

Untersuchung eines Smartphone mit Zweifrequenz-GNSS-Empfänger in verschiedenen Anwendungsszenarien im Vermessungswesen



Analysis of a Smartphone with Dual-frequency GNSS receivers for Different Applications in Surveying

Till Weigert und Günther Retscher, Wien

Dieser Beitrag wurde als „reviewed paper“ angenommen.

Kurzfassung

Diese Studie untersucht den Einsatz eines Smartphones mit Zweifrequenz-GNSS-Empfänger im Vermessungswesen. Es werden Messungen mit dem Pixel 5 des Herstellers Google LLC vorgenommen. Die Auswertung der aufgezeichneten Satellitendaten erfolgt im Post Processing mit Positionierungsmethoden, welche auf Code- und Phasenbeobachtungen basieren. Die zu erzielenden Genauigkeiten stehen hierbei im Vordergrund. Es konnte gezeigt werden, dass das Pixel 5, obwohl es die Aufzeichnung von Satellitendaten auf zwei Frequenzbändern ermöglicht, nur eingeschränkt in der praktischen Vermessung eingesetzt werden kann, da es die hier geforderten Genauigkeiten im Zentimeterbereich nicht erfüllt. Die niedrige Qualität der Messdaten ist problematisch, weswegen Lösungen über zwei Frequenzbänder und auf Basis von Phasenbeobachtungen nur bedingt möglich sind. Dennoch können mit dem Smartphone bei langen Beobachtungszeiten Ergebnisse mit einer Genauigkeit von unter einem halben Meter erzielt werden. Das Pixel 5 kann für Anwendungen mit niedrigeren Genauigkeitsansprüchen, wie beispielsweise zur Datenerfassung für Geoinformationssysteme, verwendet werden.

Schlüsselwörter: GNSS-Zweifrequenzmessungen, Smartphone, Genauigkeitsbetrachtungen, Single Point Positioning (SPP), Precise Point Positioning (PPP), Differential GNSS (DGNS)

Abstract

The study examines the application of a smartphone with dual-frequency GNSS receiver in surveying. Measurements have been carried out with the Pixel 5 from the manufacturer Google LLC. The recorded satellite data is evaluated in post processing with positioning methods based on code and phase observations. The focus here is led on the accuracy to be achieved. It could be shown that the Pixel 5, although it enables the recording of satellite data on two frequency bands, can only be used to a limited extent in practical surveying tasks because it does not meet the accuracy requirements in the centimeter range. The low quality of the measurement data is problematic, which is why solutions over two frequency bands and based on phase observations are only possible to a limited extent. Nevertheless, with long observation times, results with an accuracy of less than half a meter can be achieved with the smartphone. The Pixel 5 can be used for applications with lower accuracy requirements such as data acquisition for geographic information systems.

Keywords: GNSS dual-frequency measurements, smartphone, positioning accuracies assessment, Single Point Positioning (SPP), Precise Point Positioning (PPP), Differential GNSS (DGNS)

1. Einleitung

Die Positionsbestimmung mit Hilfe von Smartphones wird immer genauer. Mobiltelefone der neuesten Generation können Signale von Satelliten auf zwei Frequenzbändern empfangen (siehe z.B. Barbeau, 2018). Aufgrund der unterschiedlichen Ausbreitungs- und Refraktionseigenschaften der beiden Signale können atmosphärische Einflüsse und Mehrwegeeffekte verringert werden und die Messungen erreichen eine höhere Genauigkeit. Es ist denkbar, dass in Zukunft einfache Aufgaben der angewandten Vermessung mit Smartphones

durchgeführt werden können. Dies spart Zeit und Geld, da keine zusätzliche Hardware angeschafft werden muss und das Smartphone ohnehin ein ständiger Begleiter ist.

Diese Studie untersucht mögliche Einsatzgebiete eines Smartphones mit Zweifrequenz-Empfänger in der angewandten Vermessung. Es werden mehrere Anwendungen betrachtet und Messungen durchgeführt. Es wird ermittelt, ob ein sinnvoller Einsatz möglich ist, und es werden die Grenzen der Technik aufgezeigt. Um zu untersuchen, inwieweit Smartphones für vermes-

sungstechnische Aufgaben geeignet sind, sind insbesondere die zu erzielende Genauigkeit, der Messaufwand, die Wiederholbarkeit der Messergebnisse und die Qualität der Messdaten von Interesse. Um diese zu untersuchen, werden mehrere Messungen durchgeführt. Die Daten werden mit dem Pixel5 des amerikanischen Herstellers Google LLC aufgenommen, welches seit Oktober 2020 erhältlich ist.

Die Messungen finden auf dem Dach des Elektrotechnischen Institutsgebäudes (EI) der TU Wien und in einem Park vor dem Hauptgebäude, dem Karlsplatz, statt. In einer Langzeitmessung über 150 Minuten werden Rohdaten aufgezeichnet. Dabei wird das Smartphone auf einem koordinativ bekannten Referenzpunkt (Messpfeiler) positioniert um die erzielte Genauigkeit ableiten zu können. Zusätzlich wird eine Referenzstation in Form eines klassischen GNSS-Empfängers mit Präzisionsantenne auf einem zweiten Messpfeiler aufgestellt. Neben der Langzeitmessung werden mehrere kürzere Messungen über einen Zeitraum von 20 Minuten vorgenommen. Mit diesen sollen reale Messaufgaben wie beispielsweise die Datenaufnahme für ein Geoinformationssystem (Baumkataster, Laternenkataster, Verkehrsschilder etc.) simuliert werden. Des Weiteren werden Messungen entlang einer Strecke durchgeführt um Aufgaben zur Leitungsdokumentation oder die grobe Vermessung von Trassen zu untersuchen.

Im Postprocessing werden die erhobenen Daten ausgewertet und verschiedene Verfahren zur Positionsbestimmung untersucht. Hierfür wird die quelloffene Software der Real Time Kinematic Library (RTKLib, Version 2.4.3) verwendet, welche eine Analyse der Rohdaten im Receiver Independent Exchange Format (RINEX) erlaubt. Es werden die Methoden der Einzelpunktbestimmung, wie Single Point Positioning (SPP) und Precise Point Positioning (PPP), sowie Differential GNSS (DGNSS) miteinander verglichen. Zur Ermittlung der Basislinien beim Differential GNSS dienen sowohl die eigene Referenzstation als auch das Referenzstationsnetz von Echtzeit Positionierung Austria (EPOSA). Neben den Methoden zur Positionsbestimmung werden die verschiedenen GNSS miteinander verglichen. Die Anzahl der verfügbaren Satelliten, das Signal-Rausch-Verhältnis (Signal-to-Noise-Ratio, SNR) und die Kontinuität der Signale werden betrachtet. Das Google Pixel 5 Smartphone erlaubt eine Aufzeichnung der Signale je nach GNSS auf bis zu zwei Trägerfrequenzen. Es kann daher eine Analyse der Satellitensignale

in Abhängigkeit von der Frequenz vorgenommen werden. Die Unterschiede zwischen den Frequenzbändern L1 und L5 bzw. E1 und E5a werden daher untersucht.

2. Grundlagen und Vorgehensweise

Das Google Pixel5 Smartphone besitzt einen Snapdragon 765G Prozessor von Qualcomm Incorporated (Qualcomm, 2019), welcher die Aufzeichnung von GNSS-Signalen auf zwei Frequenzen ermöglicht. Die unterstützten Satellitenpositionierungssysteme und Frequenzen sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Für die Aufzeichnung der Messdaten mit dem Smartphone wird der RINEX Logger der Geo++ GmbH eingesetzt. Mit diesem ist es möglich GNSS-Rohdaten direkt als Observation-File zu speichern. Die Applikation baut auf dem frei zugänglichen Source Code des GPS Measurement Tools von Google auf. Mit dem RINEX Logger können Signale der Systeme GPS, Glonass, Galileo, Beidou und QZSS (Quasi-Zenit-Satelliten-System) aufgezeichnet werden. Ergänzungssysteme wie das Satellite Based Augmentation System (SBAS) werden nicht unterstützt.

GPS	L1 / L5
Glonass	R1
Galileo	E1 / E5a
Beidou	B1
QZSS	L1 / L5

Tab. 1: Unterstützte Satellitenpositionierungssysteme und Frequenzen

Auf dem Messdach des EI-Gebäudes der TU-Wien wird ein Referenzempfänger aufgestellt. Verwendet wird der SP80 GNSS Receiver der Firma Spectra Geospatial. Hiermit werden GPS (L1, L2, L5) und Glonass (R1, R2) Daten aufgezeichnet. Um diese verwenden zu können, werden sie anschließend in das RINEX-Format konvertiert. Dies geschieht mit dem RINEX Converter 4.7.2 der Firma Trimble.

Das Flussdiagramm (Abbildung 1) zeigt den Arbeitsablauf, der für die Untersuchungen gewählt wird. Der Ablauf beginnt mit der Aufnahme der Messdaten und der Beschaffung weiterer Daten über das Referenzstationsnetz EPOSA und den IGS (International GNSS Service). Anschließend werden mit RTKLib die aufgenommenen Rohdaten analysiert und mit verschiedenen Methoden Positionslösungen berechnet. Die ermittelten Er-

gebnisse werden visualisiert und anschließend mit Matlab weiterverarbeitet. Mit Matlab werden Transformationen berechnet, Ausreißer eliminiert, Standardabweichungen berechnet, Mittelwerte gebildet und die Genauigkeiten der Messergebnisse bestimmt. Diese Daten werden anschließend tabellarisch zusammengefasst, um einzelne Systeme, Berechnungsmethoden und Beobachtungsintervalle vergleichen zu können.

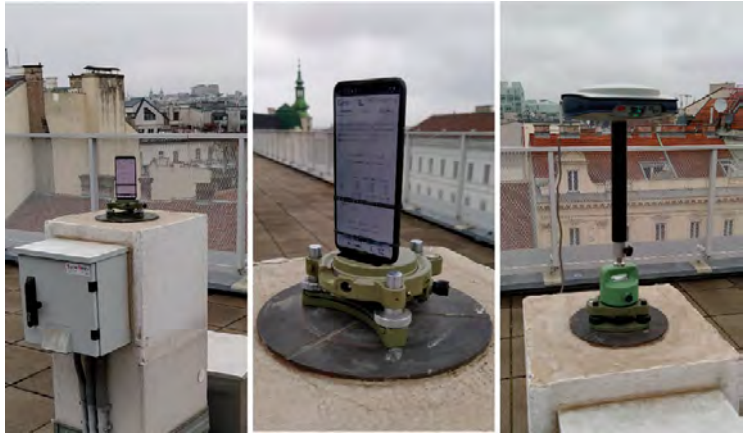


Abb. 2: Smartphone und Referenzempfänger auf zwei Messpfeilern



Abb. 1: Arbeitsablauf in Form eines Flussdiagramms

3. Analyse von Langzeitbeobachtungen

Vorerst wurden Langzeitmessungen über 150 Minuten auf dem Messdach im Dezember 2020 durchgeführt. Das Smartphone wurde hierfür mit einer Halterung in einem Dreifuß auf einem Messpfeiler montiert (siehe Abbildung 2). In kurzer Entfernung wurde auf einem zweiten Pfeiler der Referenzempfänger SP80 positioniert. Die Rohdaten wurden mit einer Auflösung von einer Sekunde aufgezeichnet.

3.1 Satellitenverfügbarkeit und -qualität

Über einen Messzeitraum von 150 Minuten, der hier betrachtet wird, wurden die Signale von 56 Satelliten aufgezeichnet. Davon konnten von 21 Satelliten die Daten auf zwei Frequenzbändern aufgenommen werden. Tabelle 2 zeigt die maximale und minimale Satellitenanzahl je System und Frequenz, welche während der Messung gleichzeitig beobachtet werden konnten. Die Anzahl beobachteter Satelliten war bei GPS am höchsten, allerdings konnte nur rund die Hälfte auf zwei Frequenzen beobachtet werden. Im Gegensatz dazu war die Anzahl an Galileo-Satelliten niedriger, es konnten aber von nahezu allen Satel-

System	Frequenz	Total	Max	Min
GPS	L1	18	12	7
	L5	10	6	4
GLONASS	L1	12	10	5
GALILEO	E1	11	9	6
	E5a	11	8	6
BEIDOU	B1	15	11	6

Tab. 2: Satellitenanzahl in Abhängigkeit vom System und Frequenzband

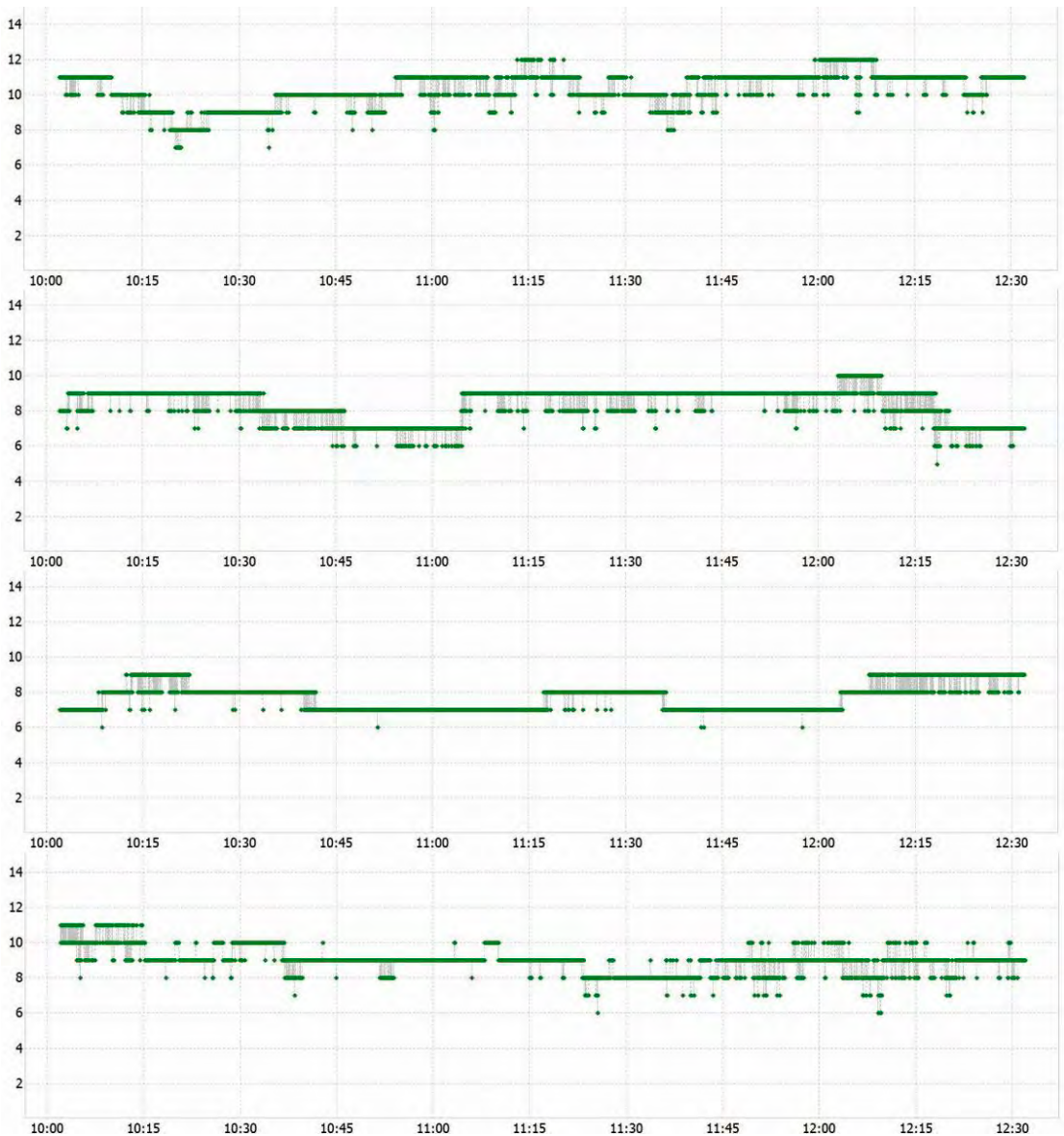


Abb. 3: Satellitenanzahl über den Beobachtungszeitraum von 150 Minuten; (Reihenfolge von oben nach unten: GPS, Glonass, Galileo, Beidou)

liten beide Frequenzen empfangen werden. Abbildung 3 zeigt die Veränderung der Satellitenanzahl der einzelnen Systeme im zeitlichen Verlauf der Messung. GPS und Beidou weisen einen großen Schwankungsbereich auf, während die Galileo-Satellitenanzahl bis auf einige Ausreißer relativ konstant bleibt. Eine Beurteilung der Qualität der aufgezeichneten Signale kann über Betrachtung des SNR (Signal to Noise Ratio) in dBHz erfolgen. Zusätzlich wurde die Anzahl der Signalabbrüche

analysiert. Die Analysen zeigen, dass das SNR für die Frequenzbänder L1, R1, E1 und B1 aller Satelliten über den Beobachtungszeitraum nur selten über 48 dBHz liegen. Die niedrigsten Werte liegen unterhalb von 12 dBHz. Im Vergleich dazu haben die Referenzstationen des EPOSA Netzes deutlich höher SNR-Werte, die teilweise bei über 56 dBHz liegen. Die Signalstärke sinkt nie unter 22 dBHz.

Abbildung 4 zeigt die Satellitenkonstellation der GPS-Satelliten in Form eines Skyplots. Die Daten

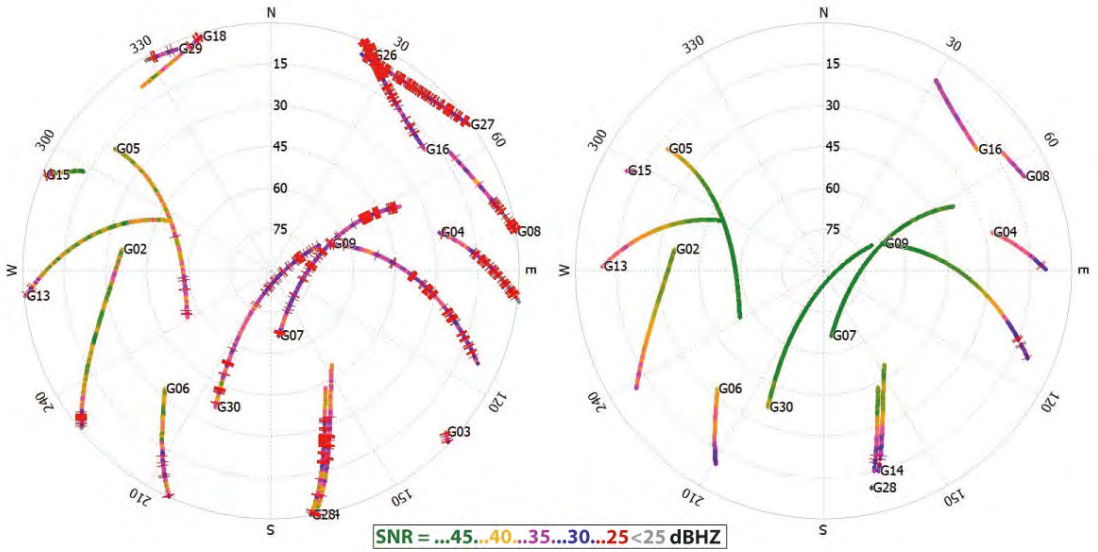


Abb. 4: Skyplot der GPS-Satelliten mit farblicher Darstellung des SNR (links Pixel 5, rechts SP80)

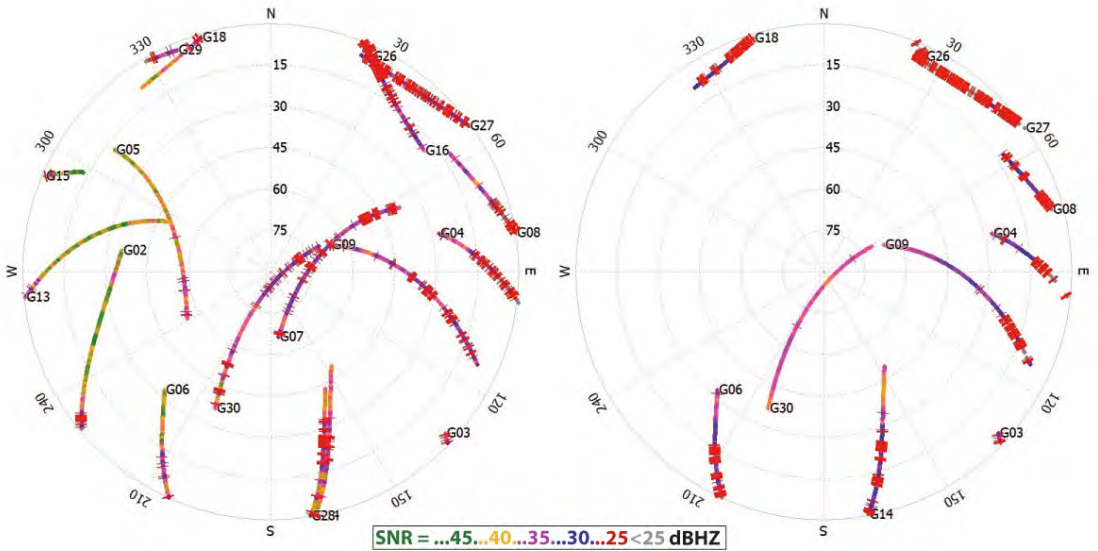


Abb. 5: Skyplot der GPS-Satelliten des Google Pixel 5 mit farblicher Darstellung des SNR; (links L1, rechts L5)

des Pixel 5 Smartphones (links) werden mit den Aufzeichnungen des Referenzempfängers SP80 (rechts) verglichen. Da die beiden Empfänger nur einige Meter voneinander entfernt waren, können die Bedingungen als identisch angesehen werden. Aus den Skyplots kann die Satellitenbewegung, die Signalstärke und die Anzahl der Signalabbrüche abgelesen werden. Die Signalstärke wird anhand einer Farbskala beschrieben, Signalabbrüche sind durch einen roten Balken gekennzeichnet.

Direkt zu erkennen ist die hohe Anzahl an Cycle Slips beim Pixel 5. Beim SP80 kommen Signalabbrüche lediglich bei einer sehr niedrigen Elevation vor. Während bei dem Referenzempfänger die Signalstärke im Zenit am höchsten ist, finden beim Pixel 5 selbst hier noch Signalabbrüche statt. Lediglich im Westen konnten relativ kontinuierliche Signale mit einem SNR von über 45 dBHz aufgezeichnet werden. Insgesamt ist die Signalstärke beim Pixel 5 deutlich niedriger als

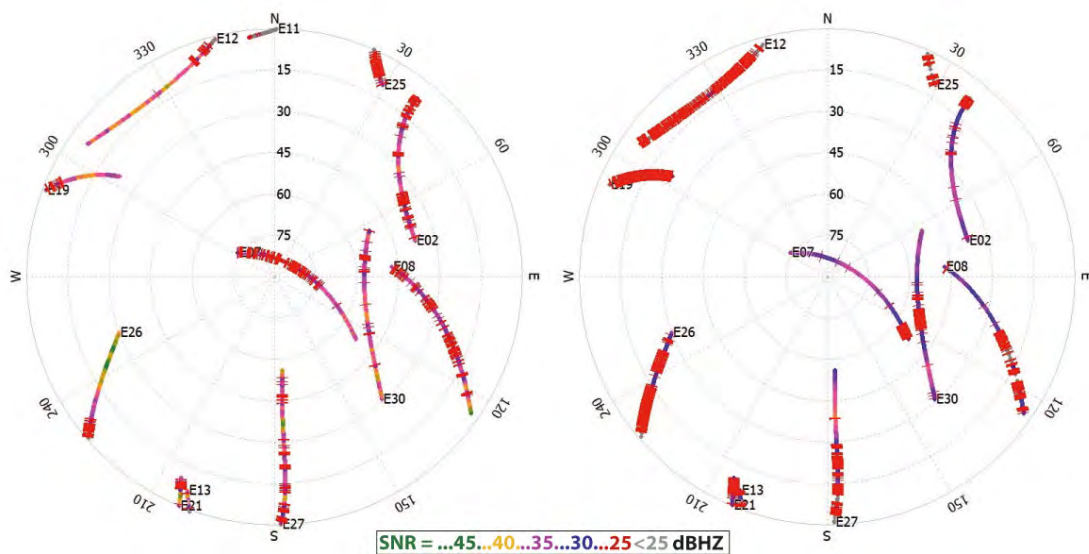


Abb. 6: Skyplot der Galileo-Satelliten des Google Pixel 5 mit farblicher Darstellung des SNR; (links E1, rechts E5a)

beim SP80. Unterhalb einer Elevation von etwa 10° liegen keine Aufzeichnungen des SP80 vor. Das Pixel 5 konnte die Satelliten auch unterhalb dieses sehr niedrigen Winkels beobachten.

Abbildung 5 zeigt die Skyplots der GPS-Bänder L1 (links) und L5 (rechts). Es ist zu erkennen, dass acht Satelliten G02, G05, G07, G13, G15, G16, G28 und G29 nur auf einer Frequenz beobachtet werden konnten. Viele dieser Satelliten befinden sich eher im Westen. Auffällig ist, dass einige der Satelliten, von denen nur das L1-Band beobachtet werden konnte, eine höhere Signalstärke aufweisen. Die Anzahl der Cycle Slips hängt bei L5 stark von der Elevation ab. Oberhalb von 30° brechen die Signale nur sehr selten ab. Bei L1 scheint diese Abhängigkeit nicht so stark ausgeprägt zu sein. Der Satellit G30 konnte auf beiden Frequenzbändern beobachtet werden. Auffällig ist, dass dessen Signal bei L5 nur zwei Mal abbricht, bei L1 hingegen deutlich öfter. Bei den restlichen Satelliten ist die Anzahl an Cycle Slips im L5-Band höher.

Abbildung 6 zeigt die Skyplots der Galileo-Bänder E1 (links) und E5a (rechts). Bis auf den Satelliten E11 konnten alle Satelliten auf zwei Frequenzbändern beobachtet werden. E11 weist eine sehr niedrige Elevation und Signalstärke auf. Cycle Slips finden deutlich häufiger im E5a-Band als im E1-Band statt, wenn man den Elevationsbereich 0° bis 30° betrachtet. E07 befindet sich zeitweise nahezu im Zenit. Im E5a-Band liegen bei diesem Satelliten deutlich weniger Signalab-

brüche als im E1-Band vor. Anders sieht es bei E26 aus. Die Signalstärke der Frequenz E1 ist relativ hoch, die Signale auf der Frequenz E5a brechen jedoch häufig ab. Auf dem Band E1 konnten unterbrechungsfreie Signale ähnlich wie bei den GPS-Satelliten eher im Westen aufgezeichnet werden.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Signalqualität im Vergleich zu einem geodätischen GNSS-Empfänger deutlich niedriger ist. Die Signale sind beträchtlich schwächer und es kommt öfter zu Signalabbrüchen. Die Position der Satelliten spielt eine Rolle, da die Signale beim Pixel 5 im Westen meist stärker sind. Eine Beeinträchtigung der Signalqualität durch ein im Süden liegendes Gebäudedach kann nicht ausgeschlossen werden. Auf den Referenzempfänger hat die Himmelsrichtung keinen Einfluss. Obwohl anzunehmen ist, dass die Signale der im Zenit stehenden Satelliten die höchste Qualität aufweisen, trifft dies auf die Frequenzbänder L1 und E1 des Pixel 5 nicht zu. Bei L5 und E5a ist hingegen eine Qualitätssteigerung mit zunehmender Elevation zu beobachten.

3.2 Vorgaben für die Berechnung der Positionslösungen

Im Folgenden wurden aus den aufgezeichneten Rohdaten Positionslösungen (nachfolgend: Lösungen) mit Hilfe der Funktion RTKPost des Softwarepakets RTKLib berechnet. Untersucht wurden wie eingangs erwähnt die drei Positionierungsmethoden SPP, PPP und DGNS. Hierbei wurde sowohl eine Auswertung über den ge-

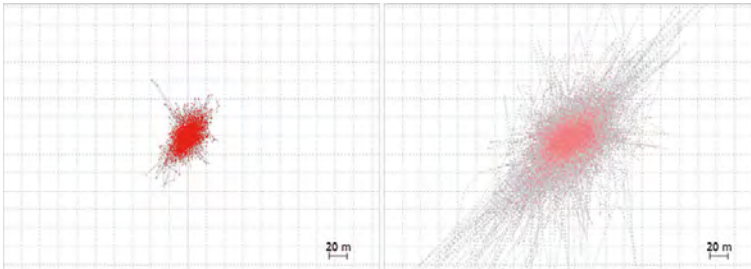


Abb. 7: SPP-Positionslösungen für GPS und Glonass

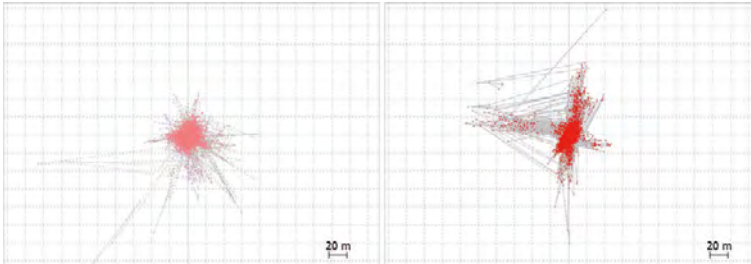


Abb. 8: SPP-Positionslösungen für Galileo und Beidou

samen Messzeitraum als auch eine Auswertung unterteilt in einzelne Intervalle vorgenommen. Neben den Unterschieden der einzelnen GNSS und der Positionierungsmethoden wurde der Einfluss der Ephemeriden (Broadcast/Precise) und der Uhrenkorrekturparameter untersucht. Um die Genauigkeit der Ergebnisse beschreiben zu können, wurden die Abweichungen zu den Referenzkoordinaten berechnet. Da diese Koordinaten im ETRS89 vorliegen, die GNSS-Lösungen jedoch im WGS84, müssen die Koordinaten des Messpfailleurs transformiert werden (Höggerl et al., 2007). Zusätzlich wird zu allen Koordinaten der Positionslösungen eine UTM-Projektion berechnet, um Aussagen über die Lage- und Höhenqualität zu treffen.

3.3 Single Point Positioning (SPP)

Bei SPP werden lediglich die Codebeobachtungen in die Berechnung mit einbezogen. Eine Frequenzwahl kann nicht vorgenommen werden. Durch Anwählen der Option RAIM FDE (Receiver Autonomous Integrity Monitoring Fault Detection and Exclusion) werden Beobachtungen, welche zu unwahrscheinlichen Lösungen führen, im Vorhinein ausgeschlossen. Für die SPP Auswertung wurden zuerst das RINEX-Observation-File und je nach verwendetem System das entsprechende Navigation-File (Broadcast Ephemeriden) verwendet. Die Navigation-Files für GPS und Glonass wurden über EPOSA bezogen. Für Ga-

lileo und Beidou wurden die Multi-GNSS Experiment Files (MGEX) des IGS verwendet.

Zuerst wurden Lösungen für jeweils ein Satellitensystem berechnet. Die vier entstandenen Ergebnisse werden nachfolgend verglichen. In Abbildung 7 sind die Verteilungen der Lösungen für GPS und Glonass dargestellt, in Abbildung 8 die Verteilungen für Galileo und Beidou. Um die Grafiken vergleichbar zu machen, werden Linienabstände für die Koordinatengitter von 20 Metern gewählt. Anhand der Darstellungen können bereits erste Aussagen über die Ergebnisse getroffen werden. Die Glonass-Lösungen weisen eine deutlich höhere Streuung

auf als die GPS- und Galileo-Lösungen. Galileo besitzt mehr weit entfernte Ausreißer als GPS, obwohl die Verteilungen ähnlich sind. Die Beidou-Lösungen sind sehr stark entlang der Koordinatenachsen verteilt.

Im Folgenden wurden die verschiedenen GNSS miteinander kombiniert. Die Positionslösungen wurden auf zwei Arten berechnet. Tabelle 3 enthält die Lösungen der einzelnen GNSS („G“ für GPS, „R“ für Glonass, „E“ für Galileo und „C“ für Beidou) in den ersten vier Zeilen sowie verschiedene Kombinationen von Lösungen der unterschiedlichen GNSS (z.B. „GR“ für GPS und Glonass und „GREC“ für alle vier GNSS). Der Parameter n beschreibt die Anzahl tatsächlich verwendeter Lösungen nach Eliminieren der Ausreißer. Die Extremwerte sind jeweils rot bzw. grün markiert. Alle Angaben in dieser sowie in den folgenden Tabellen besitzen die Einheit Meter. Betrachtet man zunächst die Systeme unabhängig, konnten mit Galileo über 7000 Lösungen über die 150 Minuten Beobachtungszeit und mit GPS nur ca. 4000 Lösungen berechnet werden. Bei den Standardabweichungen fällt auf, dass die Abweichungen in der Höhe – wie zu erwarten – bei allen Systemen am größten sind. Die höchste Streuung weist Glonass mit einer gesamten Standardabweichung von über 30 m auf. Die niedrigsten Standardabweichungen weisen Galileo und Beidou auf. Insgesamt ist die Abweichung von den Sollkoordinaten des Messpfailleurs bei Galileo am niedrigsten. Der

SPP	150 min 16.12.2020 10:02 - 12:32					Kombinierte Lösungen mit RTK-POST					
	n	Std E	Std N	Std U	Std Lage	Std Gesamt	Abw E	Abw N	Abw U	Abw Lage	Abw Gesamt
G	4045	4.532	5.842	12.407	7.394	14.443	1.988	0.882	-1.853	2.175	2.858
R	5496	12.788	11.137	25.225	16.958	30.395	0.256	5.110	5.672	5.116	7.638
E	7084	3.650	3.795	9.4024	5.265	10.776	-0.598	-0.466	0.544	0.758	0.933
C	5728	3.334	5.506	8.864	6.437	10.955	-0.470	-1.220	0.483	1.307	1.393
GR	514	3.704	3.863	8.519	5.351	10.060	2.119	1.987	-2.048	2.905	3.554
GE	2030	2.709	2.837	6.264	3.923	7.391	0.948	-0.332	-0.348	1.005	1.063
GC	965	2.008	2.909	5.460	3.535	6.505	0.882	-0.539	1.330	1.034	1.685
RE	2346	3.558	3.058	7.969	4.691	9.247	-0.664	1.001	0.812	1.201	1.450
RC	1074	2.614	3.622	6.783	4.467	8.122	0.536	2.183	1.090	2.248	2.498
EC	3738	1.863	2.938	4.631	3.479	5.792	-0.139	-0.154	1.054	0.208	1.074
GRE	205	2.315	2.372	5.709	3.314	6.601	1.054	0.987	0.275	1.444	1.470
GRC	88	2.026	2.866	5.047	3.510	6.147	1.360	1.105	1.474	1.752	2.290
GEC	500	1.650	2.268	4.531	2.805	5.329	0.673	-0.489	0.889	0.831	1.217
REC	540	1.945	2.511	4.471	3.176	5.484	0.447	1.638	0.887	1.698	1.916
GREC	39	1.321	2.195	4.325	2.562	5.027	1.070	0.574	2.607	1.214	2.876

Tab. 3: Vergleich der SPP-Ergebnisse für die einzelnen Satellitensysteme und ihre Kombinationen

Helmert'sche Punktlagefehler (Spalte „Abw Lage“) beträgt in diesem Fall rund 76 cm. Bei der Kombination der verschiedenen GNSS fällt offensichtlich auf, dass die Anzahl der brauchbaren Lösungen n sehr stark abnimmt. Bei der Kombination aller vier GNSS, beträgt die Anzahl n nur mehr 39. Die zugehörigen Standardabweichungen in Ost (E), Nord (N) und der Up (U) Komponente fallen aber am kleinsten aus. Die kleinsten Abweichungen von den Sollkoordinaten in der Lage wurden bei der Kombination Galileo mit Beidou (EC) mit einem Wert von nur 21 cm erzielt. Obwohl zu erwarten war, dass mit der Kombinationslösung aus GPS und Galileo die geringste Abweichung erzielt wird, erreicht diese lediglich eine Lagegenauigkeit von rund 1 m. Dies ist auf die im Vergleich zu den Beidou-Ergebnissen höhere Standardabweichung und geringere Genauigkeit der GPS-Lösungen zurückzuführen.

3.4 Precise Point Positioning (PPP)

Für PPP können mit RTKPost lediglich Lösungen für GPS und GLONASS berechnet werden, da die Qualität der Beobachtungen der beiden anderen Systeme zu niedrig ist. Die Signalstärke ist gering und die Signale brechen häufig ab. RTKPost schaltet daher bei diesen Systemen automatisch in den SPP-Modus um. Da für Glonass lediglich Beobachtungen auf einem Frequenzband vorliegen, konzentrierte sich die folgende Auswertung auf GPS.

Zuerst wurden Positionen für den gesamten Beobachtungszeitraum berechnet. Hierbei wurde der Einfluss der Ephemeriden und der Uhrenkorrektur untersucht. Zuerst wurde eine PPP-Lösung mit Broadcast-Ephemeriden berechnet, anschlie-

ßend eine Lösung mit den Final Orbits des IGS und schließlich wurden Uhrenkorrekturparameter zusätzlich zu den Final Orbits verwendet. Abbildung 9 zeigt die Final Orbit-Lösung einmal mit Uhrenkorrektur (türkis) und einmal ohne (lila). Beide Lösungen liegen sehr nah beieinander. Die Lösung unter Berücksichtigung der Uhrenkorrektur ist allerdings um wenige Zentimeter nach Norden und nach Osten verschoben.

In Tabelle 4 sind Ergebnisse des PPP über den gesamten Beobachtungszeitraum zusammengestellt. Die Anzahl ermittelter Lösungen unterscheidet sich je nach verwendeter Bahndaten und Korrekturen. Durch Verwenden der Final Orbits reduziert sich die Lösungsanzahl um etwa 400 Ergebnisse. Werden zusätzlich Uhrenkorrekturdaten verwendet, erhält man nochmals knapp 20 Ergebnisse weniger. In dieser Arbeit wurden vorerst nur Lösungen in 10-minütigen Intervallen untersucht, um realistische Beobachtungszeiten für Aufnahmen beispielsweise zur GIS Datenerfassung zu untersuchen. Eine Aussage über das Konvergenzverhalten der Ambiguitätenfixierung kann hierbei nicht getroffen werden. Dies wird Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

Die berechneten Standardabweichungen in Ost- und Nord-Richtung liegen bei allen Herangehensweisen in der Größenordnung von wenigen Dezimetern. Die Standardabweichungen der Höhe liegen bei knapp einem Meter. Die Standardabweichungen sind somit um mehr als den Faktor 10 kleiner als die vergleichbaren GPS-Ergebnisse der SPP-Lösung über 150 Minuten. Auch die Abweichungen von den Sollkoordinaten sind unabhängig von den verwendeten Bahndaten kleiner als die der SPP-Lösung. Interessant ist der

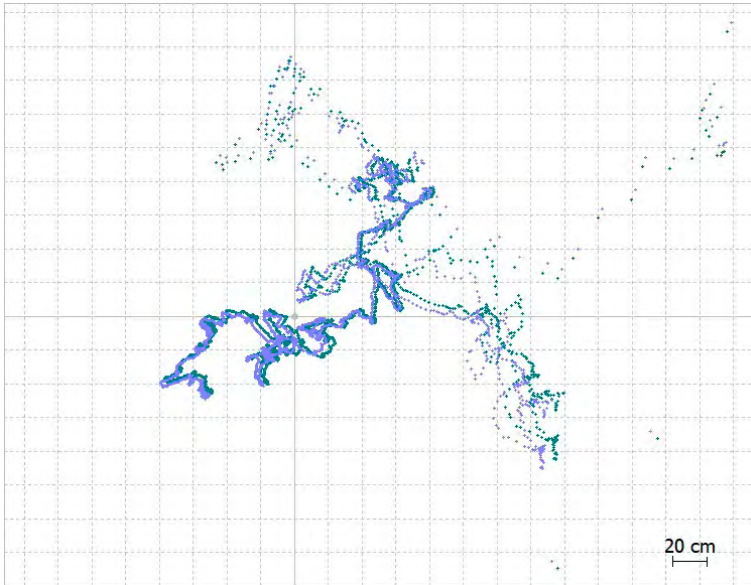


Abb. 9: PPP-Positionslösungen mit einer Auflösung von 1s und Final Orbit-Lösungen mit/ohne Uhrenkorrektur (türkis/lila)

weichung von 1,73 m erhöht werden. Werden zusätzlich zu den Final Orbits Uhrenkorrekturdaten verwendet, kann die Genauigkeit weiter gesteigert werden. Sowohl die Lage- als auch die Gesamtgenauigkeit reduzierten sich um rund 3 cm weiter.

Im Folgenden wurde der Messzeitraum in 10-Minuten-Intervalle aufgeteilt, um kürzere Beobachtungszeiten zu simulieren. Zuerst wurden die Lösungen, welche mit Broadcast Ephemeriden berechnet wurden, betrachtet (Tabelle 5). Anschließend wurden Lösungen mit den Final Orbits berechnet (Tabelle 6). Eine ähnliche Aufteilung in Intervalle bei SPP zeigte, dass die erreichbaren Genauigkeiten

Genauigkeitsunterschied zwischen den Broadcast Ephemeriden und den Final Orbits. Die Lagegenauigkeit konnte durch die Verwendung der genaueren Bahndaten um knapp 80 cm auf eine Abweichung von 95 cm gesteigert werden. Die Gesamtgenauigkeit konnte um 36 cm auf eine Ab-

beträchtlich unterschiedlich sein können. Dies bestätigt sich auch bei PPP. Die Abweichungen vom Referenzpunkt unterscheiden sich je nach betrachtetem Intervall stark, wobei die Lageabweichungen um mehrere Meter variieren können. Diese deutlichen Schwankungen können unter

150 Min	16.12.2020 10:02 - 12:32				GPS Precise Point Positioning						
	n	Std E	Std N	Std U	Std Lage	Std Gesamt	Abw E	Abw N	Abw U	Abw Lage	Abw Gesamt
BC Ephemeris	4045	0.282	0.439	0.845	0.522	0.993	1.719	-0.182	-1.171	1.728	2.087
Final Orbit	3630	0.369	0.223	0.953	0.431	1.045	0.903	0.287	1.443	0.948	1.726
Final + Clk. Cor.	3613	0.372	0.222	0.936	0.433	1.031	0.876	0.275	1.425	0.918	1.695

Tab. 4: Vergleich der PPP-Lösungen mit verschiedenen Ephemeriden und Korrekturdaten

PPP	Broadcast Ephemeris GPS		Intervalle 10 Min				16.12.2020				
	n	Std E	Std N	Std U	Std Lage	Std Gesamt	Abw E	Abw N	Abw U	Abw Lage	Abw Gesamt
10:02	447	0.319	0.657	4.206	0.731	4.268	0.337	-1.283	-2.636	1.327	2.951
10:12	421	0.702	0.997	1.377	1.219	1.839	1.377	-1.998	0.218	2.427	2.436
10:22	429	0.862	0.432	2.2633	0.964	2.460	0.265	0.041	9.141	0.268	9.144
10:32	364	0.662	1.355	2.381	1.508	2.818	3.457	2.676	0.085	4.372	4.373
10:42	309	1.356	0.524	1.660	1.454	2.207	4.530	4.226	-5.040	6.195	7.987
10:52	245	1.269	0.609	2.640	1.408	2.991	4.741	0.677	-7.367	4.789	8.787
11:02	328	1.007	2.122	1.299	2.348	2.684	0.773	-2.516	-0.815	2.632	2.755
11:12	451	0.742	1.095	1.170	1.322	1.766	1.559	2.095	-0.121	2.611	2.614
11:22	471	0.342	1.387	0.702	1.428	1.592	5.088	0.649	-2.787	5.129	5.837
11:32	406	0.695	3.628	3.892	3.693	5.366	0.474	-8.129	16.620	8.143	18.508
11:42	285	1.147	1.606	2.066	1.974	2.857	1.931	3.074	-5.539	3.630	6.623
11:52	165	1.499	0.757	2.890	1.680	3.343	3.512	5.249	-5.115	6.316	8.127
12:02	149	1.924	2.161	0.915	2.893	3.034	-6.348	-3.498	7.548	7.248	10.464
12:12	165	1.079	2.564	1.336	2.782	3.086	-5.183	-4.372	2.204	6.781	7.130
12:22	313	0.603	1.331	0.927	1.461	1.730	1.761	2.608	6.968	3.147	7.646
Mittel	330	0.947	1.415	1.982	1.703	2.613	1.218	-0.033	0.891	1.219	1.510

Tab. 5: PPP-Intervalllösungen über jeweils 10 Minuten mit GPS Broadcast Ephemeriden

PPP	Final Orbits		GPS		Intervalle 10 Min		16.12.2020				
	n	Std E	Std N	Std U	Std Lage	Std Gesamt	Abw E	Abw N	Abw U	Abw Lage	Abw Gesamt
10:02	360	0.431	0.567	4.889	0.712	4.941	0.266	-0.029	-0.988	0.268	1.023
10:12	301	0.933	1.091	1.949	1.436	2.421	0.343	-0.989	2.345	1.047	2.568
10:22	325	0.770	0.691	2.662	1.034	2.856	0.296	0.623	10.069	0.690	10.092
10:32	253	0.623	1.698	1.841	1.808	2.581	2.698	4.481	0.630	5.230	5.268
10:42	171	1.283	1.001	3.014	1.628	3.425	2.906	4.891	-5.858	5.689	8.166
10:52	136	1.638	0.729	6.113	1.793	6.370	4.094	3.818	-14.206	5.598	15.269
11:02	257	0.794	1.756	1.088	1.927	2.213	1.311	-1.205	-1.727	1.781	2.481
11:12	398	0.820	0.910	1.208	1.225	1.720	1.259	1.306	0.837	1.814	1.998
11:22	445	0.342	1.086	0.737	1.138	1.356	4.919	0.867	-2.882	4.995	5.767
11:32	332	0.669	3.250	3.359	3.319	4.722	0.788	-7.873	16.313	7.912	18.130
11:42	198	1.167	1.205	1.815	1.678	2.472	1.355	2.874	-5.418	3.178	6.281
11:52	92	1.482	1.003	4.994	1.790	5.305	4.033	5.538	-5.170	6.851	8.582
12:02	92	1.494	1.575	1.469	2.171	2.621	-5.596	-3.315	9.938	6.505	11.878
12:12	83	1.428	2.391	2.727	2.785	3.898	-4.141	-2.783	-0.028	4.989	4.989
12:22	190	0.817	0.564	0.625	0.993	1.173	1.559	1.870	4.889	2.435	5.461
Mittel	242	0.979	1.301	2.566	1.629	3.039	1.073	0.672	0.583	1.265	1.393

Tab. 6: PPP-Intervalllösungen über jeweils 10 Minuten mit IGS Final Orbits

anderem auf die über den Beobachtungszeitraum stark variierende Satellitenanzahl (siehe Abbildung 3) und die oft niedrige Signalqualität zurückgeführt werden. Im besten Fall werden Genauigkeiten unterhalb von einem Meter erzielt. Es liegt aber auch ein Ergebnis mit Abweichungen von über 8 m vor. Gemittelt erhält man eine Lageabweichung von 1,22 m. Aufgrund der starken Schwankungen wird dieser Wert jedoch von jedem Intervall stark beeinflusst. Gleiches gilt für die Abweichung in 3D. Auch hier schwanken die Ergebnisse der einzelnen Intervalle um mehrere Meter. Insgesamt wird eine Abweichung von 1,51 m erreicht. Die Anzahl der Positionen je Intervall ist bei den mit Final Orbits berechneten Ergebnissen (Tabelle 6) kleiner, schwankt jedoch ebenfalls stark je nach betrachtetem Intervall. Während sich die Standardabweichungen wenig verändert haben, sind die gemittelten Lageabweichungen kleiner geworden. Die Gesamtstandardabweichungen unterscheiden sich nur um wenige Zentimeter. Die Abweichungen vom Referenzpunkt sind stark vom jeweiligen Intervall abhängig und variieren um mehrere Meter. Die gemittelte Lagegenauigkeit liegt bei 1,27 m und ist somit um knapp 5 cm kleiner als bei der Lösung mit Broadcast Ephemeriden. Wird die Höhe hinzugezogen, wird die Genauigkeit gesteigert. Die Verbesserung der Höhe liegt bei etwa 30 cm. Es kann eine gemittelte Abweichung von 0,58 m erzielt werden.

3.5 Differential GNSS - Basislinie

Als weitere Methode wurde die Positionsbestimmung mit Hilfe einer Basislinienauswertung untersucht. Hierzu wurden fünf Basislinien mit

unterschiedlichen Längen berechnet. Als Basis dienten die drei EPOSA-Stationen Leopoldau, Baden und Traisen in und rund um Wien, eine virtuelle Referenzstation und der Vergleichsempfänger SP80, welcher sich ebenfalls auf dem Messdach befindet. Die Basislinien haben die Längen von 9,2 km, 23,5 km, 58,5 km, 0,6 km und 12 m. Von den Messungen der EPOSA Referenzstationen konnten nur L1-Daten von GPS und Glonass miteinbezogen werden, da zum Zeitpunkt der Messungen im Dezember 2020 uns keine L5-Daten zur Verfügung standen. Diese können erst seit Jänner dieses Jahres über den RINEX-Server bezogen werden. Die Daten der EPOSA Stationen konnten über diesen Server für den Messzeitraum in einer Auflösung von 1 s bezogen werden. Die Daten der virtuellen Referenzstation wurden freundlicherweise von der Forschungsgruppe Höhere Geodäsie der TU Wien bereitgestellt. Auch die Daten des SP80 liegen sekundlich vor.

Tabelle 7 enthält jeweils die Einzellösungen der Systeme sowie die kombinierten Ergebnisse, wobei die Ergebnisse für jede Referenzstation über den gesamten Beobachtungszeitraum von 150 Minuten aufgeführt sind. Die Positionslösungen wurden auf zwei Arten berechnet. In Tabelle 7 sind einerseits die Lösungen aufgeführt, bei welchen die einzelnen Systeme mit RTKPost kombiniert werden. Der Algorithmus berechnet nur Lösungen, welche optimal zu allen gewählten Systemen passen. Als Folge sinkt die Lösungsanzahl n mit Zunahme der Systeme. Daher wurde eine weitere Berechnungsmethode mit Matlab realisiert, bei der nur die Ausreißer eliminiert und die einzelnen Abweichungen berechnet werden. Dadurch erhöht

Basislinie		150 Min	16.12.2020			10:02 - 12:32						
		n	Std E	Std N	Std U	Std Lage	Std Gesamt	Abw E	Abw N	Abw U	Abw Lage	Abw Gesamt
Leopoldau	G	4946	0.752	0.753	0.492	1.065	1.173	2.260	-1.516	1.059	2.722	2.920
	R	5830	1.807	1.642	2.059	2.441	3.193	4.830	6.829	9.074	8.365	12.341
	GR RTK Lib	993	2.192	1.484	9.7057	2.647	10.060	-9.658	-21.093	12.490	23.199	26.348
	GR Matlab	10774	1.745	4.149	4.035	4.501	6.045	3.444	2.637	4.831	4.337	6.492
Baden	G	4946	0.949	0.662	0.541	1.157	1.277	2.792	-1.355	1.091	3.104	3.290
	R	5828	3.535	1.023	6.436	3.680	7.414	15.641	9.424	-31.231	18.260	36.177
	GR RTK Lib	993	7.827	4.308	22.338	8.934	24.058	-41.637	-9.719	-15.842	42.756	45.596
	GR Matlab	10775	6.442	5.077	15.887	8.202	17.879	9.175	4.410	-15.155	10.180	18.256
Traisen	G	4946	0.791	1.271	0.784	1.497	1.690	3.162	-1.473	0.829	3.488	3.585
	R	5828	5.383	2.725	4.876	6.033	7.757	32.486	12.720	-10.383	34.887	36.399
	GR RTK Lib	993	3.325	2.069	3.811	3.916	5.464	-5.912	-23.995	15.581	24.713	29.214
	GR Matlab	10774	14.600	6.840	6.017	16.123	17.209	17.579	5.907	-4.464	18.544	19.074
VRSA	G	4946	0.480	1.148	0.605	1.244	1.384	4.168	-1.933	1.056	4.594	4.714
	R	5828	1.833	2.874	6.831	3.409	7.635	11.331	17.374	-17.223	20.742	26.960
	GR RTK Lib	995	3.405	2.329	7.441	4.125	8.508	-4.743	-25.757	17.665	26.190	31.590
	GR Matlab	10774	3.505	9.241	9.214	9.884	13.513	8.303	8.963	-8.067	12.218	14.641
SP80	G	4946	2.296	2.143	1.234	3.141	3.375	5.818	3.476	-2.974	6.778	7.401
	R	5828	5.946	2.349	4.484	6.393	7.809	21.504	31.705	-2.379	38.309	38.383
	GR RTK Lib	993	3.012	9.443	10.705	9.912	14.589	10.705	1.944	-22.771	10.880	25.236
	GR Matlab	10774	8.134	13.333	2.127	15.619	15.763	13.745	19.036	-2.664	23.479	23.630

Tab. 7: DGNSS-Lösungen für GPS und Glonass sowie kombinierte Lösungen mit unterschiedlichen Referenzstationen

sich die Anzahl der Lösungen deutlich. Unabhängig von der verwendeten Referenzstation weist die reine GPS-Lösung die kleinsten Standardabweichungen in allen drei Richtungen auf. Auch bei den erzielten Lage- und 3D-Genauigkeiten liegt diese Lösung vorne. Die besten Ergebnisse ergaben sich mit der EPOSA-Station Leopoldau als Basis. Hier werden eine Lageabweichung von 2,72 m und eine Gesamtabweichung von 2,92 m erreicht. Die Lösungen mit den EPOSA-Stationen Baden und Traisen als Basis weisen eine Abweichung von über 3 m auf, wobei die längere Basislinie eine etwas höhere Abweichung besitzt.

Im Vergleich zu den GPS-Lösungen fallen die Glonass-Ergebnisse deutlich ab. Sowohl die Standardabweichungen als auch die Abweichungen von den Referenzkoordinaten sind unabhängig von der verwendeten Basis deutlich höher. Abbildung 10 zeigt als Beispiel die Verteilungen der Einzelepochenlösungen für die Systeme GPS (gelb) und GLONASS (grün) mit der EPOSA Station Leopoldau als Basis. Die beiden Verteilungen weisen nahezu keine Ähnlichkeiten auf. Die GLONASS-Lösungen sind breiter gestreut als die GPS-Lösungen und ein Großteil der Lösungen liegt südlich von diesen.

Die Abweichungen der mit den beiden näheren Stationen VRSA und SP80 berechneten Lösungen sind um einige Meter höher. Die größte Abweichung (knapp 40 m) liegt bei der Basis SP80 vor, obwohl diese Referenzstation lediglich 12 m vom Rover entfernt ist. Die großen Abweichungen von

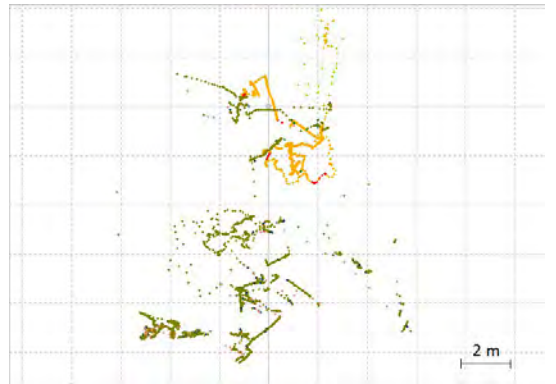


Abb. 10: DGNSS Einzelepochenlösungen für GPS (gelb) und GLONASS (grün) mit der EPOSA Station Leopoldau als Basis

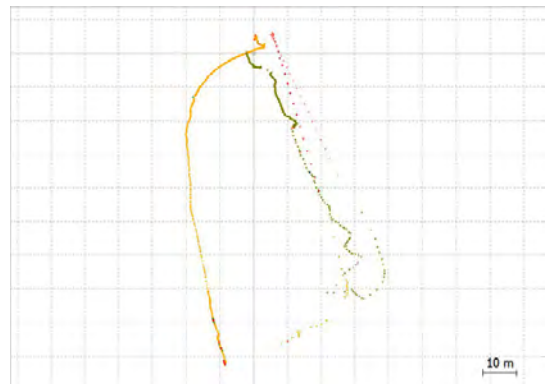


Abb. 11: DGNSS Einzelepochenlösungen mit der VRSA-Station (gelb) und dem SP80 auf Pfeiler 07 (grün) als Basis

den Sollkoordinaten wurden daher weiter untersucht. Als Beispiel sind in Abbildung 11 die Verteilungen der GPS-Lösungen mit der VRSA-Station (gelb) und dem SP80 auf Pfeiler 07 (grün) als Basis zu sehen. Auffällig ist der linienförmige Verlauf der beiden Lösungen, wobei die Abweichungen von den Sollkoordinaten mit der Zeit zunehmen. Die Ergebnisse sind nicht, wie zu erwarten wäre, um einen Wert gestreut.

Die kombinierten Lösungen weisen ebenfalls Abweichungen im Bereich von mehreren Metern auf. Die Abweichungen werden hierbei jedoch maßgeblich von den Glonass-Ergebnissen beeinflusst. Insgesamt können bei den mit Matlab kombinierten Ergebnissen höhere Genauigkeiten als bei den reinen RTKPost-Lösungen erzielt werden. Lediglich die Lage konnte bei der Basisstation SP80 mit der RTKPost-Lösung genauer bestimmt werden. Die schlechtesten Ergebnisse wurden mit der Basisstation Baden und der RTKPost-Lösung erzielt. Die Abweichung der Lage liegt bei 42 m. Wird die Höhenkomponente miteinbezogen steigt die Abweichung auf 46 m.

Aufgrund der großen Abweichungen von den Sollkoordinaten wurde in weiterer Folge ein Netzausgleich durchgeführt. Es wurden ein freier und ein gezwängter Ausgleich berechnet, in welchen die drei EPOSA-Stationen miteinbezogen wurden.

Vor der eigentlichen Ausgleichung wurden zusätzlich zu den drei berechneten Basislinien weitere Basislinien zwischen den einzelnen Referenzstationen berechnet. Hierbei wurden die Basislinien in beiden Richtungen bestimmt, sodass insgesamt 9 Basislinien für den Ausgleich zur Verfügung standen. Die Berechnungen erfolgten wieder mit RTKPost, wobei nun Basislinienvektoren ausgegeben wurden. In den Ausgleich flossen lediglich die gemittelten Werte der einzelnen Basislinien ein. Die Koordinaten der Referenzstationen sind bekannt und wurden für den freien Ausgleich als Datumpunkte und für den gezwängten Ausgleich als Festpunkte gewählt. Die Geometrie des Ausgleichs wird in Abbildung 12 dargestellt, wobei links der freie und rechts der gezwängte Ausgleich zu sehen ist. Die nach dem Ausgleich verbleibenden Abweichungen sind in Tabelle 8 aufgeführt. Die beiden Ergebnisse unterscheiden sich lediglich um einige Zentimeter. Mit dem gezwängten Ausgleich können kleinere Abweichungen erzielt werden. Die Lageabweichung beträgt hier 2,81 m. Die 3D-Abweichung liegt bei 2,99 m. Im Vergleich zu den GPS-Ergebnissen ohne Ausgleich mit der EPOSA-Station Leopoldau als Basis hat sich die Abweichung allerdings um knapp 10 cm vergrößert.

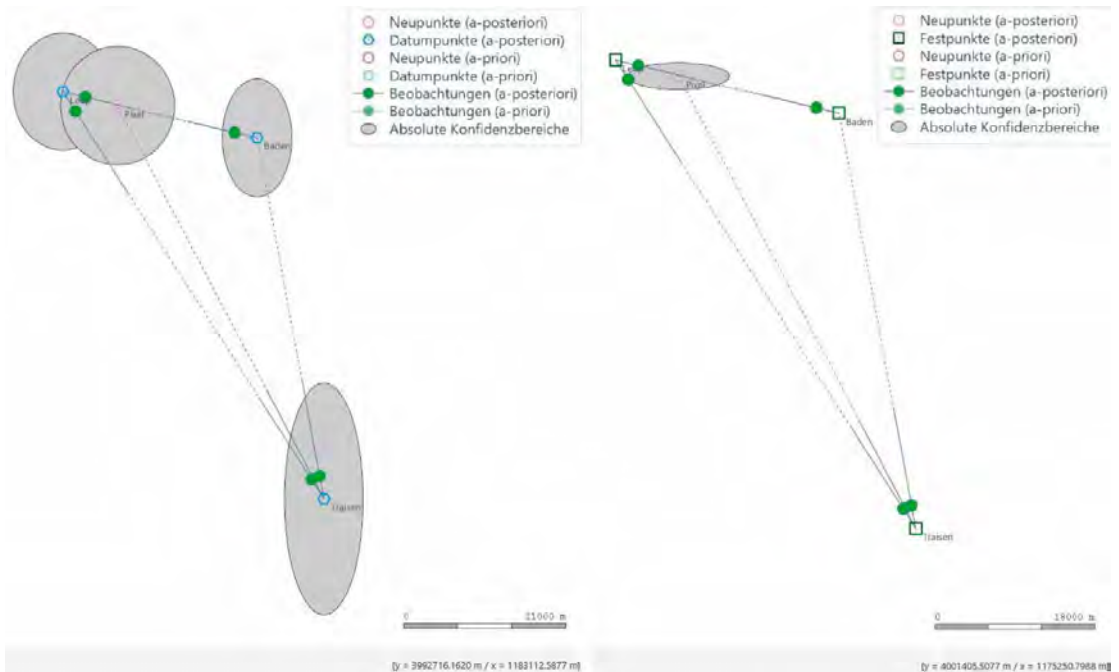


Abb. 12: Ergebnisse der freien (links) und gezwängten (rechts) Ausgleichungen mit Fehlerellipsen

Basislinie Ausgleich	150 Minuten			GPS	
	Abw E	Abw N	Abw U	Abw Lage	Abw Gesamt
Frei	2.528	-1.469	0.976	2.923	3.082
Gezwängt	2.391	-1.483	1.019	2.813	2.992

Tab. 8: Abweichungen nach Ausgleich der Basislinien

4. Kinematische Anwendungen

Um Anwendungsszenarien wie Leitungsdokumentationen oder die grobe Erfassung von Trassen zu simulieren, wurden Messungen entlang einer geradlinigen Strecke durchgeführt. Dies geschah, indem eine vorgegebene Strecke zwischen zwei bekannten Punkten mit einer Länge von 95,86 m in langsamem Tempo abgeschrieben wurde, wobei alle fünf Meter eine Pause von mehreren Sekunden eingelegt wurde (Stop-and-Go). Die Messdaten wurden kontinuierlich aufgezeichnet und die Strecke wurde sowohl im Hin- als auch im Rückweg beobachtet. Auf dem Hinweg wurden Messdaten über eine Dauer von 15 Minuten aufgezeichnet. Für den Rückweg lagen Daten über 8 Minuten vor. Die Pause zwischen den beiden Messungen betrug weniger als eine Minute. In der folgenden Analyse wurde die Höhe nicht miteinbezogen, sondern lediglich die Lage untersucht. Mit RTKPost wurden die GPS-, Glonass-, Galileo- und Beidou-SPP-Lösungen für den Hin- und Rückweg berechnet. Die so entstandenen 8 Positionsdä-

teien wurden mit Matlab transformiert, zusammengefasst und geplottet (Abbildung 11). Es liegen insgesamt 3497 Positionslösungen vor. Nach Elimination von groben Fehlern und Ausreißern wurde

eine ausgleichende Gerade durch die erhaltene Punktwolke gelegt. Diese kann anschließend mit der rechnerisch ermittelten Strecke zwischen den beiden bekannten Punkten verglichen werden. Die Ausgleichsgerade (rot) und die Soll-Gerade (grün) sind in Abbildung 13 dargestellt. Die tatsächliche Strecke kann durch die Ausgleichsgerade gut nachgebildet werden. Allerdings besitzt die Ausgleichsgerade eine etwas kleinere Steigung. Dies führt zu einem zunehmenden Abstand der beiden Geraden. Der maximale Abstand beträgt 0,97 m. Ein Problem stellt der Start- und Endpunkt der ermittelten Strecke dar. Die Ausgleichsgerade ist zu lang und ragt mehr als 10 m über die Sollstrecke hinaus. Eine Detektion des Start- bzw. Endpunktes der Strecke ist über eine reine Betrachtung der Ausgleichsgeraden nicht möglich, da eine starke Streuung der Positionslösungen um diese beiden Punkte vorliegt. Es werden auch weiter entfernte Lösungen, welche in Verlängerung der Strecke liegen in die Berechnung der Parameter miteinbezogen. So kommt es zu einer Verschiebung des Start- und Endpunktes.

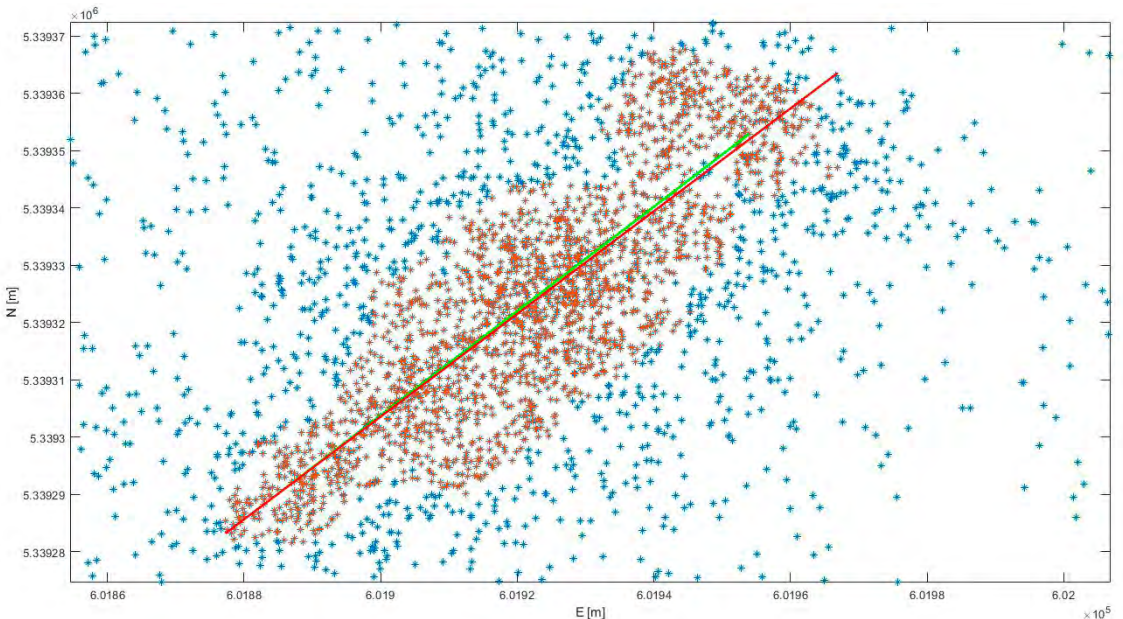


Abb. 13: Ausgleichende Gerade der Punktwolke entlang der zu untersuchenden Strecke. Die aus den bekannten Koordinaten berechnete Strecke ist in grün, die mit Hilfe der Nachbarschaftsanalyse aus den Punkten berechnete Strecke ist in rot dargestellt. In die Berechnung der ausgleichenen Geraden sind die roten Punkte einbezogen worden.

5. Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse

Verglichen mit geodätischen GNSS-Empfängern ist die Qualität der Messdaten beim Google Pixel5 deutlich geringer. Die aufgezeichneten Satellitensignale sind schwächer und es kommt häufig zu Signalabbrüchen, welche auch im Zenit auftreten. Mit dem Pixel5 können lediglich GPS- und Galileo-Satelliten auf zwei Frequenzbändern beobachtet werden. Viele (ältere) geodätische Empfänger zeichnen die Daten der Frequenzbänder L1 und L2 auf. Das Pixel5 empfängt hingegen die Frequenzbänder L1 und L5. Diese Inkompatibilität erschwert die Basislinienauswertung. Eine weitere derzeitige Einschränkung bei den Messungen ist, dass lediglich die Hälfte der GPS-Satelliten auch das L5-Frequenzband unterstützen (16 Satelliten Stand Jänner 2021). Auffällig ist hier, dass gerade die Satelliten mit starken L1 Signalen nicht auf der zweiten Frequenz L5 beobachtet werden können. Die Galileo Satelliten können größtenteils auf beiden Frequenzen mit dem Pixel5 beobachtet werden. Die Signale der Bänder L5 und E5a sind insgesamt schwächer als die Signale der Bänder L1 und E1. Die hohe Anzahl an Signalabbrüchen und die oft niedrige Signalstärke erschweren die weitere Auswertung. PPP-Lösungen lassen sich lediglich für GPS und Glonass berechnen. Aber auch dies ist oft nicht für den gesamten Beobachtungszeitraum möglich. An diesen Stellen wechselt RTKPost automatisch in den SPP-Modus. Die Tatsache, dass in dem Pixel5 ein Zweifrequenz-Empfänger verbaut ist, kann in der Auswertung somit nur bedingt genutzt werden.

Die erzielbare Genauigkeit hängt unter anderem von der verwendeten Methode zur Positionsbestimmung und der Länge der Beobachtungszeit ab. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass die SPP-Lösungen deutlich höhere Standardabweichungen besitzen als die PPP- und DGNSS-Lösungen. Bei den SPP-Lösungen liegen diese meist in der Größenordnung von wenigen Metern. Bei den PPP- und DGNSS-Lösungen liegen sie oft unterhalb von einem Meter. Bei den DGNSS-Lösungen trifft dies

allerdings nur auf die GPS-Lösungen zu. Die Standardabweichungen der Glonass-Lösungen sind deutlich höher. Betrachtet man die Abweichungen zu den Sollkoordinaten der Referenzpunkte, können die Ergebnisse nicht so leicht verallgemeinert werden. Tabelle 9 fasst die GPS-Ergebnisse der verschiedenen Positionierungsmethoden für die Langzeitmessung zusammen. Die Genauigkeitsunterschiede der einzelnen Methoden sind gut zu erkennen. Die geringsten Genauigkeiten werden mit SPP und DGNSS erzielt. Die DGNSS-Lösungen können auch durch den Ausgleich mehrerer Basislinien zu drei Basisstationen nicht verbessert werden. Die PPP-Lösungen sind deutlich genauer. Der Einfluss der unterschiedlichen Bahndaten und Korrekturparameter wird deutlich.

Diese klare Abstufung der Ergebnisse ist allerdings nur für GPS bei der Langzeitmessung zu erkennen. Sowohl Galileo als auch Beidou liefern bei der Langzeitmessung SPP-Ergebnisse mit einer höheren Genauigkeit. Diese können allerdings nicht mit den anderen Lösungsmethoden verglichen werden, da weder für Galileo noch für Beidou PPP- bzw. DGNSS-Lösungen vorliegen. Werden die verschiedenen Satellitensysteme kombiniert, können mit SPP Ergebnisse mit einer Abweichung von weniger als einem halben Meter erzielt werden. Die Kombinationslösung aus allen vier Systemen ist hierbei nicht die beste, da sie stark von den sehr ungenauen Glonass-Ergebnissen beeinflusst wird. Bei den unterschiedlichen Kombinationen können jedoch Lageabweichungen von weniger als 30 cm erzielt werden.

Wie beschrieben wurde die Langzeitmessung für GPS in Messintervalle zu je 10 Minuten eingeteilt. Für jedes dieser Intervalle wurden mit den Methoden SPP und PPP Positionslösungen berechnet, wobei für die PPP-Berechnung sowohl Broadcast Ephemeriden als auch Final Orbits verwendet wurden. Die Standardabweichungen für diese Lösungen bleiben in den Intervallen weitestgehend konstant. Die Genauigkeiten variieren jedoch unabhängig von der verwendeten Methode stark. Die Messergebnisse weisen daher für den kurzen Beobachtungszeitraum von 10

150 Min		10:02 - 12:32			GPS		16.12.2020				
	n	Std E	Std N	Std U	Std Lage	Std Gesamt	Abw E	Abw N	Abw U	Abw Lage	Abw Gesamt
SPP Broadcast Ephemeris	4045	4.532	5.842	12.407	7.394	14.443	1.988	0.882	-1.853	2.175	2.858
PPP Broadcast Ephemeris	4045	0.282	0.439	0.845	0.522	0.993	1.719	-0.182	-1.171	1.728	2.087
PPP Final Orbit	3630	0.369	0.223	0.953	0.431	1.045	0.903	0.287	1.443	0.948	1.726
PPP Final Orbit / Clock Correction	3613	0.372	0.222	0.936	0.433	1.031	0.876	0.275	1.425	0.918	1.695
Basislinie Broadcast Ephemeris	4946	0.752	0.753	0.492	1.065	1.173	2.260	-1.516	1.059	2.722	2.920

Tab. 9: Zusammenfassung der unterschiedlichen Positionierungsmethoden für GPS bei der Langzeitmessung

Minuten eine schlechte Wiederholbarkeit auf. Es bestätigt sich hier auch, dass bei der Methode PPP lange Beobachtungszeiten notwendig sind. Mehr Messungen über längere Zeiträume werden daher in weiterer Folge durchgeführt.

6. Fazit und Ausblick

Es wurde untersucht, inwieweit mit modernen Smartphones einfache vermessungstechnische Aufgaben gelöst werden können. Hierbei erhoffte man sich von der Tatsache, dass Smartphones der neuesten Generation GNSS-Signale auf zwei Frequenzbändern aufzeichnen können, eine Genauigkeitssteigerung im Vergleich zu älteren Modellen. Atmosphärische Einflüsse, welche die Signalausbreitung beeinflussen, können mit Hilfe eines zweiten Frequenzbandes besser modelliert werden. Dies konnte in einzelnen Messungen bestätigt werden. Bei diesen Messungen wurde allerdings nur ein Satellitensystem, nämlich GPS, betrachtet. Beobachtungen auf zwei Frequenzbändern lassen sich mit dem Pixel5 lediglich für GPS und Galileo vornehmen. Hierbei wiesen die Daten des zweiten Frequenzbandes in der Messkampagne eine geringere Qualität auf, sodass eine Auswertung beider Frequenzbänder nur eingeschränkt möglich war. Dies hängt im Wesentlichen von der vorherrschenden Satellitenkonstellation ab. Daher wäre es notwendig, weitere Zeiträume mit unterschiedlichen Konstellationen zu untersuchen. Aufgrund der hohen Anzahl an Signalabbrüchen während der Beobachtungen war eine Positionsbestimmung auf Basis der Phasenbeobachtungen nicht für alle Satellitensysteme möglich. Tatsächlich konnten lediglich für GPS und Glonass die Phasenbeobachtungen in die Berechnung miteinbezogen werden. Eine Positionsbestimmung mit Hilfe von zwei Frequenzen und auf Basis der Phasenbeobachtungen konnte folglich nur für GPS vorgenommen werden. Diese Lösung ist der GPS-Lösung auf Basis der Codebeobachtungen überlegen, solange eine lange Beobachtungszeit gewählt wird. Werden zusätzlich IGS Final Orbits verwendet, kann die Genauigkeit weiter gesteigert werden. Die Uhrenkorrekturparameter beeinflussen die Lösung nur gering.

Bedauerlich ist, dass sich Multi-GNSS-Lösungen nur auf Basis der Codebeobachtungen berechnen ließen. Diese liefern zuverlässigere und genauere Lösungen als die eben beschriebenen Ergebnisse auf Basis der Phasenbeobachtungen. Dies liegt daran, dass durch die Nutzung mehrerer

Satellitensysteme deutlich mehr Beobachtungen zur Verfügung stehen. Bei diesen Lösungen hängt die erzielbare Genauigkeit maßgeblich von der Länge der Beobachtungszeit ab. Mit diesem Lösungsansatz konnten auch für die Stop-and-Go Messung entlang einer vorgegebenen geradlinigen Strecke die besten Ergebnisse erzielt werden.

Ob sich das Google Pixel 5 oder ein vergleichbares Smartphone zur Lösung vermessungstechnischer Fragestellungen zurzeit eignet, hängt im Wesentlichen von den Anforderungen ab. Bei langen Beobachtungszeiten (150 Minuten) und mit bestimmten Systemkombinationen (Galileo/Beidou) können im Post Processing (SPP) Genauigkeiten unter einem halben Meter erzielt werden. Dies dürfte für die Datenaufnahme für ein Geoinformationssystem ausreichen. Wird die Beobachtungszeit allerdings verkürzt, betragen die Abweichungen oft mehrere Meter.

Die teilweise in der Literatur angegeben cm-Genauigkeiten für die PPP Lösungen mit vergleichbaren Smartphone-Modellen können hier nicht bestätigt werden. Diese stützen sich meistens auf umfangreiche Kalibrierungen für die Smartphone GNSS-Antennen zur Bestimmung der Phasenzentrumsvariationen, siehe z.B. in Darugna (2021) und Wanninger und Heßelbarth (2020), und sind daher nicht immer praxistauglich.

Für die Zukunft erfolgt eine Untersuchung folgender Fragestellungen:

- Die Langzeitmessung wurde in Intervalle zu je 10 Minuten eingeteilt. Hierbei wurden lediglich die Genauigkeiten für GPS untersucht. Wie verhalten sich die anderen Satellitensysteme und die SPP-Multi-GNSS-Lösungen im Verlauf der Messung?
- Welches Signalverhalten zeigt sich für die L5-Beobachtungen bei unterschiedlichen Satellitenkonstellationen?
- Welche Genauigkeiten können erzielt werden, wenn die Beobachtungszeit der Langzeitmessung verdoppelt wird?
- Wie sieht das Konvergenzverhalten der PPP-Lösungen in Abhängigkeit von der Beobachtungszeit aus?
- Welche Genauigkeiten werden bei der Echtzeitpositionierung mit dem EPOSA-RTK-Service erzielt? Wie genau kann die Position in Echtzeit bestimmt werden?

- Treten bei vergleichbaren Smartphones ähnliche Probleme auf? Sind die zu erreichenden Genauigkeiten vergleichbar?
- Hat die verwendete App zur Datenaufnahme einen Einfluss auf die Messergebnisse?

Qualcomm (2019): Snapdragon 765G 5G Mobile Platform <https://www.qualcomm.com/products/snapdragon-765g-5g-mobile-platform>, (aufgerufen: Juni 2021).

Wanninger L., Hebelbarth A. (2020): GNSS Code and Carrier Phase Observations of a Huawei P30 Smartphone: Quality Assessment and Centimeter-Accurate Positioning. GPS Solutions (2020) 24:64, 10 S., <https://doi.org/10.1007/s10291-020-00978-z>.

Referenzen

Barbeau S. (2018): Dual-frequency GNSS on Android devices. <https://barbeau.medium.com/dual-frequency-gnss-on-android-devices-152b8826e1c>, (aufgerufen: Juni 2021).

Darugna F. (2021): Improving Smartphone-Based GNSS Positioning Using State Space Augmentation Techniques. Veröffentlichungen der DGK, Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Reihe C, Dissertationen, Heft Nr. 864, 189 S.

Höggerl N., Titz H., Zahn E. (2007): APOS – Austrian Positioning Service. Vermessung & Geoinformation, 1/2007, S. 10-23.

Anschrift der Autoren

Till Weigert BSc, Department für Geodäsie und Geoinformation, Forschungsbereich Ingenieurgeodäsie, Technische Universität Wien, Wiedner Hauptstraße 8-10, E120-05, 1040 Wien.

E-Mail: tillweigert@googlemail.com

A.o. Univ.-Prof. Dr. Günther Retscher, Department für Geodäsie und Geoinformation, Forschungsbereich Ingenieurgeodäsie, Technische Universität Wien, Wiedner Hauptstraße 8-10, E120-05, 1040 Wien.

E-Mail: guenther.retscher@tuwien.ac.at

vgi

25 JAHRE

SURVEYORS - EXPRESS™ GmbH
 WWW.VERMESSEN.DE WWW.GPSGEO.COM
 Lupinoweg 10B | 61118 Bad Vilbel
 Vermessungsinstrumente | Land-Surveying-Instruments



TOTAL STATIONS - THEODOLITE - LASERDISTANCEMETER - CONSTRUCTION-LASERS - LEVELS - SURVEYING EQUIPMENTS
 ...new and secondhand Total Stations on stock.



- when it has to be right

Leica
Geosystems

Brandmarks: Sprinter™ - Baumeister™ - Swiss-Style-Level™ - Swiss-Style-Theo™

THE GERMAN LEICA GEOSYSTEMS
PRE-OWNED SURVEY EQUIPMENT SUPPLIER

