Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist in der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt und zugänglich.
http://www.ub.tuwien.ac.at

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology.
http://www.ub.tuwien.ac.at/eng

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
Vienna University of Technology

DIPLOMARBEIT

Optimierung eines GNSS-Beobachtungsnetzes mit Hilfe von 1-Frequenzempfängern zur 3D-Bestimmung der Refraktivität in der Troposphäre

Ausgeführt am Institut für
Geodäsie und Geoinformation

unter der Anleitung von
Ao. Prof. Dr. Robert Weber

und

Dipl.-Ing. Gregor Möller

durch

Jadre Maras
Alszeile 95/3/11
1170 Wien

Wien, Oktober 2015

Kurzfassung

Der Wasserdampfgehalt spielt eine entscheidende Rolle in der Atmosphäre. Eine genaue Kenntnis über die Verteilung des Wasserdampfgehaltes könnte dabei helfen präzisere Wettermodelle bzw. Vorhersagen und Beurteilungen von aufkommenden Unwettern zu erstellen. Die GNSS-Tomographie ist eine Methode, die zeitlich und räumlich hochaufgelöste Wasserdampffelder mit hoher Genauigkeit zur Verfügung stellen kann. Voraussetzung dafür ist ein ausreichend dichtes GNSS-Stationsnetz, damit genügend Beobachtungen für die Berechnung des Modells vorliegen. Ziel dieser Arbeit ist es, Untersuchungen betreffend der Stationsverteilung und der Stationsdichte durchzuführen, insbesondere um das bestehende Stationsnetz mit zusätzlichen GNSS-Einfrequenzempfängern zu ergänzen. Weiters soll der Einfluss einer vollständigen Galileo-Satellitenkonstellation, zusätzlich zum bestehenden GPS-System, auf das Tomographiemodell (Voxelmodell) getestet werden. Hierzu wurde ein MATLAB-Skript erstellt, welches den *Line of Sight*-Vektor, von den Satelliten zur GNSS-Station, berechnet und durchquerte Zellen im Voxelmodell registriert. In diesen Zellen kann anhand der GNSS-Tomographie die troposphärische Refraktion ermittelt werden. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die GNSS-Stationshöhe den wichtigsten Paramter für das Stationsnetz darstellt. Die horizontale Positionierung spielt insofern keine wichtige Rolle, als dass die Stationen nicht unmittelbar an den äußeren Grenzen des Voxelmodells platziert werden sollten, sondern möglichst nahe an gemeinsamen Eckpunkten von Voxelzellen. Die Verwendung einer vollständigen Galileo-Satellitenkonstellation vermag die Beobachtungen nahezu zu verdoppeln, wobei eine hohe Redundanz an Beobachtungen gegeben wäre, was einen positven Aspekt bei der Auswertung des Tomographiemodells darstellt. Innerhalb eines Testgebietes konnte der Anteil an durchlaufenen Voxeln mit zusätzlichen GNSS-Hilfsstationen um 34% auf ungefähr 86%, erhöht werden. Dies sollte für eine Auswertung des Tomographiemodells und der Berechnung des Wasserdampfgehaltes ausreichen.

Abstract

The water vapor content plays a crucial role in the atmosphere. Accurate knowledge about the distribution of the water vapor content could help to create more accurate weather models respectively forecasts and assessments of emerging storms. The GNSS tomography is a method that can provide a high temporal and spatial resolution of water vapour fields with high accuracy. This requires a sufficiently dense GNSS station network, so that there are sufficient observations for the calculation of the model. The aim of this study is to undertake investigations concerning the distribution and the density of the station network, in particular, to supplement the basic dual frequency network with additional single frequency receivers. Furthermore, the influence of a full Galileo satellite constellation has been tested for the tomographic model (voxel model) in addition to the existing GPS system. For this purpose, a MATLAB script was established, which calculates the Line of Sight vector from the satellites to the GNSS stations and registers traversed cells in the voxel model. In these cells the tropospheric refractivity can be determined by applying GNSS tomography of the troposphere. The investigations have shown that the height of the supplement GNSS stations is the most important parameter for the station network. The horizontal positioning does not play an important role, as these stations should not be placed directly at the boundaries of the voxel model, but as close to the common vertices of the voxel cells. The use of a full Galileo satellite constellation almost doubles the amount of observations, with a high redundancy which is a positive aspect in the evaluation of the tomographic model. Within a test area the amount of traversed voxels was raised by 34% to about 86% by using additional GNSS auxiliary stations. This should be sufficient for an evaluation of the tomography model and the calculation of the water vapor content.

Inhaltsverzeichnis

Abstract **i**

1 Einleitung **1**
1.1 Der Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre . . . 1
1.2 Kurzüberblick - Was ist GNSS Tomographie? . . . 1
1.3 Motivation - Ziel der Arbeit . . . 3

2 Global Navigation Satellite System (GNSS) **5**
2.1 GPS . . . 5
2.1.1 Weltraumsegment . . . 6
2.1.2 Bodensegment . . . 7
2.1.3 Benutzersegment . . . 9
2.2 Galileo . . . 10
2.2.1 Weltraumsegment . . . 10
2.2.2 Bodensegment . . . 11
2.2.3 Benutzersegment . . . 11
2.3 Funktionsweise der Satellitennavigation . . . 13
2.3.1 GNSS-Signalstruktur . . . 15
2.3.2 Eliminierung bzw. Modellierung der Ionosphäre . . . 16

3 GNSS-Tomographie **21**
3.1 Der Tomographieansatz . . . 21
3.1.1 Iterative Rekonstruktionstechnik . . . 25
3.1.2 Zwangsfreie Ausgleichung . . . 27

4 Das Untersuchungsgebiet **31**
4.1 Das Voxelmodell . . . 31
4.2 Auswirkungen der Topographie . . . 33
4.2.1 Voxelmodell - Ost . . . 33
4.2.2 Voxelmodell - West . . . 35
4.3 Erstellung von Abschattungsmasken . . . 35
4.4 Positionierung der GNSS Hilfsstationen . . . 37

5 Erstellung des Voxelmodells **43**
5.1 Aufbau des Algorithmus 43
5.2 Funktionsweise des Algorithmus 47

6 Resultate **49**
6.1 Auswahl des Beobachtungszeitraumes 50
6.2 Das westliche Untersuchungsgebiet 51
6.3 Das östliche Untersuchungsgebiet 55

7 Schlussfolgerung **59**

Abbildungsverzeichnis **63**

Tabellenverzeichnis **65**

Literaturverzeichnis **67**

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Der Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre

Alle Wetterphänomene die vom Wasserdampfgehalt und dessen Verteilung abhängig sind, wie Regen, Schnee, Wind, Hagel oder Wolken, spielen sich in der Troposphäre ab. Die Troposphäre ist charakterisiert durch eine Temperaturabnahme mit der Höhe, eine starke Durchmischung der Gase (warme Gase steigen auf und kalte sinken ab) und durch die Wolken- und Niederschlagsbildung auf Grund des hohen Wassergehaltes und der starken Vertikalwinde (siehe Abb. 1.1), Kraus (2004). Die Dicke der feuchten Troposphärenschicht, ist sowohl abhängig von der geographischen Breite, als auch von der Jahreszeit. So reicht die Troposphäre von etwa 8 km an den Polen bis zu 17 km Höhe am Äquator und im Winter weist die Schicht eine bis zu 2 km geringere Höhe auf, als im Sommer. Sie beinhaltet ungefähr 90 Prozent der gesamten Luftmasse, sowie beinahe auch den gesamten Wasserdampfgehalt der Erdatmosphäre.

Die Troposphäre gilt heutzutage als größter Unsicherheitsfaktor für die Erstellung von Wettermodellen. Was sich anfänglich nach einem Problem ausschließlich für Meteorologen anhört ist auch für Geodäten entscheidend, denn der Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre wirkt sich auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Mikrowellen aus und zählt somit zu einem limitierenden Faktor im Bereich der Positionierung und Navigation.

1.2 Kurzüberblick - Was ist GNSS Tomographie?

Die GNSS[1]-Tomographie ist ein neuartiges Verfahren, welches auf Daten von GNSS-Bodenstationen zurückgreift, um die Verteilung des Wasserdampfes in der Atmosphäre durch ein 3D-Modell darzustellen. Die Laufzeitverzögerungen der GNSS-Signale, welche durch den atmosphärischen Wasserdampfgehalt verursacht werden, können dazu verwendet werden um Rückschlüsse über die Beschaffenheit der Atmosphäre zu schließen. Liegt ein ausreichend dichtes Netz an GNSS-Bodenstationen vor, so kann mit Hilfe des tomographischen Verfahrens, ein hohes zeit-

[1] Globale Navigationssatellitensysteme

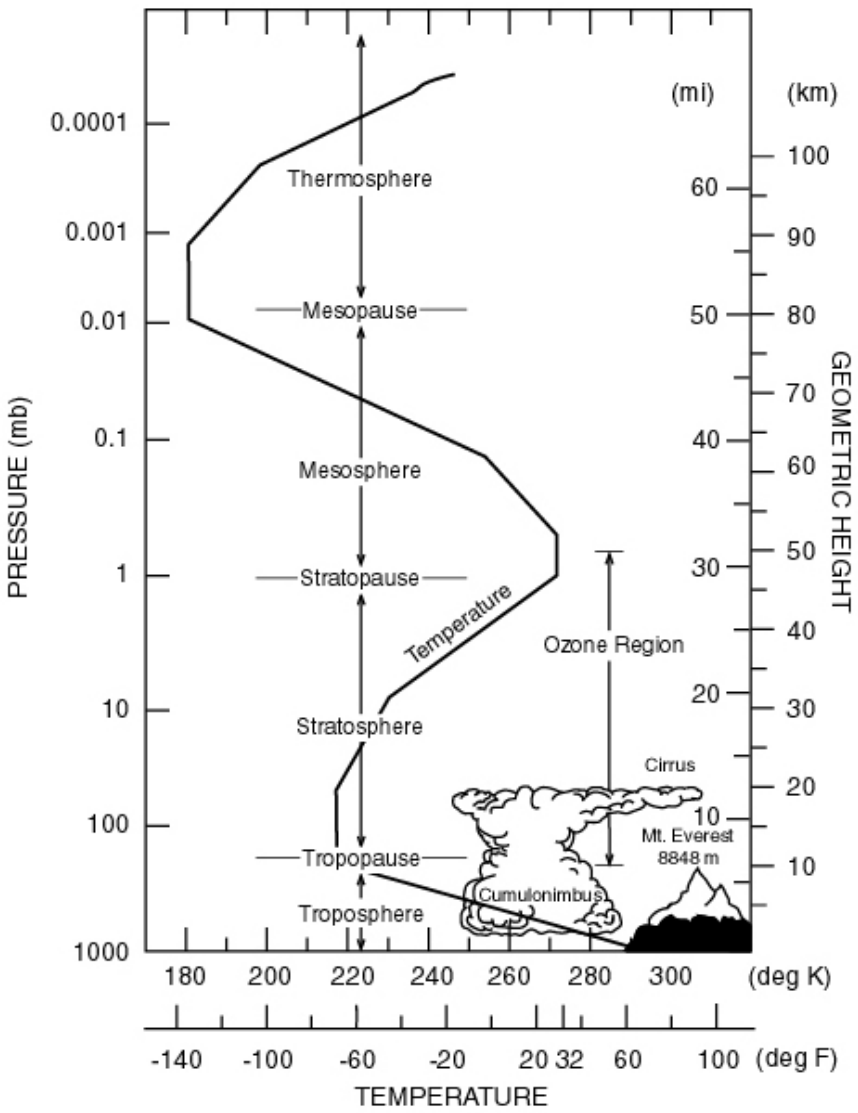


Abbildung 1.1: Das vertikale Temperaturprofil der „U.S. Standard Atmosphere 1976“ (Quelle: 1999 Oxford University Press)

lich und räumlich aufgelöstes Wasserdampffeld-Modell generiert werden. Die Erstellung eines solchen Modells interessiert nicht nur Geodäten, sondern insbesondere auch Meteorologen.

Die Meteorologie ist an der Verteilung des Wasserdampfes interessiert, um genauere Wettermodelle generieren zu können. Bereits Anfang der 90er Jahre haben Wissenschaftler, wie Bevis *et al.* (1992), das große Potential der durch die Tropo- und Ionosphäre laufenden GNSS-Signale erkannt . Mit Hilfe des Tomographieansatzes gelingt sogar die Detektion und Vorhersage von drastischen Wetterveränderungen (Manning *et al.* (2012)).

Im Bereich der Navigation bzw. der Positionierung vermag die GNSS-Tomographie eine entscheidende Rolle zu spielen, soweit ein ausreichendes GNSS-Stationsnetz zur Verfügung steht.

Nach Bender & Raabe (2007) erschweren unzureichende geometrische Parameter (Anzahl der Bodenstationen und Satelliten, Beobachtungszeit, verwendete Satellitensysteme, etc.) die Auswertung eines solchen Tomographiemodells. Aus diesem Grund ist es für jedes Projektgebiet notwendig, ein angemessen dichtes Netz an Bodenstationen aufzuweisen, um möglichst viele Beobachtungen zu generieren.

1.3 Motivation - Ziel der Arbeit

In Kooperation mit der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) in Wien, wurde im Oktober 2013 an der TU Wien das Projekt „3D ground based GNSS Atmospheric Tomography“ (Kurztitel: „*GNSS-ATom*“), im Rahmen der ASAP11 Ausschreibung der FFG gestartet. Das Projekt zielt auf die 3D-Modellierung der unteren Troposphäre in der alpinen Region ab. Der untersuchte Modellbereich weist eine horizontale Ausdehnung von 100 km x 100 km sowie 11 vertikalen Ebenen auf. Die Refraktivität innerhalb des Modellraums soll mit einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten bestimmt werden.

Die Beschreibung des feuchten Anteils der Troposphäre mittels des Tomographieansatzes wird durch die Prozessierung von GNSS-Beobachtungen (GPS, GLONASS und in späterer Folge auch Galileo) ermöglicht, welche von einem österreichischen GNSS-Referenznetzbetreiber (EPOSA[1]) zur Verfügung gestellt werden. Die beobachteten Zeit-/ Wegdifferenzen entsprechen der troposphärischen Signalverzögerung, die nicht zur Gänze durch das hydrostatische a priori Modell erfasst werden. Mithilfe dieser Residuen ist es möglich die feuchte Refraktivität innerhalb eines jeden Voxels zu rekonstruieren und innerhalb eines 3D-Gitters, oberhalb des Untersuchungsgebietes, darzustellen. Anhand der geringen Anzahl von Beobachtungen, verursacht durch die geringe Anzahl von GNSS-Referenzstationen im Vergleich zur Voxelanzahl, handelt es sich hierbei um ein schlecht konditioniertes System. Verschiedene Lösungsansätze wie der *Unconstrained Approach* (zwangsfreie Ausgleichung) oder die *Algebraic Reconstruction Techniques* (ART) (iterative Rekonstruktionstechnik) wurden zur Bestimmung solch eines Systems entwickelt. Beim ART-Algorithmus wird nach Bender *et al.* (2010) durch die Verwendung eines feuchten Refraktivitätenfeldes als Startwert das System stabilisiert und nach jedem Iterationsschritt verbessert. Mittels der Strahlenverfolgung (*ray-tracing*) werden in jedem Iterationsschritt alle Wegdifferenzen berechnet. Im letzten Bearbeitungschritt werden die feuchten Refraktivitäten dieses Gittermodells in Druck, Temperatur und Feuchte transformiert, um von der ZAMG weiterverarbeitet werden zu können.

Das Ziel der vorliegenden Diplomarbeit ist es, das Potential einer möglichen Verdichtung dieses Beobachtungsnetzes durch billige GNSS-Einfrequenzempfänger näher zu untersuchen. Zudem waren die entstehenden Auswirkungen auf das Modell zu testen, welche durch die Prozessierung von Galileo-Signalen (E1 und E5) entstehen. Schließlich war eine statistisch begründete Empfeh-

[1] Echtzeit-Positionierungs-Systems Austria, eposa.at

lung für die Installation von Hilfsstationen zu erarbeiten, wobei der wirtschaftliche Aspekt der Errichtung und Inbetriebnahme einer solchen Station nicht aus dem Auge verloren werden sollte.

Kapitel 2

Global Navigation Satellite System (GNSS)

Unter GNSS versteht man den Zusammenschluss aller, zur Positionierung und Navigation, nutzbaren Satellitensysteme, wie zum Beispiel das amerikanische System GPS (*Global Positioning System*), sein noch im Aufbau befindliches europäisches Pendent *Galileo*, das russische GLONASS (***Glo**balnaja **Na**wigazionnaja **S**putnikowaja **S**istema*) oder das chinesische System *Beidou*. Weiters gehören auch satellitenbasierte Ergänzungssysteme (SBAS[1]) zu dieser Begrifflichkeit, welche zusätzliche Informationen, wie Uhr-, Orbit- und Ionosphärenkorrekturen, von geosynchronen Satelliten an den Nutzer aussenden, um so die Zuverlässigkeit, Genauigkeit und Verfügbarkeit der Positionsbestimmung zu erhöhen.

Dieses Kapitel geht kurz auf die Satellitensysteme GPS und Galileo ein, welche für diese Masterarbeit von Relevanz sind. Neben der historischen Entwicklung beider Systeme wird auch auf die unterschiedlichen Konstellationen und Charakteristika eingegangen. Ausführlichere Darstellungen sind in den einschlägigen Lehrbüchern zur Satellitengeodäsie, zum Beispiel Seeber (2003), Hofmann-Wellenhof *et al.* (2003), Hofmann-Wellenhof *et al.* (2008), Kaplan & Hegarty (2006), Subirana *et al.* (2013) und Nurmi *et al.* (2015) zu finden.

2.1 GPS

In den frühen 1960er Jahren haben sich mehrere U.S. Regierungsorganisationen, darunter das *Department of Defense* (DOD), die *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) und das *Department of Transportation* (DOT), dazu entschlossen ein satellitengestütztes System zur dreidimensionalen Positionsbestimmung zu entwickeln. Das optimale System sollte folgende Attribute aufweisen können: eine globale Abdeckung, kontinuierliche Operabilität (bei jeglicher Wetterlage), die Möglichkeit zur Verwendung auf hoch dynamischen Plattformen, sowie eine hohe Genauigkeit. Als 1964 *Transit* betriebsbereit wurde, konnte es lediglich auf langsam bewegten

[1] ***S**atellite **B**ased **A**ugmentation **S**ystem*

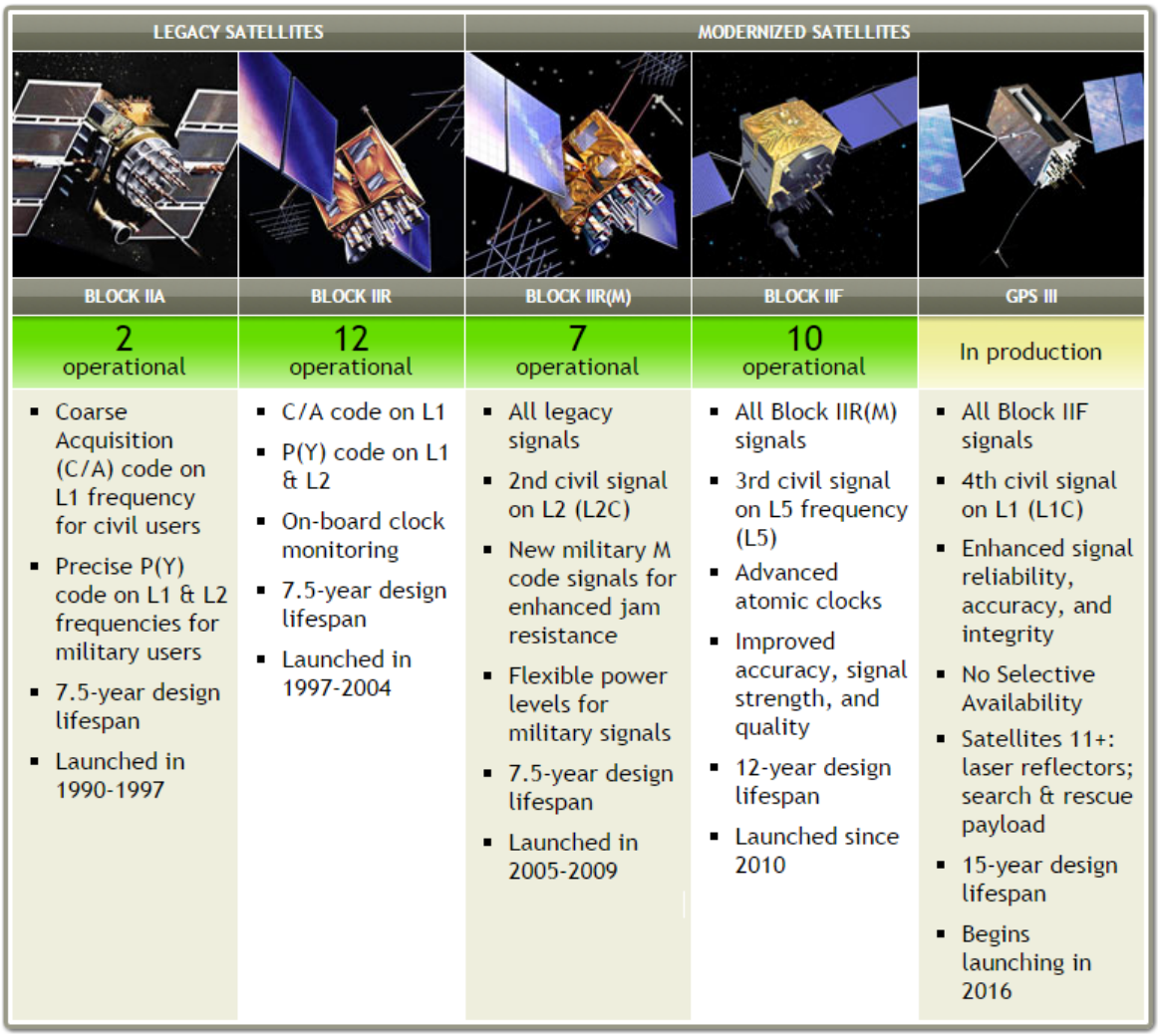
Plattformen genutzt werden, was den zuvor erwähnten Anforderungen an ein optimales System widersprach. Aus diesem Grund suchte die *Navy* nach Möglichkeiten das *Transit*-System zu verbessern bzw. ein anderes Navigationssystem zu entwickeln. Bis zum Anfang der 1990er Jahre wurden von diversen militärischen Institutionen (*Navy*, *Air Force*, *Army*,...) verschiedene Satelliten Konzepte (*Transit*, *Timation*, *621B*,...) untersucht, bis sich aus dem *NAVSTAR-GPS* [1] Konzept das heute bekannte GPS entwickelt hat. Anfang 1995 erreichte GPS volle Betriebsfähigkeit nachdem die gesamte Satellitenkonstellation, bestehend aus nominell 24 Satelliten, sich im Raum befand und ausgiebige Tests zwischen dem Boden- und Weltraumsegment durchgeführt wurden (Kaplan & Hegarty (2006)).

Ein funktionstüchtiges Satellitensystem besteht in der Regel aus mehreren Elementen, welche von der Messung vom Weltraumsegment in einer Orbitkonfiguration zu Boden- und Nutzersegmenten hinreicht. In den nachfolgenden Abschnitten werden die verschiedenen Segmente des GPS-Systems vorgestellt.

2.1.1 Weltraumsegment

Eine Konstellation von real 30-32 Satelliten, welche Radiosignale an den Benutzer übertragen, bildet heutzutage das Weltraumsegment von GPS. Diese fliegen in *Medium Earth Orbits* (MEO), auf einer Höhe von ungefähr 20.200 km in nahezu kreisrunden Bahnen. Jeder Satellit umrundet die Erde exakt zweimal pro Sterntag. Sie befinden sich in sechs gleichverteilten Bahnebenen, die eine Inklination von 55° gegenüber der Äquatorebene aufweisen. Die Konstellation besteht aus einer Mixtur von alten und neuen Satelliten. Abbildung 2.1 veranschaulicht die Merkmale der gegenwärtigen und zukünftigen Generationen von GPS-Satelliten.

[1] **Nav**igational **S**atellite **T**iming **a**nd **R**anging – **G**lobal **P**ositioning **S**ystem



LEGACY SATELLITES		MODERNIZED SATELLITES		
BLOCK IIA	BLOCK IIR	BLOCK IIR(M)	BLOCK IIF	GPS III
2 operational	12 operational	7 operational	10 operational	In production
▪ Coarse Acquisition (C/A) code on L1 frequency for civil users ▪ Precise P(Y) code on L1 & L2 frequencies for military users ▪ 7.5-year design lifespan ▪ Launched in 1990-1997	▪ C/A code on L1 ▪ P(Y) code on L1 & L2 ▪ On-board clock monitoring ▪ 7.5-year design lifespan ▪ Launched in 1997-2004	▪ All legacy signals ▪ 2nd civil signal on L2 (L2C) ▪ New military M code signals for enhanced jam resistance ▪ Flexible power levels for military signals ▪ 7.5-year design lifespan ▪ Launched in 2005-2009	▪ All Block IIR(M) signals ▪ 3rd civil signal on L5 frequency (L5) ▪ Advanced atomic clocks ▪ Improved accuracy, signal strength, and quality ▪ 12-year design lifespan ▪ Launched since 2010	▪ All Block IIF signals ▪ 4th civil signal on L1 (L1C) ▪ Enhanced signal reliability, accuracy, and integrity ▪ No Selective Availability ▪ Satellites 11+: laser reflectors; search & rescue payload ▪ 15-year design lifespan ▪ Begins launching in 2016

Abbildung 2.1: Merkmale gegenwärtiger und zukünftiger Generationen von GPS-Satelliten (Quelle: www.gps.gov/systems/gps/space/, Zugriff am 13. September 2015)

2.1.2 Bodensegment

Das GPS-Boden- oder Kontrollsegment besteht aus einem globalen Netz an Bodenstationen welche die Satelliten verfolgen, deren Signale beobachten, Analysen durchführen und Kommandos und Daten an die Konstellation senden. Das gegenwärtige operationelle Kontrollsegment beinhaltet eine Hauptkontrollstation, eine alternative Hauptkontrollstation, 12 Kommando- und Kontrollantennen und 16 Überwachungsstationen. Die Standorte dieser Anlagen sind in Abbildung 2.2 dargestellt.

Die Hauptkontrollstation in Colorado führt die primären Funktionen des Kontrollsegments aus, indem es Kommandos und Kontrollbefehle an die GPS-Konstellation bereitstellt. Desweiteren generiert die Hauptkontrollstation Navigationsnachrichten und sendet diese an die Satelliten, um die Funktionstüchtigkeit und Genauigkeit der Konstellation zu gewährleisten. Es empfängt Navigationsinformationen von den Überwachungsstationen, verwendet diese Informationen um

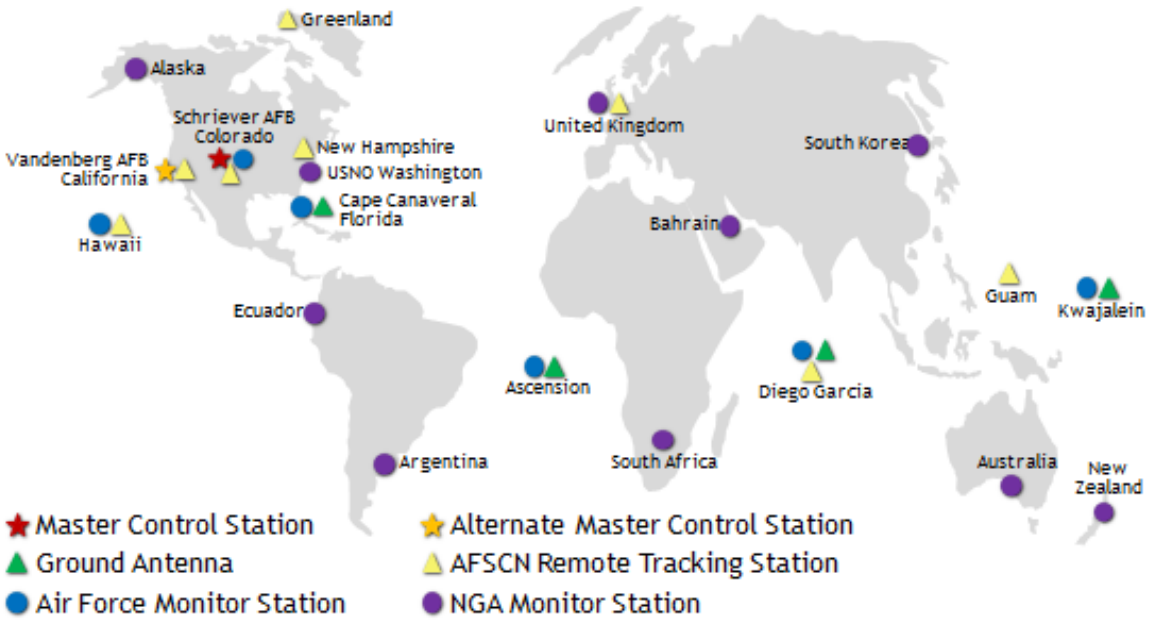


Abbildung 2.2: Standorte der GPS-Kontrollsegmentstationen (Quelle: www.gps.gov/systems/gps/control/, Zufriff am 13. September 2015)

die genauen Positionen der Satelliten im Weltall zu berechnen und um *Broadcast*-Bahnen und Uhreninformationen an die GPS-Satelliten (mittels der Navigationsnachricht) zu übermitteln. Diese senden die Navigationsnachricht aufmoduliert auf den C/A-Code an den Nutzer.

Die Überwachungsstationen verfolgen die Satelliten beim Überflug und senden ihre Beobachtungen an die Hauptkontrollstation. Die Überwachungsstationen sammeln atmosphärische Daten, Code- und Trägerphasenmessungen sowie Navigationssignale. Von den weltweiten 16 Überwachungsstationen werden sechs von der *Air Force* und zehn von der *National Geospatial-Intelligence Agency* betrieben.

Bodenantennen werden zur Kommunikation mit den GPS-Satelliten, zu Kontroll- und Befehl-Zwecken, verwendet. Diese Antennen unterstützen S-Band-Kommunikationsverbindungen (Frequenzbereich: 2 - 4 GHz) um Navigations- und Telemetriedaten zu senden und empfangen. Die Bodenantennen sind auch für normale Befehlsübertragungen, wie etwa für Steuerkommandos, zu den Satelliten verantwortlich. Zurzeit besteht das Antennennetzwerk aus den Stationen auf *Ascension Island*, *Diego Garcia*, *Kwajalein*, *Cape Canaveral* und einer Station in *Colorado* zur automatischen Satellitenverfolgung. Das Bodenantennennetzwerk und deren globale Abdeckung sind in Abbildung 2.3 dargestellt, wobei die Grauschraffierung die Anzahl an Bodenantennen angibt für die ein Satellit, der die dargestellten Zonen überfliegt, sichtbar ist.

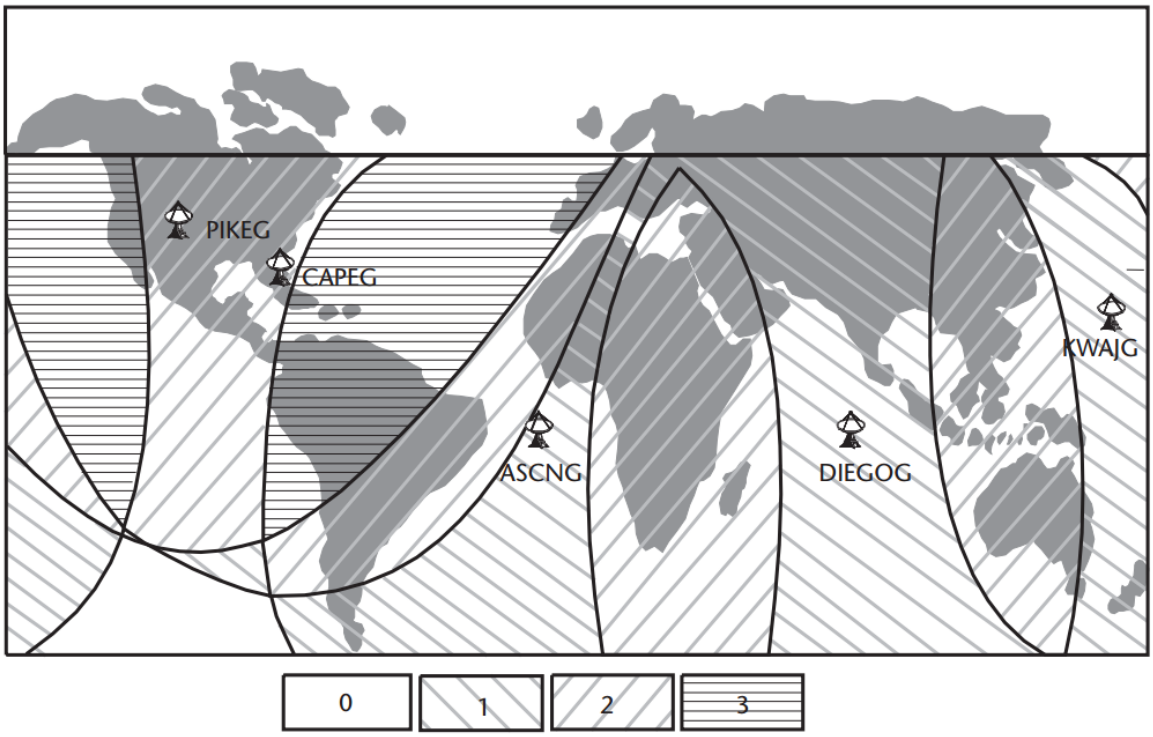


Abbildung 2.3: Bodenantennennetzwerk des Kontrollsegments (Quelle: Kaplan & Hegarty (2006))

2.1.3 Benutzersegment

Als Benutzersegment wird in der Regel die Summe aller aktiven GPS-Empfänger bezeichnet und diese sind in der Lage, empfangene Satellitensignale auf dem L-Band zu prozessieren um daraus ihre Position, Geschwindigkeit und die Zeit zu bestimmen. Die ersten Empfänger waren vorwiegend große, schwere, unhandliche, analoge Geräte die für militärische Zwecke hergestellt wurden. Heute gibt es neben geodätischen Zweifrequenz- bzw. Dreifrequenzempfängern, welche mehrere 10.000 € kosten und einen Milimeter Streckenmessgenauigkeit aufweisen können, auch günstige Navigationsempfänger welche typischerweise lediglich eine Freuquenz verarbeiten, nur 100 - 300 € kosten und mit einer Genauigkeit von 1 - 10 m die Benutzerposition ermitteln können. Solche *Low-Cost*-GPS-Empfänger bzw. deren Komponenten findet man heutzutage in vielen Alltagsgegeständen, wie zum Beispiel in Uhren, Autos und Mobiltelefonen.

2.2 Galileo

Im Jahr 1998 entschied sich die Europäische Union für den Aufbau eines Satellitennavigationssystems, welches unabhängig von GPS und GLONASS, von allen zivilen Nutzern weltweit genutzt werden kann. Zur Zeit (Sept. 2015) befinden sich 10 Satelliten (4 IOV[1] + 6 FOC[2], der finalen Satellitenkonstellation, entsprechend der 24/3/1 Walker-Konfiguration, auf ihren vorhergesehenen Bahnen. Die initiale Einsatzfähigkeit (IOC[3]) wird für Ende 2016/Anfang 2017 vorhergesagt.

2.2.1 Weltraumsegment

Galileo-Satelliten werden in nahezu kreisförmigen Bahnen in drei Ebenen auf einer Höhe von 23.222 km positioniert, was eine Umlaufzeit von 14 h und 5 min (17 Umläufe in 10 Tagen) zur Folge hat. Die Inklination der Bahnebenen beträgt ca. 56°. Wie bei anderen GNSS-Systemen, beruht das Navigationskonzept auf der Messung der Ankunftszeit von elektromagnetischen Signalen, welche von MEO-Satelliten ausgestrahlt werden. Um die mögliche Anzahl an Nutzern zu steigern werden für Galileo mehrere unterschiedliche Services, angeboten werden. Diese vier Dienste werden zur Verfügung stehen:

- **Open Service**: Das *Open Service* (OS) liefert weltweite Positions- und Zeitinformationen, über die zur Entfernungsmessung und Datenübertragung bestimmten Signale. Das OS wird für jeden Nutzer, ausgestattet mit einem Galileo kompatiblen Empfänger, frei nutzbar sein.
- **Public Regulated Service**: Der *Public Regulated Service* (PRS) wird auch weltweite Positions- und Zeitinformationen, über die zur Entfernungsmessung und PRS-Datenübertragung bestimmten Signale übermittelt. Allerdings wird der Zugang auf authorisierte Nutzer beschränkt, welche einen Empfänger mit eingebauten PRS-Sicherheitschip, benötigen.
- **Commercial Service**: Der *Commercial Service* (CS) soll zusätzliche Daten in Bezug auf den OS anbieten. Diese zusätzlichen Informationen sollen hohen Genauigkeits- und Authentifizierungszwecken, weltweit und in Echtzeit, dienen.
- **Search and Rescue Service**: Der *Search and Rescue Service* (SAR) soll das *Cospas-Sarsat*[4] Programm in Such- und Rettungsmissionen unterstützen. Dieser Dienst beruht nicht auf der Laufzeitmessung, sondern erfordert einen zusätzlichen SAR-Transponder am Satelliten.

Neben der Hauptnutzlast zu Navigationszwecken und für den SAR-Service, werden Galileo-Satelliten auch mit sekundären Nutzlasten bestückt. Das derzeitige Design sieht Laserreflektoren

[1] *In-Orbit Validation*
[2] *Full Operational Capability*
[3] *Initial Operational Capability*
[4] Internationales, satellitengestütztes Such- und Rettungssystem zur Erfassung und Lokalisierung von Schiffen, Luftfahrzeugen und Personen, www.cospas-sarsat.int

vor, welche die Nachverfolgung der Satelliten von *Sallite Laser Ranging*-Bodenstationen aus ermöglichen. Außerdem soll laut Nurmi *et al.* (2015) eine *Environmental Monitoring Unit* verbaut werden, deren Hauptaufgabe die Messung der Anzahl an Schwerionen ist, die im MEO-Orbit über die gesamte 11-jährige Sonnenzyklusperiode auf den Satelliten einwirken.

2.2.2 Bodensegment

Das Galileo-Bodensegment wird in erster Linie von Kontrollzentren und Bodenstationen gebildet welche den Betrieb des Gesamtsystems sicherstellen und die Qualität der gesendeten Navigationsinformationen gewährleisten. Zwei Galileo-Kontrollzentren, als *Mission Galileo Control Centres* (GCC) bezeichnet, in Deutschland und Italien lokalisiert,bilden als Haupt- und Backup-Kontrollzentrum den Kern des Bodensegments. Von dort aus soll der Regelbetrieb über mindestens 20 Jahre hinweg durchgeführt werden. Ein Galileo-Kontrollzentrum ist in folgende zwei Hauptbereiche gegliedert:

- Das **Ground Mission Segment** (GMS) ist für die Lieferung korrekter Navigationssignale und die Überwachung der Integrität verantwortlich. Die Hauptaufgaben des GMS bestehen darin, Navigationsprodukte für das OS- und PRS-System zu generieren, sowie die rechtzeitige Verteilung von Navigationsdaten an die Galileo-Satelliten. Das GMS-Netzwerk besteht aus den zwei GCC und mehreren *Ground Sensor Stations* zum Nachführen der Galileo-Signale aller Satelliten, sowie einigen *Mission Up-link Local Stations* (ULS), welche Daten an die Satelliten übertragen, sodass diese wieder über die korrekten Navigationsinformationen verfügen.
- Das **Ground Control Segment** (GCS) ist für das Management der Galileo-Konstellation während des Normalbetriebs zuständig. Es ist für die Funktionstüchtigkeit der Galileo-Satelliten und ihre korrekten Umlaufbahnen verantwortlich. Es besteht aus zwei Galileo-Konstellationskontrollzentren und zusätzlichen *Telemetry, Tracking and Commanding* (TT&C) Stationen, welche wechselseitig Daten über den Satellitenzustand empfangen und Kommandos senden.

Weitere Einrichtungen steuern die Schnittstellen zu externen Diensten, sorgen für die Sicherheit der übertragenen Daten oder überwachen den Status der Bodenelemente. In Abbildung 2.4 sind die wichtigsten Bodenstationen des Galileo-Netzwerks verzeichnet.

2.2.3 Benutzersegment

Das Galileo-Benutzersegment stellt im Prinzip die Summe aller Endverbraucher dar, die mittels eines Empfangsgerätes die vom Galileo-System angebotenen Dienste in Anspruch nehmen können. Der Galileo-Empfänger ist das technologische Schlüsselelement um die aus dem Weltall ausgesandten Signale für praktische Applikationen und Dienste zu übersetzen. Das Ziel der Empfänger ist es, den Nutzer mit einer genauen Positions- und Zeitinformation zu versorgen, was typischerweise durch drei Schritte ermöglicht wird:

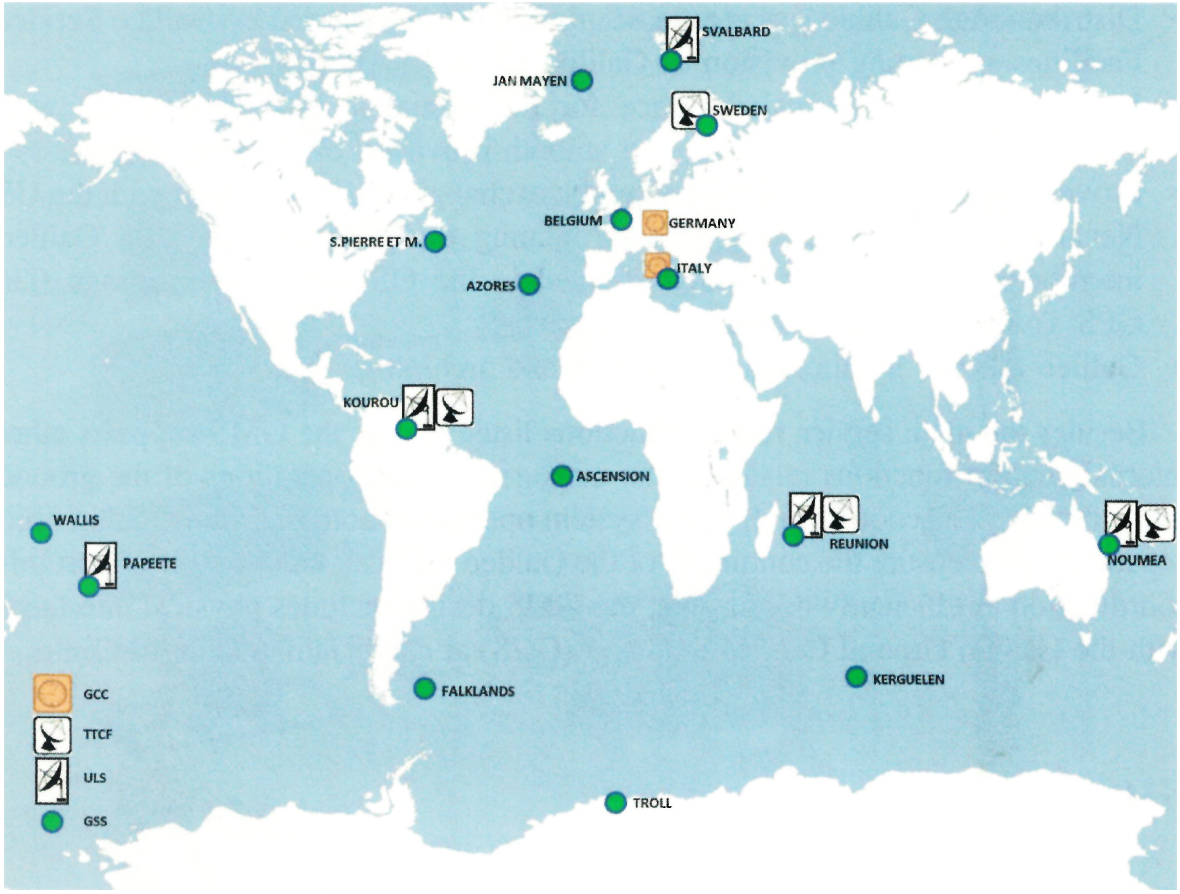


Abbildung 2.4: Galileo GMS und GCS Stationen (Quelle: Nurmi *et al.* (2015))

1. Die aus dem Weltall ausgesandten und beim Benutzer ankommenden Signale werden verstärkt, gefiltert und anschließend von analog zu digital umgewandelt.

2. Der Empfänger generiert eine Replik des Galileo-Signals, damit die Zeitverzögerung (*Code-Pseudoranges*) und Trägerphasenreststücke (Phase-Pseudoranges) des ankommenden Signals bestimmt werden können.

3. Sobald der Empfänger mit dem empfangenen Signal präzise synchronisiert ist und mehr als vier Satelliten verfolgt werden, werden die verfeinerten und genauen Signalparameter dazu verwendet die Navigationsgleichungen zu lösen, was zur Ermittlung der Positions- und Zeitinformationen des Benutzers führt.

Die drei oben angeführten Schritte sind standardmäßig in den meisten GNSS-Empfängern implementiert. Galileo-Empfänger weisen allerdings noch weitere Eigenschaften auf um das volle Potential der Galileo-Signale, in Hinsicht auf physikalische Beschaffenheit, Frequenzplanung und verfügbare Datenkanäle auszuschöpfen. Weitere und vertiefende Informationen zu diesem Thema können Nurmi *et al.* (2015) entnommen werden.

2.3 Funktionsweise der Satellitennavigation

Das Grundprinzip der Positionsbestimmung mittels GNSS besteht darin, aus gleichzeitigen Laufzeitmessungen zu mindestens vier Satelliten, deren Koordinaten in einem globalen Referenzsystem bekannt sind, die dreidimensionalen Koordinaten des GNSS-Empfängers zu bestimmen (siehe Abb. 2.5). Diese Laufzeitmessungen, die über die vom Satelliten ausgestrahlten Signale berechnet werden, werden im Allgemeinen als Pseudoentfernungsmessung bezeichnet, da aufgrund mangelnder Synchronisation zwischen Satelliten- und Empfängeruhr die Messung um einen konstanten Betrag verfälscht wird.

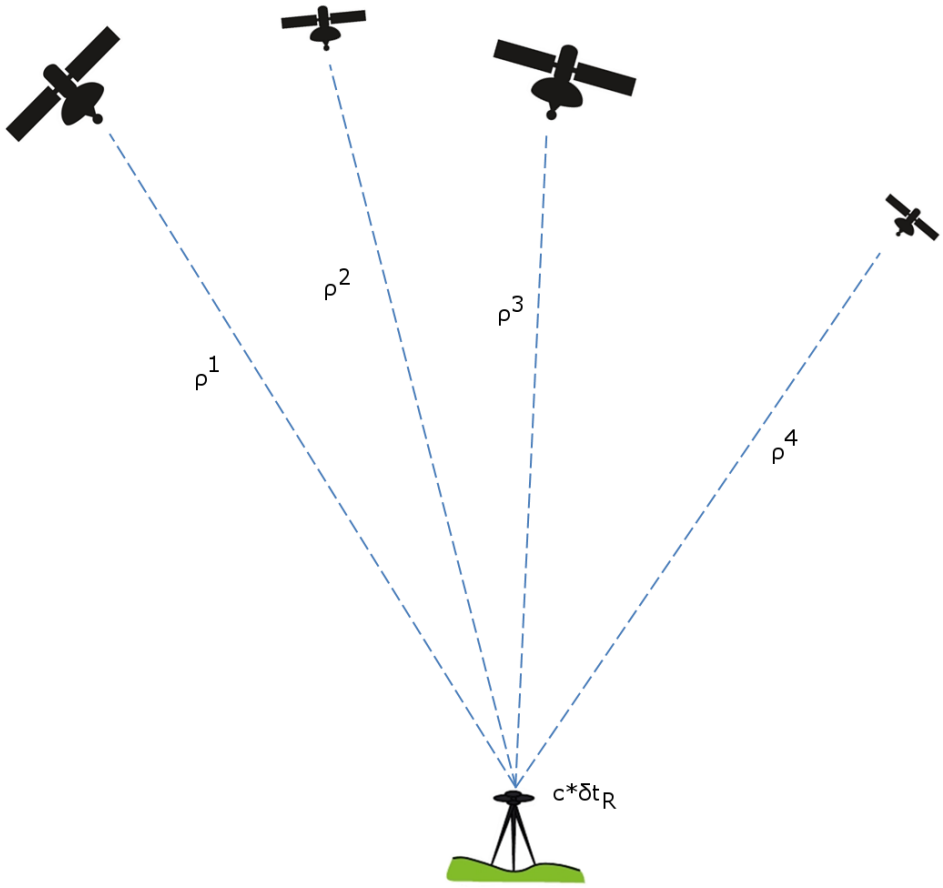


Abbildung 2.5: Grundprinzip der GNSS-Ortung

Vereinfacht lässt sich die Pseudoentfernung durch folgende Gleichung für Codemessungen

$$P_R^S = \rho_R^S + c \cdot \delta t_R + \epsilon_R^S \tag{2.1}$$

und für Phasenmessungen

$$P_R^S = \rho_R^S + c \cdot \delta t_R + \lambda \cdot N + \epsilon_R^S \tag{2.2}$$

beschreiben, wobei

P_R^S	- die gemessene Pseudoentfernung eines Empfängers R zum Satellit S,
ρ_R^S	- geometrische Distanz vom Empfänger R zum Satellit S,
c	- die Vakuumlichtgeschwindigkeit,
δt_R	- der Synchronisationsfehler der Empfängeruhr
λ	- Trägerwellenlänge
N	- Ambiguity-Term (ganzzahliger Wert der Zyklen (*cycles*))
und	
ϵ_R^S	- der aus allen verbleibenden Fehleranteilen bestehende Fehlerterm ist.

Die wichtigsten hier subsummierten Fehlerkomponenten sind:

- **Satellitenbahnfehler**. Diese werden durch die Abweichung der tatsächlichen Satellitenbahn von der berechneten Bahn verursacht. Die Genauigkeit liegt heutzutage im Bereich zwischen wenigen cm und 1 m, abhängig von den verwendeten Ephemeriden[1]. *Broadcast* Ephemeriden approximieren die Satellitenbahn in Echtzeit mit einer Genauigkeit von einem m, wohingegen *IGS*[2] *Final* Ephemeriden eine Latenzzeit von wenigen Stunden bis zu 12 Tagen besitzen und die Bahn mit einer Genauigjkeit von ca- 2,5 cm wiedergeben.

- **Satellitenuhrfehler**. Sie stellen Synchronisationsfehler der Satellitenuhr zur GNSS-Systemzeit dar. Die Größenordnung beträgt, wie bei den Satellitenbahnfehlern, wenige cm bis einige m, abhänigig von den verwendeten Ephemeriden.

- **Ionosphäre**. Alle Mikrowellensignale erfahren Laufzeitverzögerungen im ionisierten Bereich der Atmosphäre. Dieser dispersive Effekt kann durch die Verwendung von Zweifrequenzmessungen nahezu vollständig eliminiert werden und stellt somit lediglich für Einfrequenzmessungen eine wesentliche Fehlerquelle dar, mit Einflüssen im Bereich von 0,5 - mehrere 10 m, abhängig vom Ionisationsgrad, der Tageszeit und dem Elevationswinkel des einfallenden Signals.

[1] Positionswerte sich bewegender astronomischer Objekte (in diesem Fall von Satelliten), die für einen bestimmten Zeitraum ihre Gültigkeit besitzen (120 Minuten im Fall von GPS und 100 Minuten bei Galileo)

[2] **I**nternational **G**NSS **S**ervice, http://igs.org/

- **Troposphäre**. Dieser Fehler, verursacht durch den Laufzeit- und Refraktionseinfluß der Neutralgaskomponenten in der Atmosphäre, ist für alle Mikrowellensignale gleich und beträgt bei Beobachtungen im Zenit etwa 2,3 m, wobei mit Hilfe einfacher Modelle der Restfehler lediglich wenige cm beträgt.

- **Mehrwegausbreitungen**. Sie treten in Abhängigkeit von der Empfangsumgebung sowie des Antennendesigns mit unterschiedlicher Intensität auf und können Beträge im mehreren m-Bereich annehmen.

- **Antennenphasenzentrum**. Hierunter versteht man die Abweichung des physikalischen bzw. elektromagnetisch wirksamen Phasenzentrums vom mechanischen Zentrum der Antenne. Abhängig von der verwendeten Antenne liegen die Abweichungen im mm...dm-Bereich.

- **Messrauschen**. Die zufälligen Meßfehler liegen bei modernen Empfängern im Bereich von einigen dm, abhängig von angemessenen Codesignal. Das Phasenmessrauschen kann ungefähr $1-2mm$ betragen.

Die Summe aller Fehlereinflüsse (exklusive des Empfängeruhrfehlers) liefert im Allgemeinen für Einfrequenzempfänger einen Entfernungsfehler von wenigen Metern. Diese Fehleranteile beziehen sich auf die Codemessungen solange alle systematischen Fehler eliminiert werden können, wobei eine Genauigkeitssteigerung von mehr als einer Größenordnung durch Auswertung der Trägerphasen bzw. durch Differenztechniken erreicht werden kann, insofern die Mehrdeutigkeiten gelöst werden. Im folgenden Abschnitt wird näher auf die Signalstruktur von GNSS eingegangen.

2.3.1 GNSS-Signalstruktur

Die GNSS-Satelliten senden permanent Signale auf mehreren Trägerwellen im L-Band aus. Diese Trägerwellen werden von einer Grundfrequenz abgeleitet, die von mehreren sehr präzisen Atomuhren generiert wird. Im Fall von GPS wird die L1-Trägerwelle mit 1575,42 MHz gesendet, indem die Grundfrequenz von 10,23 MHz mit 154 multipliziert wird und bei L2 (1227,60 MHz) mit 120. Der L1-Trägerwelle sind mehrere Codes aufmoduliert, der C/A-Code (*Coarse/Aquisition Code*) mit 1,023 MHz, der P-Code (*Precision Code*) mit 10,23 MHz und der M-Code (*Modernized/-Military*) mit 5,115 MHz, der lediglich militärischen Nutzern zur Verfügung steht. Dem L2-Träger werden 3 Codes aufmodelliert und zwar der L2C-Code (**Civil**) für die zivile Nutzung, sowie der P- und M-Code mit 10,23 MHz. Seit 2010 werden GPS-Satelliten gestartet (Typ IIF), die über eine dritte Frequenz, die L5-Frequenz (1176,45 MHz) für Navigationszwecke abstrahlen. Die Galileo Satellitenkonstellation wird von Anfang an über drei zentrale Trägerfrequenzen (E1, E5 und E6) verfügen. In Abbildung 2.6 können die unterschiedlichen Frequenzbänder von GPS und Galileo eingesehen werden.

Die erreichbare Positionierungsgenauigkeit hängt vom verwendeten GNSS-Empfänger ab bzw. von den Signalen die der Empfänger verfolgen kann. Handelt es sich um einen *Low-*

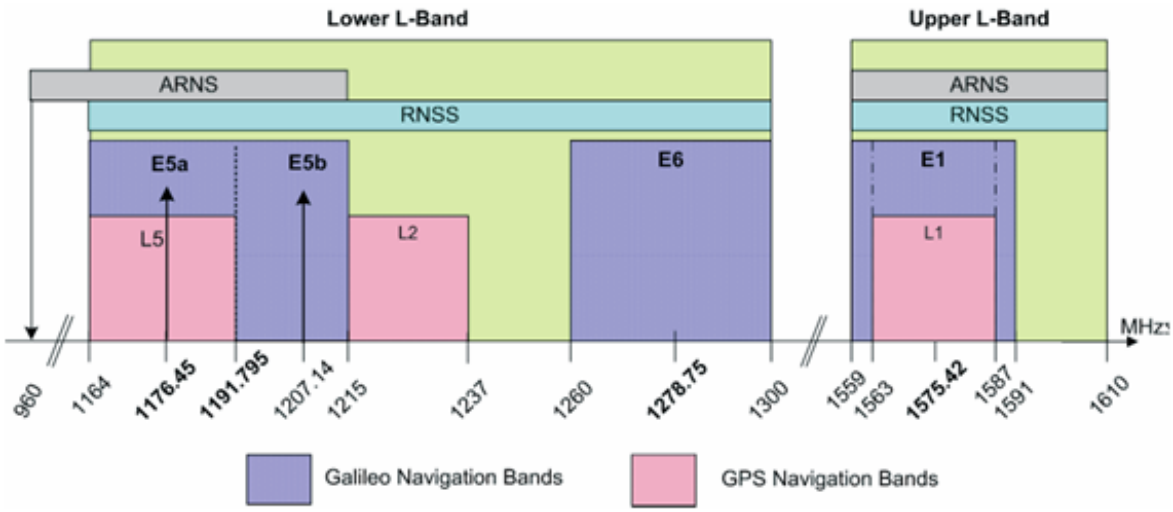


Abbildung 2.6: Galileo und GPS Frequenzbänder, Quelle: ESA (2010)

Cost-Empfänger, so kann dieser in der Regel nur die L1-Frequenz verfolgen, welche mit C/A-Codemodulation eine effektive Wellenlänge von rund 300 m aufweist. Beim P-Code beträgt die effektive Wellenlänge ungefähr 30 m, wobei das Codemessrauschen lediglich bei wenigen dm liegt. Durch die Auswertung der Trägerphasen kann ein noch genaueres Ausmessen der Pseudoranges erfolgen, da die L1-Trägerwelle eine Wellenlänge von ca. 19 cm und somit um ein vielfaches genauer ist als die Codemessungen. Kann die exakte Anzahl an Wellenlängen zwischen dem Satelliten und dem Empfänger bestimmt werden, so liegt eine hochgenau bestimmte Entfernung, im $\pm 1 - 2mm$ Bereich, zum Satelliten vor.

2.3.2 Eliminierung bzw. Modellierung der Ionosphäre

Um die troposphärische Signalverzögerung im Detail zu analysieren müssen alle Fehlereinflüsse die nicht durch die Troposphäre hervorgerufen werden eliminiert bzw. korrigiert werden. Dies gilt insbesondere für den Ionosphäreneinfluss, der unter bestimmten Voraussetzungen (Ionisationsgrad, Tageszeit und Elevationswinkel) einen Fehler von meheren 10er m verursachen kann. Die Ionosphäre ist, anders als die Troposphäre (für Frequenzen bis zu 15 GHz), ein dispersives[1] Medium. Sie erstreckt sich hauptsächlich in einem Höhenbereich zwischen ca. 70 km und 1.000 km über der Erdoberfläche und wird durch einen schichtartigen Aufbau gekennzeichnet (siehe Abb. 2.7). Innerhalb dieser Region ionisiert ultraviolette Strahlung von der Sonne einen Teil der Gasmoleküle und setzt Elektronen frei. Diese freien Elektronen beeinflussen die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen, einschließlich die Übertragung der GNSS-Signale. Aus diesem Grund wird die Distanz zwischen Satellit und Empfänger entweder zu kurz (Phasenmessung) oder zu lang (Codemessung) bestimmt. Da die ionosphärische Verzögerung frequenzabhängig ist, kann diese praktisch eliminiert werden, indem Entfernungsmessungen mit einem Zweifrequenz-

[1] Ausbreitungsgeschwindigkeit ist abhängig von der Frequenz

empfänger durchgeführt werden. Durch die Messungen auf zwei Frequenzen kann so mit Hilfe der *ionosphären-freien Linearkombination* (siehe (2.3) für die Phase und (2.4) für Codemessungen), der Effekt der Ionosphärenverzögerung weitgehend eliminiert werden. Ein Nachteil dieses Verfahrens ist, dass andere Messfehler signifikant vergrößert werden können (Kaplan & Hegarty (2006)).

$$\Phi_{iono-free} = \frac{f_1^2 \Phi_{L_1} - f_2^2 \Phi_{L_2}}{f_1^2 - f_2^2} \tag{2.3}$$

$$R_{iono-free} = \frac{f_1^2 R_{P_1} - f_2^2 R_{P_2}}{f_1^2 - f_2^2} \tag{2.4}$$

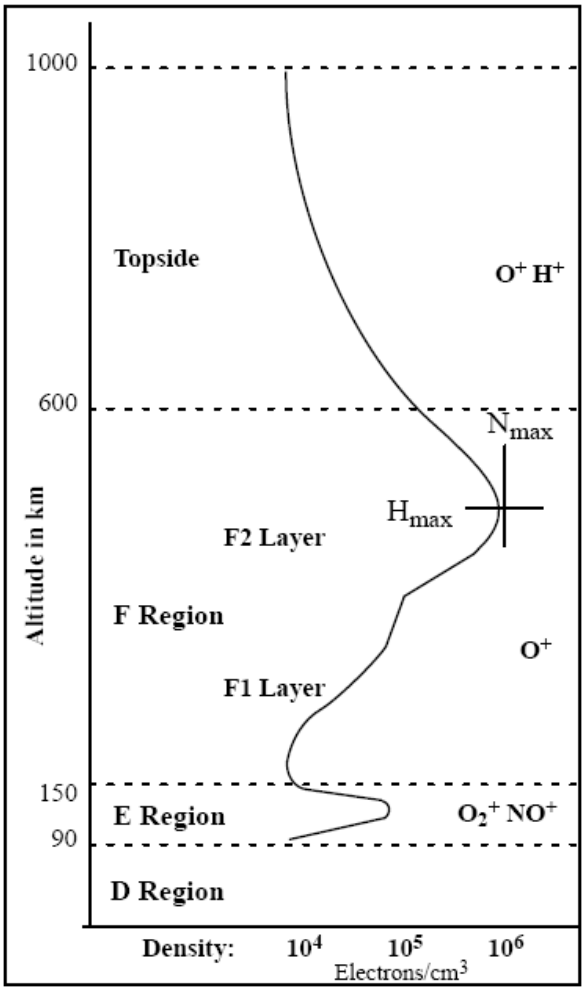


Abbildung 2.7: Elektronendichte und Ionosphärenschichten

Im Fall eines Einfrequenzempfängers ist diese Methode nicht anwendbar. Folglich müssen

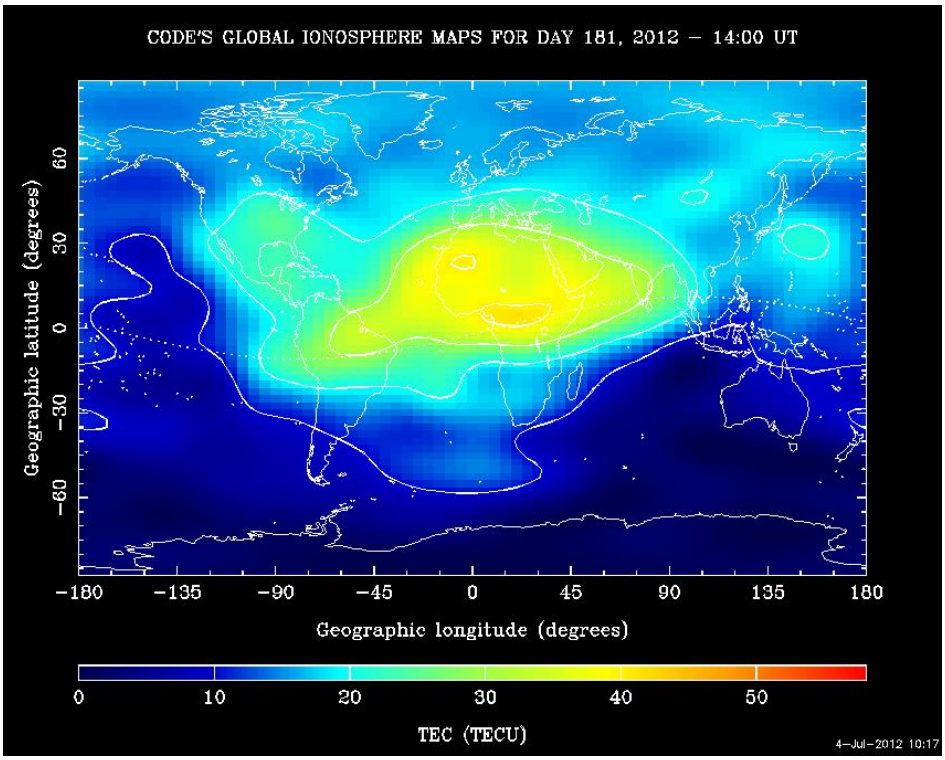


Abbildung 2.8: Globale TEC-Karte (von CODE erstellt), für den 29. Juni 2012

Ionosphärenmodelle herangezogen werden, um den Einfluss der Ionosphäre zu korrigieren.

Ionosphärenmodellierung

Nutzer von Einfrequenzempfängern benötigen Ionosphärenprodukte mit Hilfe derer sie eine Ionosphärenkorrektur schätzen können. Diese Korrekturen können z.B. aus Karten entnommen werden, die den totalen Elektronengehalt (***T**otal **E**lectron **C**ontent*, TEC) in der Ionosphäre wiedergeben. Im einfachsten Fall basieren diese TEC-Karten auf einem *Single-Layer*-Modell, welches alle freien Elektronen in einer infinitesimalen Schicht auf einer Höhe von ca. 400 km annimmt. Der TEC gibt die Anzahl an freien Elektronen, die sich in einer Säule mit 1 m^2 Grundfläche (zwischen Satelliten und Empfänger) befinden, in der Einheit TECU (*TEC-Units*) an. 1 TECU entspricht 10^{16} freien Elektronen pro m^2, wobei 1 TECU einer Verzögerung von etwa 0,16 m, für die GPS L1-Frequenz, entspricht. Er ist abhängig von der Tageszeit und der Phase der Sonnenaktivität (siehe 2.8). Weiters können auch *Multi-Layer*-Modelle zur Schätzung des TEC-Gehaltes verwendet werden, welche die Ionosphäre anstatt in nur eine Schicht in mehrere unterteilen und so eine noch exaktere Repräsentationen des freien Elektronengehaltes ermöglichen (siehe Magnet & Weber (2013)).

Ein wichtiges Beispiel stellt das *Klobuchar*-Modell dar, welches in der GPS-Navigationsnachricht implementiert ist und (im Durchschnitt) ungefähr 50% des Ionosphäreneinflusses entfernt. Dieses Modell geht davon aus, dass die Ionosphärenverzögerung durch eine halbe Kosinusfunktion der Lokalzeit während des Tages und durch einen konstanten

Wert während der Nacht, approximiert werden kann (siehe Klobuchar *et al.* (1987)). Die Navigationsnachricht beinhaltet die Koeffizienten α_i und β_i (i = 1, 2, 3, 4) und mit fünf weiteren Parametern (geodätische Länge λ und Breite Φ des Empfängers, die GPS Zeit seit Tagesbeginn, sowie Elevation und Azimut des Satelliten) ist es möglich die Signalverzögerung der Ionosphäre in Form eines Polynoms 3.Grades zu modellieren.

Modelle wie das GPS-Broadcast-Modell sind nicht in der Lage auf schnell ändernde Zustände, wie Solarstürme, zu reagieren. Aus diesem Grund wird für das Galileo-Satellitensystem das *NeQuick*-Modell verwendet, wie es von Giovanni & Radicella (1990) vorgeschlagen wurde, da dieses speziell dafür entwickelt wurde, auf schnell verändernde Zustände der Elektronendichte zu reagieren. NeQuick ist ein dreidimensionales und zeitabhängiges Ionosphärenmodell der Elektronendichte. Es basiert auf einer klimatologischen Darstellung der Ionosphäre mittels empirischer Daten, welche den monatlichen Mittelwert der Elektronendichte anhand von analytischen Profilen vorhersagt. Die Eingangsparameter für das Modell sind die Position (geographische Länge und Breite, sowie die Höhe), die Epoche (Monat und UT[1]) und die Sonnenaktivität mittels der Paramter R_{12} (geglättete Sonnenfleckzahl über 12 Monate) oder F10.7 (der durch die Sonne generierte Flusspegel auf eine Erdumlaufbahn bei einer Wellenlänge von 10,7 cm). Lediglich ein Eingangsparameter, der „effektive Ionisierungsgrad“ (*Effective Ionisation Level*) *Az*, wird zur Schätzung der Ionosphärenkorrektur in Echtzeit benötigt. Die Koeffizienten a_0, a_1, a_2, die zur Berechnung von *Az* benötigt werden, sind in der Galileo-Navigationsnachricht enthalten und werden mindestens einmal am Tag erneuert (siehe ESA (2015)).

[1] **U**niversal **T**ime, durch astronomische Beobachtung gewonnene mittlere Sonnenzeit des Nullmeridians

Kapitel 3

GNSS-Tomographie

Die Erfassung der räumlichen Verteilung des Wasserdampfes ist schwer vorhersagbar und gilt somit als wichtiger limitierender Faktor für die Positionierung und Wettervorhersage. GNSS-Signale können umgekehrt nicht nur zur Positionierung verwendet werden, es ist auch möglich Rückschlüsse auf die Atmosphäre zu ziehen. GNSS-Daten aus einem Referenznetz können dazu verwendet werden, Produkte aus den empfangenen GNSS-Signalen abzuleiten, wie den *Zenith Total Delay* (ZTD) oder den *Integrated Water Vapour* (IWV). Diese Produkte haben aber den entscheidenden Nachteil, dass sie den integralen Wert des Wasserdampfes der gesamten Atmosphäre, die das Signal zum Empfänger zurückgelegt hat, darstellen. Das vertikale Profil der Troposphäre bleibt unbekannt. Dieses Problem kann unter Anwendung des Tomographieansatzes unter Nutzung der *Slant Wet Delay* (SWD), gelöst werden.

3.1 Der Tomographieansatz

Präzise Positionierung und regionale Wettervorhersage verlangen nach einer sehr hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung des Wasserdampfgehaltes in den unteren Schichten der Atmosphäre (bis 12 km Höhe). Hierzu wird das Untersuchungsgebiet in ein 3D-Voxelmodell unterteilt (siehe Abb.3.1). Die feuchte Troposphärenschicht wird in eine Anzahl würfelförmiger Voxel diskretisiert, von denen jedes zu einer bestimmten Zeit eine festgelegte Menge an Wasserdampf enthält.

Der Strahlenweg jeder einzelnen Beobachtung wird ermittelt, um so die exakte Distanz die das Signal innerhalb eines Voxels zurückgelegt hat zu erhalten, und um so die Designmatrix füllen zu können. Die Inversion der Designmatrix führt zur Schätzung von troposphärenbezogenen Größen innerhalb der Voxel, wie zum Beispiel der Refraktivität. Die Refraktivität N_0 kann gemäß der Gleichung von Thayer (1974):

$$N_0 = N_d + N_v = Z_d^{-1} \cdot k_1 \frac{p_d}{T} + Z_v^{-1}\left(k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2}\right) \tag{3.1}$$

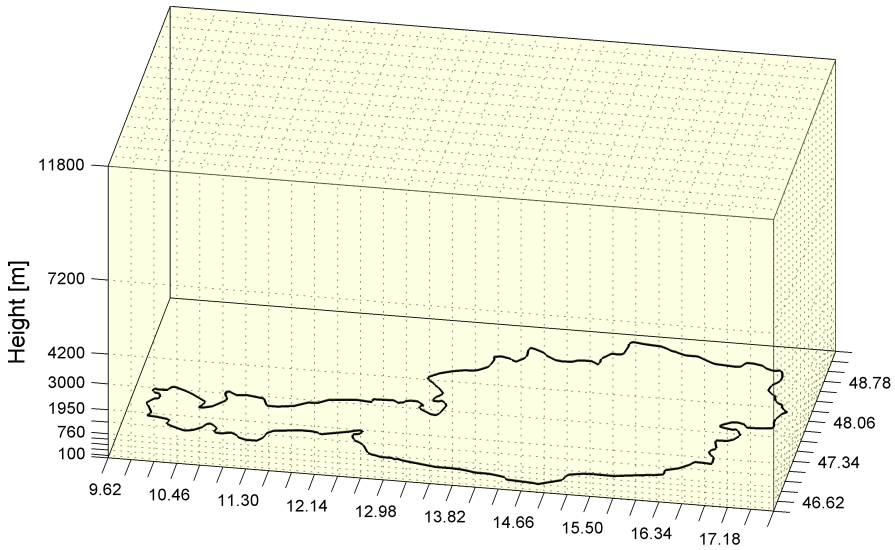


Abbildung 3.1: 3D Voxelstruktur über Österreich (Quelle: Möller *et al.* (2013))

in einen trockenen Anteil N_d abhängig vom Trockendruck p_d, sowie in einen feuchten Anteil N_v abhängig von einem partiellen Wasserdampfdruck e unterteilt werden, wobei in beide Teile die Temperatur T einfließt. Die Größen Z_d^{-1} und Z_v^{-1} bezeichnen Inversionen des trockenen und feuchten Kompressibilitätsfaktors und die Parameter k_1, k_2 und k_3 sind atmosphärische Refraktivitätskonstanten. Die Grundannahme der Methode besteht darin, dass ein linearer Zusammenhang zwischen der Refraktivität N_v und den Slant Wet Delays (SWD) besteht, insbesondere dahingehend, dass es möglich ist Funktionen anhand ihres integralen Wertes entlang einer Geraden, zu rekonstruieren.

Somit lautet die Schlüsselgleichung der Tomographie:

$$SWD_j = 10^{-6} \cdot \sum_i N_{v,i} dl_i \tag{3.2}$$

wobei SWD_j die jeweilige feuchte Schrägverzögerungen der Beobachtung j, $N_{v,i}$ die feuchte Refraktivität im $i-ten$ Voxel und dl den geraden Strahlenweg im jeweiligen Voxel i bezeichnen.

Neben der Hauptannahme, dass ein linearer Zusammenhang zwischen den SWD und N_v gegeben ist:

$$SWD_j = A_{ji} \cdot N_{v,i} \tag{3.3}$$

besteht laut Rohm (2013) eine weitere Annahme darin, dass die feuchte Refraktivität N_v innerhalb eines Voxels immer über einen kurzen Zeitraum betrachtet den gleichen Wert beibehält.

Die Rekonstruktion von N_v in jedem Voxel verlangt als Eingangsparameter den SWD aus GNSS-Beobachtungen. Unter Verwendung von Formel 3.4 ist es möglich den SWD zu berechnen.

$$SWD = \left[\frac{\Delta\rho_{apr}}{m_h(e)} + \frac{\Delta\rho_{corr}}{m_w(e)} - ZHD \right] \cdot m_w(e) + PZDR \tag{3.4}$$

Die Größe $\Delta\rho_{apr}$ steht für den Trockenanteil der troposphärischen Verzögerung, welcher über das *Global Pressure Temperature*-Modell (Böhm *et al.* (2007)) berechnet wird. Das Modell verwendet Druckwerte, die aus 10 Jahren ECMWF[1]-Daten abgeleitet wurden. Die Variable $\Delta\rho_{corr}$ wird Näherungsweise durch eine Ausgleichung alle 15 Minuten bestimmt. Beide Terme ($\Delta\rho_{apr}$ und $\Delta\rho_{corr}$) werden in den Zenit projiziert (*mapped to zenith*) indem laut Böhm *et al.* (2007) der trockene $m_h(e)$ und feuchte $m_w(e)$ Teil der globalen Mappingfunktion (GMF) verwendet wird. Um die feuchte Verzögerung in Richtung des Zenits (ZWD) zu erhalten, ist es nötig den hydrostatischen Anteil (ZHD) zu subtrahieren. Aus diesem Grund werden aus in der Nähe befindlichen meteorologischen Sensoren die Druckverhältnisse der Atmosphäre, bezogen auf den Antennenreferenzpunkt (p_0), extrapoliert. Diese werden entsprechend der Beziehung:

$$ZHD = \frac{(0.0022768 \pm 0.0000005) \cdot p_0}{f(\Phi, H)} \tag{3.5}$$

zur Berechnung des ZHD verwendet. Anschließend wird der ZWD unter Zuhilfenahme der feuchten GMF auf einen bestimmten Elevationswinkel projiziert (*mapped*), um isotropische SWD zu erhalten. Der azimutale-anisotrope Teil des SWD, wird durch die Pseudo-Zerodifferenzresiduen (PZDR) beschrieben. Dieser kann direkt gewonnen werden, indem GNSS-Beobachtungen undifferenziert prozessiert werden oder er kann aus Doppeldifferenzresiduen rekonstruiert werden, falls diese normalverteilt sind. Die Rekonstruktion von N_v aus einer Vielzahl von SWDs wird unter Berücksichtigung der Beziehung in (3.3) ermöglicht. Der Vektor SWD repräsentiert die Beobachtungen und N_v beschreibt den gegenwärtigen Zustand der Atmosphäre, das heißt die Refraktivität $N_{v,i}$ in jedem $i-tem$ Voxel. Die A-Matrix definiert die Projektion des Zustandes $N_{v,i}$ auf die Beobachtungen SWD_j. Die Matrixelemente a_{ji} von A werden durch den $j-ten$ Strahlenweg in der $i-ten$ Gitterzelle gebildet. Dies hat zur Folge, dass die A-Matrix durch die Voxelstruktur und das Tomographiemodell definiert wird. Wenn die Strahlenbiegung vernachlässigt wird, erhält man ein lineares inverses Problem für die Ermittlung von x. Die A-Matrix ist in der GNSS Tomografie meistens nicht quadratisch, spärlich befüllt und schlecht konditioniert. Aus diesem Grund ist die Inversion der Matrix keine leichte Aufgabe. Dies führte zur Entwicklung von verschiedenen Lösungsansätzen wie zum Beispiel der Verwendung von Zwangsbedingungen, iterative Algo-

[1] **E**uropean **C**entre for **M**edium-Range **W**eather **F**orecasts, www.ecmwf.int/

rithmen, Methoden der Einzelwertzerlegung, eines Kalman Filters oder einer kleinste Quadrate Ausgleichung. Ein dichtes Stationsnetz würde, unabhängig von der Rekonstruktionstechnik, die Auflösung (besonders in vertikaler Richtung) erhöhen, sowie die mangelnden Beobachtungen in den unteren Troposphärenschichten und an den Grenzen des Untersuchungsgebietes verbessern (Möller *et al.* (2013)).

Lösungsansatz Die Grundaufgabe bei der GNSS Tomografie besteht deshalb in der Inversion der linearen Gleichung (3.3), entsprechend

$$N_{v,i} = A_{ji}^{-1} \cdot SWD_j. \tag{3.6}$$

um aus einer Anzahl von integralen Beobachtungen das Refraktionsfeld zu schätzen. Vor der Inversion muss das spezifische Problem diskretisiert, linearisiert und gegebenenfalls müssen zusätzliche Informationen konvertiert werden um dem linearen Modell in 3.6 zu entsprechen. Im folgenden werden zwei Lösungsansätze näher beschrieben, nämlich die Verwendung eines iterativen Algorithmus (*Algebraic Reconstruction Technique*), sowie der Ansatz ohne Zwangsbedingungen (*Unconstraint Approach*).

3.1.1 Iterative Rekonstruktionstechnik

Diese Techniken werden bereits erfolgreich zur Rekonstruktion des TEC der Ionosphäre verwendet. Sie vereinen hohe numerische Stabilität mit Recheneffizienz selbst unter schlechten Bedingungen. Verschiedene Rekonstruktionsalgorithmen der ART-Familie wurden entwickelt, wie z.B. der originale additive ART-Algorithmus (Gordon *et al.* (1970); Censor (1983)), verschiedene multiplikative algebraische Rekonstruktionstechniken (MART) (Gordon *et al.* (1970)) und die simultanen iterativen Rekonstruktionstechniken (SIRT) (Gilbert (1972)).

Die ART-Algorithmen sind iterative Techniken, welche Beobachtung für Beobachtung prozessieren und keine Matrixinversion benötigen. Die große spärlich gefüllte A-Matrix muss nicht einmal im *Computer Memory* erstellt werden, lediglich die zwei Vektoren x, m (welche die Refraktivitäten N_v und SWDs beinhalten) und eine Datenstruktur, welche die schrägen Strahlenwege innerhalb eines jeden Voxels beschreibt, werden zur Lösung der Gleichungen benötigt. Dies führt zu einer effizienten Verwendung des Computerspeichers und der Berechnungszeit. Die Algorithmen bestehen im Grunde aus zwei Schleifen. Die innere Schleife (index $j, j = 1, \cdots, q$) prozessiert Beobachtung für Beobachtung und wendet die entsprechende Korrektur auf jede Gitterzelle an (index $i, i = 1, \cdots, p$). Nachdem alle Beobachtungen durchgeführt wurden, startet der nächste Iterationsschritt (index k) in der äußeren Schleife. Die Iteration wird beendet sobald ein ausreichend gutes Resultat erhalten wurde. Die genaue Anzahl von Iterationen ist abhängig von der Qualität des anfänglichen Feldes, der Datenqualität, sowie von anderen Parametern wie etwa dem Gewichtsparameter oder Zwangsbedingungen. Normalerweise werden 100-200 Iterationen benötigt. Der Gewichtsparameter λ muss für jeden Algorithmus sorgfältig gewählt werden, bzw. besteht die Möglichkeit individuelle Gewichte λ_i für jede $i-te$ Beobachtung festzulegen. Große λ -Werte führen zu einer schnelleren Konvergenz, aber auch zu ausgeprägten Artefakten welche Oszillationen hervorrufen können. Der SIRT-Algorithmus wurde entwickelt um den Osszilationseffekt zu vermeiden.

Unterschiedliche ART:

Original ART

Der originale ART-Algorithmus schätzt einen Korrekturterm für jede Gitterzelle und addiert diesen Term zum vorhergehenden Wert.

$$\boldsymbol{x}^{k+1} = \boldsymbol{x}^k + \lambda \frac{m_i - \langle \boldsymbol{A}^i, \boldsymbol{x}^k \rangle}{\langle \boldsymbol{A}^i, \boldsymbol{A}^i \rangle} \boldsymbol{A}^i \tag{3.7}$$

MART

Dieser multiplikative Algorithmus schätzt einen Korrekturterm, welcher auf den vorhergehenden Wert der entsprechenden Gitterzelle aufmultipliziert wird. Dies führt zu einer schnelleren Konvergenz als bei den additiven Algorithmen. Verschiedene MART-Algorithmen mit verschiedenen

Exponenten wurden entwickelt. Zum Beispiel:

MART1:

$$x_j^{k+1} = x_j^k \cdot \left(\frac{m_i}{\langle \boldsymbol{A}^i, \boldsymbol{x}^k \rangle} \right)^{\frac{\lambda A_j^i}{\sqrt{\langle \boldsymbol{A}^i, \boldsymbol{A}^i \rangle}}} \tag{3.8}$$

MART2:

$$x_j^{k+1} = x_j^k \cdot \left(\frac{m_i}{\langle \boldsymbol{A}^i, \boldsymbol{x}^k \rangle} \right)^{\frac{\lambda A_j^i}{\langle \boldsymbol{A}^i, \boldsymbol{A}^i \rangle}} \tag{3.9}$$

SIRT

Alle bis dato vorgestellten Algorithmen, iterieren durch den gegebenen Vektor m, wodurch das Ergebnis der Rekonstruktion abhängig von der Reihenfolge der Beobachtungen innerhalb dieses Vektors ist. Um dieses Verhalten zu umgehen wurde der SIRT-Algorithmus entwickelt. Er evaluiert nur einen Korrekturterm für jede Gitterzelle und berücksichtigt alle experimentellen Daten aus dem Vektor m. Der Korrekturterm ist deshalb unabhängig vom Grad von m. SIRT führt allerdings nicht zu besseren Resultaten als die anderen Algorithmen.

$$x_j^{k+1} = x_j^k + \sum_i \lambda a_{ij} \frac{m_i - \langle \boldsymbol{A}^i, \boldsymbol{x}^k \rangle}{\langle \boldsymbol{A}^i, \boldsymbol{A}^i \rangle} \tag{3.10}$$

Zusätzliche Parameter:

Stopkriterium

Es müssen Kriterien definiert werden welche das Konvergenzverhalten beschreiben und zur optimalsten Beendigung der Iteration verwendet werden können. Weiters wird ein Satz von Parametern benötigt um die Qualität der Rekonstruktion zwischen den Iterationen zu beschreiben. Vier Parameter (Δ_1, Δ_2, δ und σ) werden zwischen den aufeinander folgenden Iterationen berechnet und stoppen die Iteration zu einem bestimmten Zeitpunkt. Die Δ-Parameter geben die relative Abweichung zwischen aufeinander folgenden Iterationen an und vermitteln einen ersten Eindruck über das Konvergenzverhalten. Δ kann unterschiedlich definiert werden, z.B.:

$$\Delta_1 = \frac{\sqrt{\sum_i \left(x_i^{k+1} - x_i^k \right)^2}}{\sqrt{\sum_i x_i^{k^2}}} \tag{3.11}$$

$$\Delta_2 = \frac{\max_i \left| x_i^{k+1} - x_i^k \right|}{\max_i \left| x_i^k \right|} \tag{3.12}$$

Die Rückprojektion (*Backprojection*) δ definiert die mittlere Abweichung zwischen der Rekonstruktion $\mathbf{m}^k$ und den experimentellen Daten $\mathbf{m}^0$:

$$\delta = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^{I} \left(m_i^k - m_i^0 \right) \tag{3.13}$$

Einen weitaus wichtigeren Parameter stellt die Varianz σ von der Rückprojektion dar:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{I-1} \sum_{i=1}^{I} \left(\left\{ m_i^k - m_i^0 \right\} - \delta \right)^2} \tag{3.14}$$

Zwangsbedingungen
Sehr kleine Variationen in den Eingangsdaten können unter Umständen zu gänzlich anderen Resultaten führen und die Grundgleichung in (3.3) führt aus diesem Grund zu keiner stabilen Lösung. Die Situation kann durch die Verwendung von Bedingungen wesentlich verbessert werden, indem a priori Informationen über das System eingeführt werden welche die Rekonstruktion stabilisieren. Es können auch Bedingungen zwischen benachbarten Voxels eingeführt werden, indem der Brechungsgradient beschränkt wird, sodass es nicht zu einer inhomogenen und unrealistischen Verteilung der Refraktivität kommt, siehe Bender *et al.* (2011).

3.1.2 Zwangsfreie Ausgleichung

Zahlreiche Untersuchungen belegen eine große Abhängigkeit der verwendeten Methode von den a priori Referenzdaten und Bedingungen. Aus diesem Grund wird beim *Unconstrained Approach* auf die Verwendung von Zwangsbedingungen verzichtet, sodass nur a priori Informationen in das Modell, als erste Näherung, einfließen. Um eine sinnvolle Lösung zu erhalten wird das funktionale Modell von einem absoluten System (3.3) auf ein differentielles System übergeleitet

$$\delta SWD = A \cdot \delta N_v \tag{3.15}$$

wobei δSWD die Differenzen zwischen den gemessenen und den a priori *slant delays* bezeichnen und δN_v die Korrekturen zum a priori Refraktivitätsmodell darstellen. Die Pseudoinverse kann unter Anwendung der Einzelwertzerlegung auf Gleichung (3.3) angewendet werden und mit der Gewichtsmatrix P, welche aus der Inversion der Kovarianzmatrix der Beobachtungen

stammt, kann die Inversion der $(A^T \cdot P \cdot A)$-Matrix durchgeführt werden (siehe Gleichung (3.16)). Die Matrizen U und V sind orthonormale Basen und Σ beinhaltet einen Satz von Eigenwerten, welche sich der Größe nach geordnet auf der Hauptdiagonale befinden.

$$(A^T \cdot P \cdot A) = V \cdot \Sigma^{-1} \cdot U^T \tag{3.16}$$

Die Schlüsselfrage dieser Pseudoinversion ist die Anzahl der „sinnvollen“ Einzelwerte, welche normalerweise durch die Rechengenauigkeit des Computers begrenzt werden. Allerdings ist dies nicht die optimalste Lösung in Bezug auf Fehler und Stabilität. Aus diesem Grund wird eine geeignete Anzahl k von Eigenwerten festgelegt, welche durch verschiedene Methoden ermittelt werden können (siehe Abschnitt: *Truncation*). Die Lösung des Problems in (3.15) unter Verwendung von (3.16) führt zu

$$\delta N_v = V_I \cdot \Sigma_I^{-1} \cdot U_I^T \cdot \delta SWD \tag{3.17}$$

wobei $V_I = v_{1\cdots k}$ bzw. $U_I^T = u_{1\cdots k}^T$ einen Satz von Spaltenvektoren von V bzw. U^T darstellt, welcher mit den ausgewählten Einzelwerten $\Sigma_I = diag(\sigma_{1\cdots k})$ in Verbindung gebracht werden kann. In Spektralform kann die Lösung dargestellt werden als

$$\delta N_v = \sum_{i=1}^{k} \frac{u_i^T \cdot \delta SWD_i}{\sigma_i} \cdot v_i \tag{3.18}$$

Es wird somit ersichtlich, dass nur mit ausgewählten Einzelwerten eine Lösung ermöglicht wird, welche die Unsicherheiten die durch die feuchte Refraktivität verursacht werden, aufzulösen vermag. Aus diesem Grund müssen Einzelwerte, die schlechte Eigenschaften aufweisen, mittels der *Truncation*-Methode, aus dem System genommen werden.

Truncation

Die verwendeten Methoden, zur Kürzung (*Truncation*) der Hauptdiagonalelemente in Σ, haben ein grundlegendes Ziel, nämlich die Unterscheidung zwischen Information und Rauschen. Alle Einzelwerte mit unzufriedenstellenden Konditionen werden als Rauschen angesehen und durch die *Truncation*-Methode von der weiteren Verarbeitung entfernt. Die Kürzung kann mittels einer Funktionsanalyse der Einzelwerte, eines Signifikanztests oder anhand der Hansen Kurve erfolgen.

Stacked solution

Darunter versteht man, dass die Daten von Hochfrequenzbeobachtungen von mehreren GNSS Lösungen in ein gestaffeltes System von δSWD Beobachtungen und Designmatrizen A eingefügt werden und dadurch ein System mit höherem Rang entsteht. Das gestaffelte System, bezogen auf

(3.15), hat die Form:

$$\begin{bmatrix} \delta SWD_1 \\ \delta SWD_2 \\ \cdots \\ \delta SWD_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \cdots \\ A_p \end{bmatrix} \cdot \delta N_v, \tag{3.19}$$

welche deutlich stabilere Eigenschaften aufweist, bezogen auf die Inversion und kann unter Anwendung der in diesem Kapitel (3.1.2) beschriebenen Methoden gelöst werden (Rohm (2013)).

Kapitel 4

Das Untersuchungsgebiet

Im Zuge des GNSS-ATom Projektes wurde beschlossen, zwei kleinere Untersuchungsgebiete, eines im Osten und eines im Westen Österreichs, mit einer horizontalen Ausdehnung von ungefähr 100 km x 100 km, einzurichten. Der Referenznetzbetreiber EPOSA betreibt in beiden Gebieten GNSS-Stationen, deren Positionen in Abbildung 4.1 dargestellt wurden und deren Datenströme für Untersuchungen zur Verfügung stehen. Beide Gebiete weisen unterschiedliche geographische Begebenheiten auf. So befindet sich das östliche Areal im „Flachland“ Österreichs mit ellipsoidischen Stationshöhen zwischen 220 m und 410 m, wohingegen das zweite Untersuchungsgebiet in den Tiroler Alpen stationiert wurde und Stationshöhen zwischen 600 m und 2.220 m aufweist.

Eine Verdichtung des GNSS-Stationsnetzes ist erforderlich, um die geometrischen Bedingungen innerhalb des Voxelmodells zu verbessern. Dies führt zu einer Steigerung der Beobachtungen und begünstigt die Inversion des Systems (3.6).

Bei der simulierten Errichtung von GNSS-Hilfsstationen soll der wirtschaftliche Aspekt nicht aus den Augen gelassen werden. Die Kosten einer permanenten Zweifrequenzempfänger-Station können sich auf über 25.000 Euro belaufen (siehe http://facility.unavco.org/kb/questions/310/Permanent+GNSS%7b47%7dGPS+Stations+-+Budgets), wohingegen die Kosten für eine Einfrequenzempfänger-Stationen (mit geodätischer Antenne plus Hardware) lediglich ca. 2.000 - 3.000 Euro ausmachen würden. Nichtsdestotrotz soll die Anzahl an GNSS-Hilfsstationen möglichst gering gehalten werden, da selbst fünf Stationen beträchtliche Kosten verursachen können. Aus diesem Grund müssen dem Beobachtungsgewinn, die Kosten für die Errichtung und Innbetriebhaltung einer solchen Station gegenübergestellt werden.

4.1 Das Voxelmodell

Die vertikale Einteilung des Voxelmodells soll dem AROME[1]-Modell der ZAMG entsprechen, welches keine äquidistanten Höhenschichten besitzt, da dieses Druckwerte aus einem Modell

[1] **A**pplication of **R**esearch to **O**perations at **ME**soscale, siehe https://www.zamg.ac.at/cms/de/forschung/wetter/arome

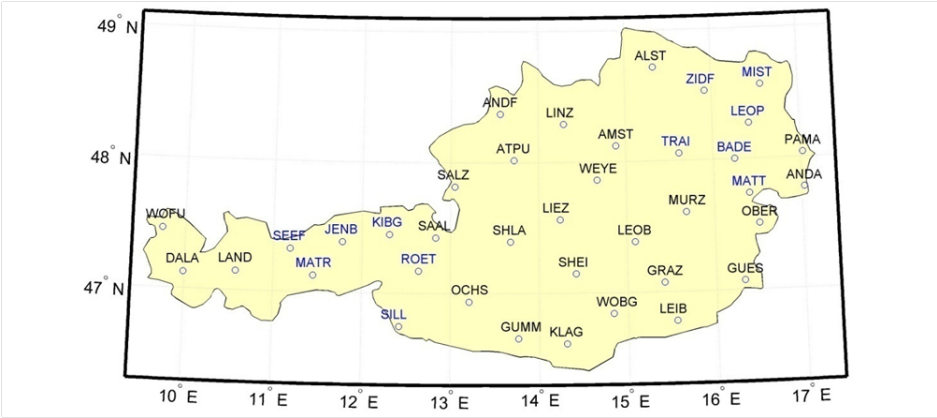


Abbildung 4.1: EPOSA GNSS-Referenznetz, Quelle: Möller *et al.* (2013)

zur vertikalen Unterteilung der Schichten verwendet. Durch die Verwendung der barometrischen Höhenformel, unter der Annahme eines mittleren Atmosphärenzustandes, wie er durch die INTERNATIONALE STANDARDATMOSPHÄRE beschrieben wird, erhält man die Internationale Höhenformel für die Troposphäre (gültig bis h = 11 km Höhe). Diese erlaubt die Berechnung der Höhe für einen gegebenen Luftdruck:

$$h[m] = \frac{T_{ref}}{\alpha} \cdot \left(1 - \frac{p(h)}{p_{ref}}^{\frac{1}{5,255}}\right) \tag{4.1}$$

, wobei

T_{ref} - Referenztemperatur auf Meereshöhe = 288,15 K (15 C))

p_{ref} - Referenzdruck auf Meereshöhe = 1013,25 hPa

α - Temperaturgradient = 0,65 K pro 100 m

und

$p(h)$ - Luftdruck auf Höhe h in hPa bezeichnen.

Das Ergebnis der Umrechnung, die vertikalen Grenzen des Voxelmodells in m, können in Tabelle 4.1 eingesehen werden. Die 11 horizontalen Ebenen beinhalten den gesamten feuchten Anteil der Troposphäre und der Abstand dieser Ebenen variiert zwischen 100 m (unterste Voxelebene) und 4,6 km (oberste Voxelebene). Abbildung 4.2 veranschaulicht die Voxelmodelle über beiden Testgebieten. Die horizontale Ausdehnung der einzelnen Voxelzellen soll 20 km betragen. Das westliche Voxelmodell besitzt eine geringere horizontale Ausdehnung von ca. 60 km x 80 km und besteht lediglich aus 132 (3x4x11) Voxeln mit 3 darin befindlichen Referenzstationen, wohingegen das Modell im Osten 275 (5x5x11) Voxel aufweist und 6 GNSS-Referenzstationen im Untersuchungsgebiet beinhaltet.

Tabelle 4.1: Höhe der horizontalen Grenzschichten des Voxelmodells

Schichten [m]	0	100	320	540	760	980	1450	1950	3000	4200	7200	11800

Tabelle 4.2: Horizontale Begrenzungen des Voxelmodells

Region	min(Lon) [^{o}]	max(Lon) [^{o}]	min(Lat) [^{o}]	max(Lat) [^{o}]
Ost	15.498	16.898	47.703	48.603
West	11.298	12.418	46.983	47.589

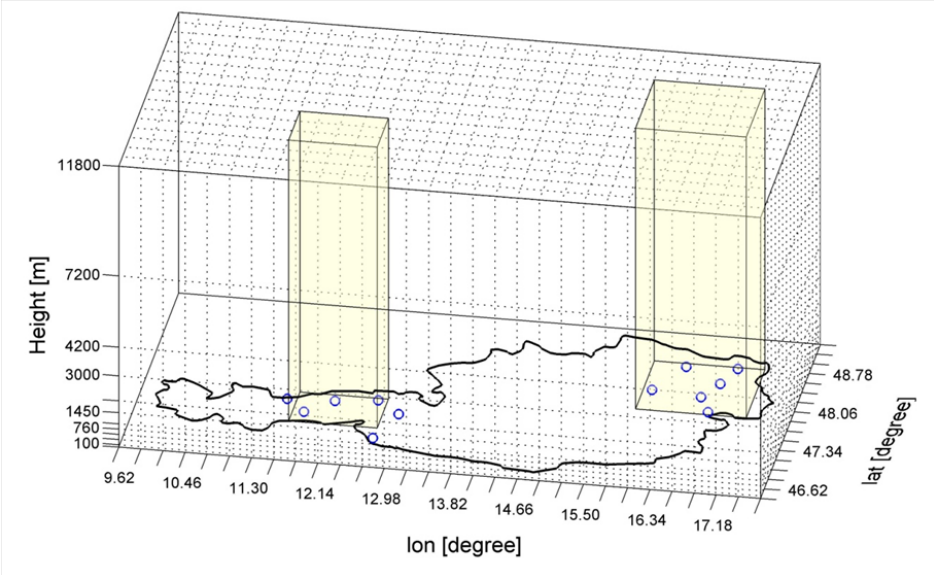


Abbildung 4.2: Voxelmodell: Ost- und Westregion, Quelle: Möller *et al.* (2013)

4.2 Auswirkungen der Topographie

4.2.1 Voxelmodell - Ost

Das Untersuchungsgebiet im Osten von Österreich soll näher begutachtet werden, um die ideale Anzahl und Anordnung von zusätzlichen Einfrequenz-GNSS-Empfängern zu untersuchen. Hierzu wurden Elevationsdaten vom "U. S. Geological Survey[1]" verwendet. Das globale digitale Geländemodell (DGM) aus der ASTER[2]-Mission mit einer räumlichen Auflösung 1" x 1" (entspricht für die longitudinale Komponente ungefähr 20 m bei 48° nördl. Breite und 30 m am Äquator) wurde in MATLAB zusammen mit den im Untersuchungsgebiet befindlichen Referenzstationen dargestellt (siehe Abb. 4.3). Das DGM ist in der Lage an das WGS84-System referenziert. Es ist deutlich zu sehen, dass sich die Station „Traisen" (TRAI) mit einer ellipsoidischen Stationshöhe von ca. 408 m in den Ausläufern der Alpen befindet und die restlichen 5 Stationen, mit Höhen zwischen ungefähr 223 m und 306 m, deutlich im Flachland positioniert sind.

Die Auswirkung der Topographie auf das Voxelmodell bzw. auf die „leer bleibenden" Voxel kann schon vorab geschätzt werden, indem das Voxel- mit dem Elevationsmodell verknüpft wird und alle Voxel deren Höhe (gemessen im Zentrum des jeweiligen Voxels) unterhalb der Höhe

[1] earthexplorer.usgs.gov

[2] **A**dvanced **S**paceborn **T**hermal **E**mission and **R**eflection Radiometer – "ASTER GDEM is a product of METI and NASA"

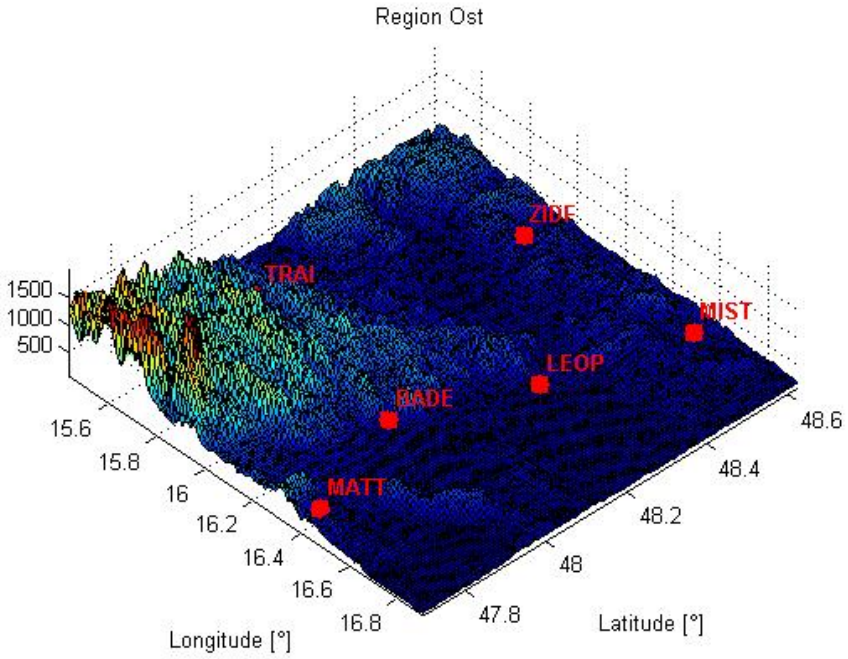


Abbildung 4.3: DGM mit Referenzstationen

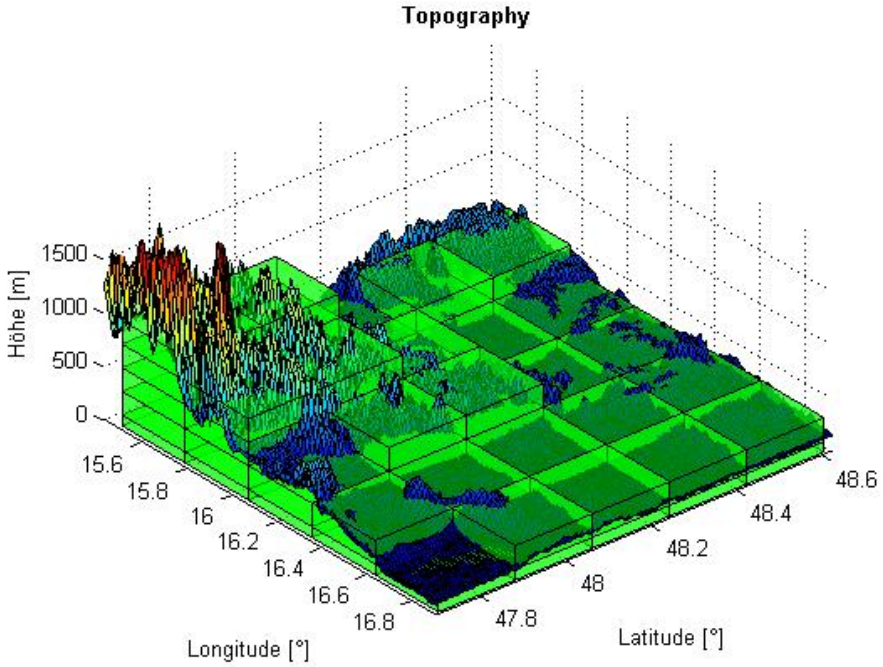


Abbildung 4.4: Voxel durch Topographie verdeckt

des Elevationsmodells liegen, wie in Abbildung 4.4 zu sehen ist, grün dargestellt werden. Die Berechnung ergab, dass 39 „leere“ Voxel durch die Topographie entstehen würden, was bei einer Gesamtanzahl von 275 Voxel, rund 14,2% entsprechen würde. Vorausgesetzung dafür ist, dass

alle anderen Voxel von Strahlengängen zu den Satelliten durchdrungen werden, sowie dass keine weiteren Sichteinschränkungen durch Abschattung (wie Gebäude, Bäume, andere Bauwerke, etc.) verursacht werden.

4.2.2 Voxelmodell - West

Das Untersuchungsgebiet im Westen Österreichs befindet sich in den Tiroler Alpen und weist somit viel komplexere geographische Begebenheiten auf, als die Region im Osten (siehe Abb. 4.5). Abbildung 4.6 lässt schon darauf schließen, dass die Beschreibung dieses Gebietes nicht so einfach werden wird wie für das östliche Gebiet. Die Höhen der 3, im Projektgebiet liegenden, Referenzstationen variieren zwischen ca. 594 m und 2215 m. Das DGM weist im ausgewählten Untersuchungsgebietweist, eine minimale Höhe von 492 m auf. Dies hat zur Folge, dass die untersten zwei Ebenen des Voxelmodells nicht mit Beobachtungen gefüllt werden können.

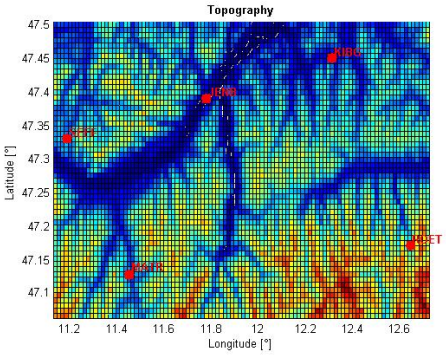


Abbildung 4.5: DGM im Grundriss

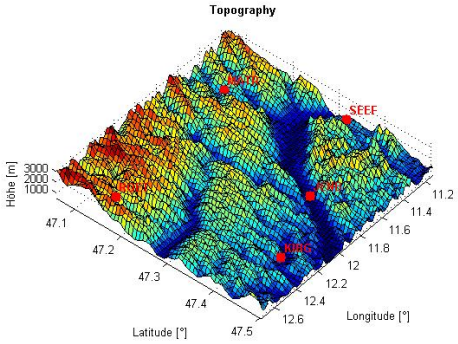


Abbildung 4.6: DGM mit Referenzstationen

Eine Abschätzung wieviele Voxel nicht durchdrungen werden können, da sie von Topographie bedeckt sind, wurde auch für dieses Areal simuliert. Auf Grund des höher gelegenen Geländes können lediglich 53,8% des Voxelmodells (entspricht 71 Voxeln) „durchdrungen“ werden (siehe Abb. 4.7). Allerdings sollte diese Abschätzung mit Vorsicht betrachtet werden, denn durch das gebirgige Areal ist es möglich, dass auch Voxel passiert werden, die durch die Topographie nicht vollkommen bedeckt werden und so durch tiefer gelegene Stationen getroffen werden können. Der Algorithmus vergleicht innerhalb einer jeden Voxelzelle die Höhe des zentral gelegenen DGM-Punktes mit den Höhenlevels des Modells(siehe Tab. 4.1) und markiert diejenigen Voxel dessen Voxelobergrenze sich unterhalb der Zentrumshöhe befindet.

4.3 Erstellung von Abschattungsmasken

Die Simulation von GNSS-Beobachtungen ermöglicht es für fiktive Stationen und zu gegebenen Zeiten RINEX[1]-Dateien zu erzeugen. Der zur Erzeugung dieser Dateien verwendete Signal-

[1] **R**eceiver **In**dependent **Ex**change Format, igscb.jpl.nasa.gov/igscb/data/format/rinex301.pdf

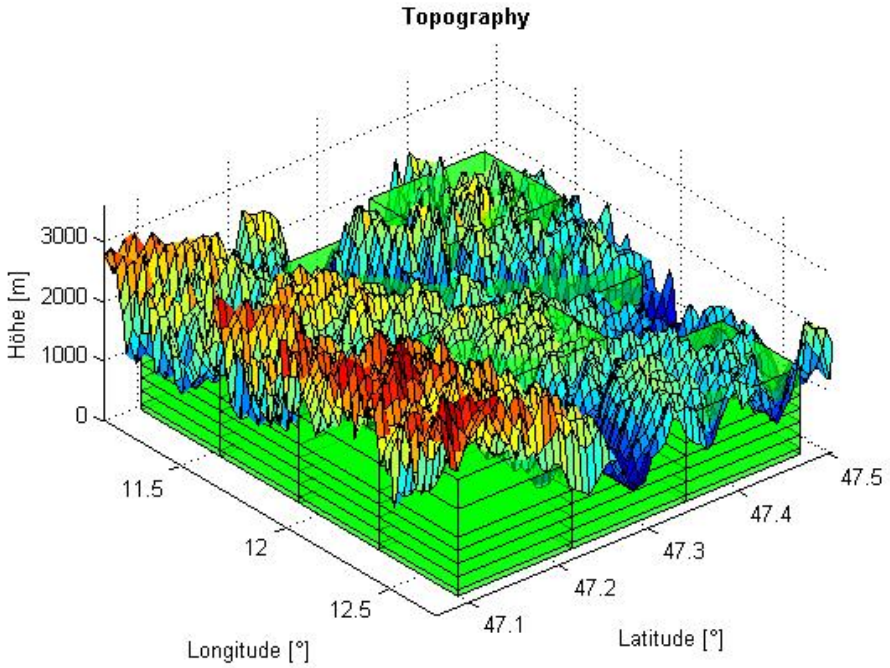


Abbildung 4.7: Durch die Topographie bedecktes, „leer bleibendes“ Voxelmodell

simulator (siehe Abschnitt 5.1.c)) berücksichtigt allerdings keine individuellen Abschattungen, sondern es ist lediglich möglich nur einen Wert für alle Azimute als „Cutoff[1]“-Winkel zu definieren.

Aus diesem Grund wurde ein Algorithmus in MATLAB programmiert, welcher für jeden Standpunkt eine Abschattungsmaske des Geländes (beruhend auf dem DGM) erzeugt. Hierzu werden vom Standpunkt aus Geländeschnitte in alle Richtungen ($0 - 360°$) durchgeführt. Anhand einer festgelegten Schrittweite werden die Erhebungen des Geländes erfasst und in einem Vektor gespeichert. Anschließend wird die größte vorkommende Elevation in einer Richtung in einem „Skyplot[2]“ dargestellt. Abbildung 4.8 zeigt eine, nach dieser Routine, erstellte Elevationsmaske für die Referenznetzstation Traisen. Alle anderen GNSS-Referenzstationen des östlichen Untersuchungsgebietes weisen keine Erhebungen auf die höher sind als der vordefinierte „Cutoff“-Winkel von 5°.

Die GNSS-Referenznetzstationen im Westen weisen keine so günstige Geländegeometrie auf, wie jene im Osten. Alle Stationen werden durch umliegende Erhebungen (Berge) abgeschattet. Die GNSS-Station in Matrei (MATR) hat die größten Abschattungen zu verzeichnen, welche zum Beispiel im Westen Beobachtungen erst ab einer Elevation von 20° ermöglichen. Im späteren Verlauf dieser Arbeit können die Elevationsmasken dazu genutzt werden, Beobachtungen aus den Daten herauszufiltern (siehe Abschnitt 5.1.c), um auf Abschattungen anzusprechen. Somit

[1] ab diesem Winkel werden Beobachtungen registriert
[2] Azimuth und Elevation von Objekten in polarer Darstellung

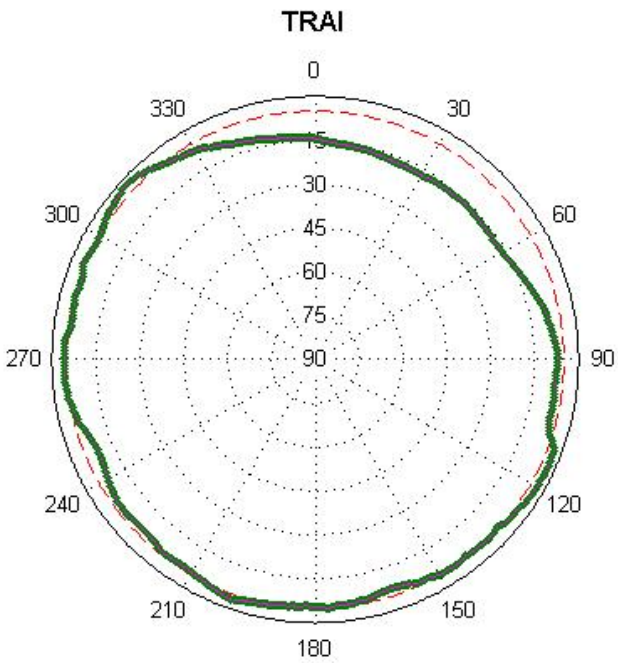


Abbildung 4.8: Elevationsmaske für die Referenzstation Traisen

können die simulierten Daten besser an die realen Bedingungen angepasst werden.

Zur Validierung der erstellten Abschattungsmasken können die Beobachtungsdaten der jeweiligen, von EPOSA betriebenen, GNSS Stationen verwendet werden. Hierzu wurden die Datenströme einer Tagessession in einem Skyplot mit den Abschattungsmasken zusammen dargestellt (siehe Abbildung 4.10). Der Vergleich beider Datensätzen zeigt, dass die Abschattungen mit dem hier erstellten Algorithmus gut erfasst werden können.

4.4 Positionierung der GNSS Hilfsstationen

Die Stationierung der Hilfsstationen wurde anfänglich zentral im Voxel definiert. Dies wurde als beste geometrische Position angesehen, da die Signalwege in alle Richtungen, innerhalb der jeweiligen Voxelsäule, die gleiche Entfernung zurücklegen müssen. Diese Positionen müssen und werden unter realen Bedingungen nicht die idealen Aufstellungsorte für GNSS-Hilfsstationen darstellen. Einerseits könnte unwegsames Gelände den Betrieb erschweren und andererseits kann die Errichtung einer solchen Station, an der theoretisch optimalen Position, durch Abschattungen nicht ermöglicht werden. Aus diesem Grunde wurde ein automatisiertes Verfahren in MATLAB erstellt, welches den „idealen“ Standort bzgl. Stationshöhe und Geländeanstieg ermitteln soll.

Als Eingangsdaten dient das DGM, welches auf die horizontale Ausdehnung des zu untersuchenden Gebietes beschränkt ist (siehe Abb. 4.11). Die Höhendaten aus dem DGM werden entsprechen den Voxelschichten (siehe Abschnitt 4.1) klassifiziert (siehe Abb. 4.13). Die unterste Voxelebene hat, in der Klassifizierung, das größte Gewicht, da Stationen mit geringeren Höhen

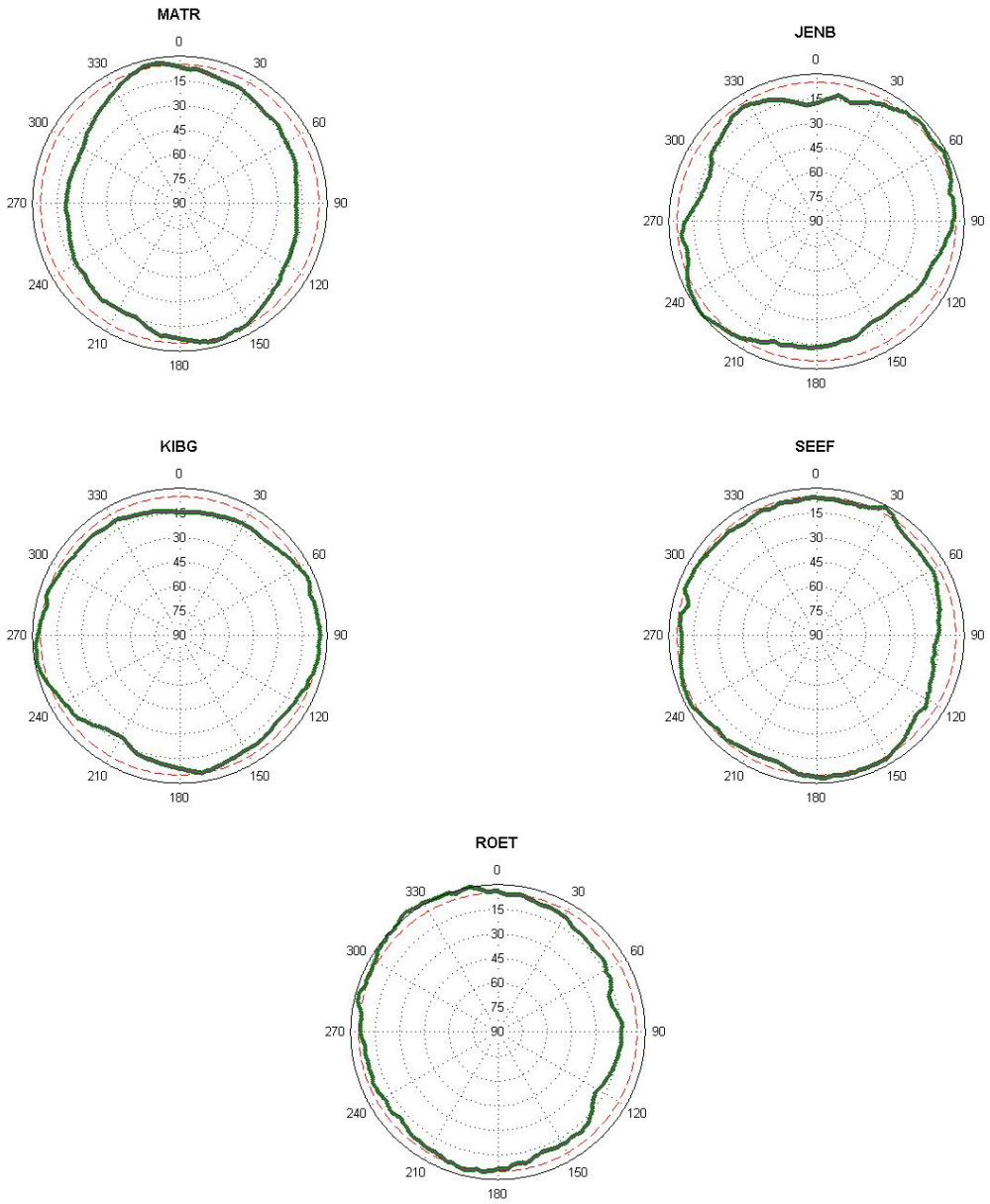


Abbildung 4.9: Abschattungsmasken der EPOSA Referenzstationen im Westen

mehr Voxelbeobachtungen generieren können als höher gelegene. Weiters wurde der Geländeanstieg (Abb. 4.12) zu benachbarten Datenpunkten ermittelt und ebenfalls klassifiziert (siehe Abb. 4.14), wobei geringeren Geländeanstiegen das größte Gewicht gegeben wurde. Die Addition beider Klassifizierungen sind in Abbildung 4.15 zu sehen und liefert die idealsten Gebiete bzgl. Höhe und Geländeneigung. Daraufhin wird ein 3x3-*Moving Average Filter* angewandt, welcher die feinen Strukturen der Klassifizierung gröber abzeichnet, indem die Werte der benachbarten Pixel in das zentral gelegene miteinfliessen (siehe Abb. 4.16). Daraufhin kann ein Schwellwert (abhängig vom jeweiligen Gebiet) definiert werden, unter welchen das betroffene Areal entfernt wird (4.17). In Gebieten mit geringen Höhenunterschieden reicht ein Schwellwert von 0,9 aus, wo-

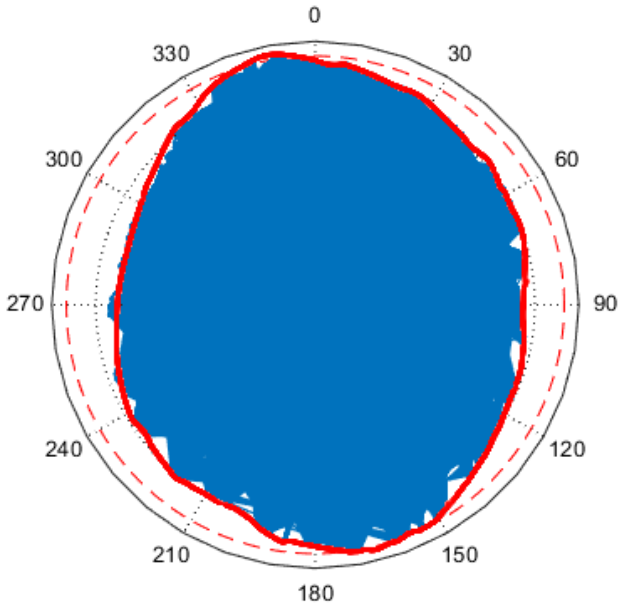


Abbildung 4.10: Vergleich der simulierten Abschattungsmaske (rot) mit reellen Daten (blau) der Station „Matrei“

hingegen in gebirgigen Arealen der Wert auf 0,7 herabgesetzt werden muss, da ansonsten das verbliebene Gebiet nicht groß genug für die weiteren Arbeitsschritte ist. Über das verbliebene Interessensgebiet wird ein 500 km x 500 km Raster gelegt, an dessen Rasterpunkten Abschattungsmasken erstellt werden (siehe Abb. 4.18). Für jeden dieser Rasterpunkte wird anschließend eine Elevationsmaske erstellt und jener Standort der die geringste Summe aller Elevationen aufweist, wird in diesem Sinne als „idealer“ Standort angesehen (siehe die durch einen blauen Kreis gekennzeichnete Station in Abbildung 4.18).

Anhand dieses Verfahrens werden für alle an der physischen Erdoberfläche befindlichen Voxelzellen, in denen Stationen vorgesehen sind, die Aufstellungsorte aller Hilfsstationen im westlichen Untersuchungsgebiet ermittelt (siehe Abb. 4.19). Weiters sollen auch Untersuchungen die Stationshöhe betreffend vorgenommen werden, insbesondere inwiefern sich die vertikale und horizontale Positionierung der Stationen innerhalb der Voxel auf die Beobachtungen auswirken.

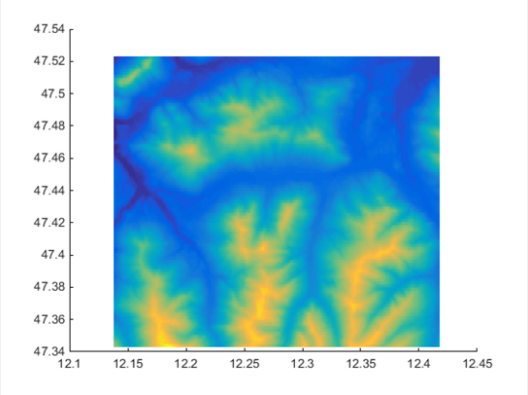


Abbildung 4.11: DGM im Untersuchungsgebiet

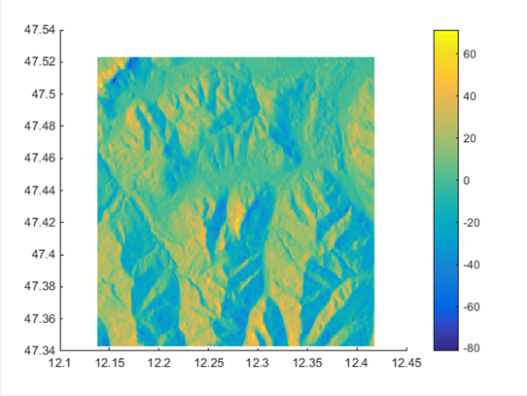


Abbildung 4.12: Geländeanstieg im Untersuchungsgebiet

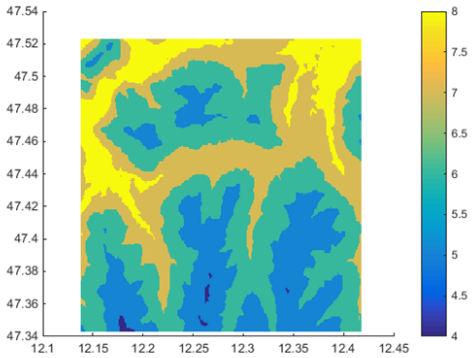


Abbildung 4.13: Klassifizierung der Höhen

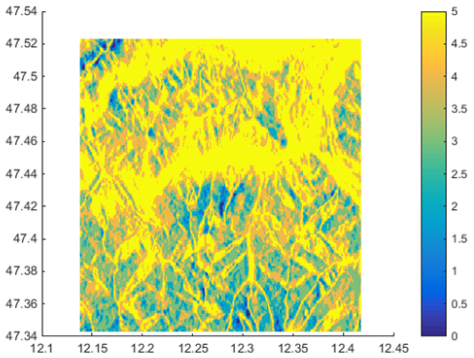


Abbildung 4.14: Klassifizierung des Geländeanstiegs

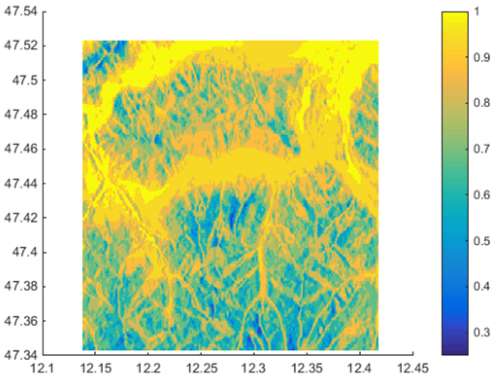


Abbildung 4.15: Addition der Höhen- und Geländeneigungsklassifizierung

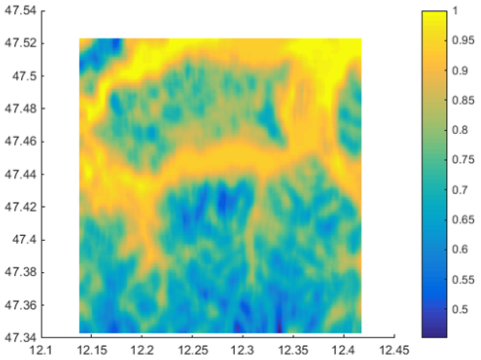


Abbildung 4.16: Anwendung des Moving-Average-Filters auf die addierte Klassifizierung

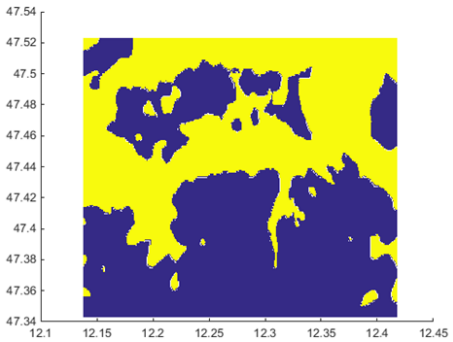


Abbildung 4.17: Verbleibendes Interessensgebiet (in gelb)

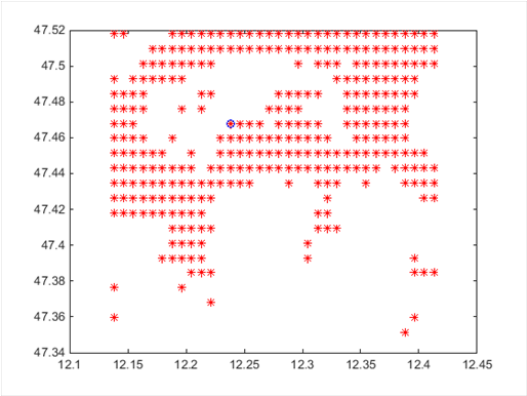


Abbildung 4.18: Raster mit provisorischen Stationspositionen für die Abschattungsmasken erstellt werden

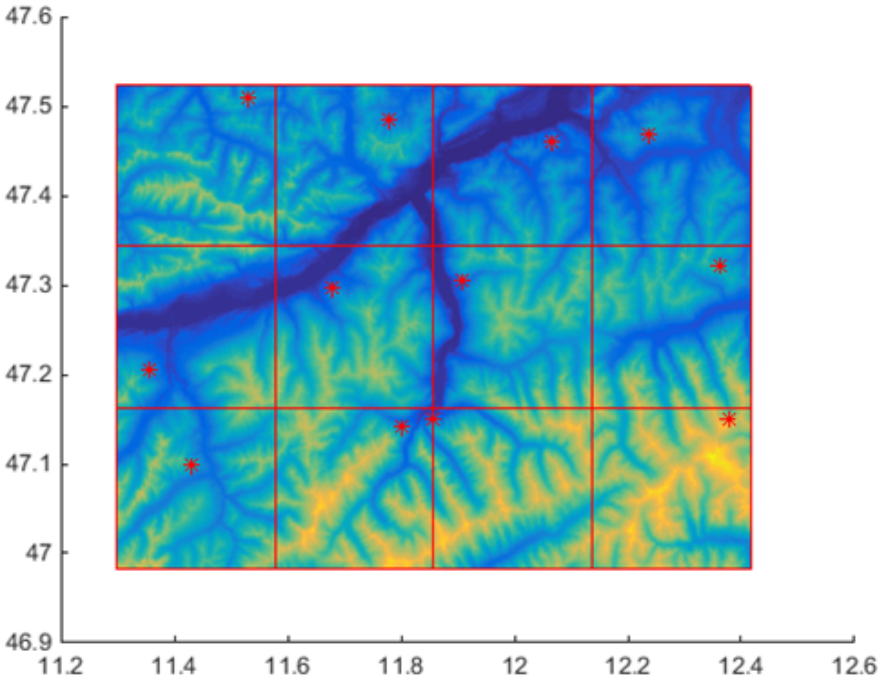


Abbildung 4.19: „Ideale“ Standpunkte für das westliche Untersuchungsgebiet

Kapitel 5

Erstellung des Voxelmodells

Dieses Kapitel behandelt die Erstellung des Voxelmodells und soll Einblicke in die Funktionsweise des Algorithmus geben, welcher zur Simulierung von Voxelbeobachtungen, in MATLAB[1] erstellt wurde.

5.1 Aufbau des Algorithmus

Der Aufbau des Algorithmus lässt sich wie folgt darstellen:

a) Definition des Untersuchungsgebiets

b) Berechnung der Satellitenpositionen

c) Simulation von Beobachtungen von Hilfsstationen

d) Erstellung von Voxelbeobachtungen

e) Ausgabe der Resultate

ad a) Definition des Untersuchungsgebiets
Das Untersuchungsgebiet wird durch die Abmessungen definiert, welche im Zuge des GNSS-ATom-Projektes getroffen wurden (siehe Tabelle 4.1 und 4.2). Die Positionen der Referenzstationen bilden die Basis des Voxelmodells, da sie die Ursprünge der Beobachtungsvektoren zu den Satelliten bilden. Die Koordinaten der verwendeten GNSS-Referenzstationen wurden vom Referenznetzbetreiber EPOSA zur Verfügung gestellt und bilden zusammen mit dem DGM die Basis für die Untersuchungen.

[1] Mathematik-Software, de.mathworks.com/products/matlab/

ad b) Berechnung der Satellitenpositionen

Die Satellitenpositionen können anhand der *Broadcast*-Ephemeriden (Brdc) berechnet werden. Diese Daten werden von den dazugehörenden Bodenstationen (für GPS eine vom GPS-Kontrollsegment) vorausberechnet und an die Satelliten übermittelt. Die Ephemeridendatei besteht aus mittleren Keplerelementen mit zeitabhängigen Korrekturgrössen und wird letztendlich vom Satelliten an den Empfänger gesendet. Anhand dieser Informationen ist es dem Nutzer möglich, seinen eigenen Standort in Echtzeit zu bestimmen, nachdem zuvor genaue Positionen aller in Sicht befindlicher Satelliten berechnet wurden.

```
     2              NAVIGATION DATA                         RINEX VERSION / TYPE
CCRINEXN V1.6.0 UX  CDDIS               05-SEP-13 15:33     PGM / RUN BY / DATE
IGS BROADCAST EPHEMERIS FILE                                COMMENT
    0.1025D-07  0.2235D-07 -0.5960D-07 -0.1192D-06          ION ALPHA
    0.9421D+05  0.9830D+05 -0.1311D+06 -0.5243D+06          ION BETA
    0.186264514923D-08 0.710542735760D-14   503808     1756 DELTA-UTC: A0,A1,T,W
    16                                                      LEAP SECONDS
                                                            END OF HEADER
 1 13  9  4  0  0  0.0 0.708028674126D-04 0.432009983342D-11 0.000000000000D+00
    0.150000000000D+02-0.285625000000D+02 0.432303703946D-08-0.216078688133D+01
   -0.161118805408D-05 0.230001052842D-02 0.122878700495D-04 0.515369726372D+04
    0.259200000000D+06 0.316649675369D-07 0.306502750192D+01-0.558793544769D-07
    0.960914110867D+00 0.143656250000D+03 0.354816619079D+00-0.782139686350D-08
    0.249653242523D-09 0.100000000000D+01 0.175600000000D+04 0.000000000000D+00
    0.200000000000D+01 0.000000000000D+00 0.838190317154D-08 0.150000000000D+02
    0.259200000000D+06 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
 2 13  9  4  0  0  0.0 0.449656974524D-03 0.181898940355D-11 0.000000000000D+00
    0.480000000000D+02-0.112500000000D+02 0.485770234280D-08-0.135429827418D+01
   -0.623986124992D-06 0.125508162892D-01 0.116918236017D-04 0.515372464561D+04
    0.259200000000D+06 0.232830643654D-06 0.304122741496D+01-0.115483999252D-06
    0.939419439436D+00 0.140593750000D+03-0.256295466080D+01-0.801783397497D-08
    0.273225666660D-09 0.000000000000D+00 0.175600000000D+04 0.000000000000D+00
    0.200000000000D+01 0.000000000000D+00-0.172294676304D-07 0.480000000000D+02
    0.259140000000D+06 0.400000000000D+01 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
 3 13  9  4  0  0  0.0 0.254782848060D-03 0.500222085975D-11 0.000000000000D+00
    0.800000000000D+02-0.747812500000D+02 0.543986944954D-08-0.119441768354D+01
   -0.343844294548D-05 0.167029120494D-01 0.351853668690D-05 0.515371786118D+04
    0.259200000000D+06 0.447034835815D-07 0.187017788890D+01 0.419095158577D-06
    0.935234987560D+00 0.297093750000D+03 0.132743692727D+01-0.884751139150D-08
   -0.252153360342D-09 0.100000000000D+01 0.175600000000D+04 0.000000000000D+00
    0.280000000000D+01 0.000000000000D+00-0.465661287308D-08 0.800000000000D+02
    0.255612000000D+06 0.400000000000D+01 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
```

Abbildung 5.1: Beispiel einer Brdc-Datei (in RINEX umgewandelt)

Das Brdc-File besteht aus einem *Header*- und einem Datenteil. Der *Header* beinhaltet globale Informationen die das gesamte File betreffen (Versionsnummer, Aufnahmezeitpunkt, etc.), *Klobuchar* Korrekturparameter für die Ionosphäre, um diese modellieren zu können, sowie Infor-

mationen bezüglich der Relation zu UTC[1]-Zeit. Die relevanten Informationen zur Rekonstruktion der Satellitenpositionen befinden sich im Datenteil und werden in Form von mittleren Keplerelementen mit zeitabhängigen Korrekturgrößen, sowie durch Satellitenuhrkorrekturen realisiert, die für einen bestimmten Zeitraum ihre Gültigkeit haben. Die Keplerelemente und Korrekturen für einen Satelliten, behalten zumindest 120 Minuten lang ihre Gültigkeit. In diesem Zeitraum wird der Satellitenorbit als stabil angesehen. Üblicherweise werden die Parameter für alle Satelliten im 2-Stunden-Takt neu definiert.

Anhand eines angefertigten MATLAB-Scripts können die benötigten Parameter und Zeitinformationen aus einem Brdc-File ausgelesen werden, um so die erforderlichen Bahnen als 3D-Positionen in einem erdfesten Koordinatenrahmen, rekonstruieren zu können.

ad c) Simulation von Beobachtungen von Hilfsstationen

Wie schon in der Einleitung (Kap. 1.3) angemerkt wurde besteht das Ziel dieser Arbeit in der Verdichtung des bestehenden GNSS-Referenznetztes mit wirtschaftlicheren Einfrequenzempfängern. Aus diesem Grund müssen zu Simulationszwecken, auf vordefinierten Positionen, sogenannte Hilfsstationen eingerichtet werden und es müssen Satellitenbeobachtungen für diese fiktiven Stationen erzeugt werden. Das gelingt mit Hilfe des NavX-NCS (***N**avigation **C**onstellation **S**imulator*) GNSS-Signalsimulators der Firma IFEN[2]. Dieser ist in der Lage, für eine angegebene Position und einen beliebigen Zeitraum, für alle (lizensierten) GNSS-Systeme, Beobachtungen zu erzeugen. Die simulierten Daten können als RINEX-Files ausgegeben werden. Zusätzlich können Orbit-, Signal- und Ionosphärenparameter vorgegeben werden, um die verschiedenen Auswirkungen der jeweiligen Parameter auf das Signal zu testen. Ein Hardwaremodul ermöglicht es den *NavX-NCS Professional GNSS Simulator* als Referenzsignalgenerator zu nutzen (wird allerdings in dieser Arbeit nicht benötigt). Der Screenshot in Abbildung 5.2 zeigt die Oberfläche der NavX-NCS Software. Mittels der Software kann eine vollständige Galileo-Satellitenkonstellation (FOC) simuliert und im RINEX-Format in Form von Brdc-Dateien ausgegeben werden.

ad d) Erstellung von Voxelbeobachtungen

Wenn die Standpunkte der GNSS-Stationen für das Untersuchungsgebiet und die Satellitenpositionen feststehen, können im Voxelmodell Beobachtungen simuliert werden. Hierzu wird der *Ray-Tracing*-Algorithmus von J. Amanatides and A. Woo (1987) angewandt, um die korrekte Durchquerung des Strahls durch das Voxelmodell zu garantieren. Die Methodik hinter dem *Traversal*-Algorithmus ist in Abbildung 5.3, für einen 2D-Fall dargestellt und funktioniert im 3D-Fall genauso.

Der Algorithmus muss die Voxel a,b,c,d,e,f,g und h in der richtigen Reihenfolge aufsuchen (vom Satellit zum Empfänger), um den Strahlengang richtig darzustellen. Die Gleichung des Strahls lautet $\vec{u} + t\vec{v}$ für $t \geq 0$ und als erstes muss der Ursprung $\vec{u}$ des Strahls gefunden werden.

[1] ***U**niversal **T**ime **C**oordinated*, ist die heute gültige Weltzeit
[2] www.ifen.com/

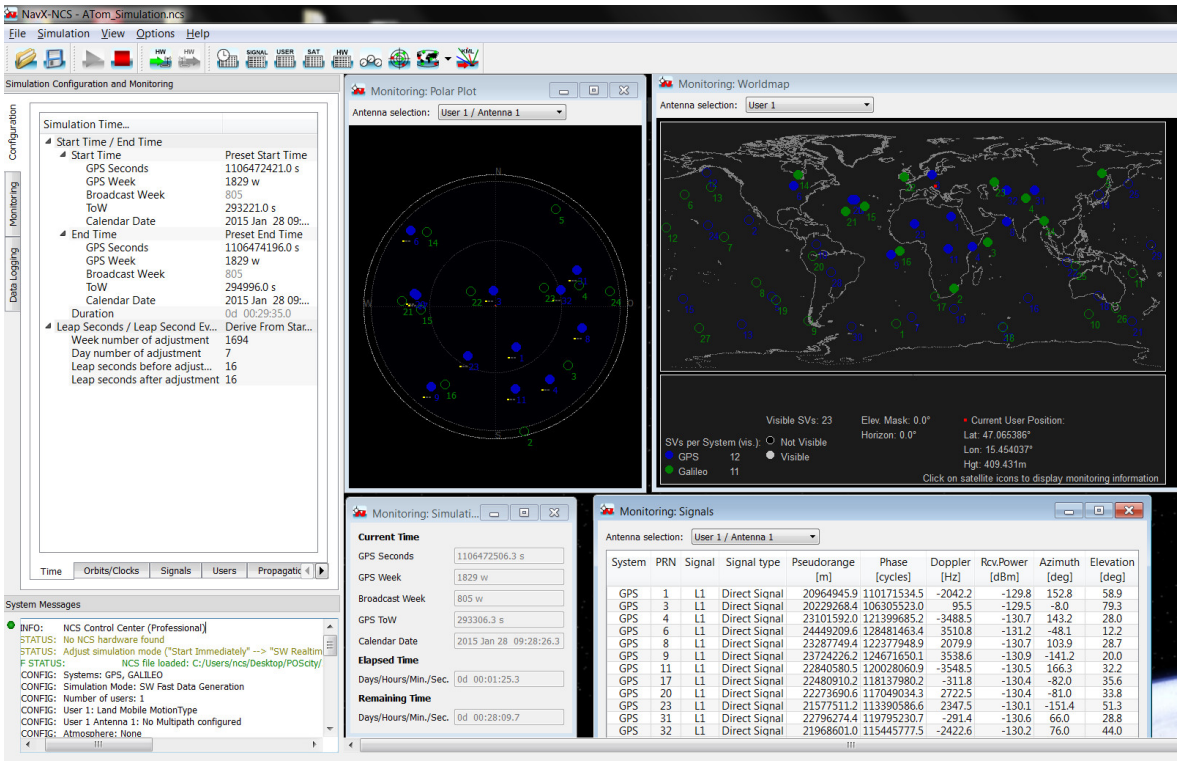


Abbildung 5.2: *NavX-NCS* Simulations-Oberfläche

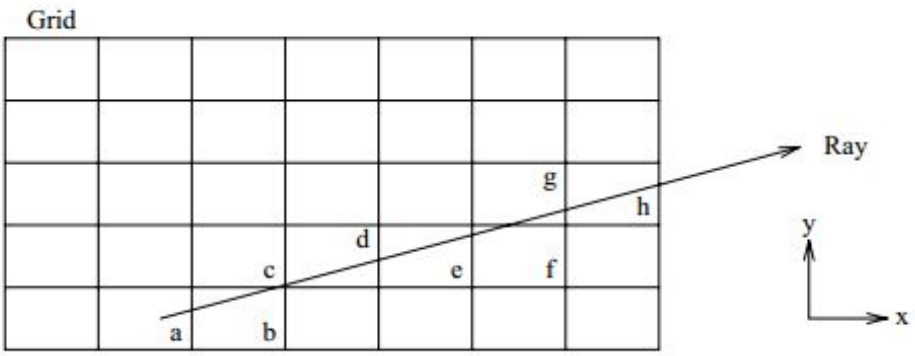


Abbildung 5.3: Strahlenverfolgung im Voxelmodell (Quelle: Amanatides & Woo (1987))

Danach wird der Strahl in Intervalle t unterteilt, von denen jedes ein Voxel umfasst (Amanatides & Woo (1987)).

ad e) Ausgabe der Resultate

Die Ergebnisse des MATLAB-Programms sind die Voxel, die durch den Strahl getroffen werden. Diese können dazu verwendet werden, um statistische Aussagen bezüglich der Beobachtungen im Voxelmodell zu treffen und um Grafiken zu erstellen, die die Resultate veranschaulichen.

5.2 Funktionsweise des Algorithmus

Das Diagramm in Abbildung 5.4 veranschaulicht die Funktionsweise des Auswertealgorithmus. Die verschiedenen Bearbeitungsschritte werden ausschließlich mit MATLAB und NCS erzeugt.

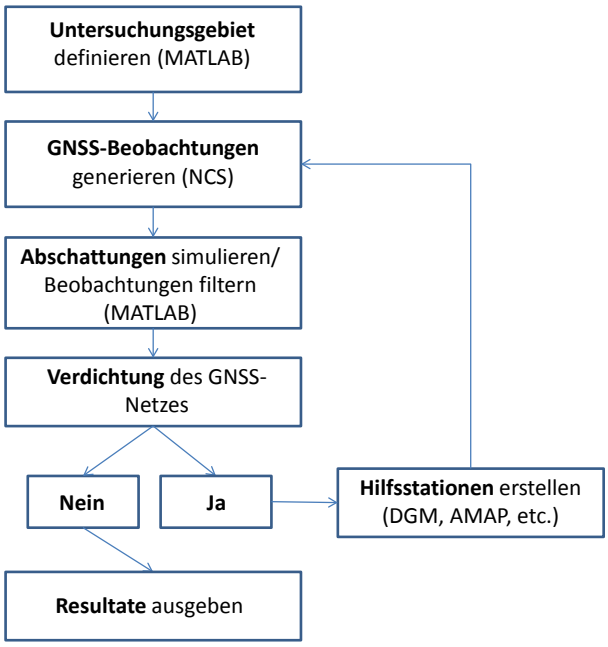


Abbildung 5.4: Blockdiagramm der Algorithmus Funktionsweise

Als erstes werden die Koordinaten der GNSS-Referenzstationen geladen, welche zusammen mit den Grenzen des Voxelmodells die Rahmengeometrie des jeweiligen Untersuchungsgebiets festlegen. Danach werden GNSS-Beobachtungen generiert und bei interesse können, anhand einer erstellten Elevationsmaske von der jeweiligen Station, Abschattungen simuliert werden, um so die Beobachtungen zu filtern. Wird eine Verdichtung des Stationsnetzes angestrebt, ist es notwendig die Höhenkoordinate der gewünschten Hilfsstationen aus einem Kartenprogramm (z.B. AMAP[1]) oder wie in dieser Arbeit aus dem DGM, zu laden. Daraufhin müssen wieder neue Beobachtungen generiert werden. Ist keine Verdichtung erforderlich, können die Resultate des Voxelmodells ausgegeben werden.

[1] *Austrian Map*, herausgegeben vom Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen

Kapitel 6

Resultate

Wie schon in Kapitel 2 angemerkt, werden zur Untersuchung der Voxelmodelle das GPS- und Galileo-Satellitensystem verwendet. Die Verwendung mehrerer Systeme führt zur Steigerung der Beobachtungen, was eine höhere Anzahl durchlaufener Voxel zur Folge hat. Allerdings können nicht alle Beobachtungen zur Voxelanalyse verwendet werden, denn für das GNSS-ATom-Projekt wird der feuchte Anteil in der Troposphäre zwischen 0 und 11.800 m konzentiert. Wenn das ankommende Signal vom Satelliten nicht durch die oberste Grenzschicht (auf 11.800 m) eintritt, sondern seitlich in das Voxelmodell eintrifft, dann kann der Wasserdampfgehalt nicht eindeutig den durchquerten Voxeln korrekt zugeordnet werden und somit können diese Beobachtungen nur bedingt verwendet werden. Um dennoch im Tomographieansatz berücksichtigt zu werden, müssen Voxel außerhalb des Voxelmodells erstellt und mitgeschätzt werden, denen diese Werte dann zugeordnet werden können. Dadurch werden im Zuge dieser Arbeit keine Beobachtungen zugelassen die das Voxelmodell seitlich durchdringen. Der Vergleich beider Szenarien zeigt, dass ohne seitliche Beobachtungen mit einem Beobachtungsverlust von ungefähr 5%, über den Untersuchungszeitraum von 15 Minuten (siehe Kap. 1.3) zu rechnen ist (siehe Tab. 6.1). Allerdings bietet dieser Untersuchungszeitraum lediglich einen eingeschränkten Blick auf die jeweilige Situation, da durch eine verändernde Satellitengeometrie, zu unterschiedlichen Zeiten, auch höhere Beobachtungsverluste ($> 5\%$) auftreten können. In Abbildung 6.1 sind die Resultate des Vergleichs zu sehen. Die Darstellungen links zeigen die Voxelmodelle, wobei Galileo-Beobachtungen durch grüne Strahlen gekennzeichnet sind und GPS durch rote. Die Säulendiagramme rechts in der Abbildung zeigen die Summe aller durchquerten Voxel innerhalb einer Voxelsäule. Hier sollte angemerkt werden, dass es sich um eine Summation der Voxelebenen, welche von Satellitensignalen durchdrungen werden, handelt. Aus diesem Grund spiegeln niedrige Säulen keinesweges Beobachtungen in unteren Voxelebenen wieder.

Tabelle 6.1: Vergleich zwischen seitlich eintreffenden Beobachtungen und von oben für die Referenzstationen im westlichen Untersuchungsgebiet, mit insgesamt 132 Voxeln

Szenario	**Voxel durchdrungen** [%]
seitlich + oben	33,3
oben	28,8

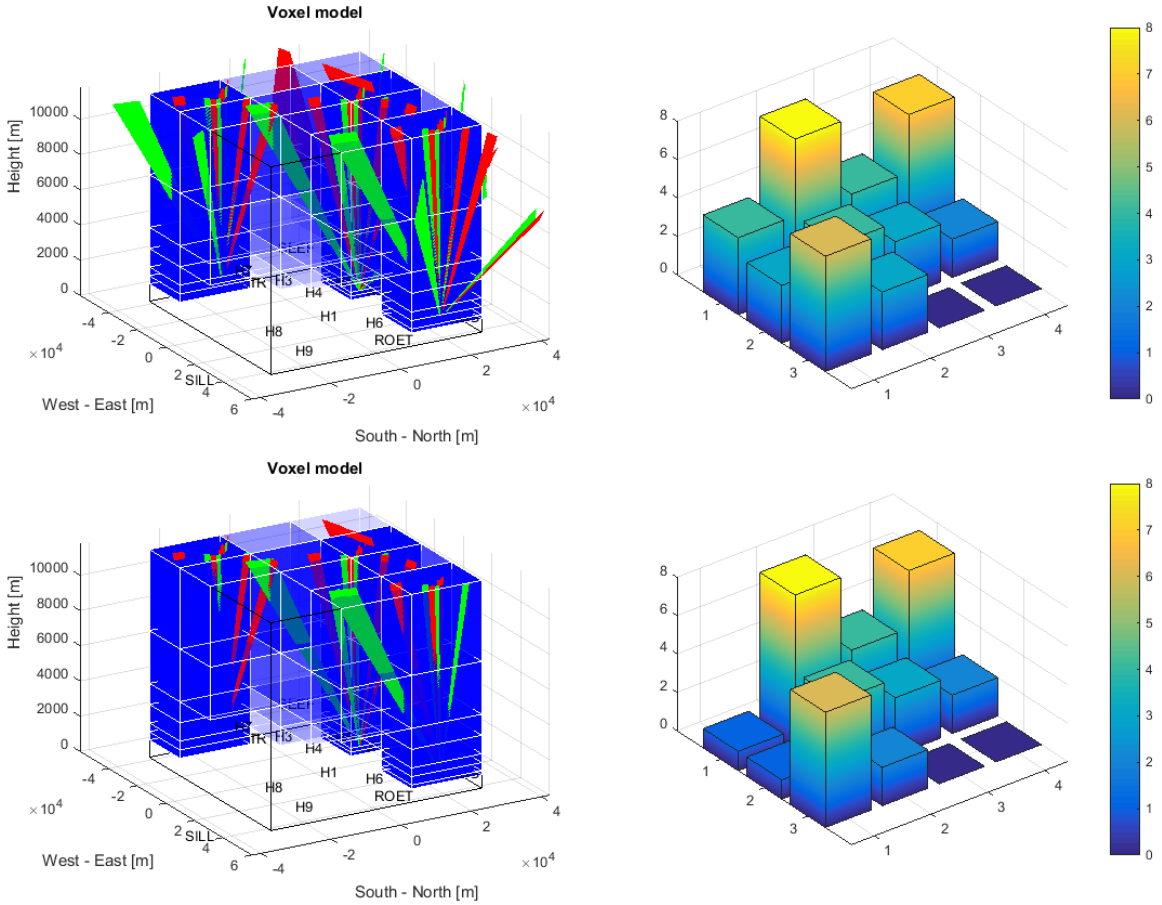


Abbildung 6.1: Vergleich zwischen seitlichen Beobachtungen (oben) und lediglich durch die oberste Schicht eintreffenden Beobachtungen (unten)

6.1 Auswahl des Beobachtungszeitraumes

Im Zuge der Arbeit wurde entschieden den 3. September 2013 für die Untersuchungen auszuwählen. Hierzu wurde ein Matlabskript erstellt, welches die von einer Station sichtbaren Satelliten am Beobachtungstag, registriert (siehe Abbildung 6.2).

Den Daten zufolge werden die meisten Satellitenbeobachtungen zwischen 15:00 und 15:30 gewonnen. Aufgrund dessen wurde der Simulationszeitpunkt von 15:05 bis 15:20 festgelegt. Die Refraktivität kann binnen dieser Zeit als konstant angesehen werden kann. Innerhalb dieses Zeitraumes werden für die Simulation alle 10 Sekunden Beobachtungen generiert. Wenn die bestmögliche Anordnung der Hilfsstationen gefunden ist, werden Beobachtungsdaten für den gesamten

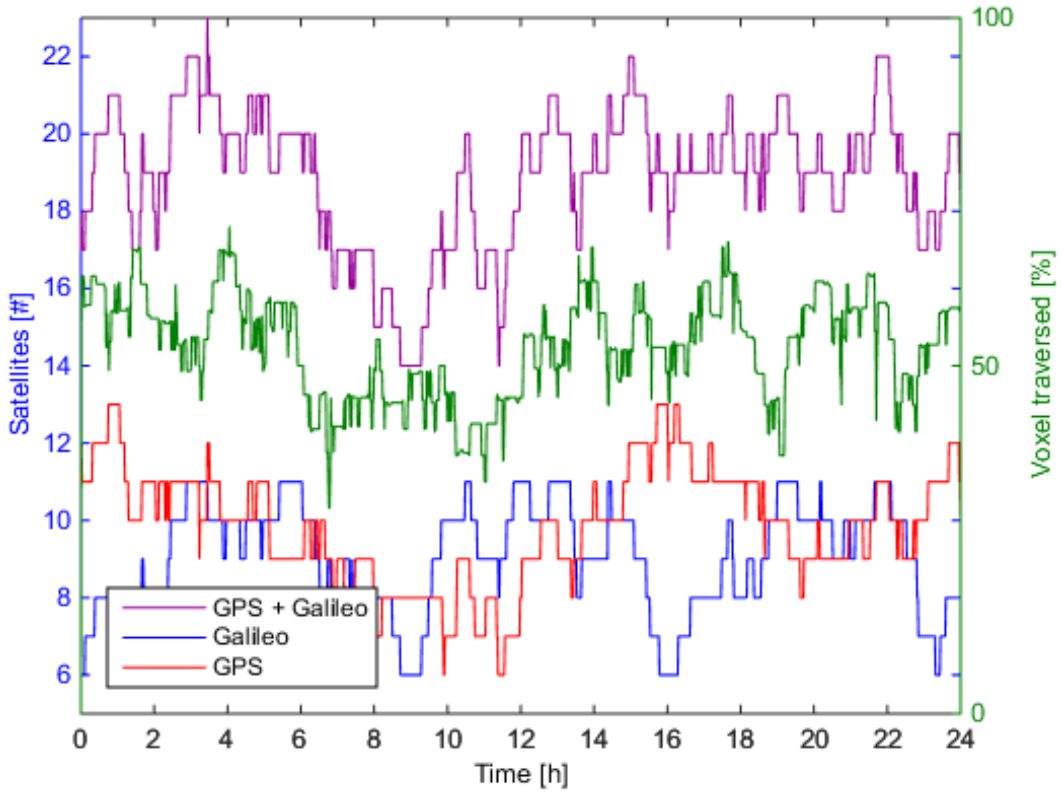


Abbildung 6.2: Verfügbare Satelliten und Anzahl durchlaufener Voxel am 3. September 2013

Tag (0 - 24 h), im 60 Sekundentakt, erstellt.

6.2 Das westliche Untersuchungsgebiet

Durch die spezielle Positionierung des Voxelmodells in den österreichischen Alpen, wurde dieses Untersuchungsgebiet als erstes zur Analyse herangezogen. Es wurden mehrere Szenarien bezüglich der Positionierung der Hilfsstationen vorgenommen:

a) Setzen der zusätzlichen GNSS-Stationen in das Zentrum des jeweiligen Voxels, damit die geometrischen Bedingungen innerhalb einer Voxelsäule für alle Hilfsstationen dieselben sind und nur von der jeweiligen Stationshöhe abhängen (siehe 6.3).

b) Stationen anhand der Klassifizierung (Abschnitt 4.4) positionieren (siehe Abb. 6.4).

c) Da die Stationshöhe eine wichtige Rolle bei der Auswertung des Voxelmodells einnimmt, werden im dritten Vergleich die Hilfsstationen im niedrigsten vorkommenden Höhenlevel des jeweiligen Voxels positioniert (im Folgenden als *minimum-Level* bezeichnet). Hierzu wurden die geringsten Höhen innerhalb eines Voxels bis zur darauffolgenden Höhenschicht

als Positionierungsareal markiert (siehe Abb. 6.7). Mithilfe eines Rasters wurde der Standort ausgewählt, welcher die wenigsten Abschattungen aufweist (siehe Abb. 6.5).

d) Letztendlich wurde noch ein Szenario in Betracht gezogen in welchem die Stationen wieder zentral positioniert wurden, allerdings wurden diese mit den gleichen Höhen (und Abschattungsmasken) wie in der *minimum-Level*-Positionierung versehen.

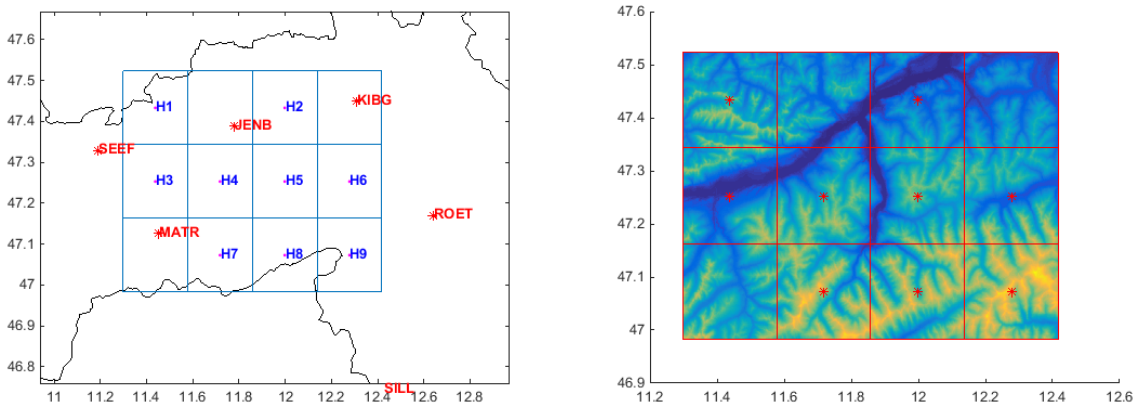


Abbildung 6.3: Zentrale Positionierung der Hilfsstationen

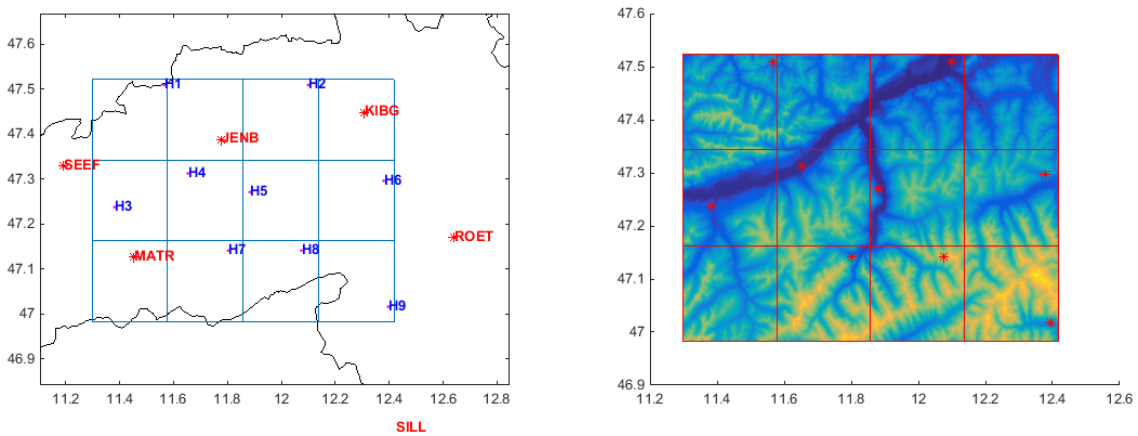


Abbildung 6.4: Positionierung der Hilfsstationen anhand der Klassifizierung

Als erstes wurden Beobachtungen für die drei im Untersuchungsgebiet befindlichen Referenzstationen generiert und danach erst Beobachtungen für die zusätzlichen Hilfsstationen, damit der Reingewinn jeder einzelnen Hilfsstation ersichtlich wird. Die Ergebnisse der vier Szenarien, für einen Beobachtungszeitraum von 15 Minuten, können aus der Tabelle 6.2 entnommen werden. Die Zeilen $H1 - H9$ geben die „Füllung“ des Voxelmodells zusammen mit der Stationshöhe an, wenn zum bestehenden Referenzstationsnetz die jeweilige Hilfsstation mit verwendet wird. Die letzten fünf Spalten zeigen die Ergebnisse für mehrere ausgewählte Stationen, zuzüglich der Re-

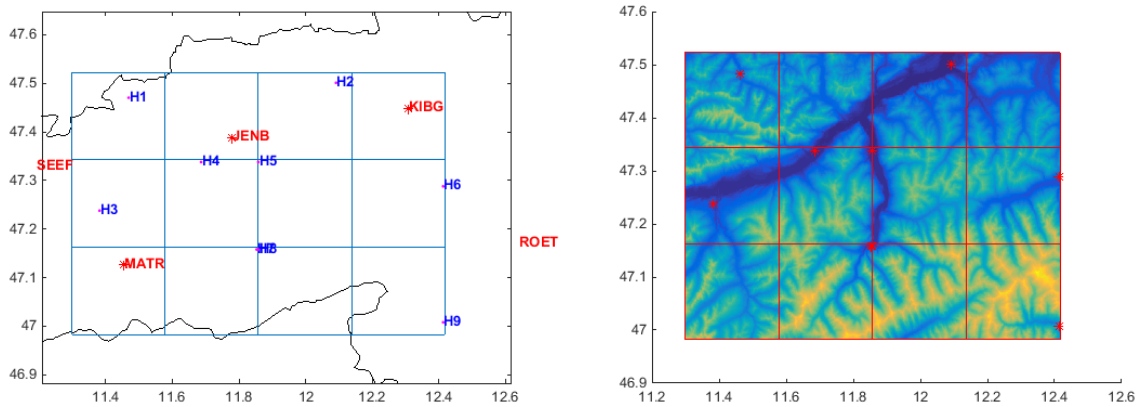


Abbildung 6.5: Positionierung der Hilfsstationen innerhalb des niedrigsten Höhenlevels

Tabelle 6.2: Ergebnisse für das westliche Untersuchungsgebiet

Station	**a) zentral**		**b) klassifiziert**		**c) niedrigstes Level**		**d) zentral & niedrigstes Level**	
	h $[m]$	**Voxel** $[\%]$	**h** $[m]$	**Voxel** $[\%]$	**h** $[m]$	**Voxel** $[\%]$	**h** $[m]$	**Voxel** $[\%]$
H1	2039	31,8	1508	31,8	850	34,1	850	34,1
H2	890	31,1	616	31,8	522	31,8	522	31,8
H3	702	34,8	742	34,8	742	34,8	742	34,1
H4	1703	32,6	541	36,8	539	34,8	539	35,6
H5	2257	32,6	754	34,8	540	37,1	540	35,6
H6	855	34,1	1571	31,8	920	34,1	920	34,1
H7	2519	31,1	1382	34,1	649	43,9	649	35,6
H8	1926	33,3	2857	32,6	663	42,4	663	37,9
H9	2892	32,6	1356	34,8	1334	34,1	1334	35,6
H(all)		58,3		57,6		68,2		65,9
H(5,7,9)		34,1		40,9		51,5		43,2
H(3,5,7,9)		39,4		46,2		56,8		47,7
H(1,5,7,9)		37,1		43,9		56,8		48,5
H(1,3,5,7,9)		41,7		49,2		62,1		52,3

ferenzstationen. Auffällig ist, dass bei allen vier Szenarien hauptsächlich die Stationen mit geringeren Höhen mehr Beobachtungen generieren können, da die vertikalen Voxelgrenzen nicht äquidistant verteil sind sondern mit zunehmender Höhe auch die Dicke der Voxelschichten zunimmt. Aus diesem Grund vermag es Szenario 3 (minimale Stationshöhe) die meisten Beobachtungen zu generieren, sogar mehr als beim 4. Szenario. Die letzte Spalte (d) in Tabelle 6.2 veranschaulicht, dass die horizontale Positionierung innerhalb einer Voxelzelle nicht so entscheidend ist, wie die vertikale Positionierung im untersten Höhenlevel. Dies wird auch durch Abbildung 6.6 gestützt, in welcher die Abschattungsmaske von “Matrei“ zusammen mit der Abschattungsmaske der Voxelmodelloberkante, zu sehen ist. Durch die Begrenzung des Voxelmodells sind teilweise Beobachtungen erst ab einer Elevation von knapp 45° möglich.

Die verwendete Beobachtungszeit von 15 Minuten liefert nur einen eingeschränkten Einblick auf den Versuchsaufbau, da sich durch die verändernde Satellitengeometrie auch Konstellationen

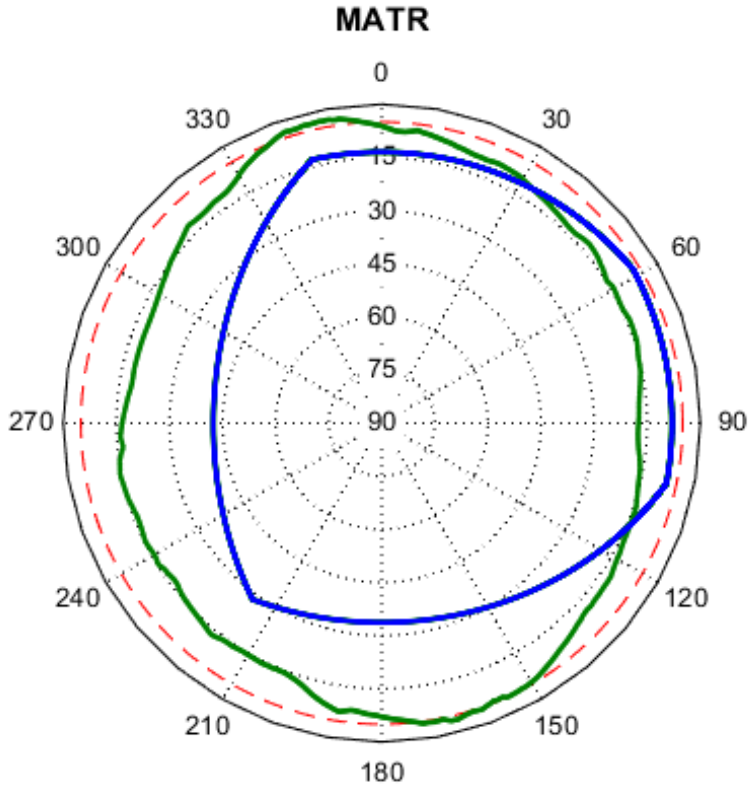


Abbildung 6.6: Vergleich Abschattungsmasken von "Matrei": Gelände (grün), Voxelmodelloberkante (blau) und der „Cut-Off"-Winkel (rot strichliert)

ergeben zu denen weniger Beobachtungen möglich sind. Aus diesem Grund wurde der Auswertealgorithmus für die Referenzstationen und die zwei vielversprechendsten Ergebnisse (siehe 6.2, Zeilen $H(3,5,7,9)$ und $H(1,5,7,9)$) auf jeweils 24 Stunden mit einer Auflösung von 60 Sekunden, für das *minimum-Level*-Szenario, erweitert (siehe Tab. 6.3). In Abbildung 6.7 sind die niedrigsten Höhenlevels in den jeweiligen Voxelzellen mit allen benötigten Hilfsstationen H(1,3,5,7,9), zu sehen.

Tabelle 6.3: 24 Stunden Daten (60 Sekunden Auflösung) für das westliche Gebiet

Stationsnetz	**Voxel** [%]
Referenznetz	37,1
Referenznetz+H(3,5,7,9)	59,8
Referenznetz+H(1,5,7,9)	61,4

Mit Hilfe der zusätzlichen Hilfsstationen H1, H5, H7 und H9 ist es möglich das Voxelmodell zu 61,4% bzw. 81 der 132 Voxel mit Beobachtungen zu „füllen". Das entspricht zwar nicht genau der Abschätzung aus Kapitel 4.2.2, wonach die durch die Topographie abgedeckten Voxel lediglich eine „Füllung" des Voxelmodells von 53,8% erlauben. Dies ist einerseits die Folge des gebirgigen Geländes und der großen (20 km x 20 km) Voxelzelle, wodurch die Abschätzung durch

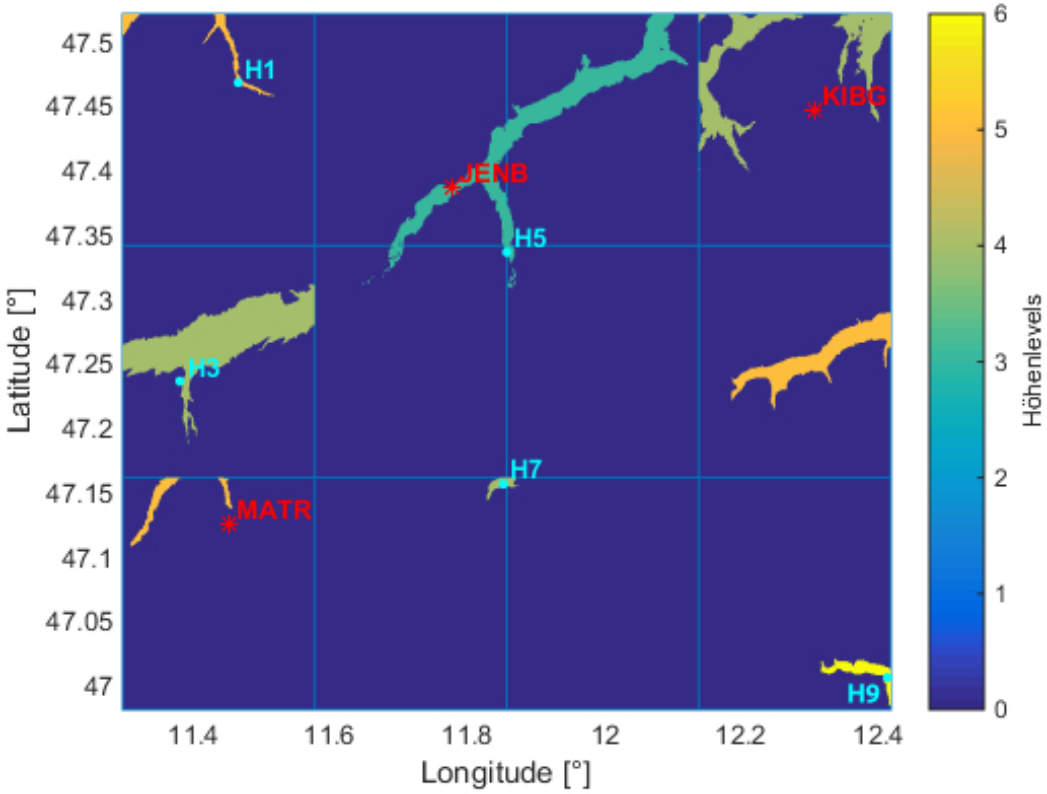


Abbildung 6.7: Die niedrigsten Höhenlevels in der jeweiligen Voxelzelle

den recht einfachen Algorithmus (Vergleich der Höhe des Voxelzentrums mit der Geländehöhe) etwas grob ausfällt und dadurch die mögliche „Füllung“ geringer schätzt. Angesichts dieses Ergebnisses, durch vier zusätzliche Hilfsstationen, und der Tatsache, dass bei einer Positionierung von einer Hilfsstation in jeder Voxelzelle, lediglich eine 68,2% „Füllung“ des Modells möglich ist (siehe 6.2, Zeile H(all)), kann man von einem zufriedenstellenden Ergebnis sprechen. Werden die untersten drei Schichten aus der Auswertung exkludiert, da diese ohnehin im Tomographieansatz nicht berücksichtigt werden, weil sie vollkommen von der Topographie bedeckt werden, steigen die Beobachtungen im Voxelmodell auf 84,4% an. Abbildung 6.8 veranschaulicht den Vergleich zwischen den Voxelmodellen, welche lediglich durch die Verwendung der drei Referenzstationen und jenem das mittels der zusätzlichen Hilfsstation erzeugt wurde.

6.3 Das östliche Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet im Osten Österreichs wurde anhand des *minimum Level*-Szenarios aus Abschnitt 6.2 analysiert. Dieses beruht auf der Tatsache, dass eine GNSS-Hilfsstation die im untersten Höhenlevel einer Voxelzelle platziert wird, mehr Voxel durchdringen kann als höher gelegene Stationen, vor allem durch die nicht äquidistanten Grenzen der Höhenlevels (siehe Tab. 4.1). Die vollständige Bestückung des Untersuchungsgebietes mit Hilfsstationen (eine Station

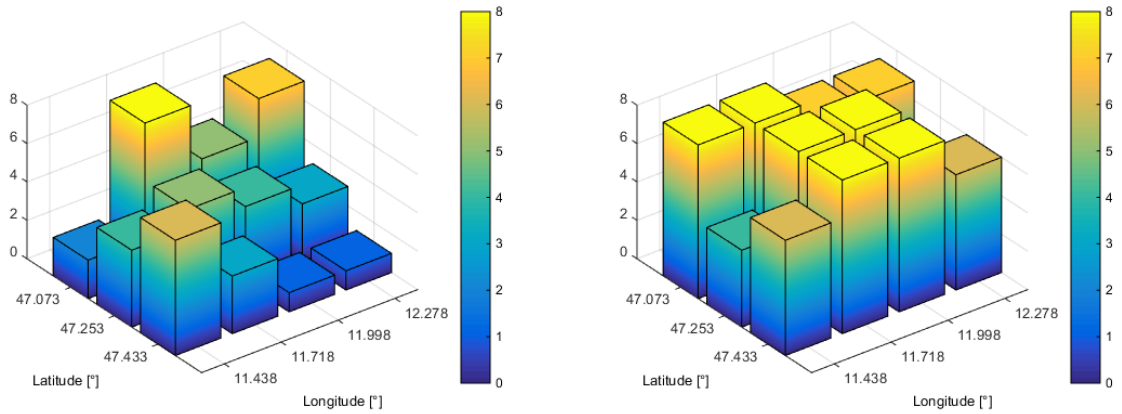


Abbildung 6.8: Vergleich der Voxelmodelle unter Anwendung des *minimum Level*-Szenarios, nur mit Referenzstationen (links) und durch vier zusätzliche Hilfsstationen (rechts) ergänzt

pro Voxelzelle) ergab eine 87,3%ige „Füllung“, bei einer Simulationszeit von 15 Minuten (siehe Abschnitt 6.1), wohingegen bei Verwendung der Referenzstationen lediglich eine 42,2%ige „Füllung“ des Voxelmodells erreicht werden konnte (siehe Abb. 6.9). Daraufhin wurden Stationen im untersten Höhenlevel einer Voxelzelle, möglichst nahe an Eckpunkten mehrerer Voxelzellen, positioniert (siehe Abb. 6.10). In Abbildung 6.10 ist das GNSS-Stationsnetz mit den niedrigsten im Voxel vorkommenden Höhenlevel zu sehen. Bis auf die Referenzstation in Traisen und die Hilfsstation „H1“ befinden sich alle restlichen Stationen im niedrigsten vorkommenden Höhenlevel (grün dargestellt in der Abbildung) mit Höhen zwischen 100 m und 320 m. Die Stationen „TRAI“ und „H1“ befinden sich im nächsthöheren Level (gelbes Areal), mit Höhen von 320 m bis 540 m.

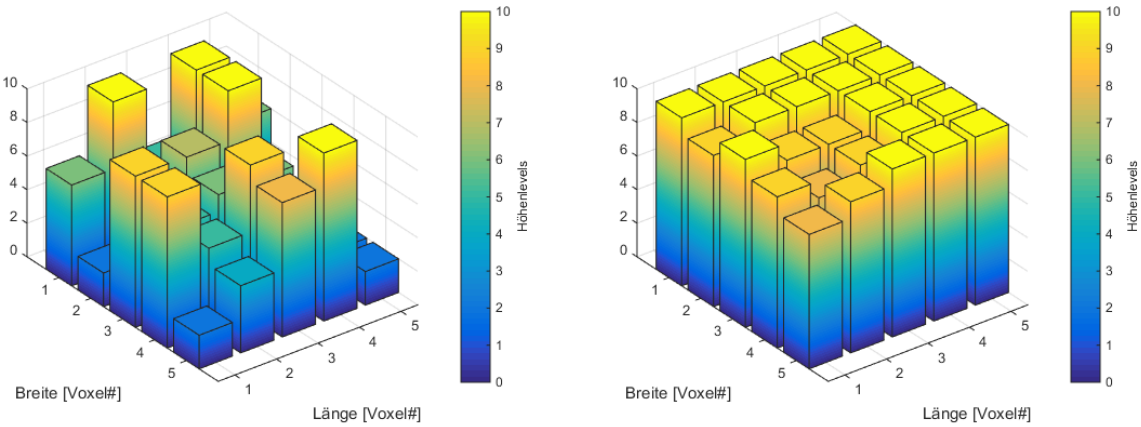


Abbildung 6.9: Voxelmodellvergleich: nur mit Referenzstationen (links) und durch zusätzliche Hilfsstationen in jeder Voxelzelle (rechts)

Aus dieser Auswahl an Hilfsstationen wurden drei 24 Stunden Durchläufe mit unterschiedlichen Konfigurationen durchgeführt, deren Ergebnisse in Tabelle 6.4 eingesehen werden können. Demnach kann eine fast 23%ige Steigerung bei Verwendung von vier GNSS-Hilfsstationen und

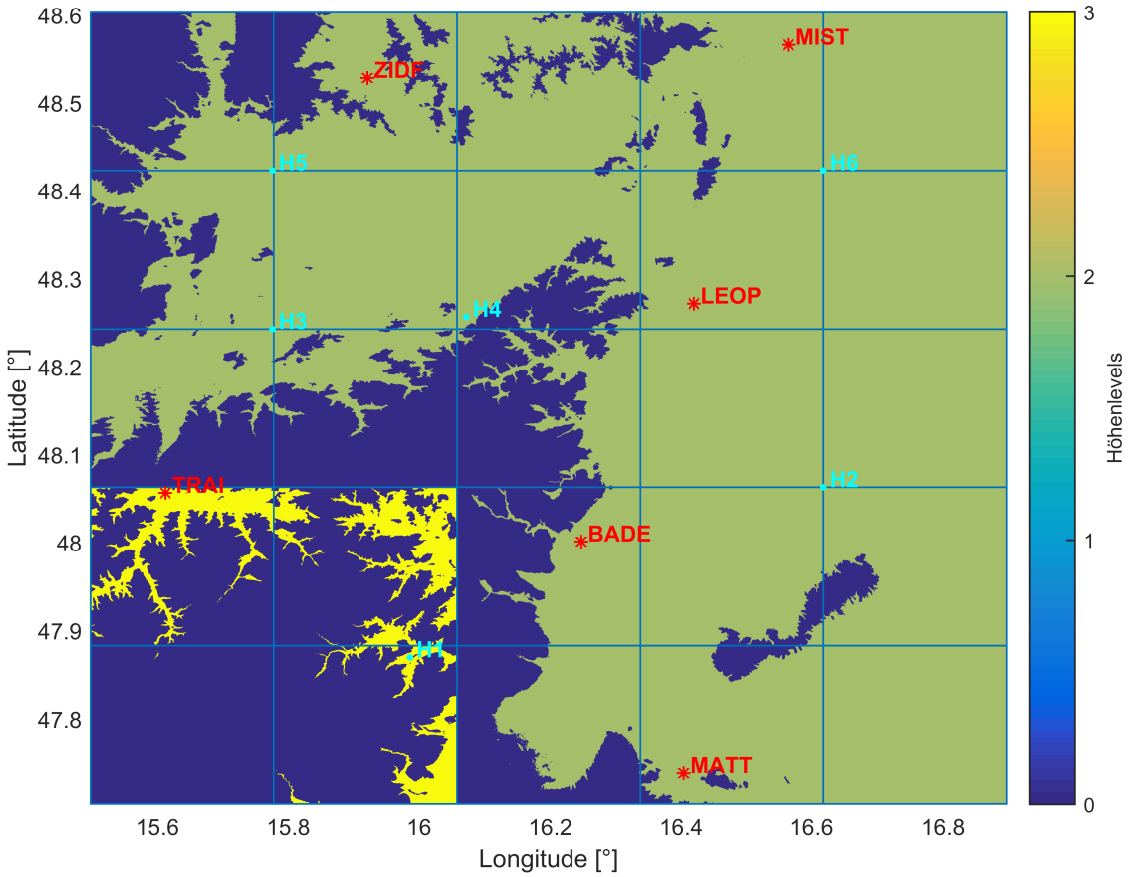


Abbildung 6.10: Voxelzellen mit dem geringsten Höhenlevel und ausgewählten Hilfsstationen

eine 26%ige Steigerung mit fünf Stationen, erzielt werden (siehe Abb. 6.11).

Tabelle 6.4: 24 Stunden Daten (60 Sekunden Auflösung) für das östliche Gebiet

Stationsnetz	**Voxel durchdrungen** [%]
Referenznetz	51,6
Referenznetz+H(1,2,3,6)	74,5
Referenznetz+H(1,2,4,5,6)	77,8

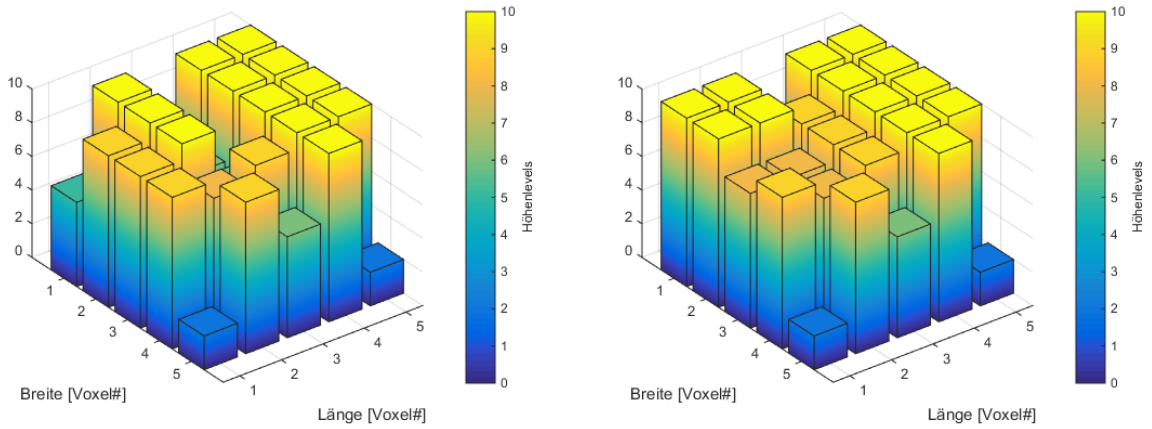


Abbildung 6.11: Voxelmodellvergleich: Referenzstationen mit zusätzlichen Hilfsstationen H(1,2,3,6) (links) und H(1,2,4,5,6) (rechts)

Kapitel 7

Schlussfolgerung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden für beide Untersuchungsgebiete, im Osten und Westen Österreichs, mehrere Szenarien bezüglich der zusätzlichen Ausstattung mit GNSS-Einfrequenzstationen untersucht. Anhand dieser Daten, insbesondere der 24 Stunden Durchläufe und ohne den wirtschaftlichen Aspekt für den Aufbau einer Hilfsstation aus dem Auge zu verlieren, wird empfohlen das kleinere östliche Untersuchungsgebiet mit vier und das westliche mit fünf zusätzlichen GNSS-Hilfsstationen auszustatten (siehe Abb. 7.1). Dadurch ist es möglich die Beobachtungen in den Voxelmodellen im Westen um ca. 33% und im Osten um ca. 26%, im Vergleich zur Auswertung mit lediglich den Referenzstationen, zu steigern. Werden die untersten Voxelebenen exkludiert, welche von der Topographie abgedeckt werden und somit für den Tomographieansatz ohne Nutzen sind, so steigt in beiden Gebieten der Grad der Füllung auf ungefähr 85% (siehe Tab. 7.1).

Tabelle 7.1: Vergleich der Untersuchungsgebiete nur mit Referenzstationen (RefStats), zusätzlichen Hilfsstationen (HilfStats) und ohne den untersten Voxelebenen die durch die Topographie abgedeckt werden

Gebiet	**RefStats**	**RefStats+HilfStats** [%]	**RefStats + HilfStats ohne *leere* Ebenen** [%]
Osten	51,6	77,8	85,6
Westen	37,1	61,4	84,4

Neben der Positionierung von zusätzlichen GNSS-Hilfsstationen sollten auch die Auswirkungen einer vollständigen Galileo-Satellitenkonstellation auf das Voxelmodell untersucht werden. Hierzu wurden Beobachtungsdaten einer fiktiven Galileo-Satellitenkonstellation, mittels eines GNSS-Signalsimulators, erstellt und zusammen mit GPS-Beobachtungsdaten prozessiert. Die Verwendung von zwei Satellitensystemen führt zu einer Verdoppelung der Satellitenbeobachtungen sowie der durchlaufenen Voxel (siehe Abb. 6.2).

Diese Arbeit hat gezeigt dass die Stationshöhe bei der Generierung von Beobachtungen innerhalb eines Voxelmodells, eine entscheidene Rolle spielt. Je niedriger eine GNSS-Station positioniert wird, desto mehr Voxel können durchdrungen werden, sei es vertikal in Richtung des Zenits, oder auf schräg einfallende Beobachtungen bezogen. Bei der Positionierung an Voxelecken, die keine Außengrenzen des Voxelmodells sind, ergeben sich mehr Beobachtungen über 24

Stunden betrachtet, da in alle Richtungen höher fliegende Satelliten beobachtet werden können. Ansonsten spielt die horizontale Positionierung innerhalb der Voxelzellen, genauso wie Abschattungen bei den GNSS-Referenzstationen, keine zentrale Rolle, da in kleinen Voxelmodellen, die Modelloberkante das Beobachtungsfenster beträchtlich einschränkt.

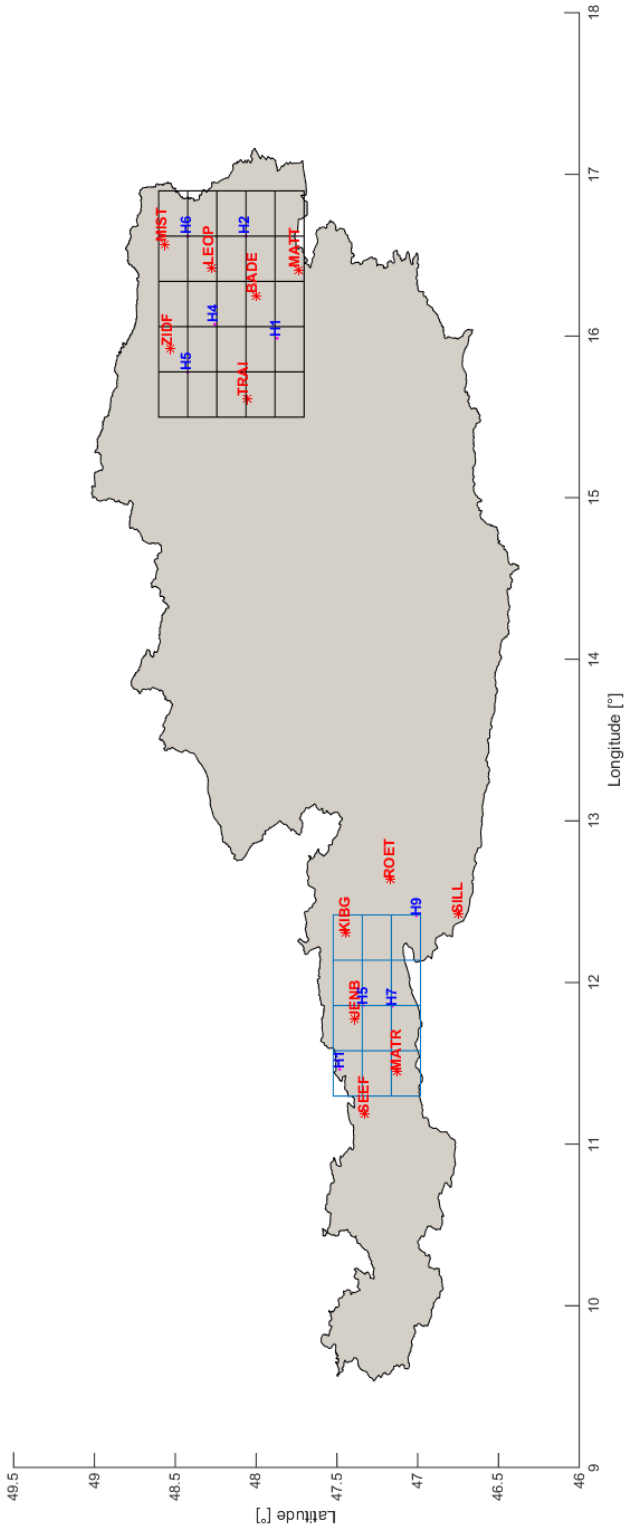


Abbildung 7.1: Untersuchungsgebiete im Osten und Westen mit zusätzlichen Hilfsstationen

Abbildungsverzeichnis

1.1 Das vertikale Temperaturprofil der „U.S. Standard Atmosphere 1976“ (Quelle: 1999 Oxford University Press) 2

2.1 Merkmale gegenwärtiger und zukünftiger Generationen von GPS-Satelliten (Quelle: www.gps.gov/systems/gps/space/, Zugriff am 13. September 2015) 7
2.2 Standorte der GPS-Kontrollsegmentstationen (Quelle: www.gps.gov/systems/gps/control/, Zufriff am 13. September 2015) 8
2.3 Bodenantennennetzwerk des Kontrollsegments (Quelle: Kaplan & Hegarty (2006)) 9
2.4 Galileo GMS und GCS Stationen (Quelle: Nurmi *et al.* (2015)) 12
2.5 Grundprinzip der GNSS-Ortung 13
2.6 Galileo und GPS Frequenzbänder, Quelle: ESA (2010) 16
2.7 Elektronendichte und Ionosphärenschichten 17
2.8 Globale TEC-Karte (von CODE erstellt), für den 29. Juni 2012 18

3.1 3D Voxelstruktur über Österreich (Quelle: Möller *et al.* (2013)) 22

4.1 EPOSA GNSS-Referenznetz, Quelle: Möller *et al.* (2013) 32
4.2 Voxelmodell: Ost- und Westregion, Quelle: Möller *et al.* (2013) 33
4.3 DGM mit Referenzstationen 34
4.4 Voxel durch Topographie verdeckt 34
4.5 DGM im Grundriss 35
4.6 DGM mit Referenzstationen 35
4.7 Durch die Topographie bedecktes, „leer bleibendes“ Voxelmodell 36
4.8 Elevationsmaske für die Referenzstation Traisen 37
4.9 Abschattungsmasken der EPOSA Referenzstationen im Westen 38
4.10 Vergleich der simulierten Abschattungsmaske (rot) mit reellen Daten (blau) der Station „Matrei“ 39
4.11 DGM im Untersuchungsgebiet 40
4.12 Geländeanstieg im Untersuchungsgebiet 40
4.13 Klassifizierung der Höhen 40
4.14 Klassifizierung des Geländeanstiegs 40

4.15 Addition der Höhen- und Geländeneigungsklassifizierung 40
4.16 Anwendung des Moving-Average-Filters auf die addierte Klassifizierung 40
4.17 Verbleibendes Interessensgebiet (in gelb) 41
4.18 Raster mit provisorischen Stationspositionen für die Abschattungsmasken erstellt werden 41
4.19 „Ideale“ Standpunkte für das westliche Untersuchungsgebiet 41

5.1 Beispiel einer Brdc-Datei (in RINEX umgewandelt) 44
5.2 *NavX-NCS* Simulations-Oberfläche 46
5.3 Strahlenverfolgung im Voxelmodell (Quelle: Amanatides & Woo (1987)) 46
5.4 Blockdiagramm der Algorithmus Funktionsweise 47

6.1 Vergleich zwischen seitlichen Beobachtungen (oben) und lediglich durch die oberste Schicht eintreffenden Beobachtungen (unten) 50
6.2 Verfügbare Satelliten und Anzahl durchlaufener Voxel am 3. September 2013 51
6.3 Zentrale Positionierung der Hilfsstationen 52
6.4 Positionierung der Hilfsstationen anhand der Klassifizierung 52
6.5 Positionierung der Hilfsstationen innerhalb des niedrigsten Höhenlevels 53
6.6 Vergleich Abschattungsmasken von “Matrei“: Gelände (grün), Voxelmodelloberkante (blau) und der „Cut-Off“-Winkel (rot strichliert) 54
6.7 Die niedrigsten Höhenlevels in der jeweiligen Voxelzelle 55
6.8 Vergleich der Voxelmodelle unter Anwendung des *minimum Level*-Szenarios, nur mit Referenzstationen (links) und durch vier zusätzliche Hilfsstationen (rechts) ergänzt 56
6.9 Voxelmodellvergleich: nur mit Referenzstationen (links) und durch zusätzliche Hilfsstationen in jeder Voxelzelle (rechts) 56
6.10 Voxelzellen mit dem geringsten Höhenlevel und ausgewählten Hilfsstationen 57
6.11 Voxelmodellvergleich: Referenzstationen mit zusätzlichen Hilfsstationen H(1,2,3,6) (links) und H(1,2,4,5,6) (rechts) 58

7.1 Untersuchungsgebiete im Osten und Westen mit zusätzlichen Hilfsstationen 61

Tabellenverzeichnis

4.1 Höhe der horizontalen Grenzschichten des Voxelmodells 32
4.2 Horizontale Begrenzungen des Voxelmodells 33

6.1 Vergleich zwischen seitlich eintreffenden Beobachtungen und von oben für die Referenzstationen im westlichen Untersuchungsgebiet, mit insgesamt 132 Voxeln . . . 50
6.2 Ergebnisse für das westliche Untersuchungsgebiet 53
6.3 24 Stunden Daten (60 Sekunden Auflösung) für das westliche Gebiet 54
6.4 24 Stunden Daten (60 Sekunden Auflösung) für das östliche Gebiet 57

7.1 Vergleich der Untersuchungsgebiete nur mit Referenzstationen (RefStats), zusätzlichen Hilfsstationen (HilfStats) und ohne den untersten Voxelebenen die durch die Topographie abgedeckt werden 59

Literaturverzeichnis

AMANATIDES, J. AND WOO, A. (1987). A Fast Voxel Traversal Algorithm for Ray Tracing. In *Eurographics '87*, 3–10.

BENDER, M. AND RAABE, A. (2007). Preconditions to ground based GPS water vapour tomography. *Annales Geophysicae*, 25, 1727–1734.

BENDER, M., DICK, G., GE, M., DENG, Z., WICKERT, J., KAHLE, H.G., RAABE, A. AND TETZLAFF, G. (2010). Development of a GNSS water vapour tomography system using algebraic reconstruction techniques. *Advances in Space Research*.

BENDER, M., DICK, G., GE, M., DENG, Z., WICKERT, J., KAHLE, H.G., RAABE, A. AND TETZLAFF, G. (2011). Development of a GNSS water vapour tomography system using algebraic reconstruction techniques. *Advances in Space Research*, 47, 1704 – 1720, {GNSS} Remote Sensing-2.

BEVIS, M., BUSINGER, S., HERRING, T.A., ROCKEN, C., ANTHES, R.A. AND WARE, R.H. (1992). GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 97, 15787–15801.

BÖHM, J., HEINKELMANN, R. AND SCHUH, H. (2007). Short note: A global model of pressure and temperature for geodetic applications. *Journal of Geodesy*, Volume 81, 679–683.

CENSOR, Y. (1983). Finite series-expansion reconstruction methods. *Proc. IEEE*, 71, 409 – 419.

ESA (2010). *European GNSS (Galileo) Open Service. Signal In Space Interface Control Document*. Issue 1.1.

ESA (2015). *European GNSS (Galileo) Open Service. Ionospheric Correction Algorithm for Galileo Single Frequency Users*. Issue 1.1.

GILBERT, P. (1972). Iterative methods for the three-dimensional reconstruction of an object from projections. *Journal of Theoretical Biology*, 36, 105 – 117.

GIOVANNI, G.D. AND RADICELLA, S. (1990). An analytical model of the electron density profile in the ionosphere. *Advances in Space Research*, 10, 27 – 30.

GORDON, R., BENDER, R. AND HERMAN, G.T. (1970). Algebraic reconstruction techniques (art) for three-dimensional electron microscopy and x-ray photography. *Journal of Theoretical Biology*, 29, 471 – 481.

HOFMANN-WELLENHOF, B., LICHTENEGGER, H. AND COLLINS, J. (2003). *Global Positioning System: Theory and Practice*. Springer-Verlag.

HOFMANN-WELLENHOF, B., LICHTENEGGER, H. AND WASLE, E. (2008). *GNSS–global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer-Verlag.

KAPLAN, E.D. AND HEGARTY, C. (2006). *Understanding GPS: Principles and Applications.-2nd ed.*, Vol. Artech House mobile communications series. Artech House.

KLOBUCHAR, J. *et al.* (1987). Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users. *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, 325–331.

KRAUS, H. (2004). *Die Atmosphäre der Erde: Eine Einführung in die Meteorologie*. Springer-Verlag, 3. Aufl.

MAGNET, N. AND WEBER, R. (2013). Ionosphärische Korrektur von GNSS-Einfrequenzdaten mittels Multilayer Modell. In *Book of Abstracts Geodätische Woche 2013*, 36, talk: Geodästische Woche 2013, Essen, Germany; 2013-10-08 – 2013-10-10.

MANNING, T., ZHANG, K., ROHM, W., CHOY, S. AND HURTER, F. (2012). Detecting Severe Weather using GPS Tomography: An Australian Case Study. *Journal of Global Positioning Systems*, 11, 58–70.

MÖLLER, G., WEBER, R. AND BÖHM, J. (2013). GNSS tomography of the atmosphere - expectation from Galileo FOC. In *Proceedings of the 4th International Galileo Science Colloquium*, International Galileo Science Colloquium.

NURMI, J., LOHAN, E.S., SAND, S. AND HURSKAINEN, H. (2015). *GALILEO Positioning Technology*. Springer Netherlands.

ROHM, W. (2013). The ground GNSS tomography — unconstrained approach. *Advances in Space Research*, 51, 501 – 513.

SEEBER, G. (2003). *Satellite Geodesy*. Walter de Gruyter, 2nd edn.

SUBIRANA, J., ZORNOZA, J., PAJARES, M., AGENCY, E.S. AND FLETCHER, K. (2013). *GNSS Data Processing*. No. Bd. 1 in ESA TM, ESA Communications.

THAYER, G.D. (1974). An improved equation for the radio refractive index of air. 9, 803–807.