



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN**

Vienna University of Technology

D I P L O M A R B E I T

Untersuchung der Qualität von GPS Echtzeit Ephemeriden für die Bestimmung troposphärischer Laufzeitverzögerungen

ausgeführt am

Department für Geodäsie und Geoinformation

Forschungsgruppe Höhere Geodäsie

der Technischen Universität Wien

unter der Anleitung von

A.o. Univ.Prof. Dr.techn. Dipl.-Ing. Robert Weber

unter der Mitwirkung von

Univ.Ass. Dipl.-Ing. Gregor Möller

durch

Josef Schwarz, BSc

MatrNr.: 0926147

Eichberg 260

2832 Thernberg - Österreich

Kurzfassung

Für die kurzfristige Wettervorhersage bilden die Parameter der Troposphäre, vor allem der Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre, eine wichtige Informationsquelle. Anhand der GPS-Meteorologie ist es möglich, durch Auswertung von Beobachtungen von GPS-Referenzstationen mittels Precise Point Positioning, diese Troposphärenparameter zu schätzen. Die Grundlage bilden Informationen über die Satellitenposition und den Satellitenuhroffset in Form von präzisen Ephemeriden. Deren Genauigkeit ist jedoch vom Zeitpunkt der Bereitstellung der Daten abhängig.

Die Schätzung der Troposphärenparameter für die kurzfristige Wettervorhersage wird durch die Bereitstellung von IGS-Echtzeitkorrekturen ermöglicht. Für die Untersuchung der Qualität und Auswirkung der Echtzeitdaten auf die Troposphären-Parameterschätzung wurden in einem definierten Untersuchungszeitraum Satellitenpositionen und Uhroffsets aus Broadcast Ephemeriden berechnet und mit den Daten aus den unterschiedlichen Korrekturdatenströmen verbessert. Anschließend wurden auf Grundlage dieser Werte in NAPEOS Troposphärenparameter geschätzt und mit Referenzwerten, berechnet aus IGS-Final und Ultra Rapid Produkten, qualitativ verglichen.

Die Vergleiche mit den aus IGS-Final Produkten geschätzten troposphärischen Verzögerungen zeigen die geringsten Abweichungen zu den aus IGC01 Echtzeitkorrekturen geschätzten Werten. Eine möglichst hohe zeitliche Auflösung bei der Erstellung der Ephemeriden wirkt sich auf die Qualität der geschätzten Troposphärenparameter positiv aus. Bei der Schätzung der Troposphärenparameter basierend auf Echtzeit-korrigierten Ephemeriden werden im Vergleich zu jener aus Ultra Rapid Orbits deutliche Verbesserungen erzielt.

Abstract

The parameters of the troposphere, especially the water vapor content of the atmosphere, are an important source of information for short-term weather forecasts. Through GPS meteorology methods it is possible to estimate values for those parameters by analyzing GPS reference stations data using the Precise Point Positioning approach. Accurate information on the satellite position and the satellite clock given in precise ephemeris form the basis for these estimates. The accuracy of the ephemeris is heavily dependent on signal delays. The evaluation of the data in real time is desirable, especially for short-term weather forecasting.

The estimation of troposphere parameters in real time is made possible through the provision of Real Time Correction by the IGS. Quality and impact of those Real Time Corrections on the final troposphere parameters are assessed by calculating satellite positions and clock offsets using broadcast ephemeris and subsequently incorporating different Real Time Correction streams. Based on these improved satellite position and clock offset values, tropospheric slant delays are estimated using the NAPEOS software package. The resulting values are compared to parameters calculated based on IGS Final Orbits and Ultra Rapid products as well. The analysis is set in a predefined time period and carried out for selected reference stations.

Tropospheric delays estimated from IGS Final Orbits show the smallest deviation from IGC01 Real Time Correction stream (based on BIAS and RMSE) data. It is concluded that high temporal resolution used in the calculation of improved satellite information has a positive impact on the estimation of tropospheric parameters. Furthermore, estimates based on real time corrected ephemeris achieve significant improvement compared to those based on Ultra Rapid Orbits.

Danksagung

An dieser Stelle darf ich mich bei Professor Weber für die Möglichkeit bedanken diese Arbeit im Umfeld der Forschungsgruppe für Höhere Geodäsie verfassen zu können. Vor allem aber möchte ich mich bei Gregor Möller für seine außerordentlich engagierte Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit bedanken.

Ebenso bedanken möchte ich mich bei allen meinen Studienkollegen, insbesondere bei Benedikt Ebenbichler, Jakob Franz Gruber, Elias Niel, Stephan Pegritz, David Reifeltshammer, Stefan Schaufler und Tomas Thalmann, für den Zusammenhalt während des Studiums und die unvergessliche Zeit.

Weiters möchte ich mich an dieser Stelle bei Matthias Flonner, Daniel Kahofer, Sebastian Krenn, Andreas Thurner und Thomas Weintögl für den immerwährenden Rückhalt und die jahrelange Freundschaft bedanken.

Besonderer Dank gilt meiner Familie, allen voran meinen Eltern, Maria und Franz, und meiner Schwester Rebecca. Ohne ihre andauernde Unterstützung wäre der erfolgreiche Abschluss des Studiums und die Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht möglich gewesen.

Der größte Dank gilt Viktoria. Durch den ständigen Ansporn und die immerwährende Unterstützung, die sie mir entgegenbringt, wurden das Verfassen dieser Arbeit und alle Erfolge in meinem Leben erst möglich gemacht.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Kurzfassung | ii |
| Abstract | iii |
| 1 Einleitung und Ziele | 1 |
| 2 Grundlagen | 3 |
| 2.1 GNSS | 3 |
| 2.1.1 Satellitengestützte Positionierung | 4 |
| 2.1.2 Satelliten Orbits | 5 |
| 2.1.3 Beobachtungen und Fehlereinflüsse | 9 |
| 2.2 Global Positioning System | 15 |
| 2.2.1 Systemaufbau | 16 |
| 2.2.2 Signale | 18 |
| 2.2.3 Messmethoden | 19 |
| 2.3 Troposphäre | 21 |
| 2.3.1 Begriffserklärung | 21 |
| 2.3.2 Signalausbreitung und Laufzeitverzögerung | 22 |
| 2.3.3 Modellierung der troposphärischen Laufzeit | 25 |
| 3 IGS - Produkte | 30 |
| 3.1 Präzise Orbit- und Uhrkorrekturdaten | 31 |
| 3.1.1 Final Orbits/Clocks | 32 |
| 3.1.2 Ultrarapid Orbits | 34 |
| 3.2 IGS - Echtzeitkorrekturen | 35 |
| 3.2.1 Erstellung und Verbreitung | 36 |
| 3.2.2 Korrekturdatenströme | 38 |
| 3.2.3 Anwendungsmöglichkeiten | 41 |
| 3.3 IGS - Troposphärenparameter | 42 |
| 4 Untersuchung der Echtzeit- Korrekturdatenströme | 43 |
| 4.1 Bahn- und Stationsdaten | 43 |
| 4.2 Berechnung von korrigierten Orbits und Uhren | 47 |
| 4.2.1 Positions-/Uhroffsetberechnung aus Broadcast Ephemeriden | 47 |
| 4.2.2 Anbringen der IGS-Echtzeitkorrekturen | 50 |
| 4.2.3 Erstellen des sp3-Files | 51 |
| 4.2.4 Realisierung der Berechnungen in MatLab | 52 |
| 4.3 Berechnung von Troposphärenparametern | 53 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.3.1 | Troposphärenparameterschätzung | 53 |
| 4.3.2 | Berechnungsablauf in NAPEOS | 55 |
| 5 | Analyse und Vergleich | 61 |
| 5.1 | Daten und Vergleichsmethodik | 61 |
| 5.1.1 | Verwendete Test- und Referenzdaten | 61 |
| 5.1.2 | Vergleichsmethoden | 62 |
| 5.2 | Analyse der Berechnungsalgorithmen | 64 |
| 5.2.1 | Berechnung korrigierter Satellitenpositionen und Uhroffsets | 64 |
| 5.2.2 | Vergleich mit IGS Final Troposphärenprodukten | 67 |
| 5.3 | Analyse der Ergebnisse | 69 |
| 5.3.1 | Analyse der korrigierten Satellitenpositionen/Uhroffsets | 69 |
| 5.3.2 | Analyse der geschätzten Troposphärenparameter | 73 |
| 6 | Schlussfolgerungen | 81 |
| | Literaturverzeichnis | 86 |
| | Abbildungsverzeichnis | 90 |
| | Tabellenverzeichnis | 92 |
| | Abkürzungsverzeichnis | 93 |

1 Einleitung und Ziele

Das Verfahren der *GPS-Meteorologie* bildet seit einigen Jahren einen wesentlichen Bestandteil der Klimaforschung. Unter diesem Begriff versteht man die Schätzung von Parametern, die die Troposphäre und den darin enthaltenen Wasserdampfgehalt widerspiegeln, auf Basis der Ausgleichung von GNSS-Beobachtungen. Durch die global verfügbaren und permanent aufgezeichneten Satelliten-Beobachtungen ergeben sich dadurch räumlich und zeitlich hochauflösende Datenmengen.

Grundlage für diese Auswertungen bildet *Precise Point Positioning (PPP)*. Um bei diesem undifferenzierten GNSS-Messverfahren eine hochgenaue Positionierung zu erreichen, müssen - neben zahlreichen modellierten Fehlereinflüssen - präzise Informationen über die Position und den Uhroffset jedes Satelliten bekannt sein. Diese Satelliteninformationen (auch Ephemeriden genannt) können von Anbietern, wie dem International GNSS Service (IGS), für Post Processing-Auswertungen bezogen werden. Die Genauigkeit der unterschiedlichen IGS-Produkte hängt von der Dauer zwischen Beobachtung und ihrer Bereitstellung ab. Während Ultra Rapid Orbits mit einer Genauigkeit von rund 3 cm bereits nach einigen Stunden zur Verfügung stehen, werden die hochpräzisen IGS-Final Orbits mit einer Verzögerung von bis zu 18 Tagen veröffentlicht. Diese Verzögerungen sind für die kurzfristige Wettervorhersage unbefriedigend. Eine Lösung in Echtzeit ist anzustreben.

Der IGS stellt neben den präzisen Satellitenprodukten auch sogenannte *Echtzeitkorrekturen (Real Time Corrections)* zur Verfügung. Bei diesen Werten handelt es sich nicht um direkte Satellitenpositionen bzw. Uhroffsets, sondern um Korrekturen im Satellitenkoordinatensystem (radial, along- und cross-track), die an aus Broadcast Ephemeriden bestimmte Positionen und Uhroffsets angebracht werden. Mit den so erhaltenen Positionen und Uhroffsets können anschließend in (naher) Echtzeit mittels PPP-Verfahren die Parameter der Troposphäre bestimmt werden. Je nach Bezugspunkt (*Center of Mass* oder *Antenna Phase Center*) und Art der Erzeugung (beitragende *Analysezentren*, *Kalmann-Filterung*)

können die IGS-Echtzeitkorrekturen in vier verschiedene Datenströme eingeteilt werden.

In dieser Arbeit werden die Auswirkungen der Verwendung unterschiedlicher Datenströme auf die Schätzung von Troposphärenparametern analysiert und der Umgang mit den Daten bei Berechnung von korrigierten Orbits/Uhren und der Schätzung von Parametern untersucht.

Zu Beginn werden die Grundlagen erläutert, auf Basis derer die weiteren Untersuchungen durchgeführt werden. Es werden die Grundzüge der Satellitenpositionierung und der Satellitenbahnen beschrieben. Da sich die in dieser Arbeit verwendeten Daten auf GPS-Beobachtungen konzentrieren, wird dieses globale Satellitenpositionierungssystem im Detail beschrieben. Weiters wird der Begriff Troposphäre erläutert und deren Auswirkung auf die (GNSS-)Signalausbreitung und die sie beschreibenden Parameter erklärt.

Im anschließenden Kapitel werden die präzisen Satellitenbahn- und Uhrprodukte des IGS beschrieben. Sie werden zur Erstellung von Referenzlösungen für die folgenden Untersuchungen herangezogen. Weiters werden die IGS- Echtzeitkorrekturen, ihre Erzeugung und Verbreitung erläutert.

Für die Untersuchung der Datenströme werden aus Broadcast Ephemeriden Satellitenpositionen und Uhroffsets berechnet. Anschließend werden diese mit den Korrekturdaten des jeweiligen Datenstroms verbessert. Aus den so erstellten Satelliteninformationen werden für ein Netz aus repräsentativ ausgewählten IGS-Referenzstationen im Software-Paket *NAPEOS* Troposphärenparameter geschätzt. Die durchgeführten Berechnungsschritte werden in Kapitel 4 dargelegt. Als Untersuchungszeitraum wurde die Periode vom 14. bis 20. April 2015 festgelegt.

Abschließend werden die Ergebnisse der einzelnen Berechnungsschritte analysiert. Es werden die aus den verschiedenen Korrekturdatenströmen berechneten Satelliteninformationen mit Referenzdaten des IGS verglichen. Weiters werden die aus verschiedenen Eingangsdaten geschätzten Troposphärenparameter analysiert. Es werden Vergleiche zwischen Lösungen aus den einzelnen Datenströmen und geschätzten Parametern aus IGS-Final Orbits angestellt. Im Bereich der Echtzeit-Anwendungen stellen die Echtzeitkorrekturen eine direkte Alternative zur Verwendung von Ultra Rapid Orbits dar. Daher wird auch auf Unterschiede der Troposphärenparameter, geschätzt aus Ultra Rapid Orbits und Echtzeit-korrigierten Satelliteninformationen, eingegangen.

2 Grundlagen

Um die in dieser Arbeit untersuchten Satelliteninformationen und ihre Einflüsse auf die Qualität daraus abgeleiteter Parameter der Troposphäre beschreiben zu können, werden in diesem einführenden Kapitel die wichtigsten Grundlagen zum Thema zusammengefasst.

Es erfolgt eine generelle Einführung zu **Globalen Navigations Satelliten Systemen (GNSS)** und Satellitenpositionierung. Da für die Untersuchungen ausschließlich Daten des **NAVSTAR-GPS** - Systems verwendet werden, wird zusätzlich ein Schwerpunkt auf die Beschreibung dieses Systems gelegt.

Weiters wird der Begriff der **Troposphäre** erläutert, die Auswirkungen der Troposphäre auf Global Navigation Satellite System (GNSS)-Messungen beschrieben und die Modellierung und Parametrisierung dieser veranschaulicht.

2.1 GNSS

GNSS gilt als Überbegriff für globale Satelliten- Navigationsdienste, die dem Zweck der Ortung, Positionierung und Navigation dienen. Die namhaftesten Systeme sind das US-amerikanische System *NAVSTAR-GPS*, das russische System *GLONASS*, das europäische Satellitensystem *GALILEO*, sowie das chinesische *BEIDOU*-System.

Im Folgenden werden die Grundlagen der **GNSS-gestützten Positionierung** erläutert. Neben den **Satellitenbahnen** werden die **GNSS-Beobachtungen** und darauf wirkende **Fehlereinflüsse** beschrieben.

Die im Folgenden erläuterten Grundlagen zum Thema GNSS wurden größtenteils aus (Hoffmann-Wellenhof et al. [2008]) bzw. (Hoffmann-Wellenhof et al. [2003]) und (Leick et al. [2015]) entnommen.

2.1.1 Satellitengestützte Positionierung

Das Grundgerüst der satellitengestützten Positionierung beruht auf der Messung von Strecken bzw. Streckendifferenzen zu künstlichen Erdsatelliten. Diese Satelliten umkreisen die Erde in sogenannten Orbits, die durch die Parameter der „Kepler -Elemente“ (siehe Kap.2.1.2) definiert werden. Auf Grund dieser bekannten Bahnen der Satelliten lassen sich wiederum Positionsvektoren in wohldefinierten Koordinatensystemen (vgl. Kap.2.2) berechnen.

Die Streckenmessung wird aus der Laufzeit des Satellitensignals (siehe Kap. 2.2.2) abgeleitet. Geometrisch gesehen wird also durch jede Streckenmessung eine *Kugelschale* mit Zentrum in der jeweiligen Satellitenposition definiert. Somit kann im idealisiert vereinfachten Fall der dreidimensionale Positionsvektor des Empfängers im Koordinatensystem der Satelliten durch den **Schnitt dreier Kugelschalen** eindeutig bestimmt werden. Die Positionsbestimmung des Empfängers kann daher durch Streckenmessungen (Signallaufzeit) zu **drei** Satelliten realisiert werden.

Einen wesentlichen Einfluss auf die Messung der Signallaufzeit und der daraus abgeleiteten Strecke hat die *Realisierung der Systemzeit* in den einzelnen Komponenten - und hier speziell in den Empfängeruhren. Moderne Standardempfänger für GNSS-Anwendungen verwenden kostengünstige Uhren, die nur näherungsweise der GNSS-*Systemzeit* folgen und somit einen Offset und einen Drift zur tatsächlichen Systemzeit aufweisen. Dadurch sind die abgeleiteten Strecken zu den Satelliten von diesen Uhrfehlern abhängig und werden als sogenannte „*Pseudostrecken*“ (R) (*"Pseudoranges"*) bezeichnet.

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

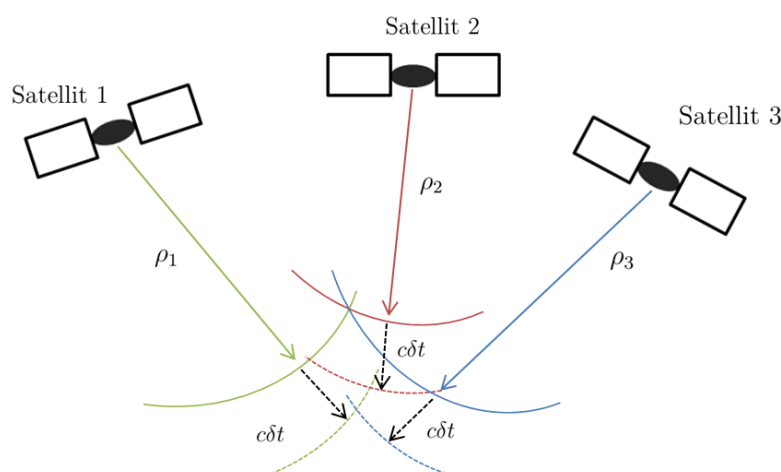


Abb. 2.1: Geometrische Interpretation der Pseudostrecken und Empfängeruhrfehler

Formel 2.1 erweitert die geometrische Distanz zwischen Satellit und Empfänger (ρ) um

eine Korrektur, resultierend aus dem Uhrenoffset multipliziert mit der (theoretischen Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals (Lichtgeschwindigkeit (c)). In Abbildung 2.1 ist die geometrische Interpretation der Formel (2.1) und die Pseudostrecken zu drei Satelliten illustriert.

Durch die Erweiterung der Anzahl der Beobachtungen und gleichzeitige Ableitung von Pseudostrecken zu **vier** Satelliten lässt sich schließlich neben dem dreidimensionalen Positionsvektor auch der Empfängeruhrfehler bestimmen.

Obwohl Satelliten gegenüber Empfängern über weitaus hochwertigere und stabilere Uhren verfügen (siehe Kap. 2.2.1) sind dennoch Differenzen zu der definierten GNSS-Systemzeit vorhanden. Auch die Genauigkeit der berechneten Positionen der Satelliten (Orbits) und weitere zahlreiche Fehlereinflüsse (vgl. 2.1.3) beeinträchtigen die Lösung der Einzelpunktbestimmung eines Empfängers.

Durch Erhöhung der Anzahl beobachteter Satelliten, Beobachtungen zu Satelliten zu verschiedenen Zeitpunkten bzw. Beobachtungen von verschiedenen Beobachtungspositionen können durch Bildung von Differenzen von Pseudostrecken unterschiedliche systematische Fehler, wie Satellitenuhrfehler, Satellitenorbitfehler, etc., reduziert oder sogar eliminiert werden.

Nach Hoffmann-Wellenhof et al. [2008] lassen sich folgende Faktoren definieren, die die Genauigkeit der Punktbestimmung wesentlich beeinflussen:

- Genauigkeiten der einzelnen Satellitenpositionen
- Genauigkeiten der Streckenmessung
- Geometrie - Schnittbedingung, Satellitenkonstellation

2.1.2 Satelliten Orbits

Wie bereits im Abschnitt 2.1.1 erwähnt, ist die Kenntnis einer möglichst genauen Position der einzelnen Satelliten für die satellitengestützte Positionierung, speziell bei der Einzelpunktbestimmung, von grundlegender Bedeutung. Die für den Anwender relevanten Informationen über Satellitenposition und Uhroffset des Satelliten werden einerseits als Teil der Navigationsnachricht in Form von Broadcast Ephemeris (brd) bereitgestellt, andererseits können sie als *präzise Ephemeriden* von diversen Anbietern bezogen werden. Während auf *präzise Ephemeriden* im Kapitel 3 näher eingegangen wird, werden im folgenden die Eigenschaften und die Parametrisierung von Satellitenorbits erklärt. Die Berechnung von Satellitenpositionen aus Broadcast Ephemeriden wird im Kapitel 4 durchgeführt und erläutert.

Die Basis für die Berechnung von Satellitenpositionen liegt in der Gravitationstheorie bzw. in den Beschreibungen des Zwei- und Einkörperproblems. Formel 2.2 beschreibt die Bewegung der Masse m_2 relativ zur Masse m_1 - und somit den Allgemeinfall bei der gegenseitigen Anziehung zweier Körper - als homogene Differentialgleichung zweiter Ordnung.

$$\ddot{\mathbf{r}} + \frac{G(m_1 + m_2)}{r^3} \mathbf{r} = 0 \quad (2.2)$$

\mathbf{r} beschreibt hier den relativen Positionsvektor, $\ddot{\mathbf{r}}$ die zweite Ableitung, also den Beschleunigungsvektor und G die universelle Gravitationskonstante. Da die Masse eines künstlichen Satelliten in Relation zur Erdmasse verschwindend klein ist und beide Körper vorerst als Punktmasse angenommen werden können, vereinfacht sich Formel 2.2 zum sogenannten *Einkörperproblem*. Weiters wird das Produkt aus Erdmasse und Gravitationskonstante als *geozentrische Gravitationskonstante* (μ) zusammengefasst. ($\mu = GM_e = 3986004.418 * 10^8 m^3 s^{-2}$ Hoffmann-Wellenhof et al. [2008])

Die Position des Satelliten auf seiner elliptischen Umlaufbahn um die Erde kann also durch Lösung der so entstehenden homogenen Differentialgleichung (*Einkörperproblem*) bestimmt werden. Hierfür werden sechs Integrationskonstanten, in diesem Zusammenhang als *Kepler Elemente* bezeichnet, benötigt.

| Parameter | Bezeichnung |
|---------------------------------|--|
| Ω | Rektaszension des Aufsteigenden Knotens |
| i | Inklination der Bahnebene |
| ω | Argument des Perigäums |
| a | Große Halbachse der elliptischen Bahn |
| e | numerische Exzentrizität der ellipt. Bahn |
| T_0 bzw. $M(0), t_{oe}$ | Zeitpunkt (des Perigäumdurchgangs) Mittlere Anomalie, Referenzzeitpunkt der Ephemeriden |

Tab. 2.1: Kepler Elemente

Die ersten fünf Parameter in 2.1 beschreiben somit die Bahn des Satelliten. Der sechste T_0 gibt den Zeitpunkt an, an welchem der Satellit das Perigäum der Erde durchläuft. Verwendet man für die Berechnung nicht T_0 direkt, sondern ermittelt die verstrichene Zeit zwischen dem Perigäumdurchgang und der gewünschten Epoche, kann man so die

Position des Satelliten zu jedem beliebigen Zeitpunkt über die mittlere Geschwindigkeit des Satelliten (n) bestimmen.

$$n = \sqrt{\frac{\mu}{a^3}} \quad (2.3)$$

Diese Bewegung des Satelliten in seiner Bahnebene kann nun ausgehend von den Keplerelementen durch drei Parameter (*Anomalien*) ausgedrückt werden. Die **mittlere Anomalie** $M(t)$, die **exzentrische Anomalie** $E(t)$ und die **wahre Anomalie** $v(t)$. Bei den *oskulierenden Bahnelementen* (Beschreibung folgt) wird anstatt des Zeitpunkts des Perigäumdurchgangs (T_0) die mittlere Anomalie M_0 zu Beginn der GPS Woche angegeben. Mittels der t_{oe} kann schließlich auf die mittlere Anomalie zum Berechnungszeitpunkt geschlossen werden.

$$M(t) = n(t - t_{oe}) \quad (2.4)$$

$$E(t) = M(t) + e \sin E(t) \quad (2.5)$$

$$v(t) = 2 \arctan \left[\sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \tan \frac{E(t)}{2} \right] \quad (2.6)$$

Die somit beschriebene Bahnebene kann schließlich unter Berücksichtigung der Keplerschen Raumparameter Υ , i , ω und der Winkelgeschwindigkeit der Erde in ein erdfestes Koordinatensystem transformiert werden. Eine ausführliche Beschreibung der notwendigen Berechnungsschritte wird in Kapitel 4.2.1 gegeben.

Auf Grund diverser **Störbeschleunigungen** weicht die eigentliche Position des Satelliten deutlich von der oben bestimmten Bahn ab.

Die Hauptursachen dieser Störbeschleunigungen sind (Subirana, et al. [2013]):

- *Die Erde ist keine Kugel mit homogener Massenverteilung:*

Für das Einkörperproblem wurde die Erde als Punktmasse bzw. als Kugel mit homogener Massenverteilung angenommen. Die tatsächliche Figur der Erde weicht allerdings von einer Kugel ab und auch die Massenverteilung ist nicht homogen. Das resultierende Schwerfeld muss durch eine Kugelfunktionsentwicklung repräsentiert werden. Bei der Berechnung der GNSS-Satellitenbahn kann allein die Vernachlässigung des Koeffizienten, der die Abplattung der Erde beschreibt, nach rund drei Stunden ein Positionsfehler von bis zu 2 km auftreten. Die Auswirkungen der weiteren Terme des Schwerfeldes bewirken einen Fehler der Satellitenbahnbestimmung von 50 bis 80m.

- *Störkräfte auf Grund der Gravitation anderer Himmelskörper (Mond, Sonne):* Auch gravitative Kräfte anderer Himmelskörper, vorwiegend Sonne und Mond, beeinflussen die Bahn des Satelliten - es liegt streng genommen kein *Einkörperproblem* vor. Hierbei wirken die Effekte des Mondes auf Grund der geringeren Entfernung größer als jene der Sonne. Zusätzlich zur direkten Einwirkung auf den Satelliten selbst, wirken die Gravitationskräfte von Sonne und Mond auch deformierend auf die Massenverteilung der Erde und verändern somit auch indirekt das Gravitationsfeld der Erde.
- *Strahlungsdruck der Sonne:* Die Energie der auf den Satelliten auftreffenden Photonen wirkt auch als Störbeschleunigung auf die Bewegung des Satelliten. Dieser Effekt kann sich über 2 Tage gesehen als Bahnfehler von bis zu 10 m auswirken und ist schwer zu modellieren.

Neben diesen Störbeschleunigungen, die sich auf die Bahn bzw. die Bewegung des Satelliten auswirken, müssen auch noch Abweichungen der Satellitenuhr von der jeweiligen *GNSS-Systemzeit* berücksichtigt werden. Die technisch bestmögliche Realisierung der Systemzeit in den Satelliten erfolgt durch die Verwendung von Atomuhren. Dennoch weisen auch diese hochpräzisen Uhren pro Satellit unterschiedliche Offsets bzw. Drifts in Bezug auf die Systemzeit auf, die für eine genaue Positionsbestimmung ebenfalls korrigiert werden müssen.

Um die Position und den Uhroffset des Satelliten, obgleich der zahlreichen Störeinflüsse, möglichst gut präzisieren zu können, werden „*oskulierende Kepler-Elemente*“ verwendet. Hierbei werden die in Tabelle 2.1 beschriebenen Parameter der Bahnbestimmung um ihre zeitlichen Veränderungen erweitert. Konkret entsteht ein Satz an Parametern, der die 6 Kepler-Elemente, drei Korrekturen für die sich linear mit der Zeit ändernden Parameter ($\dot{\Omega}, \dot{i}, \Delta n$), drei Paare an sinusoidalen Korrekturen für korrigierte Breite, Inklination und Bahnradius ($C_{uc}, C_{us}, C_{ic}, C_{is}, C_{rc}, C_{rs}$) und eine Referenzepoche (t_{oe}), auf welche sich die Elemente beziehen, beinhaltet.

Zur Korrektur der Abweichungen der Satellitenuhr von der Systemzeit wird der sogenannte **Uhroffset** berechnet. Dies geschieht über ein quadratisches Polynom. Die drei Koeffizienten dieses Korrekturpolynoms sind ebenfalls in den *oskulierenden Bahnelementen* enthalten.

Auf Grund der unterschiedlichen Störeinflüsse und ihrer zeitlichen Änderung kann die wahre Bahn des Satelliten nur in einem zeitlich begrenzten Rahmen durch einen Satz von *oskulierenden Bahnelementen* beschrieben werden. Es werden daher alle zwei Stunden neue Sätze für die Bestimmung der Satellitenorbits bereitgestellt. Der Zeitpunkt auf

welchen sich ein Satz an Bahnelementen bezieht ist in der t_{oe} (*time of ephemeris*) festgehalten. Bei der Auswertung von Satellitenorbits sollte der Berechnungszeitpunkt nicht mehr als zwei Stunden von der t_{oe} des jeweiligen Satzes an Bahnelementen abweichen (siehe Kapitel 4.2).

Diese Bahnelemente werden bei den einzelnen GNSS auf unterschiedliche Weise verbreitet. Im Fall von GPS werden die (einfachen) Kepler-Elemente aller Satelliten als sogenannte *Almanach-Daten* mit der dem Signal aufmodulierten Navigationsnachricht (Broadcast Message) übertragen. Die *oskulierenden Bahnelemente* werden von den jeweiligen Satelliten, auf welchen sie bezogen sind, ebenfalls in der Broadcast Message übertragen.

Die zu erreichende Genauigkeit bei der Bahnbestimmung aus Broadcast Ephemeriden (*oskulierende Bahnelemente*) kann mit 1-2 m angegeben werden.

Die beträchtlichen Abweichungen der realen Bahnen von der idealisierten Bahnbestimmung verdeutlichen auch die *Notwendigkeit* von **präziseren Bahndaten** für hochgenaue GNSS-Anwendungen (vgl. Kapitel 3).

2.1.3 Beobachtungen und Fehlereinflüsse

Die Inhalte der folgenden beiden Abschnitte beziehen sich größtenteils auf (Kaplan & Hegarty [2006]) und (Leick et al. [2015]).

Beobachtungen

Die Grundlage für GNSS-Beobachtungen bilden Strecken, die aus Laufzeitmessungen der empfangenen Signale abgeleitet werden. Die Signale bestehen in ihrer einfachsten Beschreibung aus einer Trägerphase und einem aufmodulierten Code.

Bei der **Code-Messung** wird im Empfänger ein Kopie des Codes generiert und mit dem Code des empfangenen Signals korreliert. Wie bereits in Abschnitt 2.1.1 beschrieben, kann auf Grund von Uhrfehlern nicht direkt auf die geometrische Distanz ρ zwischen Satellit und Empfänger geschlossen, sondern nur eine sogenannte Pseudostrecke beobachtet werden. Dadurch ergibt sich die *Beobachtungsgleichung für Code-Messungen* zu:

$$R_r^s(t) = \rho_r^s(t) + c * [\Delta t_r(t) - \Delta t^s(t_i - \tau)] + \varepsilon_r^s(t) \quad (2.7)$$

Die Indizierung verweist auf den jeweiligen Empfänger(r) oder Satelliten(s). Δt_r und Δt^s bezeichnen also den Empfänger- und den Satellitenuhrfehler. τ steht für die Laufzeit, als verstrichene Zeit zwischen Aussendezeitpunkt und Empfangszeitpunkt. Eine zusätzliche

Erweiterung zu Formel 2.1 aus Abschnitt 2.1.1 bildet der Term ε unter dem hier alle weiteren Fehlereinflüsse, die zu einer Abweichung der geometrischen Distanz ρ von der bestimmten Pseudostrecke R führen, zusammengefasst sind. Die Auflösung der Codemessung ist abhängig von der Länge des aufmodulierten Codes (unterschiedliche Systeme verwenden unterschiedliche Codes; vgl. Kap. 2.2.2) und kann mit rund 1% der Chip-Länge abgeschätzt werden ($\sigma_{code} = \pm 20cm$). Die Genauigkeit der Positionierung durch ausschließliche Verwendung von Codebeobachtungen ist für zahlreiche Anwendungen ausreichend und praktikabel ($\sigma_{Pos} = \pm 3 - 5cm$).

Abgesehen von der **Code-Messung** kann auch die **Messung der Trägerphase** zur Positionsbestimmung verwendet werden. Hierbei bildet die Phase, genauer gesagt, das Phasenreststück der Trägerwelle des empfangenen Signals die Messgröße. Die Messung erfolgt hierbei - analog zur Code-Messung - durch Abgleich des empfangenen Signals mit einer empfangener-internen Referenzfrequenz und Bestimmung des Phasenversatzes der beiden Signale. Somit kann die Differenz innerhalb einer Wellenlänge λ des Signals sehr präzise festgestellt werden. Auf die gesamte Laufzeit bzw. Entfernung zwischen Satellit und Empfänger kann erst durch Feststellung der zuvor durchlaufenen ganzen *Wellendurchgänge* N (auch *Mehrdeutigkeiten* genannt) geschlossen werden. Zur Lösung dieser Mehrdeutigkeiten gibt es unterschiedliche Wege: differentielle Messverfahren oder lange statische Beobachtungszeiten. Die Auflösung der Trägerphasenmessung kann mit 1% der Wellenlänge der verwendeten Trägerfrequenz abgeschätzt werden ($\sigma_{Phase} = \pm 1mm$). Somit erweitert sich Formel 2.7 für die Messung von Trägerphasen zu Formel 2.8, der *Beobachtungsgleichung für Trägerphasen-Messungen*:

$$L_{r,i}^s(t) = \rho_r^s(t) + c * [\Delta t_r(t) - \Delta t^s(t - \tau)] + \lambda_i * N_{r,i}^s \varepsilon_r^s(t) \quad (2.8)$$

Da die Frequenz des ausgesandten/empfangenen Signals in der Trägerphasen-Messung eine wesentliche Rolle spielt, muss in Formel 2.8 konsequenterweise zwischen Messungen von Signalen mit verschiedener Frequenz unterschieden werden - vgl. Index i .

An dieser Stelle sei noch erwähnt, dass auch die **Dopplerverschiebung** des Signals als Beobachtungsgröße bei der Auswertung von GNSS-Messungen herangezogen werden kann.

Fehlereinflüsse

In den zuvor dargelegten Beobachtungsgleichungen für Code-Messungen und Trägerphasen-Messungen wurden gleichermaßen weitere Fehlereinflüsse unter dem Parameter ε zusammengefasst. Diese systematischen Fehlereinflüsse können in 4 Gruppen von Fehlern eingeteilt werden: *satellitenabhängige Fehlereinflüsse*, *entfernungsabhängige Fehlereinflüsse* (*atmosphärische Fehlereinflüsse*), *stationsabhängige Fehlereinflüsse* und *sonstige Fehle-*

reinflüsse.

Im Folgenden werden die Fehlergruppen und einzelnen Fehlereinflüsse kurz erläutert, um im darauffolgenden Kapitel die für diese Arbeit relevanten Einflüsse der Troposphäre fundierter zu beschreiben.

Satellitenabhängige Fehlereinflüsse

Als satellitenabhängige Fehler werden hier jene Fehler zusammengefasst, die in Abhängigkeit des beobachteten Satelliten auftreten. Es handelt sich hierbei um Satellitenbahnfehler (δo^s) und Satellitenuhrfehler (δt^s).

Satellitenbahnfehler Wie bereits in Kapitel 2.1.2 erwähnt, weicht die prädierte Satellitenposition auf Grund verschiedener Störbeschleunigungen von der tatsächlichen Position ab. Die Abweichung wird in drei Komponenten (*radial, along und cross track*) dargestellt. Zur Minderung der Satellitenbahnfehler werden die Störbeschleunigungen und ihre Auswirkungen auf die Bahn des Satelliten modelliert. Andererseits werden mit zeitlicher Verzögerung unterschiedliche *präzise Ephemeriden* mit unterschiedlicher Genauigkeit zur Verfügung gestellt. (Näheres in Kapitel 3). Die Genauigkeit der Punktbestimmung hängt also mit der Genauigkeit der für die Berechnung verwendeten Bahndaten zusammen.

Satellitenuhr Die Realisierung der GPS-Systemzeit in den Satelliten erfolgt mit hoch präzisen Atomuhren. Dennoch weist jede einzelne dieser Satellitenuhren einen Offset und einen Drift zur Systemzeit auf, die für die Einzelpunktbestimmung nicht außer Acht gelassen werden können - bei differentiellen Messverfahren wird der Fehlereinfluss der Satellitenuhren eliminiert. Die Modellierung des Satellitenuhrfehlers erfolgt, im einfachsten Fall, durch ein Polynom zweiten Grades mit Polynomkoeffizienten aus der Broadcast Message.

$$\Delta t^s(t) = c_0 + c_1(t - t_{oc}) + c_2(t - t_{oc})^2 \quad (2.9)$$

t_{oc} (*time of clocks*) bezeichnet hier den Zeitpunkt auf welchen sich Polynomkoeffizienten des jeweiligen Satzes beziehen - analog zu t_{oe} für die Elemente, welche die Satellitenposition beschreiben.

Ähnlich wie bei den Satellitenbahnfehlern werden auch für die Satellitenuhrfehler präzise Informationen für post-processing Anwendungen mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung angeboten.

Entfernungsabhängige Fehlereinflüsse, atmosphärische Fehlereinflüsse

Unter diesem Begriff werden jene systematischen Fehlereinflüsse auf das gemessene Signal

zusammengefasst, deren Größenordnung von der Basislinienlänge. Im Wesentlichen handelt es sich um Laufzeitverzögerungen durch die Ionosphäre ($\delta I_{r,i}^s$) und Laufzeitverzögerungen durch die neutrale Atmosphäre (δT_r^s). Im Rahmen des in dieser Arbeit verwendeten PPP-Verfahrens wird deshalb besser von „atmosphärischen Fehlereinflüssen“ gesprochen.

Ionosphäre Die Ionosphäre ist jener Teil der Erdatmosphäre in welchem sich freie Elektronen und Ionen befinden. Diese Schicht liegt in einer Höhe von rund 50 bis 1000 Kilometer über dem Erdboden. Die Ionosphäre ist für Mikrowellen ein dispersives Medium, hat also unterschiedliche Auswirkung auf die Gruppen- und Phasengeschwindigkeit des Signals. Diese ist für die Beobachtung von Satellitensignalen von essentieller Bedeutung. Da die Phasengeschwindigkeit in der Ionosphäre erhöht und gleichzeitig die Gruppengeschwindigkeit vermindert ist, werden damit auch die beiden Messgrößen Trägerphase und aufmodulierter Code beschleunigt, bzw. verlangsamt übertragen.

Eine wichtige Größe bei der Beschreibung der Ionosphäre stellt der *Slant Total Electron Content (STEC)* dar. Er beschreibt die integrale Elektronendichte entlang des Signalweges durch die Ionosphäre. Der STEC unterliegt zeitlichen und örtlichen Schwankungen (abhängig beispielsweise von der geographischen Breite, Jahreszeit und Tageszeit). Die Fehlereinflüsse können einerseits durch die Verwendung von Zweifrequenzempfängern, andererseits durch Ionosphärenmodelle reduziert bzw. eliminiert werden.

Neutrale Atmosphäre Als neutrale Atmosphäre wird die (elektrisch) neutrale, bodennahste Schicht der Atmosphäre bezeichnet, die sich bis in eine Höhe von ca. 50km erstreckt. Es sei an dieser Stelle auf den Unterschied zur Troposphäre hingewiesen, die sich bis in eine Höhe von rund 10km erstreckt und von der sogenannten Tropopause begrenzt. In der Troposphäre befindet sich über 90% des Wasserdampfgehaltes der gesamten Atmosphäre. Die neutrale Atmosphäre stellt nun den gesamten Bereich der nicht ionisierten Schichten unterhalb der Ionosphäre dar. Im Gegensatz zur Ionosphäre stellt die neutrale Atmosphäre ein nicht dispersives Medium für Signale im Mikrowellen-Bereich (GNSS-Signale) dar. Den größten Anteil der Laufzeitverzögerungen der neutralen Atmosphäre macht jener der Troposphäre aus, wodurch sich die Begriffe neutrale Atmosphäre und Troposphäre bezogen auf die Laufzeit von GNSS-Signalen - auch in einschlägiger Fachliteratur - oft vermischen.

In dieser Arbeit spielen die Laufzeitverzögerungen in der Troposphäre und die Parameter, die sie beschreiben eine wichtige Rolle. Daher wird der Begriff Troposphäre in Kapitel 2.3 genauer erläutert.

Stationsabhängige Fehlereinflüsse

Als stationsabhängige Fehler werden hier jene Einflüsse auf die Code- und Phasenbeobachtungen zusammengefasst, die auf Grund von Einflüssen und Eigenschaften im direkten

Umfeld des Empfängers (der Station) oder am Empfänger selbst auftreten. Es handelt sich hierbei um: die Mehrwegausbreitung ($MP_{r,i}^s$), Variationen des Antennenphasenzentrums ($APC_{r,i}^s$) und das Empfängermessrauschen ($r_{r,i}^s$).

Mehrwegausbreitung Der Effekt der Mehrwegausbreitung tritt auf Grund der Überlagerung des eigentlichen Signals (auf direktem Ausbreitungsweg Satellit-Empfänger) mit einem an diversen Objekten reflektiertem Signal auf. Diese Interferenz von verschiedenen Signalen ruft eine Phasenverschiebung des eigentlichen Signals hervor und führt zu einer deutlichen Verschlechterung des *Signal-Rausch Verhältnisses*; bis hin zur völligen Auslöschung des Signals. Daher wird die vom Empfänger berechnete Korrelation zwischen empfangenen und replizierten Signal erschwert.

Der Effekt kann vermindert werden durch: Auswahl geeigneter Empfängerstandorte, spezielle Empfangsantennen (Abschirmung gegenüber seitlichen, unerwünschten Signalen) oder auch rechnerisch durch Differenzbildung von Messungen an verschiedenen Tagen - jeweils um 23 Stunden 56 Minuten versetzt.

Weiters handelt es sich bei den ausgesandten GNSS-Signalen um zirkular polarisierte Signale - konkret sind es rechtshändig zirkular polarisierte Wellen. Beim Auftreffen und Reflexion des Signals an einer Oberfläche kommt es zur Umkehr der Polarisierung. Daher kommen einfach reflektierte Signale als links zirkular polarisiert am Empfänger an und werden daher beim Empfang gedämpft.

Antennenphasenzentrum Bei den Fehlern unter dem Begriff Antennenphasenzentrum müssen einige Unterscheidungen getroffen werden (dieser Fehlereinfluss kann deshalb auch nur bedingt den stationsabhängigen Fehlern zugeschrieben werden). Grundsätzlich muss man zwischen Fehlereinflüssen zwischen **Sende- und Empfangsantenne** unterscheiden.

Die *Position der Sendeantenne am Satellit* wird im sogenannten *Satellitenkoordinatensystem - signal in Space representation* in Bezug zum Massenzentrum (COM - center of mass) des Satelliten beschrieben. Satelliteninformationen aus präzisen Ephemeriden (wie sie in Kapitel 3 beschrieben werden) beziehen sich auf das Massenzentrum des Satelliten. Die Messgrößen aus den GNSS-Beobachtungen hingegen beziehen sich auf das Antennenphasenzentrum (bzw. den Punkt am Satelliten, wo das Signal ausgesandt wird). Der Unterschied zwischen dem Bezugspunkt einer Antenne und des Antennenphasenzentrums wird Phase Center Offset (PCO) genannt. Dieser *Offset zwischen Massenzentrum und Antennenphasenzentrum des Satelliten* ist für die einzelnen Satelliten bekannt und muss in Form einer Korrektur an die Satellitenpositionsdaten (vgl. Kapitel 5.3) angebracht werden.

Weiters kann das Antennenzentrum, wie in der Theorie angenommen, nicht punktförmig als jener Ort beschrieben werden, an welchem alle verbreiteten Signale ausgestrahlt werden. In der Realität variiert die Lage des Phasenzentrums (auf Grund elektromagnetischer Eigenschaften einzelner Bauteile) in Abhängigkeit der Richtung der Signale. Dies wird als Phase Center Variation (PCV) bezeichnet.

Analog zu den eben beschriebenen Effekten bei der Satellitenantenne, treten diese auch bei der Empfangsantenne auf. Für präzise Auswertungen müssen die Einflüsse von PCO und PCV berücksichtigt werden. In die Auswertungen müssen entsprechende Kalibrierdaten (speziell für jeden Satelliten und Empfängertyp) miteinbezogen werden.

Sonstige Fehlereinflüsse

Hier werden noch weitere bekannte und minimierbare Fehlereinflüsse angeführt, die weder direkt mit der Laufzeit der Signale noch mit dem Empfänger und seiner Umgebung zusammenhängen. Zu diesen weiteren Fehlereinflüssen zählen unter anderem: relativistische Effekte und die Schnittbedingung der verschiedenen Beobachtungen.

Relativistische Effekte Die auftretenden relativistischen Effekte basieren auf unterschiedlichen Faktoren:

- (a) der Satellit umkreist die Erde mit einer Geschwindigkeit von ca. 3900 m/s . Für einen Beobachter auf der Erde wirken die Satellitenuhren verlangsamt (*spezielle Relativitätstheorie*)
- (b) auf Grund der deutlichen Differenz des Gravitationspotentials an der Erdoberfläche im Vergleich zu Satelliten in einer Höhe von rund 26000 Kilometern wirken die Satellitenuhren beschleunigt (*allgemeine Relativitätstheorie*)
- (c) auf Grund der Exzentrizität der Satellitenbahn kommt es auch zu einem periodischen Uhrfehler mit einer Amplitude von rund 46 ns. Eine Korrektur kann aus dem Radius- bzw. Geschwindigkeitsvektor des Satelliten berechnet werden.
- (d) die Ausbreitung des Signals weicht nicht nur auf Grund der bereits erwähnten Effekte von einer Geraden ab, sondern wird auch durch das Gravitationsfeld der Erde beeinflusst. Diese Größe wird *relativistische Weglängenkorrektur* genannt und hat einen Effekt von nur rund 2 cm auf den Ausbreitungsweg des Signals.

Die Effekte (a) und (b) reduzieren sich gegenseitig. In Summe scheinen schließlich die Satellitenuhren für einen Beobachter auf der Erde schneller zu laufen. Diesem Fehler wird mit einer tatsächlichen Änderung der Grundfrequenz im Satelliten bei gleichbleibenden

Frequenzwerten für die Berechnung entgegengewirkt. (bei GPS: Grundfrequenz = 10.23 MHz; eingestellte Grundfrequenz = 10.229999995453 MHz).

Der Effekt (c) wird gemeinsam mit den Auswirkungen des *Sagnac-Effekts* (auf Grund der Erddrehung während der Signalübertragung) im Empfänger berücksichtigt.

Schnittbedingungen Die Genauigkeit der erreichten Positionslösung ist auch abhängig von der Schnittgüte der gedachten Kugelschalen, die durch die einzelnen Messungen aufgespannt werden bzw. abhängig von der Geometrie der verwendeten Satelliten. Diese Schnittgüte kann ausgedrückt werden durch die sogenannte *Dilution of Precision (DOP)* ausgedrückt werden. Je nach untersuchtem Bereich können unterschiedliche DOP-Werte angegeben werden (Geometric-DOP, Horizontal-DOP, Position-DOP, etc.).

Die Werte für die Berechnung der einzelnen DOPs werden aus der Kovarianzmatrix der Ausgleichung der GPS-Beobachtungen entnommen. Generell gilt: je besser die Verteilung der Satelliten ist, desto besser ist die Schnittgüte, desto geringer ist der DOP-Wert und desto besser die Positionsgenauigkeit.

2.2 Global Positioning System

GPS - oftmals als Synonym und Überbegriff für alle GNSS verwendet - bezeichnet das US-amerikanische globale Satellitennavigationssystem: Navigation system with timing and ranging (NAVSTAR) Global Positioning System (GPS).

Auf Initiative des Department of Defense wurden in den 1970er Jahren die Grundlagen für den Aufbau des heutigen GPS geschaffen. Die ursprünglichen Zielvorgaben für das System waren die ununterbrochene Bestimmung von Position und Geschwindigkeit von Empfängern am Boden und Schaffung eines präzisen Zeitsystems unter allen Wetterbedingungen (Kaplan & Hegarty [2006]).

Das System wurde grundsätzlich für militärische Zwecke entwickelt und steht auch heute noch unter Kontrolle des US-Militärs. Nach Abschaltung der sogenannten *Selective Availability* (im Jahr 2000) - einer künstlichen Verschlechterung der zivil nutzbaren Signale - haben sich aber sehr rasch zivile Anwendungsmöglichkeiten etabliert.

Da die behandelten GNSS-Daten dieser Arbeit ausschließlich auf GPS-Messungen beruhen wird das System, die Signale und mögliche GPS-Messmethoden im Folgenden im Detail erklärt.

2.2.1 Systemaufbau

Das System steht unter Kontrolle der US-Regierung und wird von Regierungseinrichtungen betreut. Der Aufbau lässt sich üblicherweise in drei Komponenten beschreiben: *das Raumsegment, das Kontrollsegment und das Nutzersegment*.

Raumsegment Unter dem Begriff **Raumsegment** sind die Satelliten des Systems und die definierten Umlaufbahnen der Satelliten zusammengefasst.

Nominell besteht GPS aus 24 Satelliten in 6 Bahnebenen - derzeit 31 GPS-Satelliten (Stand April 2016).

Die wesentlichsten Bahndaten der GPS-Satelliten sind in Tabelle 2.2 zusammengefasst.

| | |
|--|-----------|
| <i>Große Halbachse a</i> | 26.600 km |
| <i>Numerische Exzentrizität e</i> | < 0.02 |
| <i>Inklination i</i> | 55° |
| <i>Umlaufzeit</i> | 11h 58min |

Tab. 2.2: GPS Bahndaten

Die einzelnen Satelliten wurden seit Systemstart regelmäßig erneuert. Dabei unterscheiden sich die Satellitentypen im Wesentlichen durch die eingebauten Atomuhren. Weitere Neuerungen im System, wie beispielsweise neue Signale oder die Möglichkeit der Kommunikation zwischen den einzelnen Satelliten werden bei neueren Generationen von Satelliten realisiert. Durch diesen laufenden Wechsel besteht das Weltraumsegment aus einer Mischung aus neueren und älteren Satellitentypen.

Die einzelnen Satellitentypen sind:

- **Block I:** Die erste Generation an GPS-Satelliten; wurden in den Jahren 1978 bis 1985 gestartet; hatten eine geplante Lebensdauer von 5 Jahren (tatsächlich lag sie teilweise bei 10 Jahren); ihre Bahnebene hatte im Vergleich zu allen anderen Generationen an GPS-Satelliten noch eine Inklination von 63°; es waren noch keine Voraussetzungen für *Selective Availability* enthalten; es sind keine Satelliten dieser Generation mehr in Betrieb.
- **Block II und Block IIA:** Die Block II Satelliten und ihre Weiterentwicklung, die Block IIA (*advanced*) Satelliten wiesen bereits die auch für alle folgenden Generationen geltende Bahninklination von 55° Grad auf; es sind keine Satelliten dieser Generation mehr in Betrieb.
- **Block IIR:** *Replenishment Operational Satellites*; wurden von 1997 bis 2004 gestartet; 12 der momentan in Betrieb stehenden Satelliten sind Block IIR - Satelliten;

alle sind mit einer Rubidium-Atomuhr ausgestattet; diese Generation an Satelliten ist die erste, die durch aktive Entfernungsmessungen (zu weiteren Satelliten) ihre eigene Bahn bestimmen kann; die Navigationsnachricht wird im Satelliten erzeugt.

- **BlockIIR-M:** *Modernised Satellites*; diese Satelliten wurden von 2005 bis 2009 gestartet; sind eine Modernisierung der BlockIIR-Satelliten; sie senden im Vergleich zu Block IIR ein neues militärisches Signal und ein neues ziviles Signal (L2C); 7 der momentan in Betrieb stehenden Satelliten sind BlockIIR-M Satelliten; sie sind mit Rubidium-Atomuhren.
- **BlockIIF:** *Follow-on Operational Satellites*; werden seit 2010 gestartet und haben weitere Erneuerungen des GPS-Modernisierungsprogramms in das Raumsegment gebracht; sie senden auch auf der (neuen) dritten Trägerfrequenz L5; 12 der in Betrieb stehenden Satelliten sind BlockIIF-Satelliten; 10 davon mit Rubidium-Atomuhren; die Satelliten mit der PRN 8 und 24 haben Cäsium-Atomuhren an Board.
- **BlockIII:** die künftige Generation an GPS-Satelliten; wird auch das vierte zivile Signal L1C auf der Trägerfrequenz L1 aussenden; ist optimiert für Multi-GNSS Interoperabilität (vgl. Galileo); verwendet verbesserte Verfahren zur Signal Authentifizierung.

Als Referenzsystem für der GPS-Satellitenbahnen dient das *World Geodatic System 84 (WGS 84)* (siehe Tabelle 2.3).

| | |
|--|--|
| <i>Große Halbachse a</i> | 6378137.000 m |
| <i>Abplattung f</i> | 1/298.257223563 |
| <i>Rotationsgeschwindigkeit der Erde ω_E</i> | 7292115.0 $\cdot 10^{-11} \text{rad/s}$ |
| <i>geozentrische Gravitationskonstante μ</i> | 3986004.418 $\cdot 10^8 \text{m}^3/\text{s}^2$ |
| <i>Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c</i> | 2.99792458 $\cdot 10^8 \text{m/s}$ |

Tab. 2.3: Parameter des World Geodatic System 84 (Subirana, et al. [2013])

Kontrollsegment Unter dem Begriff Kontrollsegment wird die bodengebundene Infrastruktur des Systembetreibers zusammengefasst. Im Wesentlichen besteht sie bei GPS aus einer *Master Control Station*, mehreren *Monitor Stations* und einigen *Ground Control Stations*. Zu den Aufgaben des Kontrollsegments zählt die Steuerung des Systems, die Bestimmung von Satellitenbahnen und Uhren, Fehlererkennung und Durchführung etwaiger Bahnkorrekturen (*hier: tatsächliche Neuausrichtung einzelner Satelliten; Steuermanöver*).

Die *Monitor Stations* führen nonstop Beobachtungen zu allen sichtbaren Satelliten durch und liefern Daten an die *Master Control Station*. Diese wertet die empfangenen Daten aus und gewinnt dadurch Informationen über die tatsächliche Bahn und Uhroffsets der einzelnen Satelliten. Über die *Ground Control Stations* kann mit den Satelliten kommuniziert werden. Hier werden beispielsweise die Informationen für die vom Satelliten übertragene *Navigation Message* hochgeladen.

Nutzersegment Der Vollständigkeit halber sei hier auch noch das Nutzersegment als eigene Systemkomponente des GPS-Systems erwähnt. Unter diesem Begriff werden alle Anwender des Systems zusammengefasst.

Wie bereits erwähnt, ist der ursprünglich reine militärische Nutzen von GPS von einer immer steigenden Anzahl an zivilen Anwendern überholt worden. Vor allem der *Standard Positioning Service* mit *low cost* Empfängern ist sehr stark frequentiert. Aber auch die präzise GPS-Positionierung mit professionellen (Mehrfrequenz-)Empfängern nimmt mittlerweile einen großen Teil im Nutzersegment ein.

2.2.2 Signale

Unter GPS-Signale versteht man einer Trägerphase aufgeprägte CDMA (Code Division Multiple Access)- Codes. Zusätzlich werden auch noch Daten in Form der sogenannten *Navigation Message* aufmoduliert.

Alle verfügbaren GPS-Signale basieren auf der selben Grundfrequenz von 10.23 MHz. Die aus der Grundfrequenz abgeleiteten Trägerphasen haben die Bezeichnungen *L1*, *L2* und *L5*. Die aufmodulierten Codes werden als pseudo-zufällige Folge der Werte 0 und 1 (= "Chip") erstellt. Es wird unterschieden zwischen dem **C-Code (Civil Code)** (auch bekannt als *C/A-Code (Coarse/Acquisition-Code)*) und dem **P-Code (Precision Code)**. Der C-Code ist für zivile Nutzer und Standard Positioning Service (SPS)-Anwender gedacht und gewährt freien Zugriff. Der P-Code ist für militärische Zwecke vorbehalten. Dieser Code wird mit einem weiteren Code (W-Code) überlagert. Dadurch ist der so entstehende Y-Code ohne Kenntnis des W-Codes für nicht autorisierte Nutzer unbrauchbar. Die P-Codes werden ab 2020 außer Betrieb genommen.

Durch die bereits im vergangenen Jahrzehnt begonnene Modernisierung von GPS unterstützt das System nun (bzw. künftig) weitere Signale. Für zivile Nutzer ist ein weiterer Code auf der Trägerphase L2 hinzugefügt worden (L2C). Für militärische Zwecke wurde das System um einen weiteren verschlüsselten Code (M-Code) erweitert. Mit dem Betrieb von BlockIII Satelliten wird noch ein weiteres ziviles Signal (L1C) zur Verfügung stehen. Tabelle 2.4 zeigt die aus der Grundfrequenz abgeleiteten Trägerphasen des GPS-Systems.

| Trägerphase | Frequenz (f) | Wellenlänge (λ) |
|-------------|--------------|---------------------------|
| L1 | 1575.42 MHz | 19 cm |
| L2 | 1227.60 MHz | 24 cm |
| L5 | 1176.45 MHz | 26 cm |

Tab. 2.4: Drei Trägerphasen der GPS-Signale

2.2.3 Messmethoden

Wie bereits in Kapitel 2.1.1 erwähnt können GPS-Anwendungen zunächst in *Standard Positioning Service (SPS)* und *Precise Positioning Service (PPS)* eingeteilt werden.

Unter **SPS** versteht man Standard Positionierungsverfahren, wie sie beispielsweise für kommerzielle Fahrzeugnavigation, Location Based Services und Handypositionierung verwendet werden. Hierfür wird in der Regel nur der C/A-Code auf der L1 Frequenz als Beobachtungsgröße herangezogen.

Unter dem **PPS**-Verfahren versteht man die präzise Positionierung unter Verwendung des (militärischen) P- Codes und Zweifrequenzmessungen.

In der Geodäsie verwendet werden Code- und Trägerphasenbeobachtungen (meist auf mehreren Frequenzen) als Messgrößen herangezogen. Die im Weiteren besprochenen Messmethoden beziehen sich alle auf die in geodätischen Anwendungen genutzten Verfahren.

Es gibt hier zwei grundsätzliche Arten der GNSS-Positionsbestimmung: **Precise Point Positioning (PPP)** und **Precise Differential GPS (PDGPS)**.

PDGPS

Das (einfache) Differential GPS (DGPS)-Verfahren beruht auf Methoden der *relativen Positionierung*. Das Grundprinzip der relativen Positionierung ist es gleichzeitig auf mehreren Stationen (mindestens zwei) die selben Satelliten zu beobachten. Durch Differenzbildung (*Einfachdifferenzen*) der simultanen Beobachtungen einzelner Stationen zu den Satelliten können Satellitenuhrfehler eliminiert werden.

In weiterer Folge können durch simultane Beobachtung mehrerer Satelliten von verschiedenen Stationen *Doppeldifferenzen* gebildet werden, welche auch den Empfängeruhrfehler eliminieren. In Abhängigkeit der Entfernung zwischen den beobachtenden Stationen werden auch Einflüsse der Tropo- und der Ionosphäre minimiert, da bei geringen Stationsabständen annähernd gleiche Atmosphärenschichten vom Signal durchlaufen werden.

Werden Differenzen von zwei Doppeldifferenzen gebildet (also Beobachtungen mehrerer

Stationen zu mehreren Satelliten zu verschiedenen Zeitpunkten) können weitere Effekte, wie *Cycle-Slips* (ganzzahlige Sprünge der Mehrdeutigkeiten) bei Phasenmessungen bestimmt werden.

Das Resultat dieser Auswertungen bilden Koordinatenunterschiede zwischen den beobachtenden Stationen (Referenzstation, Rover) - daher **relative Positionierung**.

Wird eine relative Positionierung in Echtzeit angestrebt, müssen die Beobachtungen zwischen Referenz und Rover kommuniziert werden. Hierfür wurden standardisierte Datenformate (wie Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM)) definiert und es werden unterschiedliche Datenübertragungsmethoden (GSM, GPRS, Datenfunk) genutzt. Bei diesen relativen Positionierungsverfahren in Echtzeit spricht man von *Differential GPS (DGPS)*.

Werden für die GPS-Auswertungen mittels DGPS auch Trägerphasenbeobachtungen herangezogen kann die erreichbare Genauigkeit nochmals gesteigert werden (Lage 1-2cm, Höhe 4-5cm). In diesem Fall spricht man von *precise DGPS* oder auch von **Real Time Kinematic (RTK)**. Hierbei bildet die Möglichkeit der Stationen selbst Korrekturparameter zu rechnen, bzw. das Vorhandensein von ganzen Netzen von Referenzstationen eine erweiterte Methode des DGPS-Verfahrens. Es gibt schließlich unterschiedliche Ansätze (Flächenkorrekturparameter (FKP), Virtuelle Referenz Station (VRS), Master / Auxiliary Concept (MAC)) bei der Berechnung und Übertragung der Korrekturdaten innerhalb von Referenzstationsnetzen.

PPP

Unter dem Begriff **Precise Point Positioning (PPP)** versteht man die absolute Positionierung eines einzelnen Empfängers mit möglichst hoher Genauigkeit. Die limitierenden Faktoren in der Genauigkeit der Einzelpunktbestimmung sind im Wesentlichen jene bereits in Kapitel 2.1.3 beschriebenen Fehlereinflüsse:

- Satellitenbahnfehler
- Satellitenuhrfehler
- Einflüsse der Troposphäre
- Einflüsse der Ionosphäre
- weitere Einflüsse wie Relativistische Effekte, Antennenoffsets

Im Gegensatz zu Relativverfahren können bei diesem Verfahren die Fehler nicht durch Differenzbildungen eliminiert werden.

Um die Fehlereinflüsse weitestgehend zu minimieren werden für PPP-Anwendungen zweifrequenz Code- und Phasenbeobachtungen verwendet. Es wird bevorzugt die Ionosphärenfreie Linearkombination gebildet und für die Berechnungen präzise Orbit- und Uhrkorrektur - Informationen (siehe Kap. 3) herangezogen. Periodische Komponenten der relativistischen Fehlereinflüsse werden korrigiert und Korrekturen für Antennenoffsets angebracht.

Die zu bestimmenden Parameter beim PPP-Verfahren sind die Empfängerposition, der Empfängeruhrfehler, die troposphärische Laufzeitverzögerung (siehe auch Kap. 4) und die Mehrdeutigkeiten.

Da bei PPP keine Beobachtungsdifferenzen gebildet werden, können die Mehrdeutigkeiten nur als Gleitkommazahl geschätzt werden. Eine ganzzahlige Lösung der vollen Wellendurchgänge bleibt aus. Ursache hierfür sind *Uncalibrated Phase Delays (UPDs)* im Satelliten und im Empfänger, hervorgerufen bei der Erstellung des Signals (bzw. Referenzsignals) durch Instabilitäten in den Schwingungen des jeweiligen Oszillators. Die Initialisierungszeit, welche benötigt wird um eine Koordinatenkonvergenz zu erreichen, liegt bei 15 - 30 Minuten. Die erzielbare Genauigkeit der Positionierung liegt bei rund 10 cm.

Das europäische GNSS *Galileo* verspricht durch Verwendung des *Galileo Commercial Services* (unter anderem Bereitstellung von Echtzeit-Bahn- und Uhrkorrekturen direkt durch Galileo Satelliten) eine noch verbesserte Positionsgenauigkeit. Durch Untersuchungen simulierter Daten wurde sogar eine mögliche PPP- Positionsgenauigkeit von 4-5cm mit dem Galileo Commercial Service präsentiert (Fernandez-Hernandez, et al. [2015] & (Tobias, et al. [2014])).

2.3 Troposphäre

In dieser Arbeit wird Fokus auf die Beeinträchtigung der GNSS-Signale durch den neutralen Teil der Erdatmosphäre, im speziellen der **Troposphäre**, gelegt. Um die Auswirkungen der Troposphäre beschreiben zu können, werden im Folgenden die Begriffe Atmosphäre und Troposphäre erklärt. Es werden Möglichkeiten zur Modellierung und Wege zur Parametrisierung der Troposphäre erläutert.

2.3.1 Begriffserklärung

Die *Atmosphäre* (von griechisch *atmós*, Dampf) bezeichnet die gasförmige Hülle um den Erdkörper. Sie kann über den vertikalen Temperaturverlauf in die Schichten *Troposphäre*,

Stratosphäre, Mesosphäre, Thermosphäre und Exosphäre eingeteilt werden. Für GNSS-Anwendungen relevanter ist die Einteilung nach physikalischen Einflüssen auf die Signalausbreitung. Hier wird unterschieden zwischen *neutraler Atmosphäre und Ionosphäre*.

Als **Troposphäre** wird nun jener (elektrisch) neutrale Teil der Atmosphäre bezeichnet, welcher sich bis in eine Höhe von 10 Kilometer erstreckt (geringer an den Polen, größer am Äquator). Die Troposphäre beinhaltet 99% des gesamten in der Atmosphäre vorhandenen Wasserdampfs.

Die Troposphäre kann wiederum in einen **trockenen/hydrostatischen** und einen **feuchten Anteil** gegliedert werden. Die Zusammensetzung (und damit auch die Auswirkung auf die Signalausbreitung) des hydrostatischen Anteils unterliegt nur lang-periodischen Schwankungen und kann über Modelle präzisiert werden. Der feuchte Anteil der Troposphäre - also die Verteilung des Wasserdampfes - unterliegt ständigen Schwankungen mit hoher Frequenz. Dieser Teil macht ca. 10% der troposphärischen Laufzeitverzögerung aus, ist allerdings kaum präzisierbar. Dies erschwert die Modellierung der Troposphäre, beziehungsweise die Reduktion des gesamten Fehlereinflusses ebendieser.

Für Signale im Radiofrequenzbereich - wie GNSS-Signale - stellt die Troposphäre ein nicht dispersives Medium dar (*Gruppengeschwindigkeit = Phasengeschwindigkeit*). Einflüsse auf die Signallaufzeit treten somit gleichermaßen bei Beobachtungen in unterschiedlichen Frequenzen, Code- und Trägerphasenmessungen auf. Der Einfluss ist somit nicht mittels Linearkombination aus Beobachtungen in verschiedenen Frequenzbereichen zu eliminieren.

2.3.2 Signalausbreitung und Laufzeitverzögerung

Grundlegende Ursache für die Laufzeitverzögerung in der Troposphäre sind *Refraktionserscheinungen*. Durch den Brechungsindex der durchlaufenen Schichten wird die Ausbreitungsrichtung und -geschwindigkeit bestimmt. Die Signalausbreitung erfolgt grundsätzlich entlang des Weges der geringsten Laufzeit und nicht entlang der kürzesten geometrischen Distanz.

Somit kommt es in der Troposphäre zu einer Verzögerung und Beugung des Signals und einer *Weglängenänderung S-G* (siehe Abbildung 2.2)

Beide Terme kann man zum sogenannten *path delay* zusammenfassen. Dieser beschreibt die Differenz zwischen der Signalausbreitung im Vakuum und in neutraler Atmosphäre (Formel 2.10)

$$\Delta\rho_{tropo} = \int n(s)ds - \int ds = \int (n(s) - 1)ds \quad (2.10)$$

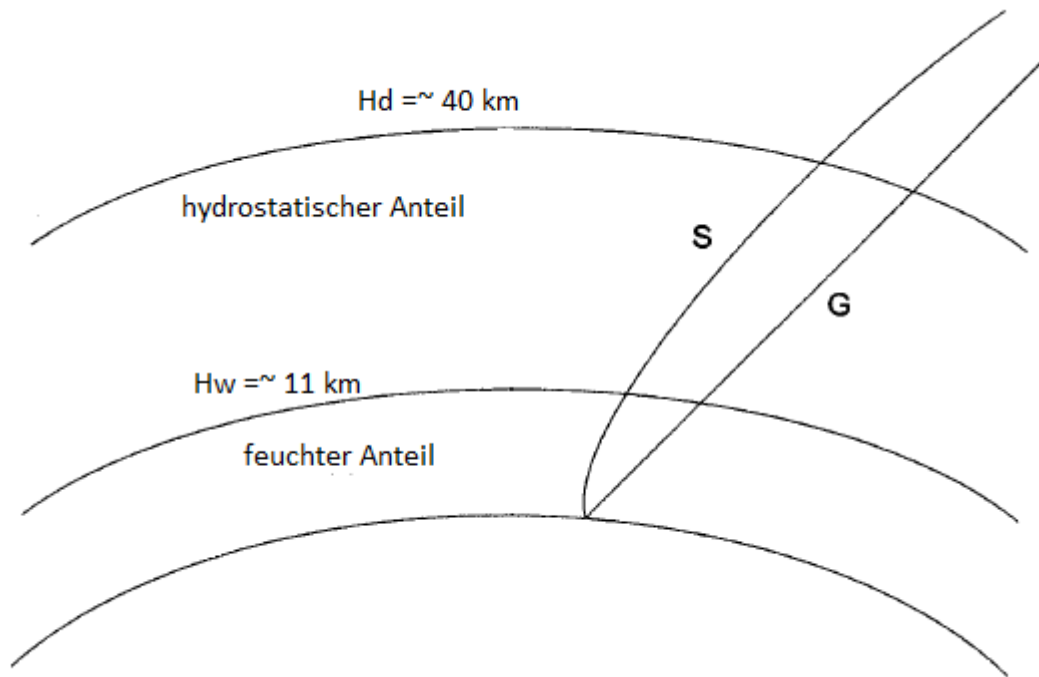


Abb. 2.2: Signalweg in der Troposphäre

$n(s)$ bezeichnet den Brechungsindex entlang des Signalwegs. Er steht über Formel 2.11 mit der Refraktivität (N) in Verbindung.

$$n(s) - 1 = N(s) \cdot 10^{-6} \quad (2.11)$$

Somit kann 2.10 ausgedrückt werden als

$$\Delta\rho_{tropo} = 10^{-6} \int N(s) ds \quad (2.12)$$

Die Refraktivität $N(s)$ kann nun in einen trockenen, einen hydrostatischen und einen feuchten Anteil gespalten werden (Smith & Weintraub [1953]). Die Aufteilung in die drei Terme in (2.13) erfolgt auf Grund der physikalischen Bedeutung der einzelnen Terme. Der trockene Anteil ist der Einfluss der Störungen aller trockenen Moleküle in der Luft, bei elektrischer Beeinflussung durch das Messsignal. Der hydrostatische fasst diese Eigenschaften für den Wasserdampf zusammen. Im feuchten Anteil ist der Einfluss der Wassermoleküle als Dipole unter dem Einfluss des Messsignals enthalten.

$$N = k_1 \frac{p_d}{T} + k_2 \frac{p_{wv}}{T} + k_3 \frac{p_{wv}}{T^2} \quad (2.13)$$

mit den in Tabelle 2.5 zusammengefassten Größen.

| | |
|-----------------|--------------------------------------|
| p_d | Partialdruck der trockenen Luft |
| p_{wv} | partialer Wasserdampfdruck |
| T | Temperatur in K |
| k_1, k_2, k_3 | Konstanten (experimentell bestimmt): |
| | $k_1 = 77.6[K/mbar]$, |
| | $k_2 = 69.5[K/mbar]$, |
| | $k_3 = 370100[K^2/mbar]$ |

Tab. 2.5: Parameter der Refraktivität

Tabelle 2.5 beschreibt die in Formel (2.13) eingehenden Parameter mit den Konstanten aus (Thayer [1974]).

Der Partialdruck der trockenen Luft und der des Wasserdampfes (p_d und p_{wv}) können jeweils als Funktion der Dichte ρ , der spezifischen Gaskonstante ($R_i =$ universelle Gaskonstante R durch Molaremasse M_i) und der Temperatur ausgedrückt werden. Sie bilden zusammen den Gesamtdruck (Gleichung 2.14 & 2.15).

$$p_i = Z_i \rho_i R_i T \quad (2.14)$$

$$p = p_d + p_{wv} \quad (2.15)$$

Durch Substitution von P_d (bzw. P_{wv}) in Formel (2.13) und Ersetzen von ρ_d durch die totale Dichte und die feuchte Dichte (bzw. die hydrostatische) kann man über die zusätzliche Einführung von 2.16 die **hydrostatische** und **feuchte Refraktivität** bestimmen (Gleichung 2.17 & 2.18).

$$k'_2 = k_2 - k_1 \frac{R_d}{R_{wv}} = k_2 - k_1 \frac{M_{wv}}{M_d} \quad (2.16)$$

$$N_d = k_1 R_d \rho = k_1 \frac{\rho}{T} \quad (2.17)$$

$$N_{wv} = k'_2 \frac{p_{wv}}{T} + k_3 \frac{p_{wv}}{T^2} \quad (2.18)$$

2.3.3 Modellierung der troposphärischen Laufzeit

Um die, durch die Refraktivität (Gleichung 2.17 & 2.18) gekennzeichnete, Laufzeitverzögerung in der gesamten über einem Punkt liegenden Troposphäre zu bestimmen (den sogenannten *Zenith Hydrostatic Delay (ZHD)* und *Zenith Wet Delay (ZWD)*) muss diese entlang des vertikalen Weges integriert werden. (Gleichungen 2.19 & 2.20)

$$ZHD = 10^{-6} \int N_d(h) dh \quad (2.19)$$

$$ZWD = 10^{-6} \int N_{wv}(h) dh \quad (2.20)$$

Um die Integrale (2.19) und (2.20) zu lösen, müssen Aussagen über die Veränderung der Refraktivität in den einzelnen Höhenschichten getroffen werden. Für den trockenen Anteil geschieht das in Abhängigkeit der Faktoren Druck bzw. Dichte und den Bedingungen des *hydrostatischen Gleichgewichts* idealer Gase.

Die Integration der feuchten Refraktivität ist abhängig von der räumlich und zeitlich stark schwankenden Verteilung des Wasserdampfs in den Luftschichten. Dies stellt bei der Berechnung der feuchten troposphärischen Laufzeitverzögerung eine Herausforderung dar.

ZHD und ZWD lassen sich aus unterschiedlichen Modellen berechnen. Viele diese Berechnungsansätze gehen von Druck, Temperatur und/oder Wasserdampfgehalt - Messungen an der beobachtenden Station (oder auch in Schichten der darüber liegenden Atmosphäre) aus.

All die zuvor getätigten Behauptungen zur Laufzeitverzögerung beziehen sich auf direkt im Zenit (Elevationswinkel = 90°) einfallende Signale. Um nun auf die Laufzeitverzögerungen der Beobachtungen in den tatsächlichen Zenitwinkeln zu schließen müssen *ZHD* und *ZWD* mit *Mappingfunktionen* ($m_{d,wv}$) multipliziert werden (Formel 2.21).

$$\Delta\rho_{tropo} = ZHD \cdot m_d + ZWD \cdot m_{wv} \quad (2.21)$$

Im Allgemeinen erfordert die Berechnung der unterschiedlichen Modelle Stationsdaten von Temperatur, Druck und relativer Feuchte. Diese Werte werden entweder direkt an der Station gemessen oder anhand von standardisierten Werten auf Meeresniveau extrapoliert (Klaffenböck [2007]).

$$p_0 = 1013.25 hPa$$

$$T_0 = 18^\circ C$$

$$f_0 = 50\%$$

Zur Vervollständigung der Informationen zur Modellierung des Troposphäreneinflusses sei an dieser Stelle noch erwähnt, dass es durch unterschiedliche räumliche Wasserdampfverteilungen auch zu einer azimuthalen Asymetrie der Troposphärenparameter rund um eine Station kommt. Das Projizieren des ZHD bzw. ZWD in die unterschiedlichen Richtungen ist also nicht nur elevationsabhängig. Die Berücksichtigung der azimuthalen Abhängigkeit gelingt mit Hilfe der Modellierung von Gradienten in Nord- und Ostrichtung.

Im Folgenden sind verschiedene (Standard-)Ansätze zur Modellierung der Troposphäre erläutert.

Model Hopfield

Hopfield [1969] bestimmt die Refraktivität des hydrostatischen Troposphärenanteils als Funktion der Höhe über der Erdoberfläche bis zu einer *Grenzhöhe* (h_d) (2.22).

$$N_d(h) = N_{d,0} \left[\frac{h_d - h}{h_d} \right]^4 \quad (2.22)$$

mit $h_d = 40136 + 148.72(T - 273.16)[m]$

Für die Berechnung der Refraktivität an der Station verwendet Hopfield die Gleichung von Smith & Weintraub [1953] (2.23 & 2.24)

$$N_{d,0} = 77.6 \cdot \frac{d}{T} \quad (2.23)$$

$$N_{wv,0} = 77.64 \cdot \frac{4810e}{T} \quad (2.24)$$

Obwohl der feuchte Anteil sehr starken - räumlichen und zeitlichen - Schwankungen unterliegt, verwendet Hopfield aus "Ermangelung brauchbarer Alternativen" (Hoffmann-Wellenhof et al. [2008]) den selben funktionalen Zusammenhang (2.22) auch für die Modellierung beider Refraktivitäten (Gleichung 2.25).

$$N_{wv}(h) = N_{wv,0} \left[\frac{h_{wv} - h}{h_{wv}} \right]^4 \quad (2.25)$$

Die Berechnung der Refraktivität erfolgt bei Hopfield also auf Basis der berechneten Werte an der Station und der Verlauf der Refraktivität nimmt als Funktion der Höhe über der Station ab. Weiters kann eine Äquivalenzhöhe definiert werden, bei der die jeweiligen Refraktionswerte (N_d, N_{wv}) Null werden. Diese Höhe liegt für den hydrostatischen Anteil in etwa bei 40 Kilometer über der Erdoberfläche, für den feuchten Anteil bei 11 Kilometer.

Die Schichtenaufteilung des Hopfieldmodells ist bereits in Abbildung 2.2 ersichtlich. Die Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung kann nun mit Gleichung 2.26 durch Integration der aus (2.22 & 2.25) ermittelten Werte berechnet werden.

$$\Delta\rho_d = 10^{-6} N_{d,0} \frac{1}{h_d^4} \int_0^{h_d} (h_d - h)^4 dh \quad (2.26)$$

Die Lösung des Integrals liefert 2.27

$$\Delta\rho_d = \frac{10^{-6}}{5} N_{d,0} h_d \quad (2.27)$$

(2.27) trifft analog (mit geänderten Indizes) für den feuchten Anteil zu und die durch Hopfield modellierte gesamte troposphärische Laufzeitverzögerung kann als Gleichung (2.28) angeschrieben werden.

$$\Delta\rho_{tropo} = \frac{10^{-6}}{5} \left[N_{d,0} h_d m_d(E) + N_{wv,0} m_{wv}(E) h_{wv} \right] \quad (2.28)$$

$m_d(E)$ und $m_{wv}(E)$ bilden die Mappingfunktionen, um die Zenitlaufzeitverzögerung aus unterschiedliche Elevationen zu erweitern (2.29 & 2.30)

$$m_d(E) = \frac{1}{\sin \sqrt{E^2 + 6.25}} \quad (2.29)$$

$$m_{wv}(E) = \frac{1}{\sin \sqrt{E^2 + 2.25}} \quad (2.30)$$

Model von Saastamoinen

(Saastamoinen [1972]) bzw. (Saastamoinen [1970]) beschreibt ebenfalls ein Modell zur Abschätzung der troposphärischen Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung abgeleitet aus dem Gasgesetz. Es werden auch hydrostatischer und feuchter Anteil auf Grund von Temperatur, Druck und Feuchte (bzw. Wasserdampfdruck) berechnet (Gleichung 2.31).

$$\Delta\rho_{tropo} = \frac{0.002277}{\cos z} \left[p + \left(\frac{1255}{T} + 0.05 \right) e - \tan^2 z \right] \quad (2.31)$$

Eine Erweiterung des Modells von Saastamoinen um Korrekturen in Abhängigkeit der absoluten Stationshöhe und der Höhe in Verbindung mit dem Zenitwinkel bildet das so-

genannte **Modified Saastamoinen** Modell (Gleichung 2.32)

$$\Delta\rho_{tropo} = \frac{0.002277}{\cos z} \left[p + \left(\frac{1255}{T} + 0.05 \right) e - B \tan^2 z \right] + \text{delta}R \quad (2.32)$$

Für den hydrostatischen Anteil der Zenitrichtung wird nur der erste Term von (2.31) genützt. Dieses Modell beschreibt den hydrostatischen Anteil der Laufzeitverzögerung aus *Druckwerten* (p) und einer *Funktion aus Breite und Höhe* ($f(\phi, h)$) der Beobachtungsstation.

$$\Delta\rho_{hyd} = 0.002277 \cdot p \cdot \frac{1}{f(\phi, h)} \quad (2.33)$$

Schätzung der Laufzeitverzögerung aus GNSS-Messungen

Zusätzlich zu der Modellierung der Troposphäre aus Standardmodellen kann auch aus GNSS-Messungen die Zenitverzögerung geschätzt werden. Durch das Vorhandensein einer Vielzahl an simultanen Beobachtungen zu verschiedenen Satelliten in verschiedenen Elevationen kann im Zuge der Parameterschätzung auch die atmosphärische Laufzeitverzögerung berechnet werden. Um diese präzise zu bestimmen, ist es notwendig präzise Informationen der Satellitenkoordinaten zu kennen (vgl. Kap.3 & 4).

Durch Bestimmung von Temperatur und Druck an der Station kann wiederum über Standardmodelle der hydrostatische Anteil bestimmt und somit eine Unterscheidung der durch GNSS-Messungen bestimmten totalen Verzögerungen in trockenen und feuchten Anteil getroffen werden.

Dieses Verfahren wird auch als **GPS-Meteorologie** bezeichnet. Vor allem, wenn aus den geschätzten Laufzeitverzögerungen noch der für die Wettervorhersage interessante Parameter *IWV* - *Integrated Water Vapor* abgeleitet wird (wie in Abbildung 2.3 von Klaffenböck [2007] dargestellt wird).

Im Gegensatz zu aus Modellen prädierten Werten, werden bei diesem (inversen) Verfahren Messungen ausgewertet, die von den momentanen räumlichen und zeitlichen Eigenschaften der Troposphäre beeinflusst wurden.

Von Bedeutung ist dieses Verfahren auch als Einsatz für die Wettervorhersage. Hierfür sind Auswertungen in Echtzeit (bzw. Naher Echtzeit) notwendig, um den Wasserdampfgehalt der Atmosphäre rasch und mit hoher zeitlicher Auflösung liefern zu können.

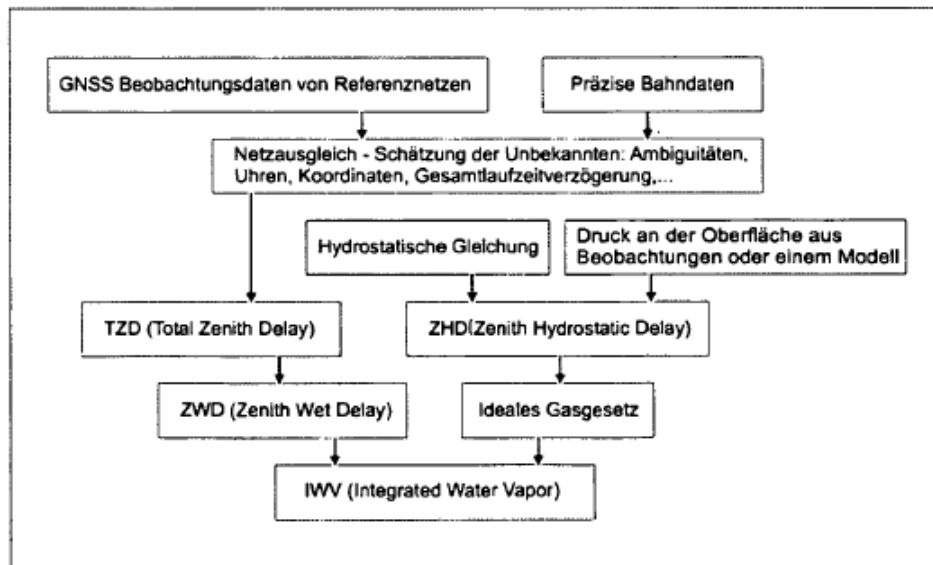


Abb. 2.3: Generierung von IWW-Werten aus GPS-Meteorologie (Klaffenböck [2007])

Damit in unmittelbarer Verbindung steht auch die Notwendigkeit von **präzisen Orbitdaten in Echtzeit** (bzw. Echtzeitbahnkorrekturen) und somit die in dieser Arbeit untersuchte *Qualität und Auswirkung der verschiedenen Korrekturdatenströme auf die Schätzung von Troposphärischen Laufzeitverzögerungen*.

3 IGS - Produkte

Der **International GNSS Service (IGS)** ist als „*zivile wissenschaftliche Dienstleistung* zu sehen“. (Klaffenböck [2007]).

Der IGS wurde 1992 nach einjähriger Pilotphase als wissenschaftliche Dienstleistung der International Association of Geodesy (IAG) gegründet und befasst sich mit der Bereitstellung von GNSS-Daten und Produkten höchster Genauigkeit. Weiters zählen auch die Schaffung von Standards im Umgang mit GNSS-bezogenen Daten und die Innovation neuer Produkte und Anwendungsmöglichkeiten im Bereich GNSS zu den Aufgaben/Zielen des IGS. Der IGS besteht in seiner Grundstruktur aus einem Netzwerk von rund 300 global verteilten GNSS-Referenzstationen, lokalen und globalen Datenzentren, Analysezentren und Analyse-Koordinatorzentren, einem Zentralbüro und dem Governing Board.

Unter dem Begriff **Ephemeriden** (vom griechischen *ephemeros*: „für einen Tag“) versteht man die Positionswerte sich bewogender, astronomischer Himmelskörper. Im konkreten Fall der Satellitennavigation fasst der Begriff Ephemeriden alle die Bahn (und den Uhroffset) des Satelliten beschreibenden Elemente und Produkte zusammen. Diese können in unterschiedlicher Form (*Satellitenkoordinaten oder Kepler Elemente*) gegeben sein und auf unterschiedliche Weise verbreitet werden (*durch Satelliten, Datenfunk, Internet*).

Der IGS berechnet in diversen Analysezentren aus globalen GNSS-Beobachtungen Satellitenpositionen und Uhroffsets. Diese werden vom *Analysis Center Coordinator (ACC)* verglichen und kombiniert. Eine bestmögliche Lösung wird anschließend durch die diversen Datenzentren über Internet kostenfrei zur Verfügung gestellt. Die verschiedenen IGS-Ephemeriden unterscheiden sich in ihrer Genauigkeit und vor allem auch in der Verfügbarkeit (gesehen als Zeitspanne zwischen Beobachtung/Referenzzeitpunkt für die Positionsberechnung und Bereitstellung der fertigen Lösungen).

Weiters berechnet der IGS **Korrekturen** zur Verbesserung der Broadcast Satellitenposition und stellt diese in Echtzeit via NTRIP-Client dem Nutzer zur Verfügung.

Eine weitere Aufgabe, an der sich der International GNSS Service (IGS) beteiligt, ist die Realisierung des **International Terrestrial Reference System (ITRS)** in Form eines globalen Koordinaten-Referenzrahmens, dem **International Terrestrial Reference Frame (ITRF)**, durch die Koordinaten der weltweit verteilten, permanent messenden Referenzstationen.

Da diese Arbeit die Schätzung von Troposphärenparametern aus GNSS-Messungen behandelt und hierfür bestmögliche Positionsinformationen der diversen Satelliten von essentieller Bedeutung sind, werden in diesem Kapitel die präzisen Bahnprodukte des IGS vorgestellt. Vor allem wird aber auch auf die **Echtzeitkorrekturen**, ihre Verbreitung und Unterschiede eingegangen. Abschließend werden noch die vom IGS bereitgestellten **Troposphärenparameter** erwähnt.

3.1 Präzise Orbit- und Uhrkorrekturdaten

Die präzisen Orbit- und Uhrkorrekturen des IGS werden im sp3 Format von den diversen Datenzentren über das Internet zur Verfügung gestellt. Dieses Format beinhaltet, neben einigen systemrelevanten Informationen, über Herkunft und Erstellung der Daten und Verfügbarkeit der Satelliten, im Header, folgende Informationen in einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten:

- Die Position aller Satelliten in Form von ITRF-Koordinaten [km]
- Uhroffset der jeweiligen Satellitenuhr zur GPS-Systemzeit

Zusätzlich können die Dateien Genauigkeitsangaben der berechneten Parameter und die Geschwindigkeiten der Satelliten enthalten. Zum weiteren Verständnis der angegebenen Koordinaten werden an dieser Stelle die beiden möglichen Bezugspunkte für Satellitenkoordinaten eingeführt: **Center of Mass (COM)** und **Antenna Phase Center (APC)**. Durch bekannte Bauweise der Satelliten und bekanntem Offset zwischen Massenzentrum und Antennenphasenzentrum können die Differenzen in den Koordinaten auf Grund der unterschiedlichen Bezugspunkte rechnerisch korrigiert werden. Eine derartige Korrektur ist in vielen Softwarelösungen bereits implementiert (vgl. Kap. (4.3.1)).

Soweit nicht anders angegeben, beziehen sich die Koordinaten der IGS-Ephemeriden auf

COM.

Abbildung 3.1 zeigt zur Veranschaulichung des sp3-Formates einen Ausschnitt der Final Orbits am 14. April 2015.

```
#cP2015 4 14 0 0 0.00000000 96 ORBIT IGB08 HLM IGS
## 1840 172800.00000000 900.00000000 57126 0.00000000000000
+ 31 G01G02G03G04G05G06G07G09G10G11G12G13G14G15G16G17G18
+ G19G20G21G22G23G24G25G26G27G28G29G30G31G32 0 0 0
+ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
+ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 2 2 2 2 3 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
++ 2 3 2 2 2 2 2 5 2 2 2 2 2 2 3 0 0 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
#c G cc GPS ccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc
#c cc cc ccc ccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc
#f 1.2500000 1.025000000 0.00000000000 0.000000000000000
#f 0.0000000 0.000000000 0.00000000000 0.000000000000000
#i 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
#i 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
/* FINAL ORBIT COMBINATION FROM WEIGHTED AVERAGE OF:
/* cod emr esa gfr jpl mit ngs sig
/* REFERENCED TO IGS TIME (IGST) AND TO WEIGHTED MEAN POLE:
/* PCV:IGS08_1840 OL/AL:FES2004 NONE Y ORB:CMB CLK:CMB
* 2015 4 14 0 0 0.00000000
PG01 13607.868483 -21456.188849 7361.463595 -6.829183 6 7 9 125
PG02 -16274.588919 1462.375216 -20496.312023 559.589899 9 9 7 130
PG03 17719.511794 -13384.659392 -14592.092111 295.126637 11 7 9 112
PG04 16487.488340 -14115.392326 14810.420555 -11.327269 8 6 8 119
PG05 -26395.967887 2975.936839 -2315.910140 -254.212705 12 8 9 123
PG06 -9660.792624 -14387.128657 -20130.638842 135.026432 10 10 7 110
PG07 5576.821379 -25077.427463 6035.592366 455.086377 9 10 5 40
```

Abb. 3.1: Ausschnitt der Final Orbits vom 14. April 2015 mit Header und Satelliteninformationen

3.1.1 Final Orbits/Clocks

Als **Final Orbits (igs)** werden die **Bahnprodukte des IGS** bezeichnet, welche die bestmögliche Genauigkeit an Satelliteninformation enthalten. Faktisch bestehen sie aus Satellitenpositionen und Uhrkorrekturen und werden wie zuvor beschrieben im sp3 Format als 24 Stunden Bahndaten (ein kompletter Beobachtungstag im Standardintervall 15 Minuten) übers Internet kostenfrei zur Verfügung gestellt.

Zum Erstellungsablauf der Final Orbits (igs):

Alle IGS-Referenzstationen beobachten permanent alle sichtbaren Satelliten. Auf Grund der großen Datenmengen und unzähligen Simultanbeobachtungen des Referenzstationsnetzes können Lösungen für alle Satellitenpositionen samt Satellitenuhrkorrekturen durch

die *IGS-Analysezentren* geschätzt werden.

Da es sich bei den Final Orbits (igs) um Bahndaten höchster Genauigkeit handelt und damit verbunden auch die höchstmögliche Konsistenz zwischen einzelnen Ergebnissen erreicht werden soll, werden alle Lösungen der einzelnen Analysezentren durch den *ACC* verglichen und kombiniert. Durch diese unterschiedlichen Prozessabläufe nimmt die Berechnung und Bereitstellung der igs-Orbits einige Zeit in Anspruch. Sie werden wöchentlich bereitgestellt und weisen zwischen Beobachtungstag und Veröffentlichung eine Verzögerung von 13 Tagen (für den letzter Tag der Woche) bzw. 20 Tage (erster Tag der Woche) auf.

Laut (IGS-Website [2016]) beträgt die erreichte Genauigkeit der Orbits 2.5 cm ; der Root Mean Square Error (RMSE) der Uhrkorrekturen wird mit 75 ps angegeben.

Die Final Orbits (igs) bilden die Basis für eine Vielzahl von Anwendungen mit höchsten Genauigkeitsanforderungen und werden auch zur Bestimmung des Referenzrahmens für IGS-Stationen verwendet. Durch die zeitliche Verzögerung ihrer Veröffentlichung sind sie allerdings nur für Post-Processing Applikationen zu verwenden.

Zusätzlich zu den kombinierten Informationen der Final Orbits, bestehend aus Satellitenpositionen und Uhrkorrekturen im zeitlichen Intervall von 15 Minuten, werden vom IGS mit gleicher Verzögerung auch reine **Uhrkorrekturdaten (.clk)** veröffentlicht. Diese haben eine deutlich höhere zeitliche Auflösung (im Regelfall 30 Sekunden) und beinhalten Uhrkorrekturen für alle Satelliten. In Abhängigkeit der Satellitenuhr und ihrer Langzeitstabilität ist die zeitliche Auflösung von Uhrkorrekturen in einem Abstand von 15 Minuten, wie bei Final Orbits, zu groß und ein, durch das Abdriften der Satellitenuhr hervorgerufener Fehler, erheblich. Für die Interpolation von Satellitenpositionen mit mm-Genauigkeit sind Positionswerte im Intervall von 15 Minuten meist ausreichend.

Für höchste Genauigkeitsansprüche werden sowohl **Final Orbits** als auch **Final Clocks**-Informationen verwendet.

Der Vollständigkeit halber sei hier erwähnt, dass der IGS auch sogenannte *Rapid Orbits (igr)* veröffentlicht. Diese erscheinen ebenfalls als kombinierte Satellitenpositions- und Uhrkorrekturdaten in einem Intervall von 15 Minuten. Im Vergleich zu den final Produkten weisen sie eine leicht verminderte Genauigkeit auf und auch die Konsistenz der Datensätze ist nicht im gleichen Ausmaß gegeben. Die zeitliche Verzögerung ihrer Bereitstellung ist allerdings deutlich geringer, so dass igr-Orbits bereits einen Tag nach den Beobachtungen zur Verfügung stehen.

3.1.2 Ultrarapid Orbits

Als weiteres Orbit- und Uhrkorrekturen-Produkt veröffentlicht der IGS die sogenannten **Ultra Rapid Orbits (igu)**. Diese werden nur auf Grund von Daten aus einem Subset von Beobachtungsstationen berechnet und beinhalten ebenfalls Satellitenpositionen und Uhrkorrekturen in einem zeitlichen Intervall von 15 Minuten. Im Gegensatz zu den anderen IGS-Orbitprodukten werden hier die Daten von 48 Stunden (also Beobachtungstag plus nächster Tag) pro Format für Orbitdaten (sp3)-file geliefert.

Die **igu-Orbits** werden viermal täglich berechnet und bereitgestellt und weisen eine nur sehr geringe zeitliche Verzögerung (rund 3 Stunden, in Abhängigkeit des gewünschten Beobachtungszeitpunktes) auf. Hierfür werden die Satellitenpositionen und Uhrkorrekturen der igu-Orbits zum Teil aus Beobachtungen abgeleitet und zum Teil mit prädizierten Werten ergänzt. Das Verhältnis zwischen prädizierten und beobachteten Daten hängt vom jeweiligen igu-file ab:

- *igu-00*: Bereitstellung der Daten um 3 Uhr. Werte auf Grund von Beobachtungen des Vortages (bis 0 Uhr des Beobachtungstages) prädiziert.
- *igu-06*: Bereitstellung um 9 Uhr. Beobachtungen bis 6 Uhr/ Prädiktion ab 6 Uhr
- *igu-12*: Bereitstellung um 15 Uhr; Beobachtungen bis / Prädiktion ab 12 Uhr
- *igu-18*: Bereitstellung um 21 Uhr; Beobachtungen bis / Prädiktion ab 18 Uhr

Die Genauigkeit der Ultra Rapid Orbits (igu) werden vom IGS mit *3 bis 5 cm* angegeben - je nach Menge der prädizierten Daten im verwendeten Produkt. Der RMSE der Uhrkorrekturen wird mit *150 bis 300 ps* angegeben.

Durch ihre schnelle Verfügbarkeit und den prädizierten Werten können Ultra Rapid Orbits (igu) für (quasi-) Echtzeitanwendungen verwendet werden. Die Genauigkeit der berechneten Produkte und damit auch das Ergebnis der Echtzeitanwendungen liegt deutlich unter den Ergebnissen von Post-Processing-Anwendungen mit Final Ephemeriden.

Weiters sei hier noch angemerkt, dass der IGS eine Vielzahl weiterer Produkte zur Verfügung stellt. Zu diesen zählen unter anderem *Erdorientierungsparameter, Koordinaten der*

IGS-Trackingstationen oder auch Ionosphärenmodelle.

Auch *Broadcast-Ephemeriden* in Form von oskulierenden Kepler-Elementen werden vom IGS täglich bereitgestellt. Die aus diesen Elementen berechneten Satellitenpositionen beziehen sich im Gegensatz zu den meisten anderen IGS-Ephemeriden auf APC.

Die Genauigkeiten und Verfügbarkeiten der einzelnen IGS-Bahnlösungen werden nochmals in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

| IGS-Ephemeriden | Latenz | Genauigkeiten |
|-----------------------------|-------------|---------------|
| Broadcast | – | 100cm / 500ps |
| Ultra-Rapid (observed half) | 3-9 Stunden | 3cm / 150ps |
| Rapid Orbits | 1 Tag | 2.5cm / 75ps |
| Final Orbits | 12-18 Tage | 2.5cm / 75ps |

Tab. 3.1: Genauigkeit und Latenz der IGS Bahn- und Uhrparameter

3.2 IGS - Echtzeitkorrekturen

Wie in Kapitel 3.1 erläutert wurde, nimmt die Genauigkeit der verfügbaren Ephemeriden erst mit längerem zeitlichem Abstand zum Beobachtungszeitpunkt (spätere Verfügbarkeit) zu. Für viele **Echtzeitanwendungen** und auf dem **PPP-Verfahren** aufbauenden Applikationen ist die *rasche Verfügbarkeit von möglichst genauen Bahn- und Uhrkorrekturdaten von essentieller Bedeutung.*

Um diesen Echtzeit-Anwendungsgebieten bessere Orbit- und vor allem Uhrdaten schneller zur Verfügung zu stellen wurde vom IGS ein sogenannter *Real Time Service (RTS)* installiert. Hierbei werden, im Gegensatz zu den bisher erläuterten Ephemeriden, keine Satellitenpositionen und Uhrkorrekturen im sp3-Format veröffentlicht. Vielmehr werden **Korrekturen** (in *State in Space Representation (SSR)-Darstellung*) an eine aus Broadcast Ephemeriden berechnete Satellitenposition bzw. Uhrenkorrektur bereitgestellt. Da diese Korrekturen mit einer sehr geringen Verzögerung und hoher zeitlicher Auflösung (in Abhängigkeit des jeweiligen Datenstroms einige Minuten bzw. 5 bis 60 Sekunden) bereitgestellt werden, wird bei diesem Dienst von **Real Time Korrekturen (RT-Corr.)** gesprochen.

Im Folgenden wird auf die *Erstellung, Verbreitung und Verfügbarkeit* der RT-Corr. eingegangen. Es werden die Unterschiede zwischen den verschiedenen *Korrekturdaten-Strömen* erläutert und mögliche *Anwendungsgebiete* aufgezeigt. Die Inhalte nehmen größtenteils Bezug auf (Hadas & Bosy [2015]), (Grinter & Roberts [2013]) & (Caissy, et al. [2012]).

3.2.1 Erstellung und Verbreitung

Die Prozessierung der RT-Corr. erfolgt in ähnlichen Arbeitsabläufen, wie die Erstellung der präzisen Ephemeriden des IGS.

Die permanent zu allen Satelliten aufgezeichneten Daten der global verteilten Trackingstationen werden über (regionale und globale) *Datenzentren* an sogenannte *Real Time Analysis Center (RTAC)* weitergeleitet. Hier werden die Beobachtungsdaten prozessiert und Lösungen - im Fall von RT-Corr. Korrekturen an die Broadcast Ephemeriden - gerechnet.

Die Einzellösungen der verschiedenen Analysezentren werden in weiterer Folge an *Combination - Centers* gesendet, welche mehrere Einzellösungen vergleichen und kombinieren. Dadurch wird eine bessere Konsistenz des entstehenden Produktes erreicht. Abbildung 3.2 zeigt den Ablauf der Prozessierung von IGS-RT-Korrekturen.

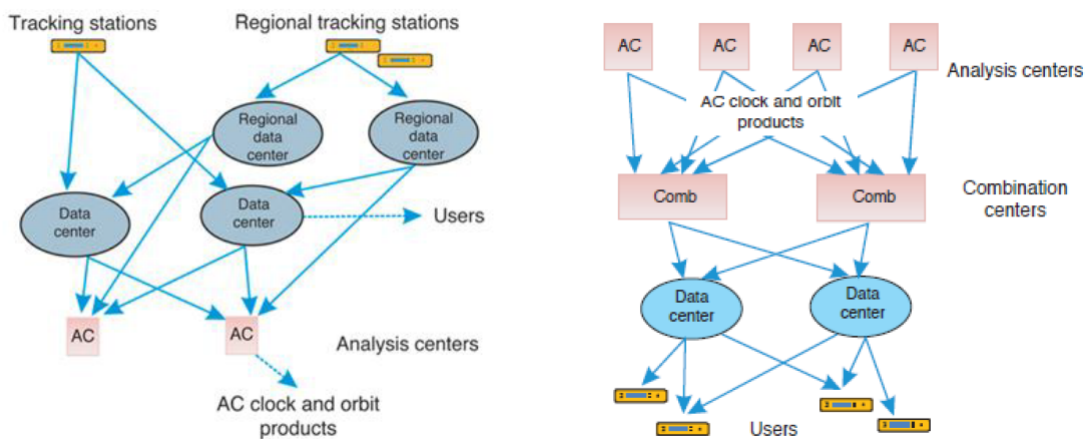


Abb. 3.2: Prozessierungsablauf der IGS-RTS (Caissy, et al. [2012])

Konkret werden im *Real Time Analysis Combination Center* die Lösungen von mindestens zwei Analysezentren gesammelt und prozessiert. Die eingehende Daten werden auf Ausreißer gefiltert und durch Entfernen eines bekannten, lösungs-spezifischen Satellitenuhroffsets auf eine gemeinsame Referenzlösung gebracht. Anschließend werden Uhرداریe-

renzen zwischen Lösungspaaren gebildet und kombinierte **Uhrkorrekturen** gerechnet.

Bei den Satellitenorbits werden die Lösungen der einzelnen Analysezentren ebenfalls Ausreißertests unterzogen. Anschließend werden über Mittelwerte der Einzellösungen **Satellitenorbits** gerechnet. Als Referenzpunkt der Korrekturen werden sowohl Lösungen bezogen auf COM als auch auf APC berechnet.

In Abbildung 3.3 zeigt Caissy, et al. [2012] die Abweichungen der Uhrenprodukte der einzelnen Analysezentren von den IGS Rapid Products. Die Werte wurden im Zuge des *Real Time pilot projects* berechnet.

| Analysis center | Feb. 6 2009 | | June 8 2010 | | June 15 2011 | |
|-----------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|
| | Clock RMS (ns) | Clock sigma (ns) | Clock RMS (ns) | Clock sigma (ns) | Clock RMS (ns) | Clock sigma (ns) |
| Comb | 0.22 | 0.22 | 0.16 | 0.10 | 0.14 | 0.07 |
| RTComb | - | - | 0.15 | 0.11 | 0.18 | 0.08 |
| BKG/CTU | 6.72 | 2.97 | 0.20 | 0.12 | 0.30 | 0.07 |
| CNES | - | - | - | - | 0.30 | 0.03 |
| DLR | 0.38 | 0.10 | 0.20 | 0.12 | 0.25 | 0.12 |
| ESOC | 0.42 | 0.38 | 0.21 | 0.12 | 0.17 | 0.12 |
| GFZ | - | - | - | - | 0.33 | 0.06 |
| NRCan | 0.67 | 0.62 | 0.24 | 0.10 | 0.23 | 0.07 |
| GMV | 1.67 | 1.66 | 0.28 | 0.14 | 0.34 | 0.10 |
| TUW | - | - | 0.70 | 0.53 | 0.73 | 0.53 |
| WUH | - | - | - | - | 0.57 | 0.07 |

Abb. 3.3: RT-Lösungen versus IGS Rapid products (Caissy, et al. [2012])

Nach Vergleich und Kombination im *Analysis Combination Center* werden die endgültigen Echtzeitkorrekturen wieder über Datenzentren an den User weitergeleitet. Dies geschieht im **RTCM-SSR-Format**.

Dieses Format wurde entwickelt um **Real Time Precise Point Positioning (RTPPP)** zu ermöglichen und ist seit Mai 2011 als offizieller RTCM-Standard (RTCM 3.1) anerkannt.

Die Bereitstellung und Verteilung der Korrekturdaten in Echtzeit an den Nutzer erfolgt mittels **Network Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP)**.

Das NTRIP-System, bestehend aus *NTRIP-Source*, *NTRIP-Server*, *NTRIP-Caster* und *NTRIP-Client*, wurde vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG, Frankfurt)

entwickelt und ermöglicht die Übermittlung unterschiedlicher Daten (*RT-Korrekturen, Beobachtungsdaten, BroadcastOrbits, etc.*) an mehrere tausend Nutzer über das Internet. Durch die Entwicklungen im Mobilfunk-Sektor und der Realisierung von überall verfügbarem Internetzugang, ist dies eine Alternative zu herkömmlichen Übertragungsarten (Datenfunk, etc.) geworden (Weber & Opitz [2005]).

Abbildung 3.4 zeigt einen schematischen Aufbau der NTRIP-Hauptkomponenten.

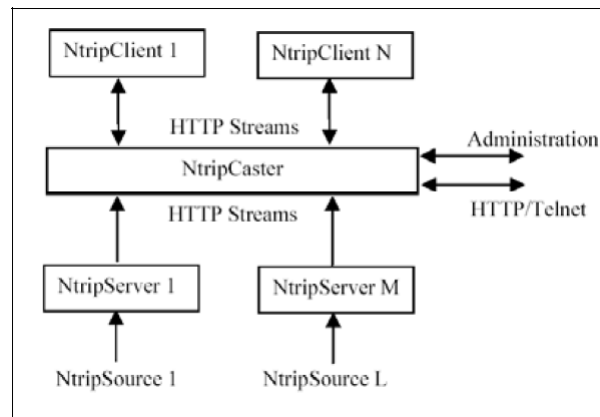


Abb. 3.4: NTRIP-Systemaufbau (Weber & Opitz [2005])

3.2.2 Korrekturdatenströme

Wie bereits erwähnt, stellt der IGS-RTS Lösungen in Form unterschiedlicher Korrekturdaten zur Verfügung. Diese werden als **Korrekturdatenströme** bezeichnet und weisen Unterschiede im Referenzpunkt der Lösung und in der Kombination bei der Erstellung der Lösung auf. Die (momentan angebotenen) unterschiedlichen Korrekturdatenströme haben die Bezeichnung:

- IGC01
- IGS01
- IGS02
- IGS03

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Datenströme kurz vorgestellt. Hauptaugenmerk wird hierbei auf die in dieser Arbeit verwendeten Korrekturdatenströme gelegt.

IGC01/IGS01

IGC01 und **IGS01** unterscheiden sich nur im Referenzpunkt der Lösungen (IGC01 = COM; IGS01 = APC) und werden deshalb hier zusammengefasst.

Bei diesen Korrekturdatenströmen handelt es sich um kombinierte Lösungen aus **Einzelepochen der verschiedenen Analysezentren** und werden nur für GPS-Satelliten bereitgestellt. Sie werden in Form von kombinierten Orbit und Uhrkorrekturen zusammengefasst und in einem zeitlichen Intervall von 5 Sekunden erstellt. Sowohl IGC01 als auch IGS01 Daten sind folgendermaßen aufgebaut (BKG-Manuel [2014]):

- | | |
|--------------------------------|--|
| (1) RTCM Message Type | (7) Uhrkorrekturpolynom-Koeffizient c_0 |
| (2) Update Interval Indicator | (8)-(10) Positionskorrektur <i>radial, along-track und cross-track</i> |
| (3) GPS Week | (11) Uhrkorrekturpolynom-Koeffizient c_1 |
| (4) Seconds of GPS-Week | (12)-(14) Geschwindigkeitskorrektur <i>radial, along-track und cross-track</i> |
| (5) GNSS- und Satellitennummer | |
| (6) IODE | (15) Uhrkorrekturpolynom-Koeffizient c_2 |

Im *RTCM Message Type (1)* wird festgelegt, um welche Art von Korrekturen es sich bei den kommenden Daten handelt. Im Fall von IGC01/IGS01 indiziert die Ziffer *1060* eine kombinierte Angabe für Positions-, Geschwindigkeits- und Uhrkorrekturen.

Der *SSR Message Update Interval Indicator (2)* gibt an, in welchem zeitlichen Intervall die kommenden Korrekturdaten sind. Indikator 2 signalisiert beispielsweise ein Intervall von 5 Sekunden, Indikator 6 eines von 60 Sekunden.

(3) und (4) kennzeichnen die Epoche, auf welche sich die Korrekturen beziehen.

Unter *(5)* wird der Satellit auf welchen sich die Korrekturen beziehen gekennzeichnet. Der GNSS-Indikator gibt an, welchem GNSS der Satellit angehört. Die Nummer als *Satellite Vehicle Pseudo Random Number* definiert den einzelnen Satelliten.

Die *Issue of Data Ephemerides (IODE) (6)* gibt an auf welchen Satz an Broadcast Ephemeriden (also oskulierenden Kepler-Elementen) sich die Korrekturen beziehen. Dies ist von essentieller Bedeutung: werden die Korrekturen an Satellitenpositionen, welche nicht aus den spezifizierten (IODE) Kepler-Elementen berechnet wurden, angebracht, ist das Ergebnis stark verfälscht, bzw. bedeutungslos.

Unter *(7) bis (15)* sind nun die eigentlichen Korrekturen für Position, Geschwindigkeit und Uhrkorrektur des Satelliten gespeichert.

Zur besseren Veranschaulichung der erklärten Inhalte zeigt Abbildung 3.5 einen Ausschnitt des IGC01 Korrekturfiles vom 14. April 2015.

The screenshot shows a text-based data file with columns for satellite ID, time, station ID, and various correction parameters. Red circles highlight the following elements:

- Line 1: The value `-0.230` in the 5th column.
- Line 2: The value `c0` in the 4th column.
- Line 3: The value `0.058` in the 5th column.
- Line 4: The value `-0.612` in the 5th column.
- Line 5: The value `-0.758` in the 5th column.
- Line 6: The value `-1.035` in the 6th column.
- Line 7: The value `1.551` in the 7th column.
- Line 8: The value `0.00000` in the 8th column.
- Line 9: The value `0.00000` in the 9th column.
- Line 10: The value `0.00000` in the 10th column.
- Line 11: The value `0.00000` in the 11th column.
- Line 12: The value `0.00000` in the 12th column.
- Line 13: The value `0.00000` in the 13th column.
- Line 14: The value `0.00000` in the 14th column.
- Line 15: The value `0.00000` in the 15th column.
- Line 16: The value `0.00000` in the 16th column.
- Line 17: The value `0.00000` in the 17th column.
- Line 18: The value `0.00000` in the 18th column.
- Line 19: The value `0.00000` in the 19th column.
- Line 20: The value `0.00000` in the 20th column.
- Line 21: The value `0.00000` in the 21st column.
- Line 22: The value `0.00000` in the 22nd column.
- Line 23: The value `0.00000` in the 23rd column.
- Line 24: The value `0.00000` in the 24th column.
- Line 25: The value `0.00000` in the 25th column.
- Line 26: The value `0.00000` in the 26th column.
- Line 27: The value `0.00000` in the 27th column.
- Line 28: The value `0.00000` in the 28th column.
- Line 29: The value `0.00000` in the 29th column.
- Line 30: The value `0.00000` in the 30th column.
- Line 31: The value `0.00000` in the 31st column.
- Line 32: The value `0.00000` in the 32nd column.
- Line 33: The value `0.00000` in the 33rd column.
- Line 34: The value `0.00000` in the 34th column.
- Line 35: The value `0.00000` in the 35th column.
- Line 36: The value `0.00000` in the 36th column.
- Line 37: The value `0.00000` in the 37th column.
- Line 38: The value `0.00000` in the 38th column.
- Line 39: The value `0.00000` in the 39th column.
- Line 40: The value `0.00000` in the 40th column.
- Line 41: The value `0.00000` in the 41st column.
- Line 42: The value `0.00000` in the 42nd column.
- Line 43: The value `0.00000` in the 43rd column.
- Line 44: The value `0.00000` in the 44th column.
- Line 45: The value `0.00000` in the 45th column.
- Line 46: The value `0.00000` in the 46th column.
- Line 47: The value `0.00000` in the 47th column.
- Line 48: The value `0.00000` in the 48th column.
- Line 49: The value `0.00000` in the 49th column.
- Line 50: The value `0.00000` in the 50th column.
- Line 51: The value `0.00000` in the 51st column.
- Line 52: The value `0.00000` in the 52nd column.
- Line 53: The value `0.00000` in the 53rd column.
- Line 54: The value `0.00000` in the 54th column.
- Line 55: The value `0.00000` in the 55th column.
- Line 56: The value `0.00000` in the 56th column.
- Line 57: The value `0.00000` in the 57th column.
- Line 58: The value `0.00000` in the 58th column.
- Line 59: The value `0.00000` in the 59th column.
- Line 60: The value `0.00000` in the 60th column.
- Line 61: The value `0.00000` in the 61st column.
- Line 62: The value `0.00000` in the 62nd column.
- Line 63: The value `0.00000` in the 63rd column.
- Line 64: The value `0.00000` in the 64th column.
- Line 65: The value `0.00000` in the 65th column.
- Line 66: The value `0.00000` in the 66th column.
- Line 67: The value `0.00000` in the 67th column.
- Line 68: The value `0.00000` in the 68th column.
- Line 69: The value `0.00000` in the 69th column.
- Line 70: The value `0.00000` in the 70th column.
- Line 71: The value `0.00000` in the 71st column.
- Line 72: The value `0.00000` in the 72nd column.
- Line 73: The value `0.00000` in the 73rd column.
- Line 74: The value `0.00000` in the 74th column.
- Line 75: The value `0.00000` in the 75th column.
- Line 76: The value `0.00000` in the 76th column.
- Line 77: The value `0.00000` in the 77th column.
- Line 78: The value `0.00000` in the 78th column.
- Line 79: The value `0.00000` in the 79th column.
- Line 80: The value `0.00000` in the 80th column.
- Line 81: The value `0.00000` in the 81st column.
- Line 82: The value `0.00000` in the 82nd column.
- Line 83: The value `0.00000` in the 83rd column.
- Line 84: The value `0.00000` in the 84th column.
- Line 85: The value `0.00000` in the 85th column.
- Line 86: The value `0.00000` in the 86th column.
- Line 87: The value `0.00000` in the 87th column.
- Line 88: The value `0.00000` in the 88th column.
- Line 89: The value `0.00000` in the 89th column.
- Line 90: The value `0.00000` in the 90th column.
- Line 91: The value `0.00000` in the 91st column.
- Line 92: The value `0.00000` in the 92nd column.
- Line 93: The value `0.00000` in the 93rd column.
- Line 94: The value `0.00000` in the 94th column.
- Line 95: The value `0.00000` in the 95th column.
- Line 96: The value `0.00000` in the 96th column.
- Line 97: The value `0.00000` in the 97th column.
- Line 98: The value `0.00000` in the 98th column.
- Line 99: The value `0.00000` in the 99th column.
- Line 100: The value `0.00000` in the 100th column.

Abb. 3.5: Ausschnitt des IGC01-files am 14.April 2015

IGS02

Der **IGS02**-Korrekturdatenstrom verwendet das Antennenphasenzentrum des Satelliten als Bezugspunkt der Korrekturen (APC).

Im Gegensatz zu den IGC01/IGS01 Korrekturdaten werden diese nicht rein aus dem Vergleich und der Kombination von Einzellösungen verschiedener Analysezentren generiert. Es wird eine zeitlich konsistentere Lösung auf Basis einer **Auswertung mehrerer zeitlich unterschiedlicher Epochenlösungen** erstellt. Auf Grundlage eines **Kalman-Filter-Algorithmus** werden Korrekturdaten aus *verschiedenen Einzellösungen mehrerer Analysezentren zu mehreren Epochen, generiert*.

In diesem Algorithmus werden die geschätzten Uhrkorrekturen der einzelnen Analysezentren als Pseudo-Beobachtungen in den Ausgleichungsprozess eingeführt. Jede Beobachtung wird als lineare Funktion der drei geschätzten Parameter (Analysezentrumspezifischer Offset, Satelliten-spezifischer Offset und tatsächliche Satellitenuhrkorrektur) modelliert. Durch Berechnung der größten Differenz zwischen Analysezentrumspezifischer Satellitenposition und mittlerer Satellitenposition wird mittels rekursiver Methoden eine Ausreißerdetektion durchgeführt.

Ungleich zu den IGC01/IGS01 Korrekturdaten, die vom *European Space Operation Center (ESOC)* erstellt werden, werden die kalman-gefilterten Produkte vom Analysezentrum des *Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG)* erstellt.

Die IGS02-Korrekturdaten werden im gleichen RTCM-SSR Format, wie die IGS01- Lösungen bereitgestellt. Diesmal werden die Korrekturen allerdings nicht kombiniert, sondern separat für Positions-/Geschwindigkeitskorrekturen und Uhrkorrekturen gespeichert (*Message Type 1057 bzw. 1058*).

Die zeitliche Auflösung der Uhrkorrekturen beträgt ebenfalls 5 Sekunden. Durch den geänderten Ablauf und Rechenprozess bei der Erstellung der kombinierten Werte werden die Positions- und Geschwindigkeitskorrekturen in einem zeitlichen Intervall von 60 Sekunden bereitgestellt.

IGS03

Zur Vervollständigung der gegebenen Informationen zu den unterschiedlichen Korrekturdatenströmen sei hier auch noch ein weiterer erwähnt. Die **IGS03**-Korrekturen ähneln den IGS02, beinhalten jedoch kalman-gefilterte Korrekturdaten sowohl für GPS-, als auch für Glonass-Satelliten. Der IGC03-Korrekturdatenstrom wird auch wie der IGS02 vom BKG erstellt, es tragen jedoch teilweise andere Analysezentren ihre Lösungen bei, wodurch sich die Korrekturdaten für GPS-Satelliten aus IGS02 und IGS03 trotzdem leicht *unterscheiden* (vgl. Kapitel 4 & Kapitel 5).

Dieser (*noch experimentelle*) Korrekturdatenstrom ist vor allem in Hinblick auf Multi-GNSS-Verfahren von Interesse.

Für mehr Informationen zum IGS03-Datenstrom sei auf die zahlreiche Literatur und die offiziellen Ausführungen des IGS verwiesen.

Für die in dieser Arbeit analysierten Auswirkungen von RT-Bahnen auf das Schätzen von Troposphärenparametern wurden ausschließlich GPS-Korrekturdatenströme verwendet, weshalb der Fokus in den folgenden Untersuchungen auf den Korrekturdatenströmen IGC01, IGS01 und IGS02 liegen wird.

3.2.3 Anwendungsmöglichkeiten

Wie bereits mehrfach erwähnt, bilden **Echtzeitanwendungen** von GNSS-Applikationen, nicht nur für die Geodäsie, ein breites Nutzungsgebiet. Viele wissenschaftliche und auch wirtschaftliche Interessen stehen hinter Positionsbestimmungen in Echtzeit und mit höchster Genauigkeit.

Neben den bereits weit verbreiteten und vielfach angewendeten *differentiellen Verfahren* der relativen Positionierung bildet das *Precise Point Positioning (PPP)* eine bedeutende Alternative. Dieses Verfahren ermöglicht weltweite eine absolute Einzelpunktbestimmung höchster Genauigkeit und kann auch ohne das Vorhandensein eines engmaschigen lokalen Netzes aus Referenzstationen durchgeführt werden.

Hierfür sind vor allem **präzise Satellitenorbitinformationen** von essentieller Bedeutung. Für *post-processing Anwendungen* werden diese in bester Genauigkeit geliefert. Für Echtzeitanwendungen stellt die späte Verfügbarkeit (bzw. schlechtere Genauigkeit bei UltraRapid Produkten) eine deutliche Einschränkung dar.

Die Verbreitung von präzisen Korrekturen an die Broadcast-Satellitenpositionen ermöglicht eine bessere Echtzeit-Stabilität des PPP-Verfahrens. Der IGS-RTS stellt eine bedeutende Unterstützung bereits *bestehender Echtzeitanwendungen* dar und eröffnet gleichzeitig eine *Vielzahl an Möglichkeiten neuer (Echtzeit)-Anwendungsgebiete*.

3.3 IGS - Troposphärenparameter

Wie bereits in Abschnitt 2.3.3 erklärt, können aus den Beobachtungsdaten eines GNSS-Referenznetzes unter anderem auch die Parameter der troposphärischen Zenitlaufzeitverzögerungen an den einzelnen Stationen abgeleitet werden. Da diese kontinuierlichen und räumlich gut verteilten Messungen des Wasserdampfgehalts der Atmosphäre einen wichtigen Parameter in der numerischen Wettervorhersage bilden (Klaffenböck [2007]) wurde vom IGS eine eigene *IGS - Troposphere Working Group* installiert. Aufgabe dieser Arbeitsgruppe ist die Koordination, Berechnung und Verbreitung der aus den IGS-GNSS-Beobachtungen ableitbaren Troposphärenparametern.

Der IGS stellt also neben den Ephemeriden-Daten auch bereits abgeleitete Parameter der Troposphäre (im zeitlichen Intervall von 5 Minuten) auf einer wöchentlichen Basis über das Internet zur Verfügung.

Auf Grund der Vielzahl an Eingangsdaten und der guten zeitlichen und räumlichen Auflösung der Daten kann ein Produkt hoher Genauigkeit erstellt werden.

Das IGS-Troposphärenprodukt wird im Folgenden in Kapitel 5.2.2 zur Validierung der *getätigten Parameterschätzungen in NAPEOS* verwendet.

4 Untersuchung der Echtzeit- Korrekturdatenströme

Um anhand der verschiedenen Echtzeit-Korrekturdatenströme Troposphärenparameter schätzen zu können, müssen zuerst Satellitenpositionen und Uhroffsets aus Broadcast Ephemeriden berechnet werden. Anschließend müssen die entsprechenden Korrekturen aus den *IGS-Echtzeitdaten* angebracht werden und die so entstandenen Uhr- und Bahninformationen im sp3-Format gespeichert werden.

In diesem Kapitel wird die Aufbereitung und Erstellung der Ephemeriden für die Troposphärenschätzung beschrieben. Es wird ein Überblick über die verwendeten **Eingangsdaten** gegeben und die **Berechnung von Orbit- und Uhrkorrekturen** aus Broadcast Ephemeriden erläutert. Anschließend wird beschrieben, wie die so berechneten Satellitenpositionen und Uhroffsets mit **IGS-Echtzeitinformationen** korrigiert werden.

Weiters wird das **Schätzen von Troposphärenparametern** und der Umgang mit den Daten im Software-Paket *NAPEOS* beschrieben.

4.1 Bahn- und Stationsdaten

Der Ablauf zur Berechnung korrigierter Satelliteninformationen bzw. zum Schätzen von Troposphärenparametern ist in Abbildung 4.1 zusammengefasst. Für die Untersuchungen in dieser Arbeit wurde der *Zeitraum vom 14. bis zum 20. April 2015* festgelegt. Alle im Folgenden beschriebenen Daten werden auf diesen Zeitraum bezogen, berechnet und ausgewertet.

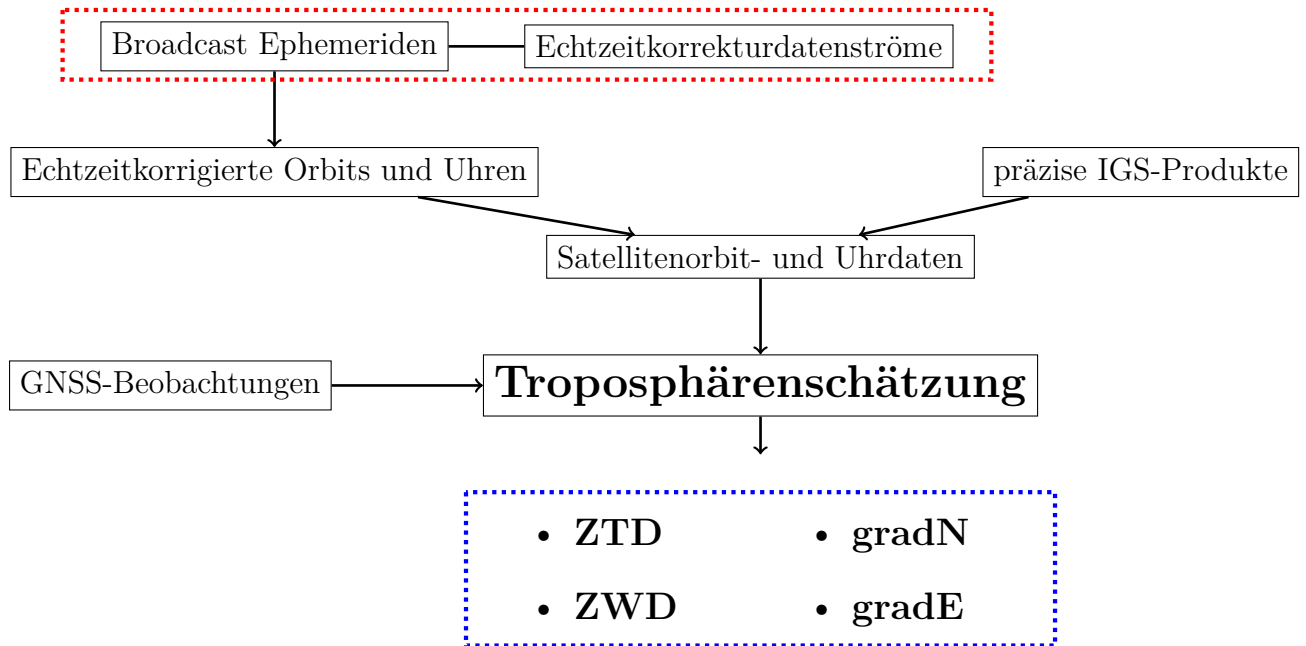


Abb. 4.1: Prozessablauf der Troposphärenschätzung; verschiedene Eingangs- und Ausgangsgrößen

Daten für die Berechnung der korrigierten Orbit- und Uhrdaten

Die Berechnung der Satellitenposition erfolgt auf Grundlage von *Broadcast Ephemeriden*, welche mit dem *NTRIP-Client* der TU Wien bezogen wurden. Diese beinhalten die oskulierenden Kepler-Elemente der Satelliten in einem zeitlichen Intervall von zwei Stunden und wurden pro Tag in einer separaten ASCII-Datei gespeichert. Abbildung 4.2 zeigt einen Ausschnitt der Broadcast Ephemeriden vom 14. April.

```

SatNr
Datum Bezugszeit = ToC c0 c1 c2
2 15 4 14 0 0 0.0 5.596047267318e-04 2.387423592154e-12 0.000000000000e+00
8.3000 IODE 0000e+01 -6.05937 Crs 0000e+01 4.93341 Delta n 1e-09 4.46637 MO 1674e-01
-3.0249 Cuc 22351e-06 1.461101 e 7235e-02 1.08610 Cus 517e-05 5.1538 sqrt(a) 267e+03
1.7280 ToE 0000e+05 -1.76951 Cic 1769e-07 -1.2112 OMEGA 79e+00 2.47731 Cis 18477e-07
9.40458 Io 75438e-01 1.62500 Crc 0000e+02 -2.2841 omega 10e+00 -8.435 OMEGA d 3e-09
-2.92869 Id 0408e-10 0.000000000000e+00 1.840 GPS Week 1e+03 0.000000000000e+00
2.000000000000e+00 0.000000000000e+00 -2.048909664154e-08 8.300000000000e+01
9.999000000000e+08 0.000000000000e+00
  
```

Abb. 4.2: Ausschnitt der für die Berechnung verwendeten Broadcast Ephemeriden

Die für die Berechnung der Satellitenpositionen benötigten Informationen werden mittels einer, eigens entwickelten, *MatLab-Routine* aus den ASCII-Dateien ausgelesen. Tabelle 4.1 listet nochmals die für die Berechnungen relevanten Informationen aus den Broadcast

| Parameter | Beschreibung |
|------------------------------------|--|
| c_0, c_1, c_2 | Koeffizienten für das Uhrkorrekturpolynom |
| M_0 | Mittlere Anomalie |
| $\text{sqr}(a) \equiv \sqrt{a}$ | Wurzel der großen Halbachse |
| I_0 | Inklination der Bahnebene |
| $OMEGA \equiv \Omega$ | Rektaszension des aufsteigenden Knotens |
| $\omega \equiv \omega$ | Argument des Perigäums |
| <i>GPS Week</i> | GPS Woche |
| <i>IODE</i> | Issue of Data Ephemerides |
| <i>ToE</i> | Time of Ephemerides |
| Crs, Crc | Amplituden zur Korrektur des Radius |
| Cus, Cuc | Amplituden zur Korrektur des Argumentes der Breite |
| Cis, Cic | Amplituden zur Korrektur der Inklination |
| $dn \equiv \Delta n$ | Differenz der mittleren Bewegung |
| $Id \equiv \dot{i}$ | Änderungsrate der Inklination |
| $OMEGA\dot{d} \equiv \dot{\Omega}$ | Änderungsrate der Rektaszension |

Tab. 4.1: Verwendete Parameter aus Broadcast Ephemeriden

Ephemeriden auf.

Die Informationen für die Korrektur der berechneten Satellitenpositionen und Uhroffsets wird ebenfalls mit einer *MatLab-Routine* aus den in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Korrekturdaten-files ausgelesen. In Tabelle 4.2 sind die verwendeten Parameter aus Echtzeitkorrekturdaten aufgelistet.

| Parameter | Beschreibung |
|-----------------------------------|--|
| c_0, c_1, c_2 | Polynomkoeffizienten für das Uhrkorrekturpolynom |
| $radial, \quad along,$ $cross$ | Positionskorrekturen im Satellitenkoordinatensystem |
| $v-radial, v-along,$ $v-cross$ | Geschwindigkeitskorrekturen im Satellitenkoordinatensystem |

Tab. 4.2: Verwendete Parameter aus Echtzeitkorrekturdaten

Daten für die Schätzung von Troposphärenparametern

Zur Schätzung der troposphärischen Signalverzögerung werden neben den **Satellitenbahnen und Uhrkorrekturen** die **Beobachtungsdaten** von GNSS-Stationen benötigt. Die Satelliteninformationen werden entweder aus präzisen IGS-Ephemeriden (*igs oder igu*), wie im Kapitel 3.1 erläutert, bezogen oder durch Verwendung von mit Echtzeitkorrekturen verbesserten Satellitenpositionen und Uhroffsets aus Broadcast Ephemeriden.

Die Beobachtungsdaten aller IGS-Stationen können ebenfalls über das Internet bezogen werden. Sie liegen als sogenannte Receiver Independent Exchange Format (RINEX)-Daten vor und enthalten neben den Beobachtungsdaten (Code- und Phasenmessungen) auch zusätzliche Informationen (wie verwendeter Antennentyp, Empfängertyp, Antennenoffset-Informationen). Für die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurde ein *Netz an repräsentativen Stationen* festgelegt.

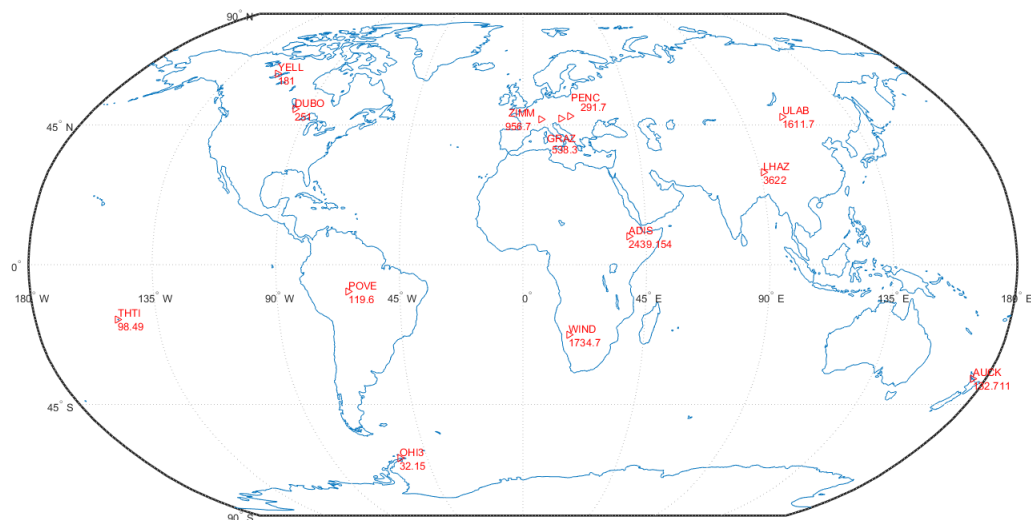


Abb. 4.3: Ausgewähltes Netz an IGS-Stationen für die Schätzung troposphärischer Laufzeitverzögerungen

Bei der Auswahl der Stationen für die Untersuchung wurde auf eine *gute und möglichst globale Verteilung* geachtet. Die ausgewählten GNSS-Stationen liegen in **unterschiedlichen Höhen** (zwischen 30m und 3000m) und auf unterschiedlichen Längen- und vor allem **Breitengraden**. Dies geschieht vor allem in Hinblick auf den von der Stationshöhe und der Breite abhängigen unterschiedlichen troposphärischen Feuchtegehalt.

4.2 Berechnung von korrigierten Orbits und Uhren

Für die Berechnung präziser Satelliteninformationen müssen zunächst **Satellitenpositionen und Uhroffsets** aus den *oskulierenden Kepler-Elementen* (wie sie aus den Broadcast Ephemeriden entnommen werden können; vgl. Tabelle 4.1) berechnet werden. Anschließend werden die berechneten Positionen und Uhroffsets mit den aus **IGS- Echtzeitkorrekturdaten** ausgelesenen Werten (vgl. Tabelle 4.2) korrigiert.

Die so entstehenden Daten bilden somit eine in Echtzeit verfügbare Alternative zu den präzisen IGS- Ephemeriden. Um sie in einem automatischen Datenfluss für Berechnungsschritte in weiteren Programmen verfügbar zu machen, müssen die korrigierten Positionen und Uhroffsets schließlich in einem standardisierten Format gespeichert werden. Im Fall von präzisen Ephemeriden ist dies das **sp3-Format**.

4.2.1 Positions-/Uhroffsetberechnung aus Broadcast Ephemeriden

Die im Folgenden beschriebenen Berechnungswege und Informationen stammen größtenteils aus (GPS/SPS-PS [1995]) & (Subirana, et al. [2013]) bzw. aus (Navipedia - Webseite [2016]).

Wie bereits in Kapitel 2.1.2 erläutert werden die oskulierenden Kepler-Elemente in einem zeitlichen Intervall von rund zwei Stunden zur Verfügung gestellt. Durch die auf den Satelliten einwirkenden Störbeschleunigungen kann die Bahn und die Position des Satelliten nur in einem Bereich von etwa vier Stunden durch oskulierende Kepler-Elemente beschrieben werden. Durch eine Extrapolation der Bahn und Position über den vordefinierten Geltungszeitraum der Elemente hinaus entstehen beträchtliche Abweichungen zu den tatsächlichen Satellitenpositionen. Auf Grund unterschiedlicher Uhrdrifts der einzelnen Satellitenuhren gelten diese Aussagen auch für die Berechnung des Uhroffsets aus oskulierenden Kepler-Elementen.

Im ersten Berechnungsschritt wird die *Zeitdifferenz* (t_k) zwischen dem *Berechnungszeitpunkt* (t) und der *Referenzepoche der Broadcast Ephemeriden* (t_{oe}) (in seconds of GPS week) bestimmt.

$$t_k = t - t_{oe} \quad (4.1)$$

Berechnung des Satellitenuhroffsets

Die Berechnung des Satellitenuhroffsets erfolgt über ein Polynom zweiten Grades, mit den aus den Korrekturdaten entnommenen Werten als Polynomkoeffizienten.

4.2 Berechnung von korrigierten Orbits und Uhren

$$\Delta t_s = c_0 + c_1 \cdot t_k + c_2 \cdot t_k^2 \quad (4.2)$$

Konsequenter Weise muss hier angemerkt werden, dass sich die Zeitdifferenz (t_k) für die Uhrenoffset-Berechnung aus der Differenz zwischen Berechnungszeitpunkt und *time of clock* (t_{oc}) der Broadcast Ephemeriden zusammensetzt. Für alle weiteren Berechnungen und Positionsbestimmungen bezieht sich t_k auf die in Formel 4.1 definierte Differenz.

Berechnung der Satellitenposition

Zu Beginn wird die Mittlere Anomalie für den Bezugszeitpunkt berechnet. Anschließend wird iterativ für die exzentrische Anomalie (M_k) ermittelt und schließlich die wahre Anomalie (v_k) errechnet (vgl. Formel (2.4) bis Formel (2.6) aus Kapitel 2.1.2).

$$M_k = M_0 + \left(\frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{a^3}} + \Delta n \right) t_k \quad (4.3)$$

$$E_k = M_k + e \sin E_k \quad (4.4)$$

mit M_k als Startwert der Iteration

$$v_k = \arctan \left(\frac{\sqrt{1 - e^2} \sin E_k}{\cos E_k - e} \right) \quad (4.5)$$

Das korrigierte Argument der Breite kann aus dem Argument des Perigäums (ω), der wahren Anomalie (v_k) und den Sinus- und Kosinuskomponenten der Korrektur der Breite (C_{us}, C_{uc}) berechnet werden:

$$u_k = \omega + v_k + C_{uc} \cos 2(\omega + v_k) + C_{us} \sin 2(\omega + v_k) \quad (4.6)$$

Aus der großen Halbachse (a), der numerischen Exzentrizität (e) und der exzentrischen Anomalie (M_k) kann der Bahnradius berechnet werden. Mit Hilfe der Faktoren (C_{rc}, C_{rs}) wird der korrigierte Bahnradius (r_k) ermittelt.

$$r_k = a(1 - e \cos E_k) + C_{rc} \cos 2(\omega + v_k) + C_{rs} \sin 2(\omega + v_k) \quad (4.7)$$

Aus den so berechneten Größen können nun die Komponenten des Positionsvektors des Satelliten in der Bahnebene berechnet werden.

$$\begin{aligned} X_{bahn} &= r_k \cdot \cos u_k \\ Y_{bahn} &= r_k \cdot \sin u_k \end{aligned} \quad (4.8)$$

Um die Koordinaten des Satelliten in einem erdfesten geozentrischen Koordinatensystem festlegen zu können müssen zunächst noch der korrigierte Inklinationwinkel und die korrigierte Rektaszension berechnet werden.

Der Inklinationwinkel der Satellitenbahn zum Berechnungszeitpunkt (t_k) kann über die inertielle Inklination (i_0) zur Referenzepeche (t_{oe}) und die Änderungsrate der Inklination (\dot{i}) berechnet werden. Der korrigierte Inklinationwinkel ergibt sich auch hier durch Anbringen der Korrekturen (C_{is}, C_{ic}).

$$i_k = i_0 + \dot{i}t_k + C_{ic} \cos 2(\omega + v_k) + C_{is} \sin 2(\omega + v_k) \quad (4.9)$$

Die vom inertialen in das erdfeste Koordinatensystem transformierte Rektaszension (Ω_k) kann aus der gegebenen Rektaszension zu Beginn der GPS Woche (Ω), dem Berechnungszeitpunkt (t_k) und der mittleren Erddrehrate (ω_E) berechnet werden.

$$\Omega_k = \Omega_0 + (\dot{\Omega} - \omega_E)t_k - \omega_E t_{oe} \quad (4.10)$$

Die Koordinaten der Satellitenposition können schließlich über Formel (4.11) berechnet werden.

$$\begin{aligned} X_k &= X_{bahn} \cdot \cos \Omega_k - Y_{bahn} \cdot \sin \Omega_k \cdot \cos i_k \\ Y_k &= X_{bahn} \cdot \sin \Omega_k + Y_{bahn} \cdot \cos \Omega_k \cdot \cos i_k \\ Z_k &= Y_{bahn} \cdot \sin i_k \end{aligned} \quad (4.11)$$

Durch diese Abfolge an Berechnungen wird die **Position des Antennenphasenzentrums** des Satelliten zum Berechnungszeitpunkt (t_k) in einem erdfesten geozentrischen Koordinatensystem festgelegt.

Berechnung der Geschwindigkeit

Der Vollständigkeit halber sei hier noch die Berechnung des Geschwindigkeitsvektors des Satelliten aus Broadcast Ephemeriden erklärt.

Beim Anbringen der Korrekturen aus Echtzeitdaten an die berechneten Satellitenpositionen (vgl. Kapitel 4.2.2) wird zusätzlich zu den Satellitenpositionen und Uhroffsets auch der Geschwindigkeitsvektor des Satelliten zum Berechnungszeitpunkt (t_k) benötigt.

Die Berechnung der Geschwindigkeit des Satelliten aus Broadcast Ephemeriden kann auf unterschiedliche Weisen erfolgen (wie sie beispielsweise bei (Zhang, et al., [2006]) beschrieben werden).

In dieser Arbeit wurde der Ansatz gewählt, den **Geschwindigkeitsvektor** des Satelliten aus der *Differenz zweier zeitnaher (t_k und $t_k + 10ns$) Satellitenpositionen* zu ermitteln.

4.2.2 Anbringen der IGS-Echtzeitkorrekturen

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Beziehungen zum Anbringen der Echtzeitkorrekturen an Positionen und Uhroffsets aus Broadcast Ephemeriden wurden (RTCM Standard 10403.2 [2013]) entnommen.

Über die *IODE*-Nummer werden den IGS- Echtzeitkorrekturdatenströmen pro Epoche und Satellit entsprechende Sätze an Broadcast Ephemeriden zugeordnet. Konkret bedeutet das, dass die Broadcast Ephemeriden, mit welchen die zu korrigierenden Satellitenpositionen berechnet werden, durch die IODE-Nummer in den Korrekturdaten festgesetzt sind.

Korrektur des Satellitenuhroffsets

Die Berechnung des Uhrkorrektur Terms aus Echtzeitdaten erfolgt über ein quadratisches Polynom. Die Koeffizienten (c_0, c_1, c_2) werden aus den Echtzeitkorrekturen bezogen. t bezieht sich auf den Berechnungszeitpunkt, t_0 auf die Referenzepoche der Korrekturdaten.

$$\delta\mathbf{C} = c_0 + c_1(t - t_0) + c_2(t - t_0)^2 \quad (4.12)$$

Die Korrektur des aus Broadcast Ephemeriden berechneten Satellitenuhroffsets erfolgt schließlich über:

$$t_{\text{korrigiert}} = t_{\text{broadcast}} + \frac{\delta\mathbf{C}}{c} \quad (4.13)$$

mit $c =$ Lichtgeschwindigkeit.

Korrektur der Satellitenposition

Die Bahnkorrekturparameter (δO_i und $\delta \dot{O}_i$) aus den Echtzeitkorrekturen werden in einem Orbit-Korrekturvektor ($\delta\mathbf{O}$) in Abhängigkeit von Berechnungszeitpunkt (t) und Referenzepoche der Korrekturen (t_0) zusammengefasst.

$$\delta\mathbf{O} = \begin{bmatrix} \delta O_{\text{radial}} \\ \delta O_{\text{along}} \\ \delta O_{\text{cross}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta \dot{O}_{\text{radial}} \\ \delta \dot{O}_{\text{along}} \\ \delta \dot{O}_{\text{cross}} \end{bmatrix} (t - t_0) \quad (4.14)$$

Um diesen Orbit-Korrekturvektor in einen Satellitenpositions-Korrekturvektor ($\delta\mathbf{X}$) umzurechnen, müssen die Einheitsvektoren des Satellitenkoordinatensystems im erdfesten geozentrischen System folgendermaßen bestimmt werden:

$$\begin{aligned}
\mathbf{e}_{along} &= \frac{\dot{\mathbf{r}}}{|\dot{\mathbf{r}}|} \\
\mathbf{e}_{cross} &= \frac{\mathbf{r} \times \dot{\mathbf{r}}}{|\mathbf{r} \times \dot{\mathbf{r}}|} \\
\mathbf{e}_{radial} &= \mathbf{e}_{along} \times \mathbf{e}_{cross}
\end{aligned} \tag{4.15}$$

mit \mathbf{r} als Satellitenpositionsvektor aus Broadcast Ephemeriden und $\dot{\mathbf{r}}$ als Geschwindigkeitsvektor aus Broadcast Ephemeriden.

Die Korrektur erfolgt schließlich durch:

$$\delta \mathbf{X} = [\mathbf{e}_{radial} \ \mathbf{e}_{radial} \ \mathbf{e}_{radial}] \delta \mathbf{O} \tag{4.16}$$

Dieser Satellitenpositions-Korrekturvektor ($\delta \mathbf{X}$) kann nun direkt an die aus Broadcast Ephemeriden berechnete Position ($\mathbf{X}_{broadcast}$) angebracht werden.

$$\mathbf{X}_{korrigiert} = \mathbf{X}_{broadcast} - \delta \mathbf{X} \tag{4.17}$$

4.2.3 Erstellen des sp3-Files

In den Abschnitten (4.2.1) und (4.2.2) wurde gezeigt wie aus Broadcast Ephemeriden Satellitenpositionen und Uhroffsets berechnet werden und wie diese mit Informationen aus den IGS-Echtzeitkorrekturen verbessert werden können.

Die so berechneten, verbesserten Satellitenpositionen und Satellitenuhroffsets müssen nun zur weiteren Verwendung in einem standardisierten Format gespeichert werden, um einen automatischen Datenfluss zu gewährleisten.

Da die korrigierten Satellitenpositionen und Uhroffsets als Alternative zu den präzisen Produkten des IGS gesehen werden können, bietet es sich an, die so berechneten Werte auch im sp3-Format zu speichern. Dadurch werden sie direkt mit den präzisen Ephemeriden des IGS vergleichbar gemacht und können analog zu diesen für die Schätzung von troposphärischen Parametern verwendet werden.

Bei der Erstellung der sp3-files ist zu beachten:

Grundsätzlich können die berechneten Daten - sofern vorhanden - wie präzise Ephemeriden pro Tag und über die gesamte Tageslänge gespeichert werden. Bei der Speicherung der Daten kann allerdings auch auf mögliche Datenlücken in den Eingangsdaten Rücksicht genommen werden und sp3-files mit korrigierten Positionen und Uhroffsets nur für bestimmte Tagesabschnitte erstellt werden.

Weiters ist es von großer Bedeutung, dass bei der Verspeicherung der korrigierten Orbits und Uhroffsets ein bestimmtes Zeitintervall vorgegeben werden kann. Wie aus Kapitel 3.2 bekannt, werden die Werte in den einzelnen Korrekturdatenströmen in einer sehr feinen zeitlichen Auflösung bereitgestellt. Dadurch können, beispielsweise für den IGS01-Datenstrom, korrigierte Satellitenpositionen und Uhrkorrekturen ohne Interpolation in einem Intervall von 5 Sekunden berechnet und im sp3-Format gespeichert werden (vgl. zeitliche Auflösung der IGS-Produkte = 15 min).

4.2.4 Realisierung der Berechnungen in MatLab

Für die weitere Untersuchung der Qualität der Satellitenorbits und Uhroffsets, welche mit den einzelnen Korrekturdatenströmen verbessert werden, müssen nun alle zuvor beschriebenen Berechnungen mit allen Daten im Untersuchungszeitraum (14. bis 21. April) durchgeführt werden.

Hierfür wurde eine Matlab-Routine erstellt, welche es ermöglicht korrigierte Satellitenpositionen und Uhroffsets zu berechnen und im sp3-Format zu speichern.

Im Wesentlichen besteht das Programm aus drei Haupt-Abschnitten, welche auch getrennt ausgeführt werden können:

- (1) dem Einlesen der notwendigen Elemente aus den Broadcast Ephemeriden und den Informationen aus den verschiedenen Korrekturdatenströmen
- (2) dem Berechnen von Satellitenpositionen und Uhroffsets und anschließendem Anbringen der Korrekturen
- (3) dem Verspeichern der berechneten Werte im sp3-Format im vorgegebenen Intervall und für vorgegebene Zeitabschnitte

Im Folgenden werden die einzelnen Programmabschnitte und Einstellungsmöglichkeiten bei der Berechnung und Verspeicherung von korrigierten Satellitenpositionen und Uhroffsets vorgestellt.

ad (1):

Bei Programmstart wird eine Datei mit den Broadcast Ephemeriden und eine mit den Korrekturdaten ausgewählt. Der Modus des jeweils verwendeten Korrekturdatenstroms wird erkannt. Es werden alle relevanten, in den Eingangsfiles vorhandenen Informationen eingelesen (alle vorhandenen Epochen). Die eingelesenen Daten werden in MatLab-Arrays für Broadcast-Informationen und Informationen aus Echtzeitkorrekturen gespeichert.

Wenn die Daten für den gewählten Tag schon eingelesen wurden, kann dieser Punkt entfallen, und direkt auf die Informationen aus den gespeicherten Arrays zugegriffen werden.

ad (2):

Aufgrund von eingegebenen Werten für Zeitabschnitt und Intervall der gewünschten Ausgabe werden mit den in (1) eingelesenen Werten die Berechnungen aus Kapitel 4.2.1 und 4.2.2 durchgeführt. Für jeden Satelliten werden zu jedem der angegebenen Zeitpunkte und jeden Korrekturdatensatz passende Sätze an Broadcast Ephemeriden (IODE-Vergleich) gesucht. Anschließend wird die Broadcast Position/Uhr berechnet und mit den Korrekturwerten verbessert.

Auf Grund von Lücken in der Bereitstellung der Echtzeitkorrekturen sind nicht konsequent für alle Zeitpunkte Korrekturwerte vorhanden. Da bei den Untersuchungen in dieser Arbeit nur direkt berechenbare korrigierte Satellitenpositionen und Uhroffsets betrachtet werden (und keine Interpolation der Echtzeitkorrekturen durchgeführt wird), werden diese Zeitpunkte in der Berechnung ausgelassen.

Alternativ zu dieser Methode können die Lücken in den Daten auch durch nicht-korrigierte Satellitenpositionen und Uhroffsets rein aus Broadcast Ephemeriden befüllt werden. Auf die Auswirkung der Datenlücken, bzw. der Verwendung von nicht-korrigierten Satelliteninformationen auf die Schätzung von Parametern der Troposphäre wird im Kapitel 5 eingegangen.

ad (3):

Die in (2) erstellten Daten von Satellitenpositionen und Uhroffsets werden nun im sp3-Format gespeichert. Hierfür wird zunächst ein Header mit standardisierten Inhalten erstellt. Anschließend werden die Daten im angegebenen zeitlichen Intervall und über die angegebenen Epochen gespeichert.

4.3 Berechnung von Troposphärenparametern

In diesem Abschnitt wird das Schätzen von Troposphärenparametern aus GNSS-Beobachtungen erläutert. Zunächst wird die angewandte Methodik zur Schätzung von Parametern der Troposphäre umrissen und anschließend werden die im Softwarepaket- NAPEOS durchgeführten Berechnungsabläufe beschrieben.

4.3.1 Troposphärenparameterschätzung

Wie bereits in Kapitel 2.3.3 eingeführt, können aus GNSS-Messungen Rückschlüsse auf Parameter der Troposphäre gezogen werden.

Konkret können die Parameter *Zenith Total Delay (ZTD)*, *Zenith Wet Delay (ZWD)*, *Nord-Gradient der Troposphärenverteilung (gradN)* und *Ost-Gradient der Troposphärenverteilung*

lung (*gradE*) an der Beobachtungsstation durch eine Ausgleichung der Beobachtungen auf Grundlage der **Methode der kleinsten Quadrate** geschätzt werden.

Die Berechnungen werden durch eine **Vielzahl an Beobachtungen** einer Station zu allen sichtbaren GNSS-Satelliten und der Informationen aus **präzisen Ephemeriden** ermöglicht. Basierend auf den in Kapitel 2.2.3 beschriebenen Verfahren der Einzelpunktbestimmung (**PPP**) können die Beobachtungsdaten (Code- und Phasenmessungen) hoch präzise ausgewertet werden.

Die Effekte der Ionosphäre werden durch Bildung der ionosphärenfreien Linearkombination eliminiert. Weitere Störeinflüsse werden weitestgehend über genaue Korrekturmodelle reduziert.

Wie im Kapitel 2.2.3 zum PPP-Verfahren beschrieben, bleiben nun folgende unbekannte Parameter zu Bestimmung durch den Ausgleich: der *Empfängeruhrfehler*, die *Empfängerposition*, *Mehrdeutigkeiten* und die *troposphärische Laufzeitverzögerung*.

Da die Messungen permanent und statisch durchgeführt werden, können nach einer gewissen **Konvergenzzeit** *Lösungen für die Mehrdeutigkeiten* (wenn auch nur Float-Werte) berechnet werden. Auch die Empfängeruhr kann bestimmt werden. Da die Beobachtungen von einer permanenten Referenzstation durchgeführt werden (Auswahl eines sehr kleinen *a priori Sigma-Wertes der Stationskoordinaten*), kann der Fokus in der Parameterschätzung auf die **troposphärische Laufzeitverzögerung** gelegt werden.

Aus der Vielzahl an Beobachtungen in verschiedensten Elevationen und zu unterschiedlichen Azimuthwerten kann also durch Ausgleichung mit der Methode der kleinsten Quadrate die troposphärische Laufzeitverzögerung bzw. der ZTD und zugehörige azimuthale Asymetrien (gradN/gradE) bestimmt werden.

Wie in Kapitel 2.3.2 erläutert wurde, setzt sich die gesamte Laufzeitverzögerung aus einem hydrostatischen und einem nicht-hydrostatischen Anteil zusammen.

$$ZTD = ZHD + ZWD \quad (4.18)$$

Der *hydrostatische Anteil* kann aufgrund von theoretischen Annahmen, wie sie in Kapitel 2.3.3 eingeführt wurden, bestimmt werden. Als Grundlage hierfür dienen - je nach Ansatz - Standard-*Troposphärenmodelle* (vgl. Saastamoinen).

Dies erlaubt wiederum die Bestimmung des **nicht-hydrostatischen Anteils der troposphärischen Laufzeitverzögerung**. Es können also an (permanenten) GNSS- Empfangsstationen durch:

- eine Vielzahl an Beobachtungen und lange Beobachtungszyklen
- bekannte Stationskoordinaten (*bzw. Näherungswerten der Koordinaten*)
- bekannte Modelle für die hydrostatische Laufzeitverzögerung
- das PPP-Verfahren zur Einzelpunktbestimmung
- und Ausgleichung mit der Methode der kleinsten Quadrate

... die oben genannten Parameter der Troposphäre (ZWD , ZWD , $gradN$ und $gradE$) ermittelt werden.

4.3.2 Berechnungsablauf in NAPEOS

Die *automatische* Schätzung der Troposphärenparameter für den festgelegten Untersuchungszeitraum und auf Grundlage unterschiedlicher Ephemeriden wird mit dem von der ESA entwickelten Softwarepaket *NAPEOS* durchgeführt. Im Folgenden werden die Hauptpunkte der Berechnungen in NAPEOS erklärt, und die verwendeten Einstellungen und Parameter beschrieben.

Die folgenden Beschreibungen und Informationen über das NAPEOS-System beziehen sich größtenteils auf (ESA [2009]) und (ESA -Webseite [2016]).

NAPEOS („*Navigation Package for Earth Observation Satellites*“) wurde Ende der 1990er Jahre entwickelt und soll „ein Allzweck-Softwarepaket für alle Phasen einer Satellitenmission - im Sinne von Unterstützungen bei der Missionsvorbereitung und Orbitfestlegung, und der Pädiktion und Kontrolle von Satellitenbahnen - darstellen.“ (ESA -Webseite [2016]).

Das Programm besteht aus einer Vielzahl an Funktionen zu Berechnungen, Analyse und Simulation von satelliten-bezogenen Daten. Sollen mehrere verschiedene Funktionen und Anwendungen von NAPEOS in einer Abfolge hintereinander (oder auch simultan) durchgeführt werden, kann dies mit der Funktion *SEQUENCE* definiert werden. Für die Troposphärenparameterschätzung in dieser Arbeit wird so ein Programmablauf implementiert. Um einen Überblick über die verwendeten NAPEOS-Funktionen zu schaffen, wird nun die Auflistung des *Sequenz-Files* beschrieben und anschließend die einzelnen Teilfunktionen mit den darin gesetzten Parametern erläutert.

Vor den eigentlichen Berechnungen müssen die für die Untersuchung ausgewählten Stationen in der NAPEOS-Datenbank eingetragen werden. Es müssen Empfänger und Antennentypen und zugehörige Typdaten-files angegeben werden. Die a priori Stationskoordinaten müssen ebenfalls vorhanden sein. Informationen zu den einzelnen Satelliten sind

4.3 Berechnung von Troposphärenparametern

standardmäßig in der NAPEOS-Datenbank vorhanden und müssen auf Aktualität und Richtigkeit überprüft werden.

Zur Schätzung von Troposphärenparametern aus Beobachtungsdaten der ausgewählten Stationen und den unterschiedlichen präzisen Ephemeriden (igs,igu, korrigierte Broadcast Ephemeriden) werden in NAPEOS folgende Funktionen (pro Untersuchungstag) ausgeführt:

- | | |
|--------------------------------|--------------------------|
| (1) <i>Ftp.exe, GET_ORBCLK</i> | (6) <i>BuildCat.bin</i> |
| (2) <i>Ftp.exe, GET_RINEX</i> | (7) <i>GnssObs.bin</i> |
| (3) <i>CmdLine.tcl</i> | (8) <i>Bahn.bin</i> |
| (4) <i>OrbUpd.bin</i> | (9) <i>par2tropo.bin</i> |
| (5) <i>ClockUpd.bin</i> | |

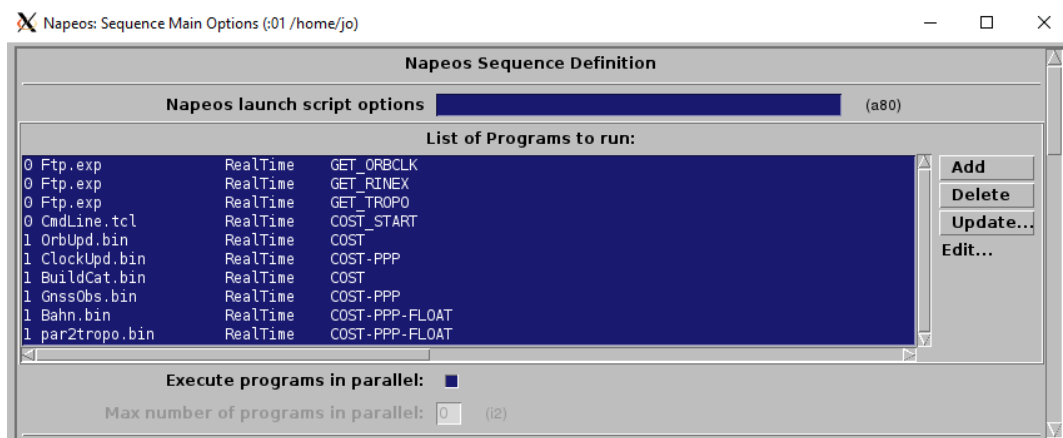


Abb. 4.4: Ausschnitt und gewählte Funktionen in *NAPEOS SEQUENCE*

Durch Ausführen der Funktion (1) werden die präzisen Ephemeriden in einem *komprierten Dateiformat* vom ftp-Server des IGS bezogen und in definierten Ordnerstrukturen gespeichert. Als Eingangsparameter für diese Funktion muss die Art der gewünschten Ephemeriden angegeben werden (*final orbits, final clocks, Ultra Rapid Orbits*).

Analog zu (1) werden durch die Funktion „Ftp.exe GET_RINEX“ die Beobachtungsdaten der gewählten Stationen vom ftp-Server bezogen.

Da alle Informationen aus (1) und (2) in komprimierten Dateiordnern gespeichert sind, müssen diese Informationen vor der weiteren Berechnung in einer dekomprimierten Ordnerstruktur gespeichert werden. Dies geschieht mit den in der Funktion *CmdLine.tcl* definierten Befehlen.

In der unter (4) angeführten Funktion *OrbUpd.bin* werden die für die Schätzung verwendeten Bahninformatoren aufbereitet. Hier kann definiert werden wie mit nicht vorhandenen Satellitenpositionen verfahren wird. Beispielsweise Streichen von Satelliten für die keine, bzw. nur wenige Werte vorhanden sind. Weiters kann in dieser Funktion eine Korrektur des Bezugspunktes (COM/APC - auf Grundlage von Antennendefinitionen in der NAPEOS-Datenbank) der verwendeten Daten durchgeführt werden. Diese Einstellung wurde beim Prozessieren der Ephemeriden aus unterschiedlichen Korrekturdatenströmen in unterschiedlichen Weisen angewandt.

Die Funktion (5) *ClockUpd.bin* bereitet analog zu (4) die Eingangsinformationen über Satellitenuhroffsets auf. Hier kann die Eingangsdatei mit den Uhrinformationen definiert werden. Bei final Clock-Produkten handelt es sich um clk-Dateien (mit höherer zeitlicher Auflösung); bei Berechnungen mit Ultra Rapid Orbits können nur die in den sp3-Dateien vorhandenen viertelstündlichen Uhroffsets verwendet werden. Bei der Berechnung aus korrigierten Broadcast Ephemeriden werden die Uhrinformationen ebenfalls aus den sp3-Dateien entnommen. Hierbei kann die zeitliche Auflösung allerdings variieren und beispielsweise bei Verwendung des IGC01-Datenstroms (ohne Interpolation) eine Bereitstellung von Uhrinformationen im Intervall von bis zu 5 Sekunden ermöglichen (vgl. Kapitel 4.2.2).

Mit der Funktion (6) *BuildCat.bin* wird für die weitere Prozessierung eine Liste der verwendeten Stationen erstellt.

Die Funktion (7) *GnssObs.bin* fügt alle zuvor aufbereiteten Informationen über Satellitenorbits, Uhren und Stationsbeobachtungen nach bestimmten Kriterien in einer binären Datei zusammen. Die vorhandenen Uhrinformationen werden hierbei mittels Interpolation auf ein definiertes Zeitintervall verdichtet. Für alle Untersuchungen in dieser Arbeit wird eine zeitliche Auflösung von 30 Sekunden gewählt. Neben grundlegenden Einstellungen der Prozessierung können Parameter zur Ausschließung gewisser Beobachtungen (Minimaler Elevationswinkel, Minimale Beobachtungszeit, etc.) und ganzer Stationen bzw. Satelliten (zu wenige Beobachtungen) angegeben werden. Weiters erfolgt in diesem Programmabschnitt auch eine Qualitätsanalyse der Beobachtungsdaten. Der minimale Elevationswinkel für die Berechnung der Untersuchungsdaten wird mit 3 Grad festgesetzt.

In der Funktion (8) *Bahn.bin* erfolgt nun die eigentliche Parameterschätzung auf Grundlage der Methode der kleinsten Quadrate und der in (7) erstellten binären Eingangsdatei. Neben grundlegenden Einstellungen der Ausgleichung (Konvergenzkriterien bei der Erstellung der Normalgleichungsmatrix, Inversionsmethode der Normalgleichungsmatrix, maximale Anzahl an Iterationen, etc.) können vor allem Einstellungen zu den verwendeten Satelliten, Beobachtungen und zu schätzenden Parametern getroffen werden. Die wichtigsten Einstellungen die im Zuge der Berechnung der Untersuchungsdaten gesetzt werden sind:

- **Elevationswinkel 3 Grad:** obwohl dies bereits in die Eingangsdaten nur jene Beobachtungen beinhalten, welche nicht in (7) ausgeschlossen wurden ist eine weitere Restriktion der Beobachtungsdaten in *Bahn.bin* möglich.
- **alle vorhandenen GPS-Satelliten verwenden:** durch diese Einstellung könnten einzelne Satelliten bewusst von der Ausgleichung ausgeschlossen werden. Die Einstellungen wurden jedoch so gesetzt, dass die Beobachtungsdaten aller in den Orbitdaten vorhandenen Satelliten auch an der Ausgleichung teilnehmen.
- **Verwendung von undifferenzierten Code- & Phasenbeobachtungen:** Es können unterschiedliche Einstellungen getroffen werden, welche Informationen aus den Beobachtungsdaten der einzelnen Stationen verwendet werden sollen. Für die Berechnung werden undifferenzierte Code- und Phasenbeobachtungen eingelesen. (*dies bezieht sich nur darauf, welche Informationen eingelesen werden und restriktiert nicht die Berechnungsabläufe; vgl. Linearkombination von verschiedenen Frequenzen, etc.*)
- **troposphärische Modellierung der Messungen:** Es kann eine unterschiedliche Auswahl an Modellierungen aus den Messdaten angegeben werden. Für die Untersuchungsdaten wird die Modellierung der Troposphäre auf Grundlage des **Modified Saastamoinen Modells** mit Werten aus dem **Global Pressure and Temperature-Modell (GPT)**, der **Global Mapping Function (GMF)** (Böhm, et al. [2006]) und den **geschätzten Parametern** gewählt.
- **Einstellungen der zu schätzenden Parameter:** neben den Standardeinstellungen für die Parameter Satellitenuhr, Empfängeruhr und Ambiguitäten können hier vor allem Einstellungen zu den Parametern an der Station getroffen werden. Für die Berechnung der Untersuchungsdaten wurden die in Tabelle 4.3 zusammengefassten Einstellungen getroffen. Die a priori Werte signalisieren Näherungswerte. Der Wert für Sigma a priori kann zur Schaffung eines Grundverständnisses folgendermaßen beschrieben werden: Dieser Wert gibt an, in wie weit die in der Ausgleichung geschätzten Werte von den a priori Werten abweichen können. Je größer der Wert für a

priori Sigma definiert wird, desto freier sind die Parameter in der Ausgleichung, und desto größer können sie von den a priori Werten abweichen. Bei wenigen, schlechten oder unbrauchbaren Beobachtungen kann dies zu grob falschen und unbrauchbaren geschätzten Parametern führen, bzw. unter Umständen zur Nichtlösbarkeit des Ausgleichungssystems führen. Je geringer Sigma a priori gewählt wird, desto stärker sind die geschätzten Parameter von den a priori Werten abhängig. Dadurch bleibt das Gleichungssystem bei wenigen und schlechten Beobachtungen lösbar, es kann dadurch jedoch auch eine systematische *Über- bzw. Unterschätzung* der einzelnen Parameter induziert werden.

| Parameter | Interval der Schätzung | a priori Wert | a priori Sigma |
|----------------|------------------------|---------------|----------------------|
| Stationskoord. | pro Tag | aus Datenbank | $\pm 1\text{m}$ |
| ZTD | 1 Stunde | 2.3m | $\pm 0.1\text{m}$ |
| gradN | 2 Stunden | 0m | $\pm 0.0005\text{m}$ |
| gradE | 2 Stunden | 0m | $\pm 0.0005\text{m}$ |

Tab. 4.3: Parameter der Schätzung an der Station: A priori Werte und a priori Sigma

Bahn.bin liefert alle Ergebnisse der Ausgleichung in Form eines Binärfiles. Aus diesem können mittels verschiedener Funktionen die gewünschten Informationen ausgelesen werden. Für die weitere Untersuchung in dieser Arbeit sind vor allem die bestimmten Troposphärenparameter von Interesse. Aber auch die in dem Ausgleich bestimmten Residuen der einzelnen Satelliten werden im Folgenden analysiert.

Abschließend werden die geschätzten Troposphärenparameter und Stationskoordinaten in (9) *par2tropo.bin* als SINEX-Datei (im SINEX TRO-Format) für alle ausgewählten Stationen und den gesamten Berechnungstag gespeichert.

Bei den Berechnungen der Parameter der Troposphäre aus unterschiedlichen Eingangsdaten werden die Einstellungen in NAPEOS nur geringfügigen Änderungen unterzogen. Bei Berechnung aus Ultra Rapid Orbits statt Final Clocks müssen die Einstellungen in *ClockUpd.bin* entsprechend angepasst werden. Ebenso bei der Verwendung von Echtzeit-korrigierten Broadcast Orbits. Hierbei entfällt auch der automatische Download der Datei in (1) und das aufbereiten in (3). Die mit MatLab berechneten Orbits und Uhren werden direkt in die entsprechenden Ordner eingespielt.

Eine Besonderheit bei der Berechnung der Parameter auf Grund von korrigierten Broadcast Orbits bildet die **COM/APC-Korrektur** in *OrbUpd.bin*. Da die Berechnungsab-

läufe in NAPEOS auf die Verwendung von präzisen IGS-Ephemeriden und damit auf Eingangsorts mit Bezug auf **COM** ausgelegt sind, muss bei der Verwendung von **IGS01/02/03**-Korrekturen eine Korrektur des Bezugspunktes der Satellitenposition durchgeführt werden.

Die unterschiedlichen Bezugspunkte der verschiedenen Satellitenorbit-Produkte und die damit verbundenen Offsetkorrekturen sind in Abbildung 4.5 illustriert.

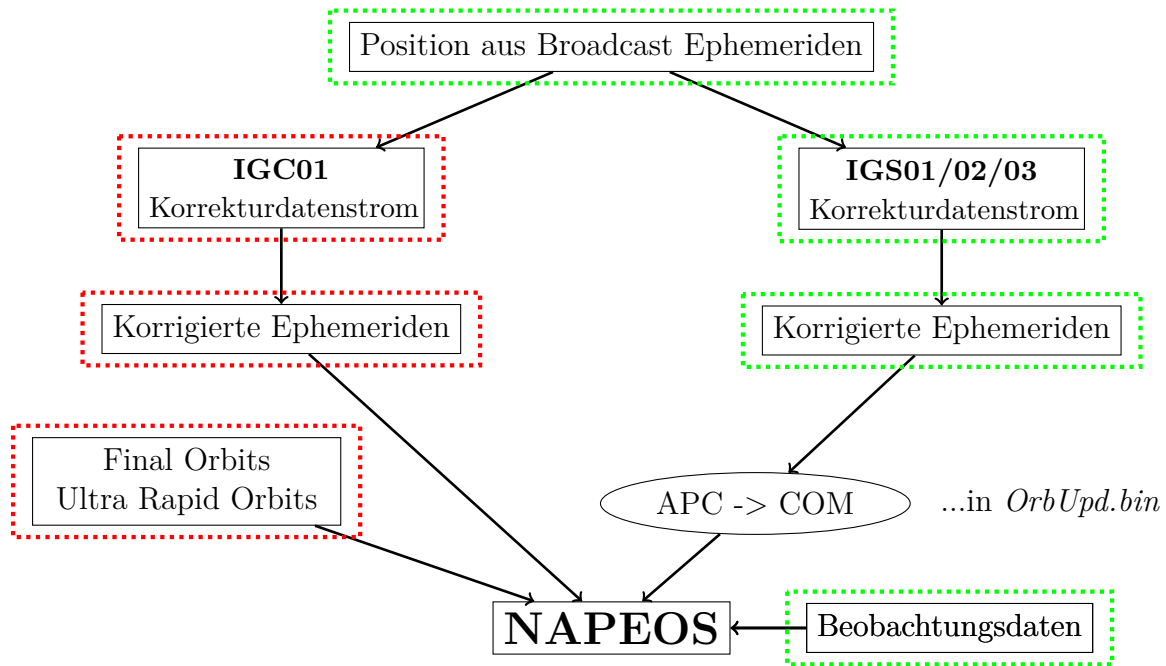


Abb. 4.5: Bezugspunkte der verschiedenen Orbitprodukte und Korrekturen im Berechnungsprozess. Rot = COM; Grün = APC

In NAPEOS kann dies, wie erwähnt, über die Einstellung *Correct for APC Offset* in *OrbUpd.bin* bei der Aufbereitung der Satellitenorbits erfolgen (vgl. Abbildung 4.6).

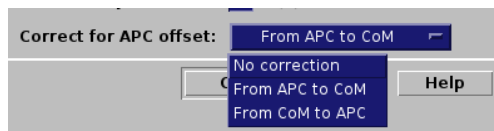


Abb. 4.6: Korrekturmöglichkeiten des Antennenphasenoffsets in der NAPEOS-Funktion *OrbUpd.bin*

5 Analyse und Vergleich

In diesem Kapitel werden nun die zuvor berechneten Daten (vgl. Kapitel 4) analysiert, um Aussagen über die *Qualität der berechneten Satellitenbahnen und Uhroffsets* zu treffen, bzw. um den Einfluss der Echtzeit-korrigierten Ephemeriden auf die Schätzung von *Troposphärenparametern* zu untersuchen. Hierfür werden die Ergebnisse der Schätzung aus unterschiedlichen Korrekturdatenströmen zueinander und mit Referenzergebnissen verglichen.

Zunächst wird ein **Überblick über die Testdaten** und die darauf angewandte **Vergleichsmethoden** gegeben. Weiters werden die Daten aus den **einzelnen Berechnungsschritten** bewertet: Ergebnisse der Orbit-Berechnungen, der Uhroffset-Berechnungen und der Troposphärenschätzung. Abschließend wird die *Qualität der aus den Testdaten (Echtzeit-korrigierte Satelliteninformationen im sp3-Format) geschätzten Troposphärenparameter* analysiert. Hierfür werden Vergleiche zu geschätzten Troposphärenparametern auf Grundlage präziser Ephemeriden angestellt.

5.1 Daten und Vergleichsmethodik

5.1.1 Verwendete Test- und Referenzdaten

Die in diesem Kapitel durchgeführten Analysen bestehen aus Vergleichen der geschätzten Parameter bzw. der berechneten Satelliteninformationen mit geeigneten Referenzdaten und aus solchen geschätzten Parameter.

Die **Testdaten** bilden einerseits die aus den verschiedenen Korrekturströmen berechneten Satellitenpositionen und Uhroffsets, andererseits die aus unterschiedlichen Eingangsdaten und mit unterschiedlichen Einstellungen geschätzten Troposphärenparameter.

Als **Referenzdaten** für die Untersuchung der berechneten Satelliteninformationen die-

nen die präzisen Ephemeriden des IGS, in Form der IGS Final Orbits bzw. in Form des IGC01- Vergleichsproduktes (näher in Abschnitt 5.2.1 beschrieben).

Bei der Analyse der geschätzten Troposphärenparameter werden aus IGS Final Orbits mit den selben NAPEOS - Einstellungen ebenfalls Parameter geschätzt. Die so entstehenden Daten bilden die Referenz für die Untersuchung der geschätzten Troposphärenparameter aus korrigierten Echtzeitorbits.

5.1.2 Vergleichsmethoden

Der Vergleich der zuvor beschriebenen Test- und Referenzdaten erfolgt durch graphische Visualisierungen und Berechnung von statistischen Kennwerten. Da vor allem Aussagen über die Abweichungen der Testdatensätze von den entsprechenden Referenzdaten getroffen werden sollen, werden für die Vergleiche einfache Kennwerte der *deskriptiven Statistik* verwendet.

Numerisch besteht der Vergleich aus der Beschreibung der Realisierungen der Zufallsvariablen, konkret über $\varphi = y_{test} - y_{vgl}$ mit dem Erwartungswert $\mu = 0$. Daraus können folgende, die Differenzen beschreibende, Kennwerte berechnet werden:

- **BIAS:** *Verzerrung der Differenzen der Datensätze*, als Maß für systematische Abweichungen

$$bias = E(\varphi) - \mu \equiv \frac{\sum_{i=1}^n y_{test} - y_{vgl}}{n} \quad (5.1)$$

- **RMSE:** *Wurzel der mittleren quadratischen Abweichungen*, als Maß der Abweichungen der Testdaten von den Vergleichsdaten

$$rmse = \sqrt{E[(\varphi - \mu)^2]} \equiv \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{test} - y_{vgl})^2}{n}} \quad (5.2)$$

Aus den pro Epoche erhaltenen Differenzen werden gemittelte Kennwerte pro Tag bzw. Satelliten errechnet. Satelliten ohne Orbit bzw. Uhrinformationen (nur mit den Dummy-Werten 0 bzw. 9999.999) werden nicht in die Berechnungen miteinbezogen. Ebenso werden Ausreißer in den berechneten Differenzen, deren Werte die dreifache Standardabweichung (errechnet auf Basis der Differenzen der jeweiligen Datensätze) übersteigen, von der weiteren Berechnung ausgeschlossen.

Für den Vergleich der Uhroffsets der verschiedenen Produkte muss vor jeglicher weiteren Untersuchung ein System-BIAS zwischen den beiden verglichenen Datensätzen berechnet

werden. Konkret wird pro Epoche ein BIAS über alle Satellitenuhroffsets berechnet und von den Uhroffsets der Testdaten abgezogen. Anschließend kann mit den Daten weiter verfahren werden. Dadurch wird gewährleistet, dass ein möglicher Uhroffset der Systeme der beiden Datensätze den eigentlichen Vergleich nicht verfälscht.

Die **graphische Analyse** der Vergleiche zwischen Test- und Referenzdaten erfolgt über diverse Visualisierungen (wie *Boxplots* der statistischen Werte, *Differenzplots* und Plots des *Parameterverlaufs*) in MatLab.

Zur Analyse der geschätzten Troposphärenparameter wurde in MatLab eigens ein graphisches User-Interface erstellt (siehe Abbildung 5.1). Dieses erlaubt die Auswahl eines Test- und eines Referenzdatensatzes anhand von

- **Tag** (Vergleich der Datensätze erfolgt an einzelnen Tagen)
- **Station** (welche der 14 untersuchten Stationen soll ausgewertet werden)
- **Parameter** (welcher Troposphärenparameter soll ausgewertet werden *ZTD*, *ZWD*, *gradN*, *gradE*)

Die so ausgewählten Troposphärenparameter können nun tageweise als Funktion der Zeit visualisiert werden. Es ist möglich die Parameter mehrerer Eingangsdaten (in unterschiedlichen Farben) in der selben Graphik darzustellen, um so einen direkten Vergleich der geschätzten Parameter aus verschiedenen Eingangsdaten zu schaffen. Auch das Darstellen der selben Daten über mehrere Tage hinweg in der selben Graphik ist möglich.

Weiters können die Differenzen der ausgewählten Test- und Referenzdaten gebildet und visualisiert werden.

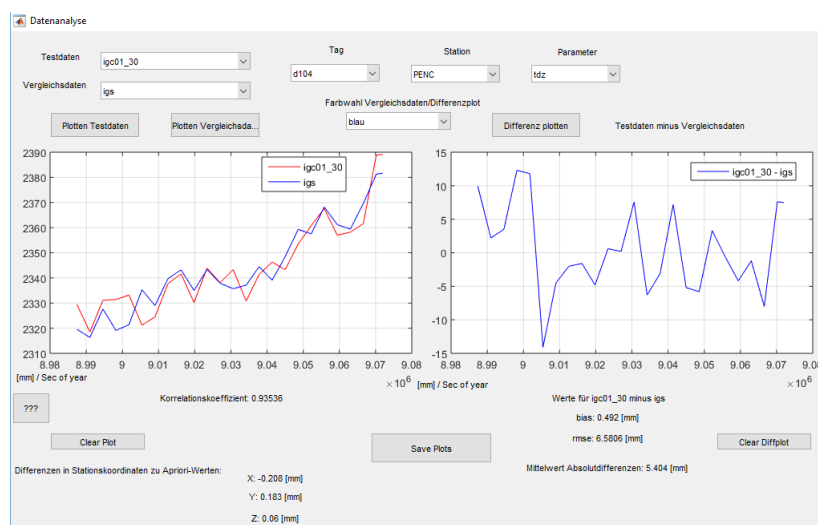


Abb. 5.1: Entwickeltes Datenanalyse-Tool zum Vergleich von geschätzten Troposphärenparametern (Screenshot)

5.2 Analyse der Berechnungsalgorithmen

Vor der Untersuchung der Ergebnisse aus der Parameterschätzung werden die Ergebnisse der einzelnen Berechnungsabläufe analysiert, wodurch die Qualität der angewandten Berechnungsalgorithmen veranschaulicht werden.

Zunächst wird die *Berechnung und Korrektur der Satellitenpositionen und Uhroffsets* bewertet. Anschließend werden die mit NAPEOS geschätzten Troposphärenparameter Vergleichsprodukten gegenübergestellt.

5.2.1 Berechnung korrigierter Satellitenpositionen und Uhroffsets

Wie in Kapitel 4.2 beschrieben, werden auf Grundlage von *Broadcast Ephemeriden* Satellitenpositionen und Uhrkorrekturen in unterschiedlichen zeitlichen Auflösungen berechnet. Um die Ergebnisse dieser Berechnungen bewerten zu können, werden sie IGS- Vergleichsprodukten gegenübergestellt. Der IGS bietet ebenfalls ein sp3-Produkt an, welches aus Satellitenpositionen und Uhroffsets im Intervall von 30 Sekunden besteht. Diese Werte wurden *aus Broadcast Ephemeriden berechnet und anschließend mit Korrekturdaten aus IGC01 korrigiert*. Dies entspricht genau jener Vorgehensweise, die in dieser Arbeit auf alle Korrekturdatenströme angewendet wird. Anhand dieses Produktes wird der Berechnungsablauf zur Erstellung korrigierter Satelliteninformationen validiert. Im Weiteren werden diese bereits korrigierten IGS-IGC01 Satelliteninformationen als „*IGC01-Vergleichsprodukt*“ bezeichnet.

Die Auswertung erfolgt tabellarisch als Auflistung der mittleren Kennwerte, errechnet aus den Abweichungen von IGC01 (berechnet) zu IGC 01 (Vergleichsprodukt). Damit Aussagen über die Abweichungen pro Satellit bzw. pro Tag zu konkretisiert werden können, werden durch Mittelbildung Kennwerte pro Satellit bzw. pro Tag berechnet. Tabelle 5.1 zeigt den BIAS und RMSE der Abweichungen zwischen IGC01 korrigierten Orbits und dem IGS-Vergleichsprodukt für den Untersuchungszeitraum.

Die Berechnungen weisen für den Untersuchungszeitraum konstante Ergebnisse auf. Auffallend sind die großen Abweichungen bei den Uhrkorrekturen am 18. April. Bei Analyse aller Differenzen pro Satellit am 18. April und genauer Betrachtung des Verlaufs der Differenzen pro Satellit über alle Epochen zeigt sich, dass sich die Differenzen des Uhroffsets ab 22 Uhr für alle Satelliten sprunghaft verschlechtern. Der in MatLab implementierte Berechnungsalgorithmus führt in Abhängigkeit der Eingangsdaten (Korrekturwerte), unabhängig vom Untersuchungstag, die selben Berechnungsschritte durch. Für den 18. April sind alle notwendigen igc01-Korrekturen vorhanden. Auch die Broadcast Ephemeriden sind in diesem Zeitraum lückenlos. Um zu konkretisieren, ob die fehlerhaften Werte in den Eingangsdaten von den Echtzeitkorrekturen oder von den Broadcast Ephemeriden

| IGC01 (berechnet) minus IGC01 (Vergleichsprodukt vom IGS) | | | | | | | | |
|---|-----------------|------|-----------------|------|-----------------|------|-----------------|--------|
| | Δx [mm] | | Δy [mm] | | Δz [mm] | | Δt [ns] | |
| | bias | rmse | bias | rmse | bias | rmse | bias | rmse |
| 14.04. | -0,06 | 1,78 | 0,04 | 1,65 | 0,04 | 1,69 | 0,00 | 0,02 |
| 15.04. | 0,00 | 1,67 | 0,03 | 1,83 | 0,03 | 1,71 | 0,00 | 0,02 |
| 16.04. | 0,00 | 0,86 | 0,01 | 0,80 | 0,00 | 0,97 | 0,00 | 0,00 |
| 17.04. | 0,01 | 1,43 | -0,02 | 1,36 | -0,01 | 1,68 | 0,00 | 0,00 |
| 18.04. | 0,01 | 1,19 | 0,00 | 1,13 | 0,02 | 1,45 | 114,56 | 702,50 |
| 19.04. | 0,00 | 0,46 | -0,01 | 0,46 | 0,01 | 0,48 | 0,00 | 3,73 |
| 20.04. | 0,06 | 2,51 | -0,11 | 2,33 | 0,07 | 2,18 | 0,00 | 0,03 |

Tab. 5.1: Abweichungen IGC01 (korrigiert) und IGC01 (Vergleichsprodukt): Mittlere Kennwerte pro Tag im Untersuchungszeitraum

kommen, werden die Daten der Satellitenuhroffset-Berechnung ohne angebrachte Korrekturen betrachtet und Differenzen zum IGS-Vergleichsprodukt erstellt. Hier zeigen sich die selben sprunghaften Verschlechterungen. Daher können die Abweichungen gegen Ende des 18. Aprils auf fehlerhafte Datensätze in den verwendeten Broadcast Ephemeriden zurückgeführt werden.

Die mittleren Abweichungen bzw. Streuungen der Differenzen des gesamten Vergleichs über alle Tage und alle Satelliten (*mit Ausnahme der Differenzen am 18. April*) ist in Tabelle 5.2 zusammengefasst.

| IGC 01 (berechnet) minus IGC01 (Vergleichsprodukt) | | | | | | | | |
|--|-----------------|------|-----------------|------|-----------------|------|-----------------|------|
| | Δx [mm] | | Δy [mm] | | Δz [mm] | | Δt [ns] | |
| | bias | rmse | bias | rmse | bias | rmse | bias | rmse |
| Mittel | -0,00 | 1,45 | -0,01 | 1,40 | 0,02 | 1,45 | 0,00 | 0,63 |

Tab. 5.2: Kennwerte der Differenzen zwischen IGC01 korrigierten Ephemeriden und IGC01-Vergleichsprodukt über alle Satelliten und alle Tage (ohne 18.April)

Die folgenden Abbildungen (5.2) & (5.3) zeigen jeweils die Differenz der Satellitenposition bzw. des Uhroffsets, zwischen IGC01-korrigierten Ephemeriden und dem IGC01-Vergleichsprodukt repräsentativ für den Satelliten 2 am 15. April. Die angesprochenen Sprünge in den Differenzen des Uhroffsets am 18.April werden in Abbildung 5.4 visualisiert.

Die Ergebnisse der Berechnungen bzw. der Visualisierungen zeigen, dass die Werte der durchgeführten Positions- bzw. Uhroffsetberechnung mit jenen des IGS - Vergleichsprodukts (mit Schwankungen im Millimeter-Bereich) übereinstimmen.

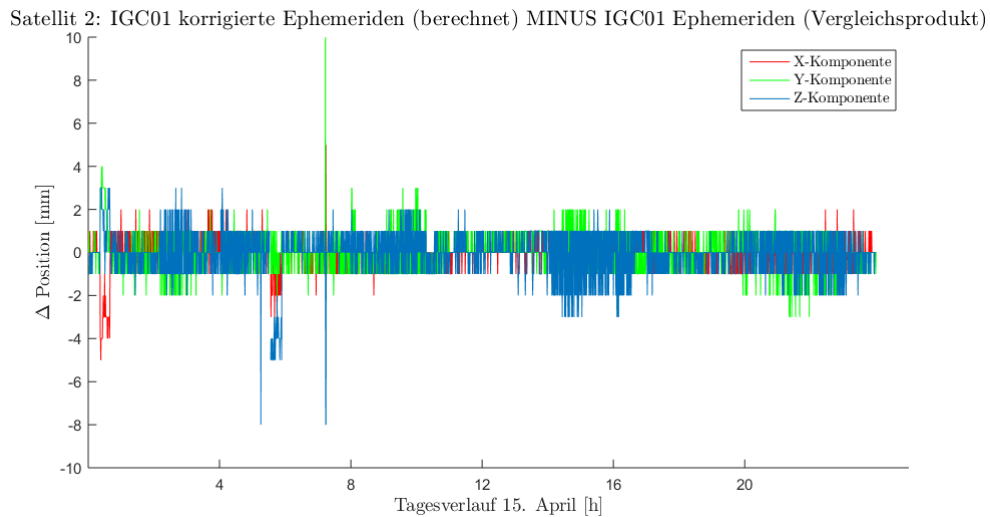


Abb. 5.2: Differenz der Position von Satellit 2 am 15. April, zwischen IGC01-korrigierten Ephemeriden (berechnet) und IGC01-Vergleichsprodukt

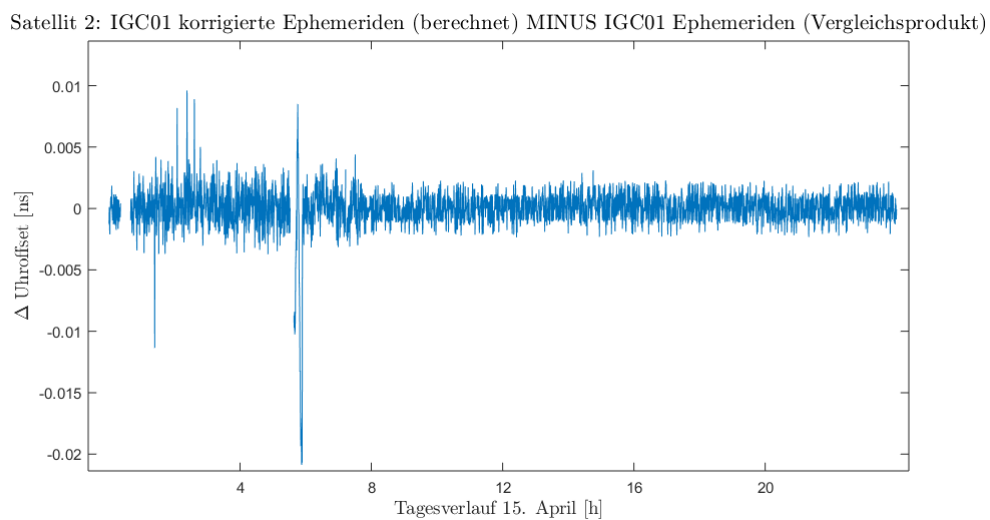


Abb. 5.3: Differenz des Uhroffsets von Satellit 2 am 15. April, zwischen IGC01-korrigierten Ephemeriden (berechnet) und IGC01-Vergleichsprodukt

Da der Berechnungsalgorithmus für korrigierte Broadcast Positionen und Uhroffsets, unabhängig vom Korrekturdatenstrom, dieselben Berechnungen durchführt, kann angenommen werden, dass auch die Berechnung von IGS01/02/03 korrigierten Broadcast Daten passende Ergebnisse liefert. Aus Ermangelung eines direkten IGS-Vergleichproduktes, kann dies allerdings nicht direkt gezeigt werden.

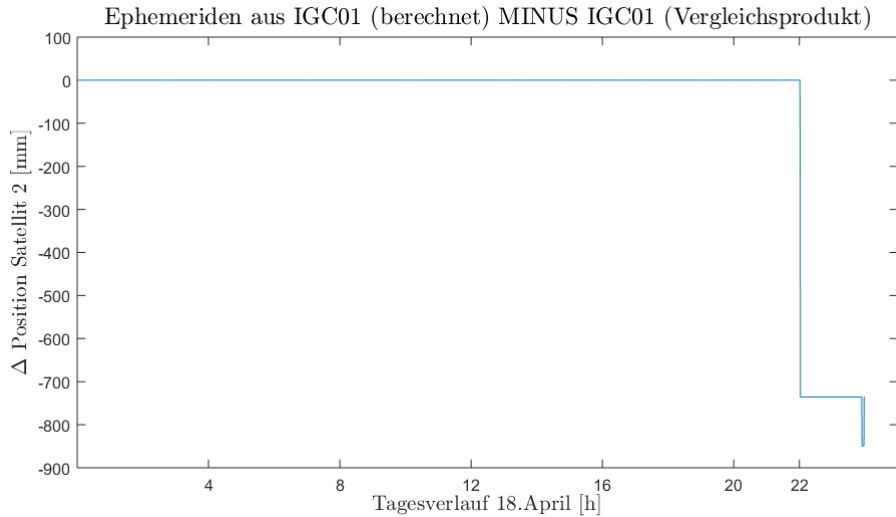


Abb. 5.4: Differenz des Uhroffsets von Satellit 2 am 18. April, zwischen IGC01-korrigierten Ephemeriden (berechnet) und IGC01-Vergleichsprodukt

5.2.2 Vergleich mit IGS Final Troposphärenprodukten

Um die Parameterschätzung in NAPEOS zu beurteilen, werden die aus IGS Final Orbits geschätzten Troposphärenparameter mit jenen des IGS Final Troposphärenproduktes verglichen.

Konkret wird die Wahl des a priori Sigma-Wertes für die Zenit Laufzeitverzögerung betrachtet. Um die Schätzungen nicht systematisch zu stark an den eingegebenen a priori Wert der Zenit Laufzeitverzögerung (2.3 m) zu binden, jedoch die Lösbarkeit der Ausgleichung zu gewährleisten werden verschiedene Varianten mit unterschiedlichen a priori Sigma-Werten getestet.

Die mittleren berechneten Werte für BIAS und RMSE über alle Tage im Untersuchungszeitraum und alle Stationen sind repräsentativ für die Varianten a priori Sigma = 1 m und a priori Sigma = 0.1 m in Tabelle 5.3 zusammengefasst.

| ΔZTD [mm] | | |
|-------------------|-------|-------|
| a priori Sigma | bias | rmse |
| 1 m | -1,07 | 11,45 |
| 0,1 m | 0,24 | 11,42 |

Tab. 5.3: mittlere Kennwerte der Abweichungen zwischen ZTD geschätzt aus Final Orbits und IGS- Final Troposphärenprodukt

Auf Basis der kleinsten mittleren Abweichung im gesamten Stationsnetz und Untersuchungszeitraum wird der a priori Sigma-Wert für die weitere Untersuchung mit 0.1 m festgelegt (siehe auch Abschnitt 4.3.2 bzw. Tabelle 4.3). Wie bereits erläutert sind die

Parameter der Troposphäre lokale Beschreibungen, daher ergeben sich an den einzelnen Stationen bei Schätzung mit unterschiedlichen Einstellungen auch verschiedene Abweichungen zu den Referenzprodukten. Zur Veranschaulichung werden für ausgewählte Stationen in unterschiedlichen Höhen im Referenzstationsnetz die Kennwerte der beiden Varianten aus Tabelle 5.3 in Tabelle 5.4 angegeben.

| ΔZTD [mm] | | | |
|-----------------------|----------------|-------|-------|
| | a priori Sigma | bias | rmse |
| LHAZ H \approx 3600 | 1 m | -3,17 | 14,65 |
| | 0,1 m | -0,44 | 14,35 |
| ADIS H \approx 2500 | 1 m | 0,46 | 12,19 |
| | 0,1 m | 2,61 | 12,58 |
| GRAZ H \approx 500 | 1 m | -1,85 | 11,09 |
| | 0,1 m | -1,23 | 10,89 |
| PENC H \approx 300 | 1 m | -0,01 | 13,70 |
| | 0,1 m | 1,61 | 13,67 |
| OHI3 H \approx 30 | 1 m | -3,35 | 9,99 |
| | 0,1 m | -2,69 | 9,74 |
| THTI H \approx 100 | 1 m | -1,00 | 17,75 |
| | 0,1 m | 1,08 | 17,70 |

Tab. 5.4: Differenzen der geschätzten ZTD-Werte zu IGS Final Troposphärenprodukten für ausgewählte Stationen und a priori Sigma-Werte der Ausgleichung

Die Ergebnisse der Schätzung von Zenit Laufzeitverzögerungen mit IGS Final Orbits und den gewählten Einstellungen, sowie die Werte des jeweiligen IGS Troposphärenprodukts sind in den folgenden Abbildungen für die Station GRAZ visualisiert.

Für alle weiteren Troposphären Parameterschätzungen in dieser Arbeit wird ein a priori Sigma-Wert für die Zenitlaufzeitverzögerung von **0.1 m** festgelegt.

In dieser Arbeit steht vor allem die Auswirkung der Schätzung aus Echtzeit-korrigierten Broadcast Daten im Vergleich zu Schätzungen aus Final Orbits/Clocks, bzw. Ultra Rapid Orbits im Vordergrund. Die Absolutwerte der jeweiligen Troposphärenschätzungen sind für die Aussagen über die Auswirkung von Echtzeit-korrigierten Daten im Vergleich zu präzisen Daten nebensächlich.

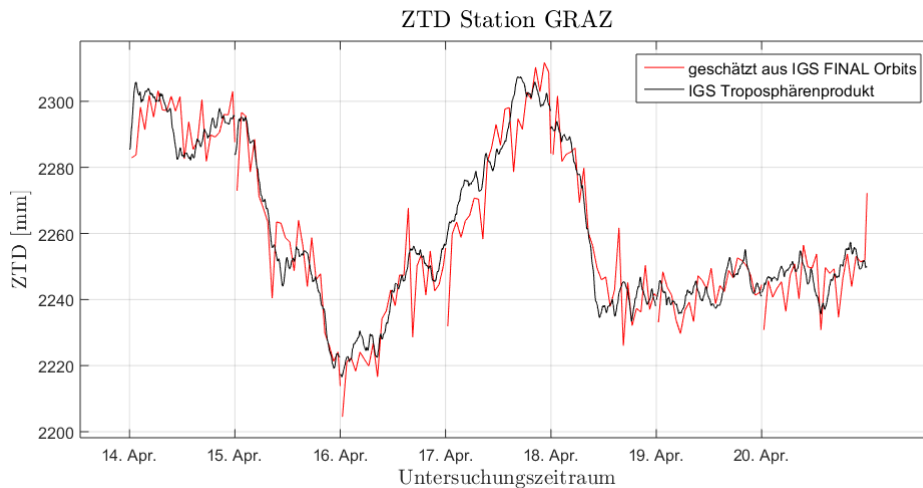


Abb. 5.5: aus Final Orbits/Clock geschätzter ZTD Wert und entsprechender Wert aus IGS-Troposphärenprodukt im Untersuchungszeitraum an der Station GRAZ

5.3 Analyse der Ergebnisse

In den folgenden beiden Abschnitten werden die Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen und Parameterschätzungen analysiert. Zuerst werden die berechneten und mit den unterschiedlichen Datenströmen korrigierten Satelliteninformationen mit IGS Final Orbits verglichen. Anschließend werden die Unterschiede der aus den korrigierten Ephemeriden geschätzten Troposphärenparameter zu jenen aus IGS Final Produkten geschätzten aufgezeigt.

Zum leichteren Verständnis werden im Weiter mit dem IGC01-Datenstrom korrigierte Satelliteninformationen als „*igc01*“ und IGS Final Orbits als „*igs*“ bezeichnet. Diese Nomenklatur gilt analog für IGS01/IGS02/IGS03 - korrigierte Satelliteninformationen.

5.3.1 Analyse der korrigierten Satellitenpositionen/Uhroffsets

Um die Qualität der berechneten und korrigierten Satellitenpositionen bzw. Uhroffsets, als Produkt aus Broadcast Ephemeriden und den verschiedenen Echtzeitkorrekturen, zu untersuchen, werden die Ergebnisse mit den Positionen und Uhroffsets aus IGS - Final Orbits verglichen.

Die erwähnten Kennwertewerden aus den entstehenden Differenzen in X-, Y- und Z-Komponente, bzw. Uhroffsetdifferenzen, berechnet. Die Berechnungen erfolgen pro Satellit und Tag als mittel über alle Epochen, jeweils für alle vier Korrekturdatenströme.

Für die so entstehenden Datensätze werden pro Satellit und Tag, für die erwähnten Komponenten, die statistischen Kennwerte *BIAS* und *RMSE* berechnet. Eine tabellarische

Auflistung aller berechneten Kennwerte (in Form von Kennwerte, pro Komponente, pro Tag bzw. pro Satelliten, pro Korrekturdatenstrom) wurde erstellt und so die Ergebnisse zwischen den einzelnen Korrekturdatenströmen untersucht.

Die Tabellen (5.5) bis (5.8) listen die errechneten Kennwerte, gemittelt über alle Satelliten pro Tag und Korrekturdatenstrom, auf.

Wie schon bei den Untersuchungen in Abschnitt 5.2.1, zeigen sich auch hier auf Grund der sprunghaften Veränderung des korrigierten Uhroffsets große Abweichungen der Uhrkorrektur am **18. April**. Weiters fällt bei den Berechnungen der korrigierten Orbits auf, dass teilweise Lücken in den aufgezeichneten Korrekturdaten vorhanden sind bzw. dass bei manchen Datensätzen nur Korrekturen für wenige Satelliten vorhanden sind. Dies tritt vorwiegend bei den IGS02 und IGS03 Datenströmen auf. Speziell sei hier (ebenfalls) der 18. April genannt. Für diesen sind die Korrekturen nur für wenige Satelliten durchgehend vorhanden.

Da grob fehlerhafte Satelliteninformationen (Ausreißer) bei der Aufbereitung der Daten in NAPEOS erkannt und eliminiert werden, werden die Untersuchungen mit aus den Berechnungen erhaltenen korrigierten Ephemeriden fortgesetzt. Da die fehlerbehafteten Daten am 18. April vor allem die Uhrkorrektur betreffen, die Satellitenpositionen jedoch größtenteils in NAPEOS verwendet werden, werden im Weiteren auch Parameter auf Grundlage der Daten vom 18. April berechnet.

Es ist erkennbar, dass die Berechnungen aus allen Korrekturdatenströmen konstante über den Untersuchungszeitraum konstante Abweichungen zu den IGS Final Orbits aufweisen. Aufgrund diverser nicht detektierte Ausreißer (durch Fehler in den Eingangsdaten; schlechte Sätze an Broadcast Ephemeriden) weichen die BIAS- Kennwerte an manchen Tagen merkbar vom Mittel ab.

Weiters ist an den RMSE- Werten erkennbar, dass die korrigierten Orbits im Dezimeterbereich um die Werte aus Final Orbits schwanken.

Zur besseren Gegenüberstellung der berechneten Ephemeriden sind in Tabelle 5.9 die gemittelten Kennwerte der Ephemeriden aller Datenströme dargestellt. Um die Vergleichbarkeit der Kennwerte ohne offensichtliche Ausreißer zu gewährleisten werden die Tage 14. und 16., sowie beim Uhroffset der 18. von der Mittelbildung ausgeschlossen.

| igc01 minus igs | | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|
| | Δx [mm] | | Δy [mm] | | Δz [mm] | | Δt [ns] | |
| | bias | rmse | bias | rmse | bias | rmse | bias | rmse |
| 14.04. | -21,64 | 771,97 | -2,90 | 771,75 | 15,73 | 776,05 | 0,01 | 0,25 |
| 15.04. | -21,31 | 786,17 | 12,78 | 783,96 | 1,97 | 781,40 | 0,03 | 0,24 |
| 16.04. | -56,06 | 775,05 | -38,79 | 768,57 | -22,26 | 765,59 | 0,05 | 0,24 |
| 17.04. | -2,53 | 776,53 | -72,08 | 788,46 | -26,84 | 786,47 | 0,01 | 0,21 |
| 18.04. | 6,87 | 797,08 | -4,38 | 778,32 | -9,93 | 780,78 | 4,35 | 575,60 |
| 19.04. | 32,10 | 808,55 | 4,92 | 769,63 | -42,30 | 791,50 | 0,00 | 10,46 |
| 20.04. | 2,59 | 798,51 | 10,39 | 785,23 | -4,82 | 784,54 | 0,00 | 0,20 |
| Mittel | -8,57 | 787,70 | -12,87 | 777,99 | -12,64 | 780,91 | 0,64 | 83,89 |

Tab. 5.5: Differenzen der mit IGC01 korrigierten Satelliteninformationen und IGS Final Orbits; Kennwerte pro Tag gemittelt über alle Satelliten

| igs01 minus igs | | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|---------|-----------------|---------|-----------------|---------|-----------------|--------|
| | Δx [mm] | | Δy [mm] | | Δz [mm] | | Δt [ns] | |
| | bias | rmse | bias | rmse | bias | rmse | bias | rmse |
| 14.04. | -13,61 | 1558,81 | 1,60 | 1542,36 | 42,12 | 1555,93 | 0,00 | 0,23 |
| 15.04. | -4,08 | 32,09 | 5,75 | 32,12 | 0,72 | 31,40 | 0,01 | 0,21 |
| 16.04. | -39,27 | 1549,30 | -22,37 | 1535,96 | 68,64 | 1551,14 | 0,01 | 0,21 |
| 17.04. | 0,30 | 34,21 | -1,65 | 40,93 | 4,02 | 25,02 | 0,00 | 0,18 |
| 18.04. | -2,48 | 25,10 | 2,22 | 26,92 | 7,39 | 27,10 | 4,37 | 575,60 |
| 19.04. | 2,10 | 22,82 | 0,25 | 25,98 | 6,60 | 23,03 | 0,00 | 10,77 |
| 20.04. | 1,21 | 23,01 | 1,71 | 24,61 | 7,89 | 23,30 | 0,00 | 0,18 |
| Mittel | -7,98 | 463,62 | -1,78 | 461,27 | 19,62 | 462,42 | 0,63 | 83,91 |

Tab. 5.6: Differenzen der mit IGS01 korrigierten Satelliteninformationen und IGS Final Orbits; Kennwerte pro Tag gemittelt über alle Satelliten

| igs02 minus igs | | | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|---------|-----------------|---------|-----------------|---------|-----------------|--------|--|
| | Δx [mm] | | Δy [mm] | | Δz [mm] | | Δt [ns] | | |
| | bias | rmse | bias | rmse | bias | rmse | bias | rmse | |
| 14.04. | 38,85 | 1566,00 | 10,52 | 1548,49 | 24,20 | 1546,14 | 0,00 | 0,32 | |
| 15.04. | 82,22 | 828,52 | 11,97 | 232,75 | 104,23 | 1002,45 | 0,00 | 0,73 | |
| 16.04. | -5,67 | 1560,74 | -0,69 | 1515,45 | 57,39 | 1529,27 | 0,00 | 0,23 | |
| 17.04. | 3,77 | 65,20 | -5,08 | 73,60 | 6,25 | 37,07 | 0,00 | 0,19 | |
| 18.04. | -1,23 | 29,81 | 0,25 | 36,58 | 10,39 | 36,24 | -5,27 | 565,36 | |
| 19.04. | -0,94 | 35,92 | 0,41 | 38,94 | 10,75 | 34,55 | 0,01 | 11,17 | |
| 20.04. | 1,74 | 33,69 | -0,13 | 34,31 | 10,62 | 31,47 | 0,00 | 0,30 | |
| Mittel | 16,96 | 588,55 | 2,46 | 497,16 | 31,97 | 602,46 | -0,75 | 82,62 | |

Tab. 5.7: Differenzen der mit IGS02 korrigierten Satelliteninformationen und IGS Final Orbits; Kennwerte pro Tag gemittelt über alle Satelliten

| igs03 minus igs | | | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|---------|-----------------|---------|-----------------|---------|-----------------|--------|--|
| | Δx [mm] | | Δy [mm] | | Δz [mm] | | Δt [ns] | | |
| | bias | rmse | bias | rmse | bias | rmse | bias | rmse | |
| 14.04. | -13,13 | 1546,67 | 36,03 | 1555,99 | 54,74 | 1534,05 | 0,02 | 0,90 | |
| 15.04. | 6,60 | 142,42 | 8,61 | 138,84 | 10,76 | 156,68 | -0,59 | 4,09 | |
| 16.04. | -46,02 | 1563,49 | 1,46 | 1532,81 | 67,45 | 1541,48 | 0,02 | 2,58 | |
| 17.04. | 6,32 | 43,15 | -8,99 | 49,35 | 9,08 | 37,30 | 0,00 | 0,46 | |
| 18.04. | 2,79 | 37,46 | 0,39 | 39,24 | 8,45 | 41,58 | -7,92 | 586,59 | |
| 19.04. | -2,86 | 35,22 | 4,86 | 38,72 | 15,27 | 35,86 | 0,00 | 11,03 | |
| 20.04. | -1,61 | 33,48 | 1,10 | 33,98 | 12,33 | 33,44 | 0,00 | 0,42 | |
| Mittel | -6,85 | 485,98 | 6,21 | 484,13 | 25,44 | 482,91 | -1,21 | 86,58 | |

Tab. 5.8: Differenzen der mit IGS03 korrigierten Satelliteninformationen und IGS Final Orbits; Kennwerte pro Tag gemittelt über alle Satelliten

| gemittelte Kennwerte der korrigierten Echtzeit Ephemeriden | | | | | | | | | |
|--|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|------|--|
| | Δx [mm] | | Δy [mm] | | Δz [mm] | | Δt [ns] | | |
| | bias | rmse | bias | rmse | bias | rmse | bias | rmse | |
| igc01 | 3,54 | 793,37 | -9,68 | 781,12 | -16,38 | 784,94 | 0,02 | 1,93 | |
| igs01 | -0,59 | 27,45 | 1,65 | 30,11 | 5,32 | 25,97 | 0,01 | 1,96 | |
| igs02 | 17,11 | 198,63 | 1,48 | 83,23 | 28,45 | 228,36 | 0,00 | 2,16 | |
| igs03 | 2,25 | 58,34 | 1,19 | 60,03 | 11,18 | 60,97 | -0,09 | 3,25 | |

Tab. 5.9: Kennwerte der Differenzen aller korrigierten Ephemeriden und IGS Final Orbits (*berechnet ohne offensichtlich schlechte Datensätze*)

5.3.2 Analyse der geschätzten Troposphärenparameter

In Folgenden werden die aus den zuvor dargestellten, korrigierten Satelliteninformationen geschätzten Troposphärenparameter untersucht. Hierfür werden die Ergebnisse mit aus präzisen IGS- Produkten geschätzten Parametern verglichen. Die Untersuchung gliedert sich in folgende Punkte:

- (1) Vergleich mit Troposphärenparametern geschätzt aus IGS Final Orbits/Clocks
- (2) Vergleich von geschätzten Parametern aus korrigierten Ephemeriden mit unterschiedlicher zeitlicher Auflösung
- (3) Vergleich mit Troposphärenparametern geschätzt aus IGS Ultra Rapid Orbits

Vergleiche mit Troposphärenparametern aus Final Orbits/Clocks

Es werden die Kennwerte der Differenzen zwischen den korrigierten Ephemeriden geschätzten Troposphärenparametern und Parametern, geschätzt aus IGS Final Orbits und Clocks, berechnet. Die Auswertung erfolgt über die ausgewählten Referenzstationen im Untersuchungszeitraum für alle vier Troposphärenparameter und für alle drei Korrekturdatenströme.

Die berechneten Kennwerte der Differenzen, der einzelnen Komponenten, werden tabellarisch für jeden Korrekturdatenstrom gemittelt pro Station in den folgenden Tabellen (5.10) bis (5.13) angeführt.

In den Abbildungen (5.6) & (5.7) sind die berechneten ZTDs aus den einzelnen Korrekturdatenströmen und IGS Final Orbits für die Station GRAZ repräsentativ über den gesamten Untersuchungszeitraum und im Detail für einen Tag illustriert.

| igc01 minus igs | | | | | | | | |
|-----------------|-------------------|-------|-------------------|-------|---------------------|------|---------------------|------|
| | Δ ZTD [mm] | | Δ ZWD [mm] | | Δ gradN [mm] | | Δ gradE [mm] | |
| | bias | rmse | bias | rmse | bias | rmse | bias | rmse |
| ADIS | -2,20 | 15,66 | -2,20 | 15,66 | -0,41 | 1,66 | -0,28 | 1,47 |
| AUCK | 3,18 | 14,28 | 3,18 | 14,28 | 0,07 | 0,95 | 0,23 | 1,04 |
| DUBO | -2,26 | 14,14 | -2,26 | 14,14 | 0,03 | 1,30 | -0,29 | 1,12 |
| GRAZ | 0,14 | 8,94 | 0,13 | 8,94 | -0,07 | 0,68 | 0,13 | 0,51 |
| LHAZ | 1,18 | 18,45 | 1,18 | 18,45 | 0,18 | 1,40 | 0,84 | 1,72 |
| OHI3 | 0,10 | 9,73 | 0,09 | 9,73 | -0,05 | 0,80 | 0,10 | 0,70 |
| PENC | -0,09 | 12,50 | -0,09 | 12,50 | -0,23 | 1,19 | 0,28 | 1,03 |
| POVE | -1,15 | 13,39 | -1,14 | 13,39 | 0,33 | 1,18 | 0,34 | 1,19 |
| THTI | 1,98 | 18,57 | 1,98 | 18,56 | 0,09 | 1,34 | 0,05 | 1,89 |
| ULAB | -4,29 | 11,78 | -4,29 | 11,78 | 0,09 | 1,22 | 0,35 | 1,14 |
| WTZR | 0,27 | 8,99 | 0,27 | 8,99 | -0,04 | 0,67 | 0,10 | 0,59 |
| ZIMM | 1,73 | 11,11 | 1,73 | 11,11 | 0,02 | 0,94 | 0,12 | 0,79 |
| Mittel | -0,12 | 13,13 | -0,12 | 13,13 | 0,00 | 1,11 | 0,16 | 1,10 |

Tab. 5.10: Kennwerte der Differenzen der einzelnen Troposphärenparameter aus igc01 und igs Daten

| igs01 minus igs | | | | | | | | |
|-----------------|-------------------|-------|-------------------|-------|---------------------|------|---------------------|------|
| | Δ ZTD [mm] | | Δ ZWD [mm] | | Δ gradN [mm] | | Δ gradE [mm] | |
| | bias | rmse | bias | rmse | bias | rmse | bias | rmse |
| ADIS | -2,64 | 16,42 | -2,64 | 16,42 | -0,35 | 1,68 | -0,27 | 1,43 |
| AUCK | 2,88 | 12,87 | 2,89 | 12,87 | -0,01 | 0,90 | 0,21 | 1,11 |
| DUBO | -1,10 | 14,44 | -1,09 | 14,44 | 0,00 | 1,21 | -0,23 | 1,12 |
| GRAZ | 0,01 | 9,27 | 0,00 | 9,27 | -0,01 | 0,70 | 0,09 | 0,54 |
| LHAZ | 3,00 | 18,29 | 3,00 | 18,30 | 0,35 | 1,51 | 0,84 | 1,63 |
| OHI3 | 0,75 | 9,85 | 0,74 | 9,86 | -0,11 | 0,72 | 0,24 | 0,83 |
| PENC | -0,09 | 12,32 | -0,08 | 12,32 | -0,12 | 1,23 | 0,14 | 1,08 |
| POVE | -1,97 | 14,44 | -1,96 | 14,45 | 0,43 | 1,08 | 0,22 | 1,14 |
| THTI | 3,70 | 19,37 | 3,70 | 19,37 | 0,29 | 1,58 | 0,07 | 1,83 |
| ULAB | -3,94 | 12,07 | -3,95 | 12,07 | 0,13 | 1,23 | 0,30 | 1,16 |
| WTZR | -0,05 | 9,36 | -0,05 | 9,36 | 0,05 | 0,70 | 0,05 | 0,65 |
| ZIMM | 1,75 | 12,04 | 1,74 | 12,04 | 0,13 | 1,00 | 0,06 | 0,83 |
| Mittel | 0,19 | 13,40 | 0,19 | 13,40 | 0,06 | 1,13 | 0,14 | 1,11 |

Tab. 5.11: Kennwerte der Differenzen der einzelnen Troposphärenparameter aus igs01 und igs Daten

| igs02 minus igs | | | | | | | | |
|-----------------|-------------------|-------|-------------------|-------|---------------------|------|---------------------|------|
| | Δ ZTD [mm] | | Δ ZWD [mm] | | Δ gradN [mm] | | Δ gradE [mm] | |
| | bias | rmse | bias | rmse | bias | rmse | bias | rmse |
| ADIS | -5,31 | 17,57 | -5,30 | 17,59 | -0,53 | 1,86 | 0,21 | 1,24 |
| AUCK | 0,74 | 12,44 | 0,74 | 12,43 | -0,48 | 1,27 | 0,08 | 1,03 |
| DUBO | 4,01 | 12,88 | 4,01 | 12,88 | -0,15 | 1,10 | -0,19 | 0,96 |
| GRAZ | 1,04 | 8,38 | 1,03 | 8,38 | 0,18 | 0,79 | 0,04 | 0,56 |
| LHAZ | 2,99 | 17,60 | 3,00 | 17,59 | 0,29 | 1,36 | 0,40 | 1,12 |
| OHI3 | 1,21 | 9,58 | 1,20 | 9,58 | -0,23 | 0,69 | 0,28 | 0,87 |
| PENC | 4,50 | 13,30 | 4,51 | 13,32 | 0,52 | 1,36 | -0,06 | 1,08 |
| POVE | -0,56 | 11,63 | -0,55 | 11,63 | 0,01 | 1,25 | 0,04 | 1,43 |
| THTI | 2,57 | 16,36 | 2,56 | 16,35 | -0,13 | 0,83 | 0,38 | 1,41 |
| ULAB | -4,93 | 11,78 | -4,93 | 11,77 | 0,02 | 0,89 | 0,16 | 0,96 |
| WTZR | 1,16 | 8,62 | 1,14 | 8,61 | 0,17 | 0,72 | 0,05 | 0,54 |
| ZIMM | 2,81 | 11,41 | 2,81 | 11,40 | 0,38 | 1,18 | 0,05 | 0,84 |
| Mittel | 0,85 | 12,63 | 0,85 | 12,63 | 0,00 | 1,11 | 0,12 | 1,00 |

Tab. 5.12: Kennwerte der Differenzen der einzelnen Troposphärenparameter aus igs02 und igs Daten

| igs03 minus igs | | | | | | | | |
|-----------------|-------------------|-------|-------------------|-------|---------------------|------|---------------------|------|
| | Δ ZTD [mm] | | Δ ZWD [mm] | | Δ gradN [mm] | | Δ gradE [mm] | |
| | bias | rmse | bias | rmse | bias | rmse | bias | rmse |
| ADIS | 3,42 | 26,94 | 3,42 | 26,94 | 0,34 | 2,41 | 0,01 | 2,04 |
| AUCK | 1,86 | 23,05 | 1,86 | 23,05 | -0,11 | 1,60 | 0,05 | 1,41 |
| DUBO | -0,41 | 16,87 | -0,41 | 16,87 | -0,18 | 1,87 | -0,25 | 1,63 |
| GRAZ | 0,74 | 14,62 | 0,73 | 14,61 | -0,11 | 0,92 | -0,10 | 0,96 |
| LHAZ | 0,50 | 26,49 | 0,50 | 26,49 | 0,44 | 2,06 | -0,17 | 1,45 |
| OHI3 | 1,54 | 12,92 | 1,53 | 12,92 | 0,08 | 0,75 | 0,26 | 1,24 |
| PENC | -0,73 | 19,62 | -0,73 | 19,63 | -0,10 | 1,75 | -0,17 | 1,58 |
| POVE | -2,65 | 16,67 | -2,65 | 16,67 | 0,01 | 1,10 | -0,01 | 1,49 |
| THTI | -0,92 | 32,12 | -0,91 | 32,12 | 0,03 | 1,69 | 0,48 | 2,13 |
| ULAB | 5,99 | 48,57 | 0,16 | 26,11 | 0,12 | 1,51 | 0,23 | 1,34 |
| WTZR | 2,64 | 20,77 | 1,14 | 14,82 | 0,00 | 0,92 | -0,21 | 1,11 |
| ZIMM | 2,78 | 18,42 | 2,78 | 18,42 | 0,13 | 1,29 | -0,22 | 1,41 |
| Mittel | 1,23 | 23,09 | 0,62 | 20,72 | 0,05 | 1,49 | -0,01 | 1,48 |

Tab. 5.13: Kennwerte der Differenzen der einzelnen Troposphärenparameter aus igs03 und igs Daten

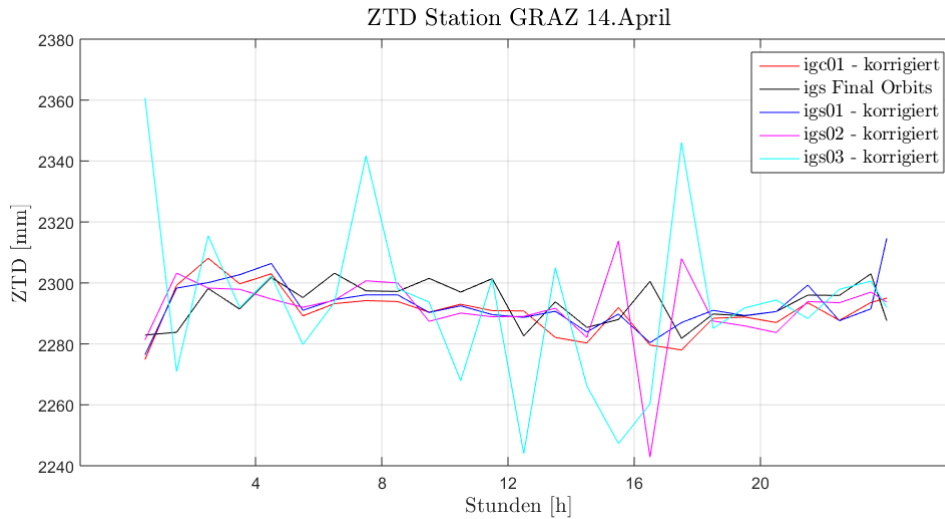


Abb. 5.6: Verlauf des geschätzten ZTD der Station GRAZ aus den Korrekturdatenströmen und IGS Final Orbits für den 14. April

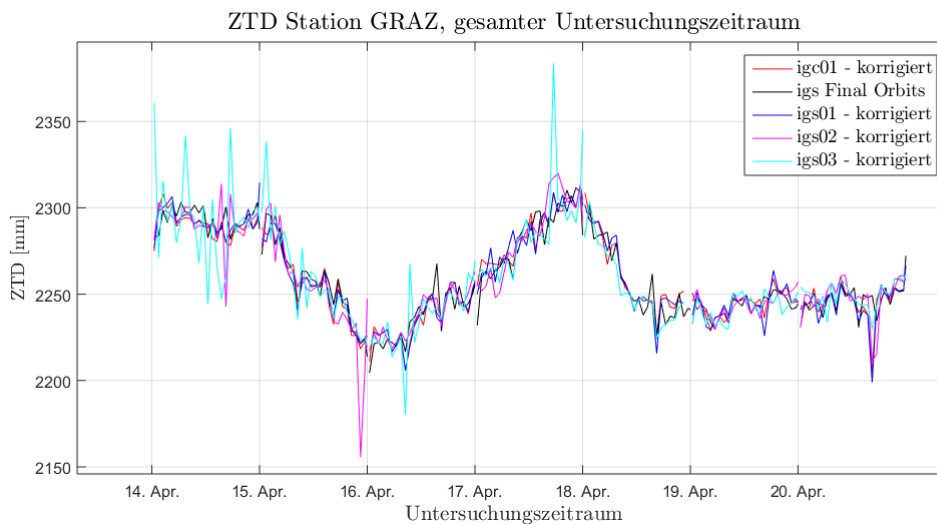


Abb. 5.7: Verlauf des geschätzten ZTD der Station GRAZ aus den Korrekturdatenströmen und IGS Final Orbits über den gesamten Untersuchungszeitraum

Die Gegenüberstellung der mittleren Kennwerte für alle vier Datenströme ist in Tabelle 5.14 zusammengefasst.

Dies zeigt, dass die geschätzten Parameter aus den IGC01 und IGS01 Korrekturströmen ähnliche Ergebnisse liefern. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sie auf Basis gleicher Daten und Prozessierungen erstellt werden. Der Unterschied liegt im Bezugspunkt, welcher bei den Berechnungsschritten NAPEOS korrigiert wird. Differenzen in den Ergebnissen der

| gemittelte Kennwerte über alle Stationen | | | | | | |
|--|-------------------|-------|---------------------|------|---------------------|------|
| | Δ ZTD [mm] | | Δ gradN [mm] | | Δ gradE [mm] | |
| | bias | rmse | bias | rmse | bias | rmse |
| igc01 | -0,12 | 13,13 | 0,00 | 1,11 | 0,17 | 1,10 |
| igs01 | 0,19 | 13,40 | 0,07 | 1,13 | 0,14 | 1,11 |
| igs02 | 0,85 | 12,63 | 0,01 | 1,11 | 0,12 | 1,00 |
| igs03 | 1,70 | 24,93 | 0,04 | 1,59 | 0,00 | 1,55 |

Tab. 5.14: Kennwerte der Differenzen der einzelnen Troposphärenparameter aus allen vier Korrekturdatenströmen und IGS Final Orbits

geschätzten Parameter aus beiden Strömen liegen in den angebrachten Korrekturen aus den NAPEOS Datenbank-files. Konkret wird das Antennenkorrekturen-File „*igs08.atx*“ (Quelle IGS) verwendet.

An einzelnen Stationen erreichen auch die Parameter geschätzt aus IGS02 bzw IGS03 gute Ergebnisse. Teilweise sogar kleinere Differenzen als die IGC01 Lösung. Eine mögliche Abhängigkeit der Ergebnisse von Höhe oder Breitengrad der jeweiligen Station konnte an dieser Stelle allerdings nicht nachgewiesen werden.

Im Vergleich zu den IGC01 und IGS01 Lösungen weisen IGS02/IGS03 - Lösungen mehr Ausreißer und unbrauchbare Daten für einzelne Satelliten auf. Dies ist vor allem durch Datenlücken in der Aufzeichnung der Korrekturdatenströme bedingt.

Zusätzlich wird in der Auflistung der einzelnen Werte für die vier Troposphärenparameter *ZTD*, *ZWD*, *gradN* und *gradE* sichtbar, dass die Differenzen für *ZTD* und *ZWD* (bis auf Rundungsfehler) die selben Werte enthalten. Dies ist dadurch begründet, dass sich die Werte nur um die Daten aus dem in Kapitel 4.3.1 erläuterten Zusammenhang zu modellierten ZHDs unterscheiden.

Für alle Berechnungen in NAPEOS wird das selbe Modell für ZHDs verwendet (GPT, Saastamoinen, vgl. 4.3.2). Bei den Differenzbildungen wird dieser Unterschied zwischen *ZTDs* und *ZWDs* eliminiert und es entstehen die selben Werte. Deshalb werden in den weiteren Auflistungen geschätzter Troposphärenparameter, zur besseren Übersichtlichkeit, nur noch die Werte für *ZTD* und *gradN* bzw. *gradE* aufgelistet.

Als Gesamtergebnis aller geschätzten Parameter über alle Tage, alle Satelliten und alle Stationen weisen die Troposphärenparameter auf Basis der Daten des IGC01 Korrekturdatenstrom die geringsten Abweichungen zu den geschätzten Parametern aus IGS Final Orbits auf.

Vergleich mit Schätzungen aus Echtzeit-korrigierten Ephemeriden mit geringerer zeitlicher Auflösung

Die Echtzeitkorrekturdaten stehen in einer hohen zeitlichen Auflösung zur Verfügung (5 Sekunden bzw. 60 Sekunden). Dies bietet einen weiteren Vorteil gegenüber präzisen Ephemeriden, welche alle mit einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten bereitgestellt werden. Vor allem bei den Uhroffsets bringt die höhere zeitliche Auflösung von Korrekturen Vorteile. Durch Uhrkorrekturen in hoher zeitlicher Auflösung können die unterschiedlichen Drifts der Satellitenuhren besser korrigiert werden, als mit interpolierten Werten auf Grundlage eines Stützstellenintervalls von 15 Minuten.

Für diese Untersuchung wurden grundsätzlich Echtzeit-korrigierte Satellitenpositionen und Uhroffsets in einem Intervall von 30 Sekunden berechnet. Um die Auswirkungen der höheren zeitlichen Auflösung auf die Differenzen bei der Parameterschätzung zu IGS Final Orbits zu zeigen, werden korrigierte Satelliteninformationen repräsentativ auf Basis des IGC01-Korrekturdatenstroms in einem zeitlichen Intervall von 15 Minuten berechnet. Die anschließend geschätzten Troposphärenparameter werden analog zu den vorangegangenen Untersuchungen prozessiert und die Kennwerte ihrer Differenzen zu Final Orbits in Tabelle 5.15 gegenübergestellt.

| igc01 (15 min) minus igs | | | | | | |
|--------------------------|-------------------|-------|---------------------|------|---------------------|------|
| | Δ ZTD [mm] | | Δ gradN [mm] | | Δ gradE [mm] | |
| | bias | rmse | bias | rmse | bias | rmse |
| ADIS | -1,71 | 11,26 | -0,42 | 1,31 | -0,02 | 1,27 |
| AUCK | 3,33 | 11,45 | 0,16 | 0,83 | 0,14 | 0,93 |
| DUBO | -2,08 | 9,91 | 0,14 | 0,99 | -0,16 | 0,83 |
| GRAZ | 1,97 | 14,84 | 0,10 | 0,46 | 0,11 | 0,44 |
| LHAZ | 0,79 | 11,34 | 0,29 | 1,22 | 0,56 | 1,11 |
| OHI3 | 0,81 | 8,70 | -0,10 | 0,67 | 0,11 | 0,67 |
| PENC | 8,19 | 45,00 | 0,12 | 0,83 | 0,23 | 0,81 |
| POVE | -0,38 | 10,70 | 0,22 | 1,07 | 0,23 | 1,12 |
| THTI | 1,78 | 16,59 | 0,18 | 1,37 | 0,03 | 1,60 |
| ULAB | 0,38 | 21,76 | 0,02 | 0,98 | 0,23 | 0,91 |
| WTZR | 0,04 | 6,37 | 0,12 | 0,44 | 0,13 | 0,47 |
| ZIMM | 0,67 | 8,49 | 0,21 | 0,64 | 0,10 | 0,60 |
| Mittel | 1,15 | 14,70 | 0,09 | 0,90 | 0,14 | 0,90 |

Tab. 5.15: Kennwerte der Differenzen zwischen Parametern geschätzt aus IGC01 korrigierten Ephemeriden im Intervall 15 Minuten und IGS Final Orbits

Die gemittelten Kennwerte der Differenzen über alle Stationen weisen eine deutliche Ver-

schlechterung zur Schätzung der Parameter aus korrigierten Orbits mit einer höheren Auflösung auf. Beim Betrachten der Ergebnisse für einzelne Stationen ist ersichtlich, dass die Abweichungen zu Parametern aus hochauflösenderen Orbits nicht pauschal deutlich schlechter ausfällt.

In Abbildung 5.8 sind die geschätzten ZTD-Werte aus IGC01-Korrekturen mit einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten und 30 Sekunden, sowie jene aus IGS Final Orbits für die Station GRAZ visualisiert.

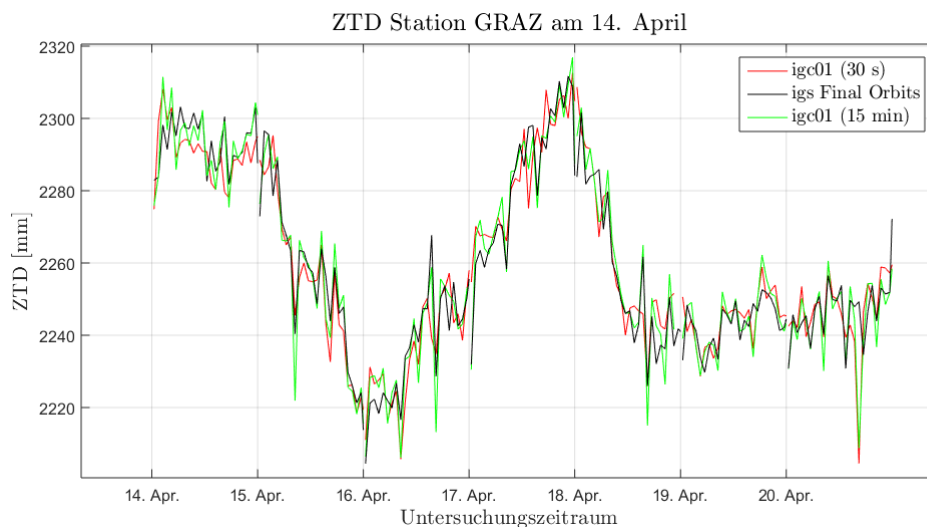


Abb. 5.8: Verlauf des geschätzten ZTD der Station GRAZ aus IGC01 mit zeitlicher Auflösung von 15 Minuten und 30 Sekunden und IGS Final Orbits über den gesamten Untersuchungszeitraum

Da alle Echtzeitkorrekturen in einer *deutlich höheren zeitlichen Auflösung verfügbar* sind als präzise Ephemeriden, ist es für präzise Echtzeitanwendungen ratsam diese hohe zeitliche Auflösung auch zu implementieren.

Vergleich mit Schätzungen aus Ultra Rapid Orbits

Wie in Kapitel 3 erläutert, stellen Ultra Rapid Orbits das Ephemeriden Produkt dar, das für nahe Echtzeit-Anwendungen am häufigsten verwendet wird. Die Echtzeitkorrekturen stellen also in der praktischen Anwendung eine direkte Alternative zu den IGUs dar.

Im Folgenden werden die Kennwerte für geschätzte ZTDs aus IGU und jene aus den verschiedenen Korrekturdatenströmen in Vergleich gestellt.

Aus den verschiedenen Ultra Rapid Orbit-Produkten werden igu-00 und igu-18 gewählt, um die beiden Fälle „Großteil prädiziert“ und „Großteil beobachtet“ zu untersuchen.

| Differenzen der verschiedenen igu - Berechnungen | | | | | | |
|--|-------------------|-------|---------------------|------|---------------------|------|
| | Δ ZTD [mm] | | Δ gradN [mm] | | Δ gradE [mm] | |
| | bias | rmse | bias | rmse | bias | rmse |
| igu-00 | 13,34 | 43,71 | 0,20 | 3,43 | 0,02 | 3,33 |
| igu-18 | 6,64 | 20,66 | 0,05 | 1,55 | -0,19 | 1,64 |
| igc01 | -0,12 | 13,13 | -0,00 | 1,11 | 0,17 | 1,20 |
| igs01 | 0,20 | 13,40 | 0,07 | 1,13 | 0,14 | 1,11 |
| igs02 | 0,85 | 12,63 | 0,01 | 1,11 | 0,12 | 1,00 |
| igs03 | 1,23 | 23,09 | 0,05 | 1,49 | -0,01 | 1,48 |

Tab. 5.16: Kennwerte der Differenzen zwischen Parametern geschätzt aus Echtzeitkorrekturen und aus IGS Ultra Rapid Orbits

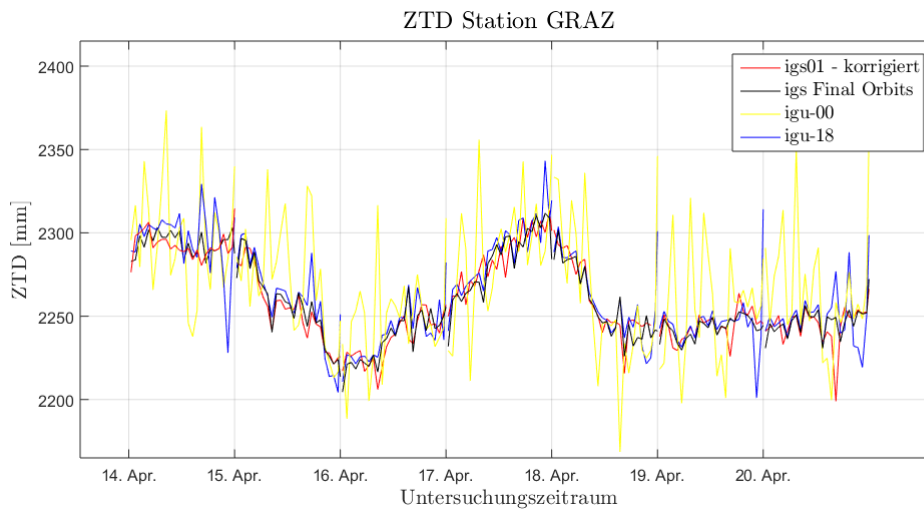


Abb. 5.9: Verlauf des geschätzten ZTD der Station GRAZ aus IGC01, IGU-00, IGU-18 und IGS Final Orbits

Es zeigt sich, dass durch die Verwendung von Satelliteninformationen aus Echtzeitkorrekturen bei der Schätzung von Troposphärenparametern deutlich geringere Differenzen zu den Lösungen aus IGS Final Orbits erzielt werden, als bei Verwendung von Ultra Rapid Orbit - Produkten. Wie in Tabelle 5.16 und Abbildung 5.9 ersichtlich ist, gilt dies sowohl für Lösungen aus allen Korrekturdatenströmen, als auch für alle Ultra Rapid Produkte - da hier die beiden Extremfälle der IGU-Produkte verwendet wurden.

6 Schlussfolgerungen

Durch Bereitstellung der IGS Echtzeitkorrekturen werden PPP - Methoden für praktische Anwendungen in (nahe) Echtzeit ermöglicht. Dies ist im Hinblick auf Schätzung von Troposphärenparametern vorteilhaft für die kurzfristige Wettervorhersage.

In dieser Arbeit sind die Grundlagen für die Anwendung des PPP - Verfahrens und die Möglichkeit daraus Informationen über die Parameter der Troposphäre zu schätzen dargestellt. Weiters werden die präzisen Ephemeriden, welche erst mit einer zeitlichen Verzögerung verfügbar sind, vorgestellt und die IGS - Echtzeitkorrekturen, ihre Entstehung und ihre Verbreitung erläutert. Es werden auch die Unterschiede der vier einzelnen Korrekturdatenströme (Bezugspunkt, Erstellungsprozess) dargestellt. Die einzelnen Berechnungsschritte zur Bestimmung von Satellitenpositionen und Uhroffsets aus Broadcast Ephemeriden und das Anbringen der Korrekturen wird beschrieben.

Für die Untersuchung wurden Satellitenpositionen und Uhroffsets aus Broadcast Ephemeriden berechnet. Diese wurden im Anschluss mit den Korrekturwerten aus den vier Echtzeitdatenströmen korrigiert. Das Einlesen der relevanten Informationen aus den diversen Eingangsdatensätzen und die anschließende Berechnung und Korrektur der Satellitenpositionen und Uhroffsets erfolgt in einer eigens erstellten MatLab-Routine. Die Echtzeitdatenströme weisen eine hohe zeitliche Auflösung der Korrekturen (5 bzw. 60 Sekunden) auf. Für die Berechnung in MatLab kann die zeitliche Auflösung der resultierenden korrigierten Satellitenpositionen und Uhroffsets im sp3-Format frei gewählt werden.

Es werden in den von der Routine erstellten sp3-Daten nur korrigierte Satelliteninformationen gespeichert. Sind zu gewünschten Zeitpunkten in den Eingangsdaten keine Korrekturen bzw. zu ihnen passende Sätze an Broadcast Ephemeriden vorhanden, werden keine Werte gespeichert.

Beim Erstellen der korrigierten Satelliteninformationen fällt auf, dass die mittels NTRIP-

Client aufgezeichneten Korrekturdaten zu manchen Zeitpunkten Lücken aufweisen und dadurch für einzelne Satelliten zu manchen Zeitpunkten keine korrigierten Informationen berechnet und gespeichert werden.

Die so prozessierten korrigierten Satelliteninformationen liegen schließlich im selben Format wie präzise Ephemeriden vor und können in gleicher Weise für diverse weitere Anwendungen verwendet werden.

In dieser Arbeit wurden mit den erstellten Ephemeriden anschließend Troposphärenparameter (ZTD, ZWD, gradN und gradE) geschätzt. Für die Berechnungen wurde der Zeitraum vom 14. bis 20. April gewählt. Die Schätzung der Parameter wurde im Software-Paket NAPEOS für Beobachtungen einer Auswahl an IGS-Referenzstationen durchgeführt.

Die aus den einzelnen Berechnungsschritten resultierenden Werte werden durch Vergleiche zu IGS-Referenzprodukten analysiert. Für die Validierung der in MatLab berechneten korrigierten Ephemeriden werden die Ergebnisse der Bahn- und Uhrberechnung des IGC01 - Datenstroms mit einem IGS Vergleichsprodukt, das auf selbe Weise berechnet wird (IGC01 Korrekturen an aus Broadcast Ephemeriden berechnete Daten anbringen) verglichen. Es kann hierbei gezeigt werden, dass die Abweichungen der in MatLab prozessierten Lösungen und jener des Vergleichsproduktes im Sub-Millimeter bzw. Sub-Nanosekunden Bereichs liegen. Durch dies wird die Richtigkeit der getätigten Berechnungsschritte bei der Erstellung der IGC01 korrigierten Satelliteninformationen bestätigt. Für die weiteren drei Korrekturdatenströme werden keine vergleichbaren IGS- Produkte angeboten. Die Berechnungsschritte in der MatLab-Routine erfolgen allerdings für alle Korrekturdatenströme gleich und unterscheiden sich nur durch die verschiedenen gegebenen Eingangsdaten, wodurch auch auf die Richtigkeit der berechneten Werte aus den anderen Datenströmen geschlossen wird.

Bei weiterem Vergleich der korrigierten Satelliteninformationen mit den hochpräzisen IGS-Final Orbits zeigen sich, je nach Komponente (X , Y , Z , T) und Korrekturdatenstrom mittlere Abweichungen zwischen 7 und 17 mm, für X und Y , zwischen 12 und 32 mm für Z , sowie zwischen 2 und 91 ps für den Uhroffset. Weiters ist zu erkennen, dass die Differenzen große Schwankungen (bis zu 780 mm bzw. 2 ns) vom Mittel aufweisen.

Bei diesen Vergleichen zeigen sich jedoch zunächst unerwartet hohe Differenzen zwischen berechneten Werten aus allen Korrekturdatenströmen und IGS Final Orbits am 18. April - vor allem in den Uhroffsets. Bei der weiteren Untersuchung der aus den Korrekturdaten berechneten Uhroffsets, zeigt sich eine sprunghafte Veränderung (Verschlechterung) um 22 Uhr. Eine Unregelmäßigkeit in der Matlab-Routine bei den Berechnungen für diesen Tag konnte nicht festgestellt werden, wodurch die sprunghafte Änderung auf die Ein-

gangsdaten aus den Korrekturdatenströmen (betrifft alle) zurückzuführen ist. Ob es sich hierbei um fehlerhafte Korrekturdaten oder Fehler in der Aufzeichnung der Korrekturdatenströme handelt wurde an dieser Stelle nicht geklärt.

Da bei der Aufbereitung der Daten durch NAPEOS grob fehlerhafte Satelliteninformationen erkannt und eliminiert werden, wird mit der weiteren Berechnung und Schätzung der Troposphärenparameter (auch für den 18. April) fortgefahren.

Bei der Untersuchung der Ergebnisse der Schätzung von Troposphärenparametern werden diese mit aus IGS Final Orbits geschätzten Parametern verglichen und die statistischen Kennwerte BIAS und RMSE der Differenzen berechnet. Die Auswertung erfolgt als Mittelwert aller Epochen pro Satellit, Tag und Station. Anschließend wird für die Gesamtvergleichbarkeit der Daten aus einzelnen Korrekturdatenströmen ein gemittelter *BIAS/RMSE* über alle Stationen berechnet.

Es zeigt sich, dass die aus dem IGC01 - Korrekturdatenstrom geschätzten Parameter die geringsten Abweichungen zu jenen aus Final Orbits geschätzten aufweisen (rund 0.118 mm im ZTD). Die Ergebnisse des IGS01 Datenstroms sind leicht abweichend. Dies ist dadurch begründet, dass sich diese beiden Datenströme nur um den Bezugspunkt, und damit um den Antennenoffset unterscheiden, welcher bei den hier getätigten Berechnungen aus der NAPEOS-Datenbank entnommen wird, und offenbar geringe Abweichungen zu den beim Erstellen der Korrekturdaten verwendeten aufweist.

Die Parameter geschätzt aus IGS02 und IGS03 Korrekturdatenströmen weisen mittlere Abweichungen von 0.9 bzw. 1.7 mm über alle Stationen im ZTD auf. An einzelnen Stationen sind die Differenzen zu den aus IGS Final Orbits berechneten Werten deutlich geringer. Eine mögliche Abhängigkeit zu Lage der Station (Breite, Höhe) kann nicht nachgewiesen werden.

Weiters zeigt sich, dass die korrigierten Satellitenpositionen und Uhroffsets in einem großen Bereich (*RMSE = einige Dezimeter*) um die Werte aus IGS Final Orbits schwanken.

Wie erwähnt, schließt die NAPEOS-Datenaufbereitung alle Beobachtungen zu Satelliten von der Ausgleichung aus, für welche nicht konsequent über den gesamten berechneten Zeitraum (Tag) Informationen über Position und Uhroffset vorhanden sind. Da vor allem die IGS02 und IGS03 Korrekturdatenströme im Untersuchungszeitraum Lücken aufweisen und bei nicht vorhandenen Korrekturdaten in der Berechnung in dieser Arbeit keine Satelliteninformationen im sp3-File gespeichert werden, bleibt nach der NAPEOS-Datenaufbereitung nur eine geringe Anzahl an Satelliten für die Ausgleichung verfügbar. Dies begründet die teilweise (zu manchen Zeitpunkten) großen Differenzen zu den IGS Final Orbits bzw. die Abweichungen zu den Differenzen von IGC01 und IGS01.

Da die Korrekturdatenströme mit einer hohen zeitlichen Auflösung verfügbar sind, ist es

auch möglich Positionen und Uhroffsets in hoher zeitlicher Auflösung ohne Interpolationsverfahren zu bestimmen. Die Auswirkung unterschiedlicher zeitlicher Auflösungen der Satelliteninformationen für die Troposphärenschätzung in NAPEOS wird auf Basis von IGC01 korrigierten Satellitenpositionen und Uhroffsets im Intervall von 30 Sekunden und 15 Minuten (entspricht dem Intervall von präzisen IGS Produkten) untersucht. Es werden auch hierfür jeweils die Differenzen zu aus Final Orbits berechneten Parametern ermittelt. Im Mittel über alle Beobachtungstage liefert die Berechnung mit hochauflösenderen Daten geringere Abweichungen (0.1 mm versus 1.1 mm im ZTD). An den einzelnen Stationen weisen auch die Berechnungen im 15 Minuten Intervall teilweise ähnlich geringe Differenzen zur IGS Final Orbit Lösung auf. Die Abweichungen zwischen Berechnungen aus unterschiedlichen zeitlichen Auflösungen der Satelliteninformationen sind nicht so drastisch als erwartet. Die Verwendung von zeitlich hochauflösender Produkten liefert jedoch bessere Ergebnisse.

Die IGS Ultra Rapid Produkte, welche mit einer zeitlichen Verzögerung von einigen Stunden veröffentlicht werden, bilden zur Zeit die in vielen Echtzeitnahen Anwendungen verwendeten Standards. Die IGS Echtzeitkorrekturen bilden eine direkte Alternative zu diesen Produkten. Aus diesem Grund werden bei der Analyse der berechneten Parameter auch Vergleiche zu aus IGS Ultra Rapid Orbits berechneten Parametern aufgestellt. Für die Untersuchung werden aus den Produkten igu-00 (alle prädiziert) bzw. igu-18 (größtenteils beobachtet) Troposphärenparameter geschätzt und die Differenzen der entstehenden Lösungen zu aus IGS Final Orbit berechneten Parametern erstellt. Beim Vergleich der Differenzen mit jenen Differenzen der Lösung mit Echtzeitdaten korrigierten Ephemeriden wird deutlich, dass die Lösungen aller vier Korrekturdatenströme deutlich geringere Differenzen zu den Referenzdaten aufweisen (0.1 bis 1.2 mm im ZTD) als die Lösungen aus den beiden Ultra Rapid Orbits (6.6 und 13.3 mm). Weiters zeigt sich, dass die Lösungen aus IGU Produkten eine wesentlich höhere Schwankungsbreite als jene aus korrigierten Ephemeriden aufweisen. Vor allem die geschätzten Troposphärenparameter aus igu-00 Ephemeriden weisen deutlich höhere RMSE- Werte auf.

Die wesentlichen Verbesserungen durch die Echtzeit-korrigierten Daten weisen auf eine höhere Genauigkeit Ephemeriden hin, sind zum Teil aber auch durch die höhere zeitliche Auflösung (*30 Sekunden versus 15 Minuten*) bedingt.

In der vorliegenden Arbeit wird die Berechnung korrigierter Satelliteninformationen gezeigt und ein entsprechender Berechnungsablauf erstellt. Die aus den berechneten Ephemeriden geschätzten Parameter der Troposphäre weisen Unterschiede zwischen 0.1 und 1.2 mm im ZTD auf. Der IGC01 Korrekturdatenstrom liefert Ergebnisse mit den geringsten Abweichungen zu Referenzlösungen.

Für weitere Untersuchungen ist es von Interesse den Untersuchungszeitraum zu erweitern

um die Auswirkungen von Datenlücken in den Korrekturdaten an einzelnen Beobachtungstagen zu minimieren. Weiters ist zu klären aus welchen Gründen es zu diesen Datenlücken kommt und eine brauchbare Vorgehensweise bei Lücken in den Korrekturdaten zu erstellen, um bei der Aufbereitung der Daten für die Parameterschätzung nicht zu viele Informationen zu verlieren.

Literaturverzeichnis

- Federal Agency for Cartography and Geodasy (2014). BKG Ntrip Client (BNC) Manual. Version 2.11.0, Frankfurt, 2014
- Böhm, J., Niell, A., Tregoning, P., Schuh, H. (2006). Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather data. *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, 2006
- Böhm, J., Schuh, H., (2013). *Atmospheric Effects in Space Geodesy*. Springer Verlag, 2013
- Byun, S. H., Bar-Sever, Y. E., (2007). A new type of troposphere zenith path delay product of the international GNSS service. *Journal of Geodasy*, Volume 83, Issue 3, p 1-7, 03/2009
- Caissy, M., Loukis, A., Weber, G., Hernandez-Pajares, M., Hugentobler, U. (2012). The International GNSS Real-Time Service. *GPS World*, 23(6): p 52-58, 2012
- Davis, J.L., Herring, T.A., Shapiro, I.I., Rogers, A.E.E., Elgered, G., (1985). Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. *Radio Science*, Volume 20, Number 6, p 1593-1607, 1985
- European Space Agency, Springer, T.A., (2009) *NAPEOS - Mathematical Models and Algorithms*. ESA, European Space Operation Center (ESOC), 2009.
- Offizielle Webseite der European Space Agency (ESA): <http://www.esa.int/ESA>, Stand: Mai 2016
- Fernandez-Hernandez, I., et al. (2015). Galileo Commercial Service, Testing GNSS High Accuracy and Authentication. *InsideGNSS*, 01/2015.
- Global Positioning System, Standard Positioning Service. Signal Specification, <http://www.navcen.uscg.gov/pubs/gps/sigspec/gpssps1.pdf>, Stand: Mai 2016
- Grinter, T., Roberts, C., (2013). Real Time Precise Point Positioning: Are We There Yet?. *IGNSS Symposium 2013*
- Hadas, T., Bosy, J., (2015). IGS RTS precise orbits and clocks verification and quality degradation over time. *GPS Solutions*, 105, 2015.

- Hoffmann-Wellenhof, B., Legat, K. & Wieser, M. (2003). Navigation - principles of navigation and guidance. Springer, Wien New York.
- Hoffmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. & Wasle, E. (2008). GNSS - Global Navigation Satellite Systems. Springer, Wien New York.
- Hopfield, H.S., (1969). Two quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. Journal for Geophysical Research, 08/69
- offizielle Webseite des IGS: igs.org/, Stand April 2016
- GPS-Directorate, Systems Engineering & Integration. Interface Specification IS-GPS-200.
- Kaplan, E. & Hegarty, J. (2006). Understanding GPS - Principles and Applications. 2nd Edition, Artech House, Boston.
- Karabatic, A., (2011). Precise Point Positioning (PPP) - an alternative technique for ground based GNSS troposphere monitoring. Dissertation am Department für Geodäsie und Geoinformation der Technischen Universität Wien, Wien 2011.
- Klaffenböck, E., (2007). Troposphärische Laufzeitverzögerung von GNSS-Signalen - Nutzen aktiver Referenzstationsnetze für die Meteorologie. Schriftenreihe der Studienrichtung Vermessung und Geoinformation, Technische Universität Wien (*Dissertation*), Institut für Geodäsie und Geophysik, 2007
- Leick, A., Rapoport, L. & Tatarnikov, D. (2015). GPS Satellite Surveying. 4th Edition, John Wiley and Sons, Hoboken.
- ESA-Navipedia Webseite: navipedia.net, Stand: Mai 2016
- Radio Technical Commission for Maritime Services, (2013). RTCM Standard 10403.2 Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Services - Version 3, Arlington, Virginia, 2013
- Saastamoinen, J., (1970). The physical Theory of astronomical refraction. *abstract*, Eos Trans. AGU, 1970.
- Saastamoinen, J., (1973). Atmospheric Correction for the Troposphere and the Stratosphere in Radio Ranging of Satellites. Geophysical Monograph 15, American Geophysical Union, Washington D.C., 1972
- Smith, E., Weintraub, S., (1953). The Constant in the Equation for Atmospheric Refractive Index at Radio Frequencies. Journal of Research of the National Bureau of Standards, Vol. 50, No. 1, Research Paper 2385, 1953

- Subirana, J.S., Zornoza, J.M.J., Henandez-Pajares, M., (2013). GNSS Data Processing, Volume I: Fundamentals and Algorithms. ESA Communications Production, European Space Agency (2013).
- Thayer, G.D., (1974). An improved equation for the radio refractive index of air. *Radio Science*, 1974, Volume 9, Issue 10.
- Tobias, G., et al. (2015). Preparing for the Galileo Commercial Service- Proof of Concept and Demonstrator Development. Conference Paper 2014
- Weber, R., Opitz, M., (2005). GNSS-Echtzeitorbitkontrolle auf Basis Internet-transferierter (NTRIP) RTCM-Datenströme. VGI, Wien, 2005
- Weber, G., Maervart, L., Neumaier, P., Söhne, W., Stürze, A., (2013). Präzise GNSS Bahnen/Uhren: Offener Echtzeitdienst zur Positionsbestimmung. *Präsentation*, FGS Workshop, Wetzell, Deutschland, April 2013
- Zhang, J., Zhang, K., Grenfell, R., Deakin, R., (2006). GPS Satellite Velocity and Acceleration Determination using Broadcast Ephemeris. *The Journal of Navigation*, 2006, 59, p. 293-305, UK 2006

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Geometrische Interpretation der Pseudostrecken und Empfängeruhrfehler . . . | 4 |
| 2.2 | Signalweg in der Troposphäre | 23 |
| 2.3 | Generierung von IWV-Werten aus GPS-Meteorologie (Klaffenböck [2007]) | 29 |
| 3.1 | Ausschnitt der Final Orbits vom 14. April 2015 mit Header und Satelliten- informationen | 32 |
| 3.2 | Prozessierungsablauf der IGS-RTS (Caissy, et al. [2012]) | 36 |
| 3.3 | RT-Lösungen versus IGS Rapid products (Caissy, et al. [2012]) | 37 |
| 3.4 | NTRIP-Systemaufbau (Weber & Opitz [2005]) | 38 |
| 3.5 | Ausschnitt des IGC01-files am 14. April 2015 | 40 |
| 4.1 | Prozessablauf der Troposphärenschätzung; verschiedene Eingangs- und Aus- gangsgrößen | 44 |
| 4.2 | Ausschnitt der für die Berechnung verwendeten Broadcast Ephemeriden . . | 44 |
| 4.3 | Ausgewähltes Netz an IGS-Stationen für die Schätzung troposphärischer Laufzeitverzögerungen | 46 |
| 4.4 | Ausschnitt und gewählte Funktionen in <i>NAPEOS SEQUENCE</i> | 56 |
| 4.5 | Bezugspunkte der verschiedenen Orbitprodukte und Korrekturen im Be- rechnungsprozess. Rot = COM; Grün = APC | 60 |
| 4.6 | Korrekturmöglichkeiten des Antennenphasenoffsets in der NAPEOS-Funktion <i>OrbUpd.bin</i> | 60 |
| 5.1 | Entwickeltes Datenanalyse-Tool zum Vergleich von geschätzten Troposphä- renparametern (Screenshot) | 63 |
| 5.2 | Differenz der Position von Satellit 2 am 15. April, zwischen IGC01-korrigierten Ephemeriden (berechnet) und IGC01-Vergleichsprodukt | 66 |
| 5.3 | Differenz des Uhroffsets von Satellit 2 am 15. April, zwischen IGC01- korrigierten Ephemeriden (berechnet) und IGC01-Vergleichsprodukt . . . | 66 |
| 5.4 | Differenz des Uhroffsets von Satellit 2 am 18. April, zwischen IGC01- korrigierten Ephemeriden (berechnet) und IGC01-Vergleichsprodukt . . . | 67 |
| 5.5 | aus Final Orbits/Clock geschätzter ZTD Wert und entsprechender Wert aus IGS-Troposphärenprodukt im Untersuchungszeitraum an der Station GRAZ | 69 |
| 5.6 | Verlauf des geschätzten ZTD der Station GRAZ aus den Korrekturdaten- strömen und IGS Final Orbits für den 14. April | 76 |
| 5.7 | Verlauf des geschätzten ZTD der Station GRAZ aus den Korrekturdaten- strömen und IGS Final Orbits über den gesamten Untersuchungszeitraum . | 76 |
| 5.8 | Verlauf des geschätzten ZTD der Station GRAZ aus IGC01 mit zeitlicher Auflösung von 15 Minuten und 30 Sekunden und IGS Final Orbits über den gesamten Untersuchungszeitraum | 79 |

| | | |
|-----|---|----|
| 5.9 | Verlauf des geschätzten ZTD der Station GRAZ aus IGC01, IGU-00, IGU-18 und IGS Final Orbits | 80 |
|-----|---|----|

Tabellenverzeichnis

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | Kepler Elemente | 6 |
| 2.2 | GPS Bahndaten | 16 |
| 2.3 | Parameter des World Geodatic System 84 (Subirana, et al. [2013]) | 17 |
| 2.4 | Drei Trägerphasen der GPS-Signale | 19 |
| 2.5 | Parameter der Refraktivität | 24 |
| 3.1 | Genauigkeit und Latenz der IGS Bahn- und Uhrparameter | 35 |
| 4.1 | Verwendete Parameter aus Broadcast Ephemeriden | 45 |
| 4.2 | Verwendete Parameter aus Echtzeitkorrekturdaten | 45 |
| 4.3 | Parameter der Schätzung an der Station: A priori Werte und a priori Sigma | 59 |
| 5.1 | Abweichungen IGC01 (korrigiert) und IGC01 (Vergleichsprodukt): Mittlere Kennwerte pro Tag im Untersuchungszeitraum | 65 |
| 5.2 | Kennwerte der Differenzen zwischen IGC01 korrigierten Ephemeriden und IGC01-Vergleichsprodukt über alle Satelliten und alle Tage (ohne 18.April) | 65 |
| 5.3 | mittlere Kennwerte der Abweichungen zwischen ZTD geschätzt aus Final Orbits und IGS- Final Troposphärenprodukt | 67 |
| 5.4 | Differenzen der geschätzten ZTD-Werte zu IGS Final Troposphärenprodukten für ausgewählte Stationen und a priori Sigma-Werte der Ausgleichung | 68 |
| 5.5 | Differenzen der mit IGC01 korrigierten Satelliteninformationen und IGS Final Orbits; Kennwerte pro Tag gemittelt über alle Satelliten | 71 |
| 5.6 | Differenzen der mit IGS01 korrigierten Satelliteninformationen und IGS Final Orbits; Kennwerte pro Tag gemittelt über alle Satelliten | 71 |
| 5.7 | Differenzen der mit IGS02 korrigierten Satelliteninformationen und IGS Final Orbits; Kennwerte pro Tag gemittelt über alle Satelliten | 72 |
| 5.8 | Differenzen der mit IGS03 korrigierten Satelliteninformationen und IGS Final Orbits; Kennwerte pro Tag gemittelt über alle Satelliten | 72 |
| 5.9 | Kennwerte der Differenzen aller korrigierten Ephemeriden und IGS Final Orbits (<i>berechnet ohne offensichtlich schlechte Datensätze</i>) | 73 |
| 5.10 | Kennwerte der Differenzen der einzelnen Troposphärenparameter aus igc01 und igs Daten | 74 |
| 5.11 | Kennwerte der Differenzen der einzelnen Troposphärenparameter aus igs01 und igs Daten | 74 |
| 5.12 | Kennwerte der Differenzen der einzelnen Troposphärenparameter aus igs02 und igs Daten | 75 |
| 5.13 | Kennwerte der Differenzen der einzelnen Troposphärenparameter aus igs03 und igs Daten | 75 |
| 5.14 | Kennwerte der Differenzen der einzelnen Troposphärenparameter aus allen vier Korrekturdatenströmen und IGS Final Orbits | 77 |
| | | 91 |

| | | |
|------|---|----|
| 5.15 | Kennwerte der Differenzen zwischen Parametern geschätzt aus IGC01 korrigierten Ephemeriden im Intervall 15 Minuten und IGS Final Orbits . . . | 78 |
| 5.16 | Kennwerte der Differenzen zwischen Parametern geschätzt aus Echtzeitkorrekturen und aus IGS Ultra Rapid Orbits | 80 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|----------------|--|
| ACC | Analysis Center Coordinator |
| APC | Antenna Phase Center |
| ASCII | American Standard Code for Information Interchange |
| BKG | Bundesamt für Kartographie und Geodäsie |
| brd | Broadcast Ephemeris |
| c | Lichtgeschwindigkeit |
| COM | Center of Mass |
| DGPS | Differential GPS |
| DOP | Dilution of Precision |
| ESA | European Space Agency |
| ESOC | European Space Operation Center |
| FKP | Flächenkorrekturparameter |
| GPS | Global Positioning System |
| GNSS | Global Navigation Satellite System |
| gradE | Ost-Gradient der Troposphärenverteilung |
| gradN | Nord-Gradient der Troposphärenverteilung |
| IAG | International Association of Geodasy |
| igr | Rapid Orbits |
| IGS | International GNSS Service |
| igs | Final Orbits |
| igu | Ultra Rapid Orbits |
| IODE | Issue of Data Ephemeris |
| ITRF | International Terrestrial Reference Frame |
| ITRS | International Terrestrial Reference System |
| PPP | Precise Point Positioning |
| PPS | Precise Positioning Service |
| MAC | Master / Auxiliary Concept |
| μ | geozentrische Gravitationskonstante |
| NAVSTAR | Navigation system with timing and ranging |
| NTRIP | Network Transport of RTCM via Internet Protocol |
| PCO | Phase Center Offset |
| PCV | Phase Center Variation |
| PDGPS | Precise Differential GPS |
| RINEX | Receiver Independent Exchange Format |

| | |
|-----------------|--|
| RMSE | Root Mean Square Error |
| RTAC | Real Time Analysis Center |
| RTCM | Radio Technical Commission for Maritime Services |
| RTPPP | Real Time Precise Point Positioning |
| RTS | Real Time Service |
| RT-Corr. | Real Time Korrekturen |
| RTK | Real Time Kinematic |
| SINEX | Solution Independent Exchange Format |
| sp3 | Format für Orbitdaten |
| SPS | Standard Positioning Service |
| SSR | State in Space Representation |
| STEC | Slant Total Electron Content |
| UPDs | Uncalibrated Phase Delays |
| VRS | Virtuelle Referenz Station |
| WGS 84 | World Geodetic System 84 |
| ZHD | Zenith Hydrostatic Delay |
| ZTD | Zenith Total Delay |
| ZWD | Zenith Wet Delay |

Josef Schwarz

Curriculum Vitae

Education

- 2013–2016 **Masters of Science**, *Vienna University of Technology*, Austria.
Specialized in Geodesy and Geoinformations
- 2009–2013 **Bachelor of Science**, *Vienna University of Technology*, Austria.
Specialized in Geodesy and Geoinformations
- 2000–2008 **Matura**, *Klemens Maria Hofbauer Gymnasium*, Katzelsdorf, Austria.
AHS

Graduation Thesis

Master Thesis

Title *Analysis of the quality of GPS Real Time Ephemeris for determining tropospheric propagation delays*

Supervisors Associate Professor Robert Weber

Bachelor Thesis

Title *Comparison of values of rail track gauges and bank height from sensor data and tachymetrically measured ones*

Supervisors Associate Professor Guenther Retscher

Experience

2010–Present **Surveyor**, AREA ZT GMBH, Wr. Neustadt, Austria.
a wide range of work in office and field staff.

Detailed achievements:

- data measurements for cadastral subdivision plans
- evaluation of recorded data
- computation of data for geodetic engineering tasks

09/2014– **Surveyor**, GEODATA ZT GMBH, Leoben, Austria.

01/2015 monitoring measurements of the existing route of the subway line U1 in Vienna. Detailed terrestrial measurement of the steel support structure in subsections of the track.

09/2014– **Tutor**, RESEARCH GROUP FOR ENGINEERING GEODESY, *Vienna University of Technology*, Vienna, Austria.

06/2015 practical assistance at measuring exercises

2832 Thernberg, Eichberg 260 – Austria

☎ (0043) 676 9628969 • ✉ josef.b.schwarz@gmx.at

1/2

Computer skills

Basic JAVA, PYTHON, OPALS, Adobe Illustrator, Linux
Intermediate L^AT_EX, MicroStation, MS office, NAPEOS
Advanced MATLAB, AutoCad, Geosi Verm, RM-Map

Languages

German Mothertongue
English Advanced
French Basic

Conversationally fluent
Basic words and phrases only

