

Scheinbare Koordinatenänderungen von GPS-Referenzstationen: Einfluss von Auswertestrategien und Antennenwechseln

Thomas Krawinkel, Nico Lindenthal und Steffen Schön

Zusammenfassung

Die Wahl unterschiedlicher GPS-Observablen und die Durchführung von Antennenwechseln in GPS-Referenzstationen können zu scheinbaren Koordinatenänderungen führen, d. h. zu Variationen der Koordinaten, obwohl die Antenne am identischen Ort verbleibt. Um ihre Beschreibung zu erleichtern und das Verständnis zu verbessern, werden die Ursachen in mathematische und physikalische Effekte eingeteilt. Anhand eines umfassenden realen Datensatzes mit neun unterschiedlichen Antennentypen werden die Effekte quantifiziert und ausführlich diskutiert. Anschließend erfolgt die Übertragung der so gewonnenen Erkenntnisse auf die Koordinatendiskrepanzen in den Local Ties des ITRF (International Terrestrial Reference Frame) und es wird eine Empfehlung zum Entgegenwirken dieser Problematik gegeben.

Summary

Different GPS observables and antenna changes can result in apparent coordinate changes of GPS reference stations, i. e. offsets in the coordinate series although the GPS antenna remains in the same geometrical place. In this article, we propose a classification of these variations into two categories, namely mathematical and physical effects. This approach will help to better understand the reasons for such coordinate changes. Based on a data set consisting of nine GPS antenna types the effects are quantified and discussed extensively. Subsequently, the gained insights are transferred to coordinate discrepancies in the so called local ties of ITRF, and a recommendation to reduce this problem is given.

Schlüsselwörter: GPS, Antennenwechsel, Referenzstationen, Local Ties

1 Motivation

Globale Navigationssatellitensysteme (GNSS), wie beispielsweise das Global Positioning System (GPS), unterliegen einer Vielzahl von Fehlereinflüssen, insbesondere stationsabhängigen Effekten wie Mehrwegeausbreitung oder Antennenphasenzentrumsvariationen, die nicht durch Auswertekonzepte wie Differenzbildung oder Linearkombinationen (LK) der empfangenen Signale reduziert bzw. eliminiert werden können (Seeber 2003). Mittels GPS bestimmte Koordinatenzeitreihen reagieren sehr sensitiv auf Veränderungen dieser Einflüsse. Im Folgenden sollen als *scheinbare Koordinatenänderungen* Variationen der Koordinaten verstanden werden, die sich bei der Auswertung ergeben, obwohl die GPS-Antenne geometrisch am identischen Ort verbleibt.

Prominente Beispiele sind Antennenwechsel wie sie in Wanninger et al. (2006), Wanninger (2009) sowie Riecken und Ruf (2013) beschrieben werden. Ursachen hierfür liegen in Unterschieden des Antennengewinns verschiedener GPS-Antennen bzw. andersartigem Zusammenwirken mit der Stationsumgebung begründet, sodass auch bei geometrisch identischer Antennenaufstellung Koordinatenvariationen entstehen. Diese Effekte werden oft als Nahfeld-Mehrwegeausbreitung bezeichnet (Dilßner 2007, Dilßner et al. 2008).

Scheinbare Koordinatenänderungen treten ebenfalls bei Verwendung unterschiedlicher Beobachtungstypen oder Lösungsstrategien in der GPS-Auswertung auf. Welcher Beobachtungstyp angewendet wird, hängt bei der relativen Positionierung maßgeblich von der Basislinienlänge ab. Bei einem Stationsabstand von weniger als 10 km wird zumeist eine reine L1-Lösung berechnet, da diese Trägerphasenmessungen vom Empfänger am höchsten aufgelöst werden können und somit eine höhere Präzision als L2-Phasenbeobachtungen liefern. Aufgrund des geringen räumlichen Abstands zwischen den beteiligten Stationen sind viele Fehlereinflüsse, v. a. die der Ionosphäre, auf die empfangenen GPS-Signale identisch und lassen sich somit bei der relativen Positionierung eliminieren (Schön 2010, Rothacher 2000, Beutler et al. 1989). Bei längeren Basislinien stellt hingegen die ionosphärenfreie Linearkombination L3 den wichtigsten Beobachtungstyp dar, da ab einer Basislinienlänge von etwa 10 km die ionosphärische Laufzeitverzögerung der größte Fehlereinfluss ist, der nicht (mehr) durch Differenzierung der Signale eliminiert werden kann. Eine zusätzliche Troposphärenkorrektur wird dann mitgeschätzt, wenn davon auszugehen ist, dass sich der räumlich und zeitlich sehr variable feuchte Anteil der troposphärischen Laufzeitverzögerung auf die in den verschiedenen Stationen empfangenen GPS-Signale unterschiedlich stark auswirkt (L3T). Dies ist das Standardmodell bei der Auswertung langer Basislinien. Weist ein kleinräumiges GPS-Netz jedoch größere Höhenvariationen auf, kann auch hier eine zusätzliche Troposphärenkorrektur sinnvoll sein (Schön et al. 2005, Beutler et al. 1995, Gurtner et al. 1989).

In diesem Beitrag wird zunächst eine Klassifikation von scheinbaren Koordinatenänderungen zur besseren Beschreibung der einzelnen Ursachen vorgeschlagen. Anhand eines in den Jahren 2011 und 2012 durchgeführten umfangreichen Experiments mit neun GPS-Antennentypen werden typische Größenordnungen bei Antennenwechseln und unterschiedlichen Auswertemethoden (L1, L2, L3, L3T) aufgezeigt und im Detail besprochen. Die

gewonnenen Erkenntnisse werden schließlich zur Erklärung von Diskrepanzen bei lokalen Verknüpfungsmessungen (Local Ties) angewandt.

2 Klassifikation von Koordinatenvariationen

Die Parameterschätzung einer GPS-Auswertung im Gauß-Markow-Modell (GMM) lässt sich nach erfolgreicher Mehrdeutigkeitslösung im letzten Ausgleichungsschritt formulieren zu

$$\Delta \hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \Delta \mathbf{l} = \mathbf{K} \Delta \mathbf{l} . \quad (1)$$

Hierin sind $\Delta \hat{\mathbf{x}}$ der $u \times 1$ -Vektor der zu schätzenden Parameter (Stationskoordinaten, Troposphärenparameter), \mathbf{A} die $n \times u$ -Designmatrix, \mathbf{P} die (elevationsabhängige) $n \times n$ -Gewichtsmatrix und $\Delta \mathbf{l}$ der gekürzte $n \times 1$ -Beobachtungsvektor. Die $u \times n$ -Matrix \mathbf{K} beschreibt die Übertragung der Information vom Beobachtungsraum in den Koordinatenraum. Koordinatenänderungen können aus zweierlei Effekten resultieren, die auch gemeinsam auftreten und sich überlagern können:

1. Die Übertragungsstruktur \mathbf{K} bleibt unverändert, aber der Beobachtungsvektor $\Delta \mathbf{l}$ ändert sich, z.B. bei Betrachtung einer anderen Frequenz (L1, L2) und deren Linearkombination(en) oder der Verwendung einer anderen Antenne bei siderisch identischem Szenario. Wir sprechen hierbei von einem *physikalischen* Effekt (Beobachtungseffekt). Weitere Variationen im Beobachtungsvektor können durch unterschiedliche Umgebungsbedingungen (Feuchtigkeit, Schnee, bauliche Veränderungen in der Stationsumgebung), durch die Nutzung eines Empfängers eines anderen Herstellers oder einer Veränderung der Firmware entstehen.
2. Die Übertragungsstruktur \mathbf{K} ändert sich, beispielsweise durch Hinzunahme eines weiteren Parameters

(hier: Schätzung der zenitalen troposphärischen Signallaufzeitverzögerung). Der Beobachtungsvektor $\Delta \mathbf{l}$ bleibt dabei unverändert; es wird aber vorausgesetzt, dass Restsystematiken wie Mehrwegeeffekte in den Beobachtungen verbleiben. Diese werden durch die Veränderung der Matrix \mathbf{K} anders auf die geschätzten Koordinaten verteilt. Wir sprechen hierbei von einem *mathematischen* oder modellabhängigen Effekt.

3 Messkonfiguration

Im Jahr 2011 wurde vom Institut für Erdmessung (IfE) ein Datensatz zur Untersuchung von Antennenwechseln auf GPS-Referenzstationen erfasst. Über mehrere Monate wurden mit einer Vielzahl von GPS-Antennen Messungen auf dem Messdach der Leibniz Universität Hannover durchgeführt, vgl. Abb. 1. Im Folgenden werden exemplarisch die in Tab. 1 aufgelisteten Messabschnitte vorgestellt und diskutiert.

Um Effekte eines Antennenwechsels möglichst präzise bestimmen zu können, bestand die Messkonfiguration immer aus zwei Antennen, die gleichzeitig betrieben wurden. Während auf Pfeiler MSD5 bzw. MSD6 verschiedene Antennen verwendet wurden, fungierte Pfeiler MSD8 als Referenzstation, deren Antenne (Leica AR25.R3 LEIT) nicht gewechselt wurde. Da beide Pfeiler nur etwa 20 m



Abb. 1: Messaufbau des Projekts Antennenwechsel

Tab. 1: Messplan des Pfeilers MSD5 im Projekt Antennenwechsel. In den mit * gekennzeichneten Setups wurde ein anderer Pfeiler (MSD6) anstelle von MSD5 genutzt.

Beobachtungszeitraum	Anzahl 24h-Sessions	Setup ID	Antennentyp	Radom	Antennen- höhe [m]
09.11.2011–13.11.2011	3	G	AR25.R3	LEIT	0,0700
13.11.2011–18.11.2011	3	H	AX1202GG	NONE	0,0700
18.11.2011–22.11.2011	3	I	TRM41249.00	NONE	0,0700
25.11.2011–30.11.2011	4	J	AT504GG	NONE	0,0700
30.11.2011–14.12.2011	13	K	AT504GG	NONE	0,1850
14.12.2011–21.12.2011	6	L	AR25.R3	LEIT	0,0700
21.12.2011–29.12.2011	7	M	JPS Regant-DD-E	NONE	0,1450
29.12.2011–09.01.2012	10	N	ASH700700.B	NONE	0,1450
27.04.2012–02.05.2012*	4	O	AR25.R3	LEIT	0,0700
02.05.2012–08.05.2012*	5	P	AR25.R3	NONE	0,0700
24.06.2012–27.06.2012	3	Q	TRM59900.00	SCIS	0,0700
29.06.2012–05.07.2012	4	R	ASH700700.B	NONE	0,1850

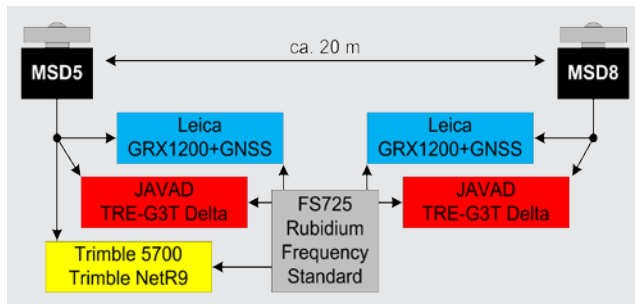


Abb. 2: Schema der Messkonfiguration des Projekts Antennenwechsel

voneinander entfernt und auf gleicher Höhe sind, ermöglicht diese Konfiguration die hochpräzise Bestimmung der Koordinaten von MSD5 relativ zu MSD8.

Pro Antenne wurden über einen Signalsplitter jeweils zwei GPS-Empfänger angeschlossen, je ein JAVAD Delta TRE-G3T und ein Leica GRX1200+GNSS (vgl. Abb. 2). Die Konfiguration der Empfänger sowie die Datenaufzeichnung der Rohdaten (1 Hz) erfolgte dabei empfängerintern (Leica, Trimble) bzw. über das vom Hersteller JAVAD bereitgestellte Softwareprogramm TriVu. Wenn auf MSD5 eine Antenne der Firma Trimble zum Einsatz kam, wurde hier zusätzlich ein Trimble-Empfänger vom Typ 5700 bzw. NetR9 betrieben, um einen optimalen Betrieb des *Low Noise Amplifiers* der Trimble-Antenne mit einer Stromversorgung von 125 mA gewährleisten zu können. Die Messkonfiguration wurde außerdem durch ein externes Rubidium-Frequenznormal (Stanford Research Systems: FS725 Rubidium Frequency Standard) ergänzt, dessen Signal eine deutlich höhere Langzeitstabilität als die in GPS-Empfängern verbauten Quarzoszillatoren aufweist (*Common Clock*). Aufgrund der GPS-Auswertung auf Basis von doppeldifferenzierten Beobachtungen ist diese Erweiterung der Messkonfiguration jedoch nicht zwingend erforderlich.

Werden mehr als ein Empfänger an einer Antenne betrieben, nennt man diese Konfiguration *Zero Baseline*, was hier sowohl auf MSD5 als auch auf MSD8 zutrifft. Mithilfe dieses Messaufbaus können Unterschiede zwischen den Empfängern untersucht werden, die Daten derselben Antenne erhalten. Da der räumliche Abstand zwischen den beiden Pfeilern lediglich 20 m beträgt, wird diese Konfiguration als kurze Basislinie (*Short Baseline*) bezeichnet. Bei diesem Abstand kann davon ausgegangen werden, dass distanzabhängige Effekte vollständig eliminiert werden.

Der Beobachtungszeitraum des Projekts Antennenwechsel 2011/12 kann in drei Phasen unterteilt werden, in denen insgesamt neun verschiedene Antennentypen eingesetzt wurden. Die unterschiedlichen Messkonfigurationen werden im Folgenden als Setups bezeichnet. Tab. 1 gibt eine Übersicht über den hier betrachteten Messplan für Messdachpfeiler MSD5 bzw. MSD6. Nach Abschluss des eigentlichen Projekts wurden im Rahmen der Masterarbeit Krawinkel (2012a) Daten für vier weitere Antennentypen erfasst (Setups O-R).

4 GPS-Auswertung

Die Auswertung der aufgezeichneten Daten erfolgte mit der *Bernese GPS Software 5.0* (Dach et al. 2007) auf Basis doppeldifferenzierter Beobachtungen (DD) der Trägerphasen L1 und L2. Neben der Auswertung der originalen Beobachtungen L1 und L2 wurde ebenfalls deren Kombination zur ionosphärenfreien Linearkombination L3 als GPS-Observable genutzt. Aufgrund der sehr kurzen Basislinienlänge von ca. 20 m kann angenommen werden, dass sich die ionosphärische Laufzeitverzögerung auf die in beiden Stationen empfangenen Signale gleichermaßen auswirkt und somit bei der Differenzbildung eliminiert wird. Dies gilt ebenfalls für die troposphärische Laufzeitverzögerung. Wurde trotzdem eine Troposphärenkorrektur in der Auswertung mitgeschätzt, erfolgte eine Unterteilung in einen trockenen und einen feuchten Anteil nach den Modellen von Niell (1996). Der trockene Anteil wurde a priori modelliert, wohingegen für den feuchten Anteil in einem Zeitintervall von einer Stunde ein Schätzwert bestimmt wurde. Diese Troposphärenparameter enthalten bei sehr kurzen Basislinien keine physikalisch relevante Information, d.h. Laufzeitverzögerungen, die durch troposphärische Refraktion hervorgerufen werden, sondern lediglich verbleibende, andere Resteffekte. Der Cut-Off-Winkel der Elevationsmaske wurde zu 10° gewählt, wenn keine Troposphärenkorrektur mitgeschätzt wurde. Ist dies jedoch der Fall, wurde – zur besseren Dekorrelation von Stationshöhe und Troposphärenkorrektur – der Cut-Off-Winkel auf 3° herabgesetzt. Untersuchungen von Krawinkel (2012a) zum Einfluss der Elevationsmaske haben im vorliegenden Fall gezeigt, dass das Herabsetzen des Cut-Off-Winkels von 10° auf 3° keinen Einfluss auf die berechneten Koordinaten hat, wenn keine troposphärische Korrektur mitgeschätzt wird.

Für jeden Antennentyp wurden die individuellen absoluten Kalibrierungen der Offsets und Variationen der Antennenphasenzentren genutzt, die am IfE bereits vor diesem Projekt bestimmt worden waren. Weitere externe Informationen, die in die Auswertung eingebracht wurden, sind die täglichen Orbits samt Satellitenuhrkorrekturen und die wöchentlichen Erdrotationsparameter des International GNSS Service (IGS, Dow et al. 2009) sowie die vom Center for Orbit Determination in Europe (CODE, Hugentobler et al. 2005) berechneten, monatlichen Differential Code Biases. Letztere wurden lediglich zur Synchronisation der Empfängeruhren verwendet.

Die Auswertung aller 24h-Sessions erfolgte mithilfe der Bernese Processing Engine (BPE), wobei das Datenintervall 5 s betrug. Im Wesentlichen unterteilt sich die Auswertung in eine Vorprozessierung, in der alle notwendigen Datensätze eingelesen und aufbereitet werden, sowie eine Netzlösung mit reellwertigen Mehrdeutigkeiten (*Float-Lösung*) und die anschließende Mehrdeutigkeitslösung samt finaler Netzlösung (*Fixed-Lösung*). Die Mehrdeutigkeitslösung erfolgte nach Dach et al. (2007) für die sehr kurzen Basislinien mittels der SIGMA-Methode.

War dieses Verfahren nicht erfolgreich, d. h. wurden nicht mindestens 98 % der Mehrdeutigkeiten gelöst, erfolgte eine erneute Auswertung mithilfe einer Methode basierend auf den Linearkombinationen Wide- und Narrow-Lane (WNL). Das Datum des Netzes wurde immer durch Fixierung der bekannten Sollkoordinaten von MSD8 im International Reference Frame 2005 (ITRF2005) festgelegt, wobei die Beobachtungen des Leica-Empfängers verwendet werden. Alle weiteren Stationen wurden also relativ zu dieser lokalen Referenzstation ausgewertet.

5 Koordinatenzeitreihen

5.1 Übersicht der Variationen

Abb. 3 und Abb. 4 zeigen durch unterschiedliche Auswertemethoden bzw. durch Antennenwechsel bedingte Variationen in den Koordinatenzeitreihen, berechnet aus dem Mittel der 24h-Lösungen der einzelnen Session.

In der Lage sind meist geringe Variationen im Submillimeterbereich zu verzeichnen, wohingegen die Höhenkomponente Variationen bis zu knapp 3 mm aufweist. Nimmt man die Wiederholbarkeit der Tageslösungen (vgl. Abb. 5) als Genauigkeitsmaße für Koordinatenmittelwerte aus einem Setup, so können alle Koordinatenänderungen zwischen aufeinanderfolgenden Setups – mit Ausnahme von I/J – sowohl in der Lage als auch in der Höhe als signifikant bezeichnet werden.

Ebenso sind Unterschiede zwischen den beiden Frequenzen L1 und L2 zu sehen, was zu einer Verstärkung für die ionosphärenfreien LK führt (vgl. Abs. 5.4). Mit Ausnahme der Setups J und P weisen die auftretenden Höhendifferenzen innerhalb der einzelnen Setups anten-

nenspezifische Systematiken zwischen L1- und L2-Lösung auf.

Um einen vertieften Eindruck über die Größenordnung der Koordinatenwiederholbarkeit bzw. Veränderungen durch Nutzung anderer Antennen zu geben, werden im Folgenden zunächst exemplarisch für 32 Tage der Setups G-L die Tageslösungen betrachtet.

5.2 L1-Lösung

In Abb. 5 sind die Koordinatenergebnisse der L1-Lösung in einem topozentrischen System – mit Ursprung in den Sollkoordinaten – grafisch dargestellt. Neben den Ergebnissen der kurzen Basislinien zwischen MSD5 und MSD8 sind ebenfalls die der Zero-Baseline von MSD8 aufgetragen. Die Koordinatenergebnisse der Letztgenannten weichen maximal um $\pm 0,1$ mm von den Sollkoordinaten ab, die für beide Empfänger auf MSD8 identisch sind. Es sind hier folglich keine systematischen Abweichungen zwischen den beiden verwendeten Empfängern erkennbar. Die topozentrischen Koordinaten der kurzen Basislinien MSD5–MSD8 aller ausgewerteten Sessions weisen die für kurze Basislinien typische hohe Präzision innerhalb eines jeden Setups auf. Dies ist in Abb. 5 direkt erkennbar. Die numerischen Werte liegen alle im niedrigen Submillimeterbereich, sodass auf eine explizite Angabe hier verzichtet wird. Abhängig vom verwendeten Antennentyp ist die Präzision der Höhenkomponente bis zu achtmal schlechter als die der Lagekoordinaten.

Koordinatensprünge, die aufgrund eines Antennenwechsels entstehen können, treten in den L1-Lösungen in geringfügigem Maß zwischen einigen Setups auf (vgl. Abb. 3).

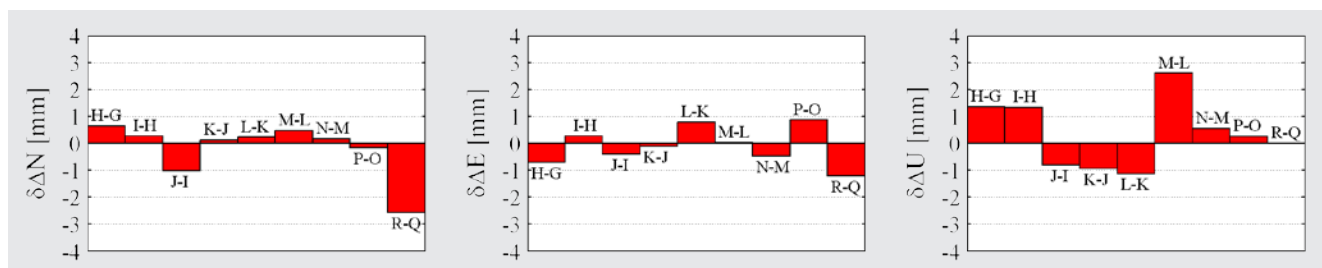


Abb. 3: Differenzen aufeinanderfolgender Setup-Mittelwerte der L1-Lösung, getrennt dargestellt für Lage- und Höhenkoordinaten

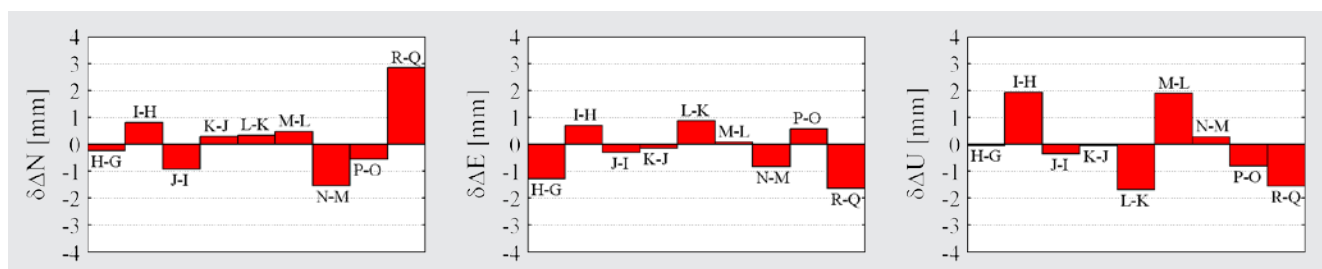


Abb. 4: Differenzen aufeinanderfolgender Setup-Mittelwerte der L2-Lösung, getrennt dargestellt für Lage- und Höhenkoordinaten

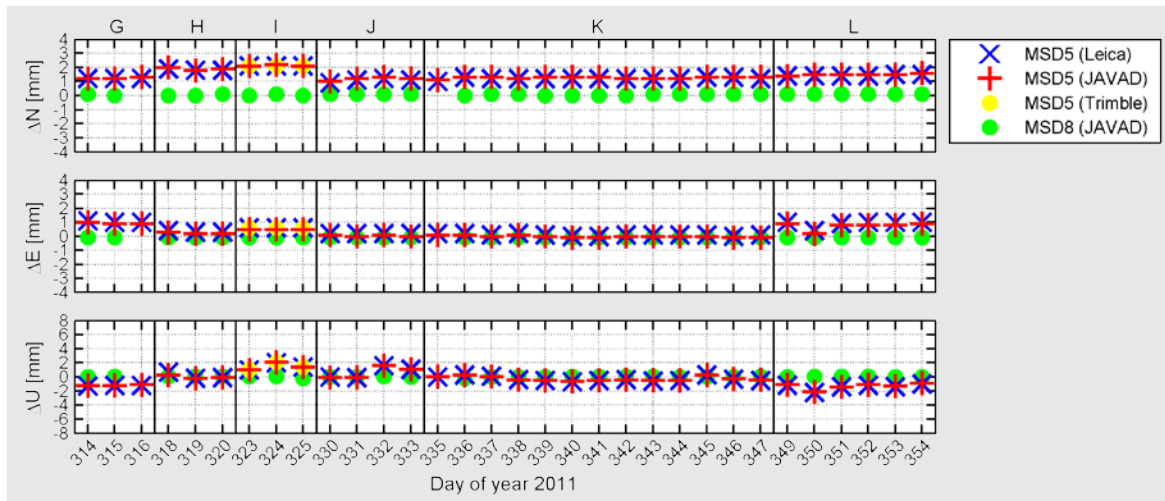


Abb. 5:
Topo-
zentrische
Koordinatenergebnisse der L1-Lösung, bezogen auf die Sollkoordinaten

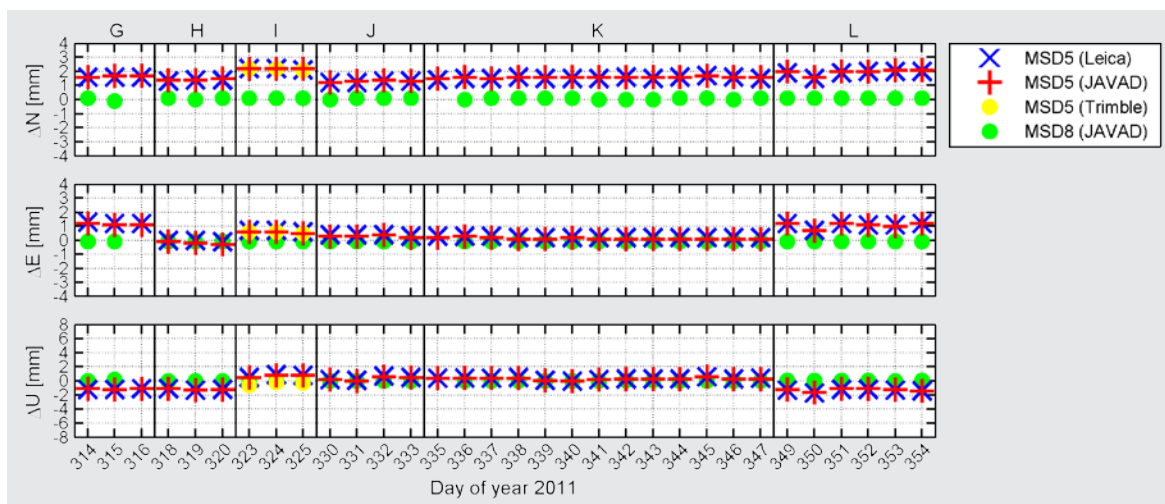


Abb. 6:
Topo-
zentrische
Koordinatenergebnisse der L2-Lösung, bezogen auf die Sollkoordinaten

5.3 L2-Lösung

Die in Abb. 6 dargestellten Koordinatenergebnisse der L2-Lösungen weisen eine ähnlich hohe Präzision wie die der L1-Lösungen auf. Auffälligkeiten zeigen sich hier im Setup I, in dem ein zusätzlicher Trimble-Empfänger in die Messkonfiguration eingebunden war. Dessen aufgezeichneten Daten führen zu erkennbar anderen Höhenkoordinaten als die L2-Beobachtungen der JAVAD- und Leica-Empfänger. Hierbei kann es sich u. a. um unterschiedliche Trackingalgorithmen handeln.

Koordinatenabweichungen zwischen den verschiedenen Setups sind, insbesondere in den Lagekomponenten, größer als in den Ergebnissen der L1-Lösungen (vgl. Abb. 5).

5.4 L3-Lösung

Die Ergebnisse der ionosphärenfreien LK weisen in den Lagekoordinaten eine ähnliche Wiederholbarkeit wie die L1-Lösung auf. Allerdings ist die Präzision der berechneten Stationshöhen etwa um den Faktor 2–3 schlechter, was sich auch in Variationen der entsprechenden Koordinatenzeitreihen äußert (vgl. Abb. 7). Der Faktor 2–3 ent-

spricht der Erhöhung des Rauschniveaus, die mit dieser LK einhergeht (Seeber 2003). Falls die Mehrdeutigkeiten gelöst werden konnten, kann dies durch Kombination der originalen L1- und L2-Koordinaten zu einer ionosphärenfreien LK auf Koordinatenebene gezeigt werden (Krawinkel 2012b).

Darüber hinaus fallen nun Inkonsistenzen in den Lösungen stärker auf: So ist beispielsweise am Tag 350 durch Schneefall das Messdach sowie die Antenne mit einer dünnen Schneedecke überzogen, die zu Koordinatenänderungen führt. In den Tagen 323 bis 325 zeigen sich die Unterschiede des Signaltrackings zwischen den Trimble- und Leica/JAVAD-Empfängern auf der Frequenz L2.

5.5 L3-Lösung mit Troposphärenkorrektur

Lange Basislinien (>10 km) werden aufgrund der ionosphärischen Fehlereinflüsse fast immer mittels der L3-LK ausgewertet, wenn Zweifrequenz-Beobachtungen vorliegen. Dabei wird zumeist auch eine Troposphärenkorrektur mitgeschätzt, um die verschiedenartigen troposphärischen Einflüsse in den beteiligten Stationen zu berücksichtigen.

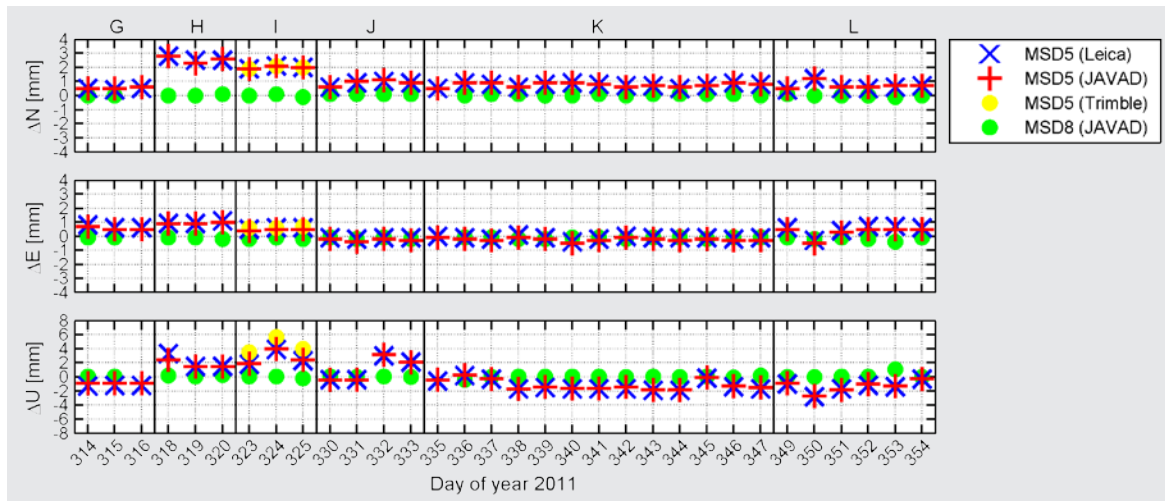


Abb. 7:
Topo-
zentrische
Koordinatenergebnisse der L3-Lösung, bezogen auf die Sollkoordinaten

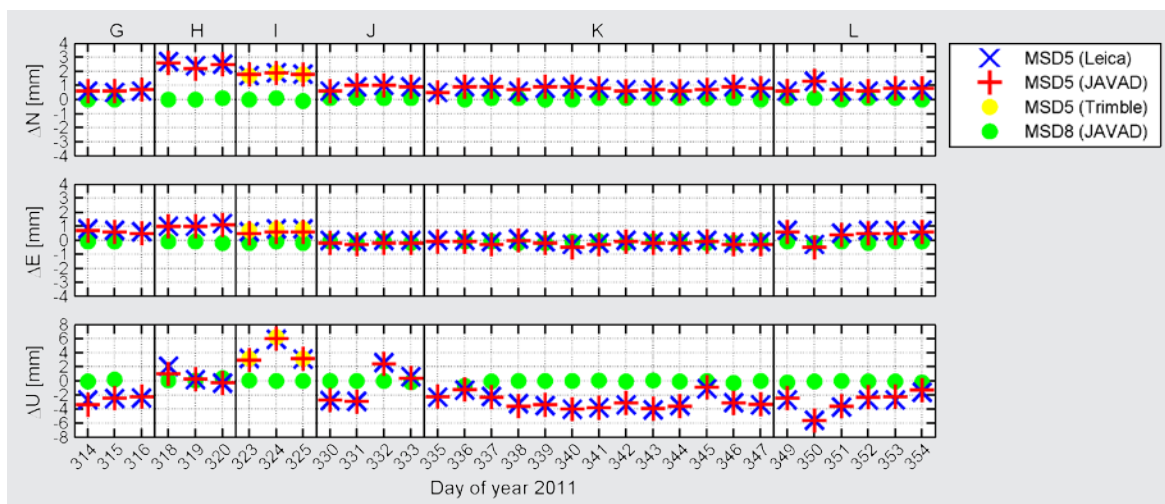


Abb. 8:
Topo-
zentrische
Koordinatenergebnisse der L3T-Lösung, bezogen auf die Sollkoordinaten

Dies führt zu einer Verringerung der Stationshöhe, die etwa das 3- bis 3,5-fache der Troposphärenkorrektur ausmacht (vgl. Beutler et al. 1989, Schön 2013). Dieser Effekt zeigt sich ebenfalls im vorliegenden Fall, wie in Abb. 8 zu erkennen ist. Im Folgenden soll nun gezeigt werden, dass diese Koordinatenvariationen als beobachtungsabhängige (physikalische) und mathematische Effekte (vgl. Abs. 2) interpretierbar sind.

6 Diskussion und Detailuntersuchungen zu physikalischen Effekten

6.1 Grundidee und Vorgehensweise

Bei dem in Abs. 2 definierten physikalischen Effekt ändert sich der Wert der Messgröße, wohingegen die Geometrie des Ausgleichungsproblems unverändert bleibt. Um dies zu zeigen, werden die DD-Werte des gekürzten Beobachtungsvektors ΔI mithilfe einer am IfE in die *Bernese GPS Software 5.0* implementierten Routine ausgelesen und so weiterverarbeitet, dass ΔI für jedes beliebige Satellitenpaar einer Basislinie gebildet werden kann. Die Satellitenpaare werden so ausgewählt, dass sich die DD über einen möglichst langen Zeitraum von mehreren

Stunden erstrecken und hoch und tief stehende Satelliten kombinieren, um unterschiedliche Effekte zu beinhalten.

Für die Analyse werden die Differenzen zweier DD-Zeitreihen gebildet und mithilfe der Autokorrelationsfunktion wird deren Ähnlichkeit charakterisiert. Unterscheiden sich die beiden DD-Zeitreihen im Rahmen einer bestimmten Unsicherheit nicht, entspricht die Autokorrelationsfunktion der eines *Weißes Rauschens*. Treten Unterschiede zwischen den Zeitreihen auf, so führen diese Signalanteile zu einem anderen stochastischen Prozess, der sich entsprechend in der Autokorrelationsfunktion widerspiegelt.

Es werden drei Fälle exemplarisch für die Basislinie zwischen den beiden Leica-Empfängern von MSD8 und MSD5 betrachtet:

1. Identische Antenne, identische Frequenz
2. Identische Antenne, unterschiedliche Frequenzen
3. Unterschiedliche Antennen, identische Frequenz

6.2 Frequenzabhängige Beobachtungseffekte

Differenzen zwischen den Koordinatenergebnissen der L1- und L2-Auswertungen verursachen bei Anwendung der L3-LK Koordinatenabweichungen gegenüber der

L1-Lösung. Daher werden an dieser Stelle, am Beispiel der Tage 343 und 344 (Setup K), die DD-Zeitreihen der L1- und L2-Beobachtungen verglichen, da die zugehörigen Koordinatenergebnisse in den Lage- und Höhenkoordinaten um bis zu 0,9 mm voneinander abweichen.

In den Abb. 9 (a) bis (d) sind die Originalzeitreihen der L1- und L2-DD dargestellt, die visuell eine siderische Wiederholung der Beobachtungsvariationen und das typische elevationsabhängige Rauschen von wenigen Millimetern aufzeigen. Die Teilabbildungen (e) und (f) zeigen die siderischen Differenzen der beiden aufeinanderfolgenden Sessions. Aufgrund der individuellen Umlaufperiode jedes GPS-Satelliten, die um wenige Sekunden von der nominellen Umlaufzeit eines Sterntages abweicht, müssen die Zeitreihen zweier Sessions vor der Differenzbildung noch exakt verschoben werden (Dilßner 2007). Dies gelingt mithilfe des maximalen Kreuzkorrelationskoeffizienten zwischen den beiden Zeitreihen. Die Teilabbildungen (g) und (h) geben die Differenzen von L1 und L2 innerhalb der beiden Sessions an. In Teilabbildung (i) sind schließlich die Autokorrelationsfunktionen der vier Differenz-Zeitreihen dargestellt. Die Autokorrelationsfunktionen identischer Frequenzen (blau, gelb) zeigen, dass sich die L1- bzw. L2-DD siderisch sehr gut wiederholen, weshalb auch eine gute Konsistenz der Koordinatenzeitreihe erhalten wird. Die Autokorrelationsfunktionen der Differenz aus L1- und L2-DD (rot, grün) zeigen noch Signalanteile. Dies unterstreicht, dass die Ausbreitungs- und Verarbeitungsbedingungen zwar zeitlich stabil und damit wiederholbar sind, jedoch für die beiden Frequenzen zu leicht unterschiedlichen, frequenzabhängigen Signaturen führen, die schließlich für Variationen in den Koordinatenzeitreihen verantwortlich sind. Diese Eigenschaften der DD-Zeitreihen des Satellitenpaares PRN8-PRN5 zeigen sich in ähnlicher Form auch für weitere Satellitenpaare. Ein Fortschritt beim Verständnis dieser Effekte (Wanninger et al. 2006, Smyrniotis et al. 2013, Smyrniotis und Schön 2014) sind daher von großer Wichtigkeit, um das Potenzial von GPS voll auszunutzen.

6.3 Beobachtungsabhängige Effekte durch Antennenwechsel

Als weitere Ursache für physikalische Effekte soll exemplarisch der Antennenwechsel zwischen den Setups K (Leica AT504GG NONE) und L (Leica AR25.R3 LEIT) für L2 näher betrachtet werden. Abb. 10 zeigt von (a) bis (c) und von (f) bis (h) die Originalzeitreihen der L2-DD der beiden Setups. Die Differenzzeitreihen innerhalb dieser Setups sowie die Differenzzeitreihen zwischen zwei Sessions verschiedener Setups (DoY 347–349) sind in den Teilabbildungen (d) und (e) sowie (i) bis (k) dargestellt. Die zugehörigen Autokorrelationsfunktionen sind in (l) zusammengestellt.

Die Autokorrelationsfunktionen der Differenzzeitreihen innerhalb der beiden Setups entsprechen weißem

Rauschen, wohingegen die Autokorrelationsfunktion von Differenzzeitreihen zwischen den beiden verschiedenen Antennentypen noch Signale enthalten. Die Differenzen der L2-DD innerhalb eines Setups weisen also keine systematischen, zeitabhängigen Unterschiede auf, was sich in der guten Wiederholbarkeit der L2-Koordinatenzeitreihe innerhalb der Setups niederschlägt. Für den Vergleich der L2-DD zweier Setups mit unterschiedlichen Antennen gilt dies jedoch nicht. Hier sind antennenabhängige Differenzen erkennbar, die zu Veränderungen der Koordinatenzeitreihe führen. Ursache hierfür sind unterschiedliche Antennengewinne (Smyrniotis und Schön 2014), eine unterschiedliche Beeinflussung dieses Gewinns durch den Antennennahbereich (Pfeiler, vgl. Abb. 1), was schließlich zu einer anderen Sensitivität für Mehrwegeeffekte führt. Zeimetz und Kuhlmann (2010) oder Wübbena et al. (2012) versuchen durch spezielle Aufbauten (Abstandsstab) diese Beeinflussung zu reduzieren. Hier sind weitere Untersuchungen hilfreich. Wanninger (2009) nutzt die Stabilität des Effekts, um Korrekturen für die Beobachtungen wegen Antennenwechseln abzuleiten und somit eine Kontinuität der Koordinatenzeitreihen herzustellen.

7 Diskussion und Detailuntersuchungen zu mathematischen Effekten

7.1 Einleitung

Im Zuge der zuvor vorgestellten Analysen wurde weiterhin festgestellt, dass es keine Unterschiede zwischen den gekürzten Beobachtungsvektoren ohne (L3) und mit Schätzen einer Troposphärenkorrektur (L3T) gibt. Die Koordinatenabweichungen zwischen den beiden Auswertestrategien sind somit nicht auf $\Delta \mathbf{l}$ zurückzuführen. Da die den L3- und L3T-Auswertungen zugrunde liegenden Beobachtungen identisch sind, gilt dies ebenfalls für die Gewichtsmatrix \mathbf{P} . Das Schätzen einer Troposphärenkorrektur verändert nur das funktionale Modell der GPS-Auswertung (Designmatrix \mathbf{A}), sodass Differenzen zwischen den Parametervektoren $\Delta \hat{\mathbf{x}}$ der L3- und L3T-Auswertungen auf diesen Umstand zurückzuführen sein müssen. Hierzu werden die $u \times n$ -Übertragungsmatrizen \mathbf{K}_{L3} bzw. \mathbf{K}_{L3T} studiert (Schön 2007):

$$\mathbf{K}_{L3} = [\mathbf{k}_{L3,N} \quad \mathbf{k}_{L3,E} \quad \mathbf{k}_{L3,U}]^T, \quad (2)$$

$$\mathbf{K}_{L3T} = [\mathbf{k}_{L3T,N} \quad \mathbf{k}_{L3T,E} \quad \mathbf{k}_{L3T,U} \quad \mathbf{k}_{L3T,T}]^T. \quad (3)$$

Der Einfachheit halber wird hier nur ein Troposphärenparameter pro Tag aufgesetzt, die Schlüsse gelten aber auch für kürzere Zeitabschnitte (vgl. Krawinkel 2012a). Bei der Multiplikation dieser Matrizen mit dem gekürzten Beobachtungsvektor, wird letzterer vom Beobachtungsraum in den Koordinatenraum abgebildet. Jede Zeile von \mathbf{K} fungiert dabei als Abbildungsfunktion für genau

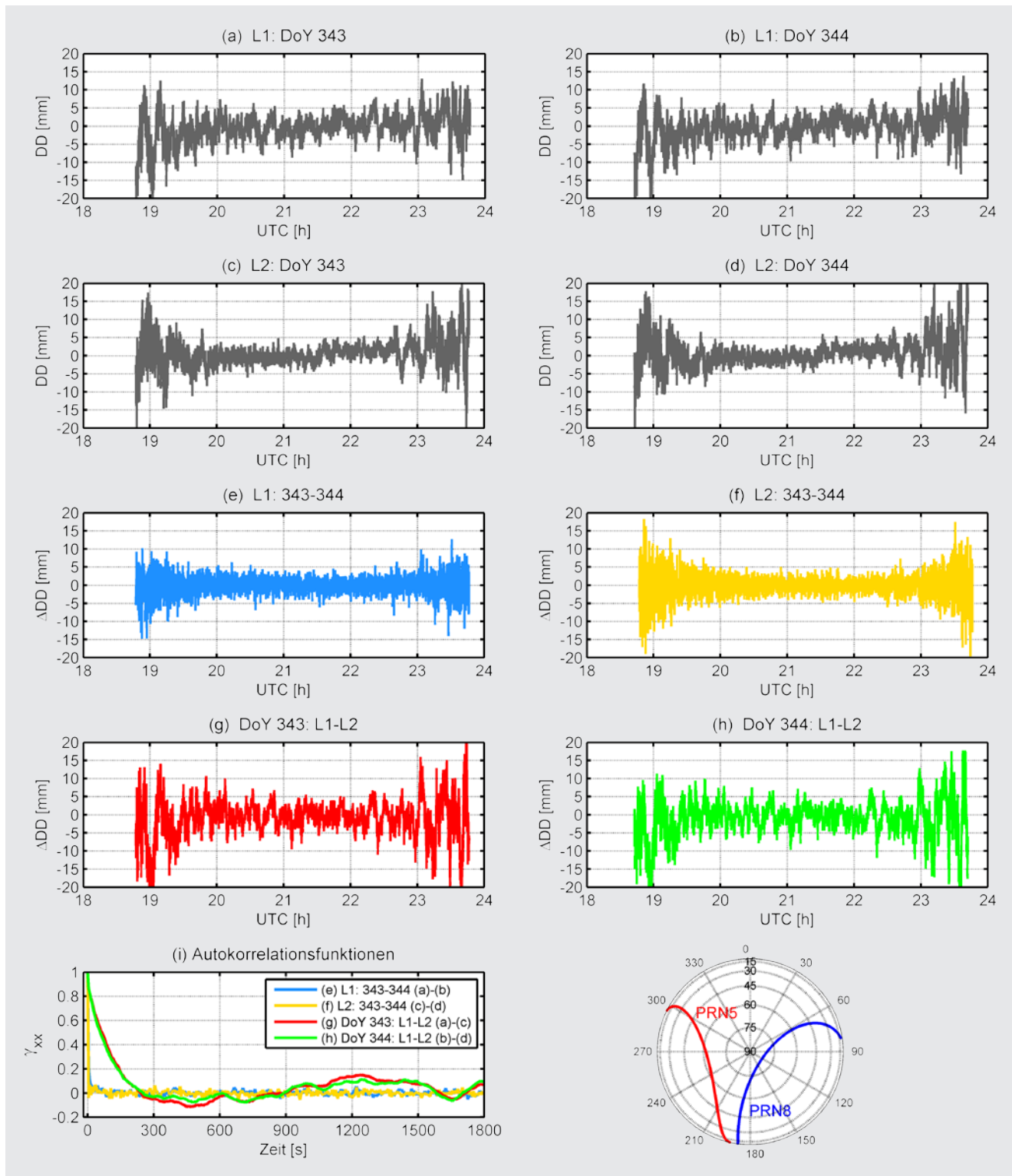


Abb. 9: Vergleich von L1- und L2-DD-Zeitreihen exemplarisch für zwei Tage von Setup K für das Satellitenpaar PRN8-PRN5: (a)–(d) Originalzeitreihen; (e) Siderische Differenzen von (a) und (b); (f) Siderische Differenzen von (c) und (d); (g) Frequenzabhängige Differenzen von (a) und (c); (h) Frequenzabhängige Differenzen von (b) und (d); (i) Autokorrelationsfunktionen von (e)–(h)

einen unbekannten Parameter. Es lässt sich zeigen, dass das Übertragungsverhältnis zwischen Höhen- und Troposphärenparameter elementweise konstant ist

$$\delta_{\mathbf{U}}^{\mathbf{T}} = \frac{\mathbf{k}_{\mathbf{L3T,U}} - \mathbf{k}_{\mathbf{L3,U}}}{\mathbf{k}_{\mathbf{L3T,T}}} = \text{const.} \quad (4)$$

und gerade dem bekannten Verhältnis zwischen Höhen- und Troposphärenparameter

$$\delta_{\mathbf{U}}^{\mathbf{T}} = \frac{\delta \Delta \mathbf{U}}{\Delta \mathbf{T}} = \frac{\Delta \mathbf{U}_{\mathbf{L3T}} - \Delta \mathbf{U}_{\mathbf{L3}}}{\Delta \mathbf{T}} \quad (5)$$

von etwa –3:1 entspricht (Schön 2013, Beutler et al. 1989).

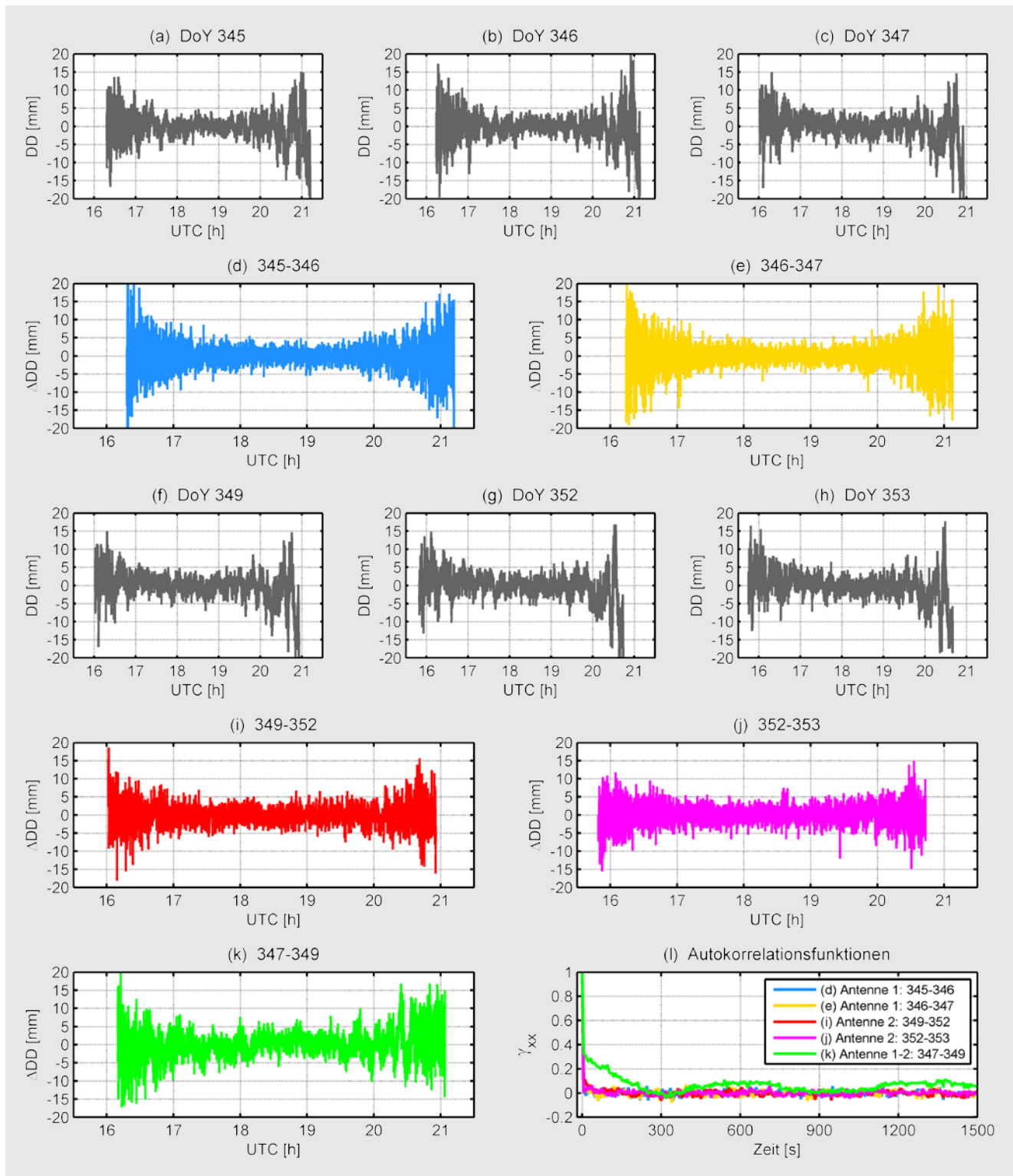


Abb. 10: Vergleich von L2-DD-Zeitreihen exemplarisch für jeweils drei Tage der Setups K (DoY 345–347) und L (DoY 349–353) für das Satellitenpaar PRN10–PRN13: (a)–(c), (f)–(h) Originalzeitreihen; (d)–(e) Siderische Differenzen von (a)–(c) innerhalb des Setups K; (i)–(j) Siderische Differenzen von (f)–(h) innerhalb des Setups L; (k) Siderische Differenzen zw. verschiedenen Setups; (l) Autokorrelationsfunktionen von (d), (e), (i)–(k)

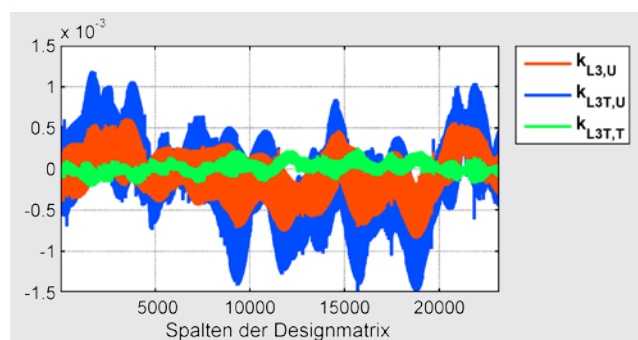
Die Abb. 11 und Tab. 2 zeigen dies am Beispiel des Tages 344 (Leica AT504GG NONE, 3° Cut-Off-Winkel). Die Zuschläge zu den genäherten Schätzparametern sind in Tab. 2 aufgelistet. Es ist direkt erkennbar, dass das zusätzliche Schätzen der Troposphärenkorrektur ΔT zu einer Reduktion der Stationshöhe ΔU führt. Das zugrunde

liegende Verhältnis kann auch mithilfe der in Abb. 11 dargestellten Vektoren berechnet werden. Dabei ergibt sich für alle 23.178 Elemente des Ergebnisvektors δ_U^T ein Wert von $-3,2$.

Es ist also festzustellen, dass das zusätzliche Schätzen einer Troposphärenkorrektur zu einer Veränderung

Tab. 2: Topozentrische Schätzparameter der L3- und L3T-Auswertungen für MSD5

	ΔN	ΔE	ΔU	ΔT
$\Delta \hat{x}_{L3}$ [mm]	0,54	-0,24	-1,76	-
$\Delta \hat{x}_{L3T}$ [mm]	0,61	-0,26	-3,78	0,68

Abb. 11: Spaltenweise Darstellung der Vektoren $k_{L3,U}$, $k_{L3T,U}$ und $k_{L3T,T}$

der Struktur der Abbildungsmatrix K zwischen Beobachtungs- und Koordinatenraum führt. Dies betrifft fast ausschließlich die Höhenkoordinate. Die dadurch entstehende scheinbare Koordinatenänderung ist also auf die veränderte Modellierung des funktionalen Zusammenhangs zwischen Beobachtungen und Parametern zurückzuführen und somit rein mathematischer Natur.

7.2 Anwendung auf Problematik der Local Ties

Bei der Berechnung des ITRF (International Terrestrial Reference Frame) werden die Lösungen unterschiedlicher geodätischer Raumverfahren (GPS; SLR: Satellite Laser Ranging; VLBI: Very Long Baseline Interferometry; DORIS: Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellites) durch Stationen verknüpft, den sogenannten *Co-Locations*, in denen zwei oder mehr Verfahren gemeinsam untergebracht sind (Altamimi et al. 2011). Innerhalb solcher Stationen werden lokale geodätische Netze angelegt, die die Referenzpunkte der einzelnen Raumverfahren beinhalten und deren relative Positionen durch terrestrische Präzisionsmessungen mit Tachymetern, Theodoliten und Nivellieren mit anschließender Netzausgleichung bestimmt werden. Diese Verbindungsvektoren werden *Local Ties* genannt und als (zusätzliche) Beobachtungen in die Kombination der vier Raumverfahren eingeführt. Ein Vergleich der aus dem ITRF ermittelten Verbindungsvektoren mit den terrestrischen Ergebnissen führt zu Diskrepanzen von wenigen Millimetern bis zu einigen Zentimetern. Letzteres trifft nach Tab. 3 auf etwa 37 % aller Diskrepanzen zu (Altamimi et al. 2011). Eine bereits detektierte Fehlerquelle ist die Verwendung von unkalibrierten Radomen der GPS-Empfangsantennen (Ray et al. 2007).

Die vom IGS berechneten globalen GPS-Lösungen, die zum ITRF beitragen, resultieren aus einer Kombination

Tab. 3: Prozentuale Anteile der Diskrepanzen der Local Ties im ITRF2008 (Altamimi et al. 2011)

Diskrepanz [mm]	GPS-VLBI	GPS-SLR	GPS-DORIS
< 6	47	43	34
6–10	24	29	12
> 10	29	28	54

der individuellen Netzlösungen mehrerer Analysezentren, die alle auf reinen L3- bzw. L3T-Auswertungen basieren. Das zugrunde liegende GPS-Netz beinhaltet jedoch auch sehr kurze Basislinien, da in einigen IGS-Stationen mehr als nur eine GPS-Antenne betrieben wird. Dies trifft insbesondere auf Co-Locations wie die Fundamentalstation Wettzell (Bad Kötzing) zu (Steigenberger et al. 2013). Die Verwendung einer L3T-Auswertestrategie führt wie in Abs. 5.4 gezeigt zu Verfälschungen der Koordinaten von mehreren Millimetern, die eine Mischung aus mathematischem Effekt (Schätzung des Troposphärenparameters) und physikalischem Effekt (tatsächliche Mehrwegebelastung der Station) sind.

Unsere Erfahrungen zeigen, dass für kurze Basislinien die L1-Lösung im Submillimeterbereich mit terrestrischen Messungen übereinstimmt, und wir empfehlen daher diese für solche Basislinien zu nutzen. Dies wurde u. a. durch Krawinkel (2012a) am Beispiel der in den vorherigen Abschnitten diskutierten Pfeiler MSD5 und MSD8 der Tage 339 bis 344 (Setup K) gezeigt. Letztgenannte wurden hierbei einzeln mittels langer Basislinien (220–420 km) an die ITRF-Stationen Wettzell (WTZR), Warnemünde (WARN) und Westerbork (WSRT) angeschlossen, und die daraus resultierenden relativen Koordinaten von MSD5 zu MSD8 berechnet. Ein Vergleich mit den topozentrischen Koordinaten der L1-Lösung von MSD5 relativ zu MSD8 ergab ausschließlich eine mittlere Höhendifferenz von -2,6 mm (bei einem Höhenunterschied von 10,2 mm für die L3T-Lösung, rot). Als Referenzlösung (blau) für den Höhenunterschied von 12,8 mm der beiden Messdachpfeiler diente das Ergebnis eines Feinnivellements, das auf 0,2 mm mit dem Resultat der lokalen L1-Lösung (grün) übereinstimmt (vgl. Abb. 12). Aus den L3T-Lösungen ergibt sich für die geschätzten Troposphä-



Abb. 12: Topozentrische Höhen von MSD5 relativ zu MSD8 aus unterschiedlichen Mess- und Auswerteverfahren. Die berechnete Höhenkorrektur für L3T von 2,2 mm ist rot transparent dargestellt.

renparameter ein Mittelwert von 0,68 mm, obwohl auf einer so kurzen Basislinie kein Troposphärenunterschied zu erwarten ist und somit ein Wert von 0,00 mm korrekt wäre. Mithilfe des im vorherigen Abschnitt empirisch bestimmten Wertes für δ_U^T von -3,2 und Formel (5) lässt sich für die L3T-Lösung eine Höhenkorrektur berechnen:

$$\delta\Delta U = \delta_U^T \cdot \Delta T = -3,2 \cdot 0,68 \text{ mm} = -2,2 \text{ mm} . \quad (6)$$

Die korrigierte L3T-Höhe von MSD5 ergibt sich dann zu

$$h_{L3T, \text{corr}} = h_{L3T} - \delta\Delta U = 12,4 \text{ mm} . \quad (7)$$

Der Korrekturfaktor δ_U^T liegt abhängig von der gewählten Elevationsmaske im Bereich zwischen -3 und -3,5. Für den vorliegenden Fall ist die Höhenkorrektur in Abb. 12 rot transparent dargestellt. Die Reduzierung der mathematisch bedingten scheinbaren Koordinatenänderung ist hier klar ersichtlich.

8 Schlussbetrachtungen

Im vorliegenden Beitrag wurde die Problematik der scheinbaren Koordinatenänderungen von GPS-Stationen unter Berücksichtigung von Antennenwechseln und unterschiedlichen Auswertemethoden analysiert. Es wurde gezeigt, dass diese Koordinatenänderungen durch mathematische Effekte (Veränderung der Übertragungsstruktur vom Beobachtungs- in den Positionsraum) und/oder physikalische Effekte (tatsächliche Änderung der Beobachtungswerte) hervorgerufen werden können. Diese Unterteilung hilft, die unterschiedlichen Ursachen besser zu strukturieren und trägt somit zum Verständnis des komplexen Problems der scheinbaren Koordinatenvariationen bei. Mathematische Effekte treten durch unterschiedliche Parametrisierung in der Auswertung auf und können korrigiert werden. Physikalische Effekte sind weitaus schwieriger zu erfassen; zentrales Element ist dabei das Wechselspiel des Antennengewinns der GPS-Antennen mit der Stationsumgebung, das die Sensitivität für Mehrwegeeffekte der einzelnen Frequenzen steuert. Deshalb können bei Antennenwechseln trotz identischer Antennenposition Koordinatensprünge auftreten.

Anhand eines Experiments mit neun unterschiedlichen Antennentypen auf einer kurzen Basislinie von etwa 20 m wurde die Größenordnung der Koordinatensprünge bedingt durch einen Antennenwechsel aufgezeigt, die Werte von bis zu einigen Millimetern annehmen können. Darüber hinaus wurde der Einfluss unterschiedlicher Auswertestrategien mit den originalen Beobachtungen L1 und L2 sowie der ionosphärenfreien Linearkombination L3 analysiert. Die L1- und L2-Koordinaten weisen dabei eine hohe Präzision von weniger als 1 mm innerhalb eines Antennentyps auf. Wird zusätzlich eine Troposphärenkorrektur mitgeschätzt, führt dies zu weiteren

Änderungen ausschließlich in den Höhenkoordinaten. Eine Troposphärenkorrektur von +1 mm verursacht eine Senkung der Stationshöhe von etwa 3 mm. Dieser Faktor tritt unabhängig vom verwendeten Antennentyp auf. Aus unseren Erfahrungen ist deshalb in räumlich kleinen Netzen mit sehr ähnlichen troposphärischen Bedingungen zu empfehlen, die durch letztgenannte hervorgerufenen Effekte durch Doppeldifferenzbildung anstatt durch zusätzlich geschätzte Korrekturparameter zu reduzieren. Sollte letzteres unumgänglich sein, kann mithilfe der Schätzwerte für die Troposphärenparameter und eines Korrekturfaktors ($-3 \leq \delta_U^T \leq -3,5$) eine Höhenkorrektur berechnet werden, die den mathematischen Effekt der scheinbaren Koordinatenänderung deutlich reduziert.

Dank

Teile der Ergebnisse wurden im Rahmen des EMRP-Vorhabens Joint Research Project SIB60 Surveying erzielt. Die Autoren danken für die finanzielle Unterstützung durch das European Metrology Research Programme (EMRP). Dieses wird von den im Rahmen von EURAMET am EMRP teilnehmenden Ländern und der Europäischen Union gemeinschaftlich finanziert.

Literatur

- Altamimi, Z., Collilieux, X., Métivier, L.: ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame. *Journal of Geodesy* 85, S. 457–473, 2011.
- Beutler, G., Bauersima, I., Botton S., Gurtner, W., Rothacher M., Schildknecht, T.: Accuracy and biases in the geodetic application of the Global Positioning System. *Manuscripta geodetica* 14, S. 28–35, 1989.
- Beutler G., Geiger, A., Rothacher, M., Schaer, S., Schneider, D., Wiget, A.: Dreidimensionales Testnetz Turtmann 1985–1993 – Teil II (GPS-Netz). *Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz* Vol. 51, Schweizerische Geodätische Kommission, Zürich, 1995.
- Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P., Meindl, M.: *Bernese GPS Software Version 5.0*. Astronomical Institute, University of Berne, Switzerland, 2007.
- Dilbner, F.: Zum Einfluss des Antennenumfeldes auf die hochpräzise GNSS-Positionsbestimmung. *Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover*, Nr. 271, 2007.
- Dilbner, F., Seeber, G., Wübbena, G., Schmitz, M.: Impact of Near-Field Effects on the GNSS Position Solution. *Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008)*, Savannah, GA, S. 612–624, 2008.
- Dow, J., Neilan, R., Rizos, C.: The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems. *Journal of Geodesy* 83 (3–4), S. 191–198, 2009.
- Gurtner, W., Beutler, G., Botton, S., Rothacher, M., Geiger, A., Kahle, H., Schneider, D., Wiget, A.: The use of the Global Positioning System in mountainous areas. *Manuscripta geodetica* 14, S. 53–60, 1989.
- Hugentobler, U., Schaer, S., Dach, R., Meindl, M., Urschl, C.: Routine Processing of Combined Solutions for GPS and GLONASS at CODE. In: M. Meindl (Hrsg.), *Celebrating a decade of the International GNSS Service, Workshop and Symposium 2004*. Astronomical Institute, University of Berne, Switzerland, 2005.
- Krawinkel, T.: *Auswertebedingte scheinbare Koordinatenänderungen in GPS-Netzen unter besonderer Berücksichtigung von Antennenwechseln*. Masterarbeit, Leibniz Universität Hannover, unveröffentlicht, 2012a.

- Krawinkel, T.: Auswertebedingte scheinbare Koordinatenänderungen in GPS-Netzen unter besonderer Berücksichtigung von Antennenwechseln. Geodätische Woche 2012, Hannover, www.uni-stuttgart.de/gi/research/Geodaetische_Woche/2012/Session03/Krawinkel_GW2012.pdf, letzter Zugriff 04/2014, 2012b.
- Niell, A. E.: Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. *Journal of Geophysical Research* 101 (B2), S. 3227–3246, 1996.
- Ray, J., Crump, D., Chin, M.: New global positioning system reference station in Brazil. *GPS Solutions* 11, S. 1–10, 2007.
- Riecken, J., Ruf, B.: Die Integration von GLONASS in SAPOS® – Eine Blaupause für Galileo!, *zfv* 138, S. 385–390, 2013.
- Rothacher, M.: Hochgenaue regionale und kleinräumige GPS-Netze: Fehlerquellen und Auswertestrategien. DVW Mitteilungsblatt, Heft 2/2000 (52. Jg.), S. 153–172, 2000.
- Schön, S., Wieser, A., Macheiner, K.: Accurate tropospheric correction for local GPS monitoring networks with large height differences. *Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2005)*, Long Beach, CA, S. 250–260, 2005.
- Schön, S.: Affine distortion of small GPS networks with large height differences. *GPS Solutions* 11, S. 107–117, 2007.
- Schön, S.: Differentielle GNSS Systeme – Code- und Phasenlösungen. In: A. Scheider, V. Schwieger (Hrsg.): *GNSS 2010 – Vermessung und Navigation im 21. Jahrhundert. Beiträge zum 100. DVW Seminar am 4. und 5. Oktober in Köln, Schriftenreihe des DVW, Band 63*, S. 15–38, Wißner-Verlag, Augsburg, 2010.
- Schön, S.: Zum Potenzial von modernen Atomuhren für die kinematische Positionierung mit GNSS. In Meyer M.: *GNSS 2013 – Schneller, Genauer, Effizienter, Beiträge zum 124. DVW Seminar am 14. und 15. März 2013 in Karlsruhe, Schriftenreihe des DVW, Band 70*, S. 227–244, Wißner-Verlag, Augsburg, 2013.
- Seeber, G.: *Satellite Geodesy. 2nd completely revised and extended edition*, Walter de Gruyter, Berlin, New York, 2003.
- Smyrnaio, M., Schön, S., Liso, M.: Multipath Propagation, Characterization and Modeling in GNSS. In: S. Jin (ed.), *Geodetic Sciences – Observations, Modeling and Applications*, InTech, Rijeka, 2013.
- Smyrnaio, M., Schön, S.: GNSS antenna impact on the resulting multipath effects in carrier-phase and signal amplitude. *Proc IAG Potsdam accepted*, 2014.
- Steigenberger, P., Hugentobler, U., Schmid, R., Hessels, U., Klügel, T., Seitz, M.: GPS-specific local effects at the Geodetic Observatory Wettzell. In: Z. Altamimi, X. Collilieux (Hrsg.), *Reference Frames for Applications in Geosciences, IAG Symposia, Vol. 138*, S. 125–130, 2013.
- Wanninger, L., Rost, C., Hartlieb, G., Köhr, M.: Zur Problematik des Antennenwechsels auf GNSS-Referenzstationen. *zfv* 131, S. 171–175, 2006.
- Wanninger, L.: Correction of apparent position shifts caused by GNSS antenna changes. *GPS Solutions* 13, S. 133–139, 2009.
- Wübbena, G., Schmitz, M., Boettcher, G., Rosenthal, G., Schwarz, L.: Station Calibration of the Berlin GNSS Reference Stations – Campaign to Analyse Multi-Stage Site Calibration – Poster presented at ICG-7, Seventh Meeting of the International Committee on GNSS, November 5–9, Beijing, 2012.
- Zeimet, P., Kuhlmann, H.: Validation of the Laboratory Calibration of Geodetic Antennas based on GPS Measurements. *Proceedings of the FIG Congress 2010, Sydney*, 2010.

Anschrift der Autoren

M.Sc. Thomas Krawinkel | Dipl.-Ing. Nico Lindenthal | Prof. Dr.-Ing. Steffen Schön
Institut für Erdmessung, Leibniz Universität Hannover
Schneiderberg 50, 30167 Hannover
krawinkel@ife.uni-hannover.de | lindenthal@ife.uni-hannover.de
schoen@ife.uni-hannover.de

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter www.geodaesie.info.