa 3,5 Stunden Dauer vorliegen.

Der Vergleich der zwei vorliegenden Koordinatenlösungen ergab eine sehr gute Übereinstimmung (Abb. 6, Tab. 4). Die kombinierten GPS/GLONASS-Ergebnisdifferenzen weisen quadratische Mittelwerte von unter 2 cm in den horizontalen Komponenten und 3 cm in der Höhe auf. Die Differenzen fallen deutlich größer aus, wenn die Datenauswertung sich auf die GPS-Beobachtungen beschränkt.

Die Höhenkomponente der PPP-Auswertung ist in Abb. 7 dargestellt. Sie zeigt die ellipsoidischen Höhen vom Seegebiet vor Rügen bis in den Rostocker Hafen (vgl. Abb. 4). Die kontinuierliche Zunahme der Höhen ist auf den sich verändernden Abstand von Ellipsoid und Geoid entlang des Fahrweges zurückzuführen. Es ist deutlich erkennbar, dass mit zunehmender Fahrdauer der Seegang stärker wurde. Erst mit Einfahrt in die Warnow bei Warnemünde kam das Schiff in ruhigere Gewässer.

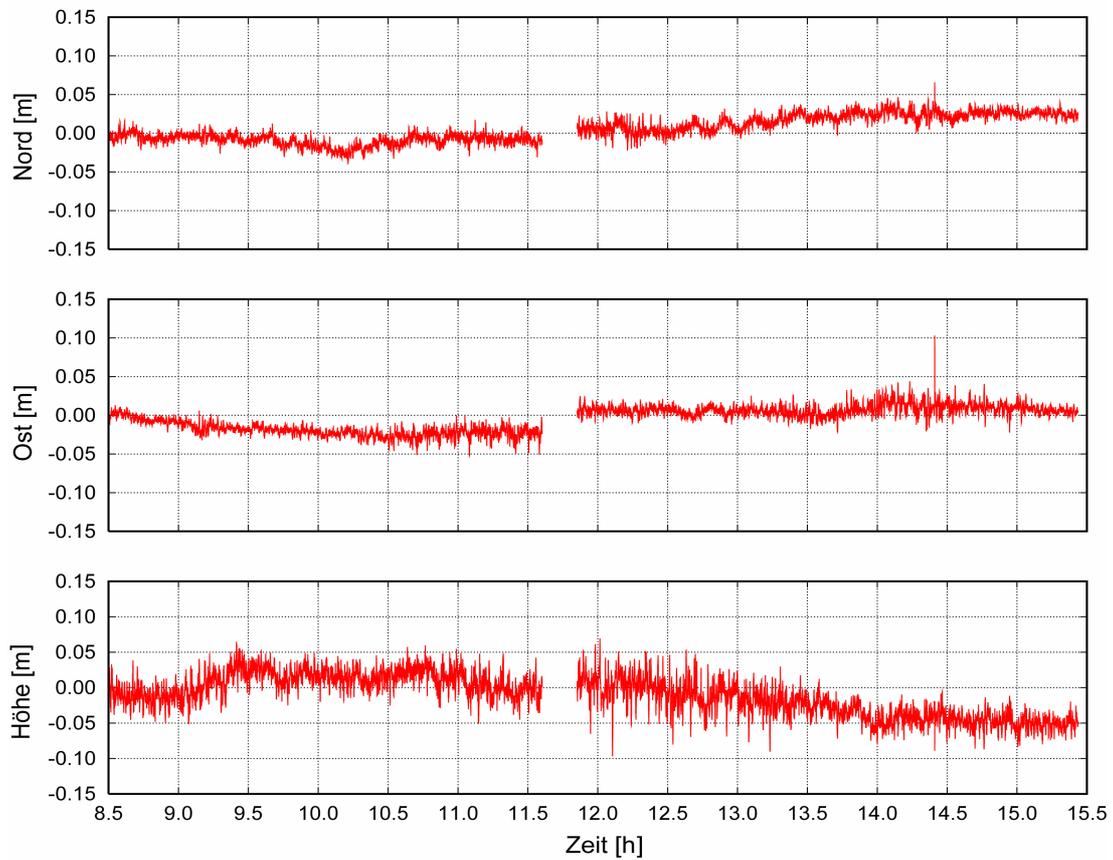


Abb. 6: Koordinatendifferenzen zwischen PPP- und Basislinienauswertung der Deneb-Fahrt

Tab. 4: Quadratische Mittelwerte über die Koordinatendifferenzen zwischen PPP- und Basislinienauswertung der Deneb-Fahrt

GNSS-System	$RMS_{\Delta N}$ [cm]	$RMS_{\Delta E}$ [cm]	$RMS_{\Delta H}$ [cm]
GPS	1,8	2,1	3,6
GPS+GLONASS	1,7	1,6	3,0

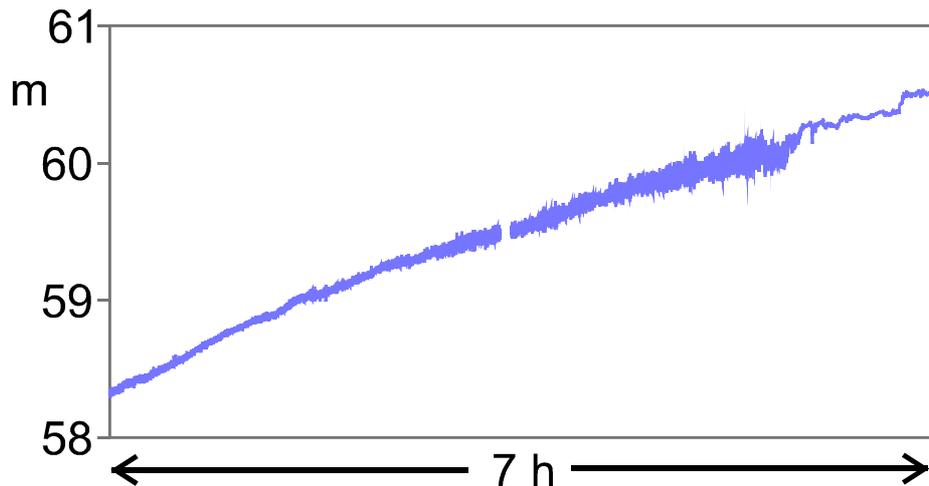


Abb. 7: Ellipsoidische Höhen aus der PPP-Auswertung der Deneb-Fahrt

Bei der Einfahrt in die Warnow wurde offensichtlich die Geschwindigkeit gedrosselt, was aufgrund des nachlassenden Squat-Effekts zu einem leichten Sprung in der Höhenzeitreihe führt. Ein entsprechender Effekt ist kurz vor Ende der Datenreihe zu beobachten als das Schiff in Rostock angelegte.

6 PPP-Dienste

Für die PPP-Datenauswertung im Nachhinein gibt es nicht nur eine sich ständig vergrößernde Anzahl von Auswerteprogrammen, sondern es existieren auch Dienste, die (kostenlos) PPP-Datenauswertung vornehmen. Seit Jahren bewährt hat sich der von *Natural Resources Canada* (NCR) betriebene CCRS-PPP Dienst (http://www.geod.nrcan.gc.ca/products-produits/ppp_e.php). Er ermöglicht sowohl statische wie auch kinematische PPP-Datenauswertung, wobei aber GLONASS-Beobachtungen nicht verwendet werden (Mireault u.a. 2008).

Ein Überblick über weitere Online-Dienste gibt die University of New Brunswick mit ihrem *PPP Software Centre* (<http://gge.unb.ca/Resources/PPP>). Insgesamt werden dort vier Dienste aufgeführt (Stand August 2009), u.a. der CCRS-PPP-Dienst. Nicht alle diese Dienste ermöglichen auch kinematische Datenauswertung. Keiner der Dienste verarbeitet GLONASS-Beobachtungen.

In den letzten Jahren sind auch Echtzeit-PPP-Dienste entstanden. Als Beispiele sein hier genannt:

- Ultra der Firma Veripos,
- StarFire der Firma NavCom Technology,
- OmniSTAR-XP der Firma Fugro.

Diese kommerziellen Dienste übermitteln die für eine PPP-Auswertung notwendigen Informationen über geostationäre Satelliten. Mit diesen Diensten werden also die größten Teile der Meere und Kontinente abgedeckt (Ausnahme Polregionen). Alle genannten Dienste beschränken sich augenblicklich auf GPS.

In naher Zukunft wird wahrscheinlich auch das IGS die für PPP notwendigen Informationen für Echtzeitanwendungen zur Verfügung stellen können. Augenblicklich gilt dies nur für die GPS-Orbitinformationen (präziser Anteil der IGS *Ultra Rapid Orbits*). Eine ähnliche Prädiktion der Uhrkorrekturen liefert nicht die gewünschten Genauigkeiten (vgl. Tab. 1). Hier muss auf tatsächliche Echtzeitdaten zurückgegriffen werden, was insbesondere hohe Ansprüche an die Datenkommunikation stellt.

PPP ist auch als Teil der GNSS-Systeme denkbar. Es setzt voraus, dass die jeweiligen Kontrollsegmente die Satellitenorbit- und -uhrkorrektionsbestimmung mit sehr geringer zeitlicher Verzögerung durchführen und diese Informationen auch ohne größere Verzögerung den Nutzern mitteilen. Die Probleme der praktischen Realisierung liegen somit besonders im Bereich der Datenkommunikation.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Precise Point Positioning (PPP) hat ein hohes Genauigkeitspotential. Je nach Dauer der kontinuierlichen Zweifrequenz-GNSS-Phasenbeobachtungen werden Koordinatengenauigkeiten von 1 dm (1 Stunde) bis wenige cm (2 und mehr Stunden) in allen drei Koordinatenkomponenten erzielt. Zusätzliche Satellitensignale, z.B. durch GLONASS, verkürzen die Konvergenzzeiten deutlich.

Noch sind das IGS und seine Analysezentren nicht so weit, dass die für PPP notwendigen Satellitenbahn- und -uhrinformationen schnell und mit genügender zeitlicher Dichte zur Verfügung gestellt werden. Insbesondere bei GLONASS gibt es noch Defizite, die hoffentlich in den nächsten Jahren beseitigt werden.

Eine weitere Verkürzung 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. Untersuchungen zeigten, dass diese Verzögerungen mit einer hohen Genauigkeit und Zuverlässigkeit aus Netzen von Referenzstationen bestimmt werden können (Ge u.a. 2008). Eine korrekte Mehrdeutigkeitsfestsetzung wird aber nicht zu einem höheren Genauigkeitsniveau führen, sondern nur dafür sorgen, dass das typische PPP-Genauigkeitsniveau schneller erreicht werden kann.

Dank

Ohne die vielen Organisationen, die Beiträge zu den IGS-Produkten liefern, wären die hier präsentierten PPP-Auswertungen nicht denkbar. Für die vorgestellten Ergebnisse waren insbesondere die Beiträge des *European Space Operations Center* (ESOC), Darmstadt und des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG), Frankfurt unverzichtbar. Dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) sei für die Bereitstellung der Deneb-Beobachtungsdaten gedankt.

Literatur

- DoD (2008): Global Positioning System Standard Positioning Service performance standard. Department of Defense, USA, 4. Auflage, Sep. 2008.
<http://www.navcen.uscg.gov/gps/geninfo/2008SPSPPerformanceStandardFINAL.pdf>
- Ge, M., Gendt, G., Rothacher, M., Shi, C., Liu, J. (2008): Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations. *J. of Geodesy*, **82**:389-399.
- Heßelbarth, A., Wanninger, L. (2008): Short-term stability of GNSS satellite clocks and its effect on Precise Point Positioning. *Proc. ION GNSS 2008*, 1855-1863.
- Heßelbarth, A. (2009): GNSS-Auswertung mittels Precise Point Positioning (PPP). *zfv*, 134:im Druck.
- IGS (2009): IGS products. International GNSS Service.
<http://igsceb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>

- Kouba, J. (2009): A guide to using International GNSS Service (IGS) products. <http://www.igs.org/igs/scb/resource/pubs/UsingIGSProductsVer21.pdf>.
- Kouba, J., Héroux, P. (2000): GPS Precise Point Positioning using IGS orbit products. *GPS Solutions*, **5**:12-28.
- Laurichesse, D., Mercier, F., Berthias, J.P., Bijac, J. (2008): Real time zero-difference ambiguities fixing and absolute RTK. *Proc. ION NTM 2008*, 747-755.
- Mervart, L., Zdenek, L., Rocken, C., Iwabuchi, T. (2008): Precise Point Positioning with ambiguity resolution in real-time. *Proc. ION GNSS 2008*, 397-405.
- Mireault, Y., Tétreault, P., Lahaye, F., Héroux, P., Kouba, J. (2008): Online Precise Point Positioning. *GPS World*, Sep. 2008, 59-64.
- Santerre, R., Lavoie, M. (1991): Propagation of GPS errors for ambiguities-fixed and ambiguities-free solutions. IUGG XX General Assembly, Vienna. [http://www.scg.ulaval.ca/gps-rs/pdf/20thIUGG_91\(8\).pdf](http://www.scg.ulaval.ca/gps-rs/pdf/20thIUGG_91(8).pdf)
- Senior, K.L., Ray, J.R., Beard, R.L. (2008): Characterization of periodic variations in the GPS satellite clocks. *GPS Solutions*, **12**:211-225.
- Springer, T.A., Dilssner, F., Schönemann, E., Otten, M., Romero, I., Tegedor, J., Pereira, F., Dow, J. (2008): ESOC new developments and innovations. Poster IGS Workshop 2008. Miami Beach, USA. <http://www.ngs.noaa.gov/IGSWorkshop2008/docs/otherAC-springer.ppt>
- Zumberge, J.F., Heflin, M.B., Jefferson, D.C., Watkins, M.M., Webb, F.H. (1997): Precise Point Positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *J. of Geophysical Research*, **102**:5005-5017.