

Zur Genauigkeit von Höhenübertragungen mit GNSS-Verfahren

von Dipl.-Ing. (FH) Darcy Böttner, Dipl.-Ing. Bernhard Heckmann und
Ing. (grad.) Theodor Müller, Wiesbaden

1 Einleitung

Der amtliche geodätische Raumbezug wird in Hessen vorwiegend über den Satellitenpositionierungsdienst **SAP_{OS}**[®] bereitgestellt. Während die Lagekomponente dabei mit hoher Qualität bestimmt werden kann, gibt es bei der Höhenkomponente verschiedene Faktoren, die den Fehlerhaushalt negativ beeinflussen. Hierzu gehören auf antenntentechnischer Seite die Unsicherheiten der absoluten Kalibrierung sowie die sog. „Nahfeld-Effekte“, die sich bei Antennenwechseln sowie beim Aufbau derselben Antenne in verschiedenen Antennenhöhen als „scheinbare Höhenänderungen“ bemerkbar machen können.

Da im Hessischen Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation (HLBG) diesbezüglich noch keine eigenen Erfahrungen quantitativer Art vorliegen, es andererseits wichtig ist zu wissen, welches Genauigkeitspotential bei Höhenbestimmungen mittels GNSS-Verfahren und dem vorhandenen Equipment überhaupt erreichbar ist, wurde 2011 ein praktischer Test durchgeführt. Dabei wurden über insgesamt 7 Wochen Langzeitbeobachtungen mit GNSS-Empfängern auf zwei höhenmäßig sehr genau bestimmten Punkten unter verschiedenartigen Antennenkonstellationen vorgenommen. Das dabei entstandene umfangreiche Beobachtungsmaterial wurde inzwischen gründlich ausgewertet und analysiert. Dabei ergaben sich einige bemerkenswerte Ergebnisse, über die nachfolgend berichtet wird.

2 Konzeption des Antennentests

2.1 Allgemeines

Hessen verfügt über 13 **SAP_{OS}**[®]-Referenzstationen, von denen sich eine auf dem Dach des HLBG in Wiesbaden befindet. Im Abstand von wenigen Metern zu dieser **SAP_{OS}**[®]-Station, nachfolgend mit S bezeichnet, befinden sich zwei fest installierte Vermessungspunkte (Pfeiler, nachfolgend mit P bezeichnet und Rohr, nachfolgend mit R bezeichnet, siehe Abbildungen 1 bis 4), auf denen mit relativ geringem logistischem Aufwand GNSS-Langzeitmessungen durchgeführt und aufgezeichnet werden können. Im 2. Quartal 2011 ergab sich die Möglichkeit, dort zwei baugleiche und absolut kalibrierte GNSS-Antennen vom Typ Trimble Zephyr Geodetic 2 über 7 Wochen (GPS-Wochen 1633 – 1639, d.h. vom 24. April bis 11. Juni 2011) aufzubauen. Beide GNSS-Antennen waren zuvor auf den früheren **SAP_{OS}**[®]-Stationen in Weilburg (Antenne A1) und Gießen (Antenne A2) installiert, ihre Spezifikationen sind nachfolgend angegeben (Tabelle 1).

Antenne	Seriennummer	IGS-Bezeichnung	Ehemaliger Standort
A1	30 260 426	TRM55971.00TZGD	Weilburg
A2	30 607 444	TRM57971.00TZGD	Gießen

Tab. 1: Antennenspezifikationen

Wesentliches Ziel des Tests war die Bestimmung des Höhenunterschiedes zwischen den Punkten R und P durch Basislinienauswertung aus GNSS-Langzeitmessungen bei verschiedenen Antennenkonstellationen, die in Abschnitt 2.3 noch detailliert beschrieben werden. Bei der Auswertung waren zudem folgende Ansätze zu betrachten:

- Die Berechnung kurzer Basislinien über die nahegelegene Wiesbadener **SAP_{OS}**[®]-Station S.
- Die Berechnung langer Basislinien über die 114 km entfernte **SAP_{OS}**[®]-Station Fulda 2.

Mit dem Ansatz b) sollte die Höhenübertragung über große Entfernungen simuliert werden.

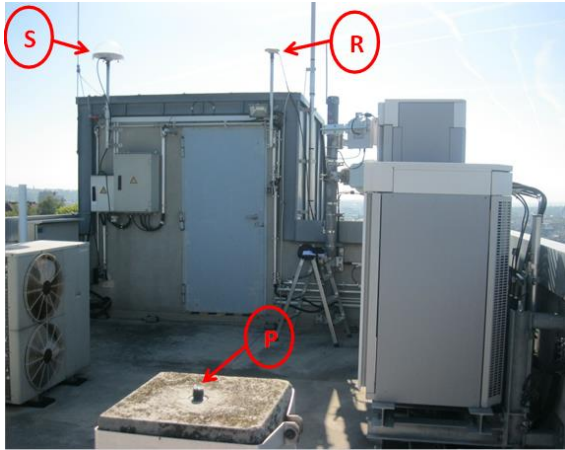


Abb. 1: Die Vermessungspunkte P, R und S auf dem Dach des HLBG aus nordwestlicher Richtung



Abb. 2: Der Vermessungspfeiler P aus südöstlicher Richtung



Abb. 3: Trimble Zephyr Geodetic 2 GNSS-Antenne auf der SAPOS®-Referenzstation Wiesbaden (S)

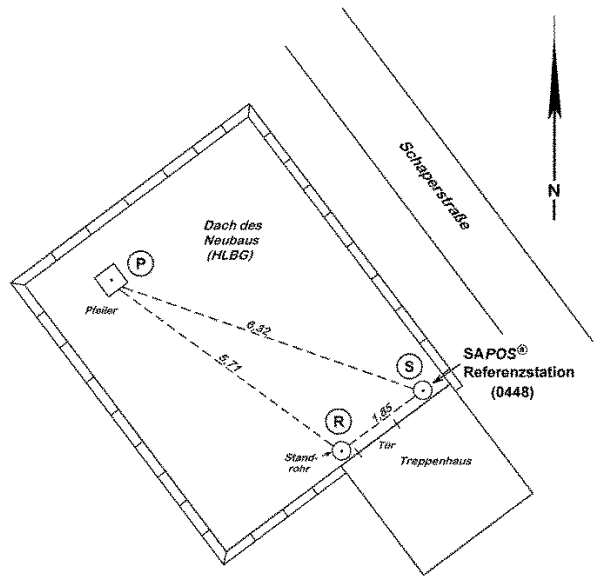


Abb. 4: Lageskizze der drei Vermessungspunkte P, R und S (nicht maßstäblich)

Der Höhenunterschied der Antennenreferenzpunkte (ARP) auf den Stationen R und P wurde nivellistisch mit hoher Genauigkeit bestimmt; er kann angesichts des geringen Punktabstandes von weniger als 6 m gleichermaßen als ellipsoidischer Höhenunterschied betrachtet werden, der sich aus den GNSS-Messungen ermitteln lässt (siehe Tabelle 2).

	Höhenunterschied R - P
Höhe Rohr (R) – Höhe Pfeiler (P)	+ 1,8053 m

Tab. 2: Sollhöhenunterschied zwischen R und P

An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Höhe der SAPOS®-Station Wiesbaden (S) im Test nicht als weiterer Vergleichswert genutzt wurde, sondern dass S nur mittelbar zur Basislinienberechnung diente. Dabei ist zu erwähnen, dass der ARP im Punkt S etwa 15 cm niedriger liegt als im Punkt R (siehe auch Abbildung 1), was bei der späteren Berechnung des sog. Multipath-Index (MPI) auf diesen Punkten zu durchaus deutlichen Unterschieden führt (siehe Abschnitt 4).

2.2 Antennenkalibrierungen

Die beiden Antennen A1 und A2 wurden vor dem Test erneut absolut kalibriert, und zwar erstmalig in der Bonner Antennenmesskammer (AMK). Bei der absoluten Kalibrierung wird die geometrische Exzentrizität des elektronisch definierten Phasenzentrums der Antenne gegenüber dem physisch definierten ARP ermittelt. Diese Exzentrizität ist sowohl von der Elevation als auch vom Azimut der empfangenen GNSS-Signale – d.h. vom Stand der jeweiligen Satelliten – abhängig. Insofern standen für den nachfolgenden Test mehrere verschiedene individuelle Kalibrierwerte zur Verfügung, die auch in der späteren Auswertung berücksichtigt wurden. Dies sind im Einzelnen (siehe auch Tabelle 3):

- a) Absolute Kalibrierung (GPS) aus dem Jahr 2007; relative Feldmessung mit automatischer Antennendrehung durch Dreheinrichtung DRB2 an der TU Dresden, absolute Kalibrierwerte aus Roboter-Kalibrierung der Firma Geo++ (Garbsen) für die Referenzantenne Trimble Choke Ring ohne Dome.
- b) Absolute Kalibrierung (GPS) aus dem Jahr 2008 für die GNSS-Kampagne der AdV; roboterbasierte Feldkalibrierung durchgeführt in Berlin.
- c) Absolute Kalibrierung (GPS) aus dem Frühjahr 2011, durchgeführt in der Bonner Antennenmesskammer (AMK) in 3 Varianten:
 - c1) Absolute Kalibrierung ohne Unterbauten vom 04.04.2011
 - c2) Absolute Kalibrierung mit Nordrichtungsadapter vom 24.03.2011
 - c3) Absolute Kalibrierung mit Nordrichtungsadapter und Unterbau vom 04.04.2011.

Kalibrierungsart	Antenne A1	Antenne A2
a	x	
b		x
c1	x	
c2	x	x
c3	x	

Tab. 3: Individuelle Antennenkalibrierungen

Die bei der Kalibrierung ermittelten horizontalen und vertikalen Komponenten des Phasenzentrumsoffsets sind grundsätzlich nicht isoliert zu betrachten. Die vollständige Beschreibung des Antennenmodells erfolgt durch den Vektor des Phasenzentrumsoffsets (Phase Center Offset – PCO) zuzüglich der Phasenzentrumsvariationen (Phase Center Variation – PCV) ([4] Görres 2010). Um dennoch einen groben Eindruck zu vermitteln, welche Unterschiede bei den verschiedenen Kalibrierungsarten auftreten können, sind in nachstehender Tabelle 4 beispielhaft die vertikalen Phasenzentrumsoffsets beider Antennen für L1 und L2 angegeben.

Antenne	Vertikale Phasenzentrumsoffsets der Kalibrierungen in L1 und L2 [mm]									
	a		b		c1		c2		c3	
	L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2
A1	68,32	64,24			69,51	64,27	69,25	63,52	69,48	63,32
A2			66,30	59,49			69,23	64,17		

Tab. 4: Vertikale Phasenzentrumsoffsets bei verschiedenen Kalibrierungsverfahren und -umgebungen

Es ist durchaus bemerkenswert, dass die vertikalen Phasenoffsets bei der Antenne A2 zwischen den Kalibrierungsarten b und c in L1 fast 3 mm auseinanderliegen und in L2 um nahezu 5 mm differieren. Dagegen bewegen sich die Abweichungen bei der Antenne A1 bei den Kalibrierungsarten c1 bis c3 für L1 innerhalb von 0,3 mm und für L2 innerhalb von 1 mm. Die Abweichungen zur Kalibrierungsart a erreichen hier 1,2 mm in L1 und 0,9 mm in L2. Bei diesen Betrachtungen darf allerdings nicht außer

Acht gelassen werden, dass sich die Kalibrierparameter einer Antenne im Laufe der Zeit ggf. verändern könnten. Immerhin haben die Kalibrierungen a und b vier bzw. drei Jahre vor den AMK-Kalibrierungen (c1 bis c3) stattgefunden. Bei den späteren Auswertungen soll jedenfalls auch geprüft werden, ob sich in den Ergebnissen entsprechende Effekte wiederfinden oder nicht.

2.3 Variationen im Antennenaufbau

Auf den Punkten P und R wurden die Antennen im wöchentlichen Wechsel in verschiedenen Höhen aufgebaut. Außerdem wurden die Antennen A1 und A2 zwischen der 2. und 3. Testwoche (GPS-Wochen 1634 und 1635) getauscht, wobei die Aufbauhöhen selbst nicht verändert wurden. Dies entspricht gerätetechnisch dem Prinzip einer „Messung in 2 Lagen“, weshalb die Ergebnisse der GPS-Wochen 1634 und 1635 unmittelbar verglichen und auf systematische Unterschiede hin betrachtet werden sollen.

Die Höhenvariationen in den Testwochen 1635 bis 1639 haben vorrangig den Zweck, für die Antennen A1 und A2 auf den Punkten P und R unterschiedliche Nahfeld-Verhältnisse zu simulieren. Aus der Vergangenheit lagen Indizien vor, dass derartige Nahfeld-Veränderungen auch scheinbare Höhenänderungen von 10 mm oder mehr hervorrufen können. Insofern sind die Ergebnisse aus den verschiedenen Antennenaufbauten auch in dieser Hinsicht zu prüfen.

Für jede Antennenkonstellation wurden die Basislinien als Wochenlösung berechnet. Die nachfolgenden Tabellen 5 und 6 charakterisieren die sieben verschiedenen Aufbauvarianten der Antennen über die sieben Messungswochen hinweg.

Aufbau	GPS-Woche	Pfeiler			Rohr		
		Antenne	Antennenhöhe	Bemerkung	Antenne	Antennenhöhe	Bemerkung
1	1633	A1	0,002	direkt auf Vermarkung+ Unterlegscheibe	A2	0,000	direkt auf Vermarkung
2	1634	A1	0,062	Nordrichtungsadapter+ Unterlegscheibe	A2	0,060	Nordrichtungsadapter
Antennentausch							
3	1635	A2	0,062	Nordrichtungsadapter+ Unterlegscheibe	A1	0,060	Nordrichtungsadapter
4	1636	A2	0,122	2mal Nordrichtungsadapter+ Unterlegscheibe	A1	0,300	Nordrichtungsadapter+ 2mal Verlängerungsstab
5	1637	A2	0,182	Verlängerungsstab+ Nordrichtungsadapter+ Unterlegscheibe	A1	0,240	2mal Nordrichtungsadapter+ Verlängerungsstab auf Mannesmannrohrmarker
6	1638	A2	0,242	Verlängerungsstab+ 2mal Nordrichtungsadapter+ Unterlegscheibe	A1	0,180	Nordrichtungsadapter+ Verlängerungsstab auf Mannesmannrohrmarker
7	1639	A2	0,302	2mal Verlängerungsstab+ Nordrichtungsadapter+ Unterlegscheibe	A1	0,060	Nordrichtungsadapter auf Mannesmannrohrmarker

Tab. 5: Aufbauvarianten der Antennen

		Antennentausch ohne Änderung der Aufbauhöhen	
Aufbau 1 (GPS-Woche 1633)	Aufbau 2 (GPS-Woche 1634)		Aufbau 3 (GPS-Woche 1635)
Aufbau 4 (GPS-Woche 1636)	Aufbau 5 (GPS-Woche 1637)	Aufbau 6 (GPS-Woche 1638)	Aufbau 7 (GPS-Woche 1639)

Tabelle 6: Grafische Darstellung der 7 Aufbauvarianten der Antennen

3 Koordinatenberechnung

Wie in Abschnitt 2.1 bereits angedeutet, wurden zwei Auswertestrategien verfolgt. Zum einen wurden die Koordinaten von P und R mit Hilfe der SAPOS[®]-Station Wiesbaden (S) aus kurzen Basislinien berechnet ($S - R = 1,85$ m, $S - P = 6,32$ m). Dabei kamen das Berechnungsmodul „Wa1“ in der Version 2.3a von WaSoft sowie die Software Leica Geo Office 8.3 zum Einsatz. Die Basislinien und die Koordinaten wurden mittels der L1- und der L2-Lösung aus GPS-Signalen berechnet. Die L1-Frequenz beträgt 1575,42 MHz (Wellenlänge ca. 19 cm) und die L2-Frequenz 1227,60 MHz (Wellenlänge ca. 24,4 cm). Die Signale der GLONASS-Satelliten wurden bei diesem Test nicht ausgewertet. Die auf die jeweilige Woche bezogene ellipsoidische Höhe entstand durch die Mittelbildung aus den Tageslösungen. Die Ergebnisse werden in Abschnitt 5.1 ausführlich dargestellt.

Das Hauptaugenmerk lag auf dem zweiten Ansatz, bei dem die Höhenübertragung über große Entfernungen simuliert werden soll. Hier erfolgte die Berechnung der Basislinien in Anlehnung an die Vorgehensweise beim SAPOS[®]-Koordinatenmonitoring, nämlich zwischen der SAPOS[®]-Station Fulda 2 und den zu betrachtenden Punkten in Wiesbaden (P und R). Die Länge beider Basislinien beträgt ca. 114 km.

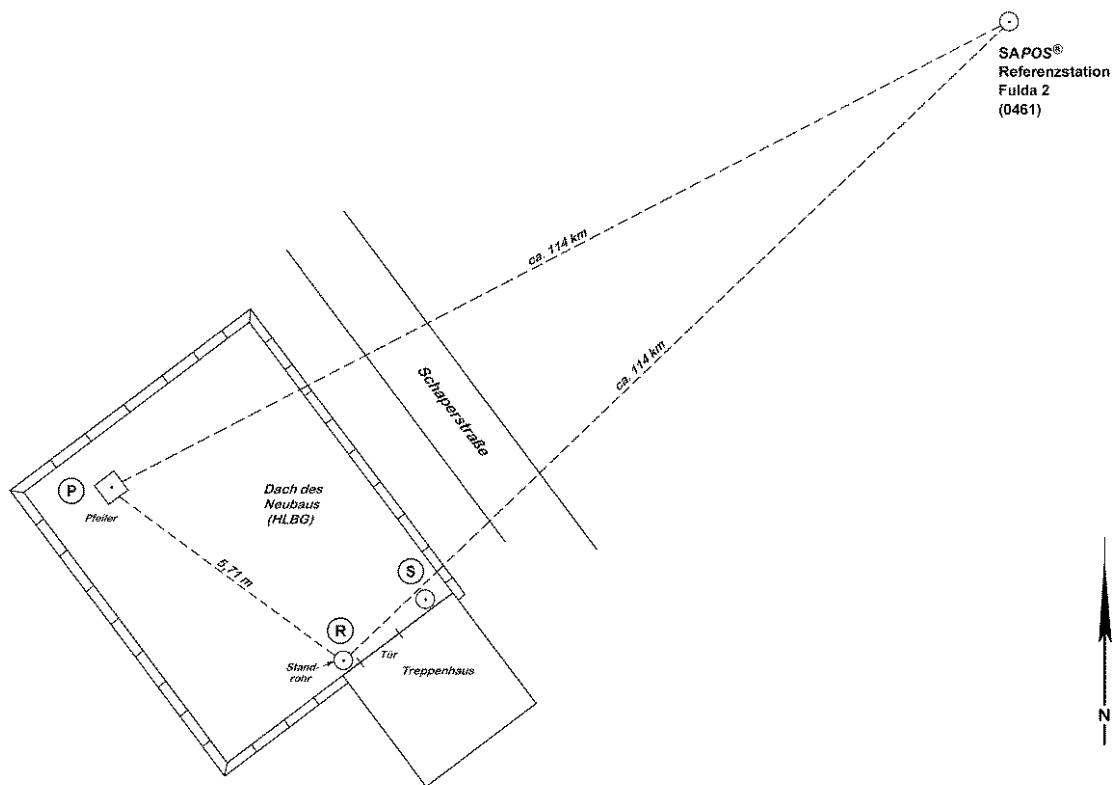


Abb. 5: Prinzip-Skizze für die Auswertung der langen Basislinien

Als Auswertesoftware wurde die Bernese GPS-Software Version 5.0 Release 29-11-2007 eingesetzt. Folgende Schritte wurden dabei abgearbeitet:

- Die Berechnung der Tageslösungen erfolgte unter Verwendung von finalen Werten für Orbits, Erdrotationsparameter und Ionosphäre (keine Berücksichtigung ozeanischer Auflasteffekte) im ITRF2008, wobei die DREF-Online-Stationen Erlangen, Euskirchen, Göttingen, Karlsruhe und Kloppenheim mit minimalem mittleren Fehler eingehen.
- Die Ambiguitäten der Basislinien wurden in zwei Schritten, zunächst unter Auswertung der Wide-Lane Linearkombination mit anschließender Auswertung der Narrow-Lane gelöst. Typischerweise werden etwa 90% der Wide-Lane-Ambiguitäten und etwa 80% der Narrow-Lane Ambiguitäten gefixt.
- Die Berechnungen erfolgten mit verschiedenen individuellen absoluten Antennenkalibrierungen (siehe Tabelle 3), bei der insgesamt 15 Lösungsvarianten A – O entstehen (siehe Tabelle 7).
- Die Wochenlösung entstand aus dem Zusammenschluss der Normalgleichungen der Tageslösungen.
- Der Übergang nach ETRS89/DREF91 erfolgte durch Transformation vom ITRF2008 mit 7 Transformationsparametern im sogenannten Einschnitt-Verfahren gemäß dem AdV-Standardverfahren beim SAPOS®-Koordinatenmonitoring (siehe [3] AdV 2008 mit späterer Ergänzung bezüglich ITRF2008).

Auch bei diesen Berechnungen blieben die GLONASS-Satelliten unberücksichtigt. Die Ergebnisse werden daher im Folgenden als GPS-Höhenunterschiede bezeichnet und in Abschnitt 5.2 ausführlich dargestellt.

Aufbau	GPS-Woche	Variante	Pfeiler					Rohr				
			Antenne	Antennenkalibrierung			Antennen- höhe	Antenne	Antennenkalibrierung			Antennen- höhe
				a)	b)	c)			a)	b)	c)	
1	1633	A	A1	•			0,002	A2		•		0,000
		B	A1			• (c1)	0,002	A2		•		0,000
2	1634	C	A1	•			0,062	A2		•		0,060
		D	A1			• (c2)	0,062	A2			• (c2)	0,060
Antennentausch												
3	1635	E	A2		•		0,062	A1	•			0,060
		F	A2			• (c2)	0,062	A1			• (c2)	0,060
4	1636	G	A2		•		0,122	A1	•			0,300
		H	A2			• (c2)	0,122	A1			• (c2)	0,300
5	1637	I	A2		•		0,182	A1	•			0,240
		J	A2			• (c2)	0,182	A1			• (c2)	0,240
6	1638	K	A2		•		0,242	A1	•			0,180
		L	A2			• (c2)	0,242	A1			• (c2)	0,180
7	1639	M	A2		•		0,302	A1	•			0,060
		N	A2			• (c2)	0,302	A1			• (c2)	0,060
		O	A2			• (c2)	0,302	A1			• (c3)	0,060

Tab. 7: Berechnungsvarianten (A – O) in Abhängigkeit der Aufbauvarianten (1 – 7 bzw. 1633 – 1639) und der unterschiedlichen Arten der Antennenkalibrierung (a – c, siehe Abschnitt 2.2)

4 Mehrwege-Effekte (Multipath)

Auswirkungen auf die präzise Bestimmung der Koordinaten haben insbesondere die langperiodisch wirkenden Einflüsse durch das Antennenphasenzentrum und durch Mehrwegeeffekte ([1] Wanninger u.a. 2006). Das Antennenphasenzentrum wird durch die individuelle absolute Antennenkalibrierung berücksichtigt, die bereits in Abschnitt 2.2 näher beschrieben wurde. Die Mehrwege-Effekte (Multipath) entstehen, wenn die Satellitensignale nicht nur unmittelbar am Antennenphasenzentrum eintreffen, sondern auch zuvor an Flächen in der näheren Umgebung der Antenne reflektiert worden sind. Die relevante Kenngröße wird als „Multipath-Index (MPI)“ bezeichnet, für deren Werte folgende Kategorien gebräuchlich sind:

- 0 – 19: Die Station liefert Daten von guter Qualität
- 20 – 39: Die Station liefert im Allgemeinen Daten von guter Qualität
- > 40: Die Station liefert Daten von eingeschränkter Qualität
- >> 40: Andere Ursachen überlagern Multipath.

Der MPI wurde mit der Software WaSoft/Multipath für die zu betrachtenden Punkte P und R in einem Netz mit den drei weiteren SAPOS®-Stationen Darmstadt, Kloppenheim und Wächtersbach für jede Woche mit den jeweiligen Antennenhöhen berechnet. Routinemäßig wird wöchentlich die SAPOS®-Station Wiesbaden in diesem Netz ausgewertet, weshalb auch für den Punkt S der MPI ermittelt wurde. Diese Ergebnisse sind in der Grafik (Abbildung 6) als blauer Balken dargestellt.

Die MPI-Mittelwerte im Messungszeitraum des Antennentests und die dazugehörigen Standardabweichungen liegen für den Pfeiler (P) bei 60 ± 3.0 , für das Rohr (R) bei 9 ± 0.8 und für die SAPOS®-Station (S) bei 29 ± 1.5 .

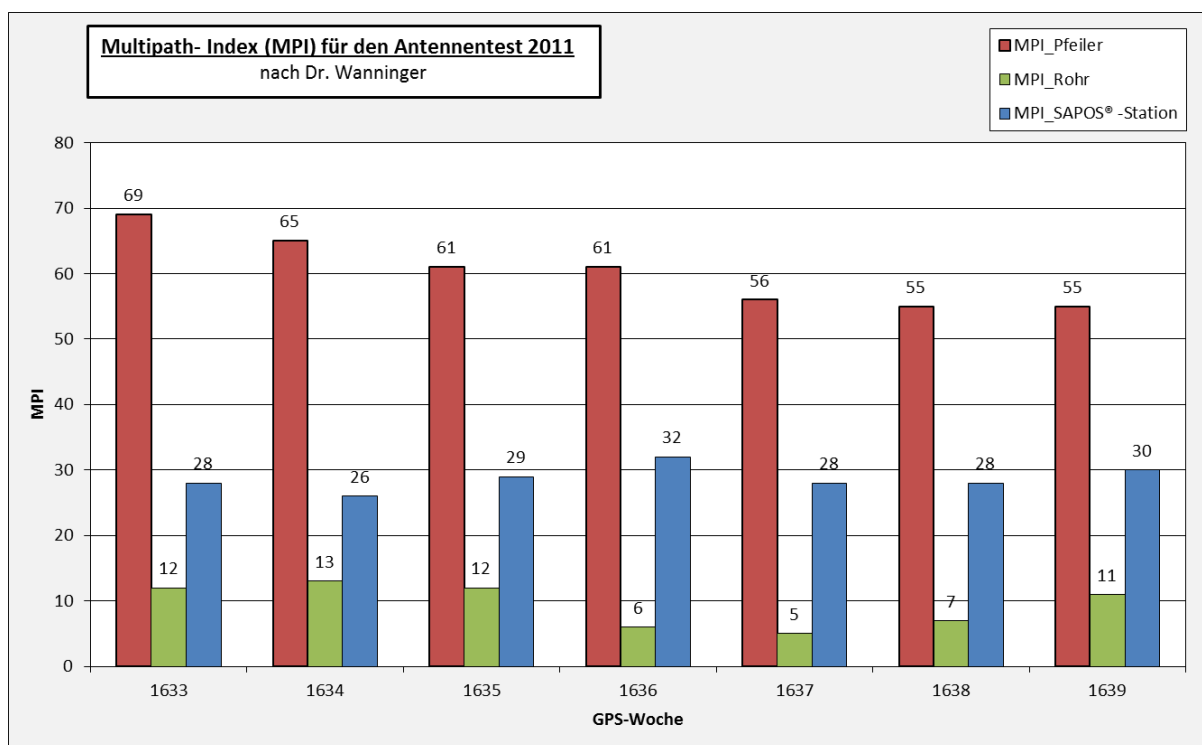


Abb. 6: Multipath-Indizes für die 3 Vermessungspunkte Pfeiler (P), Rohr (R) und SAPOS®-Station (S)

Anhand der berechneten MPI-Werte wird ersichtlich, dass die Messungen auf dem Pfeiler P lediglich Daten von eingeschränkter Qualität liefern, da die Werte deutlich über 40 liegen. Dies ist durch dessen niedrige Lage begründet, weshalb P dem Einfluss durch reflektierende Oberflächen am stärksten ausgesetzt ist (siehe Abbildungen 1 und 2); P liegt ca. 1,80 m unterhalb des Rohres R und ca. 1,65 m unterhalb der SAPOS®-Station S. Weiterhin ist nicht auszuschließen, dass Signalbeugungseinflüsse beteiligt sind. Diese werden durch die Software zwar auch erfasst, lassen sich aber nicht von Mehrwegeinflüssen trennen. In den Abbildungen 1 und 2 ist außerdem zu erkennen, dass ober- und auch unterhalb des Antennenhorizonts mehrere Reflektoren vorhanden sind. Die größten Störeinflüsse sind vermutlich durch die beiden Mobilfunkmasten, die Kühlanlagen und die Blechumrandung der Mauerbrüstung verursacht.

Gut erkennbar ist, dass der MPI auf Pfeiler P und Rohr R mit zunehmender Antennenhöhe leicht abnimmt. Die Lage des Rohres und der SAPOS®-Station ist gegenüber dem niedrigeren Pfeiler wesentlich günstiger, da hier oberhalb der Antennenhorizonte keine wesentlichen Reflektoren vorhanden sind. Der nächste augenscheinliche Reflektor für diese beiden Punkte (R und S) ist das Blechdach des HLBG-Treppenhauses, welches unterhalb der Antennen liegt. Dennoch unterscheiden sich die MPI-Werte trotz ähnlicher Lage recht deutlich. Die besseren Werte werden dabei für R ermittelt, welches ca. 15 cm höher liegt als die SAPOS®-Station S. Offenbar bewirken schon kleine Höhenänderungen große Verbesserungen in der empfangenen Datenqualität. Nach der derzeit gebräuchlichen Kategorisierung sind die aufgezeichneten Daten beim Rohr von guter Qualität und bei der SAPOS®-Station im Allgemeinen gut. Je höher der Antennenaufbau auf P und R ist, desto geringer ist auch der MPI-Wert. Beim Rohr sind zudem folgende Tendenzen ersichtlich:

- MPI > 10 bei Antennenhöhen bis 6 cm
- MPI < 10 ab einer Antennenhöhe von 18 cm.

In S variiert der MPI über die gesamte Testdauer zwischen 26 und 32, ohne dass hier eine Höhenänderung erfolgt ist. Offenbar sind Schwankungen im MPI von +/- 10 % nicht ungewöhnlich.

Die MPI-Werte sind summarisch gesehen in den GPS-Wochen 1637 bis 1639 am günstigsten. Daher sollen die Ergebnisse dieser 3 Wochen bei der Beurteilung besonders gewichtet werden.

5 Ergebnisse

5.1 Höhenunterschied zwischen Rohr und Pfeiler aus kurzen Basislinien

a) Höhenunterschied ermittelt durch Auswertung der GPS-L1-Frequenz (L1-Lösung)

Der erste Vergleich erfolgt mit den aus kurzen Basislinien mit der L1-Frequenz berechneten Höhenunterschieden, da bei dieser Auswertung die höchste Genauigkeit zu erwarten ist und die verbleibenden Differenzen insofern weitgehend die Restfehler der Höhenkalibrierung widerspiegeln dürften. Die verschiedenen Antennenkalibrierungen wurden gemäß Tabelle 7 in die Berechnung eingeführt. Zusätzlich wurde bei der L1-Lösung in der GPS-Woche 1633 die Kalibrierartenkombination A1-c1 / A2-c2 ausgewertet. Die erhaltenen Abweichungen sind in Abbildung 7 grafisch dargestellt.

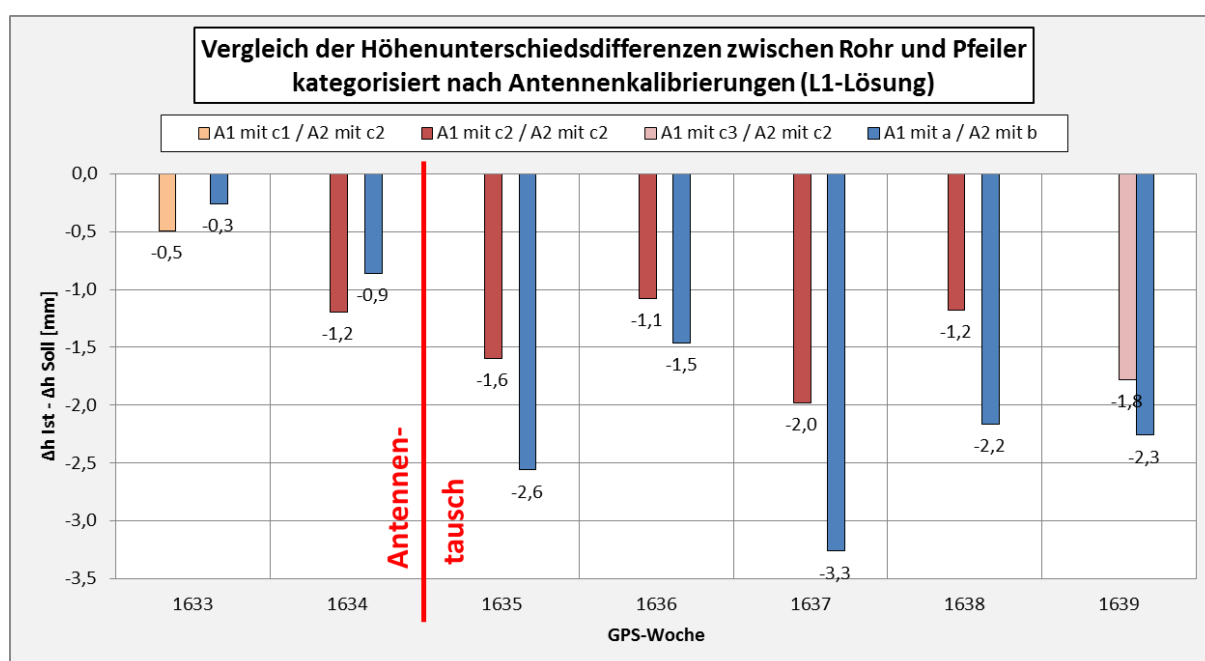


Abb. 7: Abweichungen der GPS-Höhendifferenzen (Ist) zum nivellierten Höhenunterschied (Soll) bei der L1-Lösung

Abbildung 7 zeigt zunächst sehr deutlich, dass der aus GPS-Messungen mit der L1-Lösung ermittelte Höhenunterschied stets kleiner ist als der Soll-Höhenunterschied. Die Abweichungen streuen zwischen $-0,3$ mm und $-3,3$ mm. Schaut man sich die Abweichungen in Abhängigkeit von den Antennenkonstellationen und Kalibrierungsarten etwas näher an, so stellt man zudem folgendes fest:

Die Ergebnisse, die bei Verwendung der gleichartigen AMK-Kalibrierung c2 erhalten werden (braune Balken), streuen lediglich zwischen $-1,1$ mm und $-2,0$ mm. Die mittlere Abweichung aus der 2. und 3. Testwoche (vor und nach dem Antennentausch) beträgt $-1,4$ mm und repräsentiert gleichzeitig die mittlere systematische Abweichung über alle Testwochen sehr gut. Die gesonderte Betrachtung der Testwochen 1637 bis 1639 mit den günstigsten MPI-Verhältnissen ergibt eine geringfügig andere Abweichung von $-1,6$ mm, die aber auch noch im ursprünglichen Rahmen liegt.

Betrachtet man dagegen die Ergebnisse mit der Feld- bzw. Roboter-Kalibrierung (blaue Balken), dann streuen die Ergebnisse deutlich stärker. Vor dem Antennentausch liegen die Abweichungen zwischen $-0,3$ und $-0,9$ mm, der dazugehörige Median „blau-vor“ beträgt $-0,6$ mm. Nach dem Tausch betragen die Abweichungen zwischen $-1,5$ mm und $-3,3$ mm, der entsprechende Median „blau-nach“ beträgt $-2,4$ mm und für die MPI-günstigen GPS-Wochen 1637 bis 1639 $-2,7$ mm. Hier ändert sich also auch die Systematik der Abweichung signifikant um etwa 2 mm. Bei der Auswertung mit „mischkalibrierten“ Antennen (a und b) treten die restlichen Kalibrierunsicherheiten in der Höhe also stärker zutage als bei der einheitlichen Kalibrierung (c2). Der Mittelwert der „blauen Mediane“ vor und nach dem Antennentausch beträgt $-1,6$ mm; er stimmt sehr gut mit den Werten überein, die bei der Auswertung mit der AMK-Kalibrierung c2 ermittelt worden sind. Offenbar kann man die Ergebnisse der Höhendifferenzbestimmung durch eine zweimalige Messung mit getauschten Antennen (d.h. mit dem klassischen Verfahren der „Messung in zwei Lagen“) sehr weitgehend von restlichen Fehleranteilen in den individuellen absoluten Kalibrierungsverfahren befreien.

Als Endergebnis der L1-Auswertung kurzer Basislinien lässt sich feststellen, dass der GPS-Höhenunterschied unabhängig von den verwendeten Kalibrierungsarten gleichermaßen bzw. systematisch um 1,6 mm zu klein ermittelt wurde. Des Weiteren deutet die sehr gute Übereinstimmung des „blauen“ Gesamtergebnisses (welches auf der älteren Mischkalibrierung A1-a von 2007 / A2-b von 2008 beruht) mit dem „braunen“ Gesamtergebnis (welches auf der neuen einheitlichen Kalibrierung A1-c2 / A2-c2 von 2011 basiert) darauf hin, dass sich für die GPS-L1-Frequenz die Position der Antennen-Phasenzentren gegenüber den Antennenreferenzpunkten (ARP) im Laufe der Jahre nicht merklich geändert hat.

Die in der GPS-Woche 1633 zusätzlich ausgewertete Kalibrierarten-Kombination A1-c1 / A2-c2 (rosa Balken) weicht vom c2/c2-Median ($-1,4$ mm) um 0,9 mm ab. Das scheint angesichts der anderen Ergebnisse bereits eine auffällige Differenz zwischen den Kalibrierarten c1 und c2 zu sein. Da aber in der Testwoche 1633 die Antenne in P am niedrigsten aufgebaut war und dieser Punkt zudem den höchsten MPI-Wert mit 69 aufwies (vgl. Tabelle 5), sollte diese Abweichung nicht überbewertet werden. Betrachtet man außerdem noch die in der GPS-Woche 1639 zusätzlich berechnete Kalibrierarten-Kombination A1-c3 / A2-c2 (violetter Balken), so stimmt dieser Wert sogar auf 0,2 mm mit dem c2/c2-Median der GPS-Wochen 1637 und 1638 überein. Hier ist also für L1 kein nennenswerter Unterschied zwischen den Kalibrierarten c2 und c3 festzustellen.

Die Ergebnisse in den fünf GPS-Wochen 1635 bis 1639 nach dem Antennentausch, die durch unterschiedliche Antennenhöhen charakterisiert sind, streuen in den jeweils gleichartigen Kategorien (braune und blaue Balken in Abbildung 7) um weniger als 2 mm. Es sind also keinerlei Anzeichen für scheinbare Höhengänge durch ein geändertes Antennen-Nahfeld erkennbar. Insofern braucht diesem zunächst befürchteten Effekt bei der Beurteilung der weiteren Ergebnisse keine weitere Beachtung mehr geschenkt zu werden.

Der ungünstige Einfluss von Multipath kann zumindest für die erste Testwoche (GPS-Woche 1633) mit den niedrigsten Antennen-Aufbauten nicht ausgeschlossen werden. Dagegen sind bei den folgenden Testwochen (GPS-Wochen 1634 bis 1639) im ermittelten Höhenunterschied keine diesbezüglichen Anzeichen erkennbar – die hier festgestellten Streuungen weisen eine zufällige Charakteristik auf.

Die Gesamtschau über 7 Wochen zeigt, dass die Bestimmung des Höhenunterschiedes zwischen P und R mit der vorzugsweise zu verwendenden einheitlichen Kalibrierungsart A1-c2 / A2-c2 (siehe Abbildung 7, braune Balken) zwar noch eine mittlere systematische Restabweichung von 1,6 mm aufweist, aber jede einzelne Wochenlösung nicht mehr als 0,5 mm zu diesem Wert streut. Das heißt zum einen, dass man mit einer Woche Beobachtungsdauer ein Ergebnis erhält, das innerhalb von 1 mm reproduzierbar ist. Zum zweiten liegt es nahe, die systematische Abweichung von 1,6 mm bei der Auswertung der Frequenz L1 als eine Art „Additionskonstante“ für die Höhenbestimmung mittels des Antennenpaares A1 / A2 zu interpretieren. Nach Anbringung dieser Korrektur würde man den Höhenunterschied aus jeder Wochenlösung innerhalb von $\pm 0,5$ mm richtig erhalten. Sollte diese einfache Sichtweise bzw. Deutung allerdings nicht gerechtfertigt sein, so verbleibt dennoch als

minimale Erkenntnis, dass eine GPS-gestützte Höhenbestimmung mit dem eingesetzten Antennen-Equipment des Typs Trimble Zephyr Geodetic 2 innerhalb von 2 mm möglich ist. Die Restabweichung von max. 2 mm wäre dann als geräte- und kalibriertechnische Unsicherheit aufzufassen. In diesem Fall wäre es aber durchaus denkbar, dass bei höherwertigeren Dorne-Margolin-Choke-Ring-Antennen diese Rest-Unsicherheit nochmal deutlich geringer ist.

b) Höhenunterschied ermittelt durch Auswertung der GPS-L2-Frequenz (L2-Lösung)

Analog zu den Ergebnissen der L1-Lösung in Abschnitt 5.1.a) werden die Ergebnisse der L2-Lösung nun in Abbildung 8 grafisch dargestellt.

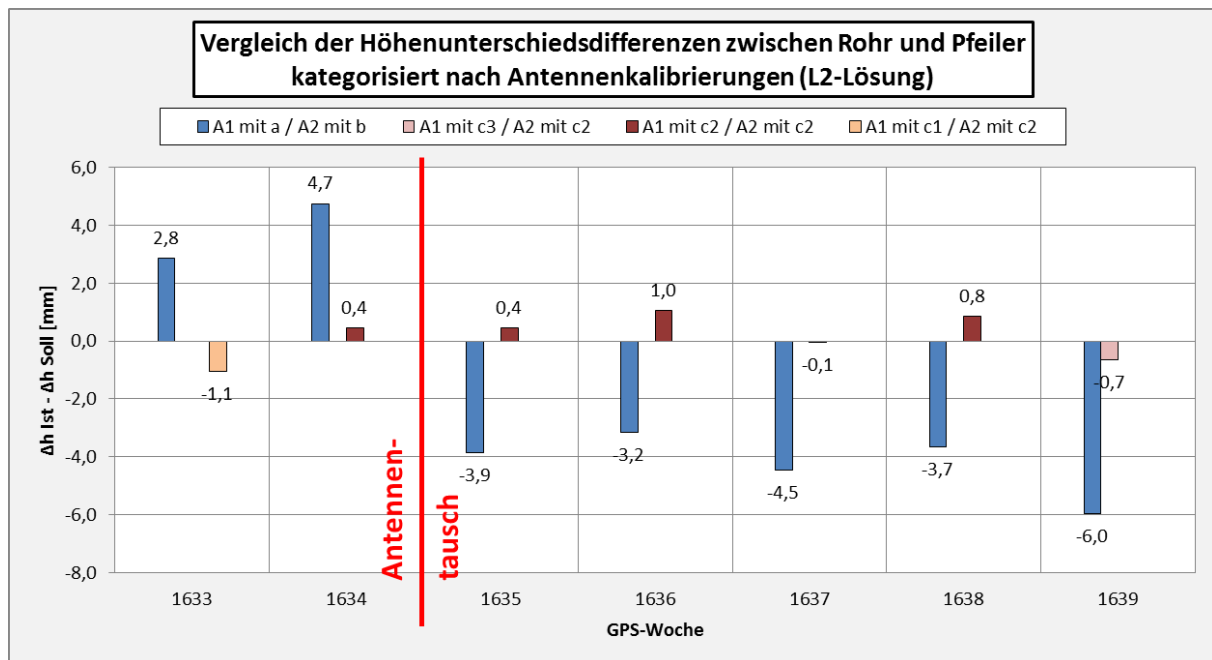


Abb. 8: Abweichungen der GPS-Höhendifferenzen (Ist) vom nivellierten Höhenunterschied (Soll) bei der L2-Lösung

Bei den Differenzen in den „mischkalibrierten“ Auswertungen (A1-a / A2-b, blaue Balken) fällt sofort der Antennentausch ins Auge, da das Vorzeichen wechselt. Zudem ändern sich die Beträge der Abweichungen zum Soll-Höhenunterschied viel deutlicher als bei der L1-Lösung, sie streuen nun zwischen + 5 mm und – 6 mm. Vor dem Antennentausch liegt der Median bei + 3,8 mm, nach dem Antennentausch bei – 4,6 mm (für die MPI-günstigen Wochen 1637 bis 1639 bei – 4,8 mm). Der gemittelte Wert beider Mediane ergibt sich zu – 0,4 mm. Rechnet man aus allen „blauen“ Wochenergebnissen einen konstanten Anteil von – 4,2 mm vor dem Antennentausch und + 4,2 mm nach dem Antennentausch heraus (was vereinfacht der Mittelung der Ergebnisse aus 2 Lagen entspricht), so streuen die verbleibenden Abweichungen nur noch zwischen – 1,8 mm und + 1,0 mm.

Bei der Verwendung einheitlich kalibrierter Antennen (c2, braune Balken) fällt der Antennentausch dagegen nicht auf. Die in den GPS-Wochen 1634 und 1635 erhaltene Abweichung von + 0,4 mm gibt auch als Median die Restsystematik über die gesamte Testdauer zutreffend wieder. Die Abweichungen der einzelnen Wochenergebnisse streuen um diesen Median zwischen – 0,5 mm und + 0,6 mm.

Im Gegensatz zur L1-Lösung unterscheiden sich die Mediane zwischen den „blauen“ Wochenergebnissen (- 0,4 mm) und den „braunen“ Wochenergebnissen (+ 0,4 mm) deutlicher voneinander, sind aber im Mittel gleich Null. Beide Beträge liegen zudem innerhalb der Kalibrierunsicherheit der Höhenkomponente (vgl. z.B. [1] Wanninger 2006) und sind insofern nicht

signifikant. Unter dieser Prämisse liegen die Ergebnisse, die mit der einheitlichen (optimalen) Kalibrierarten-Kombination A1-c2 / A2-c2 erhalten wurden (siehe Abbildung 8, braune Balken), allesamt innerhalb von +/- 1 mm zum Sollwert.

Die Auswertung der zusätzlichen Kalibrierarten-Kombination A1-c1 / A2-c2 in der GPS-Woche 1633 (rosa Balken) zeigt zum c2/c2-Median (+ 0,4 mm) eine auffällige Abweichung von 1,5 mm. Auch die Ergebnisse der zusätzlichen Kalibrierart-Kombination A1-c3 / A2-c2 in der GPS-Woche 1639 (violetter Balken) weichen vom c2/c2-Median (+ 0,4 mm) um 1,1 mm in dieselbe Richtung ab. Möglicherweise gibt es bei L2 doch einen systematischen Unterschied zwischen der c2-Kalibrierung und der c1- bzw. der c3-Kalibrierung, die auf die veränderten Unterbauten der Antenne bei der Kalibrierung zurückzuführen wären. Angesichts von nur zwei Vergleichswochen sollen allerdings keine weiteren Deutungsversuche unternommen werden.

Die gesonderte Betrachtung der Ergebnisse der MPI-günstigen GPS-Wochen 1637 bis 1639 verändert das Gesamtbild sowohl bei der L1-Lösung als auch bei der L2-Lösung um nicht mehr als 0,3 mm. Diese Größenordnung kann vernachlässigt werden, weshalb in den weiteren Untersuchungen auf diese Differenzierung verzichtet wird.

c) Vergleich der Ergebnisse mehrerer Kalibrierarten

Für die GPS-Woche 1638, die recht günstige MPI-Werte aufwies (vgl. Abschnitt 4 Abbildung 6), wurden für L1 und L2 zusätzlich die Kalibrierarten-Kombinationen A1-c2 / A2-b und A1-a / A2-c2 ausgewertet. Die Vergleiche zu den bisherigen Ergebnissen (siehe Abbildungen 7 und 8) sind in den nachfolgenden Abbildungen 9 und 10 grafisch dargestellt.

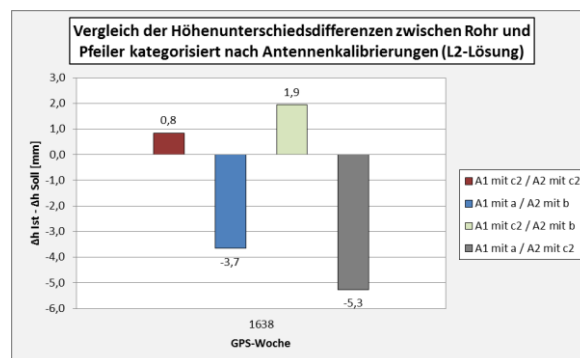
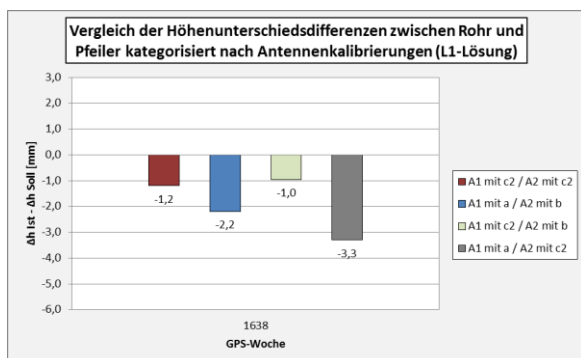


Abb. 9 und 10: Vergleich verschiedener Kalibrierarten-Kombinationen in der GPS-Woche 1638 für L1 und L2

In beiden Abbildungen fällt auf, dass das Ergebnis der gemischten Kalibrierung A1-c2 / A2-b (hellgrüne Balken) dem Ergebnis der einheitlichen c2-Kalibrierung (braune Balken) am nächsten kommt. Für L1 beträgt die Abweichung lediglich 0,2 mm und für L2 1,1 mm.

Dagegen weicht das Ergebnis der anderen gemischten Kalibrierung A1-a / A2-c2 (graue Balken) von der einheitlichen c2-Kalibrierung wesentlich deutlicher ab. Bei L1 beträgt die Differenz 2,1 mm und bei L2 sogar 6,1 mm. Damit sind die Abweichungen in beiden Fällen noch größer als beim bisherigen Vergleich der einheitlichen c2-Kalibrierung mit der gemischten Kalibrierung A1-a / A2-b (blaue Balken).

Die Kalibrierungsarten b (Roboter-Kalibrierung) und c2 (AMK-Kalibrierung) passen bezüglich der Höhenkomponente offenbar recht gut zueinander. Dagegen weist die Kalibrierungsart a (relative Feldkalibrierung) zu den Kalibrierungsarten b und c2 in der Höhe deutliche Differenzen von mehreren Millimetern auf, was im besonderen Maße auf die Frequenz L2 zutrifft. Auf weitere (quantitative) Analysen soll jedoch an dieser Stelle verzichtet werden.

5.2 Höhenunterschied aus langen Basislinien

Als drittes wurde die Höhenübertragung auf der Grundlage langer Basislinien (ionosphärenfreie Linearkombination mit Troposphärenschätzung, auch als L3 (L0)+T-Lösung bezeichnet) gerechnet. Dieser Ansatz ist an das operationelle SAPOS[®]-Koordinatenmonitoring angelehnt ([3] AdV 2008) und wurde mit der Bernese GPS-Software 5.0 ausgewertet. Die Troposphärenschätzung zwischen den benachbarten Punkten Pfeiler (P) und Rohr (R) wurde dabei bewusst nicht korreliert. Damit wurde die Höhenübertragung von Wiesbaden zur SAPOS[®]-Station Fulda 2 und wieder zurück simuliert, wobei die Basislinien zwischen Wiesbaden und Fulda 2 etwa 114 km lang sind. Nach dem in Abschnitt 3 beschriebenen Verfahren wurden zunächst die ellipsoidischen Höhen des Pfeilers (P) und des Rohres (R) in Abhängigkeit von Fulda 2 berechnet. Anschließend wurde durch Differenzbildung der Höhenunterschied ermittelt und mit dem Sollwert (siehe Tabelle 2) verglichen.

a) Ellipsoidische Höhe des Pfeilers P

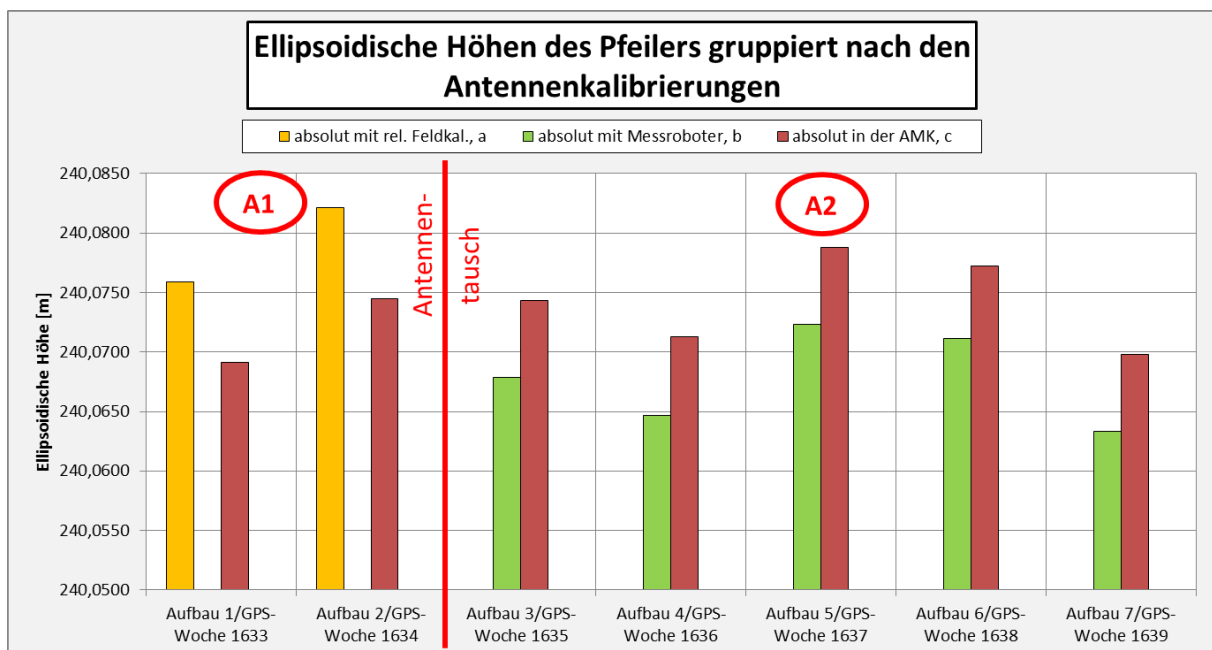


Abb. 11: Ellipsoidische Höhen des Pfeilers berechnet mit der L3(L0)+T-Lösung

Die Höhenbestimmungen unter Verwendung der Kalibrierarten a für die Antenne A1 (vor dem Antennentausch – gelbe Balken) und b für die Antenne A2 (nach dem Antennentausch – grüne Balken) liefern für den Pfeiler P mit 240,0821 m bzw. 240,0679 m signifikant unterschiedliche Ergebnisse. Arbeitet man dagegen mit der Kammerkalibrierung c2 (braune Balken), so ist durch den Antennenwechsel keine systematische Änderung in den Höhen erkennbar. Diese Phänomene konnten bereits aufgrund der in Abschnitt 5.1 vorgestellten Ergebnisse aus kurzen Basislinien erwartet werden.

Im Mittel ergibt sich die ellipsoidische Höhe des Pfeilers P aus den 7 Wochenergebnissen mit einheitlicher Kammerkalibrierung c2 zu 240,0736 m, wobei die Einzelergebnisse hiervon nicht mehr als +/- 5 mm abweichen. Zum Vergleich wird auch der Mittelwert aus den Ergebnissen der Kalibrierarten a und b vor und nach dem Antennentausch gebildet, der 240,0750 m ergibt und somit lediglich um 1,4 mm anders ausfällt.

b) Ellipsoidische Höhe des Rohres R

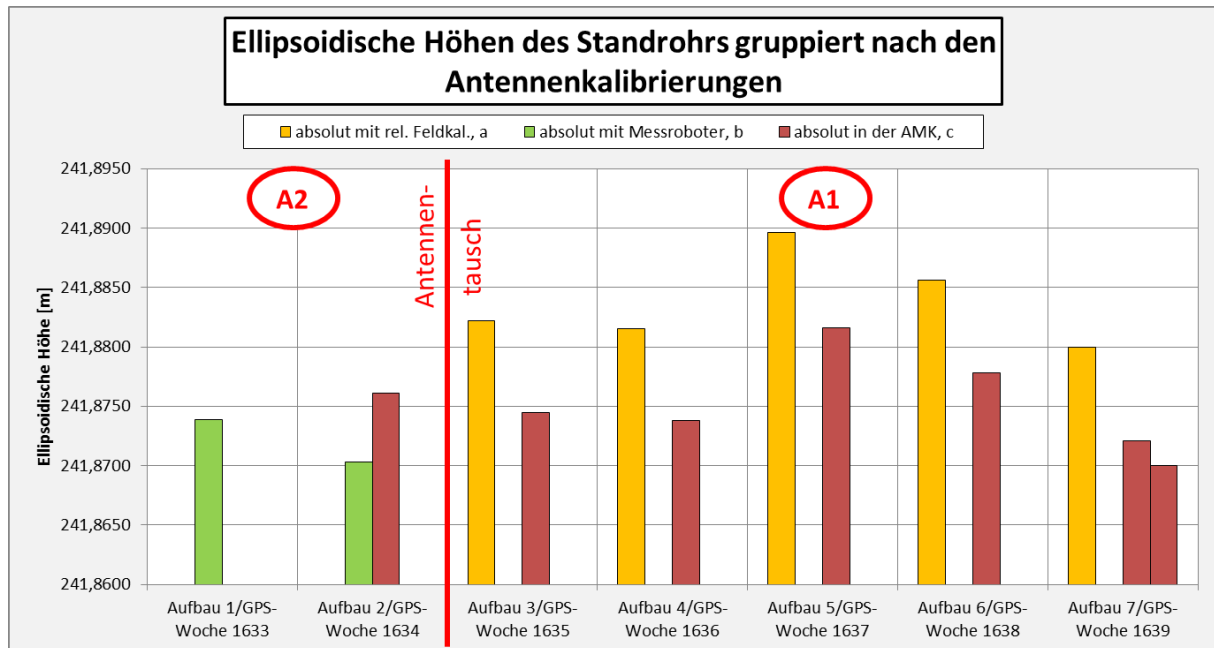


Abb. 12: Ellipsoidische Höhen des Rohres berechnet mit der L3(L0)+T-Lösung

Auf dem Rohr R sind bei der Höhenbestimmung mit langen Basislinien ähnliche Abweichungen zwischen den benutzten Antennenkalibrierungen festzustellen wie auf dem Pfeiler P. Die Höhenbestimmungen unter Verwendung der Kalibrierarten b für die Antenne A2 (vor dem Antennentausch – grüne Balken) und a für die Antenne A1 (nach dem Antennentausch – gelbe Balken) liefern für das Rohr R mit 241,8703 m bzw. 241,8822 m wiederum signifikant unterschiedliche Ergebnisse. Bei Verwendung der Kammerkalibrierung c2 (braune Balken) tritt der Antennenwechsel nicht in Erscheinung, sodass die Ergebnisse über die 6 gerechneten Wochen (1634 - 1639) gemittelt werden können. Dabei ergibt sich die ellipsoidische Höhe des Rohres R zu 241,8760 m, wobei die Einzelergebnisse hiervon nicht mehr als +/- 6 mm abweichen. Mittelt man zum Vergleich die Ergebnisse der Kalibrierarten a und b vor und nach dem Antennentausch, so erhält man die Höhe des Rohres zu 241,8763 m, was vom Gesamtergebnis der c2-Kalibrierung lediglich um 0,3 mm abweicht.

c) Höhenunterschied zwischen Rohr (R) und Pfeiler (P)

Aus den zuvor ermittelten ellipsoidischen Höhen von P und R werden nun die dazugehörigen Höhenunterschiede wöchentlich betrachtet.

In Abbildung 13 sind die Abweichungen der Ist-Höhenunterschiede zum Sollwert zwischen Pfeiler und Rohr nach den verschiedenen Aufbau- und Kalibrierungsvarianten dargestellt. Bei der Nutzung der einheitlichen Kalibrierungsart c2 aus der Antennenmesskammer (braune Balken) bewegen sich die Abweichungen zum Sollhöhenunterschied im Bereich von - 2,5 mm bis - 5,1 mm. Der Antennenwechsel zwischen den GPS-Wochen 1634 und 1635 ist bei der Verwendung dieser Kalibrierung nicht spürbar. An dieser Stelle wird eine mittlere Höhenabweichung von - 4,4 mm ausgewiesen, die innerhalb des vorgenannten Intervalls liegt und vom Median über die GPS-Wochen 1634 - 1639 (- 3,8 mm) nur geringfügig abweicht.

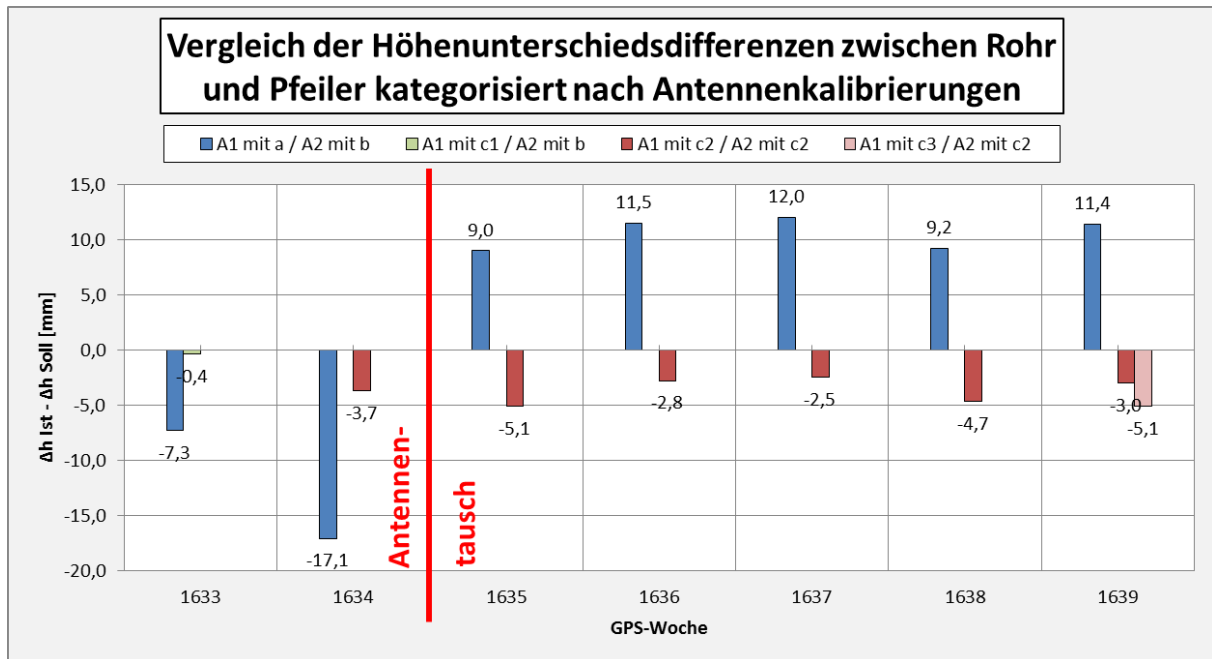


Abb. 13: Abweichungen der GPS-Höhendifferenzen (Ist) vom nivellierten Höhenunterschied (Soll) bei der L3(L0)+T-Lösung

Ein anderes Bild ergibt sich, wenn die Absolutkalibrierungen in den Varianten a (relative Feldkalibrierung) und b (Roboter-Kalibrierung) für die jeweiligen Antennen verwendet werden. Hier wird der Antennentausch sehr deutlich durch den Vorzeichenwechsel in den Abweichungen sichtbar (blaue Balken). Während vor dem Antennentausch die Abweichungen zum Soll-Höhenunterschied noch zwischen $-7,3$ mm und $-17,1$ mm (Median $-12,2$ mm) lagen, betragen sie nach dem Antennentausch zwischen $+9,0$ mm und $+12,0$ mm (Median $+10,5$ mm). Die Mediane differieren hier also um fast 23 mm. Mittelt man die Mediane vor und nach dem Antennentausch nach dem Prinzip der „Messung in 2 Lagen“, dann weicht das Resultat lediglich 0,8 mm vom Sollwert ab. Jede einzelne Wochenlösung liegt dabei innerhalb von ± 5 mm zum dazugehörigen Median.

An dieser Stelle lassen sich die bisher gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse bereits wie folgt werten:

Bei der Auswertung langer Basislinien konnte der Höhenunterschied bei jeder Wochenlösung innerhalb von ± 5 mm zum Sollwert bestimmt werden konnte, auch wenn die beteiligten Basislinien jeweils 114 km lang waren. Das ist ein durchaus erfreuliches Ergebnis. Auch die in Abschnitt 5.1 gewonnenen Erkenntnisse bezüglich der Verwendung unterschiedlicher Antennen-Kalibrierungsarten wurden nochmal bestätigt. Bei gleicher Kalibrierungsart sind mögliche Restfehler der Höhenkalibrierung nicht durch einen Antennentausch, der dem Prinzip „Messung in 2 Lagen“ entspricht, zu eliminieren. Die in Abschnitt 5.1 festgestellten verbliebenen Abweichungen betragen für L1 jedoch lediglich $-1,5$ mm und für L2 lediglich $+0,4$ mm. Für die Linearkombination aus L1 und L2 kann als wirksame Restabweichung der Mittelwert $-0,5$ mm angenommen werden, der innerhalb der Kalibrierunsicherheit in der Höhenkomponente liegt und außer Acht gelassen werden kann.

Arbeitet man dagegen mit Antennen, die auf unterschiedliche Art absolut kalibriert worden sind, so muss man mit unterschiedlichen systematischen Restfehlern bei der Höhenkalibrierung rechnen. Diese kann man in klassischer Weise durch den Antennentausch (also nach dem Prinzip einer „Messung in 2 Lagen“) sehr weitgehend eliminieren. Danach ließ sich der Höhenunterschied aus einer kompletten Messwoche innerhalb von 5 mm genau bestimmen.

Für die GPS-Woche 1633 wurde zusätzlich die gemischte Kalibrierung A1-c1 / A2-b ausgewertet. Aus Abschnitt 5.1 Unterabschnitt c konnte als Ergebnis mitgenommen werden, dass die Kalibrierungsart b (Roboterkalibrierung) gut zur Kalibrierungsart c (AMK) passt. Insofern war zu erwarten, dass dieses Ergebnis (hellgrüner Balken in Abbildung 13 mit - 0,4 mm) recht nahe an den Resultaten liegt, die mit der einheitlichen Kalibrierungsart c2 erreicht wurden (braune Balken in Abbildung 13). Tatsächlich streuen die betreffenden Werte in den Folgewochen zwischen - 2,5 mm bis - 5,1 mm, womit das besagte Ergebnis aus der GPS-Woche 1633 innerhalb von 5 mm übereinstimmt.

Noch nicht betrachtet wurde, welchen Einfluss die Troposphärenmodelle bei der GNSS-gestützten Höhenübertragung über lange Basislinien haben. Dieser Aspekt soll im nachfolgenden Abschnitt näher untersucht werden.

d) Zusätzliche Betrachtung der troposphärischen Refraktion

Die troposphärische Laufzeitverzögerung der GNSS Code- und Phasensignale bildet wahrscheinlich den größten genauigkeitslimitierenden Faktor bei geodätischen GNSS-Anwendungen ([2] Dach u.a. 2007). Aufgrund der troposphärischen Refraktion bewegt sich der Zenit Path Delay (ZPD) in der Größenordnung von 2,3 m (oder etwa 8 ns) für eine Station auf Meeresniveau und Standardatmosphärenbedingungen.

Ein absoluter Fehler in den troposphärischen Zenitkorrekturen von 10 cm führt zu einem Maßstabsfehler von ca. 0,05 ppm, ein relativer Fehler der Zenitkorrektur von 1 cm verursacht fast ausschließlich einen Höhenfehler von ca. 3 cm (nach [6] Drescher 2013):

$$d(\text{Höhe}) \approx 3 \cdot d(\Delta \text{ZPD})$$

Um die Messungen entsprechend zu korrigieren, verwendet man im Regelfall Standardatmosphärenparameter und -modelle. Die Modelle unterscheiden zwischen vertikaler Trockenkomponente und vertikaler Feuchtkomponente sowie sog. Mapping-Funktionen, die den Übergang vom Zenit auf beliebige Elevationswinkel erlauben ([5] Bauer 2011).

Beim vorliegenden Test wurden – wie bereits in den Abschnitten 3 und 5.2 erwähnt – die die Troposphäre beschreibenden ZPD-Parameter aus den Beobachtungen geschätzt, da dies bei langen Basislinien zwingend erforderlich ist.

Das Intervall der ZPD-Parameter-Schätzung betrug im Auswerteprozess mit der Bernese GPS Software eine Stunde. Da durch die räumliche Nähe der beiden Vermessungspunkte (Pfeiler P und Rohr R) gleiche troposphärische Bedingungen anzunehmen sind, werden im weiteren Verlauf nur die Unterschiede zwischen den unabhängig geschätzten ZPD-Parametern in P und R betrachtet.

Der Tabelle 8 kann man entnehmen, dass die Mittelwerte der Berechnungsvarianten mit der einheitlichen Kalibrierungsart c aus der Antennenmesskammer den gleichen troposphärischen Bedingungen auf beiden Vermessungspunkten sehr nahe kommen. Betrachtet man die Mittelwerte der Differenzen der ZPD-Parameter bei den Kalibrierungsarten a und b (siehe Tabelle 9), fallen diese höher aus. Gemäß o.a. Näherungsformel sind dadurch auch entsprechend größere Auswirkungen auf den Fehleranteil im Höhenunterschied zu erwarten.

In den folgenden beiden Tabellen wurde der Fehler auf den Höhenunterschied nach der o.a. Näherungsformel bestimmt. Aufgrund der geringen Differenzen zwischen den ZPD-Werten mit Kalibrierungen aus der Messkammer (siehe Tabelle 8 - der Maximalwert beträgt 1,1 mm in der GPS-Woche 1637), wirken sich diese nur im unteren Millimeter-Bereich auf den Fehler im Höhenunterschied aus. Allerdings erkennt man auch, dass in der GPS-Woche 1635 die exakte Wiedergabe der troposphärischen Verhältnisse ($\Delta \text{ZPD} = 0,0 \text{ mm}$) nicht zur (erhofften) geringsten Abweichung vom Sollhöhenunterschied führt, sondern laut Abbildung 13 sogar im Gegenteil mit 5,1 mm die größte Differenz aufweist.

GPS- Woche	Δ ZPD [mm] Wochenmittelwert			Fehler Δh [mm]
	Pfeiler A1-c1/ Rohr A2-b	Pfeiler A1-c2/ Rohr A2-c2	Pfeiler A2-c2/ Rohr A1-c2	
1633	-0,4			-1,2
1634		-0,2		-0,6
1635			0,0	0,0
1636			0,6	1,8
1637			1,1	3,3
1638			0,4	1,2
1639			0,5	1,5

Tab. 8: Auswirkungen der relativen ZPD-Werte auf den Fehler im Höhenunterschied mit einheitlicher Kalibrierungsart

GPS- Woche	Δ ZPD [mm] Wochenmittelwert		Fehler Δh [mm]
	Pfeiler A1-a/Rohr A2-b	Pfeiler A2-b/Rohr A1-a	
1633	-1,2		-3,6
1634	-2,8		-8,4
1635		2,5	7,5
1636		3,3	9,9
1637		3,9	11,7
1638		3,0	9,0
1639		3,4	10,2

Tab. 9: Auswirkungen der relativen ZPD-Werte auf den Fehler im Höhenunterschied mit unterschiedlicher Kalibrierungsart

Tabelle 9 zeigt, dass bei der Troposphärenschätzung mit unterschiedlichen Kalibrierungen die Fehlereinflüsse im Höhenunterschied (Fehler Δh) sehr ähnliche Werte aufweisen wie die Abweichungen der Wochenlösungen vom Sollhöhenunterschied (siehe Abbildung 13). Allgemein gilt, dass die größeren Differenzen der ZPD-Werte bei unterschiedlichen Kalibrierungen auch zu einer größeren Abweichung vom Sollhöhenunterschied führen. Doch wie in Abschnitt 5.2 c bereits gezeigt wurde, lässt sich dieser Effekt durch Antennentausch und Mittelbildung recht weitgehend kompensieren.

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Der Praxistest zur Ermittlung des Genauigkeitspotentials einer Höhenübertragung mittels GNSS-gestützten Vermessungsverfahren hat gezeigt, dass mit entsprechendem Messaufwand (1 Woche Messdauer) selbst über größere Entfernungen hinweg Genauigkeiten von 2 – 5 mm erreicht werden können. Eine wichtige Einflussgröße besteht in einer einheitlichen absoluten Kalibrierung der simultan eingesetzten Antennen. Verwendet man GNSS-Antennen, die mit demselben Verfahren absolut kalibriert wurden, so können die geringsten Restfehler erwartet werden. Nichts desto trotz wies das im Test eingesetzte Antennenpaar vom Typ Trimble Zephyr Geodetic 2 bei der Auswertung der kurzen

Basislinien mit der GPS-L1-Frequenz noch eine kleine Restsystematik von 1,5 mm auf. Dies scheint der Grenzbereich zu sein, der auch bei einer sehr langen Messdauer nicht mehr verkleinert werden kann.

Verwendet man dagegen Antennen, die nach unterschiedlichen Verfahren absolut kalibriert worden sind, so muss man bei der Höhenübertragung mit größeren Restsystematiken rechnen. Allerdings hat der Test sehr deutlich gezeigt, dass man diese Einflüsse durch eine Zweitmessung mit getauschten Antennen und anschließende Mittelbildung der Ergebnisse weitgehend eliminieren kann. Hier ist das klassische geodätische Prinzip einer „Messung in 2 Lagen“ offenbar gut dazu geeignet, systematische Restfehler wirksam zu reduzieren.

Die Simulation einer Höhenübertragung über große Entfernungen (100 km) lieferte ebenfalls befriedigende Ergebnisse. Mit der verwendeten Ausrüstung und einer Langzeitmessung über 1 Woche konnte bei einheitlicher Antennenkalibrierung eine Genauigkeit von 5 mm erreicht werden. Verwendet man dagegen Antennen, die nach verschiedenen Verfahren absolut kalibriert wurden, so muss man zwingend eine Zweitmessung mit getauschten Antennen vornehmen und die Ergebnisse „aus 2 Lagen“ mitteln. Auch in diesem Fall erreicht man für den ellipsoidischen Höhenunterschied eine Genauigkeit von 5 mm oder besser.

Durch die unterschiedlichen Antennenhöhen konnten direkt keine Auswirkungen auf die Qualität der Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Höhenunterschied abgeleitet werden. Ein höherer Antennenaufbau in P und R führte allerdings zu einem geringeren Multipath-Index (MPI), wodurch die Qualität der empfangenen Signale verbessert wird. Da aber in den Wochen mit höheren MPI-Werten keine negativen Einflüsse in den Ergebnissen erkennbar waren, wurden jene möglicherweise durch die 7 x 24 Stunden Beobachtungszeit ausreichend kompensiert.

Wichtig erscheint die Erkenntnis zu sein, dass bei unterschiedlichen absoluten Kalibrierverfahren dennoch systematische Unterschiede in der Höhenkomponente verbleiben, die beim eingesetzten Equipment Beträge von +/- 7 mm erreicht haben. Dies ist im Hinblick auf eine genaue Bereitstellung von Höhen über die *SAPOS*[®]-Dienste ein bedenklich hoher Wert, da er sich bei einem Antennenwechsel aufaddieren und somit eine Größenordnung von rund 15 mm erreichen kann. Insofern muss der absoluten Kalibrierung von GNSS-Antennen auf den *SAPOS*[®]-Stationen weiterhin größte Beachtung gewidmet werden. Ein einheitliches Kalibrierverfahren für alle Antennen verspricht die besten Ergebnisse, da dann verbliebene Restsystematiken in der Höhenkomponente nahezu gleich erwartet werden können.

Ob sich die Kalibrierparameter mit zunehmendem Alter der Antenne verändern, konnte in unserem Test nicht nachgewiesen werden. Zwischen der ersten und letzten Kalibrierung lagen allerdings auch nur 4 Jahre Zeitabstand.

Abschließend muss aber nochmals darauf hingewiesen werden, dass es sich lediglich um einen Praxistest mit „Bordmitteln des HLBG“ (d.h. mit einem befristet verfügbarem Equipment in einer nicht optimalen Umgebung mit tlw. hohen MPI-Werten sowie mit vorhandenen Auswerteprogrammen) gehandelt hat, der keine hochwissenschaftlichen Ansprüche erfüllen kann. Die Durchführung und Auswertung musste neben dem regulären *SAPOS*[®]-Betrieb erfolgen. Es konnten auch nicht alle möglichen Varianten aus dem umfangreichen Datenmaterial ausgewertet werden, was sicherlich wünschenswert gewesen wäre. Dennoch erscheinen uns die erhaltenen Ergebnisse auch für GNSS-Anwender außerhalb der HVBG hinreichend interessant. Es würde sich u.E. lohnen, wenn sich die Wissenschaft dem Fehlerhaushalt bei GNSS-gestützten Höhenübertragungen einschließlich der individuellen absoluten Antennenkalibrierung nochmal gesondert annimmt. Betreiber und Nutzer des *SAPOS*[®] wären sehr dankbar, wenn die Höhenbestimmung über diese amtlichen Positionierungsdienste weiter verbessert werden kann.

Literaturnachweis

- [1] Wanninger, L., Rost, Ch., Hartlieb, G., Köhr, M.:
Zur Problematik des Antennenwechsels auf GNSS-Referenzstationen
zfv - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 4/2006 S. 171-175.
- [2] Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P., Meindl, M.:
User manual of the Bernese GPS Software 5.0. Astronomisches Institut der Universität Bern, 2007.
- [3] AdV: Abschlussbericht der Projektgruppe SAPOS®-Koordinatenmonitoring vom 16.12.2008
(interner Bericht).
- [4] Görres, B.: Ist das GNSS-Antennenproblem gelöst?
zfv - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 4/2010 S. 256-267.
- [5] Bauer, M.: Vermessung und Ortung mit Satelliten –
Globale Navigationssatellitensysteme (GNSS) und andere satellitengestützte Navigationssysteme
6. Auflage, Wichmann Verlag, 2011.
- [6] Drescher, R.: Präzise und echtzeitnahe Positionierung in einem Mixmode-GPS-Netz mit großen
Höhenunterschieden (Dissertation).
Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie der Technischen Universität Darmstadt, 2013.

Anschriften der Verfasser:

Darcy Böttner Bernhard Heckmann Theodor Müller
Hessisches Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation
Schaperstraße 16
65195 Wiesbaden

E-Mail: darcy.boettner@hvbh.hessen.de

E-Mail: bernhard.heckmann@hvbh.hessen.de

E-Mail: theodor.mueller@hvbh.hessen.de

(Manuskript: Oktober 2014 / Mai 2015)