



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN



DIPLOMARBEIT

Ableitung troposphärischer Signalverzögerungen aus kinematischen GNSS Beobachtungsdaten

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

im Rahmen des Studiums

Geodäsie und Geoinformation

eingereicht von

Stefan Raphael Jungwirth, BSc

Matrikelnummer 01027603

ausgeführt am Department für Geodäsie und Geoinformation
Forschungsgruppe Höhere Geodäsie
der Fakultät für Mathematik und Geoinformation
der Technischen Universität Wien

Betreuung

Betreuer: Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Robert Weber

Mitwirkung: Projektass. Dipl.-Ing. Jadre Maras, Bakk.techn.

Wien, Oktober 2019

(Stefan Jungwirth)

(Robert Weber)



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Erklärung zur Verfassung der Arbeit

Ich, Stefan Raphael Jungwirth, erkläre im Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur und Quellen, genannt habe.

Wien, Oktober 2019

(Stefan Jungwirth)

Geschlechtsneutrale Formulierung

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit werden in der vorliegenden Diplomarbeit weibliche Formen nicht explizit angeführt. In den meisten Fällen wird in den Ausführungen die männliche Form gewählt. An dieser Stelle sei jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen, dass sich alle personenbezogenen Formulierungen grundsätzlich gleichermaßen auf Frauen und Männer beziehen.

Danksagung

Ein großes Dankeschön gilt der Forschungsgruppe Höhere Geodäsie, im Besonderen meinem Betreuer Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Robert Weber und Projektass. Dipl.-Ing. Jadre Maras, Bakk.techn. Sie haben mich mit Anregungen und Empfehlungen der Literatur zur Fertigstellung dieser Arbeit versorgt, welche mich immer einen Schritt weiter gebracht haben.

Großer Dank gebührt auch meiner Freundin Julia, meiner Familie und meinen Freunden für den großen Rückhalt in den Momenten des Schreibstillstandes. Sie haben mir in diesen Situationen Zeit, Motivation, Kraft und Unterstützung gespendet.

Kurzfassung

Der räumlich und zeitlich sehr variable feuchte Anteil der Troposphäre hat einen wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit der satellitenbasierten Positionsbestimmung, da dieser eine Signalverzögerung erzeugt. Ziel der Arbeit war es zu testen, ob eine Schätzung der troposphärischen Verzögerung, dem Zenit Total Delay (ZTD) aus Einfrequenzempfänger-Beobachtungsdaten möglich ist. Mit einer größeren Anzahl an ZTD-Werten kann das derzeitige Netz verdichtet werden. Dafür wurden statische Datensätze untersucht, um die Qualität des geschätzten ZTD zu beurteilen und anschließend auf kinematische Daten zu erweitern. Bei der Untersuchung der statischen Beobachtungsdaten hat sich herausgestellt, dass eine Schätzung des ZTD mit ausreichender Genauigkeit möglich ist. Im Verlauf der Arbeit hat sich jedoch gezeigt, dass eine Erweiterung auf kinematische Daten unter den gegebenen Bedingungen nicht möglich ist.

Abstract

The spatially and temporally highly variable wet part of the troposphere has a significant influence on the accuracy of the satellite-based position determination, since this causes a signal delay. The aim of this master thesis was to test whether an estimate of the tropospheric delay, the zenith total delay (ZTD), from single-frequency receiver observation data is possible. With a larger number of ZTDs, the current network can be compressed. For this purpose, static data were examined to assess the quality of the estimated ZTDs and then to extend it to kinematic data. In the study of the static observation data, it has been found that an estimate of the ZTD with sufficient accuracy is possible. In the course of the work, however, it has been shown that an extension to kinematic data under the given conditions is not possible.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	1
2	Grundlagen	3
2.1	Globale Navigations- und Satellitensysteme (GNSS)	3
2.1.1	Grundprinzip der Positionsbestimmung mit Satelliten	4
2.1.2	Fehlereinflüsse und Korrekturen	8
2.1.3	Beobachtungsgleichung mit Fehlereinflüssen	11
2.2	Global Positioning System	12
2.2.1	Referenzsystem WGS-84	12
2.2.2	GPS-Zeitsystem	13
2.2.3	GPS-Systemaufbau	13
2.3	Grundlagen der GNSS-Signalausbreitung in der Atmosphäre	16
2.3.1	Aufbau der Atmosphäre	16
2.3.2	Ionosphärische Verzögerung	19
2.3.3	Troposphärische Verzögerung	20
3	Methodik und Datengrundlage	23
3.1	Allgemeine Berechnung des ZTD	23
3.2	SEID Algorithmus	24
3.2.1	Epochen-differenzierte Ionosphären-Verzögerungskorrektur	25
3.2.2	Epochen-differenziertes Ionosphären-Verzögerungsmodell	26
3.3	Basislinienberechnung	30
3.4	Precise Point Positioning (PPP)	31
3.5	Referenznetz EPOSA	33
3.6	Satelliten-Produkte	35
3.6.1	International GNSS Service	35
3.6.2	Deutsches GeoForschungsZentrum Potsdam	37
3.7	Auswertungs-Software	38
3.7.1	RTKLIB	38
3.7.2	goGPS	40

3.7.3	Onlinetool des Canadian Geodetic Survey (CGS)	43
3.8	Datengrundlage	44
3.9	Antennenkonfigurationen	45
4	Berechnung und Ergebnisinterpretation	48
4.1	Berechnung mit RTKLIB	49
4.2	Ergebnisse mit RTKLIB	50
4.3	Berechnung mit goGPS	52
4.4	Ergebnisse mit goGPS	53
4.4.1	Ergebnisse basierend auf sieben Referenzstationen	54
4.4.2	Ergebnisse basierend auf vier Referenzstationen	55
4.4.3	Vergleich TU Wien-Antenne mit Einfrequenzempfänger	56
4.4.4	Höhenkorrektur der Referenzstationen auf Einfrequenzempfänger- Höhe	60
4.5	Interpretation der Ergebnisse	68
5	Zusammenfassung und Resümee	70
	Abbildungsverzeichnis	75
	Tabellenverzeichnis	76
	Abkürzungsverzeichnis	77

1 Einleitung und Zielsetzung

Es gibt viele Möglichkeiten, die eigene Position zu bestimmen – etwa mit Hilfe von Sternen, Karten, Kompass, Funk aber auch mit Satelliten. Die Entwicklung der ersten satellitenbasierten Positionierungssysteme (auch als Global Navigation and Satellite System (GNSS) bezeichnet) hat in den 1960er Jahren begonnen. Seither hat sich diese Art der Positionsbestimmung stetig weiter entwickelt. Nicht zuletzt die Freigabe zur zivilen Nutzung von GNSS trieb die Weiterentwicklung und Verbesserungen der einzelnen Satellitensysteme rasch voran. So sind beispielsweise die GNSS-Empfänger im Laufe der Zeit kontinuierlich kleiner und kostengünstiger geworden, sodass sie mittlerweile bereits in vielen Alltagsgegenständen, wie Mobiltelefonen, Sportuhren und Fahrzeugnavigationsgeräten verbaut sind. Allgemein hat sich die Anzahl GNSS-fähiger Geräten stark vergrößert.

Dabei werden mit GNSS längst nicht mehr nur Positionsbestimmungen durchgeführt. Mittlerweile kann mit Satelliten die Veränderung des Meeresspiegels (bedingt durch die Klimawärmung) gemessen und nachgewiesen werden. Zusätzlich können auf Basis der aufgezeichneten GNSS-Signale Aussagen über die Signallaufzeiten in der Atmosphäre – konkret in der Ionosphäre und Troposphäre – getätigt werden. Die Ableitung der Signalverzögerung in der Erdatmosphäre, speziell in der Troposphäre (sprich in den unteren fünfzig Kilometern), aus GNSS-Beobachtungsdaten unterstützt dabei nicht nur die Meteorologie bei der Erstellung genauer Wetterprognosen, sondern trägt auch zu einer verbesserten Positionsbestimmung bei. Durch die troposphärische Signalverzögerung (Zenit Total Delay, ZTD) lässt sich der feuchte Anteil der Atmosphäre bestimmen, welcher das tägliche Wettergeschehen wesentlich beeinflusst. Derzeit wird die Berechnung der troposphärischen Verzögerung vor allem mit Wetterballondaten sowie mit Hilfe der von Referenzstationen aufgenommenen Zweifrequenz-Messdaten durchgeführt. Das bestehende Netz an Referenzstation ist mit einem mittleren Stationsabstand von 70 Kilometern aktuell jedoch nicht so dicht, dass exakte Aussagen über die feuchten Anteile zwischen den einzelnen Referenzstationen getroffen werden können. Der feuchte Anteil ist sehr variabel im Verlauf eines Tages beziehungsweise auch weniger Stunden, weshalb Prognosen nur sehr schwer zu erstellen sind. Vor dem Hintergrund dieser Problemstellung soll im Rahmen der Arbeit der Frage nachgegangen werden, ob die troposphärische Verzögerung auch von kostengünstigeren Einfrequenz-GNSS-

Empfängern abgeleitet werden kann, um den derzeit verfügbaren Datensatz aus abgeleiteten Zenit Total Delay (ZTD)-Werten zu verdichten. Im Gegensatz zu statisch platzierten Einfrequenzempfängern sollen aber bewegte Receiver verwendet werden, aus denen räumlich hochauflösende troposphärische Feuchtedaten abgeleitet werden können.

Um die dieser Arbeit zugrundeliegenden Forschungsfrage umfassend beantworten zu können wurde die Arbeit in fünf Kapitel unterteilt. Zu Beginn werden die theoretischen Grundlagen näher behandelt. Konkret widmet sich dieser Abschnitt dabei dem Grundprinzip der Satellitenpositionierung sowie deren Fehlereinflüsse. Daran anschließend wird das amerikanische Satellitensystem GPS näher beschrieben, da speziell dieses GNSS im Rahmen dieser Arbeit eine zentrale Rolle spielt. Auch die Grundlagen der GNSS-Signalausbreitung werden in Kapitel 2 verdeutlicht. Kapitel 3 behandelt die Methoden und Programme, welche zur Auswertung herangezogen wurden. Zusätzlich zeigt dieses Kapitel welche Daten dieser Arbeit zugrunde liegen. Kapitel 4 präsentiert die erzielten Resultate. Im abschließenden Kapitel 5 erfolgt eine Diskussion und Zusammenfassung der Ergebnisse.

Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Ableitung der troposphärischen Verzögerung aus kinematischen GNSS-Beobachtungsdaten. Mit Hilfe der Ableitungen aus kostengünstigen Einfrequenzempfängern auf Zügen der Österreichischen Bundesbahnen soll das derzeit bestehende GNSS-Netz verdichtet werden. Die troposphärische Verzögerung soll aus den aufgenommen Beobachtungsdaten der Zug-Antennen abgeleitet werden. Es ist zu überprüfen ob die Ableitung des ZTD aus kinematischen Einfrequenzempfänger-Beobachtungsdaten mit ausreichender Qualität möglich ist um einen Beitrag zur Wettervorhersage zu liefern.

2 Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden die Globalen Satelliten- und Navigationssysteme (GNSS) und deren Funktionsweise im Detail beschrieben. Ziel ist es, einen Überblick über die Positionsbestimmung mit Hilfe von Satelliten zu geben. Dafür werden unter anderem auch die Bahnbewegungen der Satelliten, Fehlereinflüsse auf die Streckenmessung sowie die für eine exakte Positionsbestimmung notwendigen Korrekturen erläutert. Außerdem wird in diesem Kapitel das amerikanische Global Positioning System (GPS), der Aufbau der Atmosphäre und die durch die Atmosphäre bedingten Fehlereinflüsse im Detail behandelt. Dieser Teil soll die theoretische Grundlage schaffen, um die troposphärische Verzögerung mit Hilfe von kostengünstigen Einfrequenzempfängern ableiten zu können. Für diesen Zweck wurde die Literatur von Kaplan und Hegarty (2006), Hofmann-Wellenhof et al. (2008), Bauer (2018) und Seeber (2003) herangezogen.

2.1 Globale Navigations- und Satellitensysteme (GNSS)

Bei Globalen Navigations- und Satellitensystemen handelt es sich nicht um ein eigenständiges System, vielmehr gilt diese Bezeichnung als Überbegriff aller modernen satellitengestützten Positionierungssysteme. International gebräuchlich ist hierfür die Abkürzung GNSS. Weltweit existieren mehrere global agierende Satellitensysteme, welche großteils von Regierungen beziehungsweise von Staatengemeinschaften betrieben werden. Die vier bekanntesten GNSS-Systeme sind:

- GPS
Das Global Positioning System ist das bekannteste GNSS und wird von der amerikanischen Regierung betrieben. Das System wird im nachfolgenden Kapitel 2.2 in Bezug auf die verwendeten Satelliten und den Aufbau genauer beschrieben.
- Globalnaja Nawigazionnaja Sputnikowaja Sistema
Dieses System wird mit GLONASS abgekürzt und ist das russische Satellitennavigationssystem.

- **GALILEO**
Galileo ist das GNSS von Europa. Galileo wurde nicht zuletzt entwickelt um die Europäische Union (EU) in Krisensituationen nicht in der Abhängigkeit von anderen Staaten und deren GNSS zu belassen. Namensgebend für dieses System ist der bekannte italienischer Naturwissenschaftler Galileo Galilei (1564-1641).
- **BeiDou Navigation Satellite System (BDS)**
Diese Satellitensystem wird von der chinesischen Regierung betrieben.

Zusätzlich zu diesen vier großen Systemen existieren auch regionale GNSS, wie beispielsweise in Indien (Navigation with Indian Constellation (NAVIC)) und in Japan (Quasi-Zenit-Satelliten-System (QZSS)). Es wurden auch globale und regionale Erweiterungssysteme entwickelt, um die gemeinsame Nutzung der einzelnen GNSS in bestimmten Bereichen – zum Beispiel in der Luftfahrt – zu verbessern. Durch solche Erweiterungssysteme kann eine höhere Genauigkeit in der Positionsbestimmung erzielt werden.

2.1.1 Grundprinzip der Positionsbestimmung mit Satelliten

Das Grundprinzip für die Positionsbestimmung mit Hilfe von Satelliten baut auf dem Konzept der Signallaufzeit und der damit möglichen Streckenberechnung auf. Das heißt: am Empfänger wird die Ankunft jenes Zeitsignals gemessen, welches von einem bekannten Sender (zum Beispiel einem Satelliten) ausgesendet wird. Auf Basis von Signallaufzeit und Signalgeschwindigkeit lässt sich der Abstand zwischen Empfänger und Sender berechnen, wobei die Geschwindigkeit in Abhängigkeit zum Ausbreitungsmedium steht. Indem die Signale von mehreren Satelliten mit bekannter Satellitenposition (Satellitenbahn) gemessen werden, kann die Empfängerposition ermittelt werden. Die Position wird über den Schnittpunkt der Kugeln, welche aus den Signallaufzeiten entstehen, abgeleitet. Dieses Prinzip wird vereinfacht in 2D in Abbildung 2.1 geometrisch dargestellt.

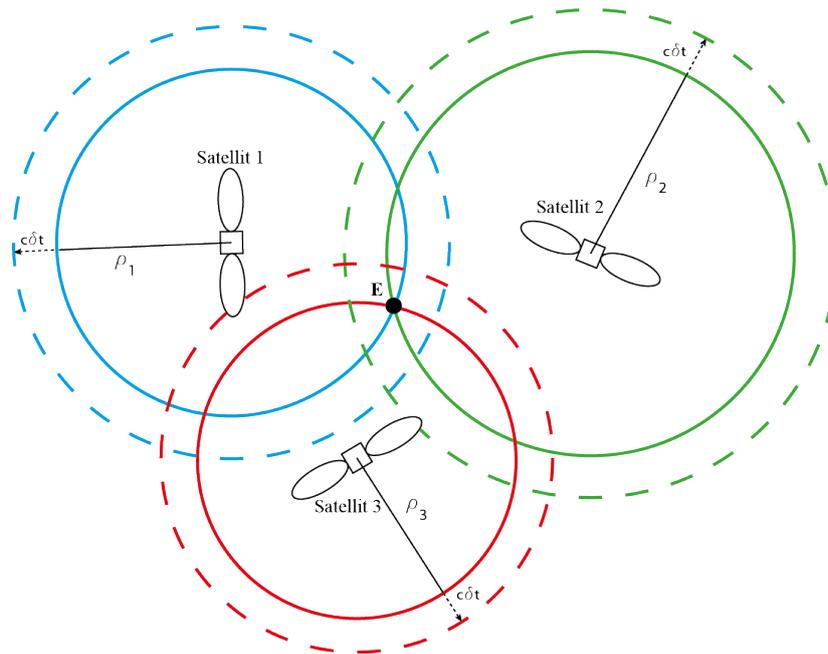


Abbildung 2.1: Berechnung der Empfängerposition auf Basis von drei Satellitensignalen unter der Annahme korrekter Uhren und der dargestellten Uhrenfehler (vereinfachte geometrische Darstellung, 2D); eigene Darstellung in Anlehnung an Kaplan und Hegarty (2006)

Voraussetzung für die Positionsbestimmung aus Signallaufzeit und -geschwindigkeit ist, dass die Uhren von Sender und Empfänger synchronisiert sind. In der Praxis ist dies aber so gut wie nie der Fall, weil eine derart präzise Empfängeruhr viel zu teuer wäre. Daher entsteht ein Synchronisationsfehler, wobei dieser Fehlereinfluss des Receivers als Empfängeruhrfehler bezeichnet wird. Durch diesen Fehler können sich nun die Kugeln praktisch nicht in einem Punkt schneiden. Aufgrund des Uhrenfehlers ist die Position des Empfängers nicht exakt bestimmbar, sondern nur auf einen Bereich eingrenzbar (siehe Abbildung 2.2). Der Uhrenfehler führt dazu, dass die Strecken falsch dargestellt werden. Diese „falschen“ Strecken werden als „Pseudostrecken“ oder „Pseudoranges (R)“ bezeichnet. Für ein besseres Verständnis dieser Problemstellung sei hier nochmals auf Abbildung 2.1 verwiesen.

Die Formel zur Berechnung der Pseudoranges ist in Formel 2.1 dargestellt, wobei c die Lichtgeschwindigkeit beschreibt.

$$R = \rho + \Delta\rho = \rho + c\delta t \quad (2.1)$$

Um den Empfängeruhrfehler zu eliminieren, wird ein weiterer Satellit mit bekannter Position benötigt. Mit Hilfe dieses vierten Satelliten können nun alle vier Unbekannten (Position X, Y, und Z sowie der Empfängeruhrfehler) gelöst werden. Zusätzlich zu dem erwähnten Emp-

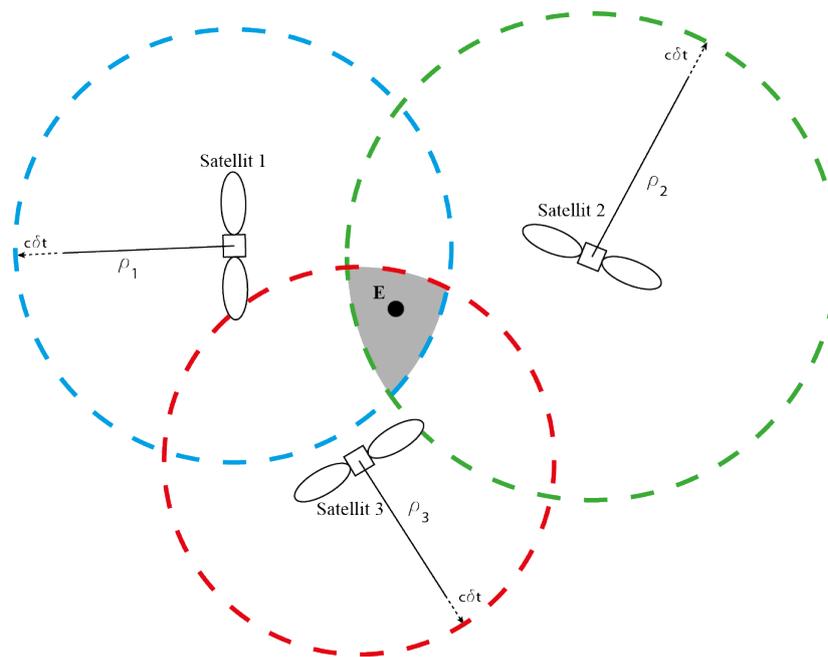


Abbildung 2.2: Berechnung der Empfängerposition aus 3 Satelliten mit Schnittfläche durch Uhrenfehler (vereinfachte Darstellung 2D); eigene Darstellung in Anlehnung an Kaplan und Hegarty (2006)

fängeruhrenfehler gibt es noch weitere Fehlereinflüsse. Diese werden in Kapitel 2.1.2 genauer behandelt. Hier kann die Genauigkeit verbessert werden, indem die Beobachtungen und Messungen auf mehr als vier Satelliten ausgeweitet werden, beziehungsweise durch Modelle genau beschrieben werden. Im Allgemeinen können durch Differenzbildung der Pseudostreckenmessung systematische Fehler zumindest reduziert, wenn nicht sogar eliminiert werden.

Satellitenbahnen

Aus dem Grundprinzip der Positionsbestimmung mit Satelliten lässt sich ableiten, dass für eine genaue Positionsbestimmung die exakte Satellitenposition bekannt sein muss. Um die genaue Satellitenposition ermitteln zu können, ist die Kenntnis über die Bahnbewegung der Satelliten essentiell. Die Satellitenbahn wird auch als Satellitenorbit bezeichnet. Als Grundlage dienen hierfür die Gesetze von Johannes Kepler (1571-1630) zur Beschreibung der Bewegung der Planeten. Diese drei Gesetze, welche von Kepler für die Bewegung der Planeten um die Sonne formuliert wurden, können nun auch für die Bahnberechnung der Erdsatelliten herangezogen werden. Somit kann ein Satellitenorbit genähert über die sechs Kepler-Bahnelemente dargestellt werden. Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über die sechs Elemente.

Keplersche Bahnelemente	
Parameter	Beschreibung
Ω	Rektaszension des aufsteigenden Knotens
i	Inklination / Bahnneigung
ω	Argument des Perigäums (erdnächster Punkt)
a	große Halbachse der Bahnellipse
e	numerische Exzentrizität
T_0	Zeitpunkt des Satellitendurchgangs am Perigäum

Tabelle 2.1: Keplersche Bahnelemente zur Berechnung der Satellitenorbits

Für ein besseres Verständnis zeigt Abbildung 2.3 die Verteilung der einzelnen Keplerelemente im Raum.

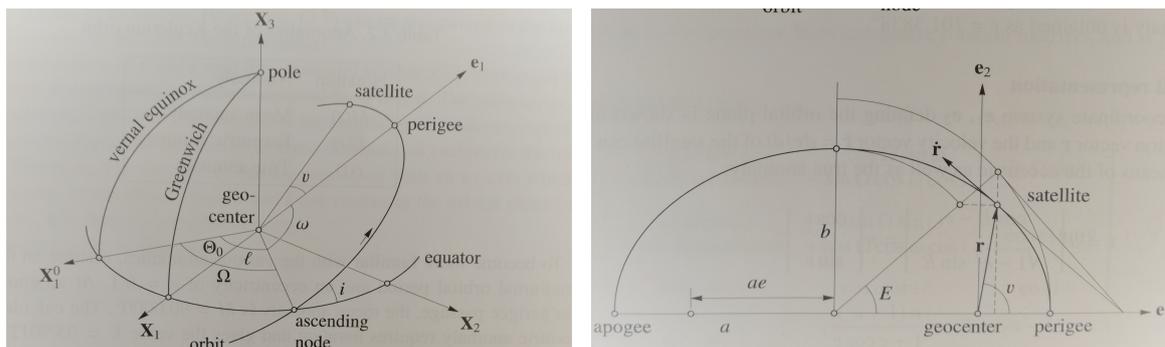


Abbildung 2.3: Darstellung der 6 Kepler-Bahnelemente (Hofmann-Wellenhopf et al., 2008)

Die Satellitenbahnen werden über die Navigationsnachricht an den Empfänger übermittelt. Zu den genannten sechs Kepler-Bahnelementen beinhaltet die Navigationsnachricht zusätzlich die zeitliche Änderung der mittleren Winkelgeschwindigkeit, der Rektaszension des aufsteigenden Knotens und der Bahnneigung. Außerdem übermittelt die Navigationsnachricht Korrekturparameter zum Argument der Breite, dem Radiusvektor und zur Bahnneigung. Durch die genannten Parameter kann derzeit eine Genauigkeit der Satellitenbahn im Bereich von ± 1 Meter erreicht werden.

2.1.2 Fehlereinflüsse und Korrekturen

Wie bereits im Kapitel 2.1.1 erläutert, wirken auf die GNSS-Streckenmessung verschiedene Arten von Fehlern, welche vor einer exakten Positionsbestimmung korrigiert werden müssen. Diese Fehlereinflüsse werden zur allgemeinen Beobachtungsgleichung hinzugefügt. In Tabelle 2.2 sind die wichtigsten Fehlereinflüsse für eine GNSS-Positionsbestimmung aufgezeigt. Die Tabelle ist in die Abschnitte Satellit, Empfänger und Signalausbreitung unterteilt. Die gezeigten Fehler werden im Anschluss im Detail beschrieben.

Quelle	Fehlerpotential	Größenordnung
Satellit	Satellitenbahnfehler	0,2 - 1 m
	Satellitenuhrenfehler	0,3 - 1 m
Empfänger / Receiver	Messrauschen	0,1 - 0,3 m
Signalausbreitung	Ionosphäre 2-Frequenzen	cm - dm
	Ionosphäre 1-Frequenz	5 m
	Troposphäre	0,5 m
	Mehrwegausbreitung	1 m

Tabelle 2.2: Fehlereinflüsse der satellitenbasierten Positionsbestimmung (eigene Darstellung)

Satellitenbahnfehler

Die Satelliten-Bahndaten werden über das ausgesendete Signal an den Empfänger übertragen. Doch die begrenzte Genauigkeit der Navigationsnachricht ergeben sich leicht fehlerhafte Satellitenorbits. Diese können zu einem Fehler in der Größenordnung von bis zu einem Meter führen. Die Satellitenbahnen werden mit Hilfe des Bodensegments (siehe Kapitel 2.2) dauerhaft überwacht. Bei einer Änderung wird die korrigierte, neue Navigationsnachricht vom Bodensegment an den Satelliten übermittelt. In der Folge werden die Ephemeriden des Satelliten aktualisiert. Streckenmaßfehler aufgrund verbleibender Abweichungen der Navigationsnachricht können mit Hilfe von Erweiterungssystemen wie zum Beispiel mit einem Satellite Based Augmentation System (SBAS) zusätzlich korrigiert werden.

Uhrenfehler

In den derzeit verwendeten modernen Satelliten sind sehr genaue Atomuhren eingebaut. Doch trotz der exakten Uhren existiert ein Taktversatz der Satellitenuhr (Drift). Dieser Versatz ist zwar sehr gering, doch bei der Bestimmung der Pseudostrecke des Empfängers wirkt sich dieser erheblich aus. Die Größenordnung dieses Fehlers liegt zwischen einem halben Meter und maximal zwei Metern. Wenn der Fehler beispielsweise bei fünf Nanosekunden liegt, entsteht bereits ein Streckenfehler von etwa eineinhalb Metern. Dieser Fehler wird von noch präziseren Uhren im Bodensegment ermittelt und eine Korrektur als neue Navigationsnachricht an den Satelliten zurück gesendet. Diese Korrektur wird vom Satellit an den Empfänger übermittelt und bei der Positionsbestimmung berücksichtigt.

Mehrwegausbreitung

Mehrwegausbreitung (englisch: Multipath) entsteht, wenn ein GNSS-Signal von einer Oberfläche (zum Beispiel von einer Hauswand) abgelenkt und anschließend das indirekte und das direkte Signal von der Antenne empfangen werden. Durch die Reflexion an einer Oberfläche wird das direkte Signal von einem abgelenkten indirekten Signal überlagert. Durch die Überlagerung der Signale entsteht eine schlechte Korrelation, wodurch eine fehlerhafte Streckenmessung folgt. Je nach örtlicher und räumlicher Gegebenheit können Streckenmessfehler durch Multipath-Effekte von bis zu zehn Meter bei der Codemessung und bis zu fünf Zentimeter bei der Phasenmessung entstehen. Aufgrund des korrelierten Signals kommt es zu einem Fehler in der Laufzeit-Streckenmessung und die Position des Empfängers wird falsch dargestellt. Die einfachste Möglichkeit diesen Fehlereinfluss zu vermeiden ist eine geeignete Auswahl der Messposition, bei der möglichst keine Abschattungen in der Nähe sind. Bei modernen Geräten ist eine Korrektur dieses Fehlers für kurze Verzögerungen in der Antenne, für lange über den Empfänger möglich (Bauer, 2018).

Empfängerfehler / Empfängerrauschen

Ein weiterer Fehlereinfluss entsteht beim Empfänger. Das Fehlerpotential ist hier stark von der Qualität des Empfängers und der Antenne abhängig. Im Allgemeinen kann der Empfänger folgende Fehler aufweisen:

- **Messrauschen:** Dieser Fehler ist ein zufälliger Fehler
- **Hardware-Verzögerung:** Dabei handelt es sich um einen systematischen Fehler.

Die zwei genannten Fehlereinflüsse können als Beeinflussung auf das Signal durch den Empfänger aufgefasst werden. Allgemein handelt es sich bei diesen Empfängerfehlern um Abweichungen in der Größenordnung von Dezimeter. (Bauer, 2018)

Relativistische Effekte

Die GPS-Satelliten bewegen sich auf ihren Orbits in einer Entfernung von etwa 20 000 Kilometer zur Erde und dort mit einer sehr hohen Geschwindigkeit von rund 14 000 Kilometer pro Stunde. Durch die Distanz und die Geschwindigkeit müssen bei der Positionsbestimmung auch relativistische Effekte, welche auf die Satelliten wirken, berücksichtigt werden. Werden diese Effekte nicht beachtet entstehen Fehler bei der Positionsbestimmung. Durch die hohe Relativ-Geschwindigkeit des Satelliten muss die Zeitdilatation der speziellen Relativitätstheorie berücksichtigt werden. Dies bedeutet, dass die Satellitenuhr, wegen der schnellen Satellitenbewegung, langsamer geht als jene des „ruhenden Beobachters“ auf der Erde.

Bei der wie zuvor beschriebenen Satellitenbahnhöhe, existiert außerdem ein anderes Gravitationspotential als auf der Erdoberfläche. Dieses wirkt sich auch wiederum auf die Uhr im Satelliten aus. Dieser Effekt kann mit Hilfe der allgemeinen Relativitätstheorie beschrieben werden. Die allgemeine Relativitätstheorie besagt, dass eine Uhr die einem niedrigerem Gravitationspotential ausgesetzt ist schneller geht als jene auf der Erde. Von einem Beobachter auf der Erde aus gesehen, wirkt die Bahnbewegung des Satelliten verzögert.

Außerdem muss der Sagnac-Effekt berücksichtigt werden. Dieser Effekt entsteht aufgrund der Rotation der Erde und der Geometrie zwischen Satellit und Empfänger. Der Empfänger wird als ruhend angenommen, bewegt sich jedoch im Laufe der Zeit mit der Rotationsgeschwindigkeit der Erde weiter. Aufgrund dieser Bewegung entsteht ein Fehler in der Signallaufzeit zwischen Satellit und Empfänger. Dieser Einfluss wird als Sagnac-Effekt bezeichnet und bewegt sich in der Größenordnung von rund einer Nanosekunde (dies entspricht rund dreißig Zentimeter).

Atmosphärische Korrekturen

Atmosphärische Korrekturen beschreiben die Verzögerung der Signale in der Ionosphäre und in der Troposphäre. Die Behandlung dieser Korrekturen stellt einen wesentlichen Teil dieser Arbeit dar, weshalb sie in Kapitel 2.3 noch im Detail behandelt werden.

2.1.3 Beobachtungsgleichung mit Fehlereinflüssen

Aufgrund der vorangegangenen Beschreibung der Fehlereinflüsse ergibt sich für die vollständige GNSS-Strecken-Beobachtungsgleichung folgende Gestalt (Formel 2.2):

$$\begin{aligned}
 P &= \rho + c \cdot \Delta t_E - c \cdot \Delta t^S + \Delta Orb + \Delta MP + \Delta Noise + \Delta Rel + \Delta Ion + \Delta Tro + \varepsilon \\
 L &= \rho + c \cdot \Delta t_E - c \cdot \Delta t^S + \Delta Orb + \Delta MP + \Delta Noise + \Delta Rel - \Delta Ion + \Delta Tro + \lambda N + \varepsilon
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

P	Code-Messung in [m]	L	Phasen-Messung in [m]
ρ	Geometrische Distanz	c	Lichtgeschwindigkeit
Δt_E	Empfängeruhrenfehler	Δt^S	Satellitenuhrenfehler
ΔOrb	Satellitenorbitfehler	ΔMP	Multipath-Effekte
$\Delta Noise$	Empfängerrauschen	ΔRel	Relativistische Effekte
ΔIon	Ionosphärische Verzögerung	ΔTro	troposphärische Verzögerung
λ	Wellenlänge der Trägerwelle	N	Anzahl der ganzen Wellen
ε	Restfehler		

Für eine genaue Positionsbestimmung wird die Trägerphasenmessung verwendet. Dabei wird bei einer kontinuierlichen Messung das Phasenreststück bestimmt und die ganze Anzahl an Wellenlängen bleibt unbekannt. Die unbekannte Anzahl an Wellenlängen wird als N , Mehrdeutigkeiten (englisch: Ambiguities) bezeichnet. Durch die kontinuierliche Relativbewegung beziehungsweise der Abstandsänderung zwischen Empfänger und Satellit ändern sich die Mehrdeutigkeiten. Die Anzahl der ganzen Wellenlängen N kann über kontinuierliche Beobachtungen bestimmt werden.

2.2 Global Positioning System

Das Global Positioning System ist ein von den Vereinigten Staaten von Amerika (USA) betriebenes globales Navigationssystem. Die Entwicklung dieses Systems startete in den 1970er Jahren. Es wurde zur Unterstützung des US-amerikanischen Militärs entwickelt, um dieses mit einem Ortungsdienst zu erweitern. Durch Bestrebungen des Verteidigungsministeriums wurde das sogenannte NAVSTAR-GPS entwickelt. Die Abkürzung NAVSTAR-GPS steht für Navigation Satellite Timing And Ranging - Global Positioning System. Im Laufe der Zeit hat sich die gängige Bezeichnung dieses Navigationssystems auf GPS verkürzt und hat auch über die US-amerikanischen Grenzen hinweg große Bedeutung erlangt.

2.2.1 Referenzsystem WGS-84

Für das Global Positioning System wurde vom Department of Defense ein eigenes Standardmodell zur Beschreibung der Erdfigur entwickelt. Dieses Modell ist das sogenannte World Geodetic System 1984 (WGS-84). Für das Referenzsystem wird die Annäherung an die Erdfigur über ein Rotationsellipsoid beschrieben, um die Position des Empfängers auf der Erde in Bezug auf Länge, Breite und Höhe bestimmen zu können. Das WGS-84 wird über vier Parameter definiert: die große Halbachse a , der normalisierte zonale Gravitationskoeffizient zweiten Grades¹ $\bar{C}_{2,0}$, die Winkelgeschwindigkeit der Erde ω_e und die Gravitationskonstante der Erde² μ . Für die Bestimmung der Satellitenephemeriden wurde dem WGS-84 System zusätzlich noch ein Erdgravitationspotentialmodell zugeordnet. In Tabelle 2.3 sind die definierenden Werte für die Beschreibung des Rotationsellipsoids des WGS-84 konkret angeführt.

Parameter mit definierten Wert	Beschreibung
$a = 6378137,0 [m]$	große Halbachse des Ellipsoid
$f = 1/298,257223563$	Abplattung des Ellipsoid
$\omega_e = 7292115 \cdot 10^{-11} [rads^{-1}]$	Winkelgeschwindigkeit der Erde
$\mu = 3986004,418 \cdot 10^8 [m^3s^{-2}]$	Erdgravitationskonstante

Tabelle 2.3: Parameter des WGS-84 System (Hofmann-Wellenhof et al., 2008)

¹Der Gravitationskoeffizient $\bar{C}_{2,0}$ kann über die Abplattung $f = \frac{a-b}{a}$ ausgedrückt werden.

² $\mu = GM$, wobei G die Gravitationskonstante und M die Masse der Erde ist.

2.2.2 GPS-Zeitsystem

Die Systemzeit von GPS wird mit der UTC³ referenziert. Das UTC-Zeitsystem stellt eine zusammengesetzte Zeitskala dar. Neben der Internationalen Atomzeit (Temps Atomique International, TAI) wird dabei auch die Erdrotation berücksichtigt. Die GPS-Systemzeit wurde mit den Atomuhren in den jeweiligen Satelliten- und Bodensegmenten abgeglichen. Die GPS-Zeit berücksichtigt jedoch keine Schaltsekunden, weshalb sich die Differenz zur UTC-Zeit jeweils auf eine ganze Zahl von Zeitsekunden beläuft. Aktuell besteht hier eine Differenz von plus 18 Sekunden zwischen GPS-Zeit und Universal Time Coordinated (UTC)-Zeit. Die GPS-Zeitählung wurde am 6. Jänner 1980 um Null Uhr Mitternacht gestartet, womit dieses Datum als Startzeitpunkt für dieses Zeitsystem gilt. Die GPS-Zeit kann außerdem auch über die Internationale Atomzeit ausgedrückt werden, wie in Formel 2.3 dargestellt.

$$\text{TAI} = \text{GPS Zeit} + 19,000 \text{ [s]} \quad (2.3)$$

Für eine detaillierte Beschreibung der Unterschiede der einzelnen Zeitsysteme sei hier auf Kaplan und Hegarty (2006) verwiesen.

2.2.3 GPS-Systemaufbau

Das Global Positioning System besteht aus drei Teilen, konkret aus Raumsegment, Bodenkontroll- und Überwachungssegment sowie der Empfängereinheit. Das Raumsegment enthält die Satelliten in deren Bahnkonstellation. Das Bodenkontrollsegment ist für die Überwachung der Satelliten (Bahnkorrektur, Satellitenfunktionalität) zuständig. Die Empfängereinheit wird für verschiedenste Applikationen wie die Navigation, das „Timing“ oder auch für die Vermessung verwendet. Die einzelnen Teilbereiche werden nachfolgend noch detaillierter behandelt.

Raumsegment

Das Raumsegment wird auch als Weltraumsegment bezeichnet. Zu diesem Teil des Global Positioning System zählen die verschiedenen Satellitentypen und deren Merkmale, die Bahnkonstellation und die Überwachung der Position für eventuelle Bahnkorrekturmanöver. Die verschiedenen Satellitentypen unterscheiden sich in ihrem Aufbau und ihrer Funktionalität.

³Universal Time Coordinated; derzeit beträgt die Differenz GPS-Zeit – UTC-Zeit = +18s (März 2019)

Satellitenkonstellation:

Die Basiskonstellation des amerikanischen GPS besteht aus 24 Satelliten, welche sich auf sechs Bahnebenen bewegen. Es befinden sich jedoch in der Realität immer circa 30 Satelliten im Raum. Das heißt, es befinden sich jeweils vier Satelliten in einer Bahnebene. Die Umlaufzeit eines Satelliten beträgt einen halben Sterntag⁴. Die Umlaufbahnen sind annähernde Kreisbahnen und gleichmäßig um den Äquator in einem Abstand von 60° verteilt und haben eine Inklination von 55°. Der Bahnradius der Satelliten beträgt etwa 26 600 Kilometer. Mit 24 Satelliten bietet das System die Möglichkeit, zu jeder Zeit eine Positionsbestimmung oder Navigation durchzuführen.

Satellitentypen:

Seit der Entwicklung in den 1970er Jahren des GPS-Systems haben sich die Satellitentypen hinsichtlich ihrer Funktionalität verbessert. Derzeit befinden sich 31 GPS-Satelliten im Weltraum (Stand: Mai 2019). Die verschiedenen Satellitentypen werden in Tabelle 2.4 beschrieben. In der Gesamtheit besteht das Satellitensystem aus einer Mischung von älteren und neueren (modernisierten) Satelliten.

	Satelliten 1. Generation		modernisierte Satelliten		
Typ	Block IIA	Block IIR	Block IIR-M	Block IIF	GPS III / IIIF
aktive Sat.	1	11	7	12	1 (Probetrieb)
Lebensdauer	7,5 Jahre	7,5 Jahre	7,5 Jahre	12 Jahre	15 Jahre
Start	1990-1997	1997-2004	2005-2009	2010-2016	2018

Tabelle 2.4: GPS-Satelliten, Stand: Mai 2019 (U.S. Government, 2019)

Bodensegment – Kontrollsegment

Das Kontrollsegment besteht aus einer Master-Kontrollstation (Master-Control-Station, MCS), mehreren Monitorstationen und einigen Bodenantennen, wobei alle drei Elemente verschiedene Aufgaben übernehmen. Die Hauptaufgaben des Kontrollsegmentes sind die Überwachung der Satellitenbahnen und der Satellitenfunktionalität (Treibstoff für Bahnkorrekturen, Solar-Panels, Frequenzgenerator) sowie die Berechnung von Bahnen, der Satellitenuhrkorrektur und der Upload der Navigationsnachricht (Almanac-Daten).

⁴Sterntag entspricht 23 Stunden, 56 Minuten und 4,1 Sekunden (Atomzeitsekunden) (Kaplan und Hegarty, 2006)

Die Monitorstationen (15 Stationen, weltweit verteilt) und die Ground-Antenna⁵ werden durch die Master-Control-Station (MCS) überwacht. Die Monitorstationen messen an ihren Standorten mit meteorologischen Sensoren Druck und Temperatur und speichern diese Daten. Außerdem werden von den Monitorstationen die Signale der sichtbaren Satelliten aufgezeichnet. Diese Stationen sind so verteilt, dass zu jedem Zeitpunkt für jede Station mindestens zwei Satelliten sichtbar sind. Durch die Messungen der meteorologischen Daten sowie der Signalmessungen werden die troposphärische und die ionosphärische Verzögerung verbessert und die Phasendaten geglättet. Dadurch können Multipatheffekte und Messrauschen bei der Codemessung verkleinert werden. Diese gemessenen und verbesserten Pseudorange werden an die Master-Kontrollstation übermittelt und dort gesammelt. Mit Hilfe dieser Daten werden die Satellitenuhren und die Satellitenbahnen überprüft. Die von der MCS berechneten Daten werden zu einer Navigationsnachricht zusammengefasst. Über die weltweit verteilten Bodenantennen der Upload-Stationen wird diese Navigationsnachricht an die einzelnen Satelliten übertragen. Die Verteilung der einzelnen Stationen und Antennen ist in Abbildung 2.4 dargestellt.

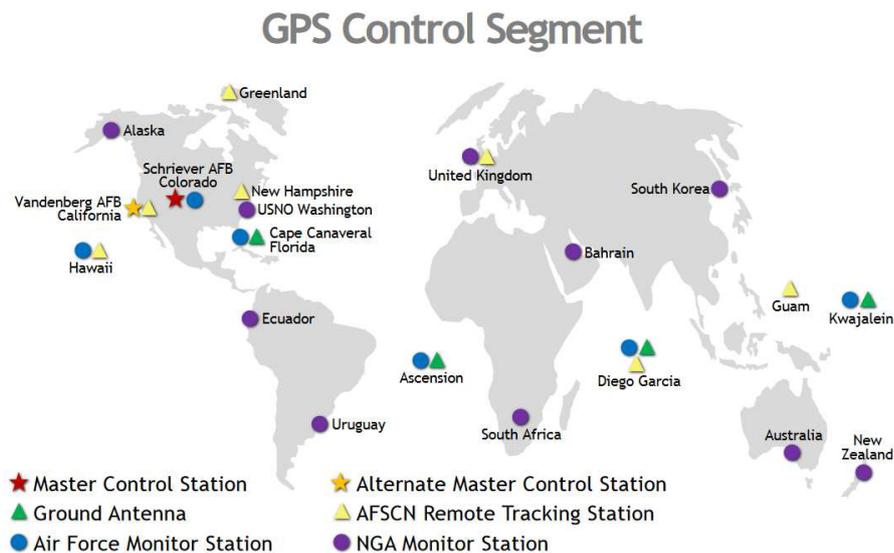


Abbildung 2.4: Verteilung der einzelnen GPS-Segmente auf der Erde (U.S. Government, 2019)

⁵Bodenantenne: 4 Haupt-Antennen und 7 Air-Force-Antennen verteilt

Empfängereinheit

Die Empfängereinheit ist jene Einheit, die der Nutzer zur Positionsbestimmung verwendet. Mittels einer Antenne können die Signale von den Satelliten empfangen werden. Durch eine geeignete Signalverarbeitung kann die Position, die Geschwindigkeit und die Zeit des Empfängers bestimmt werden. Allgemein wird die Benutzereinheit auch als GPS-Empfänger bezeichnet.

Bei den Empfängereinheiten kann zwischen einem Einfrequenzempfänger und Multifrequenzempfänger unterschieden werden. Dies bedeutet, dass der Einfrequenzempfänger nur ein Signal auf einer Frequenz von einem Satelliten empfangen kann (zum Beispiel: L1-Signal). Ein Einfrequenzempfänger ist deshalb viel empfindlicher gegenüber Abschattung und Reflexionen und hat eine wesentlich längere Initialisierungszeit (Übertragung der groben Bahndaten aller Satelliten). Im Gegensatz dazu, kann ein Multifrequenzempfänger mehrere Signale, welche ein einzelner Satellit aussendet empfangen. Durch das Empfangen von mehreren Frequenzen kann der ionosphärische Einfluss mit Hilfe einer Linearkombination (Kapitel 2.3.2) eliminiert werden.

2.3 Grundlagen der GNSS-Signalausbreitung in der Atmosphäre

Dieses Kapitel soll eine Einführung in den Aufbau der Atmosphäre geben, um im Anschluss daran die Signalverzögerungen und die damit verbundenen notwendigen Korrekturen für eine exakte Positionsbestimmung ableiten zu können. Im Zuge dieser Arbeit, spielen die ionosphärische sowie die troposphärische Signalverzögerung eine zentrale Rolle. Darum werden diese beiden atmosphärischen Schichten und die bekanntesten Methoden zur Modellierung der in diesen Bereichen auftretenden Signalverzögerungen beschrieben.

2.3.1 Aufbau der Atmosphäre

Die Atmosphäre setzt sich aus verschiedenen Schichten beziehungsweise Hüllen zusammen, welche in Abhängigkeit von der jeweiligen Höhe unterschiedliche Eigenschaften besitzen. Diese Schichten teilen sich in Troposphäre, Stratosphäre, Mesosphäre, Thermosphäre und Exosphäre. Der Schichtaufbau der Atmosphäre wird in Abbildung 2.5 vereinfacht grafisch dargestellt.

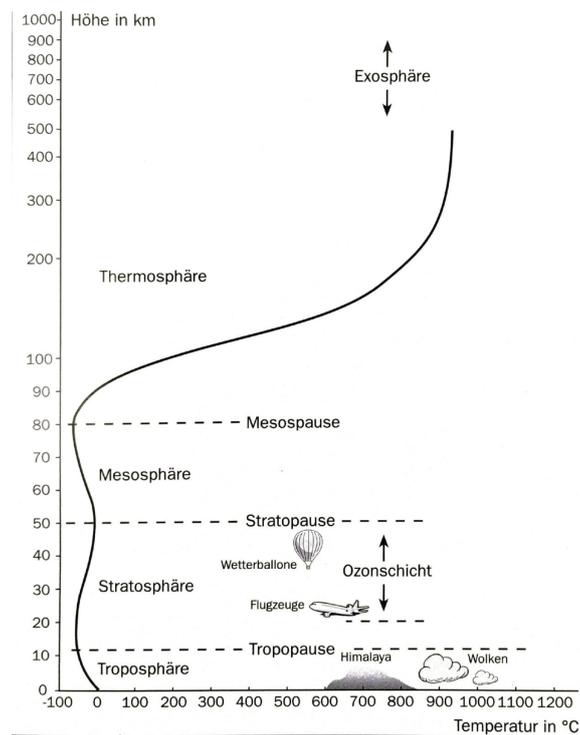


Abbildung 2.5: Aufbau der atmosphärischen Schichten (Göbel, 2004)

Hinsichtlich der atmosphärischen Signalausbreitung können die einzelnen Sphären in zwei grundlegende Schichten aufgeteilt werden: die neutrale Atmosphäre und die Ionosphäre. Die Troposphäre und die Stratosphäre bilden die neutrale Atmosphäre, wohingegen die Mesosphäre, Thermosphäre und Exosphäre die Ionosphäre beschreiben. Da die beiden Schichten unterschiedliche Einflüsse auf die Signalausbreitung haben, müssen je nach Schicht auch spezielle Korrekturen vorgenommen werden.

Neutrale Atmosphäre

Dieser Teil der Atmosphäre setzt sich aus der Troposphäre und der Stratosphäre (bis rund 50 Kilometer über der Erdoberfläche) zusammen. Im Bereich der Satellitennavigation wird die neutrale Atmosphäre verkürzt auch als *Troposphäre* bezeichnet, wenngleich auch immer die Stratosphäre hier miteinbezogen wird. Der Begriff neutrale Atmosphäre kommt daher, dass in dieser Schicht so gut wie keine geladenen Teilchen existieren. Die Troposphäre ist jener gasförmige Anteil der Atmosphäre in dem sich das tägliche Wettergeschehen abspielt. Wie in Abbildung 2.5 zu erkennen ist, nimmt die Temperatur in den ersten 15 Kilometer über der Erdoberfläche stetig mit der Höhe ab. Der Brechungsindex ist in diesem Teil immer größer als eins, nimmt mit zunehmender Höhe ab und nähert sich somit in Richtung eins. Dies ist auf die Abnahme der Dichte in diesem Medium zurückzuführen. Außerdem ist ein

großer Teil (etwa 90%) der atmosphärischen Masse in den ersten 16 Kilometern verankert. Die Troposphäre ist für die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen kein dispersives Medium. Dies bedeutet, dass der Refraktionsindex nicht von der Frequenz abhängig ist. Für die Refraktion in dieser Schicht sind der Luftdruck, der Wasserdampfdruck und die Temperatur ausschlaggebend. Dies ist auch der Grund, warum sich die Modellierung dieser Schicht als schwierig gestaltet.

Ionosphäre

Die Ionosphäre definiert den oberen Teil der Atmosphäre, welcher bis in eine Höhe von rund 1 000 Kilometer reicht. Hier ist der Anteil an geladenen Teilchen (Elektronen und Ionen) hauptverantwortlich für die Verzögerung der Satellitensignale. Die Signalverzögerung in dieser Schicht ist von der Tageszeit abhängig, da die Sonne einen großen Einfluss auf die geladenen Teilchen hat. Die Ionosphäre wird aufgrund der unterschiedlich starken Auswirkung der Ionisierung in verschiedene Schichten aufgeteilt (siehe Abbildung 2.6). Die Schichten werden als D-Layer⁶, E-Layer⁷ und F-Layer⁸ bezeichnet.

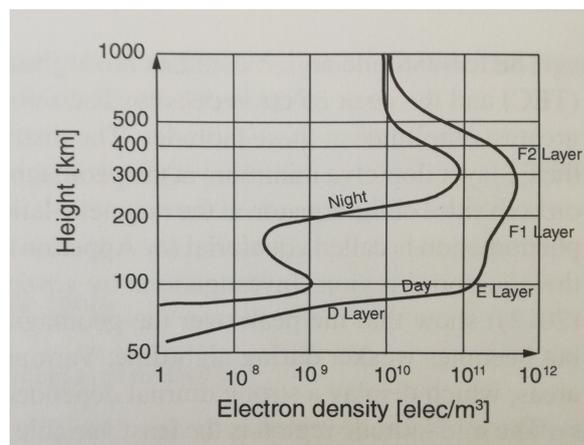


Abbildung 2.6: Chapman-Elektronendichteprofil und die ionosphärischen Schichten für Tag und Nacht in mittleren Breiten (Böhm, 2013)

Die drei Schichten variieren in der Intensität der Ionisierung, wobei der D-Layer mit dem Sonnenlicht variiert und der E-Layer mit der Röntgen- und Ultravioletten Strahlung. Die F-Schicht ist jene Schicht, in der die größte Elektronendichte vorherrscht. Die Refraktion in der Ionosphäre wird mit Hilfe der Elektronendichte beschrieben, wobei die Dichte als Gesamtelektronengehalt (in Englisch: Total Electron Content [*Elektronen/m²*], kurz TEC)

⁶D-Layer: 50 bis 90 Kilometer

⁷E-Layer: 90 bis 150 Kilometer

⁸F-Layer: 150 bis 1000 Kilometer

angegeben wird. Bauer (2018) definiert den Gesamtelektronengehalt wie folgt: „Der Elektronengehalt TEC ist die Anzahl freier Elektronen, die sich in einer Säule mit $1m^2$ Querschnittsfläche, die vom Beobachter (Empfänger) bis zum Sender (Satellit) reicht, befinden.“ (Bauer, 2018, S.125) Der Gesamtelektronengehalt wird durch Variationen der Sonnenaktivität beeinflusst und kann schematisch über globale Modelle bestimmt werden. Kleine Variationen oder Inhomogenitäten des TEC können mit solchen schematischen Profilen jedoch nicht berücksichtigt werden.

2.3.2 Ionosphärische Verzögerung

Auf die Ionosphäre wirken zwei unterschiedliche physikalische Phänomene, welche die Signalausbreitung verzögern. Einerseits wirken die Eigenschaften der Schicht auf das Signal, weshalb die freien Elektronen das Signal refraktieren. Andererseits führt der Brechungsindex dazu, dass sich das ausgesendete Satellitensignal nicht auf einer Geraden bewegt und sich die Signallaufzeit folglich vergrößert. Einen größeren Einfluss auf die Laufzeit haben jedoch die freien Elektronen. Deshalb sollen hier die Verzögerung durch den TEC und die möglichen Korrekturverfahren dargestellt werden.

Nach Seeber (2003) gilt für die Phasen- und Gruppenverzögerung in der Ionosphäre Formel 2.4, wobei diese Beziehung als eine Annäherung für die Verzögerung zu verstehen ist, da hier die Grade höherer Ordnung vernachlässigt wurden (First-Order-Approximation). Für weitere Informationen und die exakte Herleitung sei auf Seeber (2003) verwiesen.

$$\Delta S_{IONO,ph} = -\frac{40,3}{f^2} \cdot TEC \quad \text{und} \quad \Delta S_{IONO,gr} = \frac{40,3}{f^2} \cdot TEC \quad (2.4)$$

In Formel 2.4 beschreibt ΔS_{IONO} die Phasen- beziehungsweise Gruppenverzögerung als Näherung in der Ionosphäre, f steht für die Trägerfrequenz und TEC für den Elektronengehalt ($Elektronen/m^2$). Formel 2.4 zeigt, dass sich die Trägerwelle (Phasengeschwindigkeit) schneller im Raum ausbreitet als jene der Information (Gruppengeschwindigkeit). Dieser Unterschied wird durch das unterschiedliche Vorzeichen beschrieben und als ionosphärische Divergenz bezeichnet. Für die Berechnung der ionosphärischen Verzögerung von GNSS-Signalen gibt es verschiedene Modelle, wie zum Beispiel das Klobuchar-Modell (GPS) oder das NeQuick-Modell (Galileo). Auch hier sei auf die vertiefende Literatur verwiesen, wie zum Beispiel Böhm (2013) und Hofmann-Wellenhof et al. (2008).

Außerdem kann die ionosphärische Verzögerung mit Hilfe einer zweiten Frequenz über eine Linearkombination korrigiert, beziehungsweise eliminiert werden. Dies ist in den nachfolgenden Formeln 2.5 und 2.6 erläutert. Es werden Signale mit zwei verschiedenen Frequenzen

empfangen. Dadurch ergibt sich

$$\Delta t_{gr1} = \frac{1}{c} \cdot \left(S_0 + \frac{40,3}{f_1^2} \cdot TEC \right), \quad (2.5)$$

$$\Delta t_{gr2} = \frac{1}{c} \cdot \left(S_0 + \frac{40,3}{f_2^2} \cdot TEC \right). \quad (2.6)$$

Diese beiden Gleichungen enthalten die Parameter S_0 und TEC , wobei S_0 die direkte Verbindung zwischen Sender und Empfänger darstellt und nicht die Raumkurve, die der Realität entsprechen würde (Bauer, 2018). Die Gleichungen können nun nach ihren Unbekannten aufgelöst werden und dies ergibt:

$$S_0 = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot c \cdot \Delta t_{gr1} - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot c \cdot \Delta t_{gr2}, \quad (2.7)$$

$$TEC = \frac{1}{40,3} \cdot \frac{f_1^2 \cdot f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot c \cdot (\Delta t_{gr1} - \Delta t_{gr2}) \quad (2.8)$$

Aus dieser Linearkombination ergibt sich nun die Raumstrecke zwischen Satellit und Empfänger beziehungsweise lässt sich der TEC aus der ionosphärenfreien Linearkombination bestimmen. Der große Vorteil dieses Verfahren ist, dass sich der ionosphärische Effekt durch die zwei Frequenzen eliminieren lässt und damit der größte Fehlerterm (Term erster Ordnung) der GNSS-Streckenmessung wegfällt. Die Terme höherer Ordnung können hier vernachlässigt werden, da diese nur noch einen sehr kleinen Einfluss darstellen.

2.3.3 Troposphärische Verzögerung

Die Troposphäre ist, wie zuvor beschrieben, der untere Teil der Erdatmosphäre und reicht in eine Höhe von rund 50 Kilometer. In diesem Abschnitt ist die Atmosphäre nicht dispersiv, das heißt Phasen- und Gruppengeschwindigkeit bewegen sich ident – die Ausbreitung in diesem Medium ist nicht frequenzabhängig. Die troposphärische Verzögerung kann als eine Funktion des Brechungsindex betrachtet werden und ist daher vom lokalen Luftdruck, der Temperatur und der relativen Luftfeuchte abhängig. Die Verzögerung hat im Allgemeinen eine Auswirkung von etwa 2,5 Meter – wenn der Satellit im Zenit steht und der Empfänger sich auf jenem Höhenniveau befindet, welches der Meeresoberfläche entspricht. Über den Brechungsindex kann nach Kaplan und Hegarty (2006) die Verzögerung mit der Formel 2.9 berechnet werden.

$$\Delta S_{tropo} = 10^{-6} \cdot \int_{Sat}^{User} N ds \quad (2.9)$$

$$N = 10^6 (n - 1)$$

In Formel 2.9 erfolgt die Integration über den Weg der Signalausbreitung und der Brechungsindex n wird als Refraktivität N ausgedrückt.

Bei der Berechnung der troposphärischen Verzögerung wird diese in einen hydrostatischen⁹ und in einen nicht-hydrostatischen¹⁰ Anteil aufgeteilt, wobei der trockene Teil etwa 90% der gesamten Verzögerung ausmacht (Kaplan und Hegarty, 2006). Hier sei erwähnt, dass der trockene Anteil einfacher vorherzusagen ist, als die Feuchte. Der feuchte Anteil ist vom räumlich und zeitlich höchst variablen Wasserdampf abhängig und dies erschwert die Prognose. Um den trockenen und feuchten Anteil der troposphärischen Verzögerung für eine standardisierte Atmosphäre auf Meereshöhenniveau berechnen zu können, wurden verschiedene Ansätze entwickelt. Die Modelle von Hopfield und Saastamoinen stellen dabei gute Näherungen dar.

Modell nach Hopfield

H.S. Hopfield berechnete in einem ersten Schritt den trockenen und feuchten Anteil für eine standardisierte Atmosphäre auf Meereshöhe. Im Anschluss wurde ihr Modell verbessert, indem es an die Höhe des Empfängers angepasst wurde. Denn die Signalverzögerung ist vom Druck und damit insbesondere von der Höhe des Empfängers abhängig. Formel 2.10 und 2.11 sind die Näherungen für die Signalverzögerung der Troposphäre auf Meereshöhe,

$$N_{d,0} \approx a_1 \frac{p_0}{T_0} \quad (2.10)$$

$$N_{w,0} \approx a_2 \frac{e_0}{T_0} + a_3 \frac{e_0}{T_0^2} \quad (2.11)$$

wobei $a_{1,2,3}$ empirische Konstanten¹¹ sind. p_0 entspricht dem Druck auf Meereshöhenniveau, T_0 beschreibt die absolute Temperatur (auf Meeresebene) und e_0 stellt die relative Feuchte dar.

Nach Hopfield liefert Gleichung 2.12 die genauesten Ergebnisse für $\mu = 4$. h_d bezieht sich auf das Niveau der mittleren Meeresoberfläche.

$$N_d(h) = N_{d,0} \left[\frac{h_d - h}{h_d} \right]^\mu \quad \text{mit} \quad h_d = 0,011385 \frac{p_0}{N_{d,0} \cdot 10^{-6}} \quad (2.12)$$

⁹ auch als „dry“ oder trockener Anteil bezeichnet

¹⁰ auch als „wet“ oder feuchter Anteil bezeichnet

¹¹ $a_1 = 77,624[K/mbar]$; $a_2 = -12,92[K/mbar]$; $a_3 = 371900[K^2/mbar]$ (Kaplan und Hegarty, 2006, S.315)

Eine ähnliche Berechnung kann für den feuchten Anteil durchgeführt werden und es folgt:

$$N_w(h) = N_{w,0} \left[\frac{h_w - h}{h_w} \right]^\mu \quad \text{mit} \quad (2.13)$$

$$h_w = 0,0113851 \frac{p_0}{N_{w,0} \cdot 10^{-6}} \cdot \left[\frac{1255}{T_0} + 0,05 \right] \cdot e_0$$

Die gesamte troposphärische Signalverzögerung lässt sich über das Modell von Hopfield nach Formel 2.14 beschreiben.

$$\Delta S_{tropo} = 10^{-6} \int_{h=0}^{h_d} N_d(h) dh + 10^{-6} \int_{h=0}^{h_w} N_w(h) dh \quad (2.14)$$

Es ist zu erkennen, dass für die Berechnung der troposphärischen Verzögerung sowohl der Luftdruck, die Temperatur, als auch die relative Feuchte beim Empfänger benötigt wird. Diese Daten können mit Hilfe von meteorologischen Sensoren gemessen werden beziehungsweise über globale Modelle (wie zum Beispiel dem GPT-Modell – Global Pressure and Temperature Model) abgeleitet werden.

Modell nach Saastamoinen

Das in der Geodäsie meist verwendete Modell zur Berechnung der troposphärischen Refraktion ist jenes von Saastamoinen, wobei er die Verzögerung aus den Gasgesetzen ableitet. Formel 2.15 beschreibt die Ableitung der troposphärischen Verzögerung als Funktion von z , p , T und e , wobei e der partielle Wasserdampfdruck, T die Temperatur in Kelvin, p der Luftdruck in Millibar und z der Zenitwinkel ist. Das Modell wurde mit zwei zusätzlichen Korrekturen B und δR von Saastamoinen verbessert.

$$\Delta S_{tropo} = \frac{0,002277}{\cos z} \left[p + \left(\frac{1255}{T} + 0,05 \right) e - B \tan^2 z \right] + \delta R \quad (2.15)$$

Gleichung 2.15 beschreibt im Prinzip die Signalverzögerung in Zenitrichtung, welche durch den Term $1/\cos z$ in die jeweilige Beobachtungselevation projiziert wird. Aus der Addition des Zenit Hydrostatic Delay (ZHD) und des Zenit Wet Delay (ZWD) ergibt sich im Zenit über dem Empfänger der sogenannte Zenit Total Delay (ZTD). Dieser beschreibt die gesamte Signalverzögerung in der neutralen Atmosphäre und wird auch für meteorologische Zwecke, etwa zur Präzisierung von Wetterprognosen verwendet (in Österreich unter anderem von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geophysik (ZAMG)).

3 Methodik und Datengrundlage

Im Nachfolgenden sollen die Methoden und die Programme, mit deren Hilfe die troposphärische Verzögerung abgeleitet wurde näher beschrieben werden. Außerdem soll ein Einblick in die Datengrundlage dieser Arbeit gegeben werden. Konkret sollen Referenznetz, Satellitenprodukte, Antennen und weitere Datenquellen, welche herangezogen wurden beschrieben werden.

3.1 Allgemeine Berechnung des ZTD

Im Kapitel 2.3.3 wurden bereits verschiedene Ansätze für die Berechnung der troposphärischen Verzögerung angeführt. Bei praktischer Anwendung hat sich jedoch gezeigt, dass sich eine direkte Modellierung der Verzögerung als ungeeignet erweist. Mit den beschriebenen Methoden und Modellen (Hopfield und Saastamoinen) kann der ZTD zwar genähert berechnet werden, jedoch ist eine Ableitung mit hoher Genauigkeit nicht möglich. Folglich ist der troposphärische Einfluss und die sich damit ergebende Korrektur im Verlauf einer Parameterschätzung zu bestimmen. Im Allgemeinen wird hierfür ein apriori-Modell für eine Näherungslösung vorgegeben und im Verlauf des Rechenprozesses wird der feuchte Anteil als Korrektur zu dem apriori-Modell geschätzt.

Der ZWD ist räumlich und zeitlich sehr variabel und dadurch schwer vorherzusagen. Für die Modellierung der Korrekturparameter erweist sich eine stochastische Analyse der Prozesse als geeignet. Die Schätzung der troposphärischen Korrektur kann über einen Ausgleich nach der Methode der kleinsten Quadrate oder mit einem Kalmanfilter durchgeführt werden. Im Zuge der Arbeit wurde ein Kalmanfilter mit den verwendeten Programmen (siehe Kapitel 3.7) zur Berechnung der troposphärischen Signalverzögerung angewendet. Die Berechnungsmethode mittels Filter verwendet ein Modell, bei welchem Vorhersagen (Prädiktionen) geschätzt werden. In Echtzeit werden immer wieder neue Daten hinzugefügt und mit den geschätzten Prädiktionen verglichen, um neuerliche Prädiktionen zu verbessern. Das Verfahren besteht aus zwei Schritten. Erstens aus der Vorhersage des Zustandsvektors und zweitens die Aktualisierung dieses Vektors mit Hilfe neuer realer Messungen. Die Methode des Kalman-

filter hat sich als eine sehr effiziente Technik herausgestellt, um die Parameter für den Zenit Wet Delay in nahe Echtzeit zu schätzen.

3.2 SEID Algorithmus

GNSS-Daten werden heutzutage vielseitig eingesetzt, unter anderem um Wetterprognosen zu präzisieren. Dies geschieht beispielsweise indem aus den gemessenen GNSS-Daten der ZTD abgeleitet wird. Je dichter ein GNSS-Netz ist, desto genauere Aussagen können getroffen werden. Dafür braucht es eine Verdichtung des derzeitigen Netzes (siehe Kapitel 3.5), welches einen durchschnittlichen Stationsabstand von rund 70 Kilometern hat. Aus rein wirtschaftlichen Gründen ist eine Verdichtung mit Einfrequenzempfänger sinnvoll, da diese im Allgemeinen in der Anschaffung günstiger sind, als Zweifrequenzempfänger.

Um die Einfrequenzdaten wegen ionosphärischer Refraktion zu korrigieren haben sich Deng et al. (2009) in ihrer Studie mit einem Verfahren auseinandergesetzt, welches für die Ableitung meteorologischer Daten aus Einfrequenzempfängern eine ausreichende Genauigkeit liefert und kostengünstig angewendet werden kann. Das Verfahren beruht auf einer epochendifferenzierten ionosphärischen Verzögerungskorrektur, die aus nahegelegenen Zweifrequenz-Referenzstationen abgeleitet und für den günstigeren Einfrequenzempfänger interpoliert wird. Diese Methode wird als Satellite-specific Epoch-differenced Ionospheric Delay Model (SEID) bezeichnet.

Der von Deng et al. (2009) entwickelte Algorithmus bietet eine praktische Hilfestellung, um die notwendige Korrektur der ionosphärischen Verzögerung für Einfrequenzempfängerdaten zu berechnen. Im Fall eines Zweifrequenzempfängers kann dieser Fehler durch eine Linearkombination aus den einzelnen Frequenzen L_1 und L_2 bis auf den Submillimeterbereich reduziert werden. Wie bereits in Kapitel 2.3.2 erläutert, ist die Phasenverzögerung beziehungsweise die Gruppenverzögerung der Ionosphäre definiert über:

$$\Delta S_{IONO,ph} = -\frac{40,3}{f^2} \cdot TEC \quad \text{und} \quad \Delta S_{IONO,gr} = \frac{40,3}{f^2} \cdot TEC \quad (3.1)$$

Die ionosphärische Verzögerung ist folglich von der Elektronendichte über den Weg des Signals vom Satelliten zum Empfänger abhängig. Der gesamte Elektronengehalt wird über die Integration der Elektronendichte (ED) beschrieben und repräsentiert den sogenannten Slant Total Electron Content (STEC). Dies ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Für den STEC wird üblicherweise ein Modell verwendet, welches jenem von Klobuchar ähnelt. Dabei wird die

ionosphärische Schicht auf eine sehr dünne Schicht in etwa 350 km Höhe¹ reduziert (Single-Layer-Modell). Der Schnittpunkt des Signalweges mit dieser Schicht wird als Ionospheric Pierce Point (IPP – λ , Θ) bezeichnet, welcher auch für die Berechnung des STEC (siehe Formel 3.2) benötigt wird.

$$STEC(\lambda, \Theta, t) = \int_{rec.}^{sat.} ED(x, y, z, t) ds \quad (3.2)$$

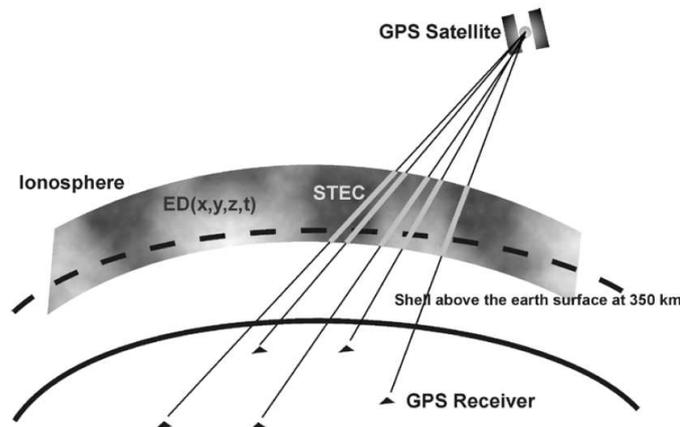


Abbildung 3.1: Darstellung des gesamten Elektronengehalts (STEC) mit einem Single-Layer Modell in 350 km Höhe (Deng, 2012)

3.2.1 Epochen-diferenzierte Ionosphären-Verzögerungskorrektur

Nachfolgend soll gezeigt werden, dass die Elimination der ionosphärischen Verzögerung bei Einfrequenzempfängerdaten mit Hilfe der Epochen-differenzierten ionosphärischen Verzögerung unter normalen oder durchschnittlichen ionosphärischen Bedingungen durchführbar ist.

Für die Herleitung nach Deng et al. (2009) wird nachfolgend die vereinfachte Beobachtungsgleichung der Pseudo-Range der Trägerphase L und der Codemessung P für eine Epoche j (siehe Gleichung 3.3) dargestellt.

$$\begin{aligned} L_i(j) &= \rho(j) - \Delta Ion_i(j) + \lambda_i N_i \\ P_i(j) &= \rho(j) + \Delta Ion_i(j) \end{aligned} \quad (3.3)$$

¹In 350 km ist die Elektronendichte am größten (F2-Layer).

wobei $\rho(j)$ die Fehlereinflüsse des nicht-dispersiven Bereichs (troposphärischer Fehler, geometrischer Fehler und Uhrenfehler) beinhaltet. ΔIon beschreibt die ionosphärische Verzögerung, λ die Wellenlänge und N die Phasenmehrdeutigkeiten. Der Frequenzindex wird über i definiert. Bei Annahme, dass der Satellit zu den Epochen j_0 bis $j_0 + n$ beobachtet wird, kann die Verzögerungsdifferenz der Ionosphäre für die L_1 -Frequenz zwischen zwei Epochen wie folgt berechnet werden:

$$d\Delta Ion_1(j_0, j_0 + k) = \Delta Ion_1(j_0 + k) - \Delta Ion_1(j_0) \quad (3.4)$$

Mit der Eingliederung dieser Korrektur an die Trägerphase für die Epoche $j_0 + k$ (k beschreibt die Anzahl an Epochen) kann diese als

$$L_i(j_0 + k) + \left(\frac{f_i^2}{f_1^2}\right) \cdot d\Delta Ion_1(j_0, j_0 + k) = \rho(j_0 + k) - \Delta Ion_i(j_0) + \lambda_i N_i \quad (3.5)$$

dargestellt werden. Aus Formel 3.5 ist zu erkennen, dass die ionosphärische Verzögerung für kontinuierliche Beobachtungen gleich jener aus der ersten Epoche j_0 ist. In weiterer Folge können die $\Delta Ion_i(j_0)$ mit den Mehrdeutigkeiten N zu \bar{N} zusammengefasst werden. Dieser Schritt führt dazu, dass sich die Gleichung wie eine ionosphärenfreie Beobachtung verhält.

$$L_i(j_0 + k) + \left(\frac{f_i^2}{f_1^2}\right) \cdot d\Delta Ion_1(j_0, j_0 + k) = \rho(j_0 + k) + \lambda_i \bar{N}_i \quad (3.6)$$

Aus Gleichung 3.6 ist zu erkennen, dass für die Prozessierung der Einfrequenzdaten nur die ionosphärische Verzögerung der epochen-differenzierten Korrekturen $d\Delta Ion_1(j_0, j_0 + k)$, notwendig ist. (Deng et al., 2009)

3.2.2 Epochen-differenziertes Ionosphären-Verzögerungsmodell

Zur Erstellung eines ionosphärischen Korrekturmodells wird im Allgemeinen die Beobachtung L_4 verwendet. Diese ist in Formel 3.7 als Differenz der Beobachtungen auf den Grundfrequenzen L_1 und L_2 definiert.

$$L_4 = L_1 - L_2 = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 - (\Delta Ion_1 - \Delta Ion_2) \quad (3.7)$$

Ein großes Hindernis für die Berechnung des Satellite-specific Epoch-differenced Ionospheric Delay Model stellt der Mehrdeutigkeitsparameter der L_4 -Frequenz dar. Es ist nicht möglich, die L_4 -Beobachtung der Zweifrequenzempfänger direkt an Einfrequenzbeobachtungen anzubringen. Deshalb wird anstatt der L_4 -Frequenz die Differenz der Epochen dL_4 verwen-

det (Formel 3.8). Hierfür wurde zuvor gezeigt, dass die Differenz eine ausreichend genaue Abschätzung darstellt. Durch die Epochen-differenzierte Variante können Mehrdeutigkeiten nicht eliminiert werden, wenn Ausreißer oder Cycle Slips vorhanden sind. Aus diesem Grund müssen diese Ausreißer im Vorhinein detektiert und behandelt werden.

$$\begin{aligned} dL_4(j, j+1) &= d\Delta Ion_1(j, j+1) - d\Delta Ion_2(j, j+1) \\ &= \left(\frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2} \right) \cdot d\Delta Ion_1(j, j+1) \end{aligned} \quad (3.8)$$

Um die ionosphärischen Einflüsse zu korrigieren, kann nun eine zweite Frequenz für einen Einfrequenzempfänger berechnet werden. Dies kann mit Hilfe von mindestens drei umliegenden Referenzstationen² (einem GPS-Netz) realisiert werden. Die Referenzstationen müssen dafür mit Zweifrequenzempfängern ausgestattet und sollten räumlich um den Einfrequenzempfänger verteilt sein. Diese Berechnung ist mit einer sehr hohen Genauigkeit möglich. Mit Hilfe der epochenweisen Differenzen der umgebenden Referenzstationen kann eine lineare Funktion der ionosphärischen Verzögerung kondensiert in einer Schicht in circa 350 Kilometer Höhe abgeleitet werden. Damit kann der Ionospheric Pierce Point (IPP) des Einfrequenzempfängers zu einem speziellen Satelliten bestimmt werden. Die Bestimmung des IPP mit Hilfe des Modells von Deng (2012) wird in Abbildung 3.2 dargestellt.

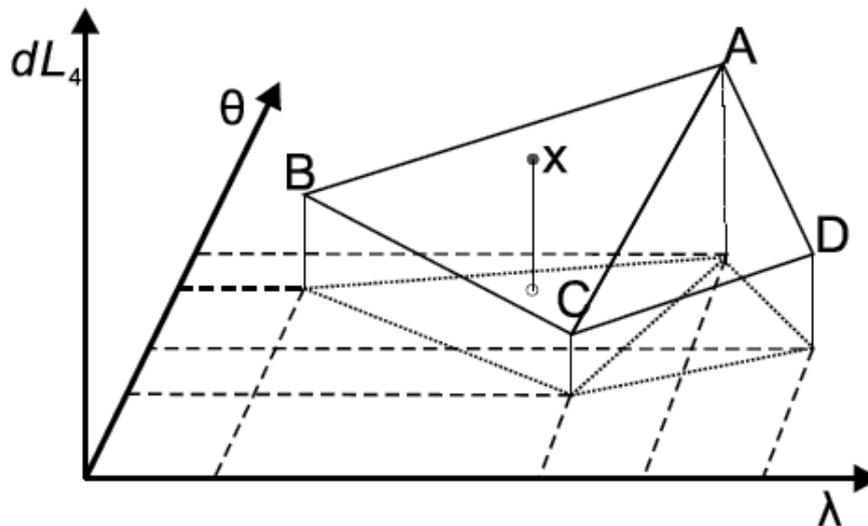


Abbildung 3.2: A, B, C, D beschreiben die IPP zu einem spezifischen Satelliten der Referenzstationen und über dL_4 kann der IPP für den Einfrequenzempfänger x abgeleitet werden. (Deng, 2012)

²siehe auch Kapitel 3.5

Mit dieser Herangehensweise kann nun die Differenz von L_4 als eine Ebene definiert werden.

$$\begin{aligned}
 dL_4 &= \alpha_0 + \alpha_1 \Delta\lambda + \alpha_2 \Delta\Theta \quad \text{wobei} \\
 \Delta\lambda &= \lambda - \bar{\lambda} \quad , \quad \Delta\Theta = \Theta - \bar{\Theta} \quad \text{und} \\
 \bar{\lambda} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad , \quad \bar{\Theta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Theta_i
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

In Formel 3.9 stellen α_0 , α_1 , α_2 die zu schätzenden Parameter, $\Delta\lambda$ und $\Delta\Theta$ die IPP Koordinatendifferenz zu den IPP-Punktzentrum $(\bar{\lambda}, \bar{\Theta})$ und n die Anzahl der Referenzstationen dar. Aus Abbildung 3.2 ist ersichtlich, dass durch diesen Algorithmus mindestens drei Referenzstationen benötigt werden, um die drei Modellparameter α_0 , α_1 , α_2 ausreichend genau schätzen zu können. Wie auch bei anderen Verfahren, verbessert eine größere Anzahl an Referenzstationen das Ergebnis der geschätzten Parameter. Die Auswertung wird über die Methode der kleinsten Quadrate berechnet. Dies wird für jeden Satelliten und für jede Epoche durchgeführt, woraus sich ein epochen- und satellitenspezifisches Ebenenmodell ergibt (Deng et al., 2009). Mit Hilfe dieses Algorithmus ist es möglich, die epochenweise-differenzierte ionosphärische Verzögerung³ $d\tilde{L}_4(j, j+1)$ für einen beliebigen Empfänger im Referenznetz zu berechnen (Krietemeyer et al., 2018). Die Summe der einzelnen Korrekturen lässt sich folgendermaßen darstellen (Formel 3.10):

$$\tilde{L}_4(k) = \tilde{L}_4(j_0) + \sum_{j_0}^k d\tilde{L}_4(j) \tag{3.10}$$

wobei $\tilde{L}_4(j_0)$ nicht bekannt ist und als beliebige reelle Zahl angenommen werden kann. Vereinfacht wird hierfür $\tilde{L}_4(j_0) = 0$ gewählt, da dies durch die Phasenzahl der \tilde{L}_2 -Beobachtungen kompensiert wird. Durch die erzeugte \tilde{L}_4 -Frequenz kann nun das synthetische Signal \tilde{L}_2 für den Einfrequenzempfänger über die Differenz von L_1 und \tilde{L}_4 berechnet werden.

$$\tilde{L}_2 = L_1 - \tilde{L}_4 \tag{3.11}$$

Das durch den Algorithmus erzeugte synthetische Signal \tilde{L}_2 hat dieselben Informationen wie das L_1 -Signal des Einfrequenzempfängers. Das neue Signal wurde über eine Interpolation aus den Referenzstationen berechnet und nur in Bezug auf die ionosphärische Korrektur an das L_2 -Signal angepasst. Durch die angepasste Korrektur kann nun die Ionosphäre mit den Ansatz einer Linearkombination reduziert werden, so wie es auch bei einem Zweifrequenzempfänger möglich ist. Diese Anpassungen, welche hier für das Trägerphasensi-

³Für eine detaillierte Berechnung des Ausgleichs für $d\tilde{L}_4(j, j+1)$ siehe Deng (2012)

gnal dargestellt wurden, können auch auf die Codemessung angewendet werden. Der SEID-Algorithmus schreibt die neu erzeugten Signale in ein neues RINEX-File⁴. Durch diesen Vorgang kann eine präzise Positionsbestimmung mit den meisten herkömmlichen GNSS-Programmen und -Auswertesoftware berechnet werden. Für ein besseres Verständnis veranschaulicht Abbildung 3.3 die Funktionsweise des SEID-Algorithmus grafisch.

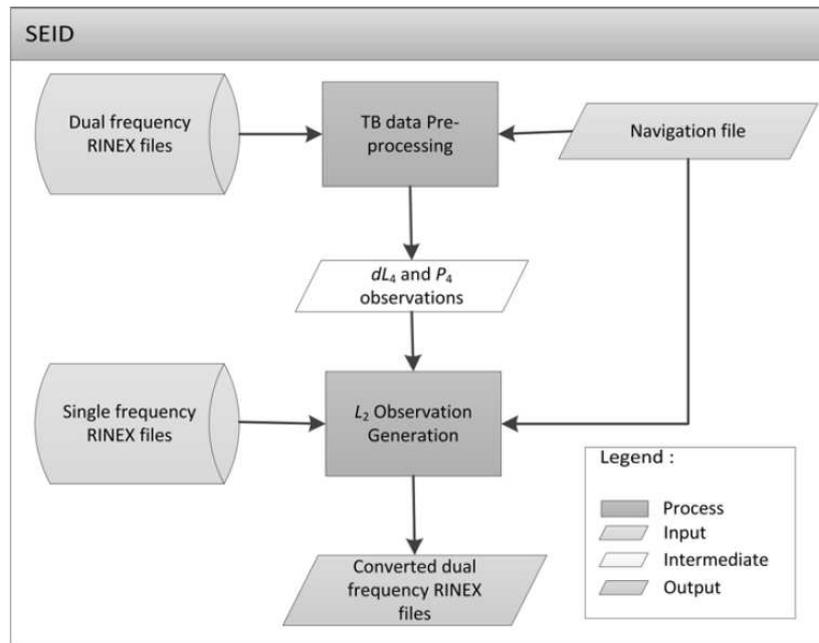


Abbildung 3.3: Ablauf des SEID Algorithmus als grafische Diagrammdarstellung (Deng, 2012, S.52)

Anhand von Abbildung 3.3 sei nochmals der gesamte Prozess kurz zusammengefasst. Vor Applikation des SEID-Algorithmus müssen die Daten der einzelnen Referenzstationen auf Ausreißer und Cycle Slips kontrolliert und diese gegebenenfalls korrigiert werden. Bei redundanten Beobachtungen können verbleibende problematische Daten während der Schätzung der Parameter korrigiert und ebenfalls eliminiert werden. Nach der Korrektur des Antennenphasenzentrums wird zu jeder Epoche P_4 und dL_4 für jeden einzelnen Satelliten berechnet und erzeugt. Im Anschluss werden aus den Koordinaten der Referenzstationen und der Satelliten die jeweiligen Ionospheric Pierce Points berechnet. Nun können über die Beobachtungsgleichungen für die Phasemessung (siehe Formel 3.9) und die Codemessung die Parameter entsprechend Gleichung 3.9 geschätzt werden. Dies wird für jede Epoche und jeden Satelliten durchgeführt. Mit den jeweils spezifischen Koeffizienten können die synthetischen P_4 - und dL_4 -Beobachtungen des Einfrequenzempfängers berechnet werden. Zuletzt wird mit Hilfe der neu erzeugten synthetischen Signale ein L_2 und P_2 Signal berechnet. Mit

⁴RINEX: Receiver Independent Exchange Format. Format zum Speichern und Austausch von GNSS-Daten.

diesem Signal wird ein neues RINEX File erstellt, welches denselben Aufbau wie Zweifrequenzbeobachtungsdaten hat. Der Vorteil besteht darin, dass diese Daten mit beliebigen Softwarepaketen verarbeitet werden können (Deng et al., 2009; Deng, 2012).

3.3 Basislinienberechnung

Im Rahmen der Arbeit wurde die Auswertemethode der Basislinienberechnung zur Positionsbestimmung angewendet. Bei der Basislinienberechnung wird die Position des Empfängers nicht absolut berechnet, sondern relativ zu einer weiteren Station. Von dieser Referenzstation müssen die genauen Koordinaten bekannt sein. Bei dieser Art der Positionsbestimmung werden die Beobachtungsdaten von mindestens zwei Empfängern gleichzeitig aufgezeichnet. Um die Empfängerposition aus den bekannten Koordinaten der Referenzstation ableiten zu können, wird im Postprocessing eine Basislinie zwischen dem Empfänger und der Referenzstation gebildet. Diese Variante der Positionsbestimmung ist auch unter dem Begriff Differenzverfahren bekannt. Der Vorteil der relativen Positionsbestimmung liegt darin, dass sich durch die Differenzbildung zahlreiche Fehler eliminieren beziehungsweise erheblich reduzieren lassen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Fehler bei naheliegenden Messpunkten räumlich und zeitlich korreliert sind. Mit diesem Verfahren können Genauigkeiten im Zentimeter- bis Millimeterbereich erreicht werden, denn die Fehler (Orbitfehler, atmosphärische Einflüsse, systematische Fehler) für den Differenzvektor (Basislinienvektor) fallen weitgehend weg. Die Basislinienberechnung wurde im Zuge dieser Arbeit mit dem Programm RTKLIB (siehe Kapitel 3.7.1) zur Positionsbestimmung und Schätzung der troposphärischen Signalverzögerung angewendet. Die Beobachtungsgleichung des Differenzverfahren setzt sich wie in Gleichung 3.12 dargestellt zusammen.

$$\rho_{u,cor}^i = \rho + c\Delta t_{um} + \varepsilon_{um} = \sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + (z_i - z_u)^2} + c\Delta t_{um} + \varepsilon_{um} \quad (3.12)$$

Wobei für $\varepsilon_{um} = \varepsilon_u - \varepsilon_m$ gilt und die verbleibenden Pseudorangefehler darstellt. i beschreibt den Satelliten, u den Rover und m die Referenzstation. Der Unterschied zwischen Receiver- und Referenzstations-Uhrenoffset wird über $\Delta t_{um} = \Delta t_u - \Delta t_m$ definiert. i beschreibt den Satelliten, u den Rover und m die Referenzstation. (Kaplan und Hegarty, 2006)

3.4 Precise Point Positioning (PPP)

Neben der Basislinienberechnung wurde auch die Auswertungsmethode Precise Point Positioning (PPP) verwendet, da diese Methode in den verwendeten Auswertungsprogrammen⁵ integriert ist, wodurch die Auswertung erheblich erleichtert wurde. Nachfolgend soll das Grundprinzip der Positionsberechnung mit Hilfe der PPP-Methode erläutert werden.

Precise Point Positioning ist eine GNSS-Auswertungstechnik, welche erst relativ spät (um 2010) weite Verbreitung fand. Im Gegensatz zur differenziellen Berechnungsmethode werden die Satellitenbahnfehler und Uhrenfehler bei der PPP-Berechnung nicht eliminiert, sondern durch präzise Vorhersagen ersetzt. Damit können auch ohne der differenziellen Berechnungsmethode Genauigkeiten im cm-Bereich erreicht werden. PPP ist charakterisiert durch einen einzelnen Empfänger, der seine Position über korrigierte Satellitenorbits und Uhrenkorrekturen bestimmt. Die korrigierten Daten erhält der Empfänger von Monitorstationen. (Guo et al., 2018; Fuhrmann et al., 2010)

Um Punktkoordinaten mit dem PPP-Verfahren bestimmen zu können, werden Zweifrequenzbeobachtungen (zum Beispiel L_1 und L_2) für die Code- und Phasenmessung benötigt. Die ionosphärenfreie Beobachtungsgleichungen für Code und Phase werden in nachfolgender Formel 3.13 dargestellt (Hofmann-Wellenhof et al., 2008). In der Formel beschreibt ρ die geometrische Distanz, $c\Delta t$ den Uhrenoffset und Δ^{TROP} die Signalverzögerung der Troposphäre.

$$\begin{aligned} \frac{R_1 f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} - \frac{R_2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} &= \rho + c\Delta t + \Delta^{TROP} \\ \frac{\lambda_1 \phi_1 f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} - \frac{\lambda_2 \phi_2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} &= \rho + c\Delta t + \Delta^{TROP} + \frac{\lambda_1 N_1 f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} - \frac{\lambda_2 N_2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \end{aligned} \quad (3.13)$$

Auch Fehlereinflüsse müssen bei der Auswertung berücksichtigt werden, da sich die Fehler im Gegensatz zu einer Doppeldifferenzberechnung nicht reduzieren beziehungsweise eliminieren. Im Fall von PPP müssen die Satellitenbahndaten und Uhrenkorrekturen als fehlerfrei betrachtet werden. Für die ionosphärische Korrektur wird die ionosphärenfreie Linearkombination verwendet. Diese wurde bereits im Abschnitt 2.3.2 mit den Formeln 2.7 und 2.8 beschrieben. Im Fall der Troposphäre wird der Fehlereinfluss beim PPP-Verfahren nicht eliminiert (siehe Formel 3.13), sondern muss mit Hilfe verschiedener Modelle, wie beispielsweise Hopfield oder Saastamoinen, modelliert beziehungsweise mitgeschätzt werden. Auch

⁵Die Auswertungsprogramme werden in Kapitel 3.7 im Detail betrachtet.

diese Ansätze wurden bereits in Kapitel 2.3.3 mit den Gleichungen 2.14 und 2.15 näher behandelt.

Vor- und Nachteile der PPP-Methode

Die Positionsbestimmung mit Hilfe von PPP bietet eine Reihe von Vorteilen. So wird beispielsweise nur ein GNSS-Empfänger benötigt. Hierbei sollte jedoch berücksichtigt werden, dass für die Positionsbestimmung trotzdem zusätzliche Produkte (präzise Ephemeriden von Monitorstationen, welche mit mehreren GNSS-Receiver gemessen wurden) benötigt werden. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass zwischen dem Empfänger und den Monitorstationen keine Korrelationen entstehen können. Das heißt, ein Fehler bei einer Station beeinflusst im Fall der PPP-Messung nur die einzelne Station und wirkt sich nicht auf das gesamte Netz aus. Aufgrund dessen wird die Methodik auch in manchen Fällen zur Fehlerdetektion heran gezogen.

Nachteilig ist jedoch, dass bei der Positionsbestimmung mit Precise Point Positioning der ionosphärische Fehler über eine Linearkombination weitgehend eliminiert wird. Daraus ergibt sich, dass die Mehrdeutigkeiten nicht ganzzahlig sind und somit auch nicht fixiert werden können. Folglich werden die Mehrdeutigkeiten als Parameter in die Ausgleichung mit einbezogen. Ein weiterer Nachteil der ionosphärenfreien Linearkombination ist, dass nur Einflüsse der ersten Ordnung berücksichtigt werden. Darüber hinausgehende Einflüsse können den Fehler der troposphärischen Verzögerung vergrößern. Da für die PPP-Auswertung präzise Bahn- und Uhrinformationen benötigt werden, ist die Positionsbestimmung mit PPP stark von der Qualität dieser zusätzlichen Produkte abhängig. Nachteilig ist zudem, dass diese hochpräzisen Uhr- und Bahndaten erst nach einigen Tagen verfügbar sind, weshalb eine Auswertung in Echtzeit ungenauer ist. Daraus lässt sich ableiten, dass die Punktbestimmung mit PPP eine geringere Genauigkeit aufweist als jene mit differenzieller Methode. Für eine Genauigkeit im Zentimeterbereich sind längere Beobachtungszeiten notwendig, als bei der differenziellen Methode mit Basislinien. (Fuhrmann et al., 2010)

Für die Auswertung von PPP gibt es derzeit verschiedene Softwarepakete mit unterschiedlichen Strategien. Die Pakete wurden von Universitäten oder Firmen entwickelt, wobei einige davon auch als „Open Source“ bereit gestellt werden (Karabatić, 2011). Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Open-Source-Programme „goGPS“ und „RTKLIB“ verwendet. Im nachfolgenden Kapitel 3.7 werden diese näher beschrieben.

3.5 Referenznetz EPOSA

Um für den Einfrequenzempfänger mit Hilfe des SEID-Algorithmus Zweifrequenzdaten berechnen zu können, werden Referenznetze benötigt. Das Referenznetz, welches im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurde, ist jenes von den Energieversorgungsunternehmen (EVUs) von Wien (Wiener Netze GmbH) und dem Burgenland (Energie Burgenland AG) sowie von den Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB). Unter der Markenbezeichnung Echtzeit Positionierung Austria (EPOSA) entwickelten diese drei Unternehmen gemeinsam ein sehr genaues Netz zur satellitengestützten Punktbestimmung. „Mit der gleichzeitigen Nutzung aller vorhandenen Navigationssatelliten, einer höchstmöglichen Verfügbarkeit und der geprüften Qualität (Technische Universität Wien) ist EPOSA Marktführer in Österreich“ (EPOSA, 2019). Die Referenzstationen sind mit Mehrfrequenzempfängern ausgerüstet und können für die Berechnung des synthetischen L_2 -Signals verwendet werden. Das EPOSA-Netz ist über das gesamte österreichische Bundesgebiet verteilt und wird in Abbildung 3.4 dargestellt.

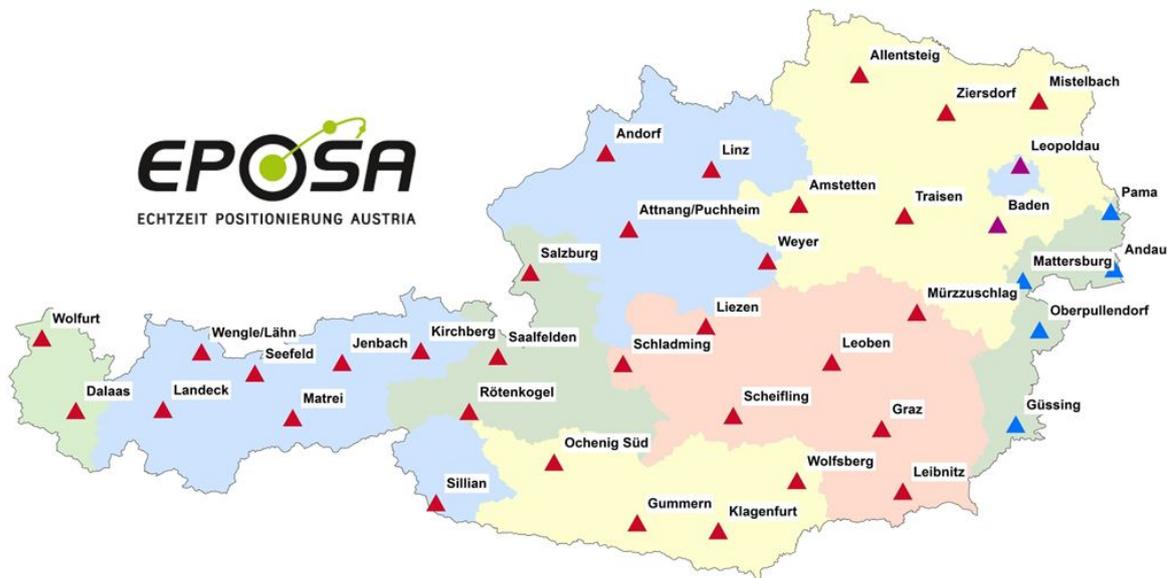


Abbildung 3.4: Verteilung der Referenzstationen des EPOSA-Netzes. (EPOSA, 2019)

EPOSA bietet eine Vielzahl an Produkten und Services an, unter anderem:

- **Real Time Kinematic (RTK) Echtzeitservice:**

Mit diesem Service stellt EPOSA Korrekturdaten in Echtzeit zur Verfügung. Diese Daten werden mit einer Rate von einer Sekunde übertragen. Die Korrekturdaten können über das Internet oder das Global System for Mobile Communications (GSM) abgerufen werden. EPOSA stellt die Daten in dem standardisierten Format RTCM⁶ mittels NTRIP-Protokoll⁷ für den Nutzer bereit.

- **Post-Processing Daten:**

EPOSA stellt nicht nur Daten in Echtzeit zur Verfügung. Es gibt auch die Möglichkeit, Daten für das Post-Processing abzurufen. Diese Daten stellt EPOSA im Receiver Independent Exchange Format (RINEX) dem Nutzer zur Verfügung. Als Zusatz zu diesem Service besteht die Option, sich virtuelle Stationsdaten ausgeben zu lassen. Dies bedeutet, dass durch das EPOSA-Netz Daten für einen beliebigen Punkt innerhalb dieses Netzes erstellt werden (fiktive Referenzstation). (EPOSA, 2019)

Das EPOSA-Netz beruht dabei nicht nur auf GPS, sondern verwendet die Daten aus allen verfügbaren GNSS-Systemen. Somit besteht die Möglichkeit, auch kombinierte Daten – wie zum Beispiel von GPS und GLONASS – zu verwenden. Auch für die Systeme GALILEO und BeiDou sind die einzelnen Referenzstationen ausgerüstet. EPOSA führt regelmäßige Überprüfungen zur Datenqualität durch. Dies erfolgt in Form von Partnerschaften, wie zum Beispiel mit jener der Technische Universität Wien. Die verschiedenen Daten des EPOSA-Netzes können gegen ein Entgelt⁸ vom jeweiligen Nutzer heruntergeladen werden.

⁶RTCM: Radio Technical Commission for Maritime Services

⁷NTRIP: Networked Transport of RTCM via Internet Protocol

⁸Details, siehe EPOSA-Homepage: <http://www.eposa.at/>

3.6 Satelliten-Produkte

Für die Punktbestimmung mit Hilfe von PPP werden Services benötigt, welche Satellitenbahn- und Satellitenuhrkorrekturen zur Verfügung stellen. Im Folgenden wird der Service des International GNSS Service (IGS) und jenes des deutschen Geo-Forschungs-Zentrum Potsdam (GFZ) im Detail beschrieben.

3.6.1 International GNSS Service

Der IGS wurde im Jahr 1994 von der International Association of Geodesy (IAG) gegründet. Die Gründungsidee der IAG war allen Nutzern GNSS-Daten sowie GNSS-Produkte kostenlos zur Verfügung zu stellen. Der IGS ist eine freiwillige Non-Profit-Organisation, bei der rund 200 verschiedene Institutionen mitwirken. Der Service ist Teil des Global Geodetic Observing Systems (GGOS), einem global verteilten GNSS-Netzwerk. Der IGS verfügt über Datenzentren, Analysezentren sowie GNSS-Bodenstationen⁹ und verfolgt das Ziel ausreichend genaue Daten für die Forschung aufzunehmen und abzuleiten.

Im Strategieplan¹⁰ für die Jahre 2013 bis 2016 hat der IGS das Hauptziel formuliert, einen weltweiten Maßstab für Non-Profit GNSS-Produkte und -Services zusetzen. Ziel war es, dass der IGS die erste Wahl für qualitativ gute GNSS-Daten ist. (International GNSS Service (IGS), 2019)

Auf der Webseite des International GNSS Service (IGS) (2019) werden folgende Produkte kostenlos zur Verfügung gestellt:

- präzise GNSS Satelliten Ephemeriden,
- Erdrotationsparameter,
- globale Stationskoordinaten und -geschwindigkeiten,
- Satelliten- und Stationsuhrenkorrekturinformation,
- Schätzungen des Zenit Total Delay sowie
- eine globale Ionosphärenkarte.

Da im Rahmen dieser Arbeit die vom IGS zur Verfügung gestellten Uhren- und Orbitkorrekturen verwendet wurden, soll nun auf diese näher eingegangen werden.

⁹siehe Details auf: <http://www.igs.org/network>

¹⁰siehe Details auf: <https://kb.igs.org/hc/en-us/articles/201747733-Strategic-Plan-2013-2016>

Präzise Uhren- und Orbitkorrekturen

Wie zuvor beschrieben, stellt der IGS Satellitendaten via Internet zur Verfügung. Diese Daten werden im sp3-Format¹¹ von verschiedenen Datenzentren des IGS bereitgestellt. Die Datenfiles beinhalten für die Auswertung im post-processing Informationen über

- den Uhrenoffset der einzelnen Satelliten in Bezug auf die GPS-Systemzeit
- die genauen Koordinaten (im ITRF-Referenzrahmen) der Satellitenposition.

Zusätzlich sind im Header des Files Informationen über die verfügbaren Satelliten, die Herkunft der Daten und eventuelle systemrelevante Informationen angegeben. Diese Korrekturen werden mit einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten zur Verfügung gestellt. Der IGS bietet die Produkte für alle gängigen GNSS-Systeme an. Die einzelnen Produkte des IGS für präzise Satellitenorbits und -uhren werden in Tabelle 3.1 für GPS-Daten dargestellt. Die Produkte unterscheiden sich in Bezug auf ihre Genauigkeit und ihre zeitliche Verfügbarkeit.

GPS Satellitenorbits / Uhrenkorrekturen		
Produkttyp	Genauigkeit Orbit / Uhr	Update
Broadcast	100cm / 500ps	—
Ultra-Rapid (observed half)	3cm / 150ps	3-9 Stunden
Rapid	2,5cm / 75ps	1 Tag
Final	2,5cm / 75ps	12-18 Tage

Tabelle 3.1: IGS-Produkte für GPS (International GNSS Service (IGS), 2019)

Die Bahnprodukte des IGS mit bestmöglicher Genauigkeit sind die Final Orbits, welche mit „igs“ auf der Webseite des IGS abgekürzt werden. Die Daten werden im sp3 Format für jeweils einen Tag (24 Stunden) im zuvor erwähnten Intervall von 15 Minuten zur Verfügung gestellt¹². Im Zuge der vorliegenden Arbeit wurden die Final-Orbits zur Schätzung der troposphärischen Signalverzögerung verwendet. Die Produkte wurden zur Auswertung der Beobachtungsdaten verwendet, um zu Überprüfen mit welcher Genauigkeit die Schätzung des

¹¹sp3: Standard Product 3 (<ftp://igs.org/pub/data/format/sp3c.txt>)

¹²Satellitenorbits als *.sp3.Z und die Uhrenkorrektur als *.clk.Z File auf zum Beispiel: <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gnss/products/> als Download verfügbar.

ZTD möglich ist. Für Anwendung in der Meteorologie werden die Daten in Echtzeit benötigt, daher muss in diesem Fall auf die Broadcast- beziehungsweise Ultra-Rapid-Orbitdaten zurückgegriffen werden.

3.6.2 Deutsches GeoForschungsZentrum Potsdam

In diesem Abschnitt wird ein kurzer Einblick in das deutsche Geoforschungszentrum (GFZ) gegeben, welches auch als Helmholtz-Zentrum Potsdam bekannt ist. Das GFZ ist unter anderem als Analysezentrum des IGS tätig. Allgemein beschäftigt sich das Zentrum mit der Untersuchung und Erforschung der Erde und der damit verbundenen Dynamik. Als Mission hat sich das Zentrum gesetzt, den Aufbau und die Abläufe des Systems „Erde“ besser interpretieren und vorhersagen zu können. Das GeoForschungsZentrum Potsdam ist auf verschiedene Departments aufgeteilt (Geodäsie, Geophysik, Geochemie und Geosysteme) Das Department der Geodäsie splittet sich erneut in vier Abteilungen:

- Geodätische Weltraumverfahren,
- Globales Geomonitoring und Schwerefeld,
- Erdsystem-Modellierung,
- Fernerkundung und Geoinformatik.

Die Abteilung der geodätische Weltraumverfahren untersucht mit Hilfe der GNSS das System Erde und leitet daraus die Bewegung der Kontinentalplatten (mit einer Genauigkeit von Millimeter pro Jahr) ab. Zudem werden hier auch globale Sondierungen der Ionosphäre und der Troposphäre erstellt. In dieser Abteilung ist auch das Analysezentrum des IGS eingegliedert. Dieses berechnet hoch genaue Bahn- und Uhrkorrekturen aus einem GNSS-Netz. Das GNSS-Netz des GFZ besteht aus 30 weltweit verteilten Stationen und stellt die Bahn- und Uhrkorrekturdaten für alle GNSS-Systeme als Final Orbits¹³ kostenlos zur Verfügung. Durch die Teilnahme am IGS-Echtzeit-Service wird auch ein Echtzeit-Analysezentrum betrieben. Das GNSS-Netz des GFZ wurde in den 1990-er Jahren aufgebaut und wird durch stetige Aktualisierungen immer am neusten Stand der Technik gehalten. Die Verteilung der 30 Stationen kann auf der Webseite des GFZ eingesehen werden¹⁴. Die einzelnen Stationen sind mit den Antennentypen „JAV_ RINGANT_ G3T“ und dem Empfänger „JAVAD TRE_ G3TH DELTA“ ausgestattet. Diese können Signale von GLONASS, GPS und GALILEO aufnehmen. Die Stationen liefern die Daten für die Berechnung der Final Orbits sowie Daten in Echtzeit. (GeoForschungsZentrum (GFZ), 2019)

¹³im Rahmen des Multi-GNSS-Experiment and Pilot Project (MGEX)

¹⁴<https://www.gfz-potsdam.de/sektion/geodaetische-weltraumverfahren/projekte/gnss-infrastruktur/>

3.7 Auswertungs-Software

Zur Berechnung der troposphärischen Verzögerung wurde im Rahmen der Arbeit auf verschiedene GNSS-Programme zurückgegriffen. Die verwendeten Programme und ihre Berechnungsmethoden werden nachfolgend beschrieben.

3.7.1 RTKLIB

RTKLIB ist ein Open-Source-Programm und kann aus dem Internet¹⁵ heruntergeladen werden. Dieses wurde entwickelt, um Nutzern die Möglichkeit zu bieten, GNSS-Daten im Post-Processing auszuwerten, ohne von einer gerätespezifischen, oft teuren Software abhängig zu sein. Das Ziel bei der Entwicklung, war es ein kompaktes und portables Softwarepaket zu entwickeln, um dem Nutzer die Auswertung von RTK-GNSS-Daten zu ermöglichen. Das Programm soll dem Nutzer eine umfangreiche Bibliothek (Library) bieten. Aus dieser RTK-Library hat sich auch der Name Real Time Kinematic Library (RTKLIB) abgeleitet. Zu dieser kompakten Programmbibliothek zählen Funktionen zur Auswertung von Positionsalgorithmen, wie zum Beispiel:

- Matrix- und Vektorfunktionen,
- Zeit- und Textfunktionen,
- Geoidmodell und Koordinatentransformation,
- Troposphären-, Ionosphären- und Antennenmodelle,
- Einzelpunktpositionierung,
- Träger- und Code-basierte relative Positionierung,
- Positionierungslösung / NMEA-Eingabe / Ausgabe,
- RINEX-Beobachtungsdaten / Eingabe / Ausgabe von Navigationsnachrichten sowie
- Einlesen von präzisen Ephemeriden über Standard Product 3 (sp3).

¹⁵Download verfügbar auf: <http://www.rtklib.com/>

Als Erweiterung zu der kompakten Bibliothek bietet RTKLIB auch verschiedene Applikationsprogramme an. Diese unterstützen den Nutzer bei der Prozessierung von Real-Time-Positioning, im Post-Processing und in der Positionierung. Derzeit verfügt RTKLIB über folgende Applikationen:

- RTKNAV für eine Echtzeitpositionierung,
- RTKPOST für die nachträgliche Analyse von Beobachtungsdaten,
- RTKPLOT für die graphische Darstellung der Ergebnisse und Plots,
- RTKCONV zum Konvertieren von Rohdaten in das RINEX-Format,
- RTKGET bezieht Satellitendaten aus dem Internet und lädt diese herunter.

RTKLIB unterstützt die momentanen Standards wie RTCM und NTRIP. Somit bietet das Programm dem Nutzer auch die Möglichkeit, mit Hilfe von Datenströmen eines Netzwerk-RTK-Dienstes, welcher die Standardformate und -protokolle unterstützt, eine Positionierung in Echtzeit durchzuführen. (Takasu und Yasuda, 2009)

3.7.2 goGPS

goGPS¹⁶ ist ein Programm, welches als „Open-Source“-Paket angeboten wird. Die Entwicklung der Software wurde 2007 im Zuge von Diplomarbeiten und Dissertationen im Geomatics Laboratory des Politecnico di Milano begonnen. Das Ziel der Entwickler war es, die Positionierungsgenauigkeit von kostengünstigen GNSS-Empfängern zu verbessern (goGPS Project, 2019). Die erste freie Version von goGPS wurde 2009 veröffentlicht. Diese Version ist in das Programm MATLAB als Toolbox mit Funktionen integriert. Seit diesem Zeitpunkt wird an dem Programm kontinuierlich gearbeitet um es stetig weiter zu entwickeln und zu verbessern. In diesem Zusammenhang wurden Kooperationen zwischen Universitäten aus verschiedenen Ländern, wie zum Beispiel Deutschland, Italien, Spanien, Japan und der Schweiz geschaffen. In weiterer Folge haben sich auch verschiedene Unternehmen an der Weiterentwicklung der goGPS-Software beteiligt. Als eine Erweiterung des Programms wurde diese auch in Java veröffentlicht, um den Nutzerraum zu vergrößern und die Möglichkeit einer Webapplikation zu schaffen. Die Software nützt zur Auswertung der Punktbestimmung einen erweiterten Kalman-Filter, welcher die doppel-differenzierten Beobachtungen eines Low-Cost-Empfängers und einer Masterstation prozessiert. Die Auswertung kann in Echtzeit beziehungsweise im Post-Processing stattfinden und bietet die Möglichkeit, die Punktbestimmung mit kostengünstigen GPS-Geräten durchzuführen. (Herrera Olmo et al., 2015; Realini und Reguzzoni, 2013)

Realini und Reguzzoni haben in ihrem Artikel (Realini und Reguzzoni, 2013) die Positionsgenauigkeit für die Auswertung eines kostengünstigen Einfrequenzempfängers im urbanen Gebiet im Vergleich zu einem Empfänger höherer Klasse untersucht. In diesem Experiment konnte festgestellt werden, dass mit Hilfe der Software goGPS annähernd gleich genaue Ergebnisse erzielt werden wie mit Daten eines teuren GNSS-Geräts. Darüber hinaus konnte die Untersuchung zeigen, dass goGPS auch im urbanen Bereich gute Genauigkeiten erzielt. (Realini und Reguzzoni, 2013; Herrera Olmo et al., 2015)

goGPS verwendet für die Positionsbestimmung von Einfrequenzempfängern einerseits die „stand-alone-Methode“, andererseits einen „erweiterten Kalman-Filter“ (Realini und Reguzzoni, 2013; Herrera Olmo et al., 2015). Durch die stetige Weiterentwicklung wurden immer mehr Funktionen integriert. Mit der Version goGPS (v 1.0 beta 1), welche für die Auswertung dieser Arbeit verwendet wurde, können Positionsbestimmungen von Zweifrequenzempfängern über PPP bestimmt werden. Für die Auswertung und das Post-Processing von Einfrequenzgerätedaten wurde die SEID-Methode implementiert. Das SEID Modell wurde

¹⁶Download verfügbar unter: <http://61.115.228.209/download/>

bereits in Kapitel 3.2 beschrieben. Zu den ursprünglichen Funktionen von goGPS sind außerdem noch Modelle für die atmosphärische Verzögerung hinzugekommen. Dadurch kann der ZTD berechnet werden, indem der ZHD über einen Modellansatz, wie zum Beispiel Saastamoinen (Kapitel 2.3.3) berechnet und anschließend der ZWD geschätzt wird. Als Mappingfunktionen hat goGPS neben der Global Mapping Function auch die Vienna Mapping Function (VMF)¹⁷ implementiert. Hierfür sei auf die Literatur von Böhm und Schuh (2003) verwiesen. Für die Modellansätze können die Daten für den atmosphärischen Druck und die Temperatur über das Global Pressure and Temperature-Modell¹⁸ bezogen werden. (Kouba, 2009)

goGPS als MATLAB-Funktion

Wie bereits zuvor erläutert, ist goGPS in MATLAB integriert. Über ein Graphical User Interface (GUI)¹⁹ kann das Programm gestartet werden. Nach dem Öffnen des GUI müssen zuerst ein Projektpfad sowie die gewünschten Datenzentren (IGS, GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ)) angegeben werden, von welchem die Satellitendaten heruntergeladen werden sollen. Diese Funktion ist ähnlich jener von RTKLIB, bei welchem die Daten mit RTKGET (siehe Kapitel 3.7.1, wie zuvor beschrieben) für den Messzeitraum heruntergeladen werden. Bei goGPS kann zwischen verschiedensten Servicezentren gewählt werden. Für die Auswertung und Ausgabe der Ergebnisse mit goGPS ist es notwendig, dem Programm einen Code zu übermitteln. Dieser Code beschreibt den Auswertalgorithmus, welchen das Programm durchführen soll. Dabei wird der Code in einem Bereich der grafischen Benutzeroberfläche eingegeben. Zusätzlich zu diesem Code müssen die Verzeichnisse mit den Antennenspezifikationen und den Referenzstationen angegeben werden, um eine Auswertung durchführen zu können.

Berechnung des ZTD in goGPS

Auch in dieser Applikation gibt es mehrere Möglichkeiten, den ZTD näherungsweise zu berechnen und zu schätzen. Es werden verschiedene Ansätze für die Berechnung eines apriori Wertes angeboten. Welche Methoden das Programm goGPS für die Berechnung bereitstellt wird im nachfolgenden Abschnitt erklärt. Für ein genaueres Ergebnis der Verzögerung wird der feuchte Anteil aus den Beobachtungsdaten der einzelnen Satelliten geschätzt.

¹⁷entwickelt an der Technischen Universität Wien von Böhm und Schuh (2003)

¹⁸http://vmf.geo.tuwien.ac.at/APL_products/GRID/

¹⁹im Deutschen: grafische Benutzeroberfläche

Berechnung apriori

Wie zuvor erwähnt, gibt es verschiedene Möglichkeiten beziehungsweise Methoden, um einen anfänglichen Näherungswert für den ZTD zu erhalten. In goGPS werden hier zwei Verfahren angeboten, um apriori einen Näherungswert für die troposphärische Korrektur zu berechnen. Die erste Methode ist die Berechnung nach Saastamoinen (Kapitel 2.3.3). Für die Eingabe von Temperatur, Luftdruck und der relativen Feuchte werden auf Grundlage der berechneten Receiverhöhe die Werte einer Standardatmosphäre an die Höhe angepasst. So wird die Berechnung des Luftdrucks in Receiverhöhe mit Hilfe der internationalen Höhenformel²⁰ durchgeführt. Auch für die Temperatur und die relative Feuchte werden standardisierte Formeln für die Höhenkorrektur verwendet. Die verbesserten Werte werden nun in den Formelsatz von Saastamoinen eingesetzt und liefern apriori-Werte für den ZWD und ZHD. Als zweite Variante zur Berechnung eines Näherungswertes der Verzögerung steht die Funktion der VMF zur Verfügung. Die Funktion entnimmt der Vienna Mapping Function die Werte für den feuchten und den hydrostatischen Teil der Atmosphäre. Mit diesen Werten wird wiederum eine Näherung für den ZTD abgeleitet.

Schätzung des Zenit Total Delay (ZTD)

Für die genaue Schätzung und Ableitung der troposphärischen Korrektur verwendet goGPS ein Kalman-Filterungsverfahren. Hierfür haben Realini und Reguzzoni (2013) einen erweiterten Kalmanfilter angesetzt. In einem ersten Schritt muss die Position des Receivers geschätzt werden. In goGPS wird die Initialisierung zum Schätzen des ersten Zustandsvektor mit dem Bancroft-Algorithmus realisiert. Diese Näherungsposition ist nun auf einige Dezimeter genau. Der Zustandsvektor wird als Näherungsposition mit einer linearisierten kleinsten Quadrate Methode verbessert. Sind zu wenig Satelliten verfügbar um einen Ausgleich zu berechnen, wird in goGPS die Position, welche mit dem Bancroft-Algorithmus berechnet wurde, an den Filter übergeben. Mit dem Kalmanfilter können die Beobachtungsgleichungen definiert werden als (Realini und Reguzzoni, 2013):

$$Y_t = H_t X_t + v_t \quad (3.14)$$

Die Formel 3.14 beschreibt mit Y_t den Vektor der Messungen. H_t ist die Formmatrix des Zustandsvektor, X_t der Zustandsvektor und v_t das Messrauschen. Alle Module des Schätzverfahren haben diese Gleichung als Grundlage der Berechnungen.

²⁰Internationale Höhenformel: $p(h) = 1013,25 \cdot \left(1 - \frac{0,0065 \frac{K}{m}}{288,15K} \cdot h\right)^{5,255} hPa$

Für die Schätzung sind in goGPS verschiedene Module integriert, welche auch kombiniert angewendet werden können, um das Kalmanfilterverfahren durchzuführen. Die Beobachtungen können mit den erweiternden Kalman-Filter über die Codemessung, die Phasenmessung oder mit Unterstützung eines digitalen Geländemodells berechnet werden. Die Funktion zur Verwendung eines Digital Terrain Model (DTM) beruht darauf, dass bei Low-Cost-Geräten die vertikale Position über GPS häufig nicht gut bestimmbar ist. Um eine Verbesserung des Ergebnisses zu erreichen wird deshalb die Höhe zur Lageposition aus dem DTM entnommen.

3.7.3 Onlinetool des CGS

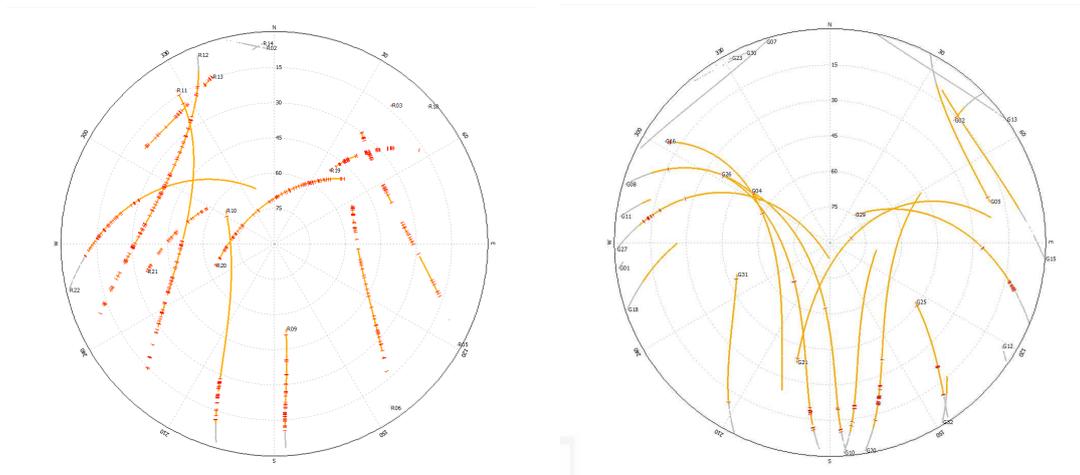
Das Canadian Geodetic Survey (CGS) bietet über deren Webseite mehrere Onlinetools zur Auswertung von GNSS-Daten an²¹. Eine dieser Applikationen ist das Canadian Spatial Reference System (CSRS)-PPP-Tool. Hier kann der Nutzer seine Rohdaten in Form von RINEX-Files hochladen. Die hochgeladenen Daten werden vom CGS ausgewertet und dem Nutzer anschließend per E-Mail zugesendet. CSRS-PPP arbeitet im Post-Processing und soll dem Nutzer Lösungen mit höherer Genauigkeit anbieten. Das Programm verarbeitet sowohl Einfrequenz- als auch Zweifrequenz-Daten im statischen und kinematischen Modus. Die Daten können für zwei Referenzsysteme, das North American Datum 1983 (NAD83) und dem International Terrestrial Reference Frame (ITRF), berechnet werden. Nach der Auswertung wird dem Nutzer eine Datei mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse, wie Zeitpunkt der Aufnahme, Position, ZTD und deren jeweiligen Genauigkeiten übermittelt.

²¹<https://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/geodetic-reference-systems/tools-applications/10925>

3.8 Datengrundlage

Das vorliegende Kapitel beschreibt die zur Ableitung der troposphärischen Signalverzögerung benötigten Datengrundlagen.

Der im Einsatz befindliche Einfrequenzempfänger kann zwar grundsätzlich GNSS-Signale von GPS und GLONASS aufzeichnen (Details siehe Kapitel 3.9), im Zuge dieser Arbeit werden jedoch ausschließlich GPS-Daten verwendet. Bei der Begutachtung der Rohdaten der aufgenommenen Signale des Einfrequenzempfängers hat sich gezeigt, dass die GPS-Daten wesentlich weniger Datenausfälle und Cycle Slips aufweisen als jene von GLONASS. Die Abbildungen 3.5a und 3.5b zeigen einen Skyplot der aufgezeichneten Rohdaten des Einfrequenzempfängers. Dabei ist zu erkennen, dass weniger russische Satelliten aufgenommen wurden und diese mit mehr Fehlern (Cycle Slips²²) behaftet sind. Die Cycle Slips werden in den Abbildungen mit roten Linien auf den einzelnen Satellitenbahnen dargestellt. Im Fall des europäischen Satellitensystems GALILEO sind von den Low-Cost-Antennen keine Beobachtungsdaten aufgezeichnet worden.



(a) Skyplot der GLONASS-Satelliten

(b) Skyplot der GPS-Satelliten

Abbildung 3.5: Skyplot der Einfrequenzempfänger-Beobachtungsdaten

Für die Berechnung der Position und der Ableitung der troposphärischen Verzögerung aus Einfrequenzempfängerdaten werden die Referenzstationen des EPOSA-Netzes verwendet. Das Netz wurde gewählt, da sehr viele Referenzstationen dieses Netz um den Messstandpunkt des Einfrequenzempfängers verteilt sind. Der Standpunkt des Low-Cost-Empfängers befindet sich am Messdach der Technische Universität Wien (TU Wien). Für die Auswertung

²²Ein Cycle Slip beschreibt den Phasenverlust bei der GNSS-Trägerphasenmessung.

werden die umliegenden Referenzstationen Andau, Baden, Leopoldau, Mattersburg, Mistelbach, Traisen und Ziersdorf verwendet (siehe Abbildung 3.4). Als weitere Referenz soll die Antenne der TU Wien dienen, welche sich in unmittelbarer Nähe des Aufnahmeortes der Einfrequenzempfänger-Messung befindet. Die Antenne wird von der Forschungsgruppe Höhere Geodäsie der TU Wien betrieben und gewartet. Dabei stellt die Forschungsgruppe Höhere Geodäsie der ZAMG stündlich eine Schätzung des ZTD zur Verfügung. Diese Auswertung soll zusätzlich eine gute Kontrolle des ZTD-Wertes des Einfrequenzempfängers darstellen.

Die statischen Daten wurden am 4. September 2018 von 08:23 Uhr bis 12:56 Uhr (MEZ²³) am Messdach der Technischen Universität aufgezeichnet. Für die Aufnahme wurden zwei unterschiedliche Zug-GNSS-Antennen verwendet. Der Aufbau des Empfängers und der Antennen wird in nachfolgenden Kapitel 3.9 beschrieben. Die statischen Daten sollten als Test für die nachfolgende Ableitung des ZTD der kinematischen Daten (Daten der Zug-Antennen der ÖBB) dienen. Die kinematischen Daten sind aufgezeichnete Beobachtungsdaten von GNSS-Zug-Antennen der ÖBB der Tage 11. Mai 2017, 27. bis 29. September 2017.

3.9 Antennenkonfigurationen

Nachfolgend werden die im Zuge der Arbeit verwendeten Antennen und Receiver zur Aufzeichnung der Satellitendaten beschrieben. Aus diesen Daten wurde anschließend mit den in Kapitel 3.7 beschriebenen Auswertprogrammen der ZTD abgeleitet.

Hierfür wurden einerseits die Antennen der Referenzstationen des EPOSA-Netzes verwendet, und andererseits zwei kostengünstige Antennen, welche auf den Zügen der ÖBB verbaut sind. Letztere dienen als statische Empfänger für die Ableitung des ZTD. Die Referenzstationen sind mit Zweifrequenzempfängern der Marke JAVAD ausgestattet. Die Kombination aus der Antenne *JAVRINGANT_G5T* und dem Receiver *JAVAD TRE_3 DELTA* stellt die Antennenkonfiguration für die Referenzstationen im EPOSA-Netz dar. Informationen über die Antenne können dem *.atx-Format, dem sogenannten Antenna Exchange Format (ANTEX), entnommen werden (National Geodetic Survey, 2019). Das Antenna Exchange Format beschreibt die speziellen Konfigurationen der Antenne in Bezug auf die Phasenzentrumsposition. Hier wird die Korrektur der Phasenzentrumsposition als Position des Antennenreferenzpunktes und dem zur Antenne gehörenden Phasenzentrums-Offset-Vektor angegeben. Die Antenne und der Receiver der Referenzstationen des EPOSA-Netz sind Produkte der Firma JAVAD, welche Produkte für hoch-präzise Navigation entwickeln. Die verwendeten

²³Mitteuropäische Zeit, entspricht UTC+1h

Gerätetypen entsprechen dem heutigen Stand der Technik, wobei auf ihre Spezifikationen nachfolgend näher eingegangen werden soll.

Der DELTA-3-Empfänger hat 864 Kanäle, drei Prozessoren und drei Programmspeicher integriert, welche alle in einem einzigen Chip verarbeitet sind. Die Vielzahl an Kanälen ermöglicht dem Nutzer die Verfolgung aller aktuellen und zukünftigen Satellitensignale. Bei der Entwicklung wurde ein großes Augenmerk darauf gelegt, dass der Empfänger einen geringen Stromverbrauch aufweist, um das damit verbundene Gesamtsystem kostengünstig und flexibel anbieten zu können. Der Receiver kann vielseitig verwendet werden, wie zum Beispiel zur hoch-genauen Navigation für Geodaten- und Vermessungsanwendungen. Aber auch für geophysikalische Untersuchungen wird der Receiver eingesetzt. Er kann als Empfänger für das Post-Processing, als Referenzstation (CORS²⁴) oder für die Echtzeitmessung als Basisstation verwendet werden. Außerdem kann der Empfänger für die Erforschung und Überwachung der Ionosphäre benutzt werden. Momentan ist dieser Receiver der einzige Empfänger, welcher das Signal des QZSS-LEX²⁵ decodieren und verfolgen kann.

Als Referenzwert zur Überprüfung der Messungen wurde die Antenne der Technischen Universität Wien gewählt, da sich diese in unmittelbarer Umgebung der aufgenommenen Daten des Einfrequenzempfängers befindet. Die Technische Universität verwendet eine Antenne des Typs TOPCON *TPSCR.G3* und einen Empfänger der gleichen Marke *TPS NET-G3A*. Die Antenne ist eine *CR-G3-Choke-Ring-Antenne* und kann sowohl GPS-Signale als auch jene von GLONASS und GALILEO empfangen. Die Antenne ist für alle Wettersituationen ausgelegt und ist für präzise geodätische Anwendungen und die Verwendung als Referenzstation geeignet. Der Receiver *TPS NET-G3A*, welcher für die TOPCON-Antenne verwendet wird, ist ein fortschrittlicher Empfänger für eine Referenzstation. Der Receiver ist mit einem Paradigm G3-Chip von Topcon ausgestattet (Topcon Antennen- und Receiverspezifikationen, 2019). Mit diesem Chip können alle Signale von GPS, GLONASS und GALILEO auf 144 Kanälen verfolgt werden. Für neue Signale beziehungsweise Frequenzänderungen kann bei diesem Gerät ein Firmware-Update durchgeführt werden, welches die Aufzeichnung von neuen Frequenzen ermöglicht. Der Vorteil ist, dass keine neuen und teuren Hardwareteile zugekauft werden müssen. Bei der großen Bandbreite an aufzuzeichnenden Signalen bietet der Empfänger mit einer Datenrate von bis zu 100 Hertz und diversen Anschlüssen eine sehr gute Systemkonnektivität. In Verbindung mit der Chock-Ring-Antenne ist der *TPS*

²⁴Continuously Operating Reference Station (CORS): stellt GPS-Daten zur Verfügung und unterstützt 3D-Punktbestimmung, Weltraumwetter-, Meteorologie-Anwendungen in den USA.

²⁵„LEX (1278.75 MHz): QZSS Experimental Signal for High precision (3 cm level) service; compatible with Galileo E6 signal.“ (Navipedia, 2019)

NET-G3A-Empfänger eine Referenzstation, welche die komplette Signallösung der oben genannten Satellitensysteme bietet.

Für die Ableitung des ZTD im Bahnbereich wurden Signale mit dem Einfrequenzempfänger *u-blox M8P* und den Antennen *Kathrein 87010003 (mit dem Verstärker 86010142)* und *Huber & Suhner SWA 0859/360/4/0/DFRX30* aufgezeichnet. Beide Antennen sind für den Zugverkehr entwickelt worden und zählen zu den sogenannten Zug-GNSS-Antennen. Der Empfänger von ublox liegt in einem Preisbereich von unter 200 Euro²⁶ und bietet die Möglichkeit mit RTK im Zentimetergenauigkeitsbereich zu messen. Der Empfänger kann bis zu 72 Kanäle auf der ersten Frequenz von GPS, GLONASS und Beidou messen. Moderne Kommunikationsfunktionen, wie WI-FI oder Bluetooth, ermöglichen dem Nutzer eine einfache Ansteuerung des Receivers. Da der u-blox M8 verschiedene GNSS-Systeme aufzeichnen kann, zählt auch dieser zur Klasse der Multi-GNSS-Receiver. Die Antenne der Firma Kathrein ist eine Zug-Antenne, welche speziell mit Hilfe der Deutschen Bahn AG entwickelt wurde. Sie ist eine Multi-Band-Antenne und kann auf allen Frequenzen gleichzeitig operieren. Die zweite eingesetzte Antenne ist von der schweizer Firma Huber & Suhner und ist auch eine Zug-Antenne sowie Multi-Band-Antenne, wodurch Signale verschiedener Satellitensysteme aufgezeichnet werden können. Detaillierte Informationen und die Spezifikationen der Antennen, als auch der Empfänger können aus den Datenblättern beziehungsweise aus dem Internet entnommen werden.

²⁶Preis laut Webseite von ublox: 131,71 Euro (<https://www.u-blox.com/de/product/neo-m8p-series>)

4 Berechnung und Ergebnisinterpretation

Kapitel 4 beschreibt die im Zuge der Arbeit durchgeführten Berechnungsschritte, um die troposphärische Signalverzögerung aus den Beobachtungsdaten von Einfrequenzempfängern abzuleiten. Vorerst wurde dies mit statischen Beobachtungsdaten, welche am Messdach der TU Wien mit den in Kapitel 3.9 beschriebenen Zug-Antennen aufgenommen wurden, getestet. Zuerst werden die Resultate der mittels RTKLIB durchgeführten Berechnungen präsentiert und erläutert. Im Anschluss sollen die Berechnungen und Ergebnisse mit goGPS dargestellt werden. Für die Auswertung mit goGPS wurde der SEID-Algorithmus einerseits mit sieben und andererseits mit vier Referenzstationen ausgewertet, um festzustellen ob die Anzahl der Referenzstationen eine Auswirkung auf das Ergebnis der troposphärischen Signalverzögerung darstellt. Zur Beurteilung der Ergebnisqualität der Einfrequenzempfänger-Auswertung hat sich die GNSS-Antenne (Zweifrequenzempfänger und Referenzstation) der TU Wien sowie die Referenzstationen Baden und Leopoldau angeboten. Um einen besseren Bezug zu den umliegenden Referenzstationen (Baden und Leopoldau) herzustellen, wurden die erhaltenen Ergebnisse der Referenzstationen auf die Höhe der Low-Cost-Empfänger angepasst. Die Höhenkorrektur wurde an die Referenzstationen angebracht, um die Verbesserung zwischen den einzelnen Stationen in einer gemeinsamen Grafik zu verdeutlichen. Zusätzlich wurden die Ergebnisse der Einfrequenzempfänger auf die Höhe der einzelnen Referenzstationen korrigiert. Dies soll einen genaueren Vergleich zu den einzelnen Referenzantennen darstellen. Um die Qualität der abgeleiteten troposphärischen Signalverzögerung zu verdeutlichen, wurden diese Unterschiede sowohl grafisch als auch in Form von Tabellen dargestellt. In der Folge der Auswertungen hat sich gezeigt, dass eine Schätzung der troposphärischen Verzögerung mit den kinematischen Daten der Zug-Antennen nicht möglich war. Zum einen konnte keine korrekte Lösung mit RTKLIB erzielt werden und in der Applikation goGPS war eine Auswertung von kinematischen Daten zum Zeitpunkt der Arbeit nicht implementiert.

4.1 Berechnung mit RTKLIB

Mit RTKLIB wurde versucht, die troposphärische Verzögerung aus den Daten eines Einfrequenzempfängers abzuleiten. Hierfür wurden die Rohdaten des Empfängers in RINEX formatiert und in das Programm importiert um die Position des Receivers und den ZTD daraus abzuleiten. Zur Positionsbestimmung wird eine Referenzstation herangezogen, um zwischen den beiden GNSS-Stationen eine Basislinie zu bilden. Als Referenzstation für die Berechnung der Basislinie zwischen Einfrequenzempfänger und der Station wurde Leopoldau gewählt. RTKLIB erstellt bei der Berechnung zwei Dateien, eine für die Position und eine für die Korrekturparameter (beispielsweise Troposphäre, Ionosphäre). Aus diesen beiden ausgegebenen Dateien wurden Position und troposphärische Parameter mit der Software MATLAB eingelesen. Die ausgegebene troposphärische Korrektur stellt laut Manual von RTKLIB den ZTD dar (Takasu, 2013).

Für die Korrektur der Ionosphäre stellt RTKLIB verschiedene Berechnungsmethoden zur Verfügung. Die ionosphärische Verzögerung kann zum Beispiel mit den Broadcast-Daten oder einem externen IONEX-File korrigiert werden. Bei den unterschiedlichen Varianten hat sich gezeigt, dass die Differenzen bei der Bestimmung der Position nur im Millimeterbereich liegen. Eine Elimination der Verzögerung der Ionosphäre ist nur bei Verwendung eines Zweifrequenzempfängers möglich. Eine exakte ionosphärische Korrektur ist wichtig, da ansonsten ionosphärische Restfehler vernachlässigt werden und die Berechnung der troposphärischen Verzögerung verfälschen.

Für die Berechnung der troposphärischen Verzögerung stellt auch hier RTKLIB zwei verschiedene Varianten zur Verfügung. Somit kann einerseits eine apriori-Näherung des ZTD mit Hilfe des Modells von Saastamoinen berechnet werden, andererseits aber auch mit jenen von Hopfield (für beide siehe 2.3.3). Die Berechnungen wurden auch mit beiden Methoden durchgeführt. Bei der Positionsbestimmung des kostengünstigen Empfängers zeigten sich wiederum nur Änderungen im Millimeterbereich. Das heißt, für die Positionsbestimmung gab es für beide Berechnungsvarianten der Troposphäre so gut wie keine Unterschiede. Die durch RTKLIB berechneten ZTD-Werte wurden aus dem erzeugten File in MATLAB eingelesen, um sie grafisch zu veranschaulichen.

4.2 Ergebnisse mit RTKLIB

Die Ableitung der troposphärischen Verzögerung aus den aufgezeichneten statischen GNSS-Daten mit RTKLIB ist in den Abbildungen 4.1 und 4.2 dargestellt. In nachfolgenden Abbildungen wurde die Antenne der Firma Kathrein als Antenne 1 bezeichnet und jene von Huber & Suhner als Antenne 2. Eine detaillierte Beschreibung der Antennen wurde bereits in Kapitel 3.9 durchgeführt. Die grafische Darstellung der Ergebnisse erfolgte mit MATLAB. Die Abbildungen zeigen den abgeleiteten ZTD der ersten und zweiten Aufnahme des Einfrequenzempfängers.

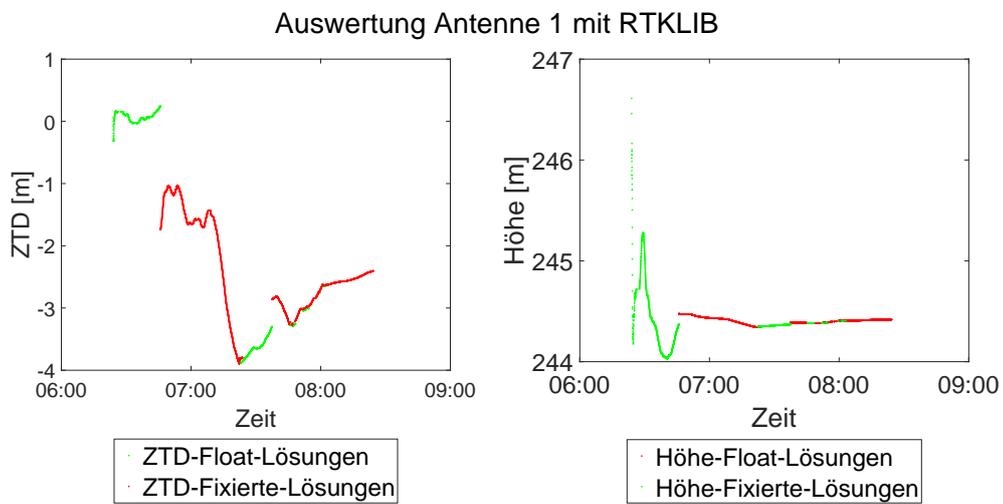


Abbildung 4.1: ZTD-Werte nach Berechnung mit RTKLIB für die erste Antenne.

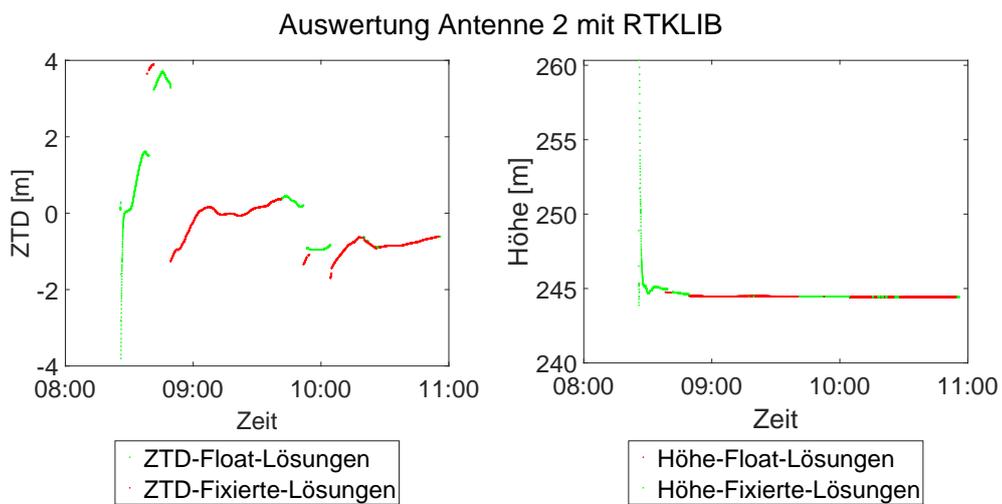


Abbildung 4.2: ZTD-Werte nach Berechnung mit RTKLIB für die zweite Antenne.

Um die fixierten Mehrdeutigkeiten von den Float-Lösungen unterscheiden zu können, wurde bei der grafischen Darstellung eine unterschiedliche Farbgebung gewählt. Die roten Linien repräsentieren die Lösung, bei welcher die Mehrdeutigkeiten fixiert sind, die grünen die nicht fixierte Float-Lösung. Zusätzlich wird jeweils im rechten Teil beider Abbildungen die Antennenhöhe dargestellt. Aus beiden Abbildungen ist herauszulesen, dass die Anzahl an fixierten Mehrdeutigkeiten in etwa gleich ist. Allgemein ist zu erkennen, dass RTKLIB die Empfängerposition inklusive der Höhe sehr gut berechnen kann. Die Schätzung des ZTD ist jedoch nicht korrekt, da beide Abbildungen irreal negative Werte für die troposphärische Verzögerung ausweisen.

Weshalb die Werte des ZTD wie dargestellt variieren, ist schwierig zu ermitteln. Allgemein liegt der Fokus des Programmes auf der Auswertung der Empfängerposition und weniger darauf, die troposphärische Korrektur abzuleiten. Die verfälschten ZTD-Werte sind voraussichtlich auf das Differenzverfahren, welches hier zur Berechnung angewendet wurde zurückzuführen. Dabei wird der Korrekturterm der Referenzstation an die Streckenmessung des Empfängers angebracht um die Fehlereinflüsse zu korrigieren. Somit kann die troposphärische Verzögerung nicht mehr absolut, sondern nur noch relativ zur Referenzstation bestimmt werden. Aufgrund der Nähe der Referenzstation wurden voraussichtlich die fixierten Höhen der Referenz auf die Einfrequenzempfängerdaten angepasst und der ZTD-Wert so geschätzt, dass die Höhe des Receivers korrekt berechnet wird. Zusammenfassend zeigt sich, dass die Auswertung des ZTD aus Einfrequenzempfängerdaten mit RTKLIB nicht sinnvoll ist. Da sich bereits bei der Berechnung mit statischen Daten unrealistische Lösungen ergeben haben, wurde eine Untersuchung der kinematischen Daten mit RTKLIB nicht durchgeführt.

4.3 Berechnung mit goGPS

Neben der Analyse mit RTKLIB wurde versucht, einen guten Schätzwert der troposphärischen Verzögerung auch mit dem Programm goGPS abzuleiten. Die Daten für die präzisen Ephemeriden und Uhrenkorrekturen wurden vom GFZ bezogen. goGPS bietet hierbei, wie RTKLIB eine Funktion zum selbstständigen Download an. Somit konnte goGPS die benötigten präzisen Ephemeriden, die ionosphärischen Korrekturparameter, die Broadcast-Daten und die weiteren benötigten Daten automatisiert aus dem Internet beziehen. Zur Berechnung der troposphärischen Verzögerung bietet das Programm verschiedene Methoden zur Ableitung dieser an. Zu den Ansätzen zählen einerseits jene, welche auch bei RTKLIB verwendet werden – apriori-Modell von Saastamoinen und Hopfield. Andererseits können die Näherungen des ZHD und des ZWD aus der VMF ausgelesen werden.

Das auf MATLAB basierte Funktionspaket goGPS verwendet für die Korrektur der Ionosphäre den in Kapitel 3.2 beschriebenen SEID-Algorithmus. Dieser Algorithmus erzeugt aus mindestens drei umliegenden Referenzstationen¹ synthetische Messdaten auf einer zweiten Frequenz für den kostengünstigen Einfrequenzempfänger. Mit der zweiten simulierten Frequenz wurde die ionosphärische Verzögerung und der damit verbundene Fehleranteil mittels der ionosphärenfreien Linearkombination eliminiert. Dies ist notwendig, wie bereits erwähnt, um die troposphärische Verzögerung exakter schätzen zu können. Für die Berechnung der zusätzlichen Frequenzdaten wurde eine unterschiedliche Anzahl an Referenzstation verwendet. In weiterer Folge stellt sich die Frage, ob die Anzahl an Referenzstation, welche für den SEID-Algorithmus verwendet wurden, einen Einfluss auf die Ableitung der Troposphäre darstellen. Dieser Fragestellung wird im Zuge der Arbeit noch näher nachgegangen.

SEID-Algorithmus in goGPS

In goGPS kann der SEID-Algorithmus ausgeführt werden. Dieser wird im GUI über einen Code ausgeführt. Hierfür wurden umliegende Stationen des Referenznetzes EPOSA verwendet. Die für diese Arbeit verwendeten Referenzstationen sind in nachfolgender Tabelle 4.1 angeführt. Die räumliche Verteilung der Stationen wird in Abbildung 3.4 aus Kapitel 3.5 dargestellt.

¹Stationen, welche mit einem Zweifrequenzempfänger ausgestattet sind.

Andau (ANDA)	Mistelbach (MIST)
Baden (BADE)	Traisen (TRAI)
Leopoldau (LEOP)	Ziersdorf (ZIDF)
Mattersburg (MATT)	

Tabelle 4.1: Verwendete Referenzstationen des EPOSA-Netzes inklusive ihrer offiziellen Kurzbezeichnung

Die in Tabelle 4.1 genannten Stationen sind kreisförmig um den Aufnahmeort der statischen Aufnahmen des Einfrequenzempfängers verteilt. Die Stationen in Baden und Leopoldau sind die nächstgelegenen Stationen zum Messstandpunkt (Messdach der Technische Universität Wien). Bei einer ersten Berechnung werden alle sieben Referenzstationen verwendet. Die RINEX-Daten der einzelnen Stationen zum Messzeitpunkt werden über den jeweiligen Dateipfad an goGPS übergeben. Wichtig ist, dass für die Berechnung der zweiten Frequenz des Einfrequenzempfängers die Antenne der TU Wien nicht in den SEID-Algorithmus miteinbezogen wird. Die Antenne der TU Wien soll ausschließlich als Referenz dienen, um die abgeleitete troposphärische Verzögerung des Einfrequenzempfängers hinsichtlich ihrer Genauigkeit beurteilen zu können.

4.4 Ergebnisse mit goGPS

Nachdem eine korrekte Ableitung der troposphärischen Verzögerung mit RTKLIB nicht möglich war, wurde versucht, die Korrektur mit Hilfe von goGPS zu berechnen. Im Folgenden wurde überprüft, ob die Anzahl der umliegenden Referenzstationen einen Einfluss auf die Ableitung der troposphärischen Verzögerung hat. Für diese Untersuchung wurden zum einen sieben Referenzstationen, zum anderen vier Referenzstationen verwendet. Im Anschluss an die Berechnungen wurden die Ergebnisse mit jener der Antenne der TU Wien verglichen. Zuletzt wurde eine Höhenkorrektur an die troposphärischen Verzögerungen der Referenzantennen, sowie an das Ergebnis der Einfrequenzempfänger angebracht. Die gewonnenen Ergebnisse werden nachfolgend grafisch dargestellt und näher erläutert.

4.4.1 Ergebnisse basierend auf sieben Referenzstationen

Um mit dem SEID-Algorithmus Messdaten einer zweiten Frequenz simulieren zu können, wurden zunächst die Daten der sieben umliegenden Referenzstationen² Andau, Baden, Leopoldau, Mattersburg, Mistelbach, Traisen und Ziersdorf herangezogen. Die zwei Referenzstationen Baden und Leopoldau sollten gleichzeitig als Referenz dienen, da diese den geringsten Abstand zu dem Einfrequenzempfänger haben (siehe Abbildung 3.4). Auf die Höhenposition bezogen liegt der Standpunkt des Einfrequenzempfängers etwa zwischen den beiden zuletzt genannten Referenzstationen³. In Abbildung 4.3 sind die berechneten ZTD-Werte dargestellt. Wie auch bei den vorangegangenen Abbildung dieses Kapitel wurden die gleichen Bezeichnungen für die Antennen gewählt.

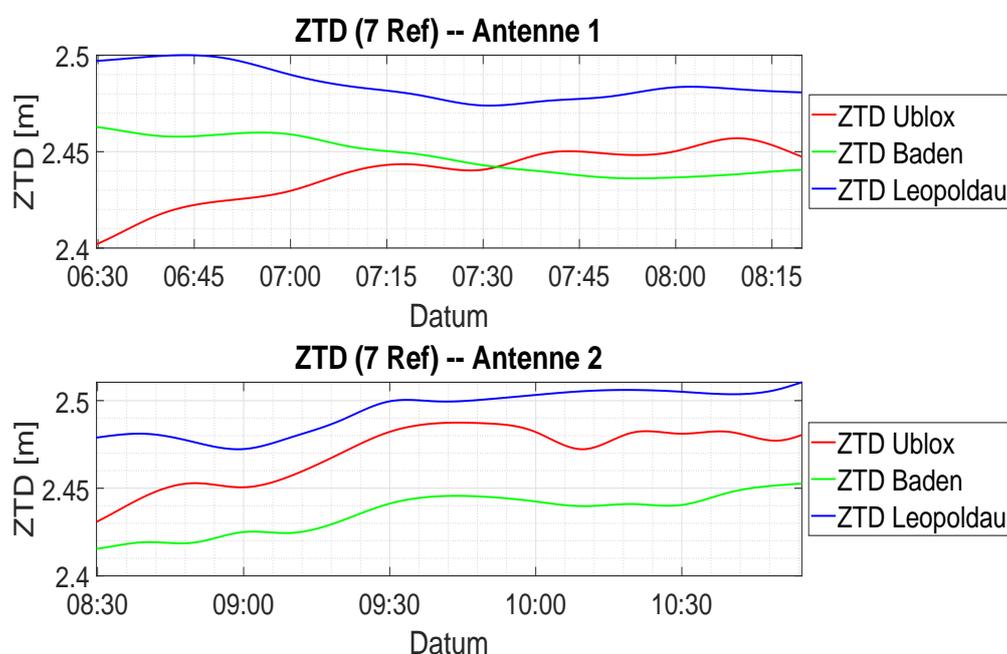


Abbildung 4.3: ZTD-Werte nach Berechnung mit goGPS für beide Aufnahmen.

Die obere Grafik zeigt die Verzögerung der ersten Beobachtung mit der Antenne der Firma Kathrein. Hier ist zu erkennen, dass sich der ZTD des Einfrequenzempfängers erst nach etwa einer Stunde zwischen den troposphärischen Korrekturen der beiden Referenzstationen befindet. Der ZTD der Referenzstation Leopoldau wird in blau, jener der Station in Baden in grün und der ZTD des Einfrequenzempfängers in rot dargestellt. Die untere Grafik zeigt die zweite Aufnahme mit der Antenne der Firma Huber & Suhner. Bei der zweiten Antenne

²in Bezug auf die Position des Einfrequenzempfängers

³Baden: 281,829 Meter; Leopoldau: 222,566 Meter; Einfrequenzempfänger: 244,438 Meter

befindet sich der geschätzte Wert für die troposphärische Verzögerung von Anfang bis zum Ende der Aufnahme zwischen den beiden Referenzstationen. Im Vergleich zur ersten Aufnahme erscheint die zweite Aufnahme realistischer, da die troposphärische Verzögerung von der Höhe abhängig ist. Es ist zu erkennen, dass die Ableitung der troposphärischen Verzögerung mit goGPS möglich ist. Das Ergebnis stellt sich dabei wie erwartet dar.

4.4.2 Ergebnisse basierend auf vier Referenzstationen

Neben der Berechnung des ZTD gestützt auf sieben Referenzstationen wurde in einem nächsten Schritt versucht, den ZTD aus nur vier Referenzstationen abzuleiten. Dadurch würden weniger Daten benötigt und dieser Ansatz damit für den Nutzer günstiger werden. Für den Vergleich wurden die Stationen Baden, Leopoldau, Traisen und Ziersdorf verwendet. Das Ergebnis der Berechnung mit vier Referenzstationen ist in Abbildung 4.4 dargestellt.

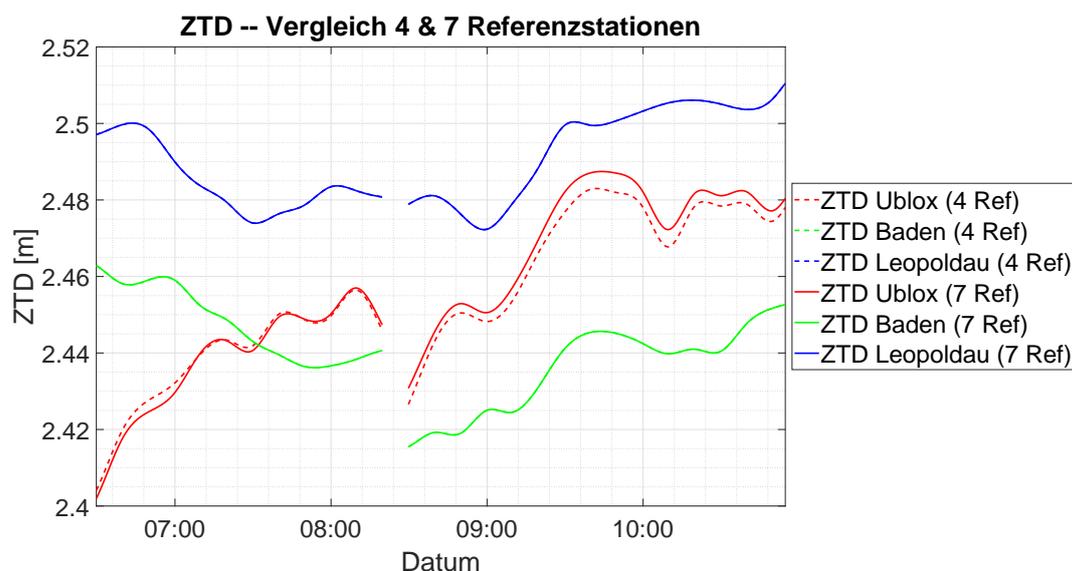


Abbildung 4.4: ZTD basierend auf unterschiedlicher Anzahl an Referenzstationen

Das Ergebnis des ZTD ähnelt jenem mit sieben Referenzstationen, wobei die ZTD-Werte für die Referenzstationen ident sind und deshalb die strichlierten Linien (grün und blau) nicht sichtbar sind. Um die geringen Unterschiede deutlicher darstellen zu können, wurden die Ergebnisse der beiden Berechnungen in einer gemeinsamen Grafik dargestellt. Die einzelnen Stationen werden mit den selben Farben dargestellt wie in Abbildung 4.3. Bei der troposphärischen Verzögerung für den Einfrequenzempfänger sind kleine Unterschiede im Subzentimeterbereich ersichtlich. Anders als in Abbildung 4.3 sind die Aufnahmen in dieser Grafik nicht einzeln dargestellt, sondern hintereinander angereiht. Die Datenlücke bei etwa 08:30 Uhr beschreibt den Antennenwechsel. Warum sich die troposphärische Signalverzögerung

nach dem Antennenwechsel für die Referenzstation Baden um rund zwei Zentimeter ändert ist verwunderlich. Eine derartige Veränderung ist in dieser kurzen Zeit nicht realistisch. Die Abweichung der Referenzstation beeinflusst natürlich auch die Resultat der Einfrequenzempfänger, da die Daten der Referenzstation über den SEID-Algorithmus einfließen. Für die Ergebnisse der Einfrequenzempfängerdaten der zweiten Antenne könnte die Konvergenzzeit (15 Minuten) eine Erklärung darstellen. Die rote Kurve zeigt, dass sich diese nach etwa der Konvergenzzeit wieder an die vorangegangenen Ergebnisse der Antenne 1 anpasst. Jedoch kann der Sprung für die Referenzstation Baden damit nicht erklärt werden. Dieser Tatsache müsste in Folgearbeiten nachgegangen werden.

4.4.3 Vergleich TU Wien-Antenne mit Einfrequenzempfänger

Für eine bessere Interpretation des Ergebnisses ist die troposphärische Verzögerung auch mit den Daten des Zweifrequenzempfängers der TU Wien berechnet worden, da sich der Empfänger hier in unmittelbarer Nähe befindet. Im Fall der Universitätsantenne wurde die Ableitung der troposphärischen Verzögerung mit den PPP-Onlinetool durchgeführt, da die Ergebnisse nach der Auswertung mit goGPS sich als nicht realistisch erwiesen haben. Die Ergebnisse (ZTD-Werte) zeigten während der gesamten Aufnahmedauer nur eine Veränderung im Millimeterbereich. Für den ZTD wäre dies ein sehr unübliches Ergebnis. In weiterer Folge wurden die Ergebnisse aus goGPS mit jenen der Forschungsgruppe Höhere Geodäsie verglichen, wobei sich auch keine Übereinstimmung zeigte.

Im Nachfolgenden wird nun der Vergleich zwischen der TU Wien-Antenne und dem Einfrequenzempfänger dargestellt. Die Berechnung für den Einfrequenzempfänger wurde mit goGPS durchgeführt und jene der TU Wien mit Hilfe des PPP-Onlinetools. Wie bereits zuvor wurden auch hier die beiden Antennen separat betrachtet. Das Ergebnis aus der ersten Antennenkonfiguration wird in Abbildung 4.5 gezeigt.

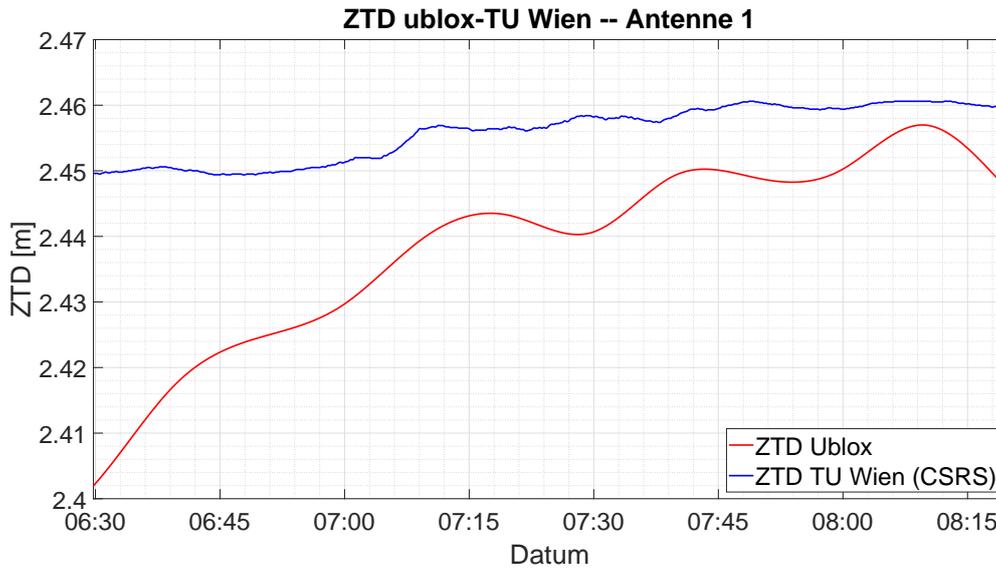


Abbildung 4.5: Troposphärische Verzögerung gemessen mit der Antenne von Kathrein im Vergleich zur Antenne der TU Wien

Die Abbildung 4.5 stellt die abgeleiteten ZTD-Werte des Einfrequenzempfängers in rot und jene der TU Wien-Antenne in blau dar. Es ist ersichtlich, dass sich mit zunehmender Aufnahmedauer die ZTD-Werte des Low-Cost-Empfängers jenen der TU Wien-Antenne annähern. Die Differenz zwischen diesen beiden liegt bei unter fünf Zentimetern, wobei sich nach etwa einer halben Stunde die Verschiebung auf unter zwei Zentimeter reduziert. Auch für die zweite Antennenkonfiguration wurde dieser Vergleich berechnet. Das Ergebnis wird in Abbildung 4.6 grafisch dargestellt.

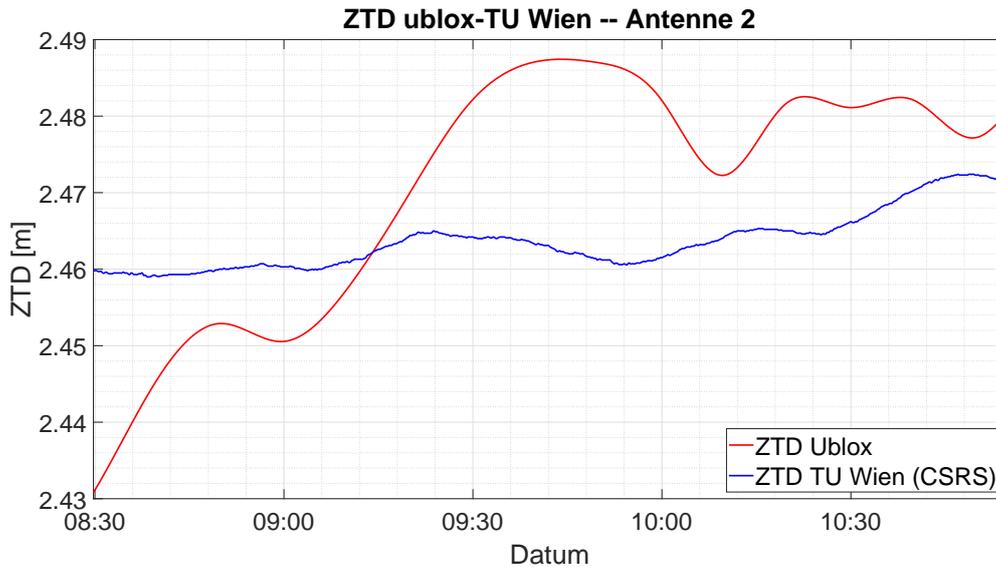


Abbildung 4.6: Troposphärische Verzögerung gemessen mit der Antenne von Huber & Suhrner im Vergleich zur Antenne der TU Wien.

Die Abbildung 4.6 zeigt ein ähnliches Ergebnis wie Abbildung 4.5, wobei die ZTD-Werte der Einfrequenzempfänger in rot und jene der TU Wien-Antenne in blau dargestellt sind. Auch hier ist zu erkennen, dass sich die abgeleiteten ZTD-Werte des Einfrequenzempfängers mit zunehmender Aufnahmedauer an die Referenzkurve annähern. Nach etwa 45 Minuten kreuzen sich die beiden Kurven. Die durchschnittliche absolute Abweichung zwischen den beiden Ergebnissen liegt hier im Mittel bei rund 1,4 Zentimeter. Details hierzu werden später in der Tabelle 4.3 dargestellt.

Mit den aufgezeichneten Beobachtungsdaten der am Messdach der TU Wien positionierten Antenne leitet die Forschungsgruppe für Höhere Geodäsie die troposphärische Verzögerung ab. Die ZTD-Werte werden immer für die volle Stunde berechnet, wobei diese Daten der ZAMG zur Verfügung gestellt werden. Die abgeleiteten Daten der TU Wien wurden ebenfalls als Referenzwerte für die Ergebnisse der Einfrequenzempfänger herangezogen. Um einen anschaulichen Vergleich zu erhalten, wurden die ZTD-Werte der Einfrequenzempfänger gemittelt. Hierfür wurden jeweils die Daten dreißig Minuten vor und nach einer vollen Stunde verwendet. Die gemittelte troposphärische Verzögerung ist in Abbildung 4.7 dargestellt.

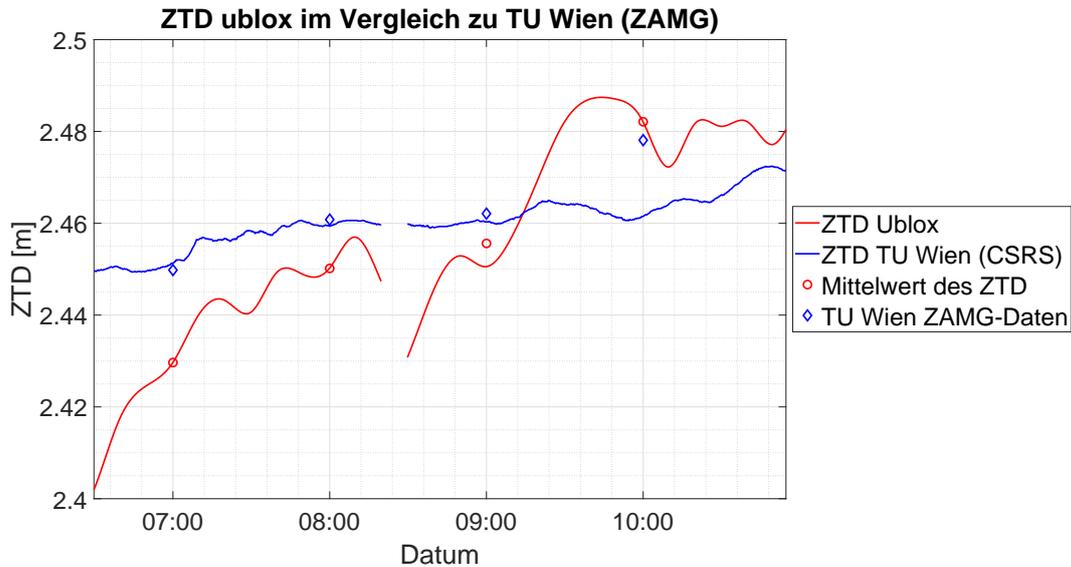


Abbildung 4.7: Ergebnis des ZTD im Vergleich zu dem von der TU Wien berechneten ZTD

Abbildung 4.7 zeigt die abgeleiteten troposphärischen Korrekturen, wie in den vorangegangenen Abbildungen. Die Korrekturen sind für den Einfrequenzempfänger in rot und für die TU Wien-Antenne in blau dargestellt. Zusätzlich sind die berechneten ZTD-Werte der TU Wien und jene der Einfrequenzempfänger zu jedem vollen Stunde verdeutlicht. Mit einer Raute in blau sind die stündlichen ZTD-Werte der TU Wien-Antenne, mit roten Kreisen jene der Einfrequenzempfänger dargestellt.

Im Vergleich zu den berechneten stündlichen Werten für die ZAMG wird sofort ersichtlich, dass die Werte der zweiten Antennenkonfiguration kleinere mittlere Abweichungen aufweisen als jene der ersten. Im Zeitraum von 6:30 bis 08:25 Uhr liegt der Unterschied der ZTD-Werte im Zentimeterbereich. Im Gegensatz dazu weist die zweite Konfiguration (08:30 bis 10:55 Uhr) nur Abweichungen im Millimeterbereich auf. Außerdem verdeutlicht die Abbildung 4.7, dass sich die Abweichungen mit zunehmender Beobachtungsdauer den Referenzwerten annähern. Diese Verbesserung ist bei beiden Vergleichen zu erkennen. Der Vergleich mit den berechneten Werten für die TU Wien-Antenne (mit dem CGS-Onlinetool) und den Werten der Forschungsgruppe Höherer Geodäsie zeigt, dass die troposphärische Verzögerung korrekt abgeleitet wurde. Die Unterschiede für die ersten drei Vergleichswerte liegen in einem Bereich von etwa fünf Millimeter. Lediglich der vierte Wert zum Zeitpunkt 10:00 Uhr weicht von den berechneten Werten des CGS-Onlinetools ab. Dafür zeigt sich jedoch wieder, dass die Abweichung zum Einfrequenzempfänger zu diesem Zeitpunkt am geringsten ist.

4.4.4 Höhenkorrektur der Referenzstationen auf Einfrequenzempfänger-Höhe

Um das Ergebnis der berechneten ZTD-Werte besser zu veranschaulichen wurde eine Höhenkorrektur an die Referenzstationen angebracht. Die Höhenkorrektur soll die Höhendifferenz zwischen den Einfrequenzempfängern und den verwendeten Referenzstationen (Baden, Leopoldau und TU Wien) ausgleichen. Hierfür wurden die notwendigen Korrekturwerte aufgrund der Höhenunterschiede apriori berechnet. Die Berechnungsschritte wurden bereits in Abschnitt 3.7.2 erläutert. Für die Korrekturen wurden standardisierte Formeln, wie beispielsweise die internationale Höhenformel, verwendet. Zuerst wurde mit einer Standardatmosphäre die troposphärische Verzögerung für die Höhe Null (Meereshöhe) berechnet. Im Anschluss wurden die standardisierten atmosphärischen Bedingungen an die Antennenhöhen angepasst. Mit den atmosphärischen Parametern der einzelnen Stationen wurde mit Saastamoinen die troposphärische Verzögerung berechnet. Die Korrekturwerte, um die einzelnen Stationen (Baden, Leopoldau, TU Wien, Einfrequenzempfänger) auf das Niveau des Meeresspiegels (Höhe Null) zu korrigieren, sind in Tabelle 4.2 angeführt. Die Korrekturen sind apriori-Ergebnisse und nur auf Grundlage der Höheninformation der Stationen abgeleitet.

Station	Stationshöhe [m]	Korrektur auf Meeressniveau [cm]	Korrektur zu ublox [mm]
ublox	244,438	8,9	—
TU Wien	248,194	9,0	1,3
Baden	281,829	10,2	13,0
Leopoldau	222,566	8,1	-7,7

Tabelle 4.2: ZTD-Höhenkorrekturwerte der Referenzstationen und Einfrequenzempfänger

Die berechneten Korrekturen, wie sie in Tabelle 4.2 aufgelistet sind, wurden zu den geschätzten ZTD-Werten aus den vorangegangenen Abschnitten addiert, um alle Stationen auf dieselbe Höhe zu reduzieren. Nach der Anbringung der Höhenkorrektur zeigt das Ergebnis eine Verbesserung der abgeleiteten ZTD-Werte zu den Referenzwerten. Die Abweichungen zu den Referenzstationen Baden und Leopoldau werden durch die Höhenkorrektur verkleinert. Auch für die Antenne der TU Wien ist eine geringfügige Verbesserung zu erkennen. Die betragslich kleinere Korrektur an der Referenzstation TU Wien ist auf den geringeren

Höhenunterschied zwischen den Einfrequenzempfängern und der Antenne der TU Wien zurückzuführen. In Abbildung 4.8 wird das Ergebnis mit angebrachter Höhenkorrektur an die einzelnen Referenzstationen grafisch dargestellt.

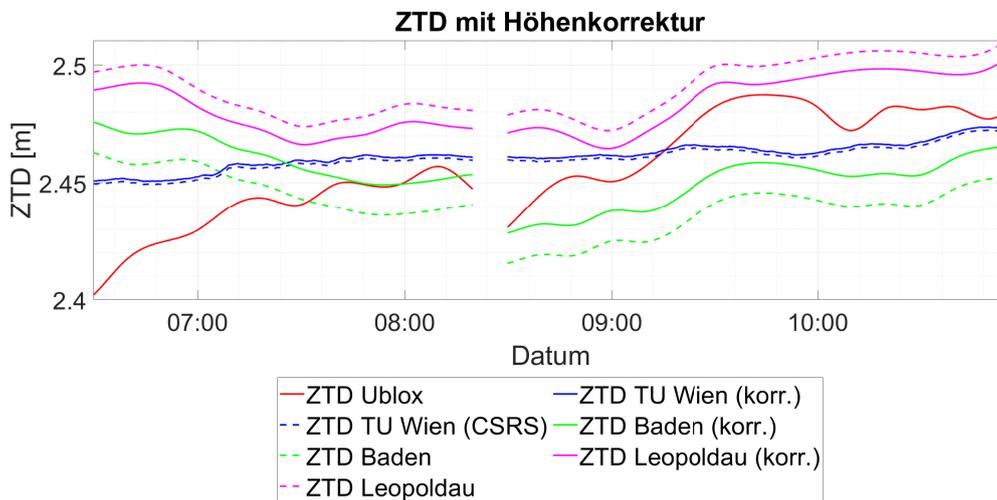


Abbildung 4.8: ZTD aller Referenzstationen mit Höhenkorrektur

Abbildung 4.8 verdeutlicht die korrigierten troposphärischen Verzögerungen, indem auch die nicht-korrigierten ZTD-Werte dargestellt werden. Die Werte der Referenzstationen ohne Höhenkorrektur sind durch strichlierte Linien abgebildet. Die korrigierten ZTD-Zeitreihen der Referenzstationen, welche sich auf die Höhe des Low-Cost-Empfängers beziehen, wurden mit Linien dargestellt. Die Referenzstation Baden ist in grün, Leopoldau in rosa, die TU Wien-Antenne in blau und die beiden Einfrequenzempfänger in rot dargestellt.

Nachfolgend wurde die Höhenkorrektur an die Einfrequenzempfängerauswertung angebracht und mit den Referenzstations-ZTDs verglichen. Als Erstes wurde dies für die Referenzstation der TU Wien-Antenne durchgeführt. Das Ergebnis wird in Abbildung 4.9 verdeutlicht. Die Abbildung zeigt, dass sich die Abweichung zur Referenzkurve bei der Aufnahme mit der ersten Antenne um den errechneten Korrekturwert aus Tabelle 4.2 vergrößert. Für die zweite Antenne vergrößert sich in den ersten 45 Minuten die Abweichung durch die Höhenkorrektur ebenfalls. Im Prinzip bleiben die ermittelten Abweichungen aufgrund der geringen Korrekturen faktisch unverändert.

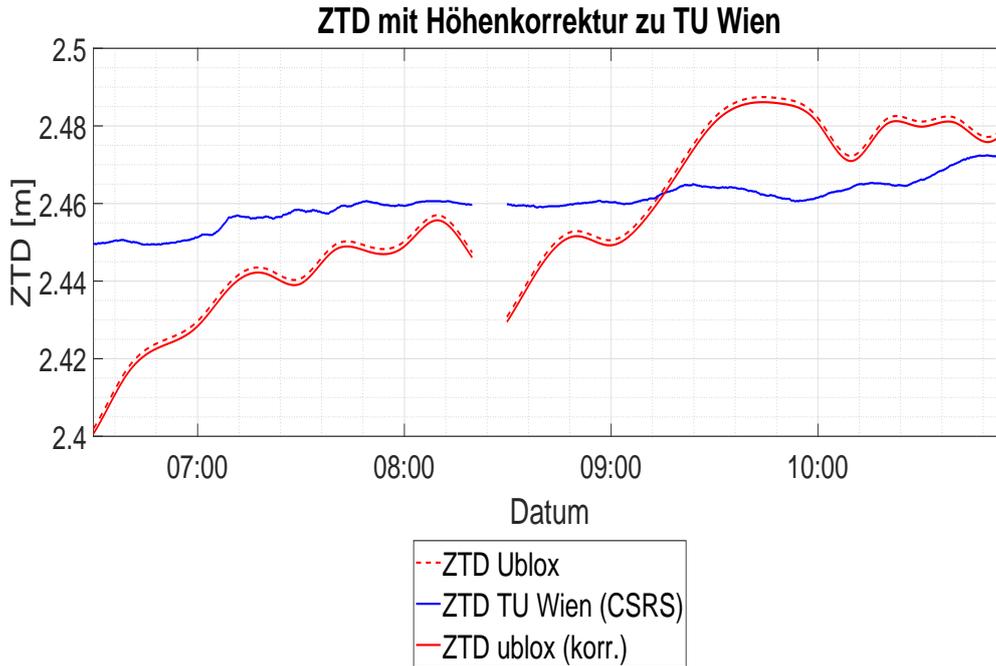


Abbildung 4.9: ZTD mit Höhenkorrektur der Einfrequenzempfänger zur Referenzstation TU Wien

Die Tabelle 4.3 stellt den Bias und die Standardabweichung der ZTD-Differenzen (als Sigma in der Tabelle bezeichnet) für den Verlauf der Aufnahmen in einem Intervall von fünf Minuten dar. Für die erste Antenne, jene der Firma Kathrein, ist zu erkennen, dass der Bias mit zunehmender Aufnahmedauer kleiner wird und bis fünf Minuten vor Aufnahmeende nur noch sechs Millimeter beträgt. Dieses Ergebnis spiegelt sich sowohl bei der Berechnung mit sieben als auch bei jener mit vier Referenzstationen wider. Die maximale Abweichung für den Bias zwischen sieben und vier Referenzstationen im SEID-Algorithmus für die abgeleiteten ZTD-Werte beträgt 3,1 Millimeter für die erste Antenne und 5,1 Millimeter für die zweite Antenne. Für die Standardabweichungen ist zu erkennen, dass sich diese nach spätestens zehn bis fünfzehn Minuten auf unter zwei Millimeter reduzieren und für die restliche Aufnahmedauer diese Schranke nicht mehr überschreiten. Die zweite Antenne von Huber & Suhner stellt ein ähnliches Bild der Resultate dar. Für die Standardabweichung zeigt sich ein ähnliches Ergebnis wie für die andere Antenne. Nach zehn bis fünfzehn Minuten liegt der Sigma-Wert unter zwei Millimeter.

Referenzstation Technische Universität Wien									
Antenne 1					Antenne 2				
Minuten	7 Referenzst.		4 Referenzst.		Minuten	7 Referenzst.		4 Referenzst.	
	BIAS	SIGMA	BIAS	SIGMA		BIAS	SIGMA	BIAS	SIGMA
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0	-45,24	2,20	-43,12	2,21	0	-26,45	2,24	-30,19	2,52
5	-37,77	2,16	-35,60	2,19	5	-18,69	2,23	-21,52	2,45
10	-31,03	1,59	-28,62	1,70	10	-12,26	1,47	-14,65	1,50
15	-27,28	0,67	-24,46	0,79	15	-8,82	0,46	-11,23	0,44
20	-25,69	0,37	-22,56	0,41	20	-8,97	0,48	-11,33	0,42
25	-24,17	0,59	-21,24	0,41	25	-10,83	0,36	-13,07	0,36
30	-21,19	1,36	-19,37	0,91	30	-10,16	0,76	-12,75	0,58
35	-18,23	0,22	-17,96	0,30	35	-7,03	1,01	-10,27	0,85
40	-16,22	0,95	-16,71	0,92	40	-2,81	1,28	-6,25	1,31
45	-14,25	0,19	-14,43	0,23	45	1,76	1,47	-1,58	1,45
50	-15,55	0,72	-15,02	0,53	50	7,04	1,82	3,14	1,52
55	-18,61	0,70	-17,53	0,59	55	13,62	1,79	8,69	1,54
60	-17,08	1,21	-15,84	1,18	60	18,45	0,99	13,32	1,11
65	-11,88	1,36	-10,90	1,25	65	21,22	0,70	16,70	0,87
70	-10,45	0,10	-9,92	0,17	70	23,21	0,49	18,79	0,38
75	-11,94	0,73	-11,87	0,86	75	24,11	0,17	19,20	0,13
80	-12,87	0,13	-13,16	0,09	80	24,32	0,15	19,43	0,14
85	-11,85	0,53	-12,33	0,50	85	22,08	1,26	17,79	1,10
90	-9,00	0,95	-9,49	0,97	90	15,58	2,40	11,48	2,46
95	-5,77	0,73	-6,24	0,72	95	8,76	1,39	4,35	1,47
100	-6,01	0,90	-6,71	1,02	100	7,60	1,01	3,24	1,13
105	-10,58	1,70	-11,77	1,87	105	12,70	1,70	8,96	1,91
110					110	16,26	0,35	13,18	0,49
115					115	15,12	0,86	12,39	0,82
120					120	13,25	0,34	10,44	0,42
125					125	11,88	0,61	8,77	0,68
130					130	8,30	1,43	5,12	1,39
135					135	4,23	0,73	1,32	0,64
140					140	5,22	1,29	2,67	1,38

Tabelle 4.3: Tabelle für Bias und Sigma der ZTD Differenzen zwischen TU Wien und Einfrequenzempfangsdaten nach der Höhenkorrektur.

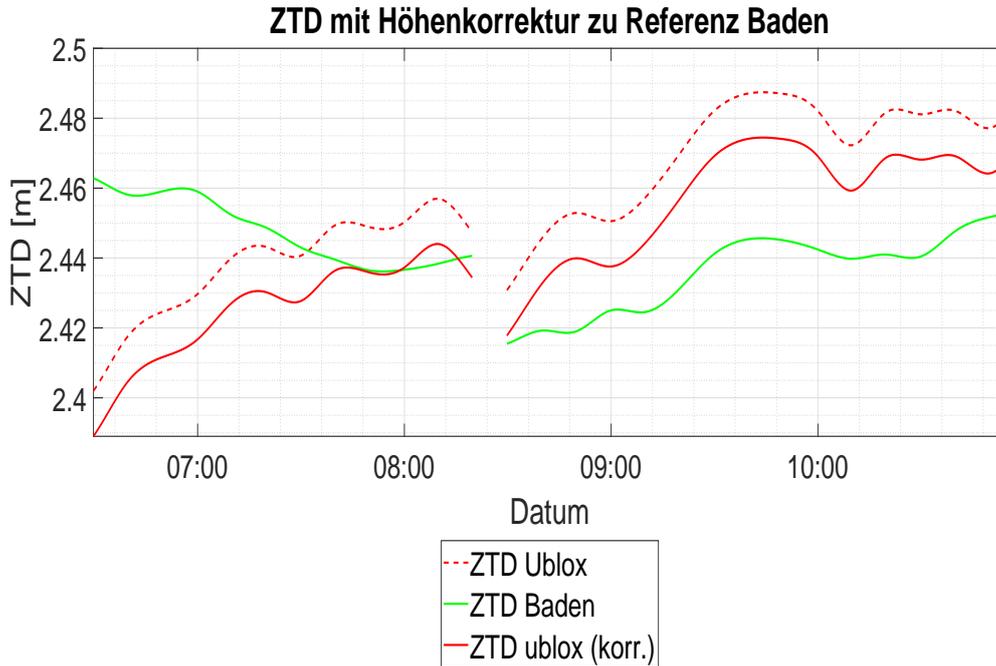


Abbildung 4.10: ZTD mit Höhenkorrektur der Einfrequenzempfänger zur Referenzstation Baden

Der Vergleich der ZTD-Werte mit der Referenzstation Baden ist in Abbildung 4.10 dargestellt. Wie zuvor wurde auch für diesen Vergleich das Ergebnis der Einfrequenzempfänger mit der berechneten Höhenkorrektur verbessert und in Bezug zur Referenzstation dargestellt. Die Grafik zeigt beide Aufnahmen der unterschiedlichen Antennen nacheinander. Es zeigt sich, dass die Ergebnisse der ersten Antenne nach der Korrektur einen größeren Bias aufweisen, als vor der Korrektur. Im Gegensatz dazu verkleinert sich der Bias im Zuge der Höhenkorrektur für die gesamte Aufnahme bei der zweiten Antenne. Aus nachfolgender Tabelle 4.4 können die Werte für Bias und Sigma der einzelnen Intervalle entnommen werden. Die Tabelle verdeutlicht, dass sich das Ergebnis des Einfrequenzempfängers der ersten Antenne mit zunehmender Aufnahmedauer an die Referenzkurve anpasst. Dies wird durch den Bias veranschaulicht, welcher sich von rund 5 Zentimeter auf rund 4 Millimeter reduziert. Für die zweite Antenne ist sofort ersichtlich, dass sich die Resultate nach der Höhenkorrektur besser an die Referenzkurve anpassen. Wie zuvor bei der Referenzstation TU Wien als auch bei der Aufnahme mit der ersten Antenne erkennbar war, beträgt die Konvergenzzeit für die berechneten ZTD-Werte etwa zehn Minuten. In Folgearbeiten wäre aber jedenfalls der Grund für den in allen Zeitserien sichtbaren Sprung des ZTD von circa zwei Zentimeter nach dem Antennenwechsel zu ermitteln.

Referenzstation Baden									
Antenne 1					Antenne 2				
Minuten	7 Referenzst.		4 Referenzst.		Minuten	7 Referenzst.		4 Referenzst.	
	BIAS	SIGMA	BIAS	SIGMA		BIAS	SIGMA	BIAS	SIGMA
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0	-68,72	3,11	-66,61	3,11	0	4,92	1,50	1,19	1,79
5	-58,07	2,86	-55,90	2,89	5	10,32	1,65	7,50	1,87
10	-50,73	1,36	-48,32	1,47	10	16,21	1,69	13,82	1,72
15	-47,97	0,37	-45,15	0,50	15	20,45	0,64	18,04	0,62
20	-47,06	0,29	-43,93	0,32	20	19,18	1,27	16,82	1,22
25	-44,88	1,12	-41,94	0,94	25	14,32	1,25	12,08	1,25
30	-38,65	2,46	-36,83	2,01	30	13,14	0,64	10,56	0,47
35	-29,58	2,59	-29,31	2,19	35	17,09	1,48	13,85	1,32
40	-22,49	1,46	-22,99	1,42	40	21,64	1,08	18,19	1,11
45	-19,21	0,53	-19,38	0,71	45	24,54	0,64	21,20	0,63
50	-18,20	0,16	-17,68	0,36	50	26,34	0,42	22,44	0,13
55	-16,97	0,69	-15,89	0,80	55	27,52	0,27	22,58	0,03
60	-12,68	1,78	-11,44	1,75	60	28,24	0,15	23,10	0,28
65	-6,16	1,81	-5,19	1,70	65	28,62	0,07	24,10	0,24
70	-1,67	0,76	-1,14	0,62	70	28,78	0,03	24,36	0,09
75	-0,51	0,06	-0,44	0,12	75	28,86	0,03	23,94	0,10
80	-0,77	0,09	-1,06	0,17	80	28,96	0,04	24,07	0,13
85	-0,39	0,40	-0,88	0,37	85	28,09	0,59	23,80	0,43
90	2,26	1,08	1,77	1,10	90	24,56	1,39	20,46	1,45
95	5,31	0,50	4,84	0,49	95	20,39	0,82	15,98	0,90
100	3,84	1,35	3,14	1,47	100	20,77	1,02	16,41	1,14
105	-2,49	2,15	-3,68	2,31	105	25,42	1,44	21,68	1,66
110					110	28,71	0,41	25,63	0,56
115					115	28,54	0,39	25,81	0,36
120					120	26,70	0,66	23,89	0,73
125					125	23,71	1,13	20,60	1,21
130					130	18,75	1,68	15,57	1,64
135					135	13,80	1,02	10,88	0,92
140					140	13,27	0,71	10,72	0,80

Tabelle 4.4: Tabelle für Bias und Sigma der ZTD Differenzen zwischen Referenzstation Baden und Einfrequenzempfangsdaten nach der Höhenkorrektur.

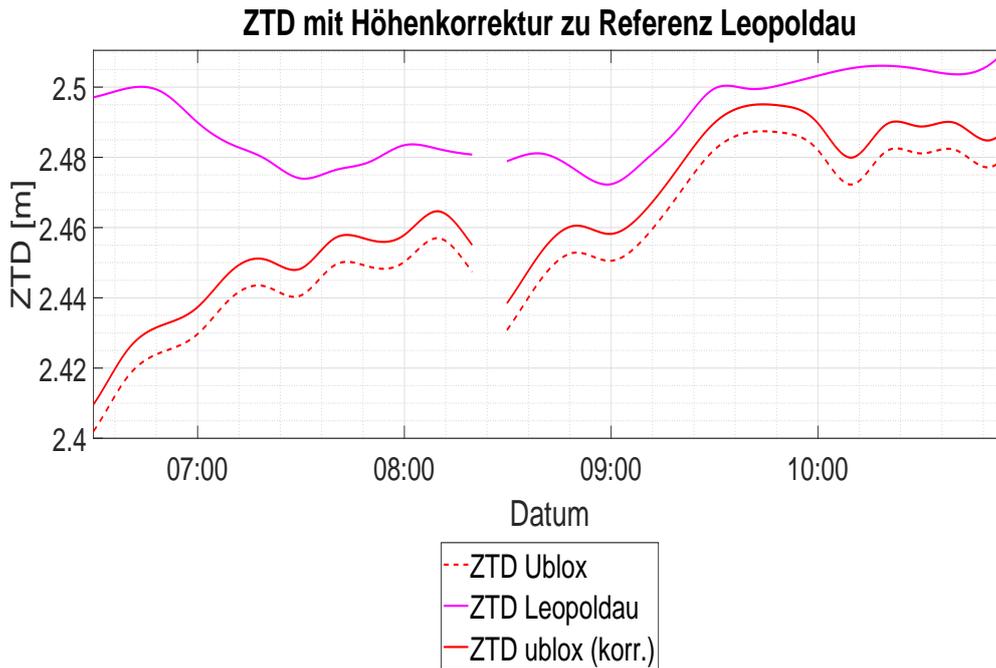


Abbildung 4.11: ZTD mit Höhenkorrektur der Einfrequenzempfänger zur Referenzstation Leopoldau

Abbildung 4.11 stellt den Vergleich zur dritten in dieser Arbeit verwendeten Referenzstation Leopoldau dar. Die Grafik zeigt die erhaltenen Ergebnisse aus goGPS sowie die korrigierten Resultate in Bezug auf die Höhe im Vergleich mit der Referenzstation Leopoldau. Die Abbildung 4.11 zeigt erstmals eine Verbesserung durch die angebrachte Höhenkorrektur an den Einfrequenzempfänger bei beiden Aufnahmen, welche in dieser Grafik als rote Linie dargestellt wurde. Für beide Antennen verkleinert sich der Bias mit zunehmender Aufnahmedauer. Die Veränderungen des Bias sowie die Standardabweichungen der ZTD-Differenzen können aus nachfolgender Tabelle 4.5 entnommen werden. Bei Betrachtung der in 4.5 tabellierten Standardabweichungen der ZTD-Differenzen zeigt sich, dass sich die Kurve der ersten Aufnahme (Antenne 1) nach der zwanzigsten bis zur vierzigsten Minute nicht wie jene der Referenzstation verhält. In diesem Zeitabschnitt vergrößert sich das Sigma auf mehr als zwei Millimeter und erreicht das Maximum der gesamten Aufnahme bei dreißig Minuten mit 2,6 Millimeter. Auch aus dieser Tabelle ist eine Konvergenzzeit für beide Antennen von etwa zehn Minuten zu erkennen.

Referenzstation Leopoldau									
Antenne 1					Antenne 2				
Minuten	7 Referenzst.		4 Referenzst.		Minuten	7 Referenzst.		4 Referenzst.	
	BIAS	SIGMA	BIAS	SIGMA		BIAS	SIGMA	BIAS	SIGMA
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0	-84,20	1,97	-82,08	1,98	0	-37,70	1,65	-41,44	1,94
5	-77,45	1,85	-75,28	1,88	5	-31,44	1,96	-34,27	2,18
10	-72,17	1,21	-69,77	1,32	10	-24,47	2,03	-26,85	2,07
15	-68,34	1,11	-65,51	1,24	15	-18,19	1,53	-20,60	1,50
20	-63,65	1,65	-60,52	1,69	20	-14,63	0,55	-16,99	0,60
25	-56,97	2,22	-54,03	2,05	25	-13,94	0,07	-16,18	0,09
30	-48,55	2,61	-46,72	2,16	30	-14,39	0,15	-16,97	0,33
35	-39,87	2,33	-39,60	1,93	35	-14,55	0,10	-17,79	0,10
40	-33,31	1,45	-33,81	1,41	40	-13,57	0,47	-17,02	0,50
45	-29,67	0,71	-29,85	0,90	45	-11,87	0,46	-15,20	0,44
50	-28,01	0,32	-27,48	0,52	50	-10,88	0,12	-14,78	0,18
55	-26,76	0,49	-25,68	0,60	55	-10,40	0,25	-15,34	0,09
60	-24,10	1,03	-22,87	1,00	60	-8,64	0,77	-13,77	0,90
65	-20,64	0,86	-19,67	0,74	65	-5,90	0,72	-10,42	0,89
70	-19,20	0,13	-18,68	0,23	70	-4,53	0,10	-8,94	0,13
75	-20,69	0,75	-20,62	0,88	75	-5,24	0,42	-10,16	0,54
80	-23,77	0,93	-24,06	1,02	80	-7,09	0,67	-11,98	0,53
85	-25,85	0,22	-26,33	0,24	85	-10,50	1,39	-14,78	1,23
90	-23,75	1,28	-24,25	1,30	90	-16,99	2,27	-21,09	2,33
95	-19,22	1,09	-19,68	1,08	95	-23,75	1,39	-28,17	1,47
100	-18,43	0,71	-19,13	0,83	100	-24,28	1,05	-28,64	1,18
105	-22,78	1,68	-23,96	1,84	105	-19,20	1,59	-22,94	1,80
110					110	-15,96	0,28	-19,03	0,43
115					115	-16,17	0,17	-18,91	0,12
120					120	-15,54	0,53	-18,35	0,45
125					125	-13,90	0,27	-17,01	0,20
130					130	-15,33	1,05	-18,51	1,01
135					135	-19,60	1,24	-22,52	1,13
140					140	-22,23	0,27	-24,79	0,19

Tabelle 4.5: Tabelle für Bias und Sigma der ZTD Differenzen zwischen Referenzstation Leopoldau und Einfrequenzempfangsdaten nach der Höhenkorrektur.

4.5 Interpretation der Ergebnisse

Abschließend sollen die erhaltenen Ergebnisse für die troposphärische Verzögerung (ZTD) nochmals interpretiert und diskutiert werden. Die Ergebnisse aus RTKLIB lassen den Schluss zu, dass die Ableitung der troposphärischen Verzögerung mit diesem Programm nicht korrekt geschätzt werden kann. Denn das Ergebnis der Berechnung mit RTKLIB ergab irreal negative Werte für den ZTD. Dieses Ergebnis ist aus Sicht des Verfassers auf das Differenzverfahren, welches RTKLIB zur Positionsbestimmung und zur Schätzung der troposphärischen Verzögerung anwendet zurückzuführen.

Bei der Auswertung mit goGPS zeigen die Ergebnisse auf den ersten Blick plausiblere Werte für den abgeleiteten ZTD. Das Ergebnis scheint eine realitätstreue Ableitung der troposphärischen Verzögerung zu sein und entspricht den auf Basis der Höhendifferenz zu den Referenzantennen angestellten Erwartungen. Bei diesem Vergleich ist auch deutlich zu erkennen, dass sich die Abweichung des Ergebnisses beziehungsweise die Schätzung der troposphärischen Verzögerung aus den Beobachtungsdaten der ersten Antennenkonfiguration mit der Aufnahmedauer verbessert. Die mittlere Standardabweichung der berechneten Intervalle beträgt zu beiden Referenzkurven in etwa rund einen Millimeter und der Bias beträgt nach der Konvergenzzeit von 15 Minuten maximal rund sieben Zentimeter.

Für eine genauere Interpretation der Ergebnisse wurde zusätzlich die Antenne der TU Wien als Referenz verwendet. Diese befindet sich in unmittelbarer Nähe und in etwa auf derselben Höhe wie die Messanordnung der Einfrequenzempfänger. Dieser Vergleich zeigt wiederum ähnliche Erkenntnisse wie jener, der mit den Referenzstationen durchgeführt wurde. Hier verbessert sich auch die Schätzung der troposphärischen Verzögerung mit zunehmender Aufnahmedauer. Darüber hinaus weist der Vergleich mit den abgeleiteten stündlichen Werten der troposphärischen Verzögerung der Forschungsgruppe Höhere Geodäsie annähernd dieselben Ergebnisse auf. Bei der Korrektur beziehungsweise der Mittelbildung der berechneten Einfrequenzempfänger-ZTD-Werte wird ersichtlich, dass die Abweichungen nur noch etwa einen Zentimeter betragen. Aufgrund der Größenordnung der Abweichungen ergibt sich eine sehr gute Abschätzung der troposphärischen Verzögerung aus Einfrequenzbeobachtungsdaten. Mit Hilfe der Höhenkorrektur auf das Höhenniveau der Einfrequenzempfänger wurde versucht der Höhenunterschied zwischen den Referenzstationen und der Messanordnung zu korrigieren. Die Korrektur wurde vorerst an die Referenzstationen angebracht, um diese in einer gemeinsamen Grafik abzubilden.

Zusätzlich wurde die Höhenkorrektur noch an die Resultate der Einfrequenzempfänger angebracht, um den Vergleich zu den drei verwendeten Referenzstationen separat zu zeigen. Neben der grafischen Veranschaulichung wurde auch der Bias und die Standardabweichungen der ZTD-Differenzen zu den verwendeten Referenzstationen dargestellt. Für die erste Antenne zeigte sich in allen drei Vergleichen eine Annäherung der berechneten ZTD-Werte der Einfrequenzempfänger-Beobachtungsdaten an die Referenzresultate. Dieses Ergebnis ergab sich sowohl bei der Auswertung mit sieben als auch mit vier Referenzstationen (Anzahl der Referenzstationen zur Auswertung des SEID-Algorithmus). Die Abweichungen an die Referenzkurven konnten mit zunehmender Aufnahmedauer bis auf 2,5 Zentimeter verkleinert werden. Für die zweite Antenne zeigte sich ein etwas anderes Ergebnis. Hier lagen die abgeleiteten ZTD-Werte der Einfrequenzempfänger, von Beginn der Aufnahme bis zum Ende, zwischen den Referenzkurven (Baden und Leopoldau), sowie es vor der Berechnung erwartet wurde. Jedoch ist in diesem Fall keine wesentliche Verbesserung der Abweichung mit der Dauer der Aufnahme entstanden. Die Abweichung der mit den Daten der zweiten Antenne errechneten ZTDs lagen immer unter drei Zentimeter (siehe Tabellen 4.3, 4.4 und 4.5). Die Tabellen zeigten außerdem, dass die abgeleiteten Ergebnisse eine maximale Standardabweichung nach der Konvergenzzeit von zweieinhalb Millimeter in den berechneten fünf Minutenintervallen ausweisen. Zusammenfassend konnte aus den Ergebnissen geschlossen werden, dass eine ausreichend genaue Ableitung der troposphärischen Signalverzögerung aus statischen GNSS-Einfrequenzempfänger-Beobachtungsdaten möglich ist.

5 Zusammenfassung und Resümee

Ziel dieser Arbeit war es, die troposphärische Verzögerung (den Zenit Total Delay) aus kinematischen Daten abzuleiten. Als Datengrundlage sollten hierfür Beobachtungsdaten von kostengünstigen GNSS-Einfrequenzempfängern dienen, welche durch Zug-Antennen auf den Lokomotiven der ÖBB aufgezeichnet wurden. Um genauere Aussagen über die Troposphäre tätigen zu können, wurden vorerst statische Daten mit den Zug-Antennen am Messdach der TU Wien aufgezeichnet. Mit Hilfe dieser Datengrundlage sollte gezeigt werden, dass eine Schätzung des ZTD aus den Einfrequenzempfänger-Beobachtungsdaten ausreichend genaue Ergebnisse liefert, um anschließend das bestehende Netz aus Zweifrequenzempfängern mit den Daten der Zugantennen zu verdichten. Die Troposphäre besteht aus einem trockenen (hydrostatischen) und einem feuchten (wet) Anteil. Der feuchte Anteil ist in dieser atmosphärischen Schicht äußerst variabel und daher sehr schwierig vorherzusagen. Durch eine größere Anzahl an abgeleiteten ZTD-Werten könnte der feuchte Teil genauer modelliert und bestimmt werden. Die erhaltenen Ableitungen können in weiterer Folge für meteorologische Anwendungen verwendet werden.

Der ZTD aus Einfrequenzbeobachtungsdaten sollte im Zuge dieser Arbeit mit Open-Source-Programmen abgeleitet werden. Die Untersuchung der Daten erfolgte mit den Programmen RTKLIB und goGPS. RTKLIB ist eine der bekanntesten Open-Source-Anwendungen für die Auswertung von GNSS-Daten, weshalb auch die Untersuchungen mit diesem Programm durchgeführt wurde. GoGPS ist ein Programm, welches zum Zeitpunkt der Arbeit in Kooperation mit mehreren Universitäten entwickelt wurde. Für die Arbeit wurde die „beta“-Version (goGPS V1-Beta1) verwendet. Ein Schwerpunkt von goGPS liegt auf der Ableitung der troposphärischen Verzögerung. Für die Auswertung der aufgezeichneten Daten wurden nur GPS-Daten verwendet, da diese GNSS-Daten in den Beobachtungsdaten weniger Fehler (Cycle Slips) aufwiesen als jene des russischen GNSS (Globalnaja Nawigazionnaja Sputnikowaja Sistema (GLONASS)). Außerdem war die Menge an aufgezeichneten GPS-Daten im Vergleich zu den anderen Satellitensystemen deutlich höher. Für die Berechnung der ionosphärischen Verzögerung wurde einerseits das Klobuchar-Modell (RTKLIB), andererseits der SEID-Algorithmus (goGPS) verwendet. Mit den erhaltenen Ergebnissen sollte die Anzahl der abgeleiteten ZTD-Werte erhöht werden. Aufgrund der größeren Anzahl an ZTD-

Werten sollen mehr Daten für den feuchten Anteil der Troposphäre zur Verfügung stehen, um diesen variablen Teil genauer modellieren zu können.

Die allgemeine Datengrundlage stellten GNSS-Messungen dar. GNSS sind Systeme, welche zur Positionsbestimmung mit Hilfe von Satelliten entwickelt wurden. Mittlerweile hat sich das Aufgabengebiet der Satellitennavigation erweitert. So können auf Basis von GNSS beispielsweise auch Aussagen über den Meeresspiegelanstieg sowie den Schichtaufbau der Atmosphäre getroffen werden. Die Korrektur und Bestimmung der Signalverzögerung in den einzelnen Schichten (im Speziellen in der Ionosphäre und Troposphäre) ist wichtig, um die Positionsgenauigkeit zu verbessern. Im Laufe der Zeit haben sich zur Beschreibung der Signalverzögerung in den atmosphärischen Schichten verschiedene beziehungsweise Modelle etabliert. Für die Ionosphäre zählen das Klobuchar-Modell beziehungsweise die Korrektur mit Hilfe einer Linearkombination (im Fall von Beobachtungsdaten mit zwei Frequenzen) zu den bekanntesten. Die Modelle von Hopfield und Saastamoinen hingegen modellieren den hydrostatischen und feuchten Anteil der troposphärischen Verzögerung. Für die Untersuchung wurden statische Daten am Messdach der TU Wien mit zwei Zug-Antennen (identisch zu jenen, welche auf den Triebwagen angebracht sind) aufgezeichnet, um aus diesen Daten die troposphärischen Verzögerung abzuleiten. Um eine Aussage über die Qualität der berechneten ZTD-Werte aus den Einfrequenzempfängerdaten treffen zu können, wurden die erzielten Ergebnisse mit den aus Daten der umliegenden Referenzstationsdaten Baden und Leopoldau sowie der Antenne der TU Wien berechneten ZTDs verglichen und beurteilt.

Bei der Untersuchung der aufgezeichneten statischen Daten mit RTKLIB wurde die Positionsbestimmung mit der Basislinienmethode (Differenzverfahren) zur Referenzstation des EPOSA-Netzes Leopoldau durchgeführt. Dabei wird die Position des Empfängers nicht absolut, sondern relativ bestimmt. Diese Methode zur Positionsbestimmung bietet den Vorteil, dass durch die Differenzbildung einige Fehlereinflüsse reduziert oder sogar eliminiert werden können. Um den ionosphärischen Einfluss zu verkleinern, wurde das Klobuchar-Modell verwendet. Dieses Modell ist in RTKLIB integriert. Die mit RTKLIB berechneten Ergebnisse der troposphärischen Signalverzögerung aus statischen Einfrequenzempfänger-Beobachtungsdaten zeigen jedoch keine korrekte Lösung. Einige der abgeleiteten ZTD-Werte sind negativ. Da es sich bei der troposphärischen Korrektur um eine Verzögerung handelt, können die Ergebnisse in der Realität nicht negativ sein. Aufgrund der relativen Positionsbestimmung mit der Referenzstation werden die Fehler teilweise eliminiert und eine absolute Schätzung des ZTD ist nicht direkt möglich. Nach Erhalt dieser Ergebnisse wurde die Untersuchung mit dem Programm RTKLIB nicht weiter fortgeführt. In der Folge wurde deshalb die Auswertung mit goGPS durchgeführt. Für die Korrektur der Io-

osphäre wurde der in goGPS integrierte SEID-Algorithmus angewendet. Dieser Algorithmus berechnet aus umliegenden Referenzstationen, welche mit Zweifrequenzempfängern ausgestattet sind, synthetische Beobachtungsdaten für den Einfrequenzempfänger. Der Algorithmus berechnet satellitenspezifisch die Ionospheric Pierce Points (IPP) der einzelnen Referenzstationen und interpoliert diese auf den Einfrequenzempfänger. Durch die synthetischen Beobachtungsdaten kann mit einer Linearkombination der ionosphärische Einfluss eliminiert werden. Die Auswertung beziehungsweise Ableitung der ZTD-Werte aus den statischen Einfrequenzempfängerdaten wurde mit den Referenzstationen Baden und Leopoldau verglichen. Die beiden Stationen wurden als Referenz gewählt, da sich die Einfrequenzempfänger zum Zeitpunkt der Datenaufzeichnung in Bezug auf die Antennenhöhe in etwa zwischen den beiden Stationen befanden. Zusätzlich wurden die erhaltenen ZTD-Werte mit den stündlichen Auswertungen der TU Wien-Antenne (aufgenommen und ausgewertet von der Forschungsgruppe Höhere Geodäsie der TU Wien) verglichen. Der Vergleich zwischen Einfrequenzempfängern und Referenzstationen zeigte, dass die ZTD-Werte der Einfrequenzempfänger wie erwartet zwischen jenen der Referenzen liegen. Außerdem verbesserte sich das Ergebnis mit zunehmender Aufnahmedauer. Für eine genauere Beurteilung der Ergebnisse der Einfrequenzempfänger mit den berechneten stündlichen troposphärischen Verzögerungen der Forschungsgruppe Höhere Geodäsie wurden die erzielten Ergebnisse als gleitendes Mittel für jede volle Stunde berechnet. Hierfür wurden die Daten dreißig Minuten vor und nach einer ganzen Stunde gemittelt. Dieser Vergleich zeigte, dass die berechneten ZTD-Werte nur im Zentimeter- bis Millimeterbereich von jenen der TU Wien abweichen. Die Abweichungen für die Zug-Antenne von Huber & Suhner sind geringer als jene der Kathrein-Antenne. Um den Vergleich anschaulicher zu gestalten wurde der ZTD auch aus den Beobachtungsdaten der TU Wien-Antenne abgeleitet. Bei der Berechnung der troposphärischen Verzögerung für die TU Wien-Antenne konnten mit goGPS keine plausiblen Ergebnisse erreicht werden, da der ZTD nur im Submillimeterbereich variiert. Die Ergebnisse wurden mit ZTD-Werten für die TU Wien-Antenne verglichen und zeigten erhebliche Abweichungen. Warum die Ableitung des ZTD aus den Beobachtungsdaten der TU Wien nicht möglich war, kann aus Sicht des Verfassers nicht nachvollzogen werden. Die Berechnung der troposphärischen Verzögerung für die TU Wien-Antenne wurde mit dem kanadischen PPP-Onlinetool des CGS durchgeführt. Das Ergebnis des Onlinetools wurde anschließend auch mit jenen Daten der Forschungsgruppe Höhere Geodäsie verglichen. Dabei hat sich gezeigt, dass sich die Ableitung des ZTD nur geringfügig von den berechneten TU Wien-Werten unterscheidet. Der Vergleich zwischen den Einfrequenzempfängern und den abgeleiteten ZTD-Werten der TU Wien-Antenne zeigte im Mittel Abweichungen kleiner als zwei Zentimeter. Außerdem zeigte dieser Vergleich, aber auch jener mit den Referenzstationen,

dass sich die Ergebnisse der Einfrequenzempfänger mit zunehmender Aufnahmedauer (nach einer Konvergenzzeit von circa 15 Minuten) sich dem Verlauf der Referenzkurven anpassen. Um die Höhenunterschiede zwischen Einfrequenzempfängerdaten und den Referenzstationen zu korrigieren, wurde eine Höhenkorrektur des ZTD berechnet. Die Korrektur wurde mit Hilfe von standardisierten Atmosphärenparametern für jede Station berechnet, um vorerst alle Referenzstationshöhen auf die Empfängerhöhe der Einfrequenzempfänger zu berichtigen. Nach Anbringung der Höhenkorrektur an die Referenzstationen haben sich die einzelnen Kurven der ZTD-Werte teilweise noch besser aneinander angepasst. Um die Verbesserungen durch die Höhenkorrektur zu bekräftigen wurde diese jeweils an die Einfrequenzempfänger angebracht, um einzelne Vergleiche zu den drei Referenzstationen herzustellen. Bei dieser Untersuchung zeigte sich, dass sich die Zeitserie der ZTD-Werte der ersten Antenne mit zunehmender Aufnahmedauer an jene der Referenzen anpasste. Die Abweichungen minimierten sich von rund sieben Zentimeter auf zwei Zentimeter. Eine derartige Verbesserung der Abweichung konnte bei den Ergebnissen der zweiten Antenne nicht festgestellt werden. Hier lag die Abweichung der ZTD-Werte jedoch kontinuierlich unter drei Zentimeter. Bei Betrachtung der Standardabweichungen der ZTD-Differenzen im fünf Minutenintervall zeigte das Ergebnis der Einfrequenzempfängerdaten bei allen drei Referenzen eine Konvergenzzeit von rund zehn bis fünfzehn Minuten. Nach der genannten Konvergenzzeit betrug die Standardabweichung der ZTD-Differenzen für die restliche Aufnahmedauer maximal zwei Millimeter. Die Auswertung der kinematischen Daten der Zug-Antennen der ÖBB konnte mit goGPS nicht durchgeführt werden, da die Berechnung in der für diese Arbeit verwendeten „beta“-Version auf statische Auswertungen beschränkt war.

Das Ergebnis dieser Arbeit hat gezeigt, dass die Ableitung der troposphärischen Verzögerung (dem ZTD) aus Einfrequenzempfängerdaten mit einer Genauigkeit von rund ± 2 Zentimeter möglich ist. Im Zuge der Beurteilung der erhaltenen Ergebnisse mit umliegenden Referenzstationen und der TU Wien-Antenne wurde verdeutlicht, dass die Ableitung der ZTD-Werte bis auf wenige Zentimeter beziehungsweise Millimeter den troposphärischen Verzögerungen der Zweifrequenzempfänger entspricht. Die Ableitung aus kinematischen Beobachtungsdaten konnte jedoch nicht erreicht werden. Einerseits hätte der Arbeitsaufwand das Ausmaß der vorliegenden Arbeit übertroffen und andererseits bestand ein Problem mit den Auswerteprogrammen. Dabei konnten mit RTKLIB nicht ausreichend genaue Ergebnisse erzielt werden. GoGPS, mit dem für die statischen Beobachtungen ausreichende genaue Ergebnisse erzielt wurden, hat die Funktion der Auswertung kinematischer Daten zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit noch nicht implementiert. Aufgrund der erzielten Ergebnisse hat sich die Auswertung auf statische Daten beschränkt. Es konnte gezeigt werden, dass die Ableitung der troposphärischen Verzögerung aus statischen Einfrequenzempfänger-

Beobachtungsdaten gute Ergebnisse mit einem mittleren Bias von ± 2 Zentimeter und einer Standardabweichung der ZTD-Differenzen von etwa 1 Millimeter liefert. Mit einem verbesserten Programm beziehungsweise der Implementierung der Auswertung kinematischer Daten in goGPS wäre eine Ableitung der bewegten Zug-Antennen wahrscheinlich. Falls die Zugmessdaten nicht ausreichend wären, könnte auch versucht werden, Daten aus Mobiltelefonen und GPS-Sportuhren zu verwenden. Dies könnte in Form einer Applikation, welche die Rohdaten der verwendeten Empfänger übermittelt, realisiert werden. Bei einem dichten Netz aus abgeleiteten ZTD-Werten könnten die erhaltenen Daten sowohl den Wetterdiensten zur Verbesserung ihrer Wetterprognosen als auch GNSS-Nutzern für eine genauere Positionsbestimmung zur Verfügung gestellt werden.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Berechnung der Empfängerposition	5
2.2	Berechnung der Empfängerposition mit Schnittfehler	6
2.3	Darstellung der 6 Kepler-Bahnelemente	7
2.4	Verteilung der GPS-Segmente	15
2.5	Aufbau der atmosphärischen Schichten	17
2.6	Chapman-Elektronendichteprofil	18
3.1	Darstellung des Elektronengehalts im Single-Layer Modell	25
3.2	Ableitungsprinzip des IPP für den Einfrequenzempfänger (SEID)	27
3.3	Ablaufdiagramm des SEID Algorithmus	29
3.4	Referenzstationen des EPOSA-Netzes	33
3.5	Skyplot der Einfrequenzempfänger-Beobachtungsdaten	44
4.1	ZTD-Werte nach Berechnung mit RTKLIB für die erste Antenne.	50
4.2	ZTD-Werte nach Berechnung mit RTKLIB für die zweite Antenne.	50
4.3	ZTD-Werte nach Berechnung mit goGPS für beide Aufnahmen.	54
4.4	ZTD basierend auf unterschiedlicher Anzahl an Referenzstationen	55
4.5	Troposphärische Verzögerung gemessen mit der Antenne von Kathrein im Vergleich zur Antenne der TU Wien	57
4.6	Troposphärische Verzögerung gemessen mit der Antenne von Huber & Suhner im Vergleich zur Antenne der TU Wien.	58
4.7	Ergebnis des ZTD im Vergleich zu dem von der TU Wien berechneten ZTD	59
4.8	ZTD aller Referenzstationen mit Höhenkorrektur	61
4.9	ZTD mit Höhenkorrektur der Einfrequenzempfänger zur Referenzstation TU Wien	62
4.10	ZTD mit Höhenkorrektur der Einfrequenzempfänger zur Referenzstation Baden	64
4.11	ZTD mit Höhenkorrektur der Einfrequenzempfänger zur Referenzstation Leopoldau	66

Tabellenverzeichnis

2.1	Keplersche Bahnelemente zur Berechnung der Satellitenorbits	7
2.2	Fehlereinflüsse der satellitenbasierten Positionsbestimmung	8
2.3	Parameter des WGS-84 System	12
2.4	GPS-Satelliten	14
3.1	IGS-Produkte für GPS	36
4.1	Verwendete Referenzstationen des EPOSA-Netzes	53
4.2	ZTD-Höhenkorrekturwerte	60
4.3	ZTD Differenzen zwischen TU Wien und Einfrequenzempfängerdaten . . .	63
4.4	ZTD Differenzen zwischen Referenzstation Baden und Einfrequenzempfängerdaten	65
4.5	ZTD Differenzen zwischen Referenzstation Leopoldau und Einfrequenzempfängerdaten	67

Abkürzungsverzeichnis

ANTEX	Antenna Exchange Format
BDS	BeiDou Navigation Satellite System
CGS	Canadian Geodetic Survey
CORS	Continuously Operating Reference Station
CSRS	Canadian Spatial Reference System
DTM	Digital Terrain Model
ED	Elektronendichte
EPOSA	Echtzeit Positionierung Austria
EU	Europäische Union
EVU	Energieversorgungsunternehmen
GFZ	GeoForschungsZentrum Potsdam
GGOS	Global Geodetic Observing System
GLONASS	Globalnaja Nawigazionnaja Sputnikowaja Sistema
GNSS	Global Navigation and Satellite System
GPS	Global Positioning System
GPT	Global Pressure and Temperature
GSM	Global System for Mobile Communications
GUI	Graphical User Interface
IAG	International Association of Geodesy
IGS	International GNSS Service
IPP	Ionospheric Pierce Point
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
MCS	Master-Control-Station
MGEX	Multi-GNSS-Experiment and Pilot Project
NAD83	North American Datum 1983
NAVIC	Navigation with Indian Constellation
NAVSTAR-GPS	Navigation Satellite Timing And Ranging - Global Positioning System
NTRIP	Networked Transport of RTCM via Internet Protocol

ÖBB	Österreichische Bundesbahn
PPP	Precise Point Positioning
QZSS	Quasi-Zenit-Satelliten-System
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services
RTK	Real Time Kinematic
RTKLIB	Real Time Kinematic Library
SBAS	Satellite Based Augmentation System
SEID	Satellite-specific Epoch-differenced Ionospheric Delay Model
sp3	Standard Product 3
STEC	Slant Total Electron Content
TAI	Temps Atomique International
TEC	Total Electron Content
TU Wien	Technische Universität Wien
USA	United States of America
UTC	Universal Time Coordinated
VMF	Vienna Mapping Function
WGS-84	World Geodetic System 1984
ZAMG	Zentralanstalt für Meteorologie und Geophysik
ZHD	Zenit Hydrostatic Delay
ZTD	Zenit Total Delay
ZWD	Zenit Wet Delay

Literaturverzeichnis

- Bauer, M. (2018). *Vermessung und Ortung mit Satelliten*. Berlin: Wichmann, 7. edition.
- Böhm, J. (2013). *Atmospheric Effects in Space Geodesy*. Springer Atmospheric Sciences. Springer.
- Böhm, J. und Schuh, H. (2003). Vienna Mapping Functions.
- Deng, Z. (2012). *GPS Meteorology with Single Frequency Receivers*. PhD thesis, GFZ Potsdam.
- Deng, Z., Bender, M., Dick, G., Ge, M., Wickert, J., Ramatschi, M., und Zou, X. (2009). Retrieving tropospheric delays from GPS networks densified with single frequency receivers. *Geophysical Research Letters*, Vol. 36.
- EPOSA (2019). Echtzeit Positionierung Austria. Webseite: <http://www.eposa.at/>. Seite abgerufen im April 2019.
- Fuhrmann, T., Knöpfler, A., Mayer, M., Luo, X., und Heck, B. (2010). *Zur GNSS-basierten Bestimmung des atmosphärischen Wasserdampfgehalts mittels Precise Point Positioning*. Technical Report 2, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Göbel, P. (2004). *Wetter und Klima*. Köln: DuMont.
- GeoForschungsZentrum (GFZ) (2019). Helmholtz-Zentrum Potsdam - Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ. Webseite: <https://www.gfz-potsdam.de/startseite/>. Seite abgerufen im April 2019.
- goGPS Project (2019). goGPS project - open source positioning software. Webseite: <http://61.115.228.209/>. Seite abgerufen im März 2019.
- Guo, J., Li, X., Li, Z., Hu, L., Yang, G., Zhao, C., Fairbairn, D., Watson, D., und Ge, M. (2018). Multi-GNSS precise point positioning for precision agriculture. *Precision Agriculture*, 2018, Vol.19(5).

- Herrera Olmo, A., Suhandri, H., Realini, E., Reguzzoni, M., und Lacy, M. C. d. (2015). goGPS: Open-Source MATLAB Software. *GPS Solutions*, 20, 1–9.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., und Wasle, E. (2008). *GNSS - Global Navigation Satellite Systems : GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Wien: Springer.
- International GNSS Service (IGS) (2019). Webseite: <http://www.igs.org>. Seite abgerufen im April 2019.
- Kaplan, E. D. und Hegarty, C. J. (2006). *Understanding GPS*. Boston: Artech House.
- Karabatić, A. (2011). *Precise Point Positioning (PPP): an alternative technique for ground based GNSS troposphere monitoring*. PhD thesis, Technische Universität Wien.
- Kouba, J. (2009). Testing of global pressure/temperature (GPT) model and global mapping function (GMF) in GPS analyses. *Journal of Geodesy*, 83, 199–208.
- Kriemeyer, A., Veldhuis, M.-C. T., der Marel, H. V., Realini, E., und de Giesen, N. V. (2018). Potential of cost-efficient single frequency gnss receivers for water vapor monitoring. *Remote Sensing*, 10, 1493.
- National Geodetic Survey (2019). Positioning America for the Future. Webseite: <https://www.ngs.noaa.gov/>; Seite abgerufen im April 2019.
- Navipedia (2019). Webseite: <https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/>. Seite abgerufen im März 2019.
- Realini, E. und Reguzzoni, M. (2013). goGPS: open source software for enhancing the accuracy of low-cost receivers by single-frequency relative kinematic positioning. *Measurement Science and Technology*, 24(11), 115010.
- Seeber, G. (2003). *Satellite geodesy*. Berlin: De Gruyter, 2. edition.
- Takasu, T. (2013). *RTKLIB ver. 2.4.2 Manual*.
- Takasu, T. und Yasuda, A. (2009). Development of the low-cost RTK-GPS Receiver with an Open Source Program Package RTKLIB. *International Symposium on GPS/GNSS*.
- Topcon Antennen- und Receiverspezifikationen (2019). Webseite: www.topcon.com.sg/images/GR-G3.pdf und <http://www.topcon.com.sg/images/NET/NETG3A.pdf>. Seite abgerufen im April 2019.
- U.S. Government (2019). Official U.S. Government information about the Global Positioning System (GPS). Webseite: <https://www.gps.gov/>. Seite abgerufen im März 2019.