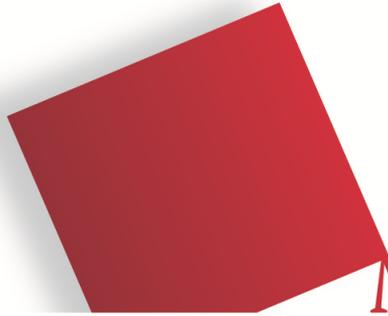


Fakultät für
Geoinformation



HOCHSCHULE
FÜR ANGEWANDTE
WISSENSCHAFTEN
MÜNCHEN

Bachelorarbeit

Untersuchung der Höhengenaugigkeit in SAPOS- Postprocessing-Verfahren in Abhängigkeit von der Messdauer

Angefertigt von
Andreas Wagner

Studiengang: Angewandte Geodäsie und Geoinformatik
Betreuer: Prof. Dr. Jens Czaja

Die Arbeit wurde angefertigt in Kooperation mit:
Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung; Referat 83

**LANDESAMT FÜR
DIGITALISIERUNG,
BREITBAND UND
VERMESSUNG**



Semester: Wintersemester 2019/ 2020
Abgabetermin: 05.06.2020

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	4
2 Grundlagen und Theorie.....	5
2.1 GNSS-Systeme und deren Signale.....	5
2.2 Fehlereinflüsse bei GNSS-Messungen.....	6
2.2.1 Troposphäre	6
2.2.2 Ionosphäre.....	9
2.2.3 Mehrwegeeffekte.....	9
2.2.4 Antenne.....	10
2.2.5 Satellitengeometrie.....	10
2.2.6 Messrauschen.....	11
2.3 Relative Positionierung.....	11
2.3.1 RTK.....	11
2.3.2 Postprocessing.....	11
2.3.3 SAPOS.....	12
2.4 Postprocessing Auswertung.....	14
2.4.1 Theoretisch erreichbare Genauigkeiten.....	14
2.4.1.1 Höhenbestimmung mit GNSS- Verfahren im Vergleich zum Nivellement. .14	
2.4.2 Empfohlene Beobachtungsdauer.....	15
3 Praktische Untersuchungen.....	16
3.1 Verwendete Daten.....	16
3.2 Verwendete Software.....	18
3.3 Vorgehen bei der Auswertung.....	19
3.4 Berechnung der Koordinaten der Monitorstation Freising.....	20
3.4.1 Basislinie Pfaffenhofen - Freising am 10.06.2019.....	20
3.4.2 Basislinie München – Freising	22
3.4.2.1 Auswertung am 09.06.2019.....	22
3.4.2.2 Auswertung am 10.06.2019.....	29
3.5 Test bei großem Höhenunterschied zur Referenzstation.....	32
3.5.1 Basislinie Weilheim – Garmisch.....	32
3.6 Analyse der Troposphärenschätzung	35
3.6.1 Basislinie Weilheim - Garmisch am 10.06.2019 ab 15 Uhr.....	36

3.6.2 Basislinie München – Freising 10.06.2019 ab 15 Uhr.....	39
3.7 Diskussion und Zusammenfassung der Ergebnisse.....	42
4 Fazit.....	44
5 Literaturverzeichnis.....	45
6 Tabellenverzeichnis.....	47
7 Abbildungsverzeichnis.....	48
8 Abkürzungsverzeichnis.....	49
9 Anhang.....	50
9.1 Standardabweichungen.....	50
9.2 Inhaltsübersicht des Datenträgers.....	53

1 Einleitung

Die Position mit einem GNSS-Empfänger bestimmen. Das ist für einen Geodäten in der Praxis kein Problem. Man stellt die Empfangsantenne an die zu bestimmende Position, drückt auf dem Controller auf Messen und schon kann die Position bestimmt werden. Nach nur wenigen Sekunden kann bei gutem Satellitenempfang mit relativer Positionsbestimmung eine ordentliche Genauigkeit im Zentimeterbereich erreicht werden. Was sich im Hintergrund auf technischer Ebene abspielt bleibt oft hinter einer bedienerfreundlichen Benutzeroberfläche verborgen. Die Genauigkeit bei solchen RTK Messungen ist in der Praxis für die meisten Anwendungen ausreichend. Doch was, wenn der Anspruch besteht, eine Genauigkeit im Bereich von nur wenigen Millimetern zu erreichen? Es ist bekannt, dass bei der Messung mithilfe von GNSS die horizontale Lage genauer bestimmt werden kann als die Höhe. Kann die Höhe mit dieser Technik überhaupt Millimetergenau bestimmt werden?

Diese Abschlussarbeit soll sich mit der Frage beschäftigen, inwiefern sich die Höhengenaugigkeit bei GNSS-Messungen mit längerer Beobachtungsdauer verbessern lässt und ob dadurch Fehlereinflüsse durch das Wettergeschehen minimiert werden können. Konkret soll dies bei der Verwendung von Messungen mit SAPOS Bayern und Auswertung im Postprocessing untersucht werden. Systembedingt kann mit GNSS erwartungsgemäß die Höhe mit geringerer Genauigkeit bestimmt werden als die Lage. Die oft verwendeten RTK Rover verwenden Standardmodelle für die Troposphäre um Wettereinflüsse auf die Messung zu erfassen. Diese Thematik wird in dieser Arbeit erklärt und die Abhängigkeit der GNSS-Messung vom Wetter bei geringem und auch großem Höhenunterschied zwischen Referenzstation und Rover untersucht. Mit einer nachträglichen Auswertung (= Postprocessing) soll durch den größeren Beobachtungsumfang eine höhere Genauigkeit bei GNSS-Messungen erreicht werden. Der tatsächliche Troposphäre-Einfluss kann nach ausreichender Beobachtungsdauer berechnet werden. Welche Beobachtungszeiten für eine sinnvolle Berechnung nötig sind, soll außerdem Teil dieser Arbeit sein.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird im ersten Teil zuerst grundlegende Theorie betreffend GNSS dargestellt. Im zweiten Teil wird dann, anhand von praktischen Auswertungen die erreichbare Genauigkeit in Abhängigkeit von der Messdauer bei der Messung mit SAPOS, vor allem der Höhengenaugigkeit unter nachträglicher Auswertung (Postprocessing) untersucht. Dazu werden Stationskoordinaten durch Basislinienberechnung ermittelt. Abschließend zum praktischen Teil wird die Verwendung von geschätztem, relativem Troposphäreneinfluss bei einer Postprocessing- Auswertung diskutiert.

Diese Abschlussarbeit soll Erkenntnis liefern, welche Beobachtungszeiten angebracht sind, wenn bestimmte Genauigkeiten erreicht werden sollen. Das LDBV möchte aufgrund dieser Erkenntnisse ihren Kunden Beobachtungszeiten empfehlen.

2 Grundlagen und Theorie

Im Folgendem werden zuerst GNSS-Systeme kurz aufgezählt und grundlegende Fehlereinflüsse auf eine GNSS-Messung aufgeführt und erklärt. Im Anschluss daran werden ausgewählte Positionierungs- und Auswertetechniken erläutert und die Eigenschaften einer Postprocessing-Auswertung dargestellt.

2.1 GNSS-Systeme und deren Signale

Bei der Verwendung von GNSS zur Positionsbestimmung ist bei der Auswahl von Satelliten zwischen verschiedenen Satellitensystemen zu unterscheiden. Das US-amerikanische GPS ist wohl das am weitesten verbreitete und bekannteste System. Jeder dieser GPS-Satelliten sendet permanent Signale auf den zwei Frequenzen L1 (1575,42 MHz) und L2 (1227,60 MHz) aus. Diese Signale basieren auf der Grundfrequenz der GPS-Satelliten (10,23 MHz) multipliziert mit dem Faktor 154 für L1 und 120 für L2.¹ Zusätzlich senden die modernisierten GPS-Satelliten ein L5 Signal (1176,45 MHz) aus².

Ähnlich dazu ist das russische GNSS mit dem Namen GLONASS. Diese Satelliten senden ebenfalls Signale auf zwei Frequenzen aus. Diese Frequenzen werden mit G1 (~1602 MHz) und G2 (~1246 MHz) bezeichnet. Anders als bei GPS und anderen GNSS-Systemen werden die einzelnen Satelliten darin unterschieden, dass jeder Satellit eine etwas andere Frequenz anstatt unterschiedliche Codes aussendet. Die neueste Generation der GLONASS Satelliten sendet zudem eine dritte Frequenz G3 (~1202,025 MHz). Die Frequenzangaben beziehen sich auf die Zentralfrequenz und jeder einzel- Satellit weicht etwas von dieser Frequenz ab.³ Die Frequenzen G1 und G2 sind ähnlich zu L1 und L2, weshalb oft nur von L1 und L2 gesprochen wird auch wenn G1 und G2 gemeint sind.

Auch die europäische Union hat ein eigenes Satellitensystem mit dem Namen Galileo. Von diesen Satelliten werden die drei Trägerfrequenzen E1 (1575,420 MHz), E5 (1191,795 MHz) und E6 (1278,750 MHz) ausgesendet.⁴

Durch die gleichzeitige Nutzung von Satelliten aus verschiedenen GNSS-Systemen ergeben sich für den Nutzer einige Vorteile. Bei der kombinierten Nutzung von GPS und GLONASS steht etwa die doppelte Anzahl an Satelliten zur Verfügung, wodurch von einem Beobachtungsort mehrere Satelliten gleichzeitig sichtbar sind. Daraus resultiert eine größere Verfügbarkeit bei der Verwendung von GNSS. Mit zunehmender Satellitenanzahl werden auch günstigere geometrische Konstellationen bei der Positionsbestimmung erreicht. Der DOP-Wert, welcher später im Text noch erläutert wird, ist also kleiner.⁵

Die Verschiedenen, von den GNSS-Systemen ausgesendeten Trägerfrequenzen können bei einer Auswertung miteinander kombiniert werden. Diese Kombinationen werden auch im praktischen Teil dieser Arbeit verwendet. Neben den L1 bzw. G1 und L2 bzw. G2 Lösungen

1 Vgl. Bauer, S. 311 ff.

2 Vgl. Bauer, S. 327

3 Vgl. Bauer, S. 345-351

4 Vgl. Bauer, S. 376

5 Vgl. Mansfeld S. 234 ff.

wird dort auch die ionosphärenfreie Linearkombination L0 verwendet, welche einen Großteil des Einflusses der Ionosphäre auf die Positionsbestimmung durch Differenzbildung entfernt. Zusätzlich werden die „Widelane“ und „Narrowlane“ Kombinationen berechnet. Widelane hat zum Ziel, ein Signal mit breiter Wellenlänge zu erzeugen, um Phasensprünge und Mehrdeutigkeiten zu lösen. Narrowlane erzeugt ein Signal mit schmaler Wellenlänge, welches geringes Messrauschen aufweist.⁶

2.2 Fehlereinflüsse bei GNSS-Messungen

Bei Messungen, die mit GNSS durchgeführt werden, ist auf einige Effekte zu achten.

Die Messwerte, welche in dieser Arbeit verwendet werden, wurden von fest montierten und eingemessenen Antennen aus erfasst. Fehler in der Stationierung der Empfänger können so größtenteils ausgeschlossen werden.

Bei der Verwendung von Korrekturdaten des SAPOS-Dienstes wird der GNSS-Empfänger relativ zum Referenzstationsnetz positioniert. Unabhängig von der relativen Positionierung treten bei jeder GNSS-Messung Fehler auf, welche nach Möglichkeit verringert werden sollten. Stationsabhängige Fehler sind zum Beispiel der Einfluss durch das Schwanken des Phasenzentrums der Antenne und die Mehrwegeausbreitung des Satellitensignals. Allgemeines Messrauschen zählt ebenfalls dazu. Zusätzlich gibt es entfernungsabhängig wirkende Fehlereinflüsse wie den ionosphärischen- und den troposphärischen Laufzeitfehler. Auch der Orbit der Satelliten verursacht Fehler.⁷

Im Folgenden werden einzelne Einflüsse erläutert.

2.2.1 Troposphäre

Die Troposphäre ist wie in Abbildung 1 zu sehen, die dem Boden nächste Schicht in der Erdatmosphäre. Sie erstreckt sich von der Erdoberfläche bis zu einer Höhe von 15 Kilometer. In dieser Schicht spielt sich das Wettergeschehen ab. Bei den von GNSS benutzten Satellitenfrequenzen von 300 MHz bis zu etwa 15 GHz ist die Troposphäre nicht dispersiv. Das bedeutet, dass die Laufzeitverzögerung durch die Signalbrechung bei dieser Schicht unabhängig von der gewählten Frequenz ist. Konkret gilt, je länger der Ausbreitungsweg des Signals durch die Troposphäre verläuft, desto größer ist die zu erwartende Signalverzögerung.⁸

6 Vgl. ESA

7 Vgl. Bauer, S. 407

8 Vgl. Mansfeld, S. 59

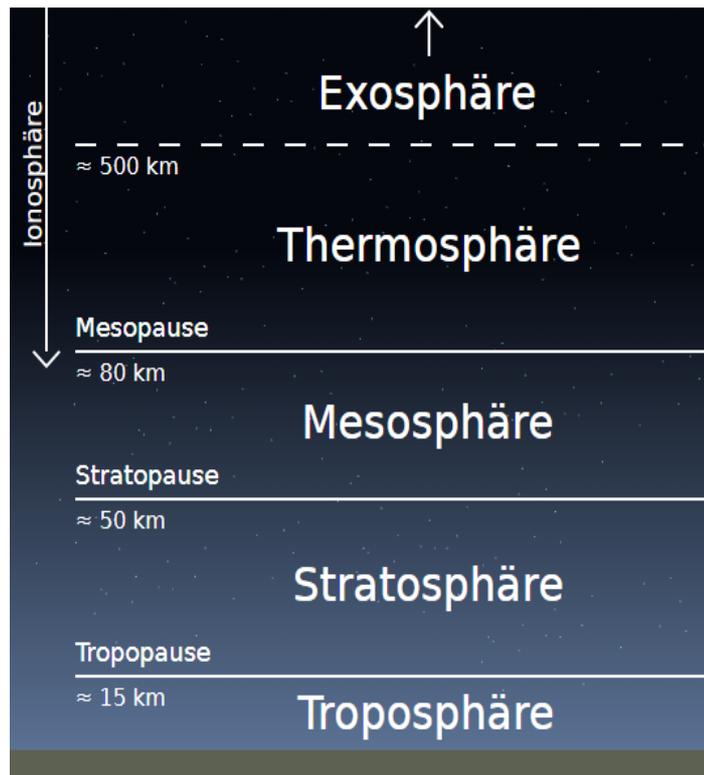


Abbildung 1: Aufbau der Erdatmosphäre⁹

Die Troposphäre ist angefüllt mit Gasmolekülen, deren Konzentration mit zunehmender Höhe stetig abnimmt. Aufgrund dessen ist der Refraktionsindex stark von der Höhe abhängig. Es wird dabei zwischen trockenem und feuchtem Anteil unterschieden. Die Zusammensetzung des trockenen Anteils ist in allen Höhenbereichen und geographischen Regionen relativ homogen. Der Wasserdampfgehalt, also der feuchte Anteil, jedoch variiert räumlich und zeitlich stark. Bei kurzzeitigen, starken Wetterereignissen wie beispielsweise bei einem Gewitter ist dies der Fall. In den noch folgenden Basislinienauswertungen wird diese Thematik noch untersucht werden. Die Schwierigkeit ist es also, diesen feuchten Anteil zu erfassen und dessen Einfluss auf GNSS- Messungen zu modellieren. Vorteilhaft ist hier, dass dieser schwer zu modellierende Teil, der sich auf die unteren 11 Kilometer beschränkt, nur etwa 10% der gesamten Signalverzögerung in der Troposphäre ausmacht und der trockene Anteil, welcher für die größte Verzögerung verantwortlich ist, einfach modellierbar ist. Der Refraktionsindex lässt sich beispielhaft mit den Koeffizienten von Smith und Weintraub wie folgt berechnen:

$$(n - 1) \cdot 10^6 = 77,6 \cdot \frac{P}{T} + 3,73 \cdot 10^5 \cdot \frac{e}{T^2}$$

Wobei T hier für die Temperatur in Kelvin, e für den Wasserdampfdruck in mbar und P für den Luftdruck in mbar steht. Anzumerken ist hier, dass der ermittelte Wert nur für eine bestimmte Position gilt, an der die Parameter gemessen wurden. Für GNSS- Messungen jedoch werden die Parameter für den gesamten Signalweg benötigt. Weil die Bestimmung

⁹ <https://de.wikipedia.org/wiki/Erdatmosph%C3%A4re>

aller Einflussgrößen kaum möglich ist, werden für das Korrigieren der Messungen Standardatmosphärenparameter und Standardatmosphärenmodelle verwendet.¹⁰

Die Normatmosphäre nach DIN ISO 2533 legt für Temperatur und Luftdruck auf Meereshöhe folgende Werte fest: $T_0 = 288,15$ Kelvin also 15 °C und $P_0 = 1013,25$ mbar. Diese Werte müssen dann für die verwendete Stationshöhe (h) angepasst werden mit $T = T_0 - 6,5 \cdot 10^{-3} \cdot h$ und $P = P_0 \cdot (T/T_0)^{5,256}$. Die relative Luftfeuchte wird auf $H = 50\%$ festgelegt. Der Wasserdampfdruck e kann nach McCarthy (1996) berechnet werden mit:

$$e = H \cdot 0,0611 \cdot 10^{\frac{7,5 \cdot (T-273,15)}{237,3 + (T-273,15)}}$$

Durch diese Werte wird die sogenannte Standardatmosphäre definiert. Oft werden diese Standardatmosphärenparameter zusammen mit den Modellen von Hopfield (1971) beziehungsweise Saastamoinen (1973) verwendet.¹¹

Neben dem trockenem und feuchtem Anteil hängt die troposphärische Verzögerung außerdem mit dem Zenitwinkel zum Satelliten zusammen, da bei geringer Elevation das Signal einen weiteren Weg durch die Atmosphäre zurücklegen muss. Mithilfe sogenannter Mapping Funktionen kann man den Übergang vom Zenit auf beliebige Elevationswinkel modellieren.¹²

Um den Einfluss der Troposphäre, beziehungsweise der Verzögerung, zu berechnen, ist es möglich, wie zuvor beschrieben, die Refraktion ohne GNSS- Beobachtungen zu modellieren, indem meteorologische Standardparameter und ein Standardatmosphärenmodell verwendet werden. Die noch bleibenden Restfehler können erfasst werden, wenn bei der Auswertung zusätzlich Parameter für die troposphärische Zenitkorrektur geschätzt werden.¹³

Diese Methode eignet sich nur dann, wenn eine GNSS-Session über längere Zeit (> eine Stunde) durchgeführt wurde. Es wird eine Korrektur pro vorher festgelegtem Zeitintervall durch Ausgleichung oder über Kalmanfilterung bestimmt. Bestimmte Softwareprodukte (z.B. WaSoft) zur Postprocessing Auswertung von GNSS-Messungen bieten die Möglichkeit Troposphärenparameter nach einer bestimmter Messdauer zu schätzen.¹⁴ Ob eine solche Schätzung auch mit geringerer Messdauer als einer Stunde durchgeführt werden kann, und ob dies immer sinnvoll ist, soll in den praktischen Untersuchungen dieser Bachelorarbeit festgestellt werden.

10 Vgl. Bauer, S.130

11 Vgl. Bauer S. 131

12 Vgl. Bauer, S. 130 f.

13 Vgl. Bauer, S. 130 ff.

14 Vgl. Czaja, S. 43

2.2.2 Ionosphäre

Die Ionosphäre ist, wie in Abbildung 1 zu sehen, die hohe Erdatmosphäre. In dieser Schicht befinden sich Elektronen und Ionen in solcher Anzahl, dass die Ausbreitung des Satellitensignals dadurch negativ beeinflusst wird. Der Zustand der Ionosphäre wird durch die Elektronendichte beschrieben. Diese Dichte variiert je nach Sonneneinstrahlung im Laufe des Tages. Somit verändert sich auch der Einfluss auf die Signalausbreitung vom Satelliten im Tagesverlauf. Beim Messen mit GNSS ist zu bedenken, dass der Fehlereinfluss durch die Ionosphäre frequenzabhängig ist.¹⁵

Der Fehler durch die Ionosphäre ist größer als der der Troposphäre, da der Signalweg länger ist und das Satellitensignal somit länger den Einflüssen dieser Schicht ausgesetzt ist. Bei der Messung mit GPS kann der entstandene Laufzeitfehler nur korrigiert werden, wenn die Frequenzen L1 und L2, also zwei Frequenzen, vom Empfänger empfangen und verarbeitet werden können.¹⁶

Der Fehlereinfluss durch die Ionosphäre ist von einem Sonnenaktivitätszyklus von etwa 11 Jahren abhängig. Erreicht der Zyklus sein Maximum, treten die höchsten Signallaufzeitfehler aufgrund des hohen Elektronengehalts in der Ionosphäre, auf. Gleichzeitig nimmt die Inhomogenität der Elektronenverteilung zu, was großen Einfluss auf die relative Positionierung mit GNSS hat. Die relativen Fehler durch die Ionosphäre können am besten in einem regionalen Referenzstationsnetz, wie beim SAPOS Stationsnetz, erfasst werden. Durch die Messung in einem solchen Netz ist die Länge der Basislinien nicht zu lang. Die beste Möglichkeit, die ionosphärischen Einflüsse zu verringern, ist die relative Positionierung über geringe Entfernungen. Aus einem kleinräumigen Referenzstationsnetz wie SAPOS können Flächenkorrekturparameter errechnet werden, welche die starke räumliche und zeitliche Variabilität des Elektronengehalts in der Ionosphäre berücksichtigen. Ohne die so erhaltenen Korrekturdaten ist eine relative Positionierung nur bis zu einer Basislinienlänge von wenigen Kilometern sinnvoll, wenn starke Störungen durch die Ionosphäre vorliegen.¹⁷

2.2.3 Mehrwegeeffekte

Wird ein Signal vom Satelliten ausgesandt, so gelangt es nicht nur auf direktem Weg zum Empfänger. Das Phasenzentrum der Empfangsantenne erfasst ebenso Reflexionen des ausgesendeten Signals, welche durch reflektierende nahe Oberflächen und Objekte entstehen. Es kommt zur Überlagerung des reflektierten Signals und dem Signal, welches auf direktem Weg empfangen wurde. Diese Abweichung ist in der Praxis selten größer als zwei bis drei Zentimeter. Weil sich die verwendeten Satelliten bei der Messung ständig bewegen, verändert sich auch der Mehrwegeeffekt mit der Zeit. Der Effekt kann durch längere Beobachtungszeiten verringert werden, weil sich die Einflüsse durch Mittelbildung verringern.¹⁸ Aus der Praxis kann ich sagen, dass es bei Messungen im Gelände meist von Vorteil ist, bereits vor dem Messen nach möglichen Fehlerquellen, wie reflektierenden

15 Vgl. Seeber, S. 46 - 49

16 Vgl. Mansfeld, S. 172 - 174

17 Vgl. Wanninger (2002), S. 1-5

18 Vgl. Bauer, S. 132 ff.

Oberflächen oder Sichthindernissen zum Horizont, Ausschau zu halten. Die Antenne ist dann so zu platzieren, dass möglichst freie Sichten zum Horizont gegeben sind.

2.2.4 Antenne

Bei GNSS- Antennen werden die Signale nicht im mechanischen Zentrum, sondern im elektrischen Phasenzentrum empfangen. Die Differenz zwischen diesen verschiedenen Nullpunkten kann einige Zentimeter betragen. Zusätzlich ist diese Differenz abhängig von der empfangenen Frequenz und der Richtung, aus der das Signal eintrifft. Um die Abhängigkeit von diesen Faktoren zu beschreiben und zu korrigieren müssen die Empfangsantennen kalibriert werden.¹⁹

Um den Einfluss des Antennenphasenzentrums auf die GNSS-Messung zu Minimieren benötigt man diese Korrekturwerte für die Antenne. Mit dem Ziel eine möglichst gute Höhengenaugigkeit zu erreichen, sollten Antennen verwendet werden, welche mit identischen Verfahren absolut kalibriert wurden, wenn in einem Referenzstationsnetz wie SAPOS gemessen wird.²⁰

Die im praktischen Teil dieser Arbeit verwendeten Antennen wurden alle auf die selbe Weise kalibriert.

2.2.5 Satellitengeometrie

Die geometrische Konstellation, in welcher die Satelliten sich befinden, übt einen Einfluss auf die mit GNSS erreichbare Genauigkeit aus. Um diesen Einfluss zu beschreiben, wird der Wert DOP (Dilution of Precision) verwendet. DOP ist somit ein Faktor, welcher die konstellationsabhängige Ungenauigkeit beschreibt. Ein großer DOP-Wert bedeutet, dass alle bei einer Messung verwendeten Satelliten nahe zusammenliegen, wodurch der daraus zu erwartende Positionsfehler entsprechend größer ist. Um eine einzelne Position mit GNSS zu bestimmen, werden mindestens vier verschiedene Satelliten benötigt. Je besser über den Horizont verteilt diese Satelliten sind, desto günstiger schneiden sich die gemessenen Strecken in einem Punkt. Aufgrund der auftretenden Abweichungen bei der Messung zu den Satelliten gleicht der Schnittpunkt eher einer Schnittfläche. Bei mehr als zwei verwendeten Satelliten wird diese Fläche zu einem dreidimensionalen Volumen erweitert. Dieses Volumen hat je nach Satellitenkonstellation verschiedene Größe und Ausrichtung, welche sich besser oder schlechter auf die Positionslösung auswirken. Je größer dieses Volumen ist, umso kleiner ist der DOP- Wert und somit die Ungenauigkeit. Bei Messumgebungen, in denen große Abschattungen vorhanden sind, üben die Satellitenkonstellationen großen Einfluss auf die Genauigkeit aus, weil es zu ungünstigen, einseitigen geometrischen Schnitten führt. Um diese Fehlereinflüsse zu minimieren können zeitversetzte Beobachtungen durchgeführt werden.²¹

19 Vgl. Bauer, S. 190

20 Vgl. Böttner, S.17

21 Vgl. Zogg, S. 91- 94

2.2.6 Messrauschen

Das Messrauschen bestimmt das Auflösungsvermögen und hängt vom Verhältnis zwischen empfangenem Signal und Rauschen beim Empfängereingang ab. Die Wirkung durch das Messrauschen ist proportional zur Periodendauer des empfangenen Signals. Es handelt sich dabei um zufällige Fehler. Außerdem wird der Korrelationsprozess bei der Entfernungsmessung negativ durch das Messrauschen beeinflusst.²²

2.3 Relative Positionierung

Bei der relativen Positionierung wird die Position des GNSS-Empfängers relativ zu einer Referenzstation bestimmt. Werden Code- oder Phasenbeobachtungen zu denselben Satelliten und Signalen gleichzeitig auf unterschiedlichen Stationen ausgewertet, kann ein Teil der Fehlereinflüsse verhindert oder deutlich verringert werden. Durch die Differenzbildung auf den Stationen wird der Satellitenuhrfehler komplett eliminiert und die Einflüsse durch Refraktion und Orbitfehler werden verringert. Das Ergebnis einer solchen differentiellen Auswertung ist ein dreidimensionaler Basislinienvektor. Dieser Vektor wird dann zu den absoluten Koordinaten der Referenzstation hinzuaddiert, wodurch die aktuelle Position mit höherer Genauigkeit bestimmt werden kann, als bei der absoluten Positionierung möglich ist.²³

2.3.1 RTK

RTK steht für Real-Time Kinematik also Echtzeitpositionierung. Dabei werden nur wenige Sekunden, in Ausnahmen auch Minuten, lang andauernde Beobachtungen auf der zu bestimmenden Position durchgeführt. Um eine Genauigkeit von ein bis zwei Zentimeter zu erreichen, werden vom Referenzstationsnetz Zweifrequenz-Phasendaten ausgesendet, welche für eine schnelle Mehrdeutigkeitslösung der Phasen verwendet werden. Diese schnelle Lösung kann in der Regel nur bis zu einer Entfernung des Rovers von der Referenzstation von maximal einigen Kilometern berechnet werden. Bei längeren Strecken können Restfehler der Ionosphäre negativ Einfluss nehmen. Der für die Genauigkeit von RTK ausschlaggebende Faktor ist immer die korrekte Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten.²⁴

2.3.2 Postprocessing

Vor der Einführung von RTK war die einzige Möglichkeit zentimetergenaue Koordinaten mit GNSS zu bestimmen die Postprocessing-Auswertung. Dabei werden die Beobachtungen von zwei gleichzeitig messenden Stationen in den Empfängern gespeichert und später auf einem Auswerterechner zusammengeführt. Diese Daten können dann für eine Basislinienberechnung verwendet werden.²⁵ Einerseits können so einzelne Basislinien zwischen einer Referenzstation und einem Rover berechnet werden. Werden mehrere Referenzstationen verwendet, können diese zu einem Referenzstationsnetz zusammengefasst

22 Vgl. Mansfeld S. 171

23 Vgl. Bauer, S. 246

24 Vgl. Bauer, S. 249

25 Vgl. Bauer, S. 250

werden (Netz-DGNSS). Beispielsweise ermöglicht das Referenzstationsnetz SAPOS seinen Nutzern Positionsbestimmungen im deutschlandweit einheitlichen Bezugssystem ETRS89. Mehr dazu in Kapitel 2.3.3..

Postprocessing-Verfahren sollen durch den erhöhten Beobachtungsumfang höhere Genauigkeiten liefern. Diese These soll in Kapitel 3 getestet werden

2.3.3 SAPOS

Der Satellitenpositionierungsdienst SAPOS ist ein Gemeinschaftsprojekt der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) und stellt für jedermann den aktuellen, amtlichen Raumbezug mit moderner Technik auf der Grundlage der Satellitensysteme GPS, GLONASS und Galileo bereit. Grundlage von SAPOS Bayern ist ein Netz von dauerhaft fest installierten GNSS-Referenzstationen in Bayern und in benachbarten Ländern. Die gesamte Landesfläche wird so abgedeckt und mit Korrekturdaten versorgt. Mit diesen Daten können Nutzer differentielle GNSS-Messungen durchführen, ohne selbst einen zweiten Empfänger auf einem Referenzpunkt verwenden zu müssen²⁶. DGNSS-Technik ist dann zu verwenden, wenn Genauigkeiten unter 5 m erreicht werden sollen. Im Falle des Referenzstationsnetzes SAPOS spricht man auch von Netz-DGNSS.²⁷

SAPOS®-Referenzstationen in Bayern



Abbildung 2: Lage der SAPOS Referenzstationen in Bayern²⁸

26 Vgl. LDBV, SAPOS

27 Vgl. Bauer, S. 447

28 <https://sapos.bayern.de/refmap.php>

Wie in Abbildung 2 zu sehen, wird die ganze Fläche Bayerns gleichmäßig von den Referenzstationen abgedeckt. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Stationen sind München, Pfaffenhofen, Weilheim und Garmisch.

SAPOS selbst bietet drei Dienste an, welche in Tabelle 1 mit ihren Eckdaten kurz dargestellt sind. Bei der Postprocessing Auswertung GPPS wird eine Genauigkeit in der Lagebestimmung von unter einem Zentimeter spezifiziert. Die Höhe kann laut Angabe mit einer Genauigkeit von einem bis zwei Zentimetern bestimmt werden, welche abhängig von der Beobachtungsdauer ist. Die Kosten einer Auswertung werden mit der Beobachtungsdauer berechnet.²⁹ Es ist deshalb wirtschaftlich, die Beobachtungsdauer so anzupassen, dass die gewünschte Genauigkeit bei geringster dafür nötigen Messzeit erreicht wird.

 SAPOS®	EPS	HEPS	GPPS
Verfahren	Echtzeit	Echtzeit	Postprocessing
Genauigkeit - Lage	0,3 - 0,8 m	0,01 - 0,02 m	≤ 0,01 m
Genauigkeit - Höhe	0,5 - 1,5 m	0,02 - 0,03 m	0,01 - 0,02 m
Übertragungstechnik	Ntrip über Internet (GPRS, UMTS, LTE)	Ntrip über Internet (GPRS, UMTS, LTE), GSM	Internet (Webserver)
Taktrate	1 Sekunde	1 Sekunde	1 Sekunde
Einheit	entfällt	1 Minute	1 Minute
SAPOS®-Gebühr je Einheit	150,00 EUR p.a.	0,10 EUR	0,20 EUR
Standard, Format	RTCM 2.3	RTCM 2.3, RTCM 3	RINEX 2.1

Tabelle 1: SAPOS Dienste im Überblick³⁰

²⁹ Vgl. LDBV, SAPOS Faltblatt

³⁰ <https://www.sapos.de/dienste-im-ueberblick.html>

2.4 Postprocessing Auswertung

Die Auswertung von statischen Messungen im Postprocessing ist in der geodätischen Praxis rückläufig. Bei kinematischer Messung im STOP- und GO- Verfahren können mit Hilfe von differentieller Messung und Auswertung von Trägerphasen unter günstigen Bedingungen bereits Genauigkeiten von ein bis zwei Zentimetern erreicht werden.³¹ Aus meiner Praxiserfahrung an einem ADBV ist mir bekannt, dass für das Liegenschaftskataster in Bayern eine Genauigkeit von drei Zentimetern gilt. Das heißt bei einer Katastervermessung, wie sie in Bayern üblich ist, wird eine Genauigkeit unter einem Zentimeter meist nicht benötigt. Angenommen, es besteht der Anspruch, ein Bauwerk mit einer Höhengenaugkeit im Millimeterbereich zu platzieren, damit dann z.B. beim Kanalbau Wasser wie gewünscht abfließt. Der nächstgelegene Höhenfestpunkt ist kilometerweit entfernt. Um einen Höhenanschluss zu ermöglichen, soll deshalb GNSS verwendet werden, weil ein Nivellement zum nächsten Höhenbolzen zu unwirtschaftlich ist. Dann stellt sich also die Frage, ob bei statischen Messungen mit entsprechend langer Beobachtungsdauer, durch Auswertung im Postprocessing eine solch hohe Genauigkeit erreicht werden kann.

2.4.1 Theoretisch erreichbare Genauigkeiten

Tests zur Ermittlung des Genauigkeitspotentials einer Höhenübertragung mittels GNSS-Verfahren haben gezeigt, dass bei einer Beobachtungsdauer von einer Woche selbst bei großen Entfernungen (100 km) Genauigkeiten im Bereich von zwei bis fünf Millimeter erreichbar sind.³² Diese Tests sind vom Aufnahmeprinzip her ähnlich zu den in dieser Arbeit durchgeführten Auswertungen. Welche Genauigkeit mit einer Beobachtungsdauer von einigen Minuten bis zu ein paar Stunden erreicht werden kann, soll dort untersucht werden.

Die Spezifikationen von SAPOS mit den Genauigkeitsangaben sind in Tabelle 1 dargestellt.

Weil die Auswertung der Trägerphasen zur Koordinatenbestimmung ein komplexer Vorgang ist, lassen sich keine allgemeinen Aussagen über die erreichbare Genauigkeit machen.³³

2.4.1.1 Höhenbestimmung mit GNSS- Verfahren im Vergleich zum Nivellement

Die Standardmethode Höhen im DHHN2016 zu bestimmen ist, ein Nivellement von vorhandenen Höhenfestpunkten aus durchführen. Die Genauigkeit des Nivellements hängt, wie in Abbildung 3 dargestellt, mit dessen Länge zusammen. Ist vom Messort aus der nächste Höhenfestpunkt mehrere Kilometer entfernt, so ist eine Höhengenaugkeit von unter einem Zentimeter unwahrscheinlich zu erreichen. Hinzu kommt, dass ab 2018 die Höhenfestpunkte im Netz dritter Ordnung nicht mehr gepflegt werden. Das Höhenfestpunktfeld vierter Ordnung wird bereits seit 2007 nicht bearbeitet. Aufgrund von Verfall wird sich die Zahl der Höhenfestpunkte erwartungsgemäß verringern. Die flächenhafte Verfügbarkeit wird also nicht mehr vorhanden sein.³⁴

31 Vgl. Bauer, S. 267

32 Vgl. Böttner S. 17

33 Vgl. Bauer, S. 261 f.

34 Vgl. LDBV (2017), S. 2

Genauigkeit des Nivellements	
$\sigma_{Niv} = \pm \sigma_s \times \sqrt{E [km]}$	→ <i>E = Entfernung in km</i>
$\sigma_s = 1 \frac{mm}{km} \text{ bis } 3 \frac{mm}{km}$	→ <i>Verfahrens – bzw. Instrumentenabhängig</i>

Abbildung 3: Genauigkeit eines Nivellements³⁵

Der Einsatz von Nivellements soll zukünftig durch GNSS- Messverfahren ersetzt werden. Nachteil dabei ist, dass mit GNSS- Verfahren ellipsoidische Höhen bestimmt werden. Diese Höhen müssen dann durch Addition einer ortsabhängigen Geoidundulation zu Höhen im DHHN umgerechnet werden. Wie in Abbildung 4 zu sehen, ist eine Höhenbestimmung mit GNSS abhängig von der geometrischen Höhenkomponente der GNSS- Messung und der Geoidundulation.³⁶

Genauigkeit der GNSS-Höhenbestimmung	
$\sigma_{GNSS} = \pm \sqrt{\sigma_{H_{ell}}^2 + \sigma_U^2}$	
$\sigma_{H_{ell}} = 5mm \text{ bis } 30mm$	→ <i>Genauigkeit der geometr. Höhenkomponente</i>
$\sigma_U = 5mm \text{ bis } 14mm$	→ <i>Genauigkeit der Geoidundulation</i>

Abbildung 4: Genauigkeit der GNSS Höhenbestimmung³⁷

Bei der Bestimmung von DHHN2016- Höhen mit hoher Genauigkeit muss man damit rechnen, dass das Geoidmodell nicht fehlerfrei ist. Das aktuelle Undulationsmodell GCG2016 ermöglicht eine Genauigkeit von etwa einem Zentimeter im Flachland und zwei Zentimeter im Hochgebirge.³⁸ Der Fehleranteil durch das Geoidmodell ist damit unabhängig von der gewählten Messmethode und Auswertestrategie.

2.4.2 Empfohlene Beobachtungsdauer

Im Handbuch des GPPS Postprocessing Dienst von SAPOS Bayern wird bei guten Messbedingungen eine Messdauer von 10 bis 15 Minuten empfohlen, um eine Lagegenauigkeit von ein bis zwei Zentimeter und eine Höhengenaugkeit von zwei bis drei Zentimeter zu erreichen. Bei schlechten Bedingungen oder großen Höhenunterschieden zur Referenzstation wird eine Beobachtungsdauer zwischen 30 und 45 Minuten empfohlen. Bei diesen Angaben wird von einer Messrate von 10 bis 30 Sekunden pro Messung ausgegangen. Nur bei kinematischen Messungen wird eine Taktrate von einer Sekunde, also ein Hz vorausgesetzt. Soll eine Genauigkeit kleiner als ein Zentimeter in der Lage und kleiner als zwei Zentimeter in der Höhe erreicht werden, wird bei guten Bedingungen eine Beobachtungsdauer von 45 bis 60 Minuten empfohlen, wobei nach einer Pause von

³⁵ LDBV (2017)

³⁶ Vgl. LDBV(2017), S. 2

³⁷ LDBV (2017)

³⁸ Vgl. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie

mindestens drei Stunden eine ebenso lange Doppelmessung erfolgen soll. Bei schlechteren Messbedingungen sollte die Beobachtungsdauer entsprechend deutlich verlängert werden.³⁹

Hohe Genauigkeiten werden dann erreicht, wenn die Mehrdeutigkeiten bei der Phasenmessung sicher aufgelöst werden können. Wie lange die Beobachtungsdauer dafür sein muss, hängt von vielen Faktoren ab. Es ist deshalb schwierig, eine pauschale Aussage zu treffen. Sicher ist, dass bei längerer Beobachtungsdauer eine höhere Wahrscheinlichkeit besteht, die Mehrdeutigkeiten zu lösen. Zusätzlich steigt bei längerer Beobachtungsdauer die Zuverlässigkeit der Ergebnisse. Systematische Fehlereinflüsse wie ionosphärische Störungen oder Mehrwegeeffekte hindern nicht die Lösung von Mehrdeutigkeiten. Diese Effekte zu minimieren ist nur möglich, wenn die Messdauer erhöht wird. Eine Beobachtungszeit von mindestens 15 bis 20 Minuten sollte eingeplant werden, damit möglichst gute Genauigkeiten erreicht werden.⁴⁰

3 Praktische Untersuchungen

Ziel der Untersuchungen ist es herauszufinden, wie sich die Höhengenaugigkeit bei einer GNSS-Messung verhält, wenn die Position im Postprocessing durch Basislinienberechnung ermittelt wird. Wichtigste Untersuchungsgröße ist die Messdauer. Es soll ermittelt werden, ab welcher Beobachtungsdauer die höchsten Genauigkeiten erreicht werden. Darüber hinaus soll untersucht werden, ob bei entsprechender Messdauer der Einfluss der Troposphäre, also des Wettergeschehens, minimiert wird, da der relative Troposphäreneinfluss auf eine Messtation modelliert werden kann.

Wenn im Verlauf der unten aufgeführten Auswertungen keine Troposphärenparameter geschätzt werden, so werden dennoch Standardatmosphärenmodelle verwendet. Die geschätzten Parameter beziehen sich auf die noch bleibenden Restfehler.

3.1 Verwendete Daten

Alle verwendeten Messdaten stammen vom LDBV. Für diese Arbeit wurden 24 Stunden Beobachtungsdaten von den SAPOS Referenzstationen München und Pfaffenhofen, sowie der Monitorstation Freising bereitgestellt. Damit wird ein Zeitraum von drei Wochen im Juni 2019 abgedeckt. Das Messintervall beträgt 30 Sekunden. Das heißt, alle 30 Sekunden wird ein Messergebnis erzeugt. Das Datenformat ist RINEX 3.04. Bei den Basislinien München – Freising und Pfaffenhofen – Freising werden Beobachtungen von GPS und GLONASS zur Berechnung verwendet, da die Monitorstation in Freising nur diese aufzeichnet.

Zusätzlich werden Broadcastephemeriden des untersuchten Zeitraums und Antennenkorrekturdaten für jede Antenne verwendet. Auch diese Daten wurden vom LDBV bereitgestellt. Um zu testen, wie sich große Höhenunterschiede zur Referenzstation bei der Basislinienberechnung auswirken, werden zusätzlich Messdaten der SAPOS Referenzstation in Weilheim und Garmisch-Partenkirchen mit einbezogen. Diese Daten sind vom gleichen Typ und umfassen den gleichen Zeitraum wie die der restlichen Stationen. Allerdings werden

³⁹ Vgl. SAPOS Bayern (2019), S. 2

⁴⁰ Vgl. Bauer, S. 425 f.

neben GPS und GLONASS auch Galileo Satelliten verwendet.

Für alle Messstationen sind Soll-Koordinaten mit einer Genauigkeit unter einem Millimeter in den Sitelogs der Stationen angegeben. X, Y und Z in Tabelle 2 beziehen sich auf ITRF.

Station	München	Pfaffenhofen	Weilheim	Garmisch	Freising
X	4177482.9706	4146844.3471	4208628.7599	4235957.6142	4154037.5290
Y	856761.0859	844141.8386	828986.0814	834342.1326	863910.3120
Z	4727789.7887	4756634.7761	4705282.1808	4681540.5861	4746908.8000
ell. Höhe	579.740	494.591	628.545	1827.871	527.546

Tabelle 2: Koordinaten der verwendeten Stationen

Die Antennentypen mit ihren Kalibrierungsarten sind in Tabelle 3 aufgelistet.

Station	München	Pfaffenhofen	Weilheim	Garmisch	Freising
Antennentyp	TRM59800.00	TRM59800.00	TRM59800.00	TRM59800.00	TRM55971.00
Kalibrierung	ROBOT	ROBOT	ROBOT	ROBOT	ROBOT

Tabelle 3: Antennentyp und Kalibrierungsarten

Die Monitorstation in Freising ist eine von vier Messstationen in Bayern, die vom LDBV für eine Qualitätssicherung des HEPS Dienstes genutzt wird. Es soll die RTK- Performance überprüft werden. Deshalb wird handelsübliche Roverhardware verwendet. Kontinuierlich werden RTK-Positionierungen mit dem SAPOS HEPS Dienst durchgeführt. Die Ergebnisse werden zu einem stündlichen RTK Performance Index zusammengefasst. Damit kann die Leistungsfähigkeit des Dienstes beurteilt werden.⁴¹ Das Ergebnis davon kann auf der SAPOS Bayern Homepage eingesehen werden. Beispielhaft ist in Abbildung 5 eine Zeitreihe der Koordinatendifferenzen dargestellt, wie sie auf der Internetseite aufgeführt wird. Hier sticht besonders der Zeitraum zwischen 16- und 17 Uhr hervor, in welchem große Differenzen aufgetreten sind.

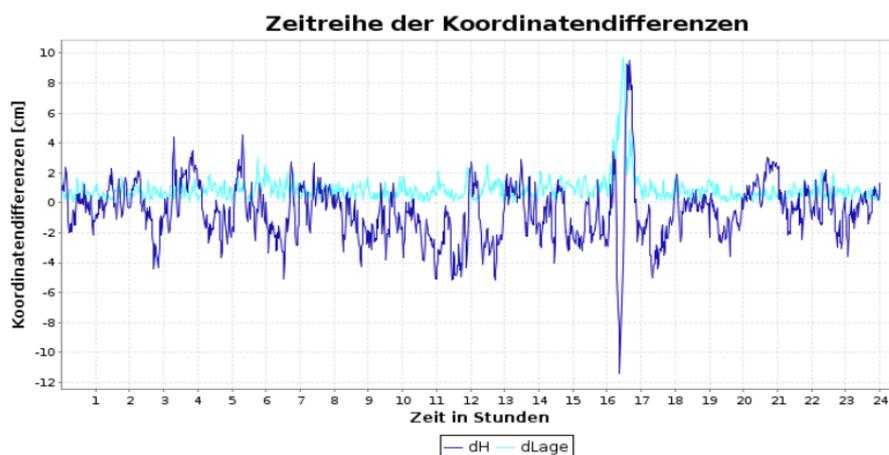


Abbildung 5: Koordinatendifferenzen an der Monitorstation Freising vom 10.06.2019⁴²

41 Vgl. SAPOS Bayern, Monitoring

42 https://sapos.bayern.de/heps_perf_1004.php

Am 10.06.2019 zog ein schweres Hagelunwetter über den Großraum München. Etwa zwischen 15:30 Uhr und 18 Uhr war das Unwetter über der Referenzstation in München. Den genauen Zeitpunkt des Unwetters zu ermitteln ist schwierig, da genaue stündliche historische Wetterdaten meist nicht kostenfrei angeboten werden. Auf der Webseite [daswetter.com](https://www.daswetter.com)⁴³ ist an der Messstation Flughafen München nach 16 Uhr ein deutlicher Temperatursturz und ein plötzlicher Anstieg der relative Luftfeuchtigkeit verzeichnet, was den Zeitraum des Unwetters eingrenzen lässt. Ein ähnlicher Zeitpunkt geht aus den GNSS-Messdaten hervor.

Im Rahmen der Bachelorarbeit wurden folgende Basislinien ausgewertet:

Basislinie	München – Freising	Pfaffenhofen – Freising	Weilheim – Garmisch
Länge	31.1 km	23.2 km	36.6 km
Höhenunterschied	52.21 m	32.94 m	1199.30 m

Tabelle 4: Berechnete Länge und Höhenunterschied der verwendeten Basislinien

3.2 Verwendete Software

Zur Auswertung der RINEX-Beobachtungsdateien wurden die Softwareprodukte von WaSoft Version 1.5 verwendet, welche vom LDBV bereitgestellt worden waren. Benutzt wurde dabei vor allem WaRINo zur Manipulation und zum Editieren der RINEX- Daten und Wa2 zum berechnen der Basislinien zwischen den Stationen. Diese Programme werden durch Kommandozeilen gesteuert, in denen man die gewünschten Parameter angibt, welche von der Software verwendet werden sollen. Zur einfachen Handhabung wurden die Kommandozeilen der WaSoft mithilfe von Windows Powershell ausgeführt, weil damit die Steuerung von Input und Output der Software übersichtlicher möglich ist.

WaRINo kann RINEX GNSS Beobachtungsdateien editieren und manipulieren. In dieser Arbeit wurde WaRINo hauptsächlich für die Konvertierung von RINEX Versionen verwendet. Wa2 kann sowohl single- Frequenz als auch dual- Frequenz GNSS-Beobachtungen beliebiger Länge verarbeiten. Bei der Berechnung der Basislinien werden automatisch bestimmte Algorithmen und Korrekturmodelle anhand der Basislinienlänge, Beobachtungszeit und Zwischenergebnissen von der Software ausgewählt.⁴⁴

Zur weiteren Auswertung der berechneten Koordinaten wurde mit der frei verfügbare Software Open Office Calc gearbeitet.

⁴³ https://www.daswetter.com/wetter_Munchen-Europa-Deutschland-Bayern--sactual-27076.html

⁴⁴ Vgl. WaSoft User's Guide

3.3 Vorgehen bei der Auswertung

Zu Beginn lagen alle Messdaten im Datenformat RINEX in der Version 3.04 vor. Diese Dateien beinhalten 24 Stunden Beobachtungen eines ganzen Tages mit einer Messung alle 30 Sekunden. Das WaSoft Modul Wa2, mit dem die Basislinienberechnungen durchgeführt wurden, kann nur RINEX in der Version 2.X verwenden. Deshalb musste zuerst eine Konvertierung erfolgen. Dazu wurde das Modul WaRINo verwendet. Nach der Konvertierung wurden die RINEX 2.11 Beobachtungsdateien zur Basislinienberechnung in Wa2 angewandt. Nach einigen Tests wurden die Auswerteparameter festgelegt, die ein bestmögliches Ergebnis versprachen. Es wurde eine Elevationsmaske von 10° bestimmt, damit Beobachtungen mit einer Elevation unter dieser Grenze weggelassen werden. Sowohl für die Referenzstation, also auch für den Rover wurden die Antennenkalibrierungsdaten angewandt. Für jede verwendete Antenne war eine solche Kalibrierungsdatei vorhanden. Wa2 wurde angewiesen, die berechneten Koordinaten in UTM Zone 32 und ellipsoidischer Höhe auszugeben. Zur Berechnung wurden die Ephemeridendaten eingelesen und verwendet. In einem Berechnungsvorgang werden von Wa2 sieben Frequenzlösungen automatisch ermittelt. Darunter sind die Lösungen L1, L2, die ionosphärenfreie L0, Widelane, Narrowlane sowie zwei Code-Lösungen, welche jedoch nicht in der Auswertung berücksichtigt wurden. Die Widelane und Narrowlane Lösungen werden auch nur der Vollständigkeit wegen in den Auswerte-Graphiken dargestellt. Hauptaugenmerk soll auf L1, L2 und L0 liegen.

Bei den Basislinien München – Freising und Pfaffenhofen – Freising wurden Beobachtungen der Systeme GPS und GLONASS verwendet. Die Frequenzlösungen basieren auf der Interoperabilität der Signale der verschiedenen Satellitensysteme.

Die 24h RINEX 2.11 Dateien wurden in der Auswertung dann so behandelt als würden nur Messungen mit einer bestimmten Beobachtungsdauer durchgeführt. Um beispielsweise den Messbeginn um 15 Uhr zu starten, wurde bei Wa2 der Parameter +b150000 eingefügt. Soll die Messung eine Stunde lang durchgeführt werden, wurde zusätzlich die Option +e160000 hinzugefügt. Damit verwendet Wa2 aus der 24 Stunden Beobachtungsdatei nur die Beobachtungen von 15 bis 16 Uhr. Dieser Vorgang wurde mehrfach für alle Basislinienberechnungen durchgeführt. Damit untersucht werden kann, wie sich die Messgenauigkeit, insbesondere die Höhengenaugigkeit bei verschiedener Beobachtungsdauer verhält, wurden 12 verschieden lange Intervalle ausgewertet. Das kürzeste Intervall dauert 2,5 Minuten. Bei einer Messung alle 30 Sekunden ergibt das 6 Messungen für diese Messdauer. Die weiteren Intervalle sind 5, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60, 120 und 180 Minuten. Der Beginn blieb für eine Messreihe dabei immer gleich. Es musste bei jeder Berechnung nur der Parameter +e angepasst werden, beispielsweise +e151000 für 10 Minuten Messdauer. Ab einer Beobachtungsdauer von 20 Minuten wurden relative Troposphärenparameter geschätzt.

Als Ergebnis wurden von Wa2 zwei Textdateien erzeugt. Eine davon ist das sogenannte „solution file“ in dem die Ergebnisse der Basislinienberechnung zusammengefasst dargestellt werden. In der anderen, dem sogenannten „log file“ werden alle Berechnungsschritte detailliert aufgeführt. Für die weitere Bearbeitung beinhaltet dieses Dokument alle nötigen

Informationen. Im nächsten Schritt wurden die berechneten Koordinaten manuell aus der log Datei nach Open Office Calc importiert. Dieser Schritt war sehr aufwendig und fehleranfällig. Eine genaue Kontrolle war deshalb nötig um sicher zu stellen, dass keine Koordinaten vertauscht worden waren.

Weil für jede verwendete Messstation genaue Soll Koordinaten vorhanden sind konnte die Abweichung der berechneten Koordinaten vom Soll einfach berechnet werden. Aus den Abweichungen zu jedem Auswerteintervall wurden dann Diagramme angefertigt.

Zu jeder aufgeführten Messreihe wurde eine Standardabweichung berechnet. Dabei wurde zwischen der inneren und der äußeren Genauigkeit unterschieden. Die innere Genauigkeit beschreibt die Streuung der Messwerte innerhalb einer Messreihe zueinander, die äußere Genauigkeit bezieht sich auf die Abweichung der Einzelmessung von den Soll-Koordinaten. Die Standardabweichungen zu jeder Messreihe befinden sich im Anhang dieser Arbeit.

3.4 Berechnung der Koordinaten der Monitorstation Freising

3.4.1 Basislinie Pfaffenhofen - Freising am 10.06.2019

Am 10.06.2019 zog ein schweres Hagelunwetter über den Großraum München.⁴⁵ Dieses Wetterereignis soll Erwartungsgemäß einen großen Einfluss auf das Messergebnis haben, da sich die Troposphäre, welche wie in Kapitel 2.2.1. erklärt, Fehlereinfluss auf eine GNSS-Messung bewirkt, verändert.

Die Auswertung an diesem Tag wurde von 15 bis 18 Uhr durchgeführt. Es wurde die Monitorstation Freising als Rover und die SAPOS Referenzstation in Pfaffenhofen als Referenzstation verwendet. Diese Auswertung soll einen Fall zeigen, bei dem sich die Referenzstation in einem Bereich mit niedrigerem Troposphäreneinfluss befindet, als der Rover. Pfaffenhofen war im Untersuchungszeitraum weniger vom Unwetter betroffen als Freising. Es wurden Lösungen nach verschiedenen Beobachtungsdauern berechnet. Beginn eines Intervalls ist immer 15 Uhr. Ausnahme hierfür ist die 24h Lösung bei der der ganze Tag ab 0 Uhr einbezogen ist.

Höhenabweichung

Wie in Abbildung 6 zu sehen, zeigt sich bis zu einer Messdauer von 15 Minuten eine relativ große Abweichung vom Soll von teils mehr als fünf Zentimetern für alle Frequenzlösungen. Ab 20 Minuten Messzeit ist eine deutliche Verringerung der Abweichung ersichtlich. Ab dieser Messzeit wird bei WaSoft die troposphärische Zenitverzögerung geschätzt. Die Abweichung bleibt ab diesem Zeitpunkt auf etwa dem gleichem Niveau. Die L0 Lösung ist etwas schlechter als die L1 und LN Lösung. Die L1, L2 und LN Lösungen verhalten sich etwa gleich. Eine Genauigkeit von unter ein Zentimeter wird teilweise kurzzeitig erreicht. Eine Genauigkeit von besser zwei Zentimeter ist mit L0, L1 und LN erreichbar.

⁴⁵ Vgl. muenchen.de: <https://www.muenchen.de/aktuell/2019-06/unwetterwarnung-gewitter-muenchen-juni.html>

Abweichung der Höhe vom Soll in Abhängigkeit von der Messdauer

Station Freising mit Basislinie zu Pfaffenhofen am 10.06.2019 ab 15 Uhr

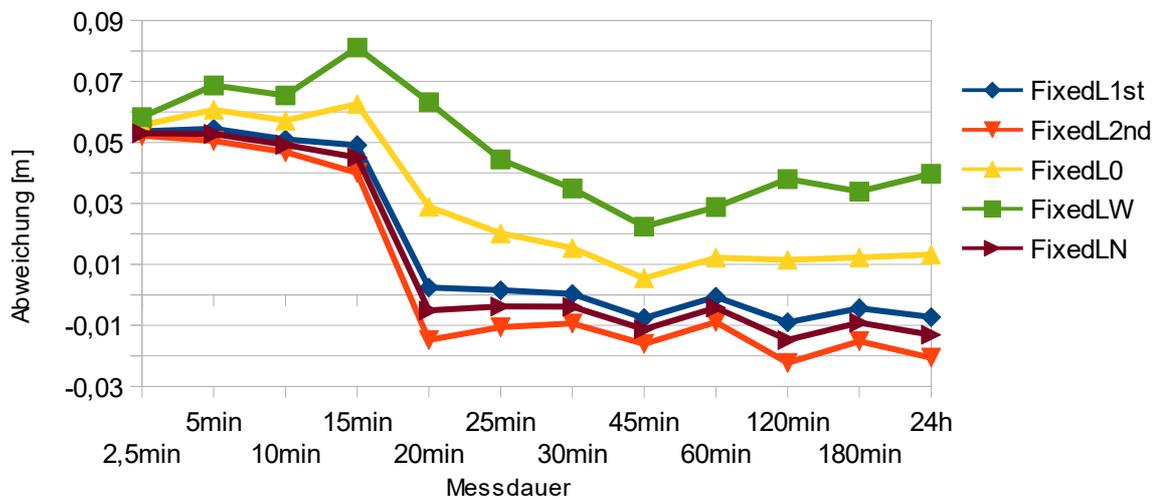


Abbildung 6: Pfaffenhofen - Freising am 10.06.2019 ab 15 Uhr Höhenabweichung

Lageabweichung

Das Ergebnis ist in Abbildung 7 und 8 dargestellt. Es wurden nur die L1, L2 und L0 Lösung berechnet. Die L0 Lösung ist hier knapp am besten. Die Abweichungen in Rechtswert und Hochwert hängen nicht erkennbar mit der Messdauer zusammen. Die Abweichung ist praktisch immer geringer als zwei Zentimeter.

Abweichung des Rechtswerts vom Soll in Abhängigkeit von der Messdauer

Station Freising mit Basislinie zu Pfaffenhofen am 10.06.2019 ab 15 Uhr

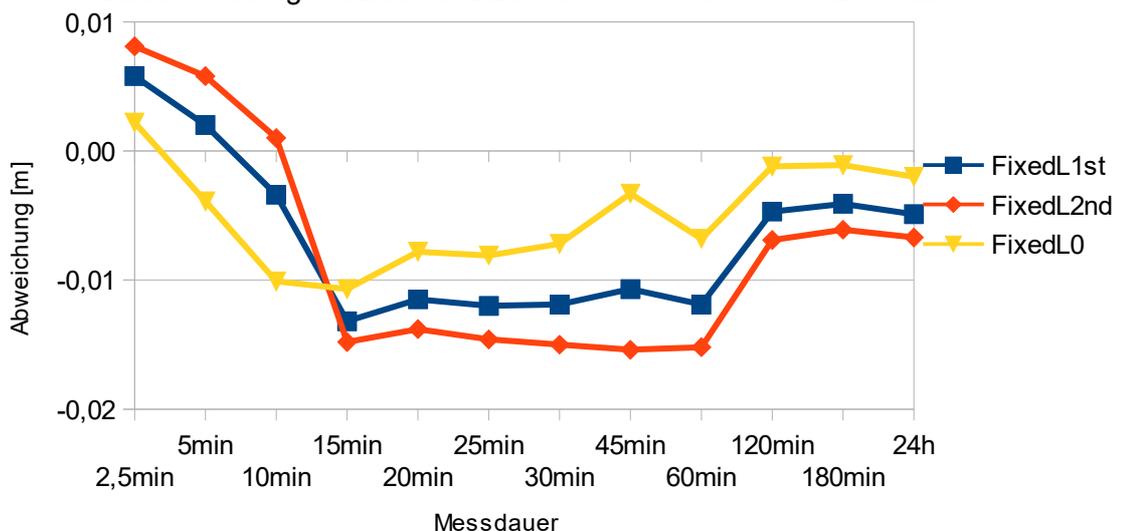


Abbildung 7: Pfaffenhofen-Freising am 10.06.2019 ab 15 Uhr Rechtswertabweichung

Abweichung des Hochwerts vom Soll in Abhängigkeit von der Messdauer

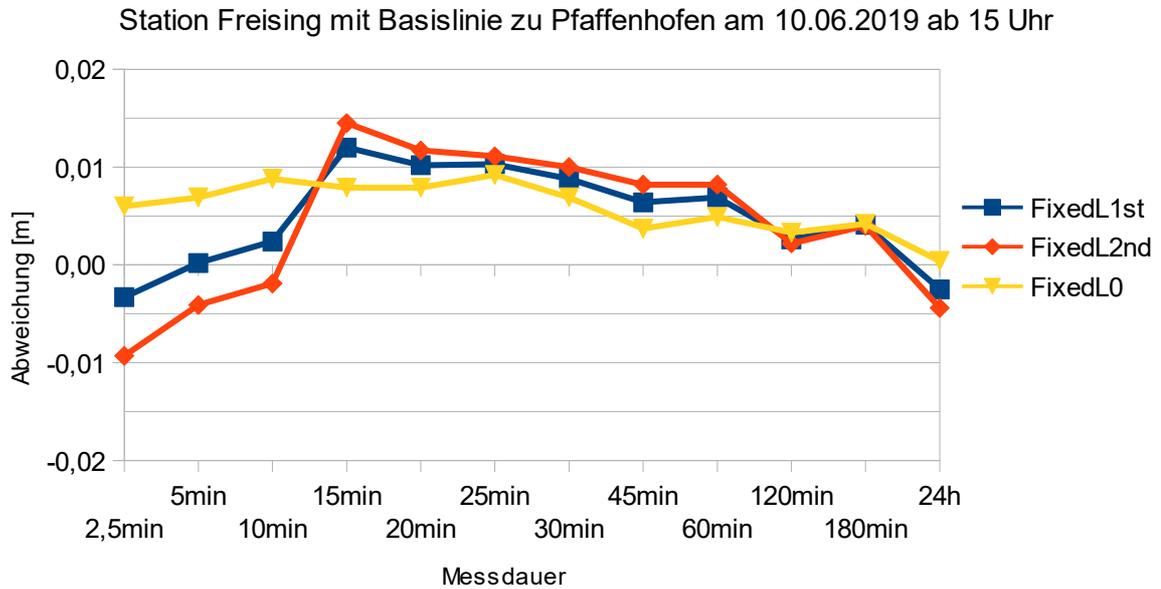


Abbildung 8: Pfaffenhofen-Freising am 10.06.2019 ab 15 Uhr Hochwertabweichung

3.4.2 Basislinie München – Freising

Diese Basislinie wurde gewählt, um die Abhängigkeit der Höhengenaugigkeit vom Wettergeschehen auch bei geringem Höhenunterschied zwischen Referenzstation und Rover zu belegen. Dazu wurden Auswertungen am Tag vor dem Hagelunwetter im Großraum München und am Tag des Unwetters angefertigt.

3.4.2.1 Auswertung am 09.06.2019

Laut SAPOS HEPS Performance Monitoring waren an diesem Tag gute Messbedingungen gegeben.⁴⁶ Diese Auswertung soll zeigen, wie das Messergebnis im besten Fall aussieht, wenn die Monitorstation Freising als Rover und die Station München als Referenzstation dient und keine bekannten Einschränkungen vorliegen. Es werden wieder die selben Messintervalle wie bei der Basislinie Pfaffenhofen – Freising berechnet. Um die Datenmenge einzugrenzen wurden nur die Lösungen L1, L2 und L0 aufgeführt. Der Auswertzeitraum beträgt drei Stunden. Nach einer Stunde Pause wird dann wieder ein Zeitraum von drei Stunden untersucht. Ziel hierbei ist eine Doppelmessung, welche dann für ein Mittel verwendet werden kann.

46 Vgl. SAPOS Bayern: HEPS Performance, https://sapos.bayern.de/heps_perf_1003.php

Auswertebeginn 0:00 Uhr

Es wird angenommen, dass zu dieser Uhrzeit der Einfluss durch die Ionosphäre niedrig ist. Die Doppelmessung soll bereits durchgeführt worden sein, noch bevor der Sonnenaufgang Einfluss auf die Genauigkeit der Messung nimmt. So sollten optimale Bedingungen vorliegen.

Höhenabweichung

In Abbildung 9 ist zu erkennen, dass die Abweichung vom Soll bis zu einer Messdauer von 30 Minuten bei allen Lösungen abnimmt. Erkennbar ist auch die Genauigkeitssteigerung von dem 20 Minuten Intervall an, ab dem die Troposphäre geschätzt wird. Nach 30 Minuten Messdauer werden die Abweichungen wieder größer. Die Abweichungen sind bei L0 und L1 auch nach langer Messdauer im Bereich von einem bis zwei Zentimeter. Selbst die 24 Stunden Lösung hat keine wesentlich geringeren Abweichungen als L1 und L0.

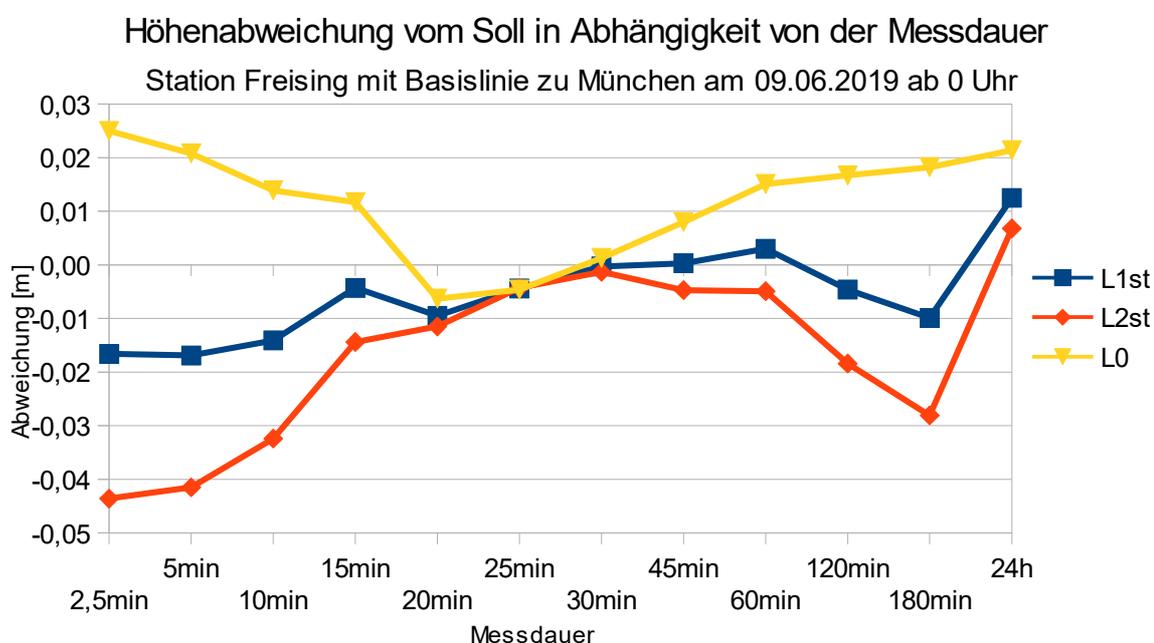


Abbildung 9: München - Freising am 09.06.2019 ab 0 Uhr Höhenabweichung

Lageabweichung

Die Abbildungen 10 und 11 zeigen, dass in diesem Fall sehr hohe Genauigkeiten erreicht wurden. Die Abweichungen für die L1 Lösung liegen teilweise unter einem Zentimeter. Weil L1 und L2 in Abbildung 11 stärkere Abweichungen beim Hochwert aufzeigen als die ionosphärenfreie L0 Lösung, kann darauf geschlossen werden, dass sich die Ionosphäre ungünstig ausgewirkt hat. Dennoch ist nach etwa 45 Minuten auch beim Addieren von Rechtswertabweichung und Hochwertabweichung eine Genauigkeit besser ein Zentimeter möglich. Die Messdauer spielt bei der Lage eine untergeordnete Rolle, da in Abhängigkeit von der Messdauer keine Verbesserung ersichtlich ist.

Abweichung des Rechtswerts vom Soll in Abhängigkeit von der Messdauer

Monitorstation Freising mit Basislinie zu München am 09.06.2019 ab 0 Uhr

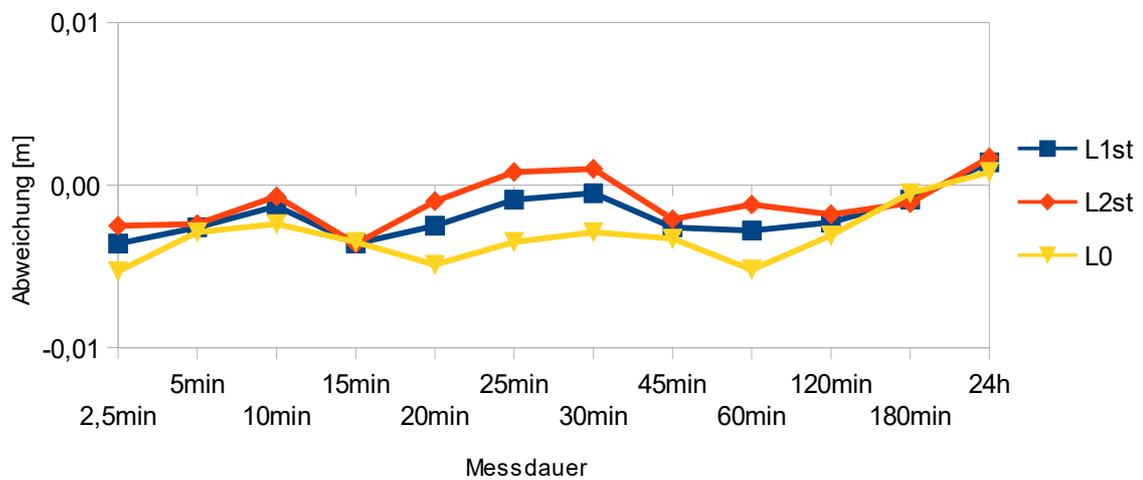


Abbildung 10: München - Freising am 09.06.2019 ab 0 Uhr Rechtswertabweichung

Abweichung des Hochwerts vom Soll in Abhängigkeit von der Messdauer

Monitorstation Freising mit Basislinie zu München am 09.06.2019 ab 0 Uhr

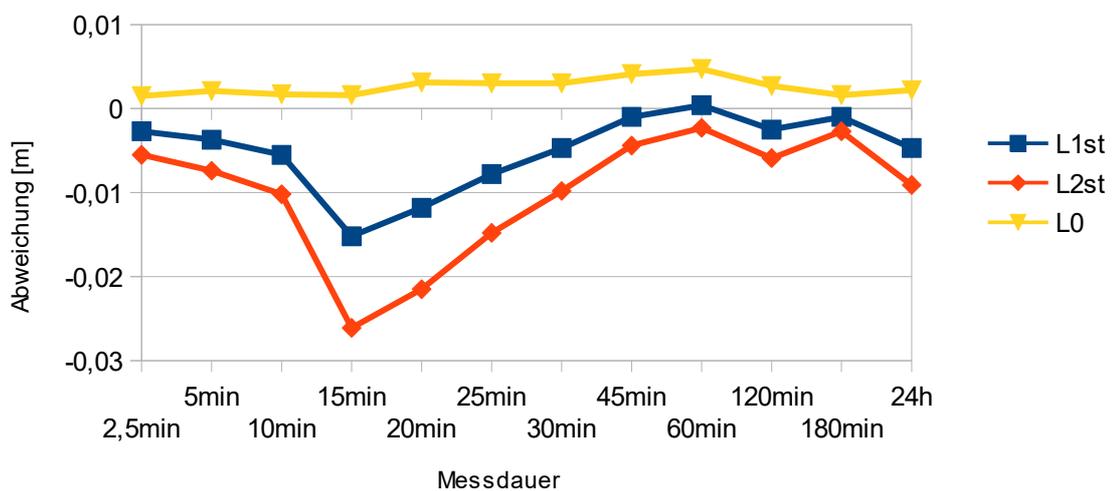


Abbildung 11: München - Freising am 09.06.2019 ab 0 Uhr Hochwertabweichung

Auswertebeginn 4:00 Uhr

Um 4 Uhr beginnt die Kontrollmessung beziehungsweise der zweite Satz. Dazwischen war eine Stunde Pause. Die Parameter der Auswertung sind exakt die selben wie bei der Messung um 0 Uhr. Da zu dieser Zeit im Juni die Sonne früh aufgeht, wird ein daraus resultierender Einfluss, unter anderem durch den Temperaturanstieg, erwartet.

Höhenabweichung

Anhand Abbildung 12 zeigt sich, dass bei L1 und L2 die Abweichungen mit dem Einsetzen der Troposphärenschätzung verringert werden. Allerdings ist auch schon ab 15 Minuten ein Verbesserungstrend erkennbar. Die Genauigkeit wird bei L1 und L2 stetig besser. Nur die 24 Stunden Lösung ist wieder etwas schlechter. Die L0 Lösung verhält sich entgegengesetzt dazu. Erst ab mehr als 60 Minuten wird eine Genauigkeit besser als ein Zentimeter erreicht. Die L1 und L2 Lösungen sind in dieser Auswertung im gesamten Zeitraum genauer als L0.

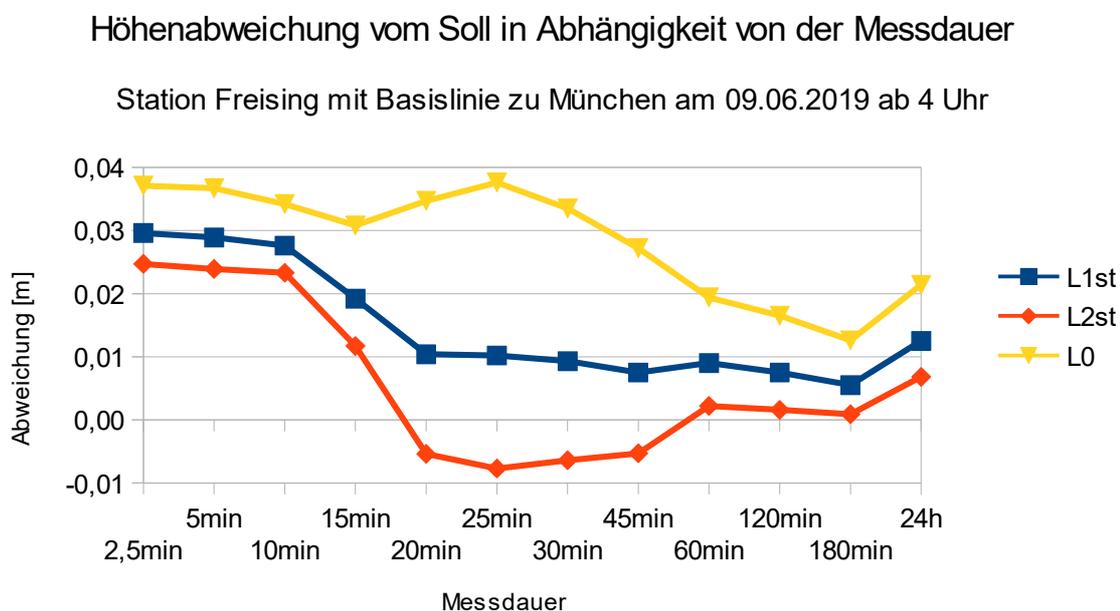


Abbildung 12: München - Freising am 09.06.2019 ab 4 Uhr Höhenabweichung

Lageabweichung

In den Abbildungen 13 und 14 ist zu sehen, dass die Abweichungen für Rechtswert und Hochwert vergleichbar mit denen aus der Messung um 0 Uhr sind. Eine Genauigkeit besser als ein Zentimeter ist hier nach einiger Messzeit gegeben. Ab 15 Minuten ist ein plötzlicher Wandel sowohl in Abbildung 13 als auch 14 zu sehen. Beim Hochwert ist ab diesem Zeitpunkt die beste Genauigkeit erreicht, beim Rechtswert erst nach zwei bis drei Stunden.

Hochwertabweichung vom Soll in Abhängigkeit von der Messdauer

Station Freising mit Basislinie zu München am 09.06.2019 ab 4 Uhr

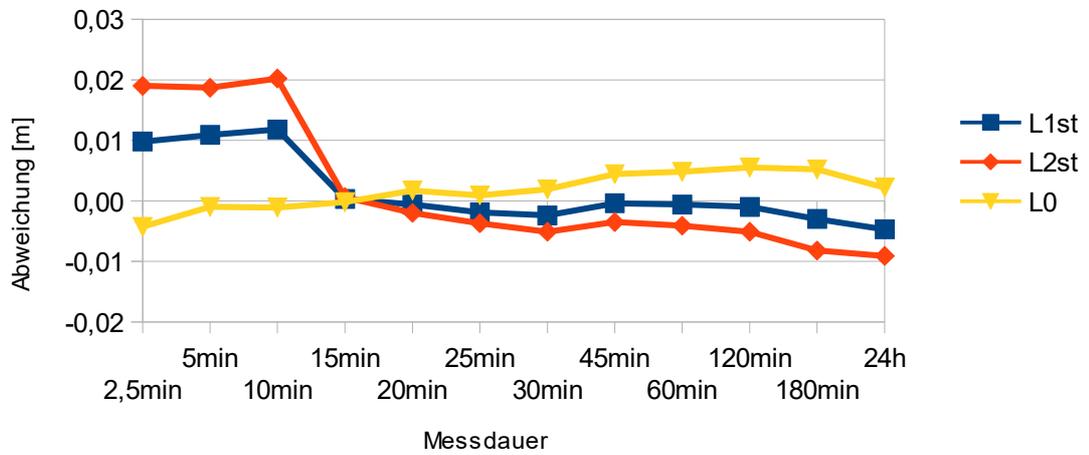


Abbildung 13: München - Freising am 09.06.2019 ab 4 Uhr Hochwertabweichung

Rechtswertabweichung vom Soll in Abhängigkeit von der Messdauer

Station Freising mit Basislinie zu München am 09.06.2019 ab 4 Uhr

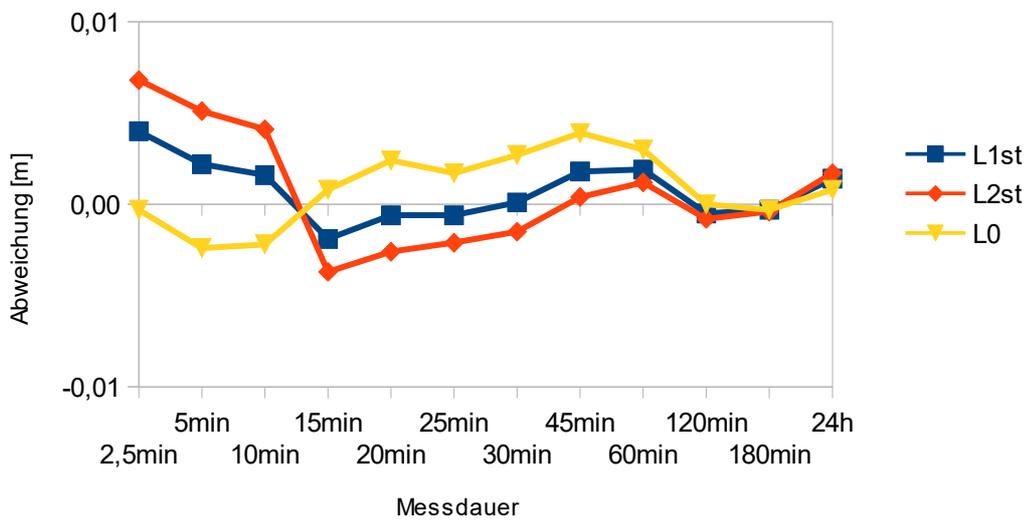


Abbildung 14: München - Freising am 09.06.2019 ab 4 Uhr Rechtswertabweichung

Mittel aus der Doppelmessung

Im Folgenden wurde die Messung um 0 Uhr mit der Auswertung um 4 Uhr gemittelt. Ziel dabei ist es, die systematischen Einflüsse durch Mittelbildung aus zeitversetzten Beobachtungen zu minimieren.

Höhenabweichung

Die Ergebnisse werden in Abbildung 15 dargestellt. Sowohl die L1 als auch die L2 Lösung sind von Beginn an auf einem sehr guten Niveau mit einer Abweichung von teils auch unter einem, bis wenig über einem Zentimeter. Die L0 Lösung weicht etwas mehr ab und bewegt sich ab einer Messdauer von 20 Minuten im Bereich von eine bis zwei Zentimetern. Eine Genauigkeitssteigerung im Vergleich zur Einzelmessung um 0 Uhr, beziehungsweise um 4 Uhr ist vorhanden. Das Mittel zeigt weniger Sprünge zwischen den Zeitintervallen. Daraus lässt sich schließen, dass kurzzeitige Einflüsse auf die GNSS- Genauigkeit durch Mittelbildung an Wichtigkeit verlieren.

Abweichung der Höhe vom Soll in Abhängigkeit von der Messdauer

Station Freising mit Basislinie zu München am 09.06.2019 gemittelt aus Doppelmessung

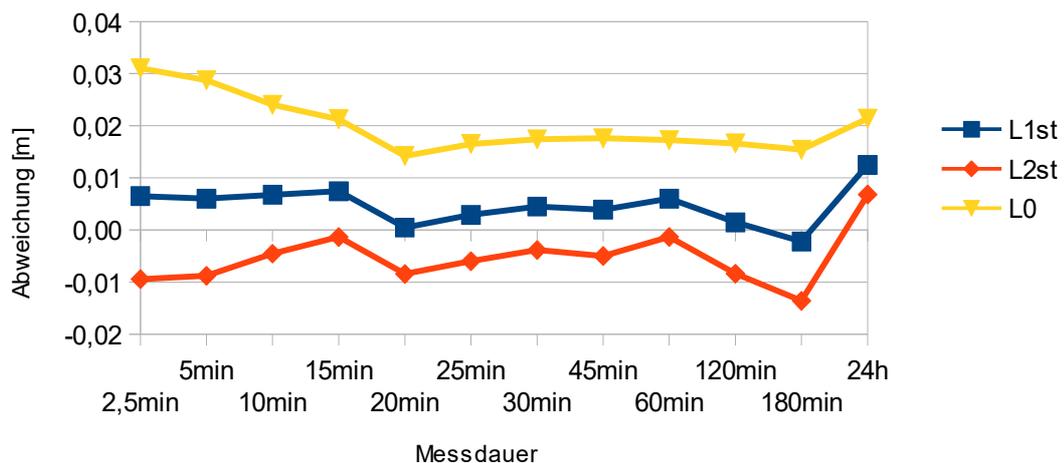


Abbildung 15: München - Freising am 09.06.2019 Doppelmessung Höhenabweichung

Lageabweichung

Die Abweichung der Lage vom Soll ist in Abbildung 16 und 17 aufgezeigt. Ebenso wie bei der Höhe ist auch beim Rechtswert und beim Hochwert eine Genauigkeitssteigerung im Vergleich zur einzelnen Messung zu beobachten. Die L0 Lösung führt hier zum besten Ergebnis. L1 und L2 unterliegen, wie in Abbildung 17 zu sehen, größeren Schwankungen in Bezug auf die verschiedenen Intervalle.

Rechtswertabweichung vom Soll in Abhängigkeit von der Messdauer

Station Freising mit Basislinie zu München am 09.06.2019 gemittelt aus Doppelmessung

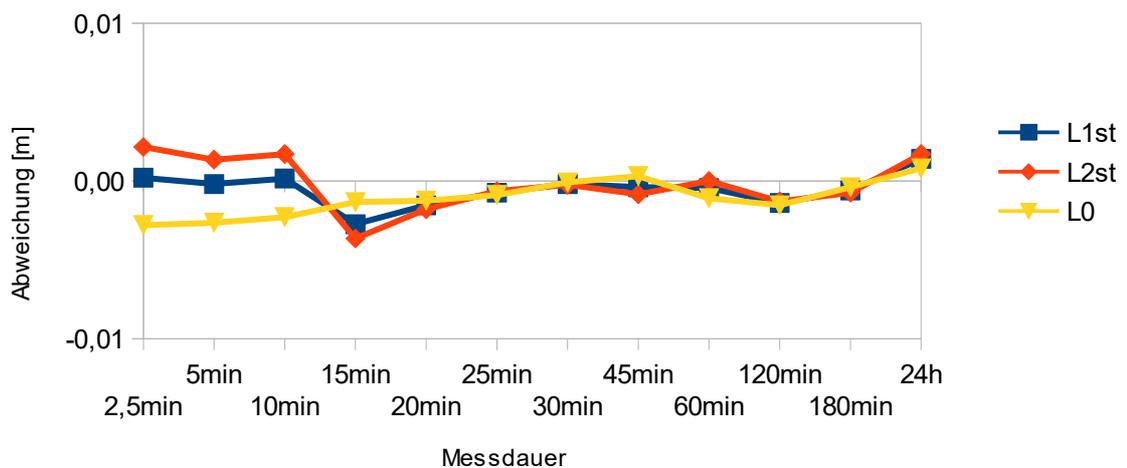


Abbildung 16: München-Freising am 09.06.2019 Doppelmessung Rechtswertabweichung

Hochwertabweichung vom Soll in Abhängigkeit von der Messdauer

Station Freising mit Basislinie zu München am 09.06.2019 gemittelt aus Doppelmessung

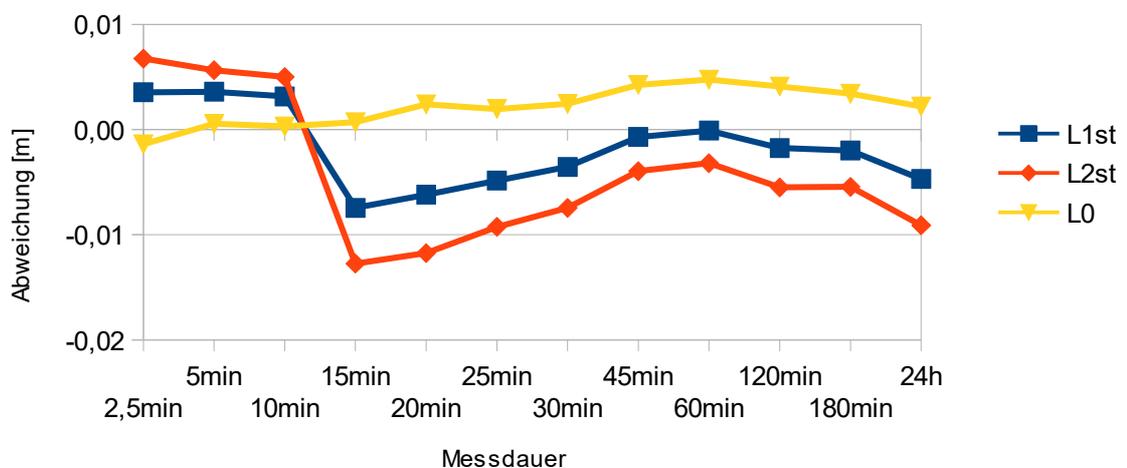


Abbildung 17: München - Freising am 09.06.2019 Doppelmessung Hochwertabweichung

3.4.2.2 Auswertung am 10.06.2019

Weil an diesem Tag das Hagelunwetter über München und Freising zog, sind große Einflüsse durch die Troposphäre zu erwarten. Das Unwetter nimmt etwa auf den Zeitraum von 15:30 Uhr bis 17 Uhr Einfluss. Das Auswerteprinzip ist gleich zu den vorherigen Auswertungen. Es wurden die Koordinaten der Monitorstation Freising mithilfe der Referenzstation in München berechnet. Außerdem wurde eine Doppelmessung ähnlich wie am Vortag durchgeführt. Ebenfalls sind die gleichen Messintervalle berechnet worden. Für die folgenden Auswertungen wurden neben L1, L2 und L0 auch die Widelane und die Narrowlane Lösung berechnet, um eine vollständigere Übersicht über die verschiedenen Lösung abzubilden.

Die Auswertung an diesem Tag mit der Basislinie München Freising ist dafür gedacht, die Messgenauigkeit im schlechtesten Fall darzustellen. Dieser Fall soll dann im Vergleich zu den guten Messbedingungen am Vortag gestellt werden.

Der Fokus dieser Arbeit soll bei der Höhengenaugigkeit liegen, weshalb ab dieser Messreihe auch nur diese ausgewertet wurde. Aus den bereits dargestellten Messreihen geht hervor, dass die Lage nicht besonders von längerer Messdauer profitiert.

Auswertebeginn 11:00 Uhr

Der erste Satz von Messungen wurde um 11 Uhr begonnen. Dadurch ist die erste Messreihe mit ihren Messintervallen um 14 Uhr beendet, sodass noch eine Stunde Pause zum nächsten Satz, der während des Gewitters aufgenommen werden soll, bleibt. Mit dieser Auswertung soll untersucht werden, ob durch den ersten Satz bei normalen Messbedingungen, die Einflüsse während des Gewitters im zweiten Satz durch Mittelbildung minimiert werden können.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 18 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Lösungen L1, L2 und LN eine ähnliche Kurve beschreiben. Diese drei Lösungen haben geringere Abweichungen vom Soll als die L0 Lösung. Es sind keine verringerten Abweichungen zu erkennen, wenn ab der 20 Minuten Marke der Troposphäre-Einfluss von WaSoft geschätzt wird. Ebenso hat die Messdauer hier keinen deutlichen Einfluss auf die drei besten Lösungen. Die L0 Lösung wird im Gegensatz dazu mit zunehmender Beobachtungsdauer besser. Nach einer Beobachtungsdauer von zwei Stunden liegen die Abweichungen bei dieser Lösung erstmals unter zwei Zentimeter. Nach einer Stunde Messzeit nimmt der Unterschied zwischen den fünf einzelnen Lösungen ab.

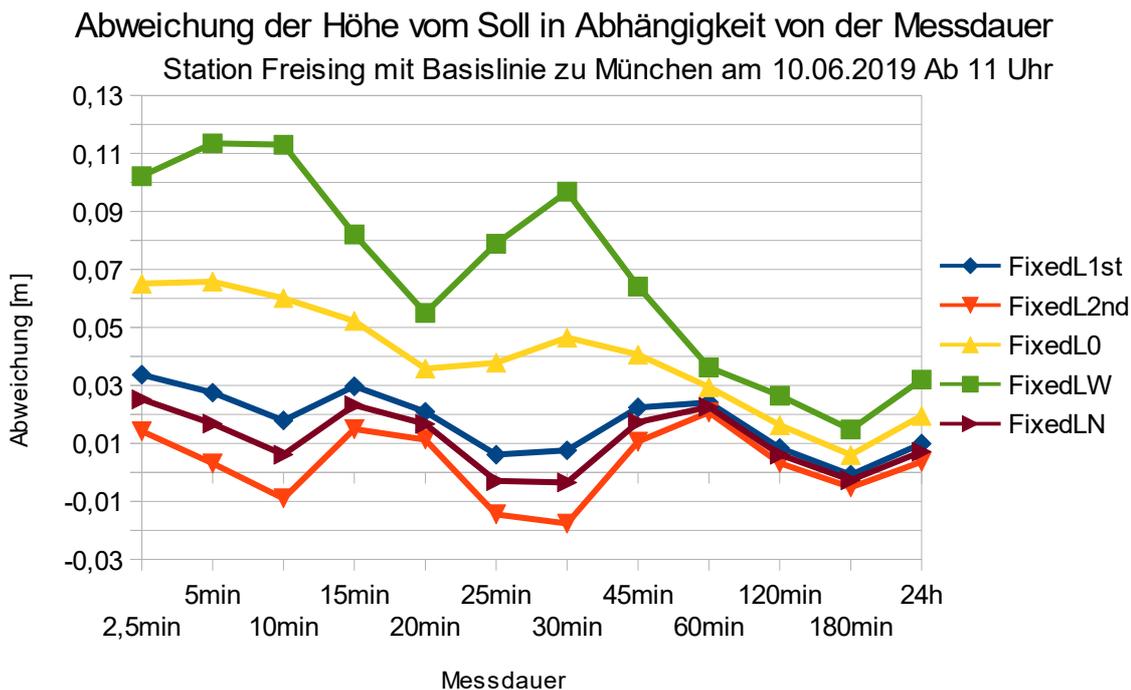


Abbildung 18: München - Freising am 10.06.2019 ab 11 Uhr Höhenabweichung

Auswertebeginn 15:00 Uhr

Der Zeitraum ist so gewählt, dass bereits mindestens eine halbe Stunde gemessen wurde, bevor das Unwetter seinen vollen Effekt auf die Messgenauigkeit ausübt. Damit soll getestet werden, ob eine solche Beobachtungsdauer ausreicht, um den Wettereinfluss auszugleichen.

Diese Ergebnisse sind in Abbildung 19 aufgeführt. Zu Beginn der Messreihe sind die Abweichungen erwartungsgemäß besser als bei den Intervallen, welche die Zeit des Unwetters beinhalten. Die L1, L2 und LN Lösung haben bis zur 30 Minuten Marke die niedrigsten Abweichungen vom Soll von teilweise unter einem Zentimeter. Die L0 Lösung ist etwas schlechter. Sie erreicht bis zum 30 Minuten Messintervall eine Abweichung zwischen 1 bis 2 Zentimetern. Ab 45 Minuten Beobachtungsdauer steigt bei allen Lösungen die Abweichung deutlich an. Auch nach 180 Minuten Messzeit ist die Abweichung auf einem erhöhten Niveau. Erst bei der 24 Stunden Lösung werden wieder etwa die selben Genauigkeiten wie bei 30 Minuten Messdauer erreicht. Der Einfluss des Hagelunwetters lässt sich also nicht durch nur 30 Minuten vorheriger Messzeit ausgleichen. Weil die Abweichungen genau zu dem Zeitpunkt stark ansteigen an dem das Unwetter beginnt, ist anzunehmen, dass dies der Grund für den Sprung in der Messgenauigkeit ist.

Abweichung der Höhe vom Soll in Abhängigkeit von der Messdauer

Station Freising mit Basislinie zu München am 10.06.2019 Ab 15 Uhr

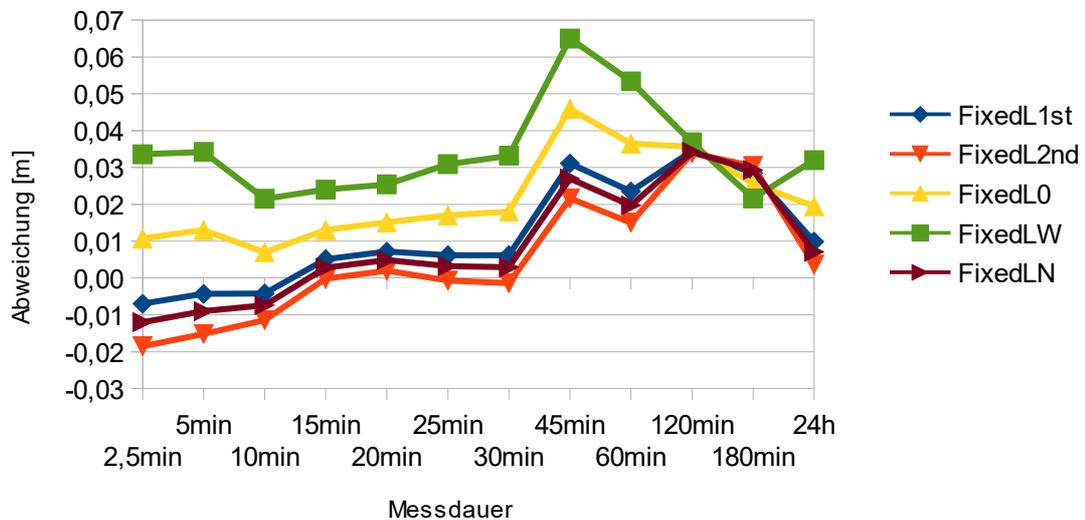


Abbildung 19: München - Freising am 10.06.2019 ab 15 Uhr Höhenabweichung

Mittel aus der Doppelmessung

Die Abweichungen aus der Messreihe beginnend um 11 Uhr und die um 15 Uhr werden wieder gemittelt. Es soll getestet werden, ob die Mittelbildung wieder zu einer Genauigkeitssteigerung führt. Ziel ist es, auch bei schlechten Messbedingungen eine ordentliche Genauigkeit von ein bis zwei Zentimetern Höhenabweichung, oder besser, zu erreichen.

Das Ergebnis ist in Abbildung 20 zu sehen. Sowohl L1 als auch L2 und LN weisen Abweichungen von ein bis zwei Zentimetern auf. Nach 30 Minuten ist noch immer ein Sprung zu erkennen. Das Ergebnis ist dennoch besser als bei der Messung um 15 Uhr. Die L0 Lösung hat durchwegs größere Abweichungen als L1, L2 und LN. Die Widelane Lösung ist auch hier die Ungünstigste.

Trotz der ungünstigen Messbedingungen ist eine Genauigkeit in der Höhe von ein bis zwei Zentimetern bei ausgewählten Frequenzlösungen zu erreichen, wenn die Beobachtungsdauer- und der Zeitpunkt, entsprechend angepasst/ verlängert werden. Nur während des Unwetters kann diese Genauigkeit nicht eingehalten werden. Auch durch die Mittelbildung können die Einflüsse hier nicht im gewünschten Maß reduziert werden.

Abweichung der Höhe vom Soll in Abhängigkeit von der Messdauer

Station Freising mit Basislinie zu München am 10.06.2019 gemittelt aus Doppelmessung

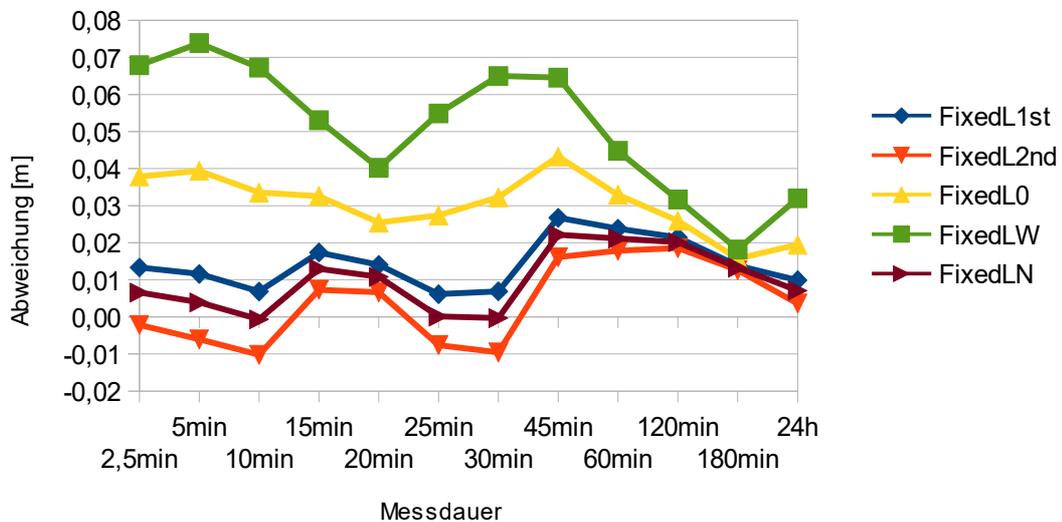


Abbildung 20: München - Freising am 10.06.2019 Doppelmessung Höhenabweichung

3.5 Test bei großem Höhenunterschied zur Referenzstation

Bei diesem Test soll untersucht werden, wie sich die Höhengenaugigkeit in Abhängigkeit von der Messdauer bei einer Basislinienberechnung mit großem Höhenunterschied zwischen Referenzstation und Rover verhält. Dazu soll die SAPOS-Station Weilheim als Referenzstation und die SAPOS-Station Garmisch als Rover verwendet werden. Dieser Test ist nicht repräsentativ für eine Anwendung unter Realbedingungen, weil die Station Garmisch keine klassische Roverhardware verwendet, so wie sie im Außendienst bei GNSS-Messungen verwendet wird. Die unten aufgeführten Ergebnisse sollten erwartungsgemäß von höherer Genauigkeit sein als in der Praxis möglich ist, zu erreichen.

3.5.1 Basislinie Weilheim – Garmisch

Die Station Weilheim liegt auf etwa 628 Metern ellipsoidischer Höhe, Garmisch auf etwa 1828 Metern ellipsoidischer Höhe. Der Höhenunterschied beträgt also etwa 1200 Meter. Bei diesem Test ist mit großem Unterschied in der Troposphäre zwischen den beiden Stationen zu rechnen, da die Atmosphäre sich mit zunehmender Höhe verändert und das GNSS Signal dadurch verschieden verzögert wird.

Es wird wieder eine Doppelmessung ausgewertet, da aus den oben aufgeführten Ergebnissen eine Genauigkeitssteigerung zu erkennen ist. Das Allgemeine Auswerteprinzip ist ebenfalls gleich. Ausgewertet wurde der 10. Juni 2019. Der Tag der Auswertung ist so gewählt, dass er mit den übrigen Basislinienauswertungen übereinstimmt. Der Einfluss durch die Ionosphäre sollte dadurch etwa identisch sein.

Auswertebeginn 08:00 Uhr

Um 8 Uhr wird mit der Messung begonnen. In Abbildung 21 zeigt sich, dass die Genauigkeit der Höhe zu Beginn auf einem guten Niveau ist. Mit der 20 Minuten Marke, ab der WaSoft den Troposphäreinfluss schätzt, werden die Abweichungen bei den Lösungen L1, L2 und LN deutlich größer. Ab diesem Zeitpunkt gewinnen diese Lösungen dann wieder stetig an Genauigkeit bis zum Ende der Messung. Die L0 Frequenzlösung wird ebenfalls mutmaßlich von der Troposphärenschätzung ab Minute 20 negativ beeinflusst. Allerdings schneidet diese Lösung bei dieser Auswertung am besten ab. Sie liefert eine Genauigkeit von unter Zwei Zentimetern. Die Widelane Lösung liefert auch hier schlechte Ergebnisse.

Abweichung der Höhe vom Soll in Abhängigkeit von der Messdauer

Station Garmisch mit Basislinie zu Weilheim am 10.06.2019 ab 8 Uhr

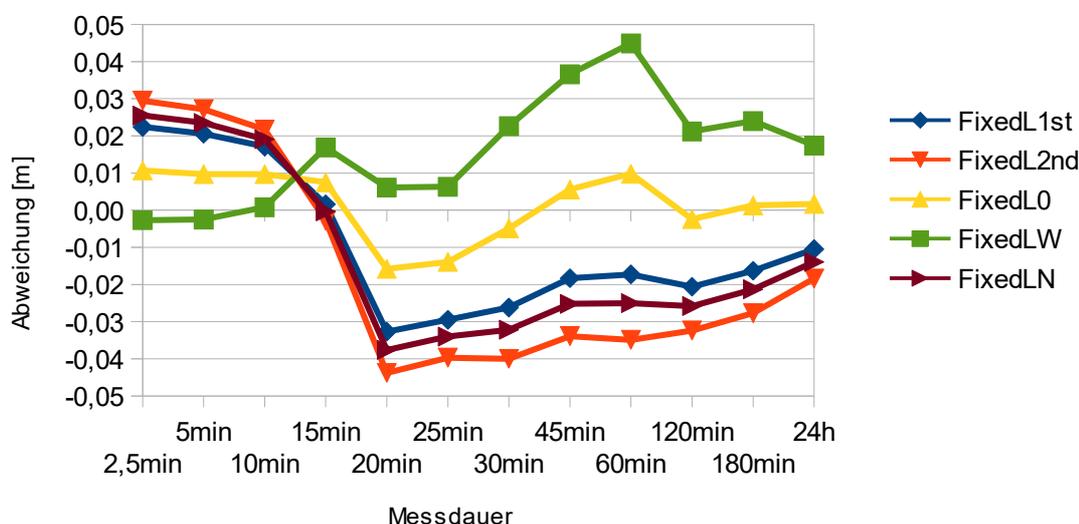


Abbildung 21: Weilheim - Garmisch am 10.06.2019 ab 8 Uhr Höhenabweichung

Auswertebeginn 15:00 Uhr

Die Zweite Messreihe beginnt um 15 Uhr. Damit sind zur ersten Messung vier Stunden Pause, sodass eine andere Satellitenkonstellation gewährleistet ist. Bei dieser Auswertung (Abbildung 22) zeigt sich ein gegensätzliches Bild zur Messung um 8 Uhr. Bis zu einer Beobachtungsdauer von 15 Minuten sind bei allen Frequenzlösungen hohe Abweichungen vorhanden. Ab 20 Minuten Messdauer, ab der die Troposphäre geschätzt wird, zeigt sich eine erhebliche Genauigkeitssteigerung. Die L0 Lösung hat ab dieser Messzeit eine Qualität von besser zwei Zentimetern. Mit L0 wird genau wie bei der Messreihe am Vormittag das beste, sicherste Ergebnis erzielt.

Die L1, L2 und LN Lösungen unterliegen selbst nach 120 Minuten noch größeren Schwankungen.

Abweichung der Höhe vom Soll in Abhängigkeit von der Messdauer

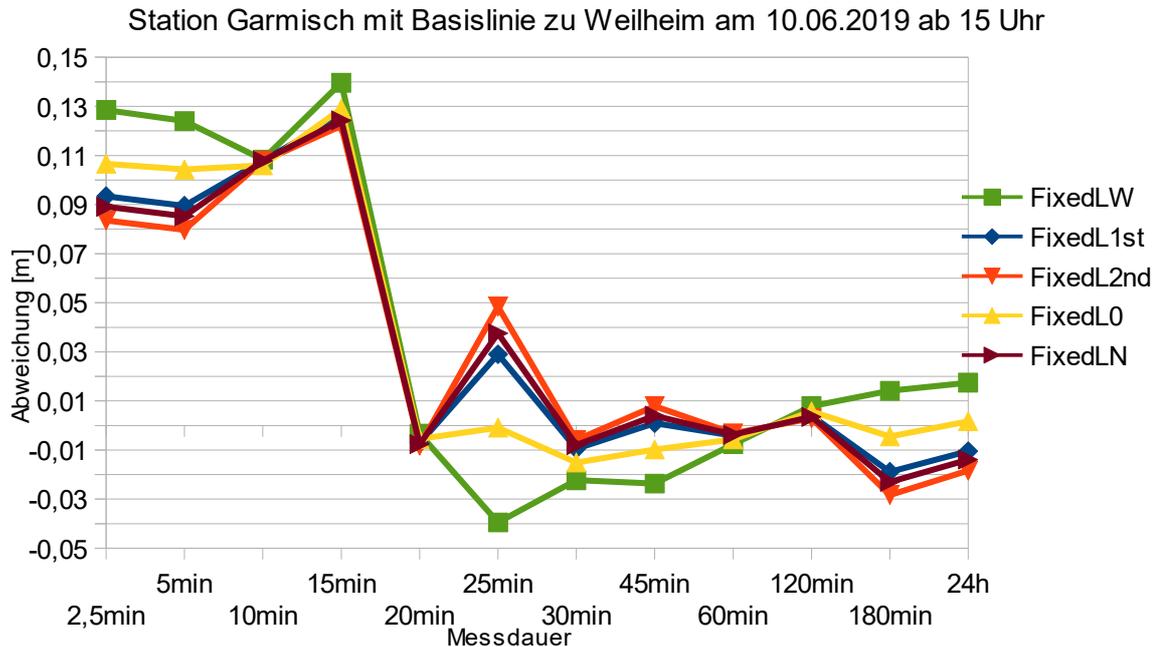


Abbildung 22: Weilheim - Garmisch am 10.06.2019 ab 15 Uhr Höhenabweichung

Mittel aus der Doppelmessung

Am Mittel aus den zwei Messreihen, dargestellt in Abbildung 23, ist eine klare Genauigkeitssteigerung ab dem Zeitpunkt zu erkennen, ab dem der Einfluss der Troposphäre durch WaSoft geschätzt wird. Alle Frequenzlösungen haben, bis zu einer Beobachtungsdauer von 15 Minuten, Abweichungen größer als fünf Zentimeter im Vergleich zum Soll.

Mit L0 kann hier das beste Ergebnis erzielt werden. Nach einer Beobachtungsdauer von 20 Minuten ist eine Genauigkeit von einem bis zwei Zentimetern erreicht. Nach etwa 45 Minuten sind die Abweichungen vom Soll kleiner als ein Zentimeter.

Die L1, L2 und LN Lösungen schneiden hier deutlich schlechter ab als L0. Die Höhe der Abweichungen schwankt bei diesen Lösungen stärker und ist allgemein auf einem schlechteren Niveau. Mit der Widelane Frequenzlösung wird ein ähnliches Ergebnis erreicht. LW ist etwa gespiegelt zu L1, L2 und LN.

Abweichung der Höhe vom Soll in Abhängigkeit von der Messdauer

Station Garmisch mit Basislinie zu Weilheim am 10.06.2019 gemittelt aus Doppelmessung

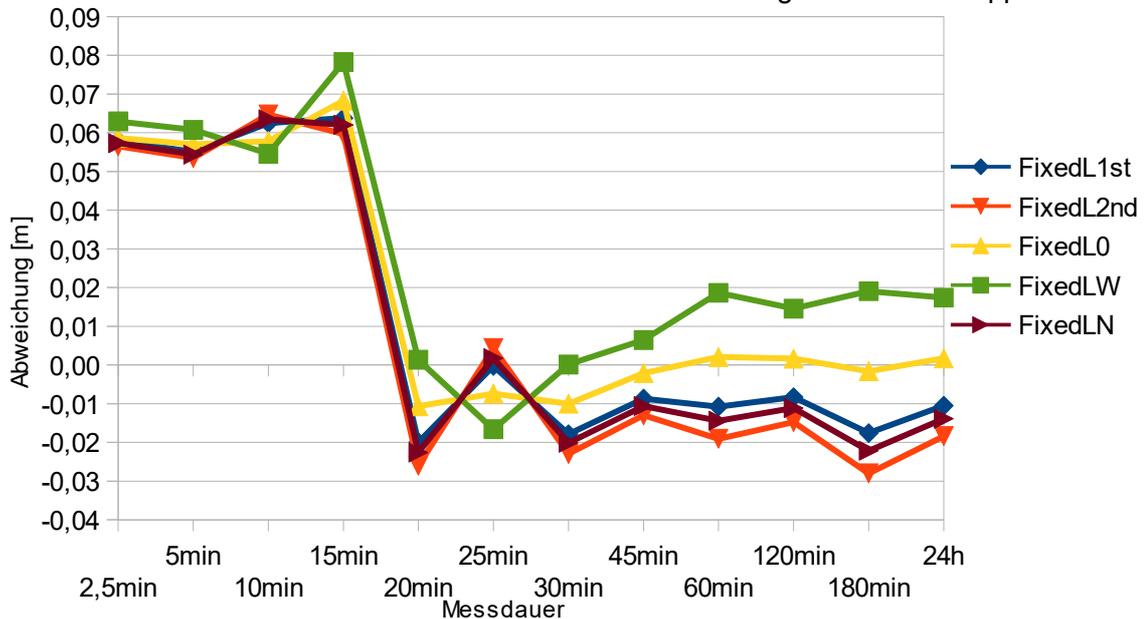


Abbildung 23: Weilheim - Garmisch am 10.06.2019 Doppelmessung Höhenabweichung

3.6 Analyse der Troposphärenschätzung

Die bisher dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die mit GNSS erreichbaren Genauigkeiten stark mit dem Wettergeschehen zusammenhängen. Dies gilt für Basislinien mit großem Unterschied in der Höhe und für Beobachtungen aus geringem Höhenunterschied zwischen Referenzstation und Rover. Auch wenn der Einfluss durch die Troposphäre groß ist, zeigt sich, dass mithilfe der angewandten Troposphärenschätzung dieser verkleinert werden kann. Jedoch geht aus manchen durchgeführten Auswertungen hervor, dass die Troposphärenschätzung entweder keine Verbesserung bewirkt oder das dadurch das Ergebnis sogar verschlechtert wird (Abbildung 21). Mit den Folgenden Tests soll ermittelt werden, ob die Troposphärenschätzung immer empfehlenswert ist und ob die ab Minute 20 beobachteten Veränderungen auf diese zurückzuführen ist. Außerdem wird untersucht, ob die Troposphärenschätzung auch mit weniger als 20 Minuten Beobachtungsdauer sinnvoll ist und somit auch bei kürzeren Messdauern eine gute Genauigkeit erreichbar ist.

Mit dem Ausdruck Troposphärenschätzung ist in dieser Arbeit meist der troposphärische Restfehler gemeint. Wird keine Schätzung durchgeführt, werden dennoch von WaSoft Standardatmosphärenmodelle verwendet.

3.6.1 Basislinie Weilheim - Garmisch am 10.06.2019 ab 15 Uhr

Diese Basislinie zeigt, dargestellt in Abbildung 22, zu diesem Auswertzeitpunkt eine deutliche Verbesserung bei den Abweichungen für alle Frequenzlösungen 20 Minuten Beobachtungsdauer.

Nun soll die Gesamte Messreihe erneut ausgewertet werden. Dabei soll der Troposphäre-Einfluss bereits ab dem 2,5 Minuten Intervall geschätzt werden. Bei einer Messrate von einer Messung alle 30 Sekunden ergibt das nur fünf Beobachtungen, aus denen der Einfluss geschätzt werden soll.

Mit Schätzung des relativen Troposphäreneinflusses

Für jedes Beobachtungsintervall bei dieser Auswertung wurde der Einfluss durch die Troposphäre mit WaSoft geschätzt. Die Ergebnisse ab der 20. Minute sind hier identisch mit denen aus Abbildung 22. Die L1, L2 und L0 Lösungen haben hier bis zu einer Messdauer von 10 Minuten deutlich höhere Abweichungen als bei der Auswertung des selben Zeitraums ohne Troposphärenschätzung. Ab 15 Minuten ist die Abweichung bei diesen Lösungen allerdings niedriger.

Bei der Widelane Lösung ist eine deutliche Verbesserung zu erkennen. Auch die L0 Lösung profitiert hier von der Troposphärenschätzung bereits ab 2,5 Minuten.

Abweichung der Höhe vom Soll in Abhängigkeit von der Messdauer

Station Garmisch mit Basislinie zu Weilheim am 10.06.2019 ab 15 Uhr
mit Troposphärenschätzung von Anfang an.

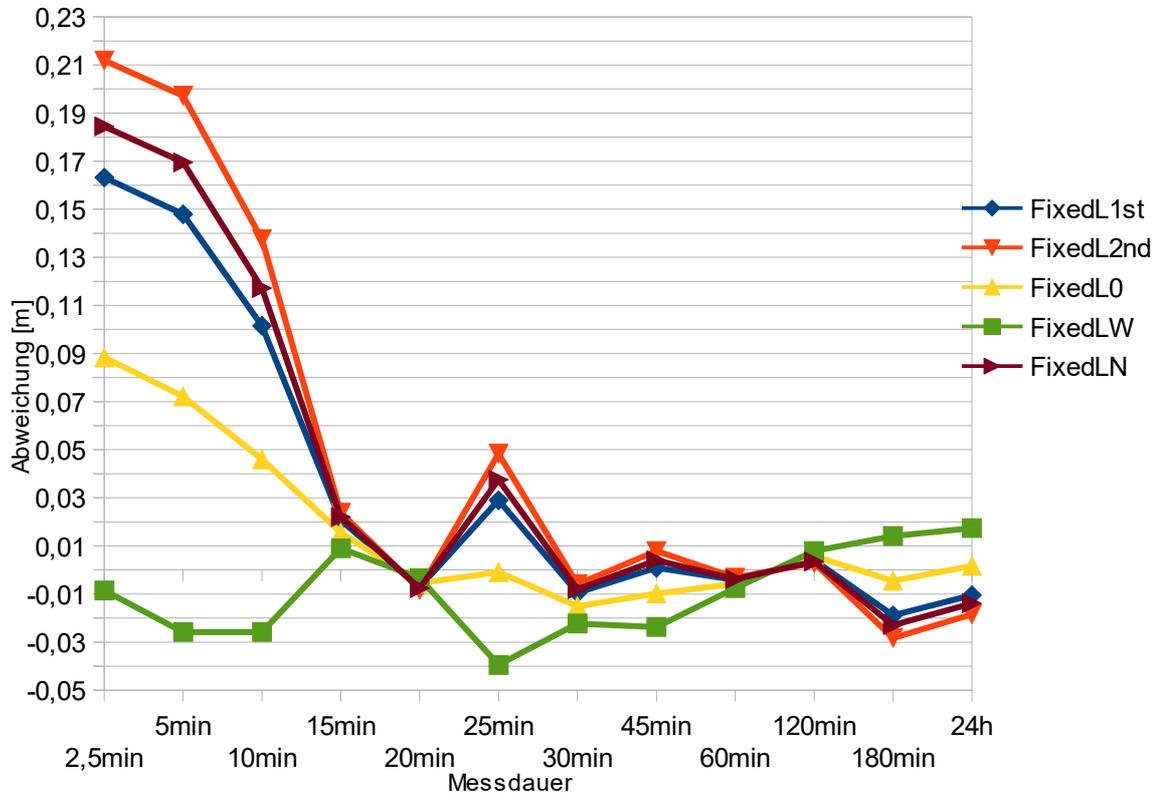


Abbildung 24: Weilheim - Garmisch am Höhenabweichung mit Troposphärenschätzung

In der unten dargestellten Abbildung 25 ist der Unterschied zwischen L0 mit Troposphärenschätzung ab 20 Minuten und von L0 mit Schätzung von Beginn an verdeutlicht. Es kann hieraus angenommen werden, dass auch aus nur wenigen Beobachtungen Troposphärenparametern geschätzt werden können, welche sich positiv auf die Genauigkeit der Messung auswirken. Weil die L1, L2 und LN Lösungen das Gegenteil abbilden, kann keine allgemein gültige Aussage getroffen werden. In diesem Beispiel sind zumindest ab 15 Minuten bei allen Frequenzlösungen Verbesserungen durch die Troposphärenschätzung erkennbar.

Abweichung der Höhe vom Soll in Abhängigkeit von der Messdauer

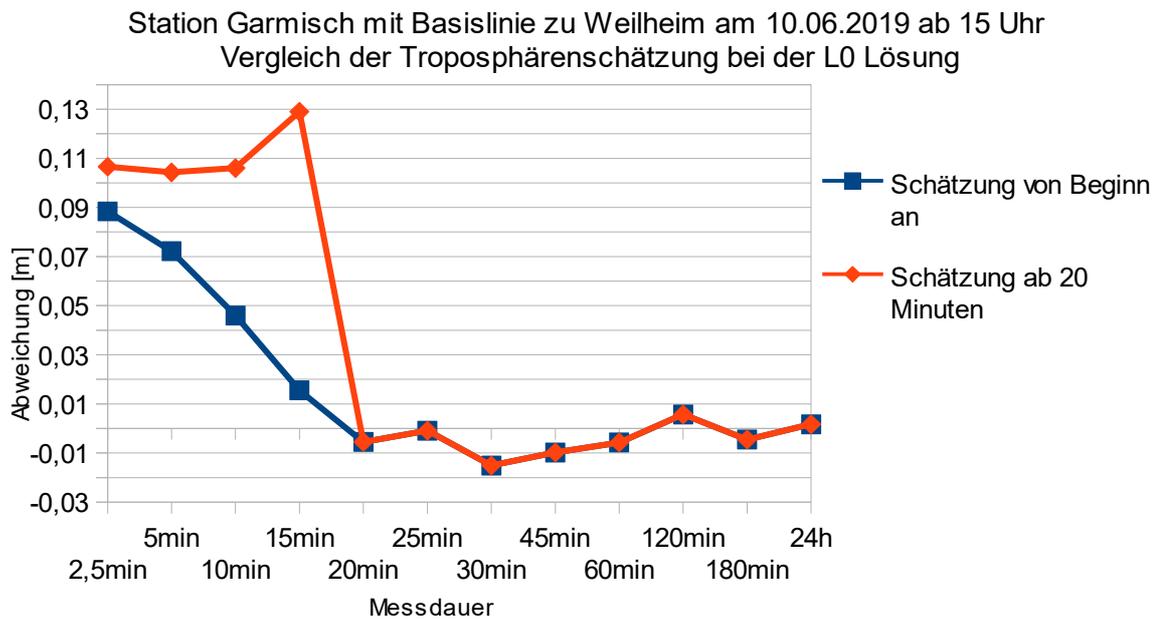


Abbildung 25: Vergleich L0 mit/ ohne Troposphärenschätzung

Ohne Schätzung des relativen Troposphäreneinflusses

Die selbe Basislinie zum identischen Zeitpunkt wurde zusätzlich komplett ohne Troposphärenschätzung ausgewertet. Dadurch soll dargestellt werden, welche Abweichungen durch den Troposphäreneinfluss entstehen, beziehungsweise korrigiert werden. Aus dem in Abbildung 26 dargestellten Kurvenverlauf ist zu erkennen, dass selbst nach 120 Minuten Beobachtungsdauer, die Abweichungen von der Sollhöhe größer als acht Zentimeter sind. Dies gilt für alle ausgewerteten Frequenzlösungen. Selbst nach 24 Stunden Dauermessung sind Abweichungen in der Größenordnung von vier Zentimetern vorhanden. Bei einer Basislinie mit großem Höhenunterschied zwischen Referenzstation und Rover ist es ausgehend von diesen Ergebnissen sinnvoll, den Troposphäreneinfluss, nach mindestens 15 Minuten Messdauer, mithilfe der Auswertesoftware zu schätzen.

Abweichung der Höhe vom Soll in Abhängigkeit von der Messdauer

Station Garmisch mit Basislinie zu Weilheim am 10.06.2019 ab 15 Uhr ohne Troposphärenschätzung

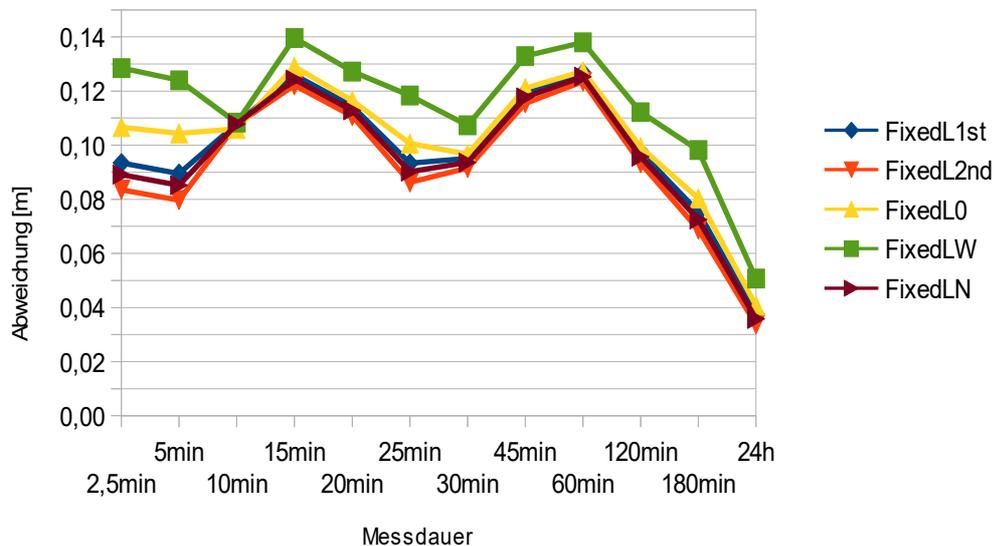


Abbildung 26: Weilheim – Garmisch Höhenabweichung ohne Troposphärenschätzung

3.6.2 Basislinie München – Freising 10.06.2019 ab 15 Uhr

Bei dieser Basislinie existiert kein großer Höhenunterschied zwischen Referenzstation und Rover. München liegt auf 580, Freising auf 528 Metern ellipsoidischer Höhe. Damit beträgt der Unterschied nur 52 Meter. Dennoch übt die Troposphäre hier großen Einfluss in Form des Hagelunwetters aus. Die folgenden Auswertungen sollen zeigen, ob kurzzeitige, starke Wettereinflüsse durch Troposphärenschätzung minimiert werden können oder ob es besser ist, in diesem Fall keine Troposphäre zu schätzen. Höhepunkt des Hagelunwetters war etwa um 16 Uhr.

Mit Schätzung des relativen Troposphäreneinflusses

In Abbildung 27 ist das Ergebnis zu sehen, wenn bei jedem dargestelltem Intervall der relative Troposphäre-Einfluss geschätzt wird. Im Gegensatz zur Auswertung bei großem Höhenunterschied haben die L1, L2 und LN Lösungen hier von Messbeginn an hohe Genauigkeiten von teilweise unter einem Zentimeter. Während des Unwetters steigen die Abweichungen dieser Lösungen auf mehr als drei Zentimeter, selbst nach 120 Minuten Messdauer. Die L0 Lösung beschreibt einen ähnlichen Verlauf, hat jedoch höhere Abweichungen von der Soll-Höhe. In den ersten 15 Minuten der Messung ist L0 hier außerdem schlechter verglichen mit Abbildung 19.

Abweichung der Höhe vom Soll in Abhängigkeit von der Messdauer

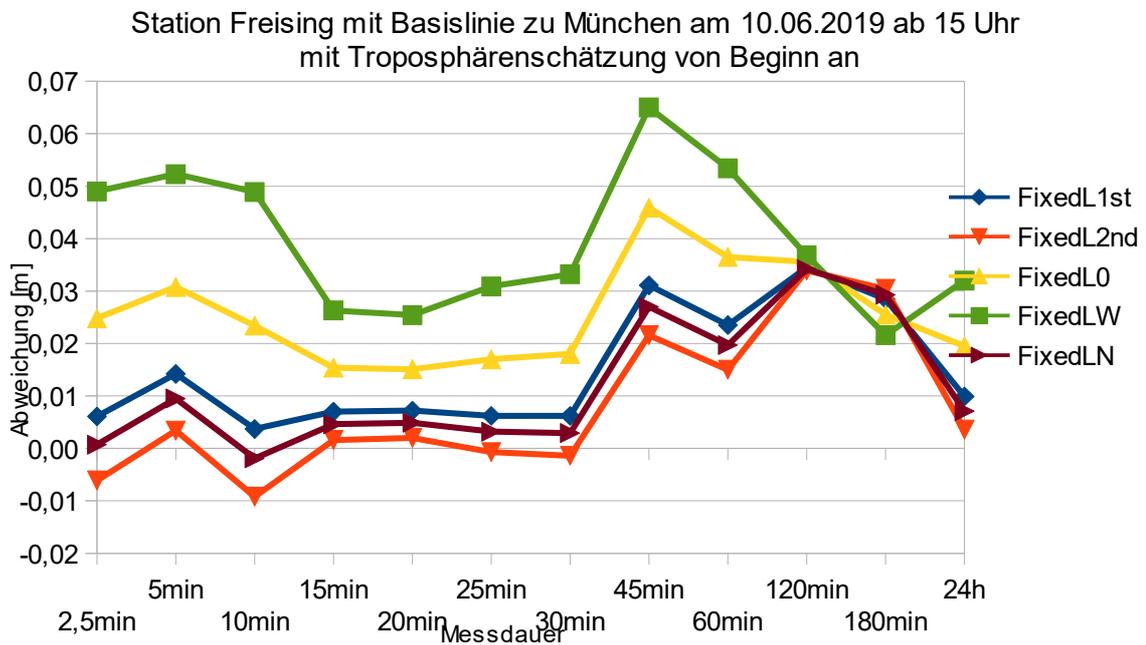


Abbildung 27: München - Freising Höhenabweichung mit Troposphärenschätzung

Ohne Schätzung des relativen Troposphäreneinflusses

Die Ergebnisse ohne Troposphärenschätzung zeigen in diesem Beispiel (Abbildung 28), dass auch ohne Beachtung dieser Einflüsse hohe Genauigkeiten erreicht werden können. Abgesehen von dem Ergebnis bei der 60 Minuten Marke sind die Abweichungen aller Frequenzlösungen außer LW immer unter zwei Zentimetern. Im Gegensatz zum Fall mit Troposphärenschätzung erzeugt das Unwetter nur einen einzelnen Sprung in den Messdaten bei 60 Minuten. Im nächsten Intervall bei 120 Minuten sind die Abweichungen wieder auf niedrigem Niveau. Beim vorherigen Beispiel (vgl. Abbildung 27) waren die Beeinträchtigungen selbst nach 180 Minuten Beobachtungsdauer vorhanden.

Das Ergebnis dieser Auswertung zeigt, dass kurzzeitige, starke Wettereinflüsse bei einer GNSS Messung, wie sie beispielsweise bei einem Hagelgewitter auftreten, durch Troposphärenschätzung nicht immer zufriedenstellend minimiert werden können.

Abweichung der Höhe vom Soll in Abhängigkeit von der Messdauer

Station Freising mit Basislinie zu München am 10.06.2019 ab 15 Uhr
ohne Troposphärenschätzung

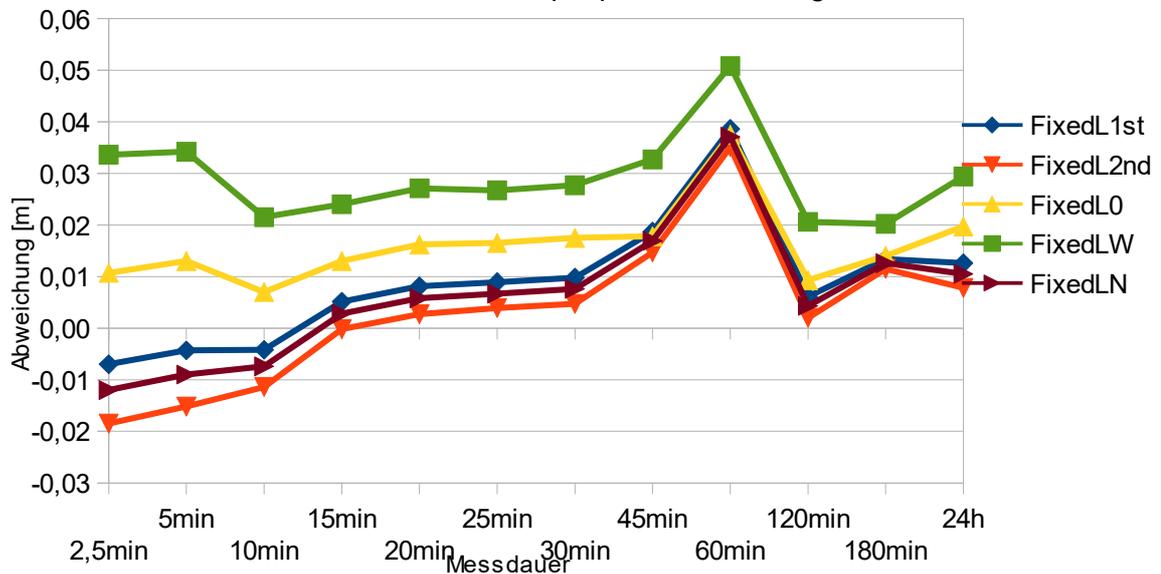


Abbildung 28: München - Freising Höhenabweichung ohne Troposphärenschätzung

Abbildung 29 zeigt im direkten Vergleich den Unterschied zwischen den Lösungen L0 mit Troposphärenschätzung (L0t) und L0 ohne Troposphärenschätzung (L0-t) beziehungsweise L1t und L1-t. Aus diesem Vergleich kann abgeleitet werden, dass ab einer Beobachtungsdauer von 15 bis 20 Minuten der Troposphäreneinfluss sinnvoll geschätzt werden kann. Ein ähnliches Ergebnis geht aus Abbildung 24 hervor.

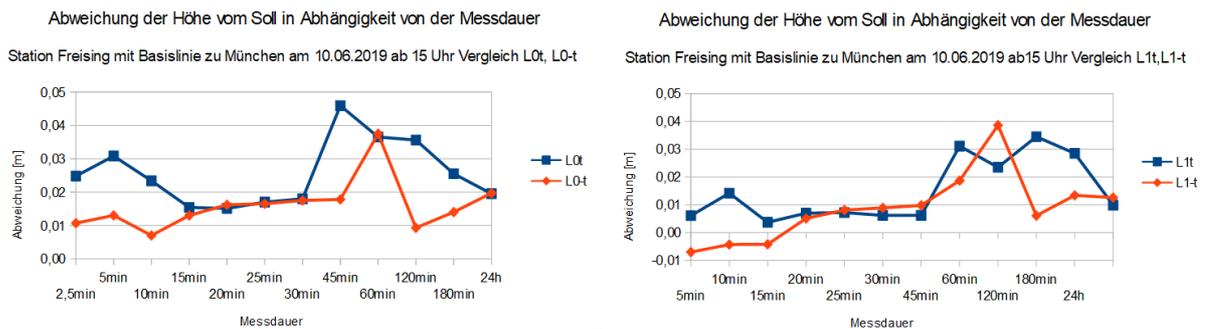


Abbildung 29: Vergleich der Troposphärenschätzung L0t/ L0-t und L1t/ L1-t

3.7 Diskussion und Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Auswertungen zeigen, dass wie erwartet, die Höhengenaugkeit schlechter ist als die Genauigkeit der Lage. Mit L0 konnte die Lage bei guten Messbedingungen auch bei nur relativ kurzer Messdauer mit einer Genauigkeit besser einem Zentimeter bestimmt werden. Mit zusätzlicher Messdauer ist außerdem kaum eine weitere Genauigkeitssteigerung zu beobachten. Wenn bei einer GNSS- Messung also nur die Lage, nicht aber die Höhe bestimmt werden soll, so ist eine Auswertung der Messdaten im Postprocessing nicht wirtschaftlich. In den durchgeführten Basislinienauswertungen war die Genauigkeit der Lage nach 2,5 Minuten Messdauer auf einem ähnlichen Niveau wie in den darauf folgenden Zeitintervallen. Eine Genauigkeitssteigerung der Lage durch Auswertung mit Postprocessing Verfahren macht, wenn überhaupt, erst nach deutlich längeren Beobachtungszeiten Sinn, als in dieser Arbeit durchgeführt wurden. Beim Vergleich der Frequenzlösungen fällt auf, dass die L0 Lösung bei der Lageauswertung immer das beste Ergebnis liefert. Die L1 und L2 Lösungen sind unbeständiger. Sie weichen stärker vom Soll ab und schwanken im Verlauf der Beobachtungsintervalle.

Bei der Auswertung der Höhe fällt auf, dass bei Basislinien mit geringem Höhenunterschied zwischen Referenzstation und Rover das beste Ergebnis oft mit L1, L2 oder LN erreicht wird. Bei der Basislinie mit großem Höhenunterschied jedoch liegt L0 klar vorne. Mit L0 wird hier das Ergebnis mit der höchsten Genauigkeit und den geringsten Schwankungen erzeugt. Im Gegensatz zur Lage scheint bei der Höhe eine verlängerte Beobachtungszeit und eine Postprocessing Auswertung sinnvoll zu sein. In den meisten Fällen kann ab einer Beobachtungsdauer von 20 Minuten und bei angewandter Troposphärenschätzung eine Genauigkeit von einem bis zwei Zentimetern erreicht werden. Es werden zwar auch teilweise bessere Ergebnisse erzielt, doch diese sind nicht sehr zuverlässig, wenn man ihre Schwankungen auch nach langer Beobachtungszeit bedenkt. Ist es das Ziel, möglichst gute Höhen mit GNSS zu bestimmen, sollte mindestens 20 Minuten gemessen werden. Wirklich bessere Genauigkeit als nach 20 Minuten werden wenn überhaupt, erst mit deutlich längerer Beobachtungsdauer ($>24h$) erreicht.

Generell ist zu sagen, dass jede durchgeführte Auswertung zu unterschiedlichen, zum Teil auch gegensätzlichen Ergebnissen geführt hat. Um allgemein gültige Aussagen treffen zu können müssten zu jedem in dieser Arbeit dargestellten Auswerteszenario mehrere verschiedene Basislinien berechnet werden. Damit könnten Ausreißer besser identifiziert werden. Aus zeitlichen Gründen konnten diese Berechnungen nicht mehr durchgeführt werden. Weil bei der Wahl der Frequenzlösungen einmal L0, ein anderes Mal L1, L2 oder LN zum besten Ergebnis geführt haben, sollte von Beginn an nur eine Lösung gewählt werden. L0 eignet sich dabei am besten, weil damit immer relativ hohe Genauigkeiten erreicht wurden und keine allzu großen Genauigkeitsschwankungen bei den verschiedenen Auswerteintervallen auftraten.

Neben der Verlängerung der Beobachtungszeit kann die Genauigkeit auch durch eine Doppelaufnahme deutlich erhöht werden. Mit einer zeitlichen Pause von mindestens einer Stunde zwischen den Aufnahmen konnten Verbesserungen beobachtet werden, die sich positiver auf das Messergebnis auswirkten als zusätzliche Beobachtungszeit. Eine

Doppelmessung ist nach den Ergebnissen der Auswertungen einer überlangen Beobachtungszeit vorzuziehen, außer die einzelne Messzeit erstreckt sich auf den Bereich von 24 Stunden. Am besten sollte also zuerst mindestens eine 20 Minuten lange Messung erfolgen. Mit einem Abstand von ein bis zwei Stunden sollte dann eine zweite auf dem selben Punkt mit gleicher Messdauer erfolgen. Auf diese Weise können kurzzeitige Fehlereinflüsse, wie sie zum Beispiel durch nahe Gewitter verursacht werden, minimiert werden.

Aus den Troposphärenschätzungstests geht hervor, dass erst nach einer gewissen Messdauer von ungefähr 20 Minuten eine sinnvolle Schätzung durchgeführt werden kann. In den berechneten Beispielen waren zwar teilweise schon bei geringerer Beobachtungsdauer Verbesserungen erkennbar, diese scheinen aber eher zufällig zu sein. Ein klares Ergebnis kann auch hier erst nach deutlich mehr Stichproben erfasst werden. Auch scheint ein Unterschied zwischen den Frequenzlösungen vorhanden zu sein. Klar erkennbar ist, dass bei normalen Messbedingungen, eine Schätzung des relativen Troposphäreinflusses nach einer Messdauer von 20 Minuten immer zu einer Genauigkeitssteigerung geführt hat. Zum Zeitpunkt des Hagelunwetters, also bei schlechten, unvorhersehbaren Messbedingungen, war zu erkennen, dass in einem solchen Fall besser keine Schätzung durchgeführt werden sollte. In der Praxis wäre es natürlich am besten bei solchen Extrembedingungen keine GNSS-Messungen durchzuführen. Die Einflüsse durch das Wettergeschehen sind schwer einzuschätzen. Im Zweifel sollten dennoch, wenn möglich die relativen Zenitverzögerungen durch die Troposphäre geschätzt werden. Das Wettergeschehen, insbesondere bei einem Unwetter, übt in dieser Arbeit nachgewiesen einen entscheidenden Einfluss auf die Genauigkeit der Messung aus.

Allgemein ist zu sagen, dass bei allen durchgeführten Auswerteszenarien, welche den Normalfall zeigen, die Höhe auf ein bis zwei Zentimeter genau bestimmt werden konnte. Die Lage konnte meist auf unter ein Zentimeter genau bestimmt werden. Die verwendete Empfängerhardware ist zwar nicht direkt mit einer klassischen Ausrüstung eines Geodäten im Außendienst zu vergleichen, dafür sind die Basislinienlängen in der Praxis in der Regel kürzer.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde hauptsächlich die äußere Genauigkeit der Messreihen, also die Abweichung der Einzelmessung von der Soll-Koordinate beachtet. Die innere Genauigkeit jeder Messreihe wurde ebenfalls berechnet. Die Standardabweichung befinden sich im Anhang. Wa2 gibt bei jeder Basislinienberechnung eine Standardabweichung für eine einzelne Beobachtung aus. Diese betrug in der Regel unter ein Zentimeter. Die Aussagekraft dieser Abweichung ist jedoch nicht sehr hoch. Für die präsentierten Ergebnisse ist dies nicht relevant.

4 Fazit

Die erste Schwierigkeit bei der Postprocessing-Auswertung war es, das Ausgangsformat RINEX zu verstehen. Der Einstieg in WaSoft war ebenfalls eine Hürde. Nach einiger Eingewöhnungszeit konnten dann die ersten Basislinienberechnungen durchgeführt werden. Die daraus entstandenen Ergebnisdateien sind nicht benutzerfreundlich erklärt, weshalb eine gute Einarbeitung in WaSoft nötig ist. Nachdem die anfänglichen Unklarheiten beseitigt waren, war die restliche Auswertung kein Problem mehr. Beim Verwalten von vielen Messdaten ist auf eine genaue Benennung aller Dateien zu achten, damit keine Ergebnisse vertauscht werden und die richtigen Beobachtungsdateien mit ihren Antennenkorrekturdateien ausgewählt werden. Eine übersichtliche Ordnerstruktur dazu ist sehr empfehlenswert.

Die durch diese Arbeit erhaltenen Ergebnisse zeigen in erster Linie Tendenzen an. Weil sich die Ergebnisse von Basislinie zu Basislinie unterscheiden und teils auch widersprechen, sollten keine allgemeingültigen Schlüsse gezogen werden. Es bräuchte dazu eine viel größere Anzahl an Stichproben.

Dennoch kann man sagen, dass per Postprocessing bei einer Basislinienauswertung mit einer Beobachtungsdauer von 20 Minuten mit anschließender Doppelaufnahme bei den meisten Auswerteszenarien eine gute Höhengenaugigkeit von einem bis zwei Zentimetern erreichbar ist. Bei günstigen Messbedingungen kann dieser Wert noch unterboten werden. Weiter konnte im Bereich der Troposphärenschätzung anhand der Basislinie mit großem Höhenunterschied bewiesen werden, dass durch den berechneten, tatsächlichen Troposphäreneinfluss auf eine Station, die Abweichungen minimiert werden können, was sich besonders positiv auf solch steile Basislinien auswirkt. Dieser Wettereinfluss auf die GNSS- Genauigkeit ist auch bei geringerem Höhenunterschied nicht zu vernachlässigen, wie der Test mit der Basislinie München – Freising am Tag des Unwetters zeigt.

Die durchgeführten Auswertungen stützen sich auf die Annahme, dass die Soll-Koordinaten der Stationen mit absoluter Genauigkeit vorhanden sind. Abhängig davon, wie diese Stationen eingemessen wurden, ist diese Annahme natürlich nicht zu 100% richtig, da auch diese Koordinaten nur Näherungen zur tatsächlichen Position sind. Für die Einordnung der Ergebnisse dieser Arbeit sollte diese Tatsache nicht außer Acht gelassen werden. Jeder Fehler bei der Einmessung der Referenzstation verfälscht das Ergebnis der GNSS-Auswertung um den gleichen Betrag.

5 Literaturverzeichnis

Bauer, Manfred: Vermessung und Ortung mit Satelliten (2018). 7., neu bearbeitete und erweiterte Auflage (E-Book). Wichmann Verlag, Berlin.

Bundesamt für Kartographie und Geodäsie: Die Höhenbezugsfläche von Deutschland.
<https://www.bkg.bund.de/DE/Ueber-das-BKG/Geodaesie/Integrierter-Raumbezug/Hoehenbezugsflaeche/hoehenbezug.html> (Aufgerufen am 05.01.2020)

Böttner Darcy, B. Heckmann, T. Müller, Hessisches Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformatio: Zur Genauigkeit von Höhenübertragungen mit GNSS- Verfahren.
https://www.sapos.de/files/Antennentest_Boettner_2015-06-30_final.pdf
(Aufgerufen am 12.12.2019)

Czaja, J., Fakultät für Geoinformation, Hochschule für angewandte Wissenschaften München: GlobalNavigationSatelliteSystems (SS 2018) Vorlesungsskript 4-Einflussgrößen, S. 43

daswetter.com: Wetter Graphiken
https://www.daswetter.com/wetter_Munchen-Europa-Deutschland-Bayern--sactual-27076.html
(Aufgerufen am 20.02.2020)

ESA Navipedia: Combination of GNSS Measurements
https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Combination_of_GNSS_Measurements
(Aufgerufen am 17.03.2020)

Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung: Verfahren zur Höhenbestimmung im DHHN2016 (2017).
https://sapos.bayern.de/download.php?file=SAPOS_DHHN2016.pdf (Aufgerufen am 31.12.2019)

Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung: SAPOS Faltblatt.
<https://ldbv.bayern.de/file/pdf/12304/Faltblatt.pdf> (Aufgerufen am 17.02.2020)

Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung: SAPOS Satellitenpositionierungsdienst der AdV.
<https://www.ldbv.bayern.de/produkte/dienste/sapos.html> (Aufgerufen am 05.12.2019)

Mansfeld, Werner: Satellitenortung und Navigation. Grundlagen, Wirkungsweise und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme. 3. überarbeitete und aktualisierte Auflage. Verlag Vieweg+Teubner, Wiesbaden 2010.

muenchen.de: Die Bilanz des schweren Gewitters im Großraum München.
<https://www.muenchen.de/aktuell/2019-06/unwetterwarnung-gewitter-muenchen-juni.html>
(Aufgerufen am 17.02.2020)

SAPOS Bayern: HEPS Performance.

https://sapos.bayern.de/heps_perf_1003.php (Aufgerufen am 20.12.2019)

SAPOS Bayern: Monitoring.

<https://sapos.bayern.de/monitoring.php> (Aufgerufen am 05.01.2020)

SAPOS Bayern: GPPS-Postprocessing-Datendienst (2019).

https://sapos.bayern.de/download.php?file=GPPS-Bayern_Handbuch.pdf
(Aufgerufen am 09.02.2020)

Seeber, Günter: Satellitengeodäsie: de Gruyter Verlag, 1989.

Wanninger,L.: WaSoft User´s Guide, Volume 2, Juli 2018.

<http://www.wasoft.de/> (Aufgerufen am 18.02.2020)

Wanninger, L.: Die Bedeutung der Ionosphäre für Referenstationsnetze, 4. SAPOS-Symposium, Hannover, 21.-23. Mai 2002

<http://www.wasoft.de/lit/sapossym.pdf> (Aufgerufen am 18.02.2020)

Zogg, Jean-Marie: GPS und GNSS: Grundlagen der Ortung und Navigation mit Satelliten.

http://www.zogg-jm.ch/Dateien/Update_Zogg_Deutsche_Version_Jan_09_Version_Z4x.pdf
(Aufgerufen am 24.02.2020)

6 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: SAPOS Dienste im Überblick	13
Tabelle 2: Koordinaten der verwendeten Stationen.....	17
Tabelle 3: Antennentyp und Kalibrierungsarten.....	17
Tabelle 4: Berechnete Länge und Höhenunterschied der verwendeten Basislinien.....	18

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau der Erdatmosphäre.....	7
Abbildung 2: Lage der SAPOS Referenzstationen in Bayern	12
Abbildung 3: Genauigkeit eines Nivellements	15
Abbildung 4: Genauigkeit der GNSS Höhenbestimmung	15
Abbildung 5: Koordinatendifferenzen an der Monitorstation Freising vom 10.06.2019.....	17
Abbildung 6: Pfaffenhofen - Freising am 10.06.2019 ab 15 Uhr Höhenabweichung.....	21
Abbildung 7: Pfaffenhofen-Freising am 10.06.2019 ab 15 Uhr Rechtswertabweichung.....	21
Abbildung 8: Pfaffenhofen-Freising am 10.06.2019 ab 15 Uhr Hochwertabweichung.....	22
Abbildung 9: München - Freising am 09.06.2019 ab 0 Uhr Höhenabweichung.....	23
Abbildung 10: München - Freising am 09.06.2019 ab 0 Uhr Rechtswertabweichung.....	24
Abbildung 11: München - Freising am 09.06.2019 ab 0 Uhr Hochwertabweichung.....	24
Abbildung 12: München - Freising am 09.06.2019 ab 4 Uhr Höhenabweichung	25
Abbildung 13: München - Freising am 09.06.2019 ab 4 Uhr Hochwertabweichung.....	26
Abbildung 14: München - Freising am 09.06.2019 ab 4 Uhr Rechtswertabweichung.....	26
Abbildung 15: München - Freising am 09.06.2019 Doppelmessung Höhenabweichung.....	27
Abbildung 16: München-Freising am 09.06.2019 Doppelmessung Rechtswertabweichung.	28
Abbildung 17: München - Freising am 09.06.2019 Doppelmessung Hochwertabweichung..	28
Abbildung 18: München - Freising am 10.06.2019 ab 11 Uhr Höhenabweichung.....	30
Abbildung 19: München - Freising am 10.06.2019 ab 15 Uhr Höhenabweichung.....	31
Abbildung 20: München - Freising am 10.06.2019 Doppelmessung Höhenabweichung	32
Abbildung 21: Weilheim - Garmisch am 10.06.2019 ab 8 Uhr Höhenabweichung.....	33
Abbildung 22: Weilheim - Garmisch am 10.06.2019 ab 15 Uhr Höhenabweichung.....	34
Abbildung 23: Weilheim - Garmisch am 10.06.2019 Doppelmessung Höhenabweichung....	35
Abbildung 24: Weilheim - Garmisch am Höhenabweichung mit Troposphärenschätzung....	37
Abbildung 25: Vergleich L0 mit/ ohne Troposphärenschätzung.....	38
Abbildung 26: Weilheim – Garmisch Höhenabweichung ohne Troposphärenschätzung.....	39
Abbildung 27: München - Freising Höhenabweichung mit Troposphärenschätzung.....	40
Abbildung 28: München - Freising Höhenabweichung ohne Troposphärenschätzung.....	41
Abbildung 29: Vergleich der Troposphärenschätzung L0t/ L0-t und L1t/ L1-t.....	41

8 Abkürzungsverzeichnis

AdV	Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder
DGNSS	Differential Global Navigation Satellite System
DHHN2016	Deutsches Haupthöhennetz 2016
DOP	Dilution Of Precision
EPS	Echtzeit Positionierungs Service
GCG2016	German Combined QuasiGeoid 2016
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GNSS	Globales Navigationssatellitensystem
GPPS	Geodätischer Postprocessing Positionierungs- Service
GPS	Global Positioning System
HEPS	Hochpräziser Echtzeit Positionierungs- Service
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
LDBV	Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung
PPP	Precise Point Positioning
RTK	Realtime Kinematik
SAPOS	Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung

9 Anhang

9.1 Standardabweichungen

Alle gegebenen Abweichungen sind in der Einheit Meter angegeben.

Pfaffenhofen-Freising am 10.06.2019.

Lösung (Höhe)	FixedLW	FixedL1st	FixedL2nd	FixedL0	FixedLN
Standardabweichung (innere Genauigkeit)	0,0184	0,0274	0,0310	0,0225	0,0289
Standardabweichung (äußere Genauigkeit)	0,0536	0,0317	0,0316	0,0382	0,0312
Lösung (Rechtswert)	FixedL1st	FixedL2nd	FixedL0		
Standardabweichung (innere Genauigkeit)	0,0062	0,0086	0,0040		
Standardabweichung (äußere Genauigkeit)	0,0093	0,0119	0,0066		
Lösung (Hochwert)	FixedL1st	FixedL2nd	FixedL0		
Standardabweichung (innere Genauigkeit)	0,0051	0,0076	0,0026		
Standardabweichung (äußere Genauigkeit)	0,0072	0,0088	0,0066		

München-Freising am 09.06.2019 ab 0 Uhr.

Lösung (Höhe)	L1	L2	L0
Standardabweichung (innere Genauigkeit)	0,0086	0,0164	0,0102
Standardabweichung (äußere Genauigkeit)	0,0103	0,0238	0,0160
Lösung (Rechtswert)	L1	L2	L0
Standardabweichung (innere Genauigkeit)	0,0015	0,0016	0,0018
Standardabweichung (äußere Genauigkeit)	0,0070	0,0128	0,0029
Lösung (Hochwert)	L1	L2	L0
Standardabweichung (innere Genauigkeit)	0,0046	0,0074	0,0010
Standardabweichung (äußere Genauigkeit)	0,0024	0,0019	0,0037

München-Freising am 09.06.2019 ab 4 Uhr.

Lösung (Höhe)	L1	L2	L0
Standardabweichung (innere Genauigkeit)	0,0091	0,0123	0,0088
Standardabweichung (äußere Genauigkeit)	0,0179	0,0137	0,0310
Lösung (Rechtswert)	L1	L2	L0
Standardabweichung (innere Genauigkeit)	0,0017	0,0032	0,0020
Standardabweichung (äußere Genauigkeit)	0,0018	0,0033	0,0022
Lösung (Hochwert)	L1	L2	L0
Standardabweichung (innere Genauigkeit)	0,0058	0,0110	0,0030
Standardabweichung (äußere Genauigkeit)	0,0060	0,0112	0,0035

München-Freising am 09.06.2019 Mittel aus Doppelmessung. (Varianzfortpflanzungsgesetz)

Lösung (Höhe)	L1	L2	L0
Standardabweichung (innere Genauigkeit)	0,0063	0,0103	0,0068
Standardabweichung (äußere Genauigkeit)	0,0103	0,0138	0,0174
Lösung (Rechtswert)	L1	L2	L0
Standardabweichung (innere Genauigkeit)	0,0011	0,0018	0,0013
Standardabweichung (äußere Genauigkeit)	0,0036	0,0066	0,0018
Lösung (Hochwert)	L1	L2	L0
Standardabweichung (innere Genauigkeit)	0,0037	0,0066	0,0016
Standardabweichung (äußere Genauigkeit)	0,0032	0,0057	0,0025

München-Freising am 10.06.2019 ab 11 Uhr.

Lösung (Höhe)	FixedLW	FixedL1st	FixedL2nd	FixedL0	FixedLN
Standardabweichung (innere Genauigkeit)	0,0350	0,0108	0,0123	0,0195	0,0107
Standardabweichung (äußere Genauigkeit)	0,0791	0,0211	0,0126	0,0457	0,0157

München-Freising am 10.06.2019 ab 15 Uhr.

Lösung (Höhe)	FixedLW	FixedL1st	FixedL2nd	FixedL0	FixedLN
Standardabweichung (innere Genauigkeit)	0,0129	0,0145	0,0170	0,0120	0,0155
Standardabweichung (äußere Genauigkeit)	0,0381	0,0187	0,0178	0,0254	0,0179

München-Freising am 10.06.2019 Mittel aus Doppelmessung. (Varianzfortpflanzungsgesetz)

Lösung (Höhe)	FixedLW	FixedL1st	FixedL2nd	FixedL0	FixedLN
Standardabweichung (innere Genauigkeit)	0,0186	0,0090	0,0105	0,0114	0,0094
Standardabweichung (äußere Genauigkeit)	0,0439	0,0141	0,0109	0,0261	0,0119

Weilheim-Garmisch am 10.06.2019 ab 8 Uhr.

Lösung (Höhe)	FixedLW	FixedL1st	FixedL2nd	FixedL0	FixedLN
Standardabweichung (innere Genauigkeit)	0,0151	0,0197	0,0278	0,0092	0,0232
Standardabweichung (äußere Genauigkeit)	0,0225	0,0219	0,0326	0,0094	0,0265

Weilheim-Garmisch am 10.06.2019 ab 15 Uhr.

Lösung (Höhe)	FixedLW	FixedL1st	FixedL2nd	FixedL0	FixedLN
Standardabweichung (innere Genauigkeit)	0,0674	0,0543	0,0530	0,0575	0,0536
Standardabweichung (äußere Genauigkeit)	0,0777	0,0645	0,0629	0,0678	0,0636

Weilheim-Garmisch am 10.06.2019 Mittel aus Doppelmessung.

(Varianzfortpflanzungsgesetz)

Lösung (Höhe)	FixedLW	FixedL1st	FixedL2nd	FixedL0	FixedLN
Standardabweichung (innere Genauigkeit)	0,0345	0,0289	0,0300	0,0291	0,0292
Standardabweichung (äußere Genauigkeit)	0,0404	0,0341	0,0354	0,0342	0,0345

Weilheim-Garmisch am 10.06.2019 ab 15 Uhr mit Troposphärenschätzung von Anfang an.

Lösung (Höhe)	FixedLW	FixedL1st	FixedL2nd	FixedL0	FixedLN
Standardabweichung (innere Genauigkeit)	0,0185	0,0648	0,0854	0,0342	0,0738
Standardabweichung (äußere Genauigkeit)	0,0208	0,0743	0,0986	0,0379	0,0849

Weilheim-Garmisch am 10.06.2019 ab 15 Uhr ohne Troposphärenschätzung.

Lösung (Höhe)	FixedLW	FixedL1st	FixedL2nd	FixedL0	FixedLN
Standardabweichung (innere Genauigkeit)	0,0241	0,0248	0,0256	0,0238	0,0251
Standardabweichung (äußere Genauigkeit)	0,1230	0,1053	0,1005	0,1095	0,1032

München-Freising am 10.06.2019 ab 15 Uhr mit Troposphärenschätzung von Anfang an.

Lösung (Höhe)	FixedLW	FixedL1st	FixedL2nd	FixedL0	FixedLN
Standardabweichung (innere Genauigkeit)	0,0137	0,0113	0,0141	0,0098	0,0124
Standardabweichung (äußere Genauigkeit)	0,0435	0,0192	0,0163	0,0285	0,0175

München-Freising am 10.06.2019 ab 15 Uhr ohne Troposphärenschätzung.

Lösung (Höhe)	FixedLW	FixedL1st	FixedL2nd	FixedL0	FixedLN
Standardabweichung (innere Genauigkeit)	0,0084	0,0122	0,0144	0,0077	0,0131
Standardabweichung (äußere Genauigkeit)	0,0315	0,0153	0,0147	0,0184	0,0147

9.2 Inhaltsübersicht des Datenträgers

- Bachelorarbeit
 - Bachelorarbeit in PDF- und odt-Format
- Kolloquium
 - Präsentation in PDF- und odp-Format
- Eidesstattliche Erklärung
- Zusammenfassung/ Kurzfassung
- Daten
 - Ephemeriden
 - Sitelogs
 - Stationen (RINEX-Files, ANTEX-Files)
 - Freising_1003
 - Garmisch_0285
 - München_0256
 - Pfaffenhofen_0258
 - Weilheim_1271
- Ergebnisse (Tabellen in ods-Format und Log-Files)
 - München-Freising
 - 09.06.2019
 - 10.06.2019
 - Doppelmessung
 - Tropo-Test
 - Pfaffenhofen-Freising
 - Weilheim-Garmisch
 - Doppelmessung
 - Tropo-Test



Erklärung

gemäß § 15 Abs. 5 APO in Zusammenhang mit § 35 Abs. 7 RaPO

Name: ^{Wagner} _____

Vorname: ^{Andreas} _____

Geburtsdatum: ^{24.10.1997} _____

Studiengang: ^{Angewandte Geodäsie und Geoinformatik} _____

Studiengruppe: ^{GD8} _____

Matrikel-Nr.: ⁷³⁹³¹⁴¹⁶ _____

Winter-/Sommersemester: ^{Sommersemester} _____

Betreuer/in: ^{Prof. Dr. Czaja} _____

Hiermit erkläre ich, dass ich die Bachelorarbeit selbstständig verfasst, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benutzt, sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

Neureichenau, 22.03.2020

Ort, Datum

Andreas Wagner

Unterschrift

Bitte geben Sie diese Erklärung unterschrieben zusammen mit der Bachelorarbeit bei der Betreuerin / dem Betreuer ab.