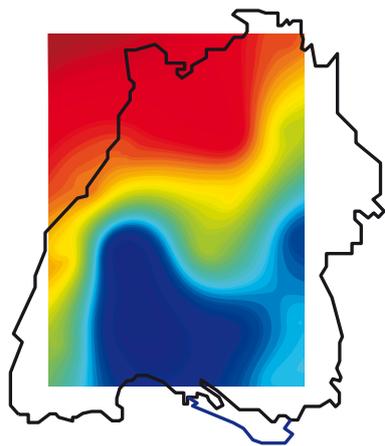


Universität Karlsruhe (TH)

Schriftenreihe des Studiengangs
Geodäsie und Geoinformatik
2007,2



Xiaoguang Luo
Michael Mayer
Bernhard Heck



Bestimmung von
**hochauflösenden
Wasserdampffeldern**
unter Berücksichtigung
von **GNSS-Doppeldifferenz-
residuen**



Xiaoguang Luo, Michael Mayer, Bernhard Heck

Bestimmung von hochauflösenden Wasserdampffeldern unter Berücksichtigung von GNSS-Doppeldifferenzresiduen

Universität Karlsruhe (TH)

Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik

2007, 2

Bestimmung von hochauflösenden Wasserdampffeldern unter Berücksichtigung von GNSS-Doppeldifferenzresiduen

von

Xiaoguang Luo

Michael Mayer

Bernhard Heck



universitätsverlag karlsruhe

Impressum

Universitätsverlag Karlsruhe
c/o Universitätsbibliothek
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe
www.uvka.de



Dieses Werk ist unter folgender Creative Commons-Lizenz
lizenziiert: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/de/>

Universitätsverlag Karlsruhe 2007

ISSN: 1612-9733
ISBN: 978-3-86644-115-6

Kurzfassung

Die Einflüsse der Erdatmosphäre auf die Signale von globalen Satellitennavigationssystemen (GNSS: Global Navigation Satellite System) können in iono- und neutrosphärische Einflüsse eingeteilt werden. Die Neutrosphäre ist für elektromagnetische Wellen des L-Bands nicht dispersiv und deren Einflüsse auf die GNSS-Signale können nicht durch Messungen auf mehreren Trägerfrequenzen eliminiert werden. Die neutrosphärischen Einflüsse lassen sich in eine trockene und eine feuchte Komponente unterteilen, wobei der feuchte Anteil i.d.R. weniger als 10% der gesamten Einflüsse beträgt, gleichzeitig jedoch wertvolle Informationen über den wichtigen Bestandteil der Erdatmosphäre, Wasserdampf, enthält.

Die Variation des feuchten Anteils des Neutrosphäreneinflusses kann in eine sog. isotrope und eine sog. anisotrope Komponente unterteilt werden. Der isotrope Anteil kann im Rahmen einer statischen GNSS-Auswertung durch Prädiktionsmodell und Zusatzparameter, ein zweiteiliges Verfahren, beschrieben werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll der anisotrope Anteil unter Anwendung von Residueninformationen aus der GNSS-Auswertung bei der Modellbildung mitberücksichtigt werden. Kombiniert mit der o.g. zweiteiligen Modellierung können Wasserdampffelder unter Anwendung eines planaren Einschnittmodells zeitlich und räumlich hochauflösend bestimmt werden.

Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen konzentrieren sich auf den anisotropen Anteil des feuchten Neutrosphäreneinflusses, von seiner Entstehung durch die Konvertierung von Doppeldifferenzresiduen (DDR) über seine Abhängigkeit von verschiedenen Einflussfaktoren (z.B. Basislinienlänge, Mehrwegeeffekte und Auswertestrategie) bis zu seinem Beitrag bei der Visualisierung von Wasserdampffeldern. Als Datenmaterial stehen die GPS-Beobachtungen aller 16 Baden-Württembergischen Stationen des SAPOS[®]-Netzes (Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung) im Zeitraum DOY2004: 186-193 zur Verfügung.

Basierend auf Berechnungen und graphischen Darstellungen lassen sich Animationen generieren, die zeitliche Variationen des Wasserdampfs in einem 3- bzw. 30-Minuten-Takt veranschaulichen können. Bei relativ ruhigen Wetterbedingungen und unter der Voraussetzung, dass sowohl das funktionale als auch das stochastische Modell bei der GNSS-Auswertung zutreffend definiert sind, liegen die DDR normalerweise in einem kleinen Wertebereich von wenigen Millimetern. In diesem Fall lohnt es sich nicht, den anisotropen Anteil bei der Modellierung mitzuberücksichtigen, weil die Konvertierung von Doppeldifferenzresiduen in Pseudo-Zerodifferenzresiduen (PZDR) mit einem hohen Zeit- und Rechenaufwand verbunden ist. Deswegen ist es notwendig, eine Größenordnung für DDR aus der GNSS-Auswertung festzulegen, ab der die Residueninformationen bei neutrosphärischer Modellierung zu berücksichtigen sind. Am Schluss dieser Arbeit wird die vorgestellte dreiteilige neutrosphärische Modellierung mit anderen Modellierungsmöglichkeiten hinsichtlich der räumlichen Auflösung des ermittelten Wasserdampffeldes verglichen. Durch diesen Vergleich wird festgestellt, dass die dreiteilige neutrosphärische Modellierung durch Berücksichtigung der Residueninformationen eine verbesserte räumliche und zeitliche Auflösung des modellierten Wasserdampffeldes gegenüber der gewöhnlichen zweiteiligen Modellierung darstellt.

Abstract

Global Navigation Satellite System (GNSS) signals are delayed by propagation through the Earth's atmosphere. The delays can be divided into ionospheric and neutral atmospheric delay terms. For electromagnetic signals at microwave frequency the ionosphere is a dispersive medium, thus the first order ionospheric effects can be corrected using dual frequency observations. In contrast to the ionosphere, the neutral atmosphere is not dispersive. Because of the different behaviour in the neutral atmosphere it is convenient to separate the neutral atmospheric delay into a dry and a wet component. Typically, the magnitude of the wet component is less than 10% of the total delay. But this component includes valuable information about an essential part of the Earth's atmosphere, the water vapor.

Additionally the wet component can be separated into an isotropic and an anisotropic part. Under the azimuthal isotropic assumption of the neutral atmosphere the isotropic part of the wet delay can be estimated based on a prediction model added with the wet part of the site specific neutral atmospheric parameter (SSNP) resulting from the GNSS processing. This work focuses on the modelling of the anisotropic part of the wet delay, which can be obtained from the residuals of modelled GNSS observations. Combined with the isotropic component a two-dimensional water vapor field can be reconstructed and visualised with high temporal and spatial resolution by means of a so-called planar one-layer model. Furthermore, the accuracy and the reliability of the neutral atmospheric modelling is affected by a lot of factors, such as length of the baseline, multipath effects, and processing strategies. The influences of these factors on the results of the neutral atmospheric modelling are also analyzed. The observation data from all sixteen sites of the *SAPOS*[®] (Satellite *Positioning Service* of the German State Survey) network in Baden-Württemberg spanning eight days, DOY2004: 186-193, are available for the GNSS processing.

Based on calculations and graphics, animations at 3 resp. 30 minutes rates are generated, which represent the temporal variations of the water vapor field. Under normal weather conditions and the assumption that the functional and the stochastic models in the GNSS processing are appropriate, the magnitude of the residuals of processed GNSS observations is often very small, about a few millimeters. In this case it is not worth to take the anisotropic component into account, because the conversion of the residual information for a single-path between a transmitting satellite and a site is very time-consuming. Therefore the magnitude of the double difference residuals (DDR) is estimated, in order to make a decision, whether the anisotropic component should be considered in the neutral atmospheric modelling to determine the atmospheric water vapor. Finally the water vapor graphics are compared with the results of other investigations in order to validate the improvement in spatial resolution of the modelled water vapor field. It is proved that the spatial and temporal resolution benefits from modelling of the anisotropic part by introducing the residual information.

Abkürzungen

AIUB	Astronomisches Institut der Universität Bern
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BS5	Bernese GPS-Software 5.0
BW	Baden-Württemberg
DDR	Double Difference Residual/-s Doppeldifferenzresiduum/-en
DOY	Day Of Year
ECMWF	European Center for Medium range Weather Forecasting
EPN	EUREF Permanent Network
ETRS	European Terrestrial Reference System
EUREF	EUropean REference Frame
GK	Gauß-Krüger
GIK	Geodätisches Institut der Universität Karlsruhe (TH)
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GUI	Graphical User Interface
IGS	International GNSS Service
IPWV	Integrated Precipitable Water Vapor
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
ITRS	International Terrestrial Reference System
MF	Mapping Function
PCV	Phase Center Variations
PRN	Pseudo Random Noise
PSDR	Pseudo Single Difference Residual/-s Pseudo-Singledifferenzresiduum/-en
PW	Precipitable Water
PZDR	Pseudo Zero Difference Residual/-s Pseudo-Zerodifferenzresiduum/-en
QIF	Quasi IonosphärenFrei
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
RMS	Root Mean Square
SAP ^{POS} ®	Satelliten <i>positionierungsdienst</i> der deutschen Landesvermessung
SWD	Slant Water Delay
SSNP	StationsSpezifische Neutrosphärische Parameter
SW	Slant Water
SWV	Slant Water Vapor
TEC	Total Electron Content
VB6	Visual Basic 6.0
ZWD	Zenith Water Delay

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	7
1.1	Motivation	7
1.2	Zielsetzung und Gliederung der Arbeit	8
2	Erdatmosphäre und Wasserdampf	9
2.1	Zusammensetzung der Erdatmosphäre	9
2.2	Mensch und Atmosphäre	9
2.3	Wasserdampf als ein wichtiger Bestandteil der Erdatmosphäre	10
2.4	Erfassung des atmosphärischen Wasserdampfgehaltes	10
2.4.1	Meteorologische Standardsensoren	10
2.4.2	Globale Satellitennavigationssysteme	11
3	Aufbau der Erdatmosphäre und ihre Einflüsse auf GNSS-Signale	12
3.1	Einteilung der Erdatmosphäre nach dem Temperaturverlauf	12
3.2	Einteilung der Erdatmosphäre nach Ionisierungsgrad	13
3.3	Atmosphärische Einflüsse auf GNSS-Signale	13
3.3.1	Ionosphärische Einflüsse auf GNSS-Signale	14
3.3.2	Neutrosphärische Einflüsse auf GNSS-Signale	15
4	Bestimmung des atmosphärischen Wasserdampfs durch GNSS	16
4.1	Quantifizierung des Wasserdampfgehaltes	16
4.2	Grundlagen der neutrosphärischen Modellierung	17
4.3	Gewöhnliche zweiteilige neutrosphärische Modellierung	19
4.3.1	A priori Prädiktionsmodell	19
4.3.2	Schätzung von Zusatzparametern	21
4.4	Berücksichtigung anisotroper Anteile	23
5	Software	25
5.1	Microsoft Visual Basic 6.0	25
5.2	Bernese GPS Software 5.0	25
5.3	MATLAB Version 7.0	26
6	Vorbereitende Arbeiten	27
6.1	Modifikation der BS5	27
6.2	Schnittstelle der BS5	27
6.3	Konvertierung der DDR in PZDR	28
6.3.1	Konvertierung der DDR in PSDR	28
6.3.2	Konvertierung der PSDR in PZDR	30
7	Datenprozessierung	32
7.1	Datumstransformation	33
7.2	GNSS-Auswertung mit der BS5	35
7.2.1	Vorbereitung	37
7.2.2	Kampagnendefinition	37
7.2.3	Datenaufbereitung	38
7.2.4	Präprozessierung	38
7.2.5	Parameterschätzung	38
7.2.6	Speicherung der DDR	39

8	Analyse der Ergebnisse	41
8.1	Analyse der ermittelten Stationskoordinaten	41
8.2	Analyse der Residueninformationen	43
8.2.1	Darstellung und Untersuchung von DDR	43
8.2.2	Darstellung und Untersuchung von PSDR	46
8.2.3	Darstellung und Untersuchung von PZDR	48
8.3	Größenordnung verschiedener Einflussfaktoren in PZDR	54
8.3.1	Einteilung der Einflussfaktoren	54
8.3.2	Einflüsse der Basislinienlänge und Mehrwegeeffekte	55
8.3.3	Einflüsse der elevationsabhängigen Gewichtung	56
8.3.4	Einflüsse der neutrosphärischen Prädiktionsmodelle	57
8.3.5	Einflüsse der Strategien zur Phasenmehrdeutigkeitslösung	58
8.3.6	Zusammenfassung aller Einflussfaktoren	59
9	Visualisierung von Wasserdampffeldern	61
9.1	Einschichtmodell der Neutrosphäre	61
9.2	Zenitale Darstellung des Wasserdampffeldes	62
9.2.1	Modellierung des Wasserdampfdrucks	63
9.2.2	Bestimmung der Projektionspunkte	64
9.2.3	Realisierung der zenitalen Darstellung	65
9.3	Handhabung der SSNP im Rahmen der Visualisierung	67
9.3.1	Analyse der Einflussfaktoren auf SSNP	67
9.3.2	Mittelbildung der SSNP für die Referenzstation	73
9.3.3	Interpolation der SSNP	75
9.4	Visualisierungsergebnisse	76
9.4.1	Visualisierungsergebnisse im 3-Minuten-Takt	76
9.4.2	Visualisierungsergebnisse im 30-Minuten-Takt	77
9.4.3	Analyse der Visualisierungsergebnisse	79
9.5	Vergleich der Visualisierungsergebnisse	81
9.5.1	Vergleich der zweiteiligen mit der dreiteiligen Modellierung	81
9.5.2	Vergleich der dreiteiligen Modellierung mit der BKG-Lösung	84
9.5.3	Neutrosphärische Modellierung durch den Oberflächenluftdruck	85
10	Zusammenfassung und Ausblick	88
10.1	Zusammenfassung	88
10.2	Ausblick	90
	Literaturverzeichnis	92
	Anhang	95
A.	Graphische Oberfläche des MATLAB-Programmpakets	95
B.	Auswertetabellen für die PZDR	98

1 Einführung

1.1 Motivation

Die Einführung der Satellitentechnik zur Positionierung und Navigation hat in den letzten Jahren die geodätische Messtechnik in vielen Bereichen stark verändert. Während der Start der ersten GPS-Satelliten die Geschichte der Satellitenpositionierungstechnik revolutionierte, setzt der Start des ersten Satelliten des europäischen Navigationssystems GALILEO Ende 2005 einen Meilenstein für die Zukunft dieser Positionierungstechnik. Die Bezeichnung GNSS (Global Navigation Satellite System) stellt einen übergeordneten Begriff für ein ziviles, allen Mitgliedern der internationalen Staatengemeinschaft zugängliches Navigationssystem dar und subsummiert das amerikanische System GPS, das russische System GLONASS und das zukünftige europäische System GALILEO.

Um das volle Genauigkeitspotential von GNSS bei geodätischen Anwendungen ausschöpfen zu können, müssen alle Eigenschaften der Satellitensignale sowie die auf sie einwirkenden Einflussfaktoren, von der Entstehung im GNSS-Satelliten über den Signalweg durch die Erdatmosphäre bis zum Empfang an der Beobachtungsstation, entweder bekannt sein oder es muss versucht werden, deren Auswirkungen im Rahmen der GNSS-Auswertung zu modellieren. Neben den satelliten- und stationsspezifischen Einflussfaktoren spielen die atmosphärischen Einflüsse bei dieser Modellierung eine wichtige Rolle. Einerseits können sie bei fehlerhafter oder unvollständiger Berücksichtigung im Rahmen der GNSS-Auswertung limitierende Fehlerfaktoren bei der Positionsbestimmung darstellen. Andererseits können physikalische Eigenschaften der Erdatmosphäre durch Analyse solcher Fehlerfaktoren indirekt untersucht werden.

Die atmosphärischen Einflüsse auf GNSS-Signale können nach dem Aufbau der Atmosphäre in iono- und neutrosphärische Einflüsse eingeteilt werden. Die erste Ordnung der Ionosphäreinflüsse lässt sich durch Mehrfrequenzbeobachtungen auf den beiden Trägerfrequenzen L1 und L2 eliminieren, weil die Ionosphäre für elektromagnetische Wellen des L-Bands dispersiv ist. Im Gegensatz dazu ist die Neutrosphäre in diesem Bereich nicht dispersiv und ihre Einflüsse wirken sich auf die beiden Frequenzen gleich aus. Die neutrosphärischen Einflüsse bewirken eine Verlangsamung der Ausbreitungsgeschwindigkeit, eine Änderung der Signalrichtung und eine Beeinflussung der Signalstärke. Bei diesen Einflüssen unterscheidet man zwischen einem trockenen und einem feuchten Anteil, wobei der feuchte Anteil weniger als 10% des gesamten Einflusses beträgt.

Zwar trägt die feuchte Komponente im Vergleich zur trockenen zur gesamten neutrosphärischen Laufzeitverzögerung nur wenig bei, aber dieser kleine Beitrag ist auf einen wichtigen Bestandteil der Erdatmosphäre, den „Wasserdampf“, zurückzuführen. Durch den feuchten Anteil bietet sich die Möglichkeit, mittels der Auswertung von GNSS-Beobachtungen die räumliche Verteilung und die zeitliche Variation des Wasserdampfes hochauflösend zu bestimmen. Die Kenntnis von globalen und regionalen Verteilungen des Wasserdampfgehaltes und seiner zeitlichen Variation ist grundlegend für z.B. Wettervorhersage und Klimaforschung.

Die Ermittlung des hochvariablen atmosphärischen Wasserdampfes basierend auf geodätischen Beobachtungen mittels Satelliten (z.B. GPS) wurde erstmalig vor ca. 15 Jahren in die Praxis umgesetzt und als wirtschaftliche Alternative zu meteorologischen Standardsensoren erkannt. Mit zunehmender Systemgenauigkeit und -zuverlässigkeit von globalen Satellitennavigationssystemen (GNSS) und der Verbesserung von Auswertalgorithmen gewinnt diese Technik anschließend im Laufe der Zeit v.a. in den Bereichen Meteorologie, Klimatologie und Wettervorhersage immer mehr an Bedeutung. Die neuen Forschungsergebnisse zeigen weitere Möglichkeiten, die integrierte Wasserdampfmenge entlang der Sichtlinie zwischen einem Satelliten und einem Empfänger durch GNSS zu quantifizieren. Darauf basierend lässt sich die Heterogenität der Neutrosphäre durch tomographische Methoden untersuchen.

Es ist zwar Tatsache, dass die Wasserdampfkonzentration in der Erdatmosphäre zeitlich und räumlich sehr variabel vorkommt und der Wasserdampf trotz langjähriger Versuche bisher immer noch zu den schwer zu erfassenden Komponenten im Haushalt der Erdatmosphäre gehört, aber dies kann durch

weitere Entwicklungen und Verfeinerungen dieser auf GNSS basierenden Technik in naher Zukunft geändert werden.

1.2 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit

Ausgangspunkt der vorliegenden Arbeit ist die gewöhnliche, ausführlich beschriebene und diskutierte zweiteilige neutrosphärische Modellierungsmethode zur Bestimmung der Verteilung des Wasserdampfs in der Erdatmosphäre. Dabei wird lediglich der elevationsabhängige, azimutal-isotrope Anteil der feuchten Komponente durch Prädiktionsmodell und Zusatzparameter modelliert. Im Rahmen dieser Arbeit soll darüber hinaus der anisotrope Anteil unter Berücksichtigung von DDR aus der GNSS-Auswertung modelliert werden. Außerdem soll untersucht werden, inwieweit DDR einen signifikanten Beitrag zur Bestimmung von Wasserdampffeldern leisten können. Des Weiteren wird die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der neutrosphärischen Modellierung zur Bestimmung von Wasserdampffeldern von Einflussfaktoren wie z.B. Mehrwegeinflüssen, Basislinienlänge und Auswertestrategien beeinflusst. Die Einflüsse dieser Faktoren sollen miteinander verglichen und deren Größenordnung bezogen auf die Modellierungsgenauigkeit abgeschätzt werden. Abschließend soll eine sinnvolle graphische Darstellungsmöglichkeit entwickelt werden, die sowohl die räumliche Verteilung als auch die zeitliche Variation der ermittelten Wasserdampffelder veranschaulichen kann.

In Kapitel 2 und 3 werden zunächst die für diese Arbeit relevanten meteorologischen Grundlagen und die Einflüsse der Atmosphäre auf GNSS-Signale erläutert. Kapitel 4 befasst sich hauptsächlich mit der Theorie der dreiteiligen neutrosphärischen Modellierung zur Bestimmung der Wasserdampfverteilung auf Basis von Prädiktionsmodell, Zusatzparametern und aus DDR abgeleiteten Pseudo-Zerodifferenzresiduen (PZDR). In Kapitel 5 wird die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Software kurz vorgestellt. Kapitel 6 beschreibt die vorbereitenden Arbeiten für die spätere Modellierung und Analyse. Ein Schwerpunkt in diesem Teil ist die Konvertierung von DDR in PZDR unter der sog. „zero mean“-Annahme. Kapitel 7 beschäftigt sich überwiegend mit der Datenprozessierung unter Anwendung der Bernese GPS Software 5.0 (BS5). In Kapitel 8 werden die durch GNSS-Auswertung ermittelten Stationskoordinaten sowie die konvertierten PZDR unter verschiedenen Aspekten analysiert. Den Abschluss dieser Arbeit bildet in Kapitel 9 eine graphische Darstellungsmethode zur Präsentation der ermittelten Wasserdampffelder.

2 Erdatmosphäre und Wasserdampf

In diesem Kapitel wird die chemische Zusammensetzung der Erdatmosphäre zunächst kurz erläutert. Basierend auf gegenseitiger Beeinflussung zwischen Menschen und Atmosphäre wird ein dabei stark einwirkender Bestandteil der Erdatmosphäre, der „Wasserdampf“, eingeführt. Anschließend werden verschiedene meteorologische Standardsensoren hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile zur Erfassung der atmosphärischen Wasserdampfkonzentration kurz vorgestellt und mit der auf GNSS basierenden Methode verglichen.

2.1 Zusammensetzung der Erdatmosphäre

Auf Grund der Gravitationskraft der Erde werden Luftmoleküle daran gehindert, sich in den Weltraum zu verflüchtigen. Diese Moleküle bilden eine Gashölle um den Erdkörper, die sog. Erdatmosphäre. Sie besteht aus einem als konstant anzusehenden physikalischen Gemisch verschiedener gasförmiger Elemente - hauptsächlich Stickstoff (ca. 78%) und Sauerstoff (ca. 21%). Deutlich kleinere Anteile entfallen auf Edelgase (z.B. Argon, Helium, Krypton, Neon, Xenon), Kohlendioxid, Ozon und Wasserstoff. Die einzelnen Bestandteile der Atmosphäre haben unterschiedliche Massen und das Mischungsverhältnis bleibt bis in große Höhen konstant. Dieser Zustand ist auf die starke vertikale bzw. horizontale Luftbewegung (turbulente Durchmischung) der Atmosphäre zurückzuführen [Kraus, 2001; Mayer, 2006].

2.2 Mensch und Atmosphäre

Die Atmosphäre umspannt die Erde und spielt für die Umweltbedingungen auf der Erde eine zentrale Rolle. Sie dient den Menschen als dünne Schutzschicht vor dem kalten Weltraum und den schädlichen UV-Strahlen, sie versorgt Mensch und Tier mit dem lebenswichtigen Sauerstoff und sie bestimmt das Klima und den Kreisverlauf des Wassers. Auf Grund der wirtschaftlichen Entwicklung und weltweiter Industrialisierung beeinflussen die Menschen durch Emissionen verschiedenster Art auch die Erdatmosphäre. Durch Verbrennung von fossilen Energieträgern wie Kohle, Öl und Gase wird zwar der Energiehunger der Menschheit gestillt, aber die dadurch entstehenden Abgase können in der Atmosphäre zu regionalen bzw. globalen Klimaänderungen führen: Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur, Gletscherabschmelzung und extreme Wetterereignisse wie Stürme und Überflutungen sind Zeichen dafür, dass eine Klimaänderung auf der Erde bereits in vollem Gange ist.

Seit langem versuchen Wissenschaftler aus verschiedenen Fachgebieten durch intensive Forschungen möglichst tief greifend zu verstehen, welche Mechanismen und atmosphärischen Prozesse für die Veränderung der Atmosphäre, den Klimawandel und somit auch für das Leben der Menschen von großer Bedeutung sind. Die Forschungsarbeiten sind interdisziplinär und fachübergreifend und gehen zunehmend über die wissenschaftliche Ebene hinaus in praxisorientierte Anwendungen. Es handelt sich dabei nicht nur darum Antworten auf die Fragen wie z.B. „warum sind die Sommer immer wärmer, die Winter immer kälter und warum gibt es Schnee von Dezember bis Februar“ zu finden, sondern auch darum, die menschlichen Einflüsse auf die Atmosphäre und die Umwelt möglichst gering zu halten und die Menschen vor Naturkatastrophen, die zum großen Teil durch Klimaänderung verursacht sind, frühzeitig zu warnen und vor großen Schäden zu schützen.

In solchen Fällen kommen in der Regel auf Annahmen basierende Prädiktionsmodelle zum Einsatz. Wenn die Modelle bei der Beschreibung atmosphärischer Prozesse zutreffend definiert sind, liefern sie zuverlässige Modellergebnisse mit zufrieden stellender Genauigkeit. Die dadurch gewonnenen Erkenntnisse können bspw. zur Wettervorhersage herangezogen werden. Aber auf Grund der physikalischen Komplexität atmosphärischer Prozesse und starker zeitlicher und räumlicher Variationen der Eingangsgrößen der Modellierung ist die entsprechende Genauigkeit und Zuverlässigkeit solcher Modelle durch neue Techniken bzw. zeitlich und räumlich besser auflösende Datensätze weiter zu steigern.

2.3 Wasserdampf als ein wichtiger Bestandteil der Erdatmosphäre

Ein wichtiger Bestandteil der Erdatmosphäre ist Wasserdampf, er hat einen wesentlichen Einfluss auf Wetter und Klima und spielt eine Hauptrolle in der chemischen Zusammensetzung der Erdatmosphäre. Seine herausragende Bedeutung liegt u.a. in der Fähigkeit, seinen Aggregatzustand zwischen gasförmig, flüssig und fest zu ändern.

Des Weiteren nimmt der Wasserdampf eine zentrale Rolle im Rahmen des sog. Treibhauseffekts ein. Etwa die Hälfte der Sonnenenergie, die aus dem Weltraum den äußeren Rand der Atmosphäre erreicht, gelangt schließlich bis zur Erdoberfläche. Durch diese verbleibende Hälfte der Sonnenenergie wird die Erdoberfläche aufgeheizt und strahlt Infrarotstrahlung ab. Durch den Treibhauseffekt von Spurengasen wird die Infrarotstrahlung in der Erdatmosphäre zwischengespeichert. Wasserdampf ist das wichtigste dieser Gase und absorbiert Infrarotstrahlung über einen weiten Bereich des Spektrums. Dadurch hat Wasserdampf einen Anteil von 60% am natürlichen Treibhauseffekt und wird als das dominierende Treibhausgas betrachtet. Mehr Wasserdampf in der Atmosphäre kann den Treibhauseffekt verstärken und somit die Temperatur erhöhen. Andererseits kann er aber auch zu mehr Bewölkung und zu stärkerer Abkühlung führen, weil Wolken unter gewissen Umständen einen großen Teil der einfallenden Sonnenstrahlung reflektieren [Malberg, 2002].

Der Wasserdampfgehalt gehört nach [Kraus, 2001] zu den atmosphärischen Gasen, die nicht homogen verteilt sind. Die Wasserdampfkonzentration ist zudem zeitlich und räumlich hochvariabel. In der bodennahen Atmosphäre liegt der Anteil bei 4 Volumenprozent als Maximalwert in den feuchten Tropen, 1.3 Volumenprozent im Durchschnitt der warmen und 0.4 Volumenprozent der kalten Jahreszeit in mittleren geographischen Breiten. Auf Grund der vertikalen Temperaturabnahme nimmt auch der Wasserdampfgehalt mit zunehmender Höhe rasch ab.

Die Kenntnis der zeitabhängigen räumlichen Verteilung dieses meteorologischen Parameters ist jedoch grundlegend für meteorologische Grundaufgaben wie Wettervorhersage oder Klimaforschung, was seine Erfassung bspw. mit meteorologischen Standardsensoren (z.B. Oberflächenmeteorologie, Radiosondaufstiege, Wasserdampfradiometer) notwendig macht. Trotzdem stellt Wasserdampf eine bisher schwer mit ausreichender Auflösung zu erfassende Komponente im Haushalt der Erdatmosphäre dar.

2.4 Erfassung des atmosphärischen Wasserdampfgehaltes

2.4.1 Meteorologische Standardsensoren

Die Meteorologie beschäftigt sich schon seit langem mit der Erfassung der Wasserdampfkonzentration durch meteorologische Standardsensoren, um die Klimaänderung der Erde zu erforschen und Wettermodelle für zuverlässige Wettervorhersagen zu entwickeln. Dafür werden neben physikalischen Modellen zeitlich und räumlich (horizontal und vertikal) gut auflösende meteorologische Beobachtungen benötigt. Die folgenden meteorologischen Standardsensoren kommen je nach ihrer Eigenschaften in der Praxis zum Einsatz.

- **Oberflächennahe Meteorologiestationen**

In diesem Fall werden meteorologische Messungen mit hoher zeitlicher Auflösung durchgeführt. Räumlich liefert dieser Sensor allerdings nur horizontal gut aufgelöste Beobachtungen (z.B. in Mitteleuropa) und es könnten durch lokale Mikroklimata Verfälschungen auftreten.

- **Radiosonden (Wetterballon)**

Radiosonden sind Messgeräte, die an einem Ballon befestigt bis zu 10 km hoch in die Atmosphäre aufsteigen können. Dadurch lässt sich bspw. ein vertikales Profil der Wasserdampfwerte in Abhängigkeit von der Höhe an einer bestimmten Stelle über der Erde erstellen. Dieses Verfahren liefert lediglich eine gute vertikale Auflösung und ist darüber hinaus mit hohen Kosten verbunden (ca. 400€/Aufstieg).

- **Wasserdampfradiometer**

Wasserdampfradiometer (WVR: Water Vapor Radiometer) ermöglichen direkte gerichtete Messungen des Wasserdampfes in Richtung der Instrumentenantenne. Dadurch ist eine gute räumliche Auflösung der ermittelten Wasserdampffelder zu erwarten. Allerdings ist der Einsatz von WVR sehr stark von Wetterbedingungen abhängig. Bei Regen oder Schnee sind die Messwerte durch den hohen Gehalt des flüssigen Wassers in der Atmosphäre stark verfälscht. Außerdem liefert das Verfahren in der Praxis keine zufrieden stellende horizontale Auflösung.

- **Satellitengestützte Sensoren (Remote Sensing)**

Der Wasserdampfgehalt wird in diesem Fall mittels eines auf einem Satelliten angebrachten Messinstruments aus großer Entfernung erfasst. Satelliten überfliegen innerhalb weniger Tage die gesamte Erdoberfläche und können daher ein globales Bild der Wasserdampfkonzentration liefern. Aber die Schwierigkeit bei diesem Verfahren besteht darin, einen bestimmten Konzentrationswert einem genauen Ort zuzuordnen. Dadurch wird die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der ermittelten Wasserdampfwerte sehr stark beeinträchtigt [Mayer, 2006].

2.4.2 Globale Satellitennavigationssysteme

Durch die obige Erläuterung sind die Nachteile verschiedener meteorologischer Sensoren zur Erfassung der Wasserdampfkonzentration deutlich zu erkennen. Keiner der o.g. Sensoren liefert eine zufrieden stellende räumliche Auflösung in horizontaler und vertikaler Richtung. Manche Verfahren sind so stark von Wetterbedingungen abhängig, dass sie unter extremen Wettersituationen in der Praxis nicht mehr einsatzfähig sind. Hinsichtlich der zeitlichen Auflösung müssen manche Verfahren für praktische Anwendungen noch in Frage gestellt werden. Neben den technischen Aspekten sind auch wirtschaftliche Faktoren zu beachten. Die Nachfrage nach einem kompakten System, das eine wirtschaftliche Erfassung der Wasserdampfkonzentration mit guter räumlicher und zeitlicher Auflösung unabhängig von Wetterbedingungen ermöglicht, ist im Laufe der Zeit immer größer geworden.

Unter der Voraussetzung, dass eine geeignete Analyse der auf die Signalgeschwindigkeit bzw. die Signallaufzeit einwirkenden, originär limitierenden Einflüsse der elektrisch neutralen Atmosphärenbereiche gewährleistet ist, weisen Globale Satellitennavigationssysteme wie GPS, GLONASS und GALILEO ein großes Potential auf, die Schwächen der o.g. meteorologischen Standardsensoren (z.B. hohe Kosten, geringe räumliche bzw. zeitliche Auflösung) zu beheben. Im Speziellen zeichnen sich die bestehenden Permanentstationsnetze z.B. IGS (International GNSS Service)-, EUREF (EUropean REference Frame)- und SAPOS[®] (Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung)-Netz durch eine sehr gute horizontale und zeitliche Auflösung aus und sind weiterhin im Vergleich zu Sensoren wie Radiosonden oder Wasserdampfradiometer sehr kostengünstig. Basierend auf den Einflüssen der Atmosphäre auf GNSS-Signale kann die atmosphärische Wasserdampfkonzentration durch geeignete Modellierung zeitlich und räumlich hochauflösend bestimmt werden. Durch weitere Berücksichtigung der Residuen aus GNSS-Auswertungen kann eine Verbesserung der azimutalen Auflösung gegenüber aktuell verwendeten Auswertestrategien erzielt werden.

3 Aufbau der Erdatmosphäre und ihre Einflüsse auf GNSS-Signale

Die Atmosphäre ist i.d.R. keine homogene Gashölle, sondern infolge zahlreicher innerer und äußerer Einflüsse in mehrere gegeneinander abgesetzte Schichten einzuteilen. In den folgenden Unterkapiteln wird die Atmosphäre nach den beiden Kriterien Temperaturgradient und Ionisierungsgrad schichtweise eingeteilt (Abb. 3-1). Auf Grund der physikalischen Eigenschaften dieser Schichten werden die GNSS-Signale auf verschiedene Weise und in unterschiedlichem Maße beeinflusst. Darauf basierend können die atmosphärischen Einflüsse auf die Signale bei der GNSS-Auswertung durch die entsprechenden Ansätze reduziert bzw. modelliert werden.

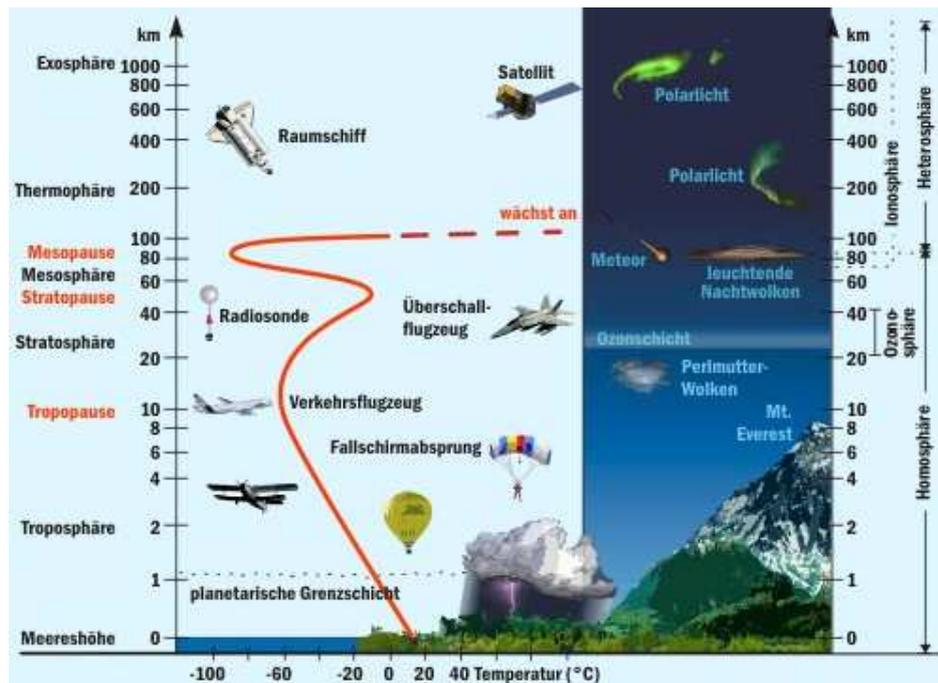


Abb. 3-1: Aufbau und schichtweise Einteilung der Erdatmosphäre

Quelle: http://www.kowoma.de/gps/zusatzerklaerungen/Atmosphaere_02.jpg

3.1 Einteilung der Erdatmosphäre nach dem Temperaturverlauf

Hier wird die Atmosphäre entsprechend ihrem positiven oder negativen Temperaturgradienten in die vier Schichten Tropo-, Strato-, Meso- und Thermosphäre unterteilt (im linken Bereich der Abb. 3-1). 99% der Atmosphärenmasse sind in den unteren 40 km zu finden. Dies hat zur Folge, dass der Luftdruck mit zunehmender Höhe rasch abnimmt.

Die Troposphäre ist die unterste Schichte der Atmosphäre und erstreckt sich bis in eine Höhe von etwa 8-18 km. Die Mächtigkeit der Troposphäre variiert mit den Jahreszeiten, wobei sie im Winter dünner ist als im Sommer. In der Troposphäre nimmt die Temperatur mit etwa 6,5°C pro Kilometer ab und das gesamte Wetter spielt sich hier ab. 99% des gesamten Wasserdampfs der Atmosphäre sind in der Troposphäre enthalten. Zwischen der Tropo- und Stratosphäre liegt die Tropopause. Innerhalb der Tropopause bleibt die Temperatur konstant.

Die Stratosphäre folgt auf die Tropopause mit einer Mächtigkeit zwischen etwa 10 bis 50 km. In den ersten 20 km ist die Temperatur relativ konstant, dann nimmt sie bis auf etwa 0°C an ihrer Obergrenze zu. Für diesen plötzlichen Temperaturanstieg ist die Ozonschicht verantwortlich, die in etwa 30 bis 40 Kilometern Höhe über der Erdoberfläche liegt und die UV-Strahlung der Sonne absorbiert. Die Stratosphäre greift in geringem Maße in das Wettergeschehen ein. Die Stratosphäre ist durch die Stratopause von der Mesosphäre getrennt.

Die Mesosphäre schließt an die Stratopause an und reicht von etwa 50 bis 85 km über der Erdoberfläche. Mit zunehmender Höhe fällt die Temperatur bis auf -93°C . Die chemische Zusammensetzung in der Mesosphäre besteht überwiegend aus leichten Gasen. Außerdem verglühen innerhalb der Mesosphäre die meisten Meteore, wenn sie auf die Erde stürzen. Zwischen der Meso- und der Thermosphäre liegt die Mesopause.

Die Thermosphäre dehnt sich oberhalb der Mesopause von 85 bis etwa 600 Kilometern über der Erdoberfläche aus. Die Thermosphäre weist eine extrem kleine Dichte auf, weil die einzelnen Gasmoleküle dort weit voneinander entfernt sind. In dieser Atmosphärenschicht erscheinen die berühmten Nordlichter. Außerdem umlaufen in diesem Bereich das Spaceshuttle und die Internationale Raumstation ISS die Erde [Kraus, 2001].

3.2 Einteilung der Erdatmosphäre nach Ionisierungsgrad

Oberhalb der Stratosphäre gibt es keine Ozonschicht, welche die energiereiche Strahlung (die sog. kosmische Strahlung) der Sonne absorbieren könnte. Gasmoleküle der extrem dünnen Atmosphärenschicht werden von der eintreffenden Strahlung ionisiert, in Ionen (Teilchen mit positiven oder negativen Ladungszustand) und freie Elektronen gespalten. Dieser Vorgang wird auch als Ionisationsprozess bezeichnet. Der Grad der Ionisationsprozesse gliedert die Erdatmosphäre in die Neutrosphäre und die Ionosphäre (im rechten Bereich der Abb. 3-1).

Die Ionosphäre subsummiert alle signifikant ionisierten Bereiche der Erdatmosphäre und umfasst die Meso- und Thermosphäre. Die untere (obere) Schichtgrenze liegt ca. 50-100 km (1000-1500 km) über der Erdoberfläche. Auf Grund der geringen Dichte der Ionosphäre können die durch Ionisationsprozesse erzeugten Ionen und freien Elektronen in dieser Schicht sehr lange existieren und dadurch herrschen in der Ionosphäre starke elektrische und magnetische Felder. Durch elektrische Ströme wird die Ausbreitung von Funkwellen erheblich beeinflusst. Je nach Höhe, Tageszeit und Sonnenaktivität wird elektromagnetische Strahlung in der Ionosphäre reflektiert oder absorbiert. Die Ionosphäre spielt im Bereich der Funk- und Telekommunikationsbereich eine bedeutende Rolle. Durch Reflexion von der Erdoberfläche ausgesandter elektromagnetischer Strahlung im Bereich der Radiowellen in der Ionosphäre weisen Radioprogramme und Funkamateure oft Reichweiten auf, die auf direktem Wege, bedingt durch die Erdkrümmung, überhaupt nicht möglich wären [Kraus, 2001].

Eine wichtige physikalische Eigenschaft der Ionosphäre ist, dass sie für elektromagnetische Wellen des L-Bandes dispersiv ist. Unter dem Begriff Dispersion versteht man die Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen von ihrer Wellenlänge. Diese Eigenschaft der Ionosphäre kann zur Reduktion der ionosphärischen Einflüsse auf GNSS-Signale bspw. mittels der sog. ionosphärenfreien Linearkombination L3 nutzbar gemacht werden.

Die Neutrosphäre subsummiert die Tropo-, die Strato- und Teile der Mesosphäre. Sie erstreckt sich vom Boden bis in etwa 80 km Höhe. Auf Grund der Absorption kosmischer Strahlung durch die Ozonschicht finden hier fast keine Ionisationsprozesse statt. Deshalb ist dieser Atmosphärenbereich elektrisch neutral. Die Neutrosphäre ist für elektromagnetische Wellen des L-Bandes nicht dispersiv. Aber für sichtbares Licht stellt die Neutrosphäre ein dispersives Medium dar; Phänomene wie Morgen- und Abendrot sowie die blaue Farbe des Himmels sind hierdurch bedingt.

3.3 Atmosphärische Einflüsse auf GNSS-Signale

GNSS-Signale sind im Prinzip elektromagnetische Signale des L-Bandes und werden aktuell im Falle des hier behandelten GPS auf zwei Trägerfrequenzen (L1: 1227.60 MHz, L2: 1575.42 MHz) abgestrahlt. Auf dem Weg von den Satelliten zu den Bodenstationen werden u.a. die Ausbreitungsgeschwindigkeit und Ausbreitungsrichtung der GNSS-Signale durch die Atmosphäre beeinflusst. Die atmosphärischen Einflüsse auf GNSS-Signale können in iono- und neutrosphärische Einflüsse unterteilt werden.

3.3.1 Ionosphärische Einflüsse auf GNSS-Signale

Die Ionosphäre bewirkt eine Beeinflussung der Signallaufzeit. Zum Beispiel führt eine durch die Ionosphäre auftretende Beschleunigung der Trägerphasen zu einer rechnerischen Verkürzung der Strecke zwischen Satellit und Empfänger (negativer ionosphärischer Einfluss), die in Zenitrichtung Größenordnungen bis zu 50 m erreicht [Howind, 2005]. Diese Einflüsse hängen vom Elektronengehalt TEC (Total Electron Content) entlang der Sichtlinie zwischen einem Satelliten und einer Beobachtungsstation ab. Die TEC-Werte können somit zur Quantifizierung der Ionisation herangezogen werden. Der Ort maximaler Ionisation wandert täglich durch die Eigenrotation der Erde von Ost nach West. Durch die Neigung der Erdachse kommt es dabei zusätzlich zu einer jahreszeitlichen Verschiebung. Darüber hinaus hat die Sonnenfleckenaktivität, die etwa einen 11-Jahreszyklus aufweist, starken Einfluss auf die Ionisation. In den Jahren eines Maximums erreicht der Elektronengehalt der Ionosphäre und somit auch der ionosphärische Einfluss auf GNSS-Signale i.d.R. höchste Werte.

In der geodätischen Praxis bei der präzisen satellitengestützten relativen Positionierung durch Zwei-Frequenzmessungen mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern spielen die ionosphärischen Signalfehler eine entscheidende Rolle, heutzutage mehr als andere entfernungsabhängige Einflussfaktoren (z.B. Orbitfehler, neutrosphärische Laufzeitverzögerungen). Diese ionosphärischen Einflüsse behindern die notwendige Bestimmung der Phasenmehrdeutigkeit bei kinematischen Anwendungen. Liegen ionosphärische Restfehler in einer Basislinie vor, kann sich die notwendige Beobachtungszeit bis zu einer zuverlässigen Phasenmehrdeutigkeitslösung deutlich verlängern oder eine Positionierung mit Zentimetergenauigkeit zeitweilig gar nicht möglich sein [Wanninger, 2002].

Basierend auf dem Prinzip der Dispersion werden elektromagnetische Wellen beim Durchgang der Ionosphäre in Abhängigkeit von ihrer Frequenz, und zwar näherungsweise umgekehrt proportional zu ihrer Frequenz zum Quadrat ($1/f^2$), verlangsamt. Das bedeutet, dass sich elektromagnetische Wellen mit niedrigen Frequenzen stärker als solche mit hohen Frequenzen verlangsamen. Angenommen $I_k^i(L1)$ stellt den ionosphärischen Einfluss zwischen der Station k und dem Satelliten i auf die Trägerfrequenz L1 in Meter dar, kann der ionosphärische Einfluss auf die Trägerfrequenz L2 in Abhängigkeit von $I_k^i(L1)$ infolge der o.g. Frequenzabhängigkeit folgendermaßen dargestellt werden:

$$I_k^i(L2) = \frac{f_1^2}{f_2^2} I_k^i(L1) \quad (3-1)$$

Basierend auf den beiden Trägerfrequenzen L1 und L2 lässt sich eine abgeleitete Frequenz L3, die sog. ionosphärenfreie Linearkombination, durch

$$L3 = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 L1 - f_2^2 L2) \quad (3-2)$$

darstellen. Der entsprechende Ionosphäreneinfluss auf diese Linearkombination $I_k^i(L3)$ ergibt sich

$$I_k^i(L3) = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 I_k^i(L1) - f_2^2 I_k^i(L2)). \quad (3-3)$$

Setzt man die Gleichung (3-1) in die Gleichung (3-3) ein, resultiert daraus

$$I_k^i(L3) = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 I_k^i(L1) - f_2^2 \frac{f_1^2}{f_2^2} I_k^i(L1)) = 0. \quad (3-4)$$

Unter Anwendung der ionosphärenfreien Linearkombination L3 lässt sich die erste Ordnung der Ionosphäreneinflüsse zwar eliminieren, aber die Minderung dieses Einflusses führt zu einer Verstärkung der Mehrwegeeffekte und einer Erhöhung des Messrauschens um das ca. Dreifache. Deshalb ist der Einsatz ionosphärenfreier Linearkombination nur in solchen Fällen sinnvoll, bei denen der Ionosphäreneinfluss durch differentielles GPS nicht weitergehend beseitigt werden kann, z.B. bei langen Basislinien.

Zur Reduktion des Ionosphäreneinflusses bieten sich neben der ionosphärenfreien Linearkombination präzise ionosphärische Modelle an. Dadurch sind die Nutzer nicht mehr auf die Zweifrequenzmethode angewiesen und können auch über lange Basislinien kinematisch arbeiten. Die ionosphärischen Modelle können nach ihrer Entstehung in zwei Gruppen eingeteilt werden: Die Gruppe der sog. Prädiktionsmodelle, die auf den Parametern der ionosphärischen Korrekturalgorithmen ICA (Ionospheric Correction Algorithm) basiert und das ionosphärische Verhalten lediglich genähert beschreibt; diese Modelle werden hauptsächlich für Einfrequenz-Navigationsnutzer eingesetzt und sind für geodätische Anwendungen ungeeignet. Bei der anderen Gruppe handelt es sich um globale ionosphärische Modelle, die auf den GPS-Beobachtungen von global verteilten GPS-Permanentstationen und auf deren Auswertungsergebnissen beruhen. Sie erfassen den VEC (Vertical Electron Content) und zum Teil auch die großräumigen horizontalen Gradienten, nicht jedoch ionosphärische Störungen. Die Berechnungen werden innerhalb des IGS bspw. am Astronomischen Institut der Universität Bern (Schweiz) durchgeführt. Auf Grund ihrer begrenzten zeitlichen und räumlichen Auflösung sind solche Modelle für lokale und kurzzeitige Messungen noch nicht einsetzbar [Wanninger, 2000a].

3.3.2 Neutrosphärische Einflüsse auf GNSS-Signale

Die neutrosphärischen Einflüsse bewirken eine Verlangsamung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der GNSS-Signale, eine Änderung der Signalrichtung und eine Beeinflussung der Signalstärke, da die Ausbreitung der Satellitensignale v.a. in Erdnähe nicht im Vakuum stattfindet. Die durch verschiedenen Wetterlagen bedingten unterschiedlichen Wasserdampfkonzentrationen in der Troposphäre führen dazu, dass die Troposphäre den größten Anteil der neutrosphärischen Einflüsse auf GNSS-Signale aufweist. Im Gegensatz zur Ionosphäre kann der Einfluss der elektrisch neutralen Atmosphärenbereiche auf GNSS-Beobachtungen nicht durch Mehrfrequenzmessungen eliminiert werden. Die Signalausbreitung ist in diesem atmosphärischen Bereich von Lufttemperatur (T), Luftdruck (p) und relativer Luftfeuchtigkeit (relative humidity rh) abhängig. Deshalb lässt sich der neutrosphärische Einfluss i.d.R. in Abhängigkeit von den o.g. meteorologischen Parametern modellieren. Im Vergleich zum Ionosphäreneinfluss sind hierdurch verursachte Fehler viel kleiner. Rechnet man die neutrosphärische Laufzeitverzögerung der Satellitensignale (ca. 8 ns) durch Multiplikation mit der Lichtgeschwindigkeit in einen Entfernungsfehler um, beträgt dieser in Zenitrichtung auf Meeresebene ca. 2.3 m und nimmt zum lokalen topozentrischen Horizont hin rasch zu (75°: ca. 10 m; 80°: ca. 15 m). Da sich die GNSS-Signale in diesem Atmosphärenbereich nicht in einem homogenen Medium ausbreiten, ergibt sich ein nach dem Prinzip von Snellius gekrümmter Signalweg. Die Signalkrümmung wird im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt. Die die Signalstärke verschlechternde Absorption führt zu einer gänzlichen oder teilweisen Umwandlung von Signalenergie bspw. in Wärme.

4 Bestimmung des atmosphärischen Wasserdampfs durch GNSS

Der permanente Betrieb von GNSS-Stationen, die einfache Verfügbarkeit und die automatisierbare Verarbeitbarkeit der GNSS-Daten führen dazu, dass die Ermittlung von atmosphärischen Parametern (z.B. Wasserdampf) basierend auf satellitengeodätischen Beobachtungen in unterschiedlichen Disziplinen (z.B. Meteorologie, Geodäsie) mit verschiedenen Intentionen vorangetrieben wurde und wird. Als grundlegende, repräsentative Literatur für den Kontext der Bestimmung von atmosphärischem Wasserdampfgehalt aus GNSS-Beobachtungen seien an dieser Stelle [Bevis et al., 1992], [Bevis et al., 1994] und [Businger et al., 1996] genannt.

Es sind in der Fachliteratur verschiedene Ansätze zur Ermittlung des Wasserdampfgehalts der Atmosphäre zu finden, die sich bspw. in der Aktualität (Real-Time, Near-Real-Time, Post-Processing), im realisierten funktionalen Ansatz (z.B. Nutzung von Code- bzw. Phasenbeobachtungen), in den verwendeten satellitengeodätischen Beobachtungsverfahren (z.B. GPS, VLBI) oder durch die Nutzung von meteorologischer Zusatzinformation unterscheiden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden zeitintensive Auswertungen im Post-Processing-Modus basierend auf der Phasenobservable Doppel-differenz durchgeführt, wobei keine meteorologischen Beobachtungen einbezogen werden, statt dessen wird die Standardatmosphäre [ESSA/NASA/USAF, 1966] verwendet.

Die neutrosphärischen, die Signallaufzeit beeinflussenden Einflüsse können in einen trockenen und einen feuchten Anteil eingeteilt werden, wobei der Beitrag der feuchten Komponente i.d.R. deutlich unter 10% liegt. Zur Bestimmung von Wasserdampf ist nur dieser feuchte Anteil von Wichtigkeit. Dieses Kapitel beschäftigt sich hauptsächlich mit der Theorie und dem Vorgehen zur Modellierung der feuchten Komponente durch die Auswertung von GNSS-Beobachtungen. Basierend auf einer gewöhnlichen zweiteiligen Modellierungsmethode durch Kombination von in Unterkapitel 4.3 erläuterte Prädiktionsmodellierung und Berücksichtigung von Zusatzparametern lässt sich die neutrosphärische Laufzeitverzögerung auf Grund der feuchten Komponente entlang jeder Sichtlinie zwischen einem Satelliten und einem Empfänger unter zusätzlicher Berücksichtigung von ebenfalls beschriebenen Residueninformationen bestimmen. Diese Laufzeitverzögerung kann anschließend durch einen Umrechnungsfaktor in kondensiertes Wasser des vorhandenen atmosphärischen Wasserdampfs umgerechnet werden. Vor Beginn der eigentlichen Modellierung zur Bestimmung von Wasserdampffeldern wird eine geeignete Größe zur Quantifizierung des Wasserdampfgehaltes zuerst festgelegt, welche die Informationen über die räumliche Verteilung von Wasserdampffeldern enthält.

4.1 Quantifizierung des Wasserdampfgehaltes

Der atmosphärische Wasserdampfgehalt kann durch zwei ineinander überführbare Größen beschrieben werden: Das sog. Precipitable Water (PW) und das Slant Water (SW). PW gibt die gesamte Wasserdampfmenge in Zenitrichtung als Säulenhöhe von kondensiertem Wasser in der Einheit Millimeter an, liefert darüber hinaus jedoch keine Informationen über die räumliche Verteilung des Wasserdampfs in der Erdatmosphäre. PW-Werte können aktuell basierend auf der im Rahmen einer GNSS-Auswertung angewandten neutrosphärischen Modellierung mit Millimetergenauigkeit bestimmt werden, siehe hierzu bspw. [Elgered et al., 2005].

SW stellt die integrierte Wasserdampfmenge entlang der Sichtlinie (line of sight) zwischen einem Satelliten und einer Station in kondensiertem Wasser in Millimeter dar. Durch Berücksichtigung der tatsächlichen Satellitenposition enthält SW im Gegensatz zu PW Informationen über die räumliche Verteilung von Wasserdampf. Solche Informationen können zur Erstellung dreidimensionaler Wasserdampffelder und bspw. für noch zuverlässigere Wettervorhersage genutzt werden. PW kann als Mittelwert aller in Zenitrichtung abgebildeten SW-Werte an einer Bodenstation zu allen Satelliten über die ganze Beobachtungszeit betrachtet werden.

Durch eine zeitliche Mittelbildung können die Einflussfaktoren wie z.B. Satelliten- und Empfängeruhrfehler, Mehrwegeeinflüsse sowie fehlerhafte bzw. nicht ausreichende Modellierung der Antennenphasenzentrumsvariationen (PCV) bei der Bestimmung von PW reduziert werden. Da SW keinen räumlichen Mittelwert darstellt, erfährt die Bestimmung von SW auch keine Vorteile durch Mittelbildung. U.a. deshalb ist SW eine schwer zu bestimmende Größe, die das zeitliche Verhalten und die räumliche Verteilung des Wasserdampfes im Vergleich zu PW jedoch genauer repräsentieren kann. Die wissenschaftliche GNSS-Auswertesoftware BS5 bietet den Nutzern die Möglichkeit, die zenitale neutrosphärische Laufzeitverzögerung durch Prädiktionsmodelle und auf Basis von aus GNSS-Beobachtungen zeitabhängig und stationspezifisch geschätzten neutrosphärischen Zusatzparametern zweiteilig zu modellieren. Unter Anwendung einer Abbildungsfunktion (Mapping Function; MF) lässt sich die zenitale neutrosphärische Laufzeitverzögerung in Richtung eines Satelliten elevationsabhängig abbilden.

4.2 Grundlagen der neutrosphärischen Modellierung

Die neutrosphärischen Einflüsse auf GNSS-Signale können als Signallaufzeitverzögerung in der Einheit Meter dargestellt werden. Da die Neutrosphäre für den Mikrowellenbereich des L-Bandes nicht dispersiv ist, wirken sich diese Einflüsse in der gleichen Weise auf die Trägerfrequenz L1 und L2 aus. Die gesamte neutrosphärische Laufzeitverzögerung $\Delta\rho$ zwischen Beobachtungsstation und Satellit kann durch

$$\Delta\rho = \int (n - 1) ds = 10^{-6} \int N^{NEU} ds \quad (4-1)$$

n : Brechungsindex
 N^{NEU} : neutrosphärische Brechungszahl

definiert werden, wobei die Integration entlang der Sichtlinie s durch die Atmosphäre durchgeführt werden muss [Hugentobler et al., 2005]. Die Brechungszahl N^{NEU} lässt sich i.d.R. in Abhängigkeit von meteorologischen Größen wie Temperatur T , Partialdruck der trockenen Luft p_d und Wasserdampfdruck e sowie experimentell bestimmten Koeffizienten k_i bspw. nach [Essen und Froome, 1951] mittels

$$N^{NEU} = \underbrace{k_1 \frac{p_d}{T}}_{\text{trocken}} + \underbrace{k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2}}_{\text{feucht}} = N_d^{NEU} + N_w^{NEU} \quad (4-2)$$

unter der Annahme, die Erdatmosphäre sei ein Gemisch idealer Gase, ausdrücken. Nach [Hopfield, 1969] ist eine Separierung von trockener (Index: d) und feuchter Luft (Index: w) sinnvoll. Die trockene Komponente entspricht zu großen Teilen dem in der Fachliteratur zu findenden Fachterminus hydrostatische Komponente und die feuchte der sog. nicht-hydrostatischen Komponente. Unter diesem Aspekt lässt sich die Brechungszahl N^{NEU} auch in eine hydrostatische (Index: h) und eine nicht-hydrostatische (Index: nh) Komponente zerlegen und in Abhängigkeit von Universalgaskonstante R , Molmasse M_d und Dichte ρ der trockenen Luft sowie Koeffizienten k_1 , k'_2 und k_3 mittels

$$N^{NEU} = \underbrace{k_1 \frac{R}{M_d} \rho}_{\text{hydrostatisch}} + \underbrace{k'_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2}}_{\text{nicht-hydrostatisch}} = N_h^{NEU} + N_{nh}^{NEU} \quad (4-3)$$

darstellen [Davis et al., 1985]. Weil die Koeffizienten k_2 und k'_2 nicht identisch sind, weicht der hydrostatische Anteil von dem trockenen Anteil ab. In der Fachliteratur werden die Begriffe „trocken“ und „hydrostatisch“ bzw. „feucht“ und „nicht-hydrostatisch“ teilweise gleichbedeutend verwendet. Im Folgenden werden lediglich die beiden Begriffe „trocken“ und „feucht“ verwendet. Der trockene Anteil beträgt etwa 90% der gesamten neutrosphärischen Laufzeitverzögerung ist proportional zur Luftdichte und kann durch repräsentative Messung des Oberflächendrucks ausreichend genau bestimmt werden, da die Durchmischung der trockenen Luft nach [Askne und Nordius, 1987] als nahezu konstant

erachtet werden kann. Der feuchte Anteil ist jedoch zeitlich variabler. Basierend auf den beiden Gleichungen (4-1) und (4-2) wird die gesamte neutrosphärische Laufzeitverzögerung durch

$$\Delta\rho = \Delta\rho_d + \Delta\rho_w = 10^{-6} \int N_d^{NEU} ds + 10^{-6} \int N_w^{NEU} ds \quad (4-4)$$

erhalten. Die gesamte neutrosphärische Laufzeitverzögerung ist vom Weg der Radiowellen in der Atmosphäre abhängig und somit ist sie auch eine Funktion der Zenitwinkel Z der Satelliten. Unter Berücksichtigung der Elevationsabhängigkeit ist die neutrosphärische Laufzeitverzögerung durch das Produkt des zenitalen Wertes $\Delta\rho^0$ mit einer Abbildungsfunktion $f(Z)$ durch

$$\Delta\rho = f(Z)\Delta\rho^0 \quad (4-5)$$

darstellbar. Nach [Rothacher, 1992] sind bessere Ergebnisse durch Anwendung unterschiedlicher Abbildungsfunktionen für den trockenen und feuchten Anteil der neutrosphärischen Laufzeitverzögerung zu erzielen, darauf basierend ergibt sich aus der Gleichung (4-5)

$$\Delta\rho = f_d(Z)\Delta\rho_d^0 + f_w(Z)\Delta\rho_w^0. \quad (4-6)$$

Trotz verschiedener Arten und Erscheinungsformen zahlreicher Abbildungsfunktionen ist es nennenswert, dass sie alle in der ersten Ordnung durch

$$f_d(Z) \approx f_w(Z) \approx f(Z) \approx \frac{1}{\cos Z} \quad (4-7)$$

approximiert werden können [Hugentobler et al., 2005]. Kann im Rahmen der Auswertung der feuchte Anteil des neutrosphärischen Einflusses in Zenitrichtung $\Delta\rho_w^0$ separiert werden, so ist daraus der gesamte integrierte Wasserdampfgehalt entlang der Sichtlinie, umgerechnet in kondensierte Wassermenge SW, unter Anwendung geeigneter Abbildungsfunktionen bestimmbar. Darauf basierend gilt auf jeder Sichtlinie zwischen einem Satelliten und einer Beobachtungsstation

$$SW = \Pi \cdot \Delta\rho_w = \Pi \cdot f(Z)\Delta\rho_w^0. \quad (4-8)$$

Die Hilfsgröße Π ist mittels

$$\Pi(T_m) = \frac{10^6}{\rho_w R_w \left(\frac{k_3}{T_m} + k_2 - k_1 \frac{R_d}{R_w} \right)} \quad (4-9)$$

in Abhängigkeit von

- k_i : empirische Konstanten (k_1, k_2 in [K/hPa], k_3 in [K²/hPa])
- ρ_w : Dichte des flüssigen Wassers in [kg/m³]
- T_m : mittlere atmosphärische Temperatur in [K]
- R_w : spezifische Gaskonstante der feuchten Luft in [J/kg K]
- R_d : spezifische Gaskonstante der trockenen Luft in [J/kg K]

berechenbar. Die o.g. empirischen Konstanten k_i sind z.B. aus [Rueger, 2002] zu entnehmen. Theoretisch ist die mittlere atmosphärische Temperatur T_m als eine Funktion von Wasserdampfdruck e [hPa], Temperatur T [K] und Realgasfaktor Z_w mittels

$$T_m = \frac{\int \frac{e}{T Z_w} dh}{\int \frac{e}{T^2 Z_w} dh} \quad (4-10)$$

nach [Davis et al., 1985] in Abhängigkeit vom physikalischen Höhenunterschied dh definiert. Die empirischen funktionalen Zusammenhänge zur Berechnung von Z_w sind bspw. aus [Owens, 1967] zu entnehmen. In der Praxis wird häufig jedoch die Formel

$$T_m = 70.2 + 0.72 \cdot T_0 \quad (4-11)$$

nach [Bevis et al., 1992] zur Berechnung der mittleren atmosphärischen Temperatur [K] in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur T_0 [K] angewendet. Die Gleichung (4-11) wurde auf Basis von mehr als 8500 Radiosondenprofilen (Zeitbasis: 2 Jahre) für den nordamerikanischen Bereich (13 Stationen, $\varphi \in [27^\circ \text{ n.Br.}; 65^\circ \text{ n.Br.}]$, $h \in [0 \text{ km}; 1.6 \text{ km}]$) mit einem relativen Fehler von weniger als 2% bestimmt.

4.3 Gewöhnliche zweiteilige neutrosphärische Modellierung

Im Rahmen der gewöhnlichen zweiteiligen neutrosphärischen Modellierung wird von einem azimutal-symmetrischen Verhalten der Erdatmosphäre im Bereich einer einzelnen Beobachtungsstation ausgegangen. Unter Isotropieannahme der Neutrosphäre in azimutaler Richtung lassen sich die feuchten neutrosphärischen Einflüsse in einen sog. isotropen und einen sog. anisotropen Anteil unterteilen. Bei herkömmlicher funktionaler GNSS-Modellbildung in lokalen oder regionalen Netzen wird der isotrope Anteil bspw. mittels Prädiktionsmodellen (z.B. Saastamoinen-Modell [Saastamoinen, 1973]) und auf der Basis von GNSS-Beobachtungen zeitabhängig und stationsspezifisch geschätzten neutrosphärischen Zusatzparametern (SSNP) zweiteilig modelliert. Darauf wird in den Unterkapiteln 4.3.1 und 4.3.2 eingegangen. Als Ergebnisse werden die berechneten Modellwerte der isotropen Komponente und die geschätzten stationsspezifischen neutrosphärischen Parameter als Korrekturgrößen für die Modellwerte in Zenitrichtung erhalten. Um die räumliche Verteilung des Wasserdampfs erfassen zu können, werden Abbildungsfunktionen (z.B. Niell-Funktion [Niell, 1996]) sowohl für die berechneten Modellwerte als auch für die geschätzten SSNP-Werte angewendet.

4.3.1 A priori Prädiktionsmodell

Eines der am häufigsten in GNSS-Auswerteprogrammen implementierten a priori Prädiktionsmodelle zur Bestimmung der neutrosphärischen Laufzeitverzögerung ist das sog. Saastamoinen-Modell. Dieses Modell basiert auf dem idealen Gasgesetz. Nach [Saastamoinen, 1973] stellt die Gleichung

$$\Delta\rho_{Saas} = \frac{0.002277}{\cos Z} \left[p + \left(\frac{1255}{T} + 0.05 \right) e - \tan^2 Z \right] \quad (4-12)$$

p : Luftdruck in [hPa]

T : Lufttemperatur in [K]

e : Partialdruck des Wasserdampfs in [hPa]

die gesamte neutrosphärische Laufzeitverzögerung in Abhängigkeit von meteorologischen Parametern (p , T , e) und Beobachtungsrichtung (z.B. Zenitwinkel z) in der Einheit Meter dar. Durch Anbringen der Korrekturgrößen D , B und δ_{geom} ergibt sich aus der oberen Gleichung

$$\Delta\rho_{Saas} = \frac{0.002277D}{\cos Z} \left[p + \left(\frac{1255}{T} + 0.05 \right) e - B \tan^2 Z \right] + \delta_{geom}. \quad (4-13)$$

Die geometrische Korrektur δ_{geom} entspricht der Differenz zwischen dem gekrümmten elektromagnetischen Signalweg und dem direkten euklidischen Weg und ist von der Stationshöhe und dem Zenitwinkel funktional abhängig. D trägt der Variation der mittleren Schwerebeschleunigung in der neutrosphärischen Luftsäule über der Station Rechnung und kann mittels

$$D = 1 + 0.0026 \cos(2\varphi) + 0.00028h \quad (4-14)$$

abhängig von Stationsbreite φ und -höhe h [km] bestimmt werden. Mit dem Korrekturterm B wird der Einfluss, der von klimatischen Bedingungen abhängt und von der gekrümmten Atmosphäre ausgeht, in Abhängigkeit von der Stationshöhe sphärisch genähert modelliert.

Das Saastamoinen-Modell ist bspw. mit

$$\Delta\rho_{Saas,d} = \frac{0.002277D}{\cos Z} [p - 0.155471e - B \tan^2 Z] + \delta_{geom} \quad (4-15)$$

$$\Delta\rho_{Saas,w} = \frac{0.002277D}{\cos Z} \left(\frac{1255}{T} + 0.205471 \right) e \quad (4-16)$$

auch zweiteilig darstellbar.

Basierend auf Annahmen hinsichtlich des Verhaltens der Neutrosphäre (z.B. Standardatmosphäre) ist eine Approximation der tatsächlich herrschenden meteorologischen Bedingungen bspw. durch Extrapolation von bodennah erfassten Meteorologiewerten möglich. Liegen keine instrumentell bestimmten oder lediglich nicht repräsentativen meteorologischen Parameter vor, werden i.d.R. Beträge basierend auf sog. Standardatmosphären, die eine Beziehung zwischen Stationshöhe und dem mittleren Zustand der Erdatmosphäre schaffen sowie mittlere Informationen hinsichtlich Aufbau, Struktur und Eigenschaften der Erdatmosphäre zur Verfügung zu stellen, verwendet, siehe hierzu bspw. [Kraus, 2001]. Unter Anwendung der Modellwerte für Temperatur T_0 , Luftdruck p_0 und relative Luftfeuchtigkeit rh_0 der Standardatmosphäre in der Bezugshöhe h_0 nach [ESSA/NASA/USAF, 1966]

$$\begin{aligned} T_0 &= 18 && [^\circ\text{C}] \\ p_0 &= 1013.25 && [\text{hPa}] \\ rh_0 &= 50 && [\%] \\ h_0 &= 0 && [\text{m}] \end{aligned} \quad (4-17)$$

lassen sich die meteorologischen Parameter (T , p , rh) in Abhängigkeit von der Stationshöhe h mittels

$$\begin{aligned} T &= T_0 - 0.0065(h - h_0) \\ p &= p_0(1 - 0.0000226(h - h_0))^{5.225} \\ rh &= rh_0 e^{-0.0006396(h-h_0)} \end{aligned} \quad (4-18)$$

nach [Berg, 1948] extrapolieren. Der Partialdruck des Wasserdampfs kann basierend auf T [K] und rh [%] über

$$e = \left(\frac{rh}{100} \right) e^{-37.2465 + 0.2131665T - 0.000256908T^2} \quad (4-19)$$

berechnet werden.

Setzt man nun die berechneten meteorologischen Parameter (T , p und e) sowie die Korrekturgröße D für eine Beobachtungsstation in die Gleichung (4-16) mit $Z = 0$ ein, ergibt sich der Modellwert der feuchten Komponente der neutrosphärischen Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung

$$\Delta\rho_{Saas,w}^0 = 0.002277D \left(\frac{1255}{T} + 0.205471 \right) e. \quad (4-20)$$

Die zenitale Laufzeitverzögerung kann unter Anwendung einer Abbildungsfunktion in eine beliebige Himmelsrichtung elevationsabhängig abgebildet werden. Somit können die Modellwerte der neutrosphärischen Laufzeitverzögerung entlang allen Sichtlinien von einer Beobachtungsstation aus zu allen „sichtbaren“ Satelliten berechnet werden. Fast alle Abbildungsfunktionen basieren auf meteorologischen Parametern, die den Unterschied des Verhaltens der Erdatmosphäre in Abhängigkeit von der Höhe nur begrenzt voraussagen.

Im Jahre 1996 veröffentlichte Niell eine Abbildungsfunktion, die von Jahreszeit t , geographischer Breite φ und Höhe h der Station abhängig ist. Nach [Niell, 1996] lautet eine kompakte Darstellung dieser Abbildungsfunktion:

$$MF(Z) = \frac{1 + \frac{a}{b}}{1 + \frac{1+c}{a}} \cdot \frac{1}{\cos Z + \frac{b}{\cos Z + c}} + h \cdot 10^{-3} \cdot M_{ht} \quad (4-21)$$

Für die Abbildungsfunktion des trockenen Anteils $MF_{Niell,d}$ gilt:

$$M_{ht} = \frac{1}{\cos Z} - \frac{1 + \frac{a_{ht}}{b_{ht}}}{\cos Z + \frac{a_{ht}}{\cos Z + c_{ht}}} \quad (4-22)$$

$$\begin{aligned} a &= a_{avg}(\varphi) + a_{amp}(\varphi) \cdot \cos\left(2\pi \frac{t - T_0}{365.25}\right) \\ b &= b_{avg}(\varphi) + b_{amp}(\varphi) \cdot \cos\left(2\pi \frac{t - T_0}{365.25}\right) \\ c &= c_{avg}(\varphi) + c_{amp}(\varphi) \cdot \cos\left(2\pi \frac{t - T_0}{365.25}\right) \end{aligned} \quad (4-23)$$

- $(a, b, c)_{avg}$: tabellierte Mittelwerte in Abhängigkeit von φ
- $(a, b, c)_{amp}$: tabellierte Jahresamplituden in Abhängigkeit von φ
- $(a, b, c)_{ht}$: tabellierte Größen für die Höhenkorrektur
- t : Zeit ab Januar 0.0 (in UT-Tagen)
- T_0 : Phasenverschiebung [DOY 28].

Für die Abbildungsfunktion des feuchten Anteils $MF_{Niell,w}$ gilt:

$$M_h = 0 \quad (4-24)$$

- $(a, b, c)_{wet}$: tabellierte Werte in Abhängigkeit von φ

Alle tabellierten Werte in Gleichung (4-22), (4-23) und (4-24) sind aus [Niell, 1996] zu entnehmen. Den endgültigen Modellwert entlang einer Sichtlinie zwischen einem Satelliten und einer Beobachtungsstation enthält man durch das Produkt des entsprechenden zenitalen Werts mittels Gleichung (4-20) und der Niell-MF bspw. für die feuchte Komponente $MF_{Niell,w}$

$$\Delta\rho_{Modell,w} = MF_{Niell,w} \cdot \Delta\rho_{Saas,w}^0 \quad (4-25)$$

4.3.2 Schätzung von Zusatzparametern

Im Rahmen der relativen Positionsbestimmung durch zweifach differenzierte Phasenbeobachtungen werden mit einer vorgegebenen Stochastik stationsabhängige Verbesserungen für das o.g. Prädiktionsmodell in zenitaler Richtung mittels geeigneter funktionaler Ansätze mit eingeschränkter zeitlicher Gültigkeit (z.B. 2 Stunden) bestimmt. Bei GNSS-Auswertungen unter Anwendung der BS5 können die

Modellwerte für den trockenen bzw. den gesamten Anteil durch Prädiktionsmodelle (z.B. Saastamoinen-Modell) berechnet werden, während die stationsspezifischen Zusatzparameter SSNP durch einen Ausgleichsprozess als Korrekturgrößen geschätzt und mittels MF (z.B. $MF_{Niell,w}$) in Zenitrichtung abgebildet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass die SSNP sowohl einen trockenen als auch einen feuchten Anteil beinhalten und der prozentuale Betrag des feuchten Anteils in SSNP mit dem im Prädiktionsmodell (hier Saastamoinen-Modell) identisch ist. Diese Annahme beeinflusst die Ergebnisse grundlegend. Zur Bestimmung des Wasserdampfs muss der feuchte Anteil $SSNP_w$ in Gleichung (4-26) unter Anwendung eines Gewichtungsfaktors vom Gesamtbetrag der neutrosphärischen Zusatzparameter abgespalten werden (s. Gleichung (9-8) in Unterkapitel 9.2.3).

Abb. 4-1 stellt die berechneten Modellwerte (gestrichelt) und die gesamten durch SSNP verbesserten neutrosphärischen Laufzeitverzögerungen (durchgezogen) dar. Durch Vergleich dieser beiden Grafiken ist leicht feststellbar, dass diese Parameterschätzung sehr stark von der jeweiligen Station (z.B. Datenqualität, Zustand der Atmosphäre) abhängig ist. Auf die Genauigkeit der Parameterschätzung wirken viele Faktoren ein, ihre Einflüsse auf die Standardabweichung von SSNP werden in Unterkapitel 9.3.1 ausführlich analysiert.

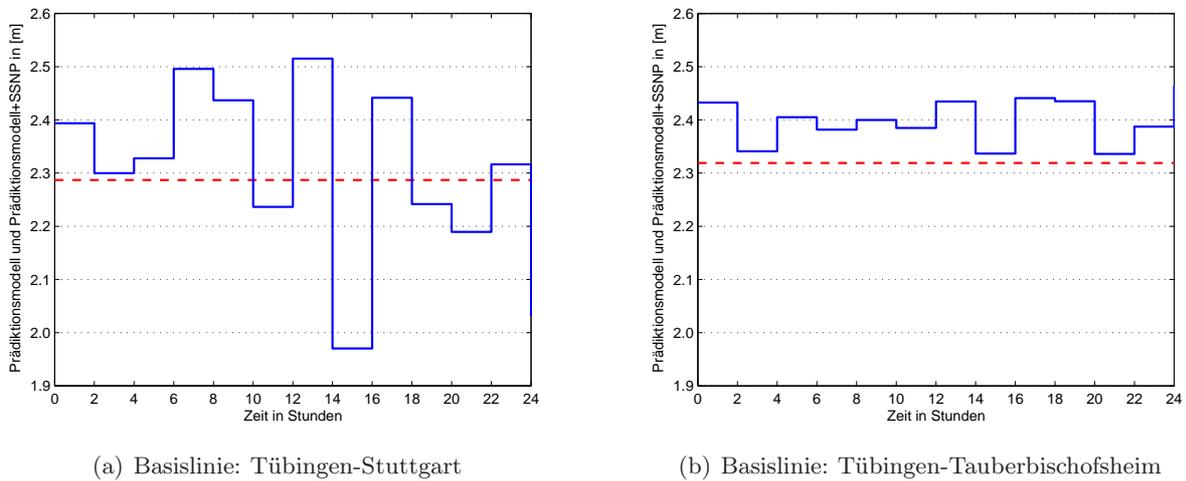


Abb. 4-1: Zweiteilige neutrosphärische Modellierung, DOY2004: 186

Umgekehrt können unter Berücksichtigung von MF an die zenitalen Werte Verbesserungen in anderen Himmelsrichtungen berechnet werden. Durch die oben vorgestellte zweiteilige Modellierung ergibt sich die neutrosphärische Laufzeitverzögerung des isotropen¹ feuchten Anteils zwischen einem Satelliten und einer Station zu

$$\Delta\rho_{isotrop} = \underbrace{MF_{Niell,w} \cdot \Delta\rho_{Saas,w}^0}_{\text{Prädiktionsmodell}} + \underbrace{MF_{Niell,w} \cdot SSNP_w}_{\text{Parameterschätzung}} \quad (4-26)$$

Diese gewöhnliche, zweiteilige Modellbildung erfolgt i.d.R. unabhängig von der azimuthalen Richtung, unter der die Satellitensignale die Station erreichen; die azimuthalen Richtungen werden somit stationsweise isotrop behandelt. Die Bestimmung von horizontalen neutrosphärischen Gradienten, die einer Verkippung des neutrosphärischen Zenits gegenüber dem lokalen topozenitrischen Zenit entsprechen, sollen im Rahmen dieses Beitrags unberücksichtigt bleiben, da zur zuverlässigen Bestimmung dieser Parameter große Netzausdehnungen und niedrige minimale Cut-Off-Winkel der Satellitenelevation vorausgesetzt werden [Chen und Herring, 1997].

¹Azimutale Isotropie

4.4 Berücksichtigung anisotroper Anteile

Bei dem in Unterkapitel 4.3 vorgestellten zweiteiligen Modellierungsverfahren wird nur der isotrope Anteil der neutrosphärischen Laufzeitverzögerung berücksichtigt. Um den anisotropen Anteil berücksichtigen zu können, können die Residueninformationen, die im Rahmen der GNSS-Auswertung nach der Parameterabschätzung in Form von DDR zur Verfügung stehen, verarbeitet werden. DDR sind jedoch auf zwei Stationen und zwei Satelliten bezogen und enthalten somit Informationen von insgesamt vier Signalwegen.

Nach einer Konvertierung von DDR in PZDR unter der sog. „zero mean“-Annahme (s. Unterkapitel 6.3) können die Residueninformationen zwischen einer Station und einem Satelliten extrahiert werden. Auf der Basis von Prädiktionsmodell, Zusatzparameter und PZDR erfolgt eine dreiteilige neutrosphärische Modellierung zur Bestimmung von Wasserdampffeldern,

$$\Delta\rho_{ges} = \underbrace{MF_{Niell,w} \cdot \Delta\rho_{Saas,w}^0}_{\text{Prädiktionsmodell}} + \underbrace{MF_{Niell,w} \cdot SSNP_w}_{\text{Parameterschätzung}} + \underbrace{PZDR}_{\text{Pseudo-Residuen}}$$

azimutal-isotrop azimutal-anisotrop

(4-27)

die sowohl den azimutal-isotropen als auch den azimutal-anisotropen Anteil berücksichtigt. Die Einteilung der atmosphärischen Einflüsse auf GNSS-Signale und ihre Modellierung werden in Abb. 4-2 dargestellt.

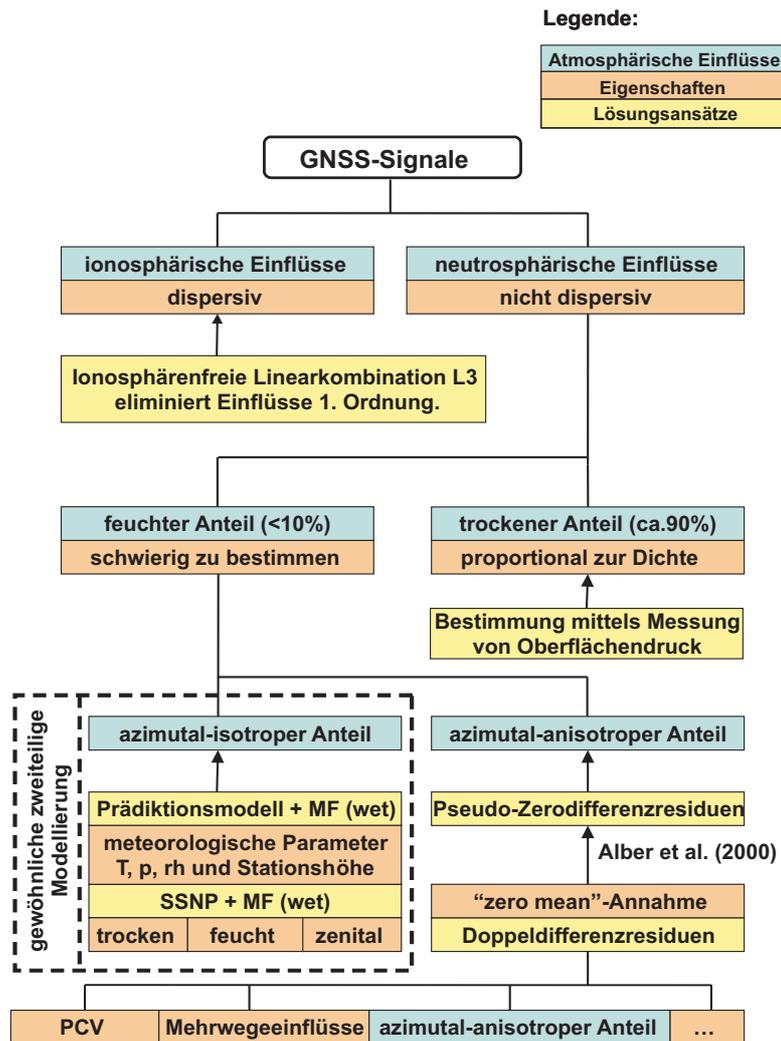


Abb. 4-2: Atmosphärische Einflüsse auf GNSS-Signale und ihre Modellierung

Neben dem azimuthal-anisotropen Anteil der Laufzeitverzögerung enthalten die PZDR Informationen über weitere Einflussfaktoren (z.B. Mehrwegeeffekte, Antennenphasenzentrumsvariation), die bei der aktuellen Modellierung vernachlässigt werden. Die unter dieser Annahme berechneten Ergebnisse können als „worst case“-Abschätzung der dreiteiligen Modellierung betrachtet werden. Im Vergleich zum isotropen Anteil ist der anisotrope Anteil viel kleiner und kann nur mit hohem Zeit- und Rechenaufwand bestimmt werden. Deshalb wird er in der Praxis bei gewöhnlicher Modellbildung normalerweise vernachlässigt. Im Rahmen dieser Arbeit soll basierend auf der gewöhnlichen zweiteiligen Modellierung untersucht werden, inwieweit der anisotrope Anteil einen signifikanten Beitrag zur neutrosphärischen Modellierung zur Bestimmung und Visualisierung von Wasserdampffeldern leisten können.

5 Software

Für die Datenaufbereitung, die -verarbeitung und die -analyse kommen in dieser Arbeit unterschiedliche Programme (z.B. BS5 und MATLAB 7.0) und verschiedene Programmiersprachen (z.B. Visual Basic, C und Fortran) zum Einsatz. Weil die GPS Software BS5 lediglich unter Linux zur Verfügung steht, werden zusätzlich Schnittstellen für die unter Windows geschriebenen Programme (z.B. in Visual Basic) implementiert.

5.1 Microsoft Visual Basic 6.0

Microsoft Visual Basic 6.0 (VB6) ist Teil von Microsoft Visual Studio, das schon in 1998 auf den Markt kam. Visual Basic (VB) ist ein Sammelbegriff für verschiedene Programmierumgebungen, die auf der Programmiersprache BASIC (Beginner's Allpurpose Symbolic Instruction Code) basieren und aus der MS-DOS Anwendung QBasic hervorgegangen sind.

Der Erfolg von VB ist vor allem auf eine einfach zu erlernende Programmiersprache, eine windows-orientierte, visuelle Entwicklungsumgebung und eine unkomplizierte Aufbaufähigkeit zurückzuführen. VB6 weist zwar objektorientierte Eigenschaften auf, ist jedoch keine voll objektorientierte Programmiersprache in Hinsicht auf Klassenvererbung. Trotzdem ist VB für viele leichter zu erlernen als andere höhere Programmiersprachen wie z.B. Java, C oder C++. Ein weiterer Vorteil von VB liegt darin, dass VB die Möglichkeit bietet, über ein API (Application Programming Interface, Schnittstelle zur Anwendungsprogrammierung) auf s.g. Einsprung-DLL²s zuzugreifen und somit ein großes Potential hat, auf andere Programme einzuwirken. Dadurch ist VB sehr geeignet für Prototypen komplexer Anwendungen, die in beliebigen Sprachen implementiert werden sollen. Die neuesten deutschen Versionen Visual Basic 2005 wurden im Februar 2006 auf einer eigenen Veranstaltung in Karlsruhe veröffentlicht, siehe <http://msdn.microsoft.com/vbasic/>.

Im Rahmen dieser Arbeit werden genau die o.g. Vorteile von VB ausgenutzt, nämlich leichte Handhabung und starke Kommunizierfähigkeit mit anderen Programmiersprachen. Unter Anwendung von VB wird in BS5 eine Schnittstelle implementiert, die die Residueninformationen auf kompakte und elegante Weise für die weitere Datenverarbeitung vorbereitet.

5.2 Bernese GPS Software 5.0

Die Bernese GPS Software wurde am Astronomischen Institut der Universität Bern (AIUB) in der Schweiz entwickelt und wird nach den wachsenden Ansprüchen an die Genauigkeit, Zuverlässigkeit, Flexibilität und Reproduzierbarkeit von GPS-Auswertungen sowohl in wissenschaftlichen als auch in kommerziellen Anwendungen mit komplexen Applikationen angewandt. Im Jahre 2005 ist die neuste Version 5.0 auf den Markt gekommen.

Diese Software ist besonders geeignet für komplexe Datenauswertungen in großen GPS-Netzen mit zahlreichen individuellen Modellierungsmöglichkeiten, wie z.B. Automatisierung von GPS-Auswertungen für Permanentstationen, Prozessierung großer Mengen von Daten unter Berücksichtigung von PCV, der Modellierung von neutro- bzw. ionosphärischen Einflüssen bzw. dem Schätzen von Uhr- und Erdorientierungsparametern.

Die BS5 unterstützt internationale Input- und Outputdatenformate, z.B. RINEX (Receiver Independent Exchange Format), SINEX (Software Independent Exchange Format), IONEX (IONosphere Map Exchange Format), ANTEX (ANTenna Exchange Format) und ERP (Earth Rotation Parameter) des IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service). Diese Software prozessiert fast alle durch hoch präzise geodätische Empfänger (Code- und Phasendaten auf beiden Trägerfrequenzen) aufgezeichnete Beobachtungsdaten sowohl im Doppel- als auch im Zerodifferenzmodus. Insgesamt können

²Eine Dynamic-Link Library (DLL) ist eine unter Microsoft Windows verwendete Programm Bibliothek. DLLs wurden eingeführt, um den von einer Anwendung auf der Festplatte und im Hauptspeicher benötigten Speicherplatz zu reduzieren.

fünf Typen von Linearkombinationen gebildet und genutzt werden. Darüber hinaus stehen mehrere Strategien zur Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten zur Verfügung. Unter Anwendung von z.B. IGS präzisen Satellitenbahndaten können Phasenmehrdeutigkeiten für extrem lange Basislinien (größer als 2000 km) gelöst werden.

Im Hinblick auf die Modellierung zeitabhängiger Parameter, z.B. zenitale neutrosphärische Laufzeitverzögerung, Erdorientierungsparameter und globale Ionosphärenmodelle, bietet die BS5 auch eine stückweise Modellierungsmöglichkeit mit einem zeitlichen Gültigkeitsrahmen.

Besonders für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit wichtige neutrosphärische Modellbildung stehen zahlreiche Standardatmosphärenmodelle und Abbildungsfunktionen sowohl für den trockenen als auch für den feuchten Anteil zur Verfügung. Außerdem kann das neutrosphärische Prädiktionsmodell aus meteorologischen Beobachtungen (z.B. T , p und rh) sowie Messungen von Wasserdampfadiometern statt aus dem Standardatmosphärenmodell in BS5 hergeleitet werden.

Im Vergleich zur Version 4.2 hat die neue Version 5.0 eine nutzerfreundliche Bedienoberfläche, die auf QC C++ Bibliotheken basiert. Durch diese Menüoberfläche wird ein besserer Überblick über die Programmstruktur geschaffen und fast alle Operationen, wie z.B. die Definition von Kampagnen und Sessions, Einsehen und Editieren von Datenfiles, Starten der Programme und Nachschlagen von Hilfe im Kontext, können durch die grafische Oberfläche durchgeführt werden. Außerdem führt eine weitere Entwicklung in BPE (Bernese Processing Engine) zu einer besseren Kontrollierbarkeit bei automatischer Datenprozessierung (Mehr Informationen unter <http://www.bernese.unibe.ch/>).

5.3 MATLAB Version 7.0

MATLAB ist sowohl eine leistungsfähige Programmiersprache für effiziente Lösungen von technischen Problemen als auch eine Umgebung mit zahlreichen Funktionen für Entwicklung von Algorithmen, Datenanalyse und -visualisierung, numerische Berechnung sowie Problemmodellierung bzw. Szenariensimulation.

MATLAB steht für „MATrix LABoratory“ und wurde ursprünglich zur Erleichterung von Matrizenberechnungen entwickelt. Heutzutage zeigt die neue Version MATLAB 7.0 ihre Stärke nicht nur durch elegante und effiziente Behandlung von Matrizen, sondern auch durch eine große Funktionsbibliothek, welche die Rechenzeit und den Programmieraufwand bei wissenschaftlichen und ingenieurtechnischen Problemen erheblich reduziert. Außerdem zeichnet sich diese Programmiersprache durch ihre leichte Lernbarkeit und schnelle Handhabung aus. Im Vergleich zu konventionellen Programmiersprachen (z.B. Fortran und C) ist es bei MATLAB nicht notwendig Variablen extra zu deklarieren oder Arrays vor ihrer Zuweisung zu dimensionieren.

Um als ein wissenschaftliches und industrielles Werkzeug auf dem Markt vielseitig einsetzbar zu sein, stehen in der MATLAB-Entwicklungsumgebung noch zahlreiche Tools zur Implementierung und Praktizierung nutzerspezifischer Anwendungen zur Verfügung. Die sog. Toolboxes bestehen aus einer großen Menge von MATLAB-Funktionen (M-files), die die Fähigkeiten von MATLAB in speziellen Bereichen, z.B. Signalverarbeitung, Kontrollsystem, Fuzzy Logik oder Waveletanalyse, erweitern können.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die meisten Datenverarbeitungen, Berechnungen und graphische Darstellungen unter MATLAB durchgeführt. Alle geschriebenen Subroutinen bzw. Programme werden unter Anwendung von GUI (Graphical User Interface) zusammengefasst (s. Anhang A). Unter der Bezeichnung GUI versteht man in diesem Fall interaktive Dialogboxen bzw. MATLAB-Figuren, die verschiedene graphische Objekte, wie Text- und Grafikausgaben usw. enthalten können. Über die MATLAB-Engine kann GUI aufgerufen werden, somit findet die Mensch-Maschine-Kommunikation statt. Da MATLAB über sehr leistungsfähige Werkzeuge zur Entwicklung solcher GUI verfügt, lassen sich komfortable Bedienoberflächen ohne großen Aufwand erstellen. Weitere Informationen sind bspw. unter <http://www.mathworks.com/products/matlab/> zu finden.

6 Vorbereitende Arbeiten

Um die Einflüsse der DDR auf die Bestimmung und die Visualisierung des Wasserdampfgehaltes untersuchen zu können, müssen die entsprechenden Residuen in geeigneter Form nach GPS-Auswertungen gespeichert werden. Da die BS5 über diese Funktionalität nicht originär verfügt, müssen die betroffenen Subroutinen bzw. Programme der BS5 modifiziert werden, damit die DDR für die weitere Datenverarbeitung zur Verfügung stehen. Neben der Softwareerweiterung gehört auch die Konvertierung der DDR in PZDR unter der sog. „zero mean“-Annahme zu den vorbereitenden Arbeiten. Weiterhin sollte erreicht werden, dass die DDR nach einer Basislinienauswertung in geeigneter Form für die weitere Berechnung gespeichert werden und anschließend durch MATLAB-Programme in PZDR konvertiert werden.

6.1 Modifikation der BS5

Im Rahmen der hier beschriebenen GPS-Auswertungen mit der BS5 werden GPS-Beobachtungen basislinienweise verarbeitet. Die DDR, die nach einem Ausgleichsprozess erzeugt werden, stehen somit für jede Basislinie zur Verfügung. Um die DDR dem entsprechenden Satellitenpaar im weiteren Bearbeitungsschritt zuordnen zu können, müssen sowohl die DDR als auch die Informationen der beteiligten Satelliten gespeichert werden. Hierfür ist eine Programmerweiterung notwendig. Dabei werden die Quellcodes der Routinen GPSEST.f, PRCEPO.f, RESOUT.f und PRIFIL.f modifiziert. Hierbei muss im Besonderen auf die Parameterliste, die Verpfadung und die Deklaration der neu eingeführten Parameter geachtet werden. Außerdem sind die Pfade künftig unter Berücksichtigung der Benutzerberechtigung auf dem jeweiligen Rechner anzupassen. Nach Änderung der Parameterliste und Eintragung der neu definierten Parameter in die Registrierungsliste ist eine neue Kompilierung aller Routinen und Programme durchzuführen. Die wesentliche Modifizierung der Routinen ist bereits von einem ehemaligen Mitarbeiter am Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe (TH) unter der Version 4.2 durchgeführt worden [Howind, 2005]. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Modifikation an die neue Version 5.0 angepasst.

Nach der Modifikation der entsprechenden Subroutinen und Programme werden vier neue Dateien GPSEST.VER, GPSEST.DD1, GPSEST.DD2 und GPSEST.TIM nach Lösen der Phasenmehrdeutigkeiten mittels Parameterschätzung für jede Basislinie in jeder Session erzeugt. Bei der Paneleinstellung von GPSEST ist es zwingend notwendig, die Residuendatei mit der Endung RES generieren zu lassen.

GPSEST.VER enthält alle DDR einer Basislinie einer prozessierten Session. GPSEST.DD1 beinhaltet die PRN (Pseudo Random Noise), die Elevationswinkel und die Azimute zweier Satelliten bezogen auf zwei Bodenstationen. In diesem Fall sind die beteiligten Satelliten und die entsprechenden DDR getrennt in zwei Dateien gespeichert. Daher werden noch weitere vorverarbeitende Schritte durchgeführt, um die DDR dem entsprechenden Satellitenpaar zuzuordnen. In GPSEST.DD2 sind Informationen über Anfangs- und Endepoche, Gesamtzahl der Doppeldifferenzbeobachtungen einer Session und sog. Abtastrate (Epochenabstand) vorhanden. Die Datei GPSEST.TIM liefert diverse zeitliche Angaben, wie z.B. Anfang einer Session, definiert durch Stunden, Minuten, Sekunden und Tagen, sowie Pfad einer Headerdatei.

6.2 Schnittstelle der BS5

Eine Schnittstelle (Abb. 6-1) wurde mittels VB6 in die BS5 implementiert, die DDR aus der GPS-Auswertung epochenweise extrahiert, Satelliten zuordnet und für die spätere Verarbeitung formatiert. Des Weiteren wird versucht, diese Schnittstelle mit BPE in BS5 in Kommunikation zu setzen, damit eine automatische Durchführung der o.g. Schritte durch passende Einstellung der Aktualisierungsrate auf Grund unterschiedlicher Leistungsfähigkeit der Hardware automatisch möglich ist³.

³Für Rechner mit geringer CPU-Leistung und geringem Arbeitsspeicher muss noch eine Warteschleife in die Routine GPSEST.f nachprogrammiert werden.

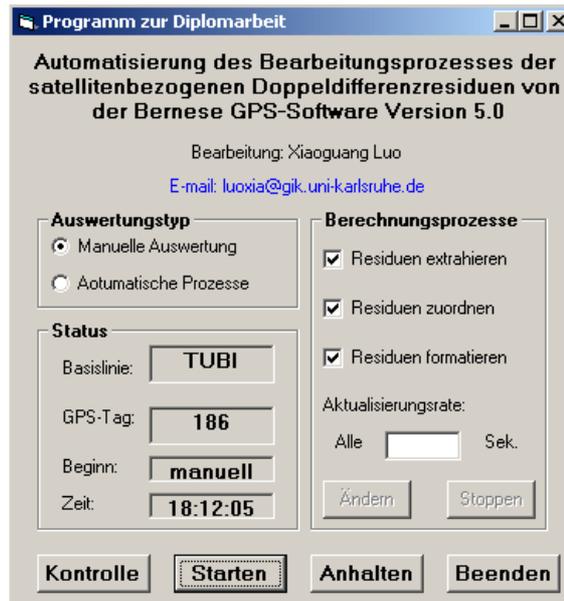


Abb. 6-1: Schnittstelle der BS5, programmiert in VB6

Bei der Implementierung der Schnittstelle wird besonders auf die Übersichtbarkeit der erzeugten Dateien und die Ordnerstruktur geachtet. Jeder Verarbeitungsprozess der o.g. vier GPSEST-Dateien einer Basislinie eines GPS-Tags (z.B. Basislinie zwischen Tübingen und Stuttgart am GPS-Tag 186: TUST1860) erzeugt eine Epochendatei mit der Endung EPO (hier z.B. TUST1860.EPO) und drei weitere Ordner, LOCH, TUST1860 und DDR4ORD. In der Epochendatei TUST1860.EPO werden alle DDR an diesem Tag epochenweise geordnet, während die DDR im Ordner TUST1860 explizit satellitenbezogen in Form von einzelnen Dateien (z.B. TUST0319186.dat: Satellit 03, 19) zur Verfügung stehen. Die Epochendateien werden für die Konvertierung von DDR in Pseudo-Singledifferenzresiduen (PSDR) benötigt, während die einzelnen Dateien zur Visualisierung von DDR verwendet werden können. Im Ordner LOCH sind Dateien gespeichert, die Informationen über die Beobachtungslücken dieses Tags beinhalten. Die vier GPSEST-Dateien werden nach jedem Verarbeitungsprozess umbenannt und der neue Dateiname wird aus den Basislinienstationen und dem GPS-Tag zusammengesetzt. Abschließend werden die o.g. vier umbenannten Dateien in den Ordner DDR4ORD verschoben. Die epochenweise nach Satelliten sortierten DDR, gespeichert in Dateien mit der Endung EPO, sind die Eingangsdaten für den nächsten Vorverarbeitungsschritt, die Konvertierung der DDR in PZDR.

6.3 Konvertierung der DDR in PZDR

Durch Doppeldifferenzbildung von GNSS-Phasenbeobachtungen können systematische Fehlereinflüsse, z.B. Satelliten- und Empfängeruhrfehler sowie atmosphärische Einflüsse, reduziert bzw. eliminiert werden. Aber an einem DDR sind zwei Satelliten und zwei Stationen beteiligt und es beinhaltet somit Beobachtungen von vier verschiedenen Signalwegen. Daher ist ein DDR in der Praxis viel schwieriger zu interpretieren als bspw. undifferenziertes Residuum. In dieser Arbeit werden DDR nach dem in [Alber et al., 2000] vorgestellten Verfahren unter der „zero mean“-Annahme konvertiert. Die im Folgenden aus DDR abgeleiteten Residuen entsprechen nicht notwendigerweise den Residuen undifferenzierter Beobachtungen, da z.B. gemeinsame Anteile der originären GNSS-Beobachtungen durch Differenzierungstechniken eliminiert werden. Aus diesem Grund werden abgeleitete Residuen in dieser Arbeit als Pseudo-Residuen bezeichnet. Er ergeben sich somit die Akronyme PSDR und PZDR.

6.3.1 Konvertierung der DDR in PSDR

Die Konvertierung von DDR in PSDR wird für eine Basislinie basierend auf mehreren Satelliten durchgeführt (s. Abb. 6-2). Ein DDR ddr_{AB}^{12} zwischen zwei Stationen (A, B) und zwei Satelliten (1, 2) kann

durch die satellitenbezogenen PSDR $psdr_{AB}^1$ und $psdr_{AB}^2$ mittels

$$ddr_{AB}^{12} = psdr_{AB}^1 - psdr_{AB}^2 \quad (6-1)$$

ausgedrückt werden.

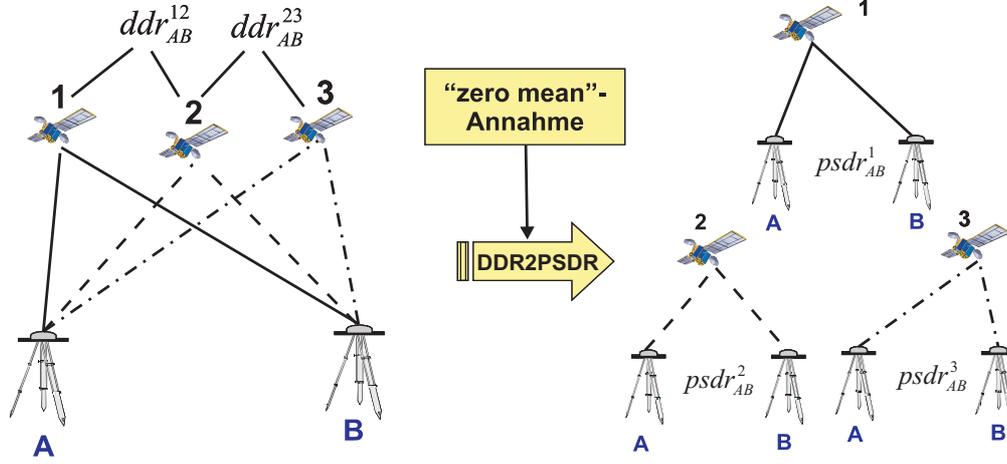


Abb. 6-2: Prinzip der Konvertierung von DDR in PSDR

Die DDR lassen sich durch das Produkt einer Designmatrix D_1 mit dem Spaltenvektor PSDR durch

$$DDR = D_1 \cdot PSDR \quad (6-2)$$

darstellen. Die zur Gleichung (6-1) korrespondierende Darstellung mittels Matrizen lautet:

$$ddr_{AB}^{12} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} psdr_{AB}^1 \\ psdr_{AB}^2 \end{bmatrix} \quad (6-3)$$

Für eine Basislinie AB und n PSDR sind nur $(n - 1)$ linear unabhängige DDR vorhanden und die singuläre Designmatrix D_1 kann nicht invertiert werden. Um das Konvertierungsproblem auf Grund der Singularität der Designmatrix D_1 beheben zu können, wird eine Zeile in die Matrix D_1 eingeführt, die über die Gewichtungen w^i der einzelnen PSDR verfügt. Die PSDR mit niedrigeren Elevationswinkeln sollen mit kleineren Gewichten multipliziert werden. Durch Ergänzung dieser Gewichtszeile ergibt sich aus der Gleichung (6-2)

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n w^i psdr_{AB}^i \\ ddr_{AB}^{12} \\ ddr_{AB}^{23} \\ \vdots \\ ddr_{AB}^{n-1,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w^1 psdr_{AB}^1 + \dots + w^n psdr_{AB}^n \\ psdr_{AB}^1 - psdr_{AB}^2 \\ psdr_{AB}^2 - psdr_{AB}^3 \\ \vdots \\ psdr_{AB}^{n-1} - psdr_{AB}^n \end{bmatrix} \quad (6-4)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n w^i psdr_{AB}^i \\ ddr_{AB}^{12} \\ ddr_{AB}^{23} \\ \vdots \\ ddr_{AB}^{n-1,n} \end{bmatrix}}_{DDR} = \underbrace{\begin{bmatrix} w^1 & w^2 & w^3 & \dots & w^n \\ 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & -1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -1 \end{bmatrix}}_{D_1} \underbrace{\begin{bmatrix} psdr_{AB}^1 \\ psdr_{AB}^2 \\ psdr_{AB}^3 \\ \vdots \\ psdr_{AB}^n \end{bmatrix}}_{PSDR} \quad (6-5)$$

wobei die Struktur der Designmatrix D_1 von der Reihenfolge der Satellitennummern in den DDR-Dateien abhängig ist.

Um mit der Gewichtsbehandlung im Auswerteprogramm (BS5) konsistent zu bleiben, wird ein elevations- bzw. zenitwinkelabhängiges Gewicht w^i für das PSDR $psdr_{AB}^i$

$$w^i = \sin^2 E_{AB}^i = \cos^2 Z_{AB}^i \quad (6-6)$$

E_{AB}^i : Mittelwert der Elevationswinkel E_A^i und E_B^i

Z_{AB}^i : Mittelwert der Zenitdistanzen Z_A^i und Z_B^i

eingeführt. Auf Grund der geringen Basislinienlänge (max. 131 km) und eines maximalen Höhenunterschieds von 1300 km ist im Fallbeispiel eine Mittelbildung zweier Elevations- bzw. Zenitwinkel einer Basislinie zulässig. Abschätzungen nach [Wanninger, 2000b] ergeben maximale Elevations- bzw. Zenitunterschiede von 3.5° . Unter der Annahme, dass die DDR normal verteilt sind und diese Normalverteilung während der Konvertierung erhalten bleibt, kann die gewichtete Summe aller PSDR von mehreren Satelliten bezogen auf eine Basislinie zu Null gesetzt werden. Die durch die Gleichung

$$\sum_{i=1}^n w^i psdr_{AB}^i = w^1 psdr_{AB}^1 + \dots + w^n psdr_{AB}^n = 0 \quad (6-7)$$

dargestellte Bedingung wird als „zero mean“-Annahme für die PSDR bezeichnet. Diese Annahme ist umso zuverlässiger, je mehr Satelliten verfügbar sind. Um die Dimension der Matrix D_1 möglichst klein zu halten, wird die Konvertierung epochenweise durchgeführt. Durch dieses Vorgehen entsteht keine Korrelation zwischen den Einzelepochen.

6.3.2 Konvertierung der PSDR in PZDR

Die Konvertierung von PSDR in PZDR wird für einen Satelliten basierend auf mehreren Stationen durchgeführt (s. Abb. 6-3). Die bei der GNSS-Auswertung ausgewählte Referenzstation wird in diesem Konvertierungsprozess als Bezugsstation definiert. Ein PSDR $psdr_{AB}^1$ vom Satelliten 1 zu zwei Stationen A und B ist durch zwei PZDR $pzdr_A^1$ und $pzdr_B^1$

$$psdr_{AB}^1 = pzdr_A^1 - pzdr_B^1 \quad (6-8)$$

definierbar.

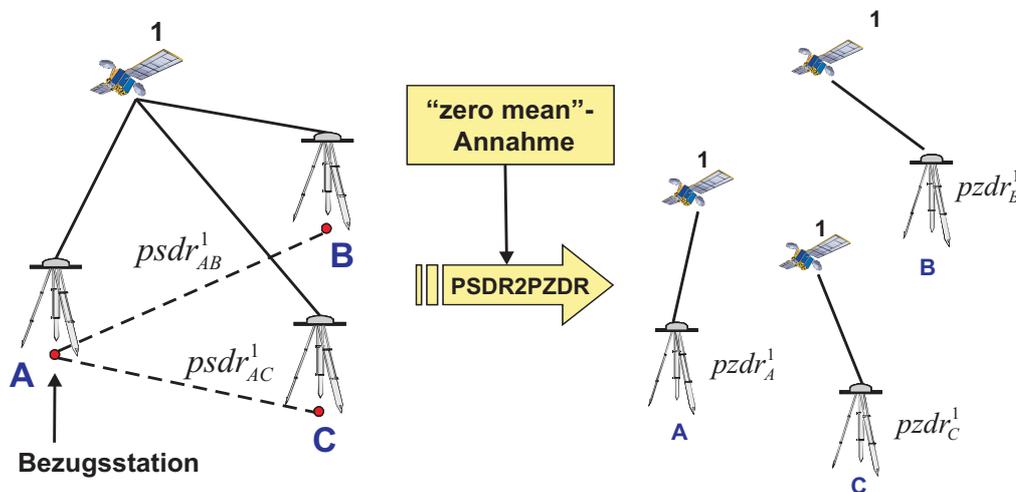


Abb. 6-3: Prinzip der Konvertierung von PSDR in PZDR

Auch hier lässt sich die mathematische Beziehung in der Gleichung (6-8) in Abhängigkeit von Matrizen mittels

$$PSDR = D_2 \cdot PZDR \quad (6-9)$$

darstellen. In diesem Schritt besteht das oben beschriebene Invertierungsproblem auf Grund der Singularität von D_2 ebenfalls. Daher ist die Ergänzung einer Zwangsbedingung für die Matrix D_2 durch Gewichte w_I^i zwischen dem Satelliten i und der Station I notwendig. Nach Ergänzung der Gewichtszeile ergibt sich aus der Gleichung (6-9)

$$\begin{bmatrix} \sum_{I=A}^Z w_I^i pzd r_I^i \\ p s d r_{AB}^i \\ p s d r_{AC}^i \\ \vdots \\ p s d r_{AZ}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_A^i p z d r_A^i + \dots + w_Z^i p z d r_Z^i \\ p z d r_A^i - p z d r_B^i \\ p z d r_A^i - p z d r_C^i \\ \vdots \\ p z d r_A^i - p z d r_Z^i \end{bmatrix} \quad (6-10)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \sum_{I=A}^Z w_I^i p z d r_I^i \\ p s d r_{AB}^i \\ p s d r_{AC}^i \\ \vdots \\ p s d r_{AZ}^i \end{bmatrix}}_{PSDR} = \underbrace{\begin{bmatrix} w_A^i & w_B^i & w_C^i & \dots & w_Z^i \\ 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & -1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & \dots & -1 \end{bmatrix}}_{D_2} \underbrace{\begin{bmatrix} p z d r_A^i \\ p z d r_B^i \\ p z d r_C^i \\ \vdots \\ p z d r_Z^i \end{bmatrix}}_{PZDR} \quad (6-11)$$

wobei

$$w_I^i = \sin^2 E_I^i = \cos^2 Z_I^i \quad (6-12)$$

E_I^i : Elevationswinkel zwischen i und I

Z_I^i : Zenitdistanz zwischen i und I .

Da eine Station bei der Konvertierung als Bezugsstation ausgewählt wird, ist die Struktur der Designmatrix D_2 durch die Bezugsstation und die entsprechende Basislinienbildung festgelegt. Unter der Annahme einer Normalverteilung der PZDR zwischen einem Satelliten und einer Station ist eine weitere „zero mean“-Annahme für die beteiligten PZDR

$$\sum_{I=A}^Z w_I^i p z d r_I^i = w_A^i p z d r_A^i + \dots + w_Z^i p z d r_Z^i = 0 \quad (6-13)$$

zu treffen. Je mehr auf den gleichen Satelliten bezogene Stationen an diesem Konvertierungsprozess beteiligt sind, umso zutreffender ist diese „zero mean“-Annahme. Um den Rechenaufwand zu reduzieren wird die Konvertierung von PSDR in PZDR ebenfalls epochenweise durchgeführt.

7 Datenprozessierung

Für die GNSS-Auswertung werden die Beobachtungsdaten aller Stationen des SAPOS[®]-Netzes von Baden-Württemberg (BW) (s. Abb. 7-1) im Zeitraum DOY2004: 186-193 herangezogen. Diese Daten stehen mit einer Taktrate von 15^S und mit einem minimalen Elevationswinkel von 0° zur Verfügung. Zur Ermittlung der Stationskoordinaten werden alle vorhandenen Daten ausgewertet. Für die Untersuchung und Analyse werden unter Berücksichtigung der jeweiligen Wetterbedingungen, welche die Auswertungsergebnisse in unterschiedlichem Ausmaß beeinflussen, die folgenden vier Tage 186, 187, 190 und 193 ausgewählt. An den ersten beiden Tagen herrschten über Baden-Württemberg trockene, ruhige und gleichmäßige Wetterbedingungen, während an den beiden letztgenannten Tagen teilweise erhebliche Niederschläge registriert wurden [Wetterzentrale, 2006].

Basierend auf den in [Mayer et al., 2004] beschriebenen Untersuchungen zur Quantifizierung der Mehrwegeeffekte der SAPOS[®]-Stationen von Baden-Württemberg können alle bei der im Folgenden erläuterten Grundlagenstudie berücksichtigten Stationen hinsichtlich der Mehrwegebelastung in drei Gruppen eingeteilt werden.

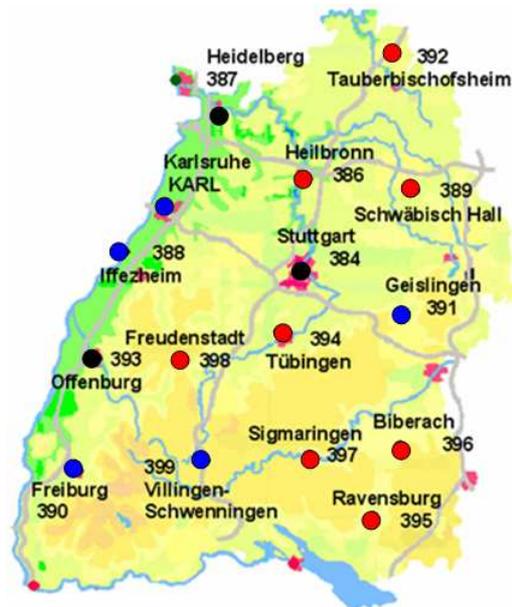


Abb. 7-1: SAPOS[®]-Stationen BW (SAPOS[®]2006); rote/blaue/schwarze Kreissignatur: geringe/durchschnittliche/starke Mehrwegeeffekte nach [Mayer et al., 2004]

Quelle: <http://www.lv-bw.de/lvshop2/ProduktInfo/sapos/images/refuebersicht.gif>

Eine Berücksichtigung der Mehrwegesituation ist u.a. deshalb sinnvoll, da diese quasi-periodischen Fehlereinflüsse zu einer Verschlechterung der Signalqualität führen, was wiederum einen direkten Einfluss auf die durch das stochastische Ausgleichungsmodell festgelegte Genauigkeitssituation der GNSS-Auswertung hat. Des Weiteren besteht nach [Beutler, 1998] eine Korrelationsproblematik z.B. zwischen den geschätzten Stationskoordinaten, im Speziellen der Stationshöhe, und der neutrosphärischen Modellbildung, v.a. den in Unterkapitel 9.3.1 analysierten zenitalen stationspezifischen Zusatzparametern, wodurch fehlerhaft geschätzte Stationshöhen auf neutrosphärische Produkte einwirken.

Für die GNSS-Auswertung, die grundlegend für die Ermittlung der Wasserdampfverteilung ist, wird die Station Tübingen (TUEB), die sich im Vergleich zu anderen Stationen durch eine sehr geringe Mehrwegebelastung auszeichnet, als Referenzstation ausgewählt, zu der von den übrigen Netzstationen Basislinien gebildet und verarbeitet werden. Außerdem liegt diese Station in der Mitte des SAPOS[®]-Netzes, wodurch eine günstige Netzgeometrie bspw. hinsichtlich der Basislinienlänge erzielt werden kann.

Die Datenauswertungen werden unter Verwendung der BS5 schrittweise mit verschiedenen Parameter-einstellungen durchgeführt, um die Auswertungsergebnisse verschiedener Varianten bei der späteren Datenanalyse zwischen den Gruppen bzw. innerhalb einer Gruppe vergleichen zu können. Dabei werden die folgenden Varianten hinsichtlich der Auswertestrategie durchgeführt: mit oder ohne elevations-abhängige Gewichtung der Beobachtung, Auswahl des neutrosphärischen Prädiktionsmodells und Strategien zur Phasenmehrdeutigkeitslösung.

7.1 Datumstransformation

Die neutrosphärische Modellierung ist mit der Stationshöhe und der Modellierung der Antennen hoch korreliert [Mayer, 2006]. Die Modellierungsfehler der Neutrosphäre können in zwei Gruppen, relative und absolute Fehler, unterteilt werden. Die relativen neutrosphärischen Fehler sind auf eine fehlerhafte Modellierung der neutrosphärischen Refraktion an einem Endpunkt der Basislinie relativ zum anderen Endpunkt zurückzuführen und beeinflussen vor allem die Genauigkeit der Stationshöhe. Die absoluten Fehler sind an den beiden Endpunkten der Basislinie zu finden und führen zur fehlerhaften Bestimmung der Basislinienlänge. Für ein regionales Netz, wie das hier untersuchte, sind relative neutrosphärische Modellierungsfehler von großer Bedeutung, jedoch auch schwieriger zu modellieren.

Die erste Ordnung der relativen Fehler in Zenitrichtung $\Delta\rho_r^0$ kann in Abhängigkeit von Fehlern in der Stationshöhe Δh mittels

$$\Delta\rho_r^0 = \Delta h \cdot \cos Z_{max} \quad (7-1)$$

Δh : Fehler der Stationshöhe

$\Delta\rho_r^0$: relativer Fehler der Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung

Z_{max} : maximaler Zenitwinkel; Auswerteparameter

dargestellt werden. Für einen maximalen Zenitwinkel von 80° entspricht ein Fehler von 6 cm in der Stationshöhe einem relativen neutrosphärischen Modellierungsfehler von ca. 1 cm in zenitaler Laufzeitverzögerung [Hugentobler et al., 2005].

Unter diesen Umständen sind gute Näherungskordinaten vor allem in den Höhenkomponenten aller SAPOS[®]-Stationen für die Auswertung erforderlich. Die Stationskoordinaten, die in Beobachtungsdateien mitgeliefert sind, beziehen sich auf das Bezugssystem ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989). Durch dieses System wurde eine weitere Verdichtungsstufe des ITRF (International Terrestrial Reference Frame) im west- und mitteleuropäischen Bereich geschaffen. Bei der GNSS-Auswertung mit der BS5 werden diverse IGS-Produkte, z.B. Satellitenephemeriden und Erdorientierungsparameter, benutzt, die sich auf das neueste Referenzsystem ITRS2000 (International Terrestrial Reference System 2000) beziehen.

Auf Grund der eurasischen tektonischen Kontinentalplattenbewegung unterscheidet sich das ETRS89 vom ITRF2000. Daher müssen die Näherungskordinaten aller SAPOS[®]-Stationen durch eine Helmert-Datumstransformation in ITRF2000 auf die aktuelle Auswerteepoche transformiert werden. Unter dieser Datumstransformation versteht man eine dreidimensionale Ähnlichkeitstransformation mit sieben Parametern (3 Translationen, 3 Rotationen und 1 Maßstab). Die Zahlenwerte der Parameter für die Transformation vom ITRF2000 in das ETRS89 sind in Tab. 7-1 zusammengefasst.

Die Formel für die Transformation von ITRF2000 in ETRS89 kann folgendermaßen dargestellt werden:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}^{ETRS89} = \begin{bmatrix} t_X \\ t_Y \\ t_Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 + s & -r_Z & r_Y \\ r_Z & 1 + s & -r_X \\ -r_Y & r_X & 1 + s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}^{ITRF2000} \quad (7-2)$$

t_X, t_Y, t_Z : 3 Translationen entlang der X-, Y- und Z-Achse
 r_X, r_Y, r_Z : 3 Rotationen um die X-, Y- und Z-Achse
 s : Maßstabsfaktor [in ppm]

Tab. 7-1: Transformationsparameter von ITRF2000 in ETRS89 [Ordnance Survey, 2006]

ITRF2000 in ETRS89 Datumstransformation						
Translationen			Rotationen			Maßstab
t_X	t_Y	t_Z	r_X	r_Y	r_Z	s
[m]	[m]	[m]	['']	['']	['']	[ppm]
0.054	0.051	-0.048	$0.000081 \cdot \Delta t$	$0.00049 \cdot \Delta t$	$-0.000792 \cdot \Delta t$	0

Die Rotationsparameter in der oberen Gleichung sind zeitabhängig. Δt (s. Tab. 7-1) stellt die Zeitdifferenz in der Einheit Jahr zwischen der Bezugsepoche des ETRS89 (1989.0) und der aktuellen Auswerteepoche dar:

$$\Delta t = t_{\text{Auswerteepoche}} - 1989.0 \quad (7-3)$$

Um die Stationskoordinaten vom ETRS89 in ITRF2000 transformieren zu können, müssen die Transformationsparameter zuerst mit der mittleren Auswerteepoche, in diesem Fall 2004.52, durch Δt bestimmt werden. Anschließend können die auf das ITRF2000 bezogenen Stationskoordinaten durch Auflösung der Gleichung (7-2) nach $[x; y; z]^{ITRF2000}$ berechnet werden.

Die Station Karlsruhe (KARL) ist sowohl eine Station im SAPOS[®]-Netz als auch eine Referenzstation im EUREF-Netz. Die Koordinaten von KARL im aktuellen ITRF2000 beziehen sich zunächst auf die Epoche $t_0 = 1997.0$. Durch die dreidimensionalen Geschwindigkeitskomponenten unter der Annahme zeitlich linearer Bewegungen dieser Station können die auf t_0 bezogenen Koordinaten auf die aktuelle Auswerteepoche $t = 2004.52$ umgerechnet werden. Die Genauigkeit der EUREF-Koordinaten liegt heutzutage bei 1-3 cm. Außerdem werden die Stationskoordinaten von Tübingen (TUEB) durch drei IGS- bzw. EUREF-Referenzstationen (KARL, PFAN und ZIMM) unter extrem hohem Zwang mittels Netzlösung mit einer Genauigkeit von wenigen Millimetern bestimmt. Die hier ermittelten KARL- bzw. TUEB-Koordinaten werden in Tab. 7-2 unter „Herkunft“ als „berechnet“ bezeichnet und können zum Vergleich mit den in das ITRF2000 transformierten Stationskoordinaten herangezogen werden.

Tab. 7-2: Transformationsergebnisse von ETRS89 in ITRF2000

Nr.	Bezugssystem	Herkunft	Station KARL			Station TUEB		
			X [m]	Y [m]	Z [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]
1	ETRS89	gegeben	... 4.660	... 7.825	... 6.962	... 7.492	... 5.633	... 0.833
2	ITRF2000	transformiert	... 4.393	... 8.050	... 7.159	... 7.223	... 5.860	... 1.031
3	ITRF2000	berechnet	... 4.379	... 8.052	... 7.146	... 7.208	... 5.869	... 1.033
4	ITRF2000	Differenz 2-3	0.014	-0.002	0.013	0.015	-0.009	-0.002

Die transformierten Koordinaten von KARL und TUEB in Tab. 7-2 sind unter Vernachlässigung führender Ziffern zusammengestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass die transformierte Z-Komponente der Station TUEB im Vergleich zu KARL mit dem Vergleichswert besser übereinstimmt. Dies lässt sich dadurch begründen, dass die durch die GNSS-Auswertung mittels Netzlösung bestimmten Stationskoordinaten von TUEB eine bessere Genauigkeit aufweisen als die aus EUREF-Koordinaten und Geschwindigkeitskomponenten berechneten Koordinaten von KARL. Basierend auf den Vergleichsergebnissen (s. Nr. 4 in Tab. 7-2) unter Berücksichtigung der Genauigkeit von EUREF-Koordinaten ist davon auszugehen, dass die in ITRF2000 transformierten SAPOS[®]-Koordinaten eine Genauigkeit von

wenigen Zentimetern aufweisen und damit als Näherungskordinaten für die spätere GNSS-Auswertung geeignet sind.

7.2 GNSS-Auswertung mit der BS5

Die eigentliche GNSS-Auswertung mit der BS5 umfasst im Allgemeinen die folgenden fünf Schritte: Vorbereitung, Kampagnendefinition, Datenaufbereitung, Präprozessierung und Parameterschätzung. Die einzelnen Schritte werden in den folgenden Unterkapiteln kurz erläutert. Anschließend werden vier Auswertevarianten mit verschiedenen Parametereinstellungen zur Erzeugung der DDR beschrieben. In Tab. 7-3 werden die wichtigsten Einstellparameter für die Standardauswertevariante (Variante 1 in Abb. 7-2) zusammengefasst. Abb. 7-2 stellt den Ablauf des gesamten Auswerteprozesses dar.

Tab. 7-3: Einstellparameter für die Standardauswertevariante

Beobachtungen	Ionosphärenfreie Linearkombination L3
Abtastrate	180 Sekunden (3 Minuten)
Stochastisches Modell	Elevationsabhängige Gewichtung $\cos^2 Z$
Elevation cut-off	10 Grad
Orbits und ERP ⁴	IGS präzise Bahndaten und ERP
Empfängeruhrfehler	Eliminieren durch Doppeldifferenzen
Stationskoordinaten	Tübingen als Referenzstation (fixiert)
Neutrosphärenmodell	Modell Niell
Abbildungsfunktion (MF)	Niell,wet
Zeitliche Gültigkeit für SSNP	2 Stunden
Phasenmehrdeutigkeitslösung	SIGMA-Strategie L5 & L3
Antennenkorrektur	Absolute Kalibrierung (SAPOS [®] -Stationen)

⁴Earth Rotation Parameter

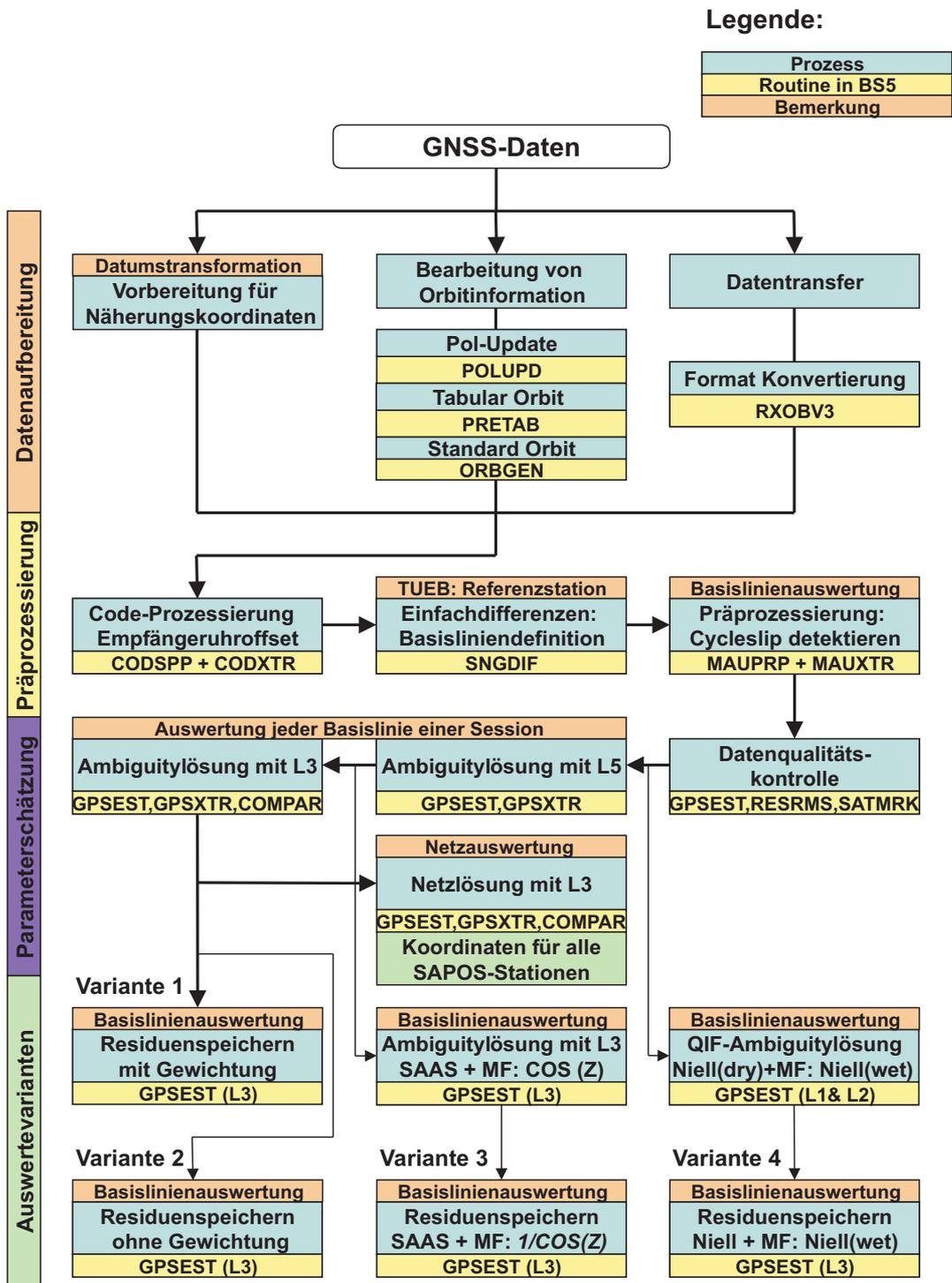


Abb. 7-2: Flussdiagramm der GNSS-Auswertung mit der BS5

7.2.1 Vorbereitung

Bevor mit der eigentlichen Datenauswertung begonnen werden kann, müssen diverse Vorbereitungsarbeiten geleistet werden. Dazu gehören z.B. Datenvorbereitung (Beobachtungsdaten, Satellitenbahn-
daten, Erdorientierungsparameter und Daten für atmosphärische Modellierung) und Analysieren von Stationsdateien, die sog. log-Files. Bei der Analyse von log-Files steht die Kontrolle verschiedener Antennen- und Receiverangaben im Vordergrund, z.B. Vergleich der Antennenhöhenangabe im log-File und im Beobachtungsfile sowie Kontrolle der Antennenreferenzpunkte.

Die *SAPOS*[®]-Stationen lassen sich durch eine Nummer (die sog. Identifier) eindeutig identifizieren. Eine bessere und leichtere Stationserkennung wird durch Stationsnamen mit vier Buchstaben eindeutig erhalten. Bei Bildung der Basislinien werden die ersten zwei Buchstaben des Stationsnamen verwendet, durch die jede Station eindeutig identifizierbar ist (s. Tab. 7-4). Die Stärke der Mehrwegebelastung der einzelnen *SAPOS*[®]-Stationen in Tab. 7-4 ist aus [Mayer et al., 2004] entnommen.

Tab. 7-4: *SAPOS*[®]-Stationen BW und deren Abkürzungen

Nr.	Identifier	Stationsname	Abkürzung		Basislinienlänge bzgl. TUEB [km]	Mehrwege- belastung
			Station	BL		
1	0384	Stuttgart	STUT	ST	30.3	stark
2	0385	Karlsruhe	KARL	KA	72.5	mittel
3	0386	Heilbronn	HLBR	HL	70.1	sehr gering
4	0387	Heidelberg	HEID	HE	100.8	stark
5	0388	Iffezheim	IFFE	IF	77.7	mittel
6	0389	Schwäbisch Hall	SCHA	SC	81.5	sehr gering
7	0390	Freiburg	FREI	FR	106.9	mittel
8	0391	Geislingen	GEIS	GE	55.6	mittel
9	0392	Tauberbischofsheim	TAUB	TA	131.0	gering
10	0393	Offenburg	OFFE	OF	81.8	stark
11	0394	Tübingen	TUEB	TU	-	gering
12	0395	Ravensburg	RAVE	RA	90.1	gering
13	0396	Biberach	BIBE	BI	71.8	gering
14	0397	Sigmaringen	SIGM	SI	49.9	gering
15	0398	Freudenstadt	FSTA	FS	47.7	gering
16	0399	Villingen-Schwenningen	VISV	VI	66.6	mittel

7.2.2 Kampagnendefinition

Für jede GNSS-Kampagne verfügt die BS5 über die gleiche Ordnerstruktur. Die vorbereiteten Daten werden in den entsprechenden Ordner gespeichert. Neben den Ordnern für die einzelne Kampagne stehen die Dateien, die für die Auswertung aller Kampagnen benötigt werden, im GEN-Verzeichnis zur Verfügung. Vor dem Beginn einer GNSS-Auswertung sollten die Dateien (z.B. geodätische Datumsdefinitionen, verwendete Konstanten, Satelliten- und Empfängerinformationen) dieses Ordners durch Internet-Updates (z.B. unter <http://www.aiub.unibe.ch/>) auf den aktuellen Stand gebracht werden. In manchen Fällen müssen spezielle Receiver- bzw. Antennentypen manuell in entsprechende Dateien ergänzt werden. Für jede einzelne Antenne der *SAPOS*[®]-Stationen sind absolute azimuth- und elevationsabhängige Kalibrierwerte vorhanden und dies verlangt entsprechend die absoluten Kalibrierwerte der Satellitenantennen bei der Auswertung zu verwenden. Leider sind die Kalibrierwerte für die einzelnen Satellitenantennen aktuell nicht verfügbar. Stattdessen werden für die Satellitenantennen die absoluten Kalibrierwerte des gleichen Antennentyps herangezogen.

7.2.3 Datenaufbereitung

Mit der Datenaufbereitung beginnt die eigentliche GNSS-Auswertung. Dieser Schritt umfasst die Formattransformation aller Beobachtungsdaten i.d.R. vom RINEX-Format (ASCII-Format) in das Bernese-Format (Binär-Format), das Update der Polinformationen und die Erzeugung von Standard-Orbits. Durch Polupdate können die Erdorientierungsparameter, die für eine Woche in einer Datei zusammengefasst sind, für jeden Tag extrahiert werden und in ein Bernese-Format umgewandelt werden. Die Erzeugung von Standardorbits erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Schritt wird der sog. Tabularorbit generiert, um die präzisen Satellitenbahninformationen von einem terrestrischen in ein zälestrisches System zu transformieren, während die mathematische Bahnbestimmung im zweiten Schritt durch Lösen der Satellitenbewegungsgleichung unter Berücksichtigung von Sonnenstrahlungsdruck, Erdschwerefeld und Erdzeiten geschieht. Die wichtigsten Informationen in den Ausgabedateien sind die RMS (Root Mean Square)-Fehler der Bahnbestimmung für jeden Satelliten, welche unter Verwendung von IGS-Präzisionsbahndaten im Zentimeterbereich bleiben sollten [Pitz, 2004].

7.2.4 Präprozessierung

Dieser Schritt leistet einen fundamentalen Beitrag zu einer erfolgreichen Phasenprozessierung. Sie lässt sich in drei weitere Schritte unterteilen, nämlich Code-Prozessierung, Basislinienbildung und Phasen-Präprozessierung. Die Satelliten- und Empfängersynchronisation findet mit ausreichender Genauigkeit durch Code-Beobachtungen einer einzelnen Station statt, dadurch werden die Empfängeruhrfehler bestimmt und in den korrespondierenden Dateien der Phasenbeobachtungen gespeichert. Die Empfängeruhrfehler können sich von Station zu Station unterscheiden, aber an einer Station sollten sie im Lauf der kurzen Analysezeitspanne nahezu konstant bleiben. Anschließend werden alle Basislinien im SAPOS[®]-Netz von der ausgewählten Station TUEB aus durch Singledifferenzbildung definiert. Alle Singledifferenzen gehen in den nächsten Schritt Phasen-Präprozessierung ein, der die Detektion von Cycle Slips zum Ziel hat. Falls ein Cycle Slip gefunden ist und zuverlässig festgelegt werden kann, werden die entsprechenden Beobachtungen in den Singledifferenzen korrigiert, ansonsten werden die Beobachtungen bei der Auswertung als Ausreißer markiert. In diesem Fall wird ein neuer unbekannter Phasenmehrdeutigkeitsparameter (Ambiguity) eingeführt. Mit Beobachtungen ohne Cycle Slips wird eine Dreifachdifferenzlösung für jede Basislinie durchgeführt, wobei die Koordinaten der ersten Station einer Basislinie fixiert werden und die Koordinaten der zweiten Station geschätzt werden. Bei einer erfolgreichen Durchführung der Phasen-Präprozessierung liegt der RMS-Wert der Dreifachdifferenzlösung bei wenigen Zentimetern [Pitz, 2004].

7.2.5 Parameterschätzung

Nach geeigneter Behandlung von Cycle Slips erlaubt das Programm GPSEST der BS5 Schätzungen von diversen Parametern, z.B. die Stationskoordinaten, Zusatzparameter (SSNP) und Phasenmehrdeutigkeiten. Die mathematische Methode für die Parameterschätzung basiert auf der Ausgleichung nach dem Prinzip der kleinsten Quadrate mit geeigneten funktionalen und stochastischen Modellansätzen. Die aus Singledifferenzen gebildeten Doppeldifferenzen gehen in den Ausgleichungsprozess als Beobachtungsgrößen ein. Um die endgültigen Stationskoordinaten des SAPOS[®]-Netzes zu erhalten, sind im hier beschriebenen Fall insgesamt vier Durchläufe des Programms GPSEST notwendig.

Beim ersten Durchlauf werden nur die Residueninformationen gespeichert, die einer gründlichen Untersuchung der Datenqualität zugrunde liegen. Eine wichtige Information in der Ausgabedatei ist die a posteriori RMS. Unter Anwendung einer elevationsabhängigen Gewichtung der Beobachtungen sollte diese Größe bei wenigen Millimetern liegen. Ein großer RMS-Fehler ist auf schlechte Datenqualität zurückzuführen. Es besteht weiter die Möglichkeit, Residuen unter statistischen Aspekten zu analysieren bzw. graphisch darzustellen (z.B. durch Histogramm). Basierend auf den Untersuchungsergebnissen können Ausreißer markiert werden.

Nach der Qualitätskontrolle der Daten können die Phasenmehrdeutigkeiten unter Anwendung verschiedener Strategien unabhängig für jede Basislinie gelöst werden. Hier wird zunächst die SIGMA-Strategie auf Basis der Wide-Lane Linearkombination L5 benutzt. Auf Grund ihrer relativ großen Wellenlänge (ca. 86 cm) ist diese Kombination für die Lösung von Phasenmehrdeutigkeiten besonders geeignet. Dabei werden die Koordinaten der beiden Stationen einer Basislinie fixiert. Bei fast allen Basislinien liegt die prozentuale Angabe der gelösten Phasenmehrdeutigkeiten bei 95%. Im nächsten Schritt werden die Phasenmehrdeutigkeiten durch einen erneuten Durchlauf mittels der ionosphärenfreien Linearkombination L3 gelöst. Dabei werden die im letzten Schritt erhaltenen L5-Lösungen eingeführt. Im Vergleich zur L5-Lösung wird bei der L3-Lösung nur die Referenzstation festgehalten und die gelösten Phasenmehrdeutigkeiten liegen bei ca. 80%. Auf der Basis der L5- und L3-Lösung lassen sich die Phasenmehrdeutigkeiten auf den Trägerfrequenzen L1 und L2 ermitteln.

Beim abschließenden Durchlauf werden die Stationskoordinaten und die SSNP mittels L3 durch eine Netzlösung, woran alle Basislinien einer Session beteiligt sind, ermittelt, hierbei werden die mathematischen Korrelationen berücksichtigt. Bei diesem Durchlauf werden keine Phasenmehrdeutigkeiten gelöst und die L5-Lösung sowie die aus L5 und L3 berechnete L1- und L2-Lösung werden eingeführt. Die mittleren RMS-Werte der geschätzten Stationskoordinaten liegen bei allen Stationen unter 5 mm.

7.2.6 Speicherung der DDR

Um die Einflüsse der hier verwendeten Auswertestrategien und der eingesetzten Modellierungsmethode auf die konvertierten PZDR untersuchen zu können, müssen die DDR jeder Basislinie unter Anwendung verschiedener Auswertevarianten gespeichert werden. In dieser Arbeit werden insgesamt vier Varianten von Auswertestrategien hinsichtlich der drei folgenden Aspekte umgesetzt:

1. Elevationsabhängige Gewichtung für Beobachtungen ($\sin^2 E_I^i$ bzw. keine Gewichtung)
2. Auswahl der neutrosphärischen Prädiktionsmodelle (Saastamoinen bzw. Niell)
3. Strategien zur Phasenmehrdeutigkeitslösung (SIGMA- bzw. QIF-Strategie)

Bei den letzten zwei Varianten müssen die Phasenmehrdeutigkeiten zuerst mit entsprechenden Panel-einstellungen erneut gelöst werden. Erst danach können die DDR für jede Basislinie gespeichert werden. Die wichtigsten Merkmale aller vier Auswertevarianten sind in Tab. 7-5 zusammengestellt.

Tab. 7-5: Zusammenfassung aller vier Auswertevarianten

Aspekte	Auswertevarianten							
	Variante 1 ⁵		Variante 2		Variante 3		Variante 4	
Gewichtung	mit		ohne		mit		mit	
Modelle+MF	Niell	MF(Niell,w)	Niell	MF(Niell,w)	SAAS	1/cosZ	Niell	MF(Niell,w)
AMB-Lösung	SIGMA (L5 & L3)		SIGMA (L5 & L3)		SIGMA (L5 & L3)		QIF (L1 & L2)	
Neue AMB	Nein		Nein		Ja		Ja	

Bei den ersten zwei Varianten geht es hauptsächlich darum, ob die Elevationswinkel E_I^i der einzelnen Beobachtungen bei der GNSS-Auswertung durch die Gewichtsfunktion $\sin^2 E_I^i$ bzw. $\cos^2 Z_I^i$ berücksichtigt werden sollen. Die Auswertungen mit bzw. ohne Berücksichtigung der elevationsabhängigen Gewichtung werden in Tab. 7-5 unter dem Aspekt „Gewichtung“ durch „mit“ bzw. „ohne“ gekennzeichnet. In diesem Fall können die DDR nach dem Lösen von Phasenmehrdeutigkeiten mittels der SIGMA-Strategie auf L5 und L3 direkt gespeichert werden.

⁵Diese Auswertevariante wird als Standardauswertestrategie betrachtet.

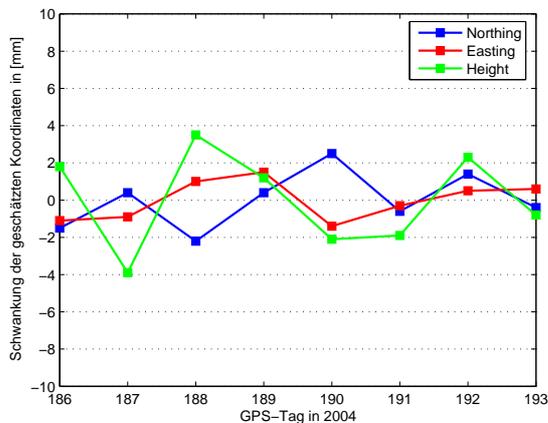
Hinsichtlich der Auswahl des neutrosphärischen Prädiktionsmodells werden bei der dritten Variante das Saastamoinen-Modell, kombiniert mit der MF $1/\cos Z$ sowohl für die Phasenmehrdeutigkeitslösung auf L5 und L3 als auch für die Speicherung der DDR eingesetzt. Bei der letzten Variante werden die Phasenmehrdeutigkeiten mittels der QIF (Quasi IonosphärenFrei)-Strategie auf L1 und L2 gelöst. Die Einzelheiten verschiedener Strategien zur Phasenmehrdeutigkeitslösung sind in [Hugentobler et al., 2005] zu finden.

8 Analyse der Ergebnisse

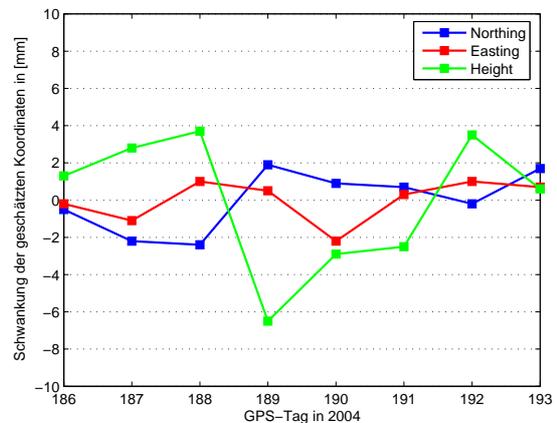
In diesem Kapitel werden sowohl die Ergebnisse der GNSS-Auswertung (z.B. Stationskoordinaten) als auch die Konvertierungsergebnisse von DDR in PZDR analysiert. Bei der statistischen Untersuchung von Residuen wird versucht, die Normalverteilung der DDR sowie die Annahme, dass diese Verteilung während der Konvertierung erhalten bleibt, u.a. durch graphische Darstellungen der Auswertungs- bzw. Konvertierungsergebnisse z.B. durch Histogramme zu bestätigen. Basierend auf den Standardabweichungen der PZDR können die Auswirkungen der einzelnen Einflussfaktoren, die auf die Empfangssituation einer Station (z.B. Mehrwegebelastung), die Basislinienlänge und die Auswertestrategien (z.B. Einführung elevationsabhängiger Gewichtung, Auswahl der neutrosphärischen Prädiktionsmodelle und Strategien zur Phasenmehrdeutigkeitslösung) zurückzuführen sind, quantifiziert werden. Um die Ergebnisse unter verschiedenen Wetterbedingungen zu interpretieren, werden unabhängige meteorologische Daten (z.B. Niederschlagsmenge) herangezogen.

8.1 Analyse der ermittelten Stationskoordinaten

Die Stationskoordinaten des *SAPPOS*[®]-Netzes werden nach der Phasenmehrdeutigkeitslösung mittels einer Netzlösung für die aufeinander folgenden acht Tage (DOY2004: 186-193) ermittelt. Durch ein in der BS5 verfügbares Programm zum Koordinatenvergleich (COMPAR) können bspw. die mittleren Standardabweichungen der ermittelten Koordinaten für alle acht Tage und deren Abweichungen zu den ungewichteten Mittelwerten in drei Richtungen (Northing, Easting und Height) in einem lokalen topozentrischen System für jede Station bestimmt werden. Die Schwankungen der ermittelten Stationskoordinaten zu den Mittelwerten sind für alle acht Tage in Abb. 8-1 graphisch dargestellt.



(a) Station: Freudenstadt (FSTA), 47.7 km



(b) Station: Tauberbischofsheim (TAUB), 131.0 km

Abb. 8-1: Einflüsse der Basislinienlänge auf die Stationskoordinaten

Beim ersten Blick ist in den beiden Grafiken zu erkennen, dass die Schwankungen in der Höhenkomponente größer sind als die in den Lagekomponenten. Dies hängt damit zusammen, dass die Beobachtungen, die zur Bestimmung der Stationshöhe den größten Beitrag leisten können, i.d.R. kleinere Elevationswinkel aufweisen, diese werden jedoch meistens durch Abschattungen, atmosphärische bzw. stationsspezifische Einflüsse (z.B. Mehrwegeeffekte) stärker beeinträchtigt als die Beobachtungen mit größeren Elevationswinkeln. Daher ist die Genauigkeit der bestimmten Höhenkomponente schlechter als die der Lagekomponenten. Vergleicht man die beiden Grafiken miteinander, weist die Station TAUB eine deutlich stärkere Schwankung in der Höhenkomponente auf als die Station FSTA. Da die beiden Stationen nur geringfügig von Mehrwegeeffekten beeinflusst sind, ist die Basislinienlänge für diesen Unterschied verantwortlich. Die basislinienabhängigen Unterschiede der Koordinatenschwankungen sind zum einen auf die Satellitenbahnfehler und zum anderen auf den Unterschied der atmosphärischen Einflüsse aufgrund langer Basislinien zurückzuführen, wobei die Auswirkung der Satellitenbahnfehler

unter Anwendung von präzisen IGS-Bahndaten mit einer Genauigkeit von 3-5 cm maximal 1-2 mm beträgt [Howind, 2005].

Neben der Basislinienlänge wirken sich auch die zufälligen Wetterbedingungen auf die Schwankung der Stationskoordinaten aus. Unter ungünstigen Wetterbedingungen (z.B. Regen, Nebel und Schnee) unterliegen die Signale aufgrund höheren Wassergehaltes in der Atmosphäre einer größeren Laufzeitverzögerung. Dadurch werden mehr Energieanteile der elektromagnetischen Wellen in der Atmosphäre absorbiert und dies hat eine Signalabschwächung zur Folge. Dieser Energieverlust der Signale wird auch als Ausbreitungsdämpfung bezeichnet. Die Signale, die durch extrem hohe Dämpfung beeinflusst sind, können sogar nicht in den Empfängern ankommen und dies führt wieder zu einer geringeren Anzahl von Beobachtungen. Die unter feuchten Wetterbedingungen (z.B. DOY2004: 190 in Abb. 8-2) ermittelten Stationskoordinaten unterscheiden sich qualitativ sehr stark von denen trockener Wetterbedingungen (z.B. DOY2004: 186).

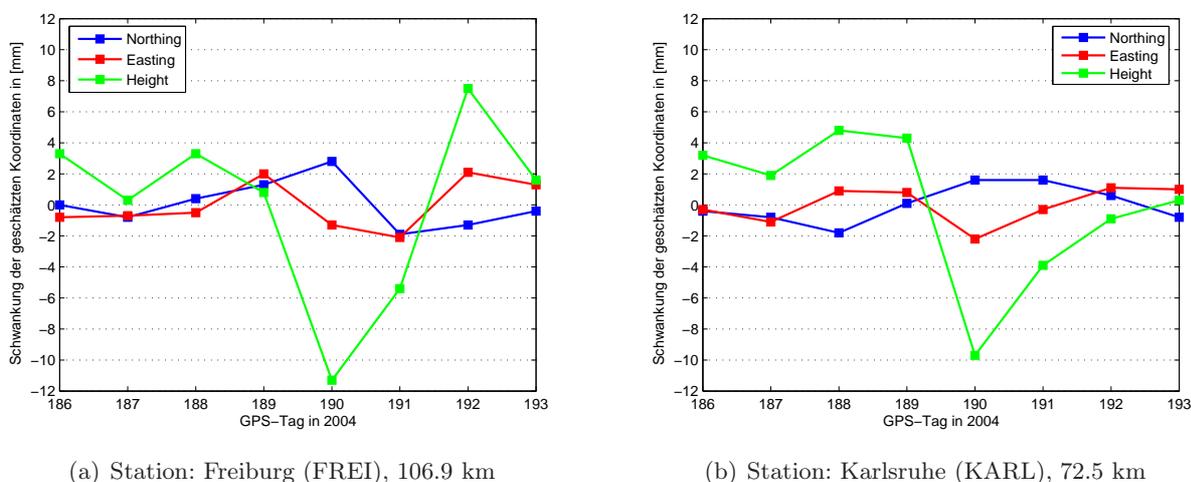


Abb. 8-2: Einflüsse der Wetterbedingungen auf die Stationskoordinaten

Um die großen Koordinatenschwankungen durch die Änderung der Wetterbedingungen interpretieren zu können, werden die Daten der Niederschlagsmenge am GPS-Tag 190 mit einer Datendichte von sechs Stunden herangezogen (Abb. 8-3).

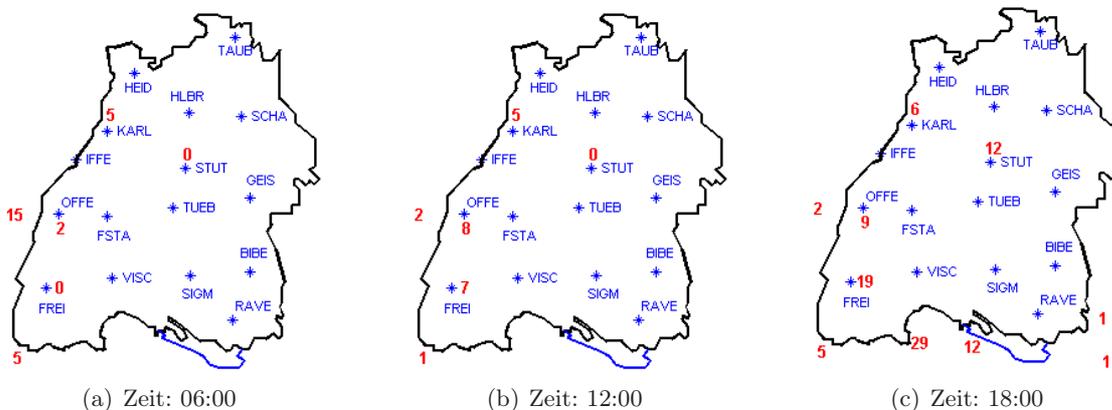


Abb. 8-3: Niederschlagsmenge in mm über BW, DOY2004: 190
 Quelle: <http://www.wetterzentrale.de/topkarten/tkdwdar2.htm>

An diesem Tag hat es über Teilen von BW geregnet und die maximale bzw. die größte Variation der Niederschlagsmenge ist an der Station FREI feststellbar, worauf die größte Schwankung der Höhenkomponente (ca. 12 mm) in Abb. 8-2(a) zurückzuführen ist. Im Vergleich zur Station FREI hat es an

diesem Tag über der Station KARL zwar weniger geregnet, aber dies führt trotzdem zu einer maximalen Schwankung der Höhenkomponente von ca. 10 mm, wobei der Unterschied der Basislinienlänge zwischen den beiden Stationen (ca. 35 km) zusätzlich eine untergeordnete Rolle spielen könnte. Im Gegensatz dazu herrschten am GPS-Tag 186 sehr ruhige und trockene Wetterbedingungen in BW. Die ermittelten Stationshöhen bewegen sich auch innerhalb eines kleinen Bereichs von ca. 4 mm.

8.2 Analyse der Residueninformationen

Nachdem die Stationskoordinaten bestimmt sind, werden in einem anschließenden Durchlauf die DDR gespeichert. Unter Anwendung der in Unterkapitel 6.2 implementierten Schnittstelle in BS5 werden die DDR epochenweise sortiert. Anschließend können die DDR nach dem in Unterkapitel 6.3 vorgestellten Verfahren unter der „zero mean“-Annahme in PZDR konvertiert werden. Da diese Annahme auf einer Normalverteilung der DDR basiert, ist es notwendig, die Verteilungseigenschaft der DDR zu untersuchen. Um feststellen zu können, ob die angenommene Normalverteilung während des Konvertierungsprozesses erhalten bleibt, sollen auch die PSDR bzw. PZDR auf die Verteilungseigenschaft geprüft werden.

8.2.1 Darstellung und Untersuchung von DDR

DDR zu einer bestimmten Epoche sind abhängig von zwei Stationen und zwei Satelliten. Auf beiden Stationen der Basislinie werden Daten beider Satelliten empfangen. Je nach Abstand der Stationen unterscheiden sich damit die Elevationen, unter denen Daten desselben Satelliten empfangen werden. Abb. 8-4 stellt die DDR einer 48 km und einer 131 km langen Basislinie und die entsprechenden Elevationen der beteiligten Satelliten über die Zeit dar. Die beiden Grafiken verdeutlichen einerseits den Zusammenhang zwischen der Varianz der DDR und der Satellitenelevation, andererseits werden die bei langen Basislinien auftretenden Unterschiede zwischen den Elevationen auf den beiden Stationen visualisiert. Um die Mehrwegeinflüsse auf die DDR beim Vergleich möglichst gering zu halten, werden hier zwei Stationen FSTA und TAUB ausgewählt, die nur geringfügig von Mehrwegeeffekten belastet sind.

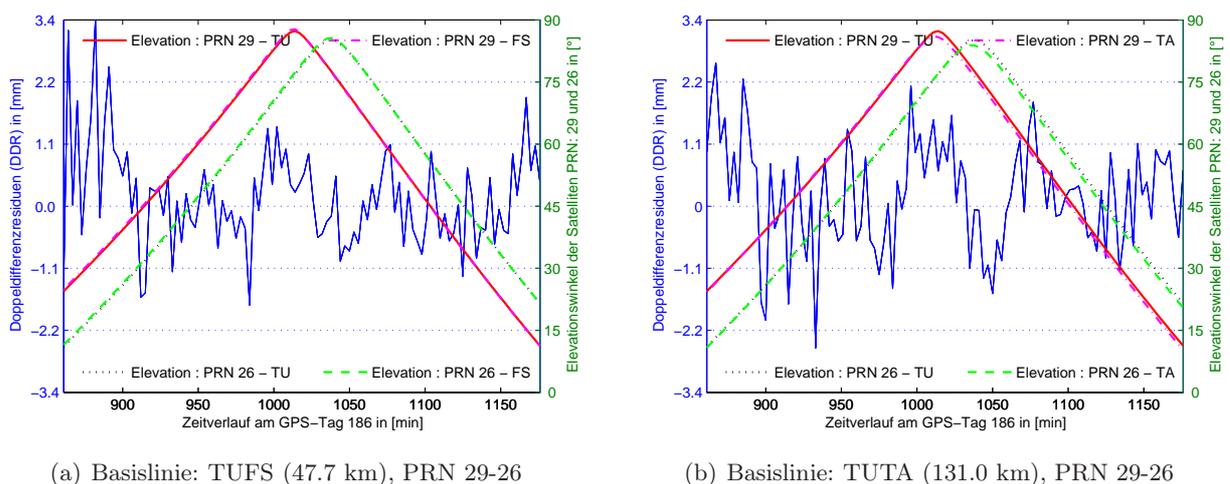


Abb. 8-4: Darstellung der DDR mit Satellitenelevationen, DOY2004: 186

In den oberen beiden Grafiken ist festzustellen, dass die Varianz der DDR mit zunehmender Elevation abnimmt. Außerdem weist die lange Basislinie in Abb. 8-4(b) im Durchschnitt eine größere Varianz der DDR auf. Bei der kurzen Basislinie in Abb. 8-4(a) liegen die Elevationskurven eines Satelliten für die beiden Stationen so dicht beieinander, dass eine graphische Trennung der beiden Kurven nicht möglich ist, wohingegen bei der langen Basislinie in Abb. 8-4(b) die Elevationen eines Satelliten optisch zu unterscheiden sind. Da die Konvertierung von DDR in PSDR auf Basislinien basiert, wird die

statistische Untersuchung von DDR ebenfalls basislinienweise durchgeführt. Um eine genügende Anzahl von Stichproben zu erreichen, werden alle DDR einer Basislinie an einem GPS-Tag für die Untersuchung verwendet. Die DDR werden auf Normalverteilung geprüft. Die Dichtefunktion y einer Normalverteilung kann mittels Erwartungswert μ und Standardabweichung σ durch

$$y = f(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (8-1)$$

dargestellt werden [Höpcke, 1980]. Zunächst werden alle DDR in einem Histogramm dargestellt, das die absolute Häufigkeit der DDR zeigt (s. Abb. 8-5(a)). Anschließend wird die rote Kurve, die eine Normalverteilung mit dem Erwartungswert μ_{DDR} und der Standardabweichung $\sigma = 1$ darstellt, an das Histogramm angepasst. Die Anpassung der Dichtefunktion y an das Histogramm erfolgt durch

$$y_{his} = \frac{nd}{s} y \quad (8-2)$$

n : Anzahl der DDR

d : Klassenbreite (hier 0.5 mm)

s : Standardabweichung der DDR ($s = \mu_{DDR}$).

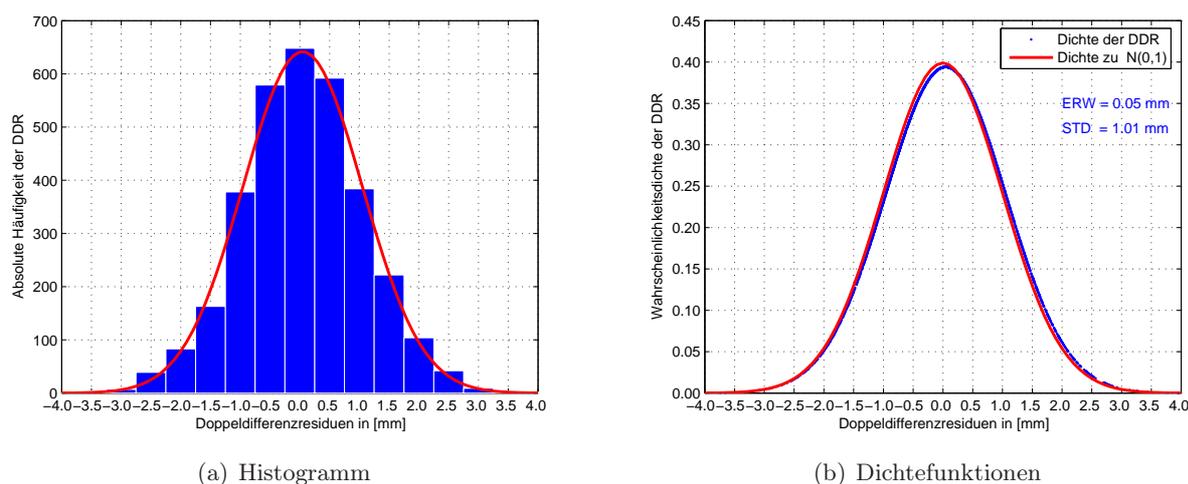


Abb. 8-5: Verteilung der DDR für die Basislinie TUSC, DOY2004: 186

Wird die Form des Histogramms mit der angepassten Kurve verglichen, ist deutlich zu erkennen, dass die Verteilung der DDR einer Basislinie einer Normalverteilung entspricht. Außerdem ist es interessant zu sehen, inwieweit sich die in den DDR steckende Normalverteilung

$$y_{DDR} = f(DDR|\mu_{DDR}, \sigma_{DDR}) = \frac{1}{\sigma_{DDR}\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x - \mu_{DDR})^2}{2\sigma_{DDR}^2}} \quad (8-3)$$

von einer normierten Normalverteilung

$$y = f(x|0, 1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (8-4)$$

unterscheidet (s. Abb. 8-5(b)).

Theoretisch sollten die Erwartungswerte der DDR aller Basislinien gleich Null sein, weil sie die Mittelwerte von Verbesserungen nach einem Ausgleichsprozess darstellen. Aber aufgrund numerischer

Effekte während der Ausgleichsberechnung können sich die Erwartungswerte der DDR geringfügig von Null unterscheiden. Die Abweichungen der Erwartungswerte von Null rufen eine Verschiebung der Glockenkurven der Normalverteilung hervor, während die Unterschiede der Standardabweichungen zu Eins eine Formänderung der Glockenkurven verursachen.

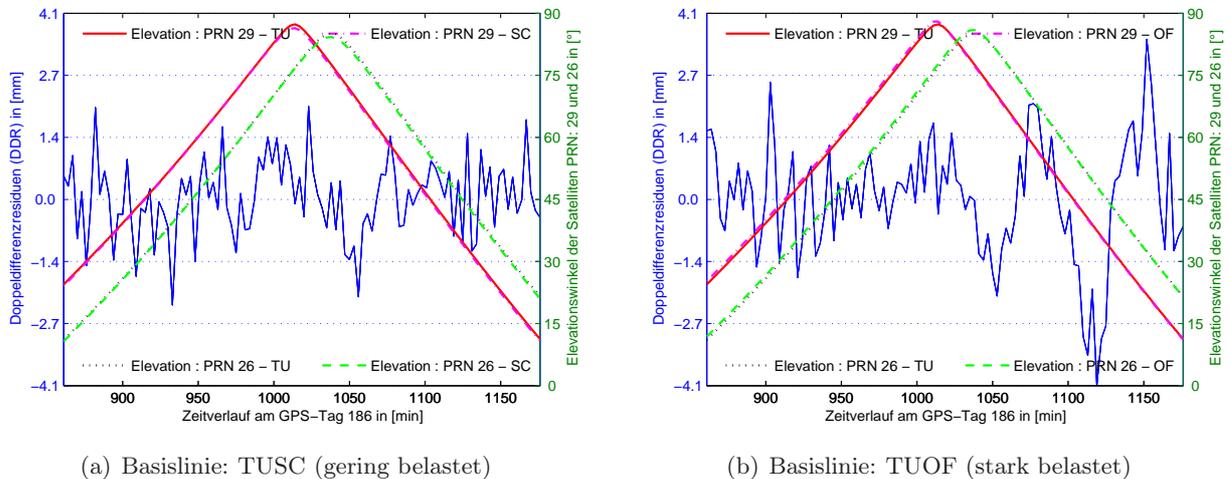


Abb. 8-6: DDR-Vergleich hinsichtlich Mehrwegebelastung, DOY2004:186, PRN 29-26

Für die Variation der Standardabweichungen von DDR sind, wie oben angeführt, unterschiedliche Faktoren verantwortlich, z.B. Länge der Basislinie, Mehrwegebelastung und Wetterbedingungen. Die Grafiken 8-6(a) und 8-6(b) sollen die Auswirkungen der Mehrwegeeffekte veranschaulichen. Dies ist möglich, da die Basislinien TUSC und TUOF fast gleich lang sind und die beiden Stationen SCHA und OFFE unterschiedlich von Mehrwegeeffekten belastet sind. In Abb. 8-6(b) ist eine zeitliche Abhängigkeit der Mehrwegeeffekte zu erkennen, wobei die Mehrwegeeffekte in den letzten 150 Epochen deutlich stärker sind. Durch Vergleich von Abb. 8-7(a) und Abb. 8-7(b) ist die Einwirkung der Wetterbedingungen zu vermuten, was durch einen Abgleich mit o.g. Wetterdaten bestätigt wird. Die hier auf die Standardabweichungen der DDR einwirkenden Faktoren beeinflussen ebenfalls weiter die Standardabweichungen der konvertierten PSDR bzw. PZDR. In Tab. 8-1 werden die Standardabweichungen der DDR aller Basislinien für die beiden GPS-Tage 186 und 190 zusammengefasst.

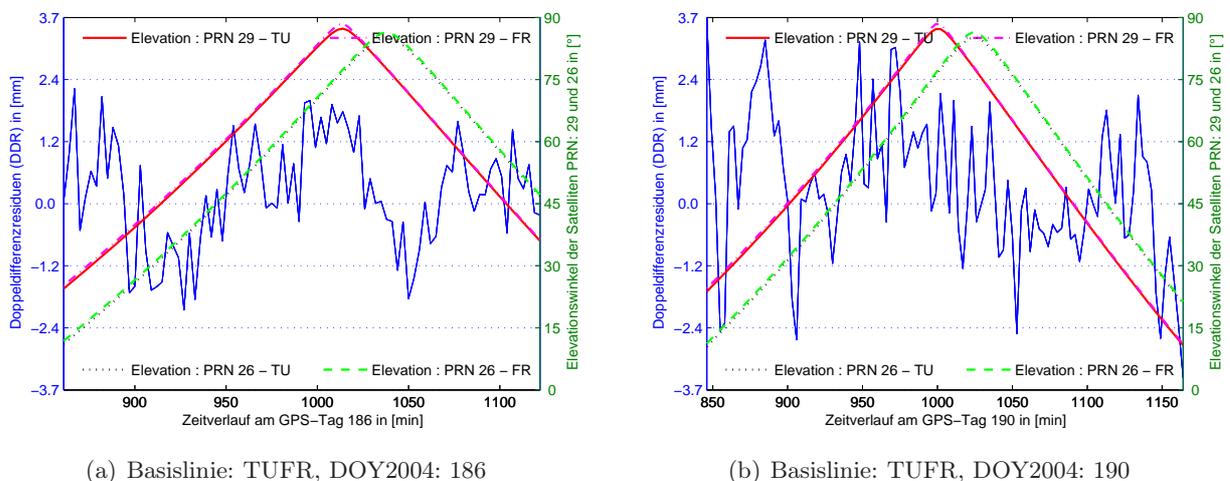


Abb. 8-7: DDR-Vergleich hinsichtlich Wetterbedingungen, PRN 29-26

Tab. 8-1: Standardabweichungen der DDR aller Basislinien, DOY2004: 186, 190

GPS-Tag	Standardabweichungen der DDR [mm]														
	stark			mittel						gering					
DOY2004: 186/Station	ST	OF	HE	GE	VI	KA	IF	FR	FS	SI	HL	BI	SC	RA	TA
Standardabweichung	1.3	1.4	1.3	1.2	1.2	1.2	1.1	1.2	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0	1.1	1.1
Mittelwert	1.4			1.2						1.1					
DOY2004: 190/Station	ST	OF	HE	GE	VI	KA	IF	FR	FS	SI	HL	BI	SC	RA	TA
Standardabweichung	1.6	1.7	1.6	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.3	1.6	1.4	1.4	1.4	1.5
Mittelwert	1.6			1.5						1.4					

8.2.2 Darstellung und Untersuchung von PSDR

Bei der Auswertung werden die sog. Empfängereinfachdifferenzen gebildet, die sich auf einen Satelliten und zwei Empfänger zu einer bestimmten Empfangsepoche beziehen. Nach einer epochenweisen und auf mehreren Satelliten basierenden Konvertierung der DDR in PSDR unter der „zero mean“-Annahme können die PSDR eines Satelliten mit den entsprechenden Elevationen bspw. in einer Grafik dargestellt werden. Basierend auf den Beispielgrafiken der DDR in Unterkapitel 8.2.1 zeigt Abb. 8-8 die daraus abgeleiteten PSDR.

Der Zusammenhang zwischen der Varianz der PSDR und der Satellitenelevation ist hier in den beiden Grafiken (s. Abb. 8-8) ebenso deutlich zu erkennen. Allerdings ist die Auswirkung der Basislinienlänge auf die Variation der PSDR nicht so dominant ersichtlich wie bei den DDR. Darüber hinaus lässt sich für lange Basislinien feststellen, dass die PSDR mit einer zyklischen Schwankung (z.B. durch Mehrwegeeffekte) behaftet sind (s. Abb. 8-8(b)). Vergleicht man die Variationsbreite der PSDR mit denen der DDR, liegt eine Verkleinerung dieser Variationsbreite vor.

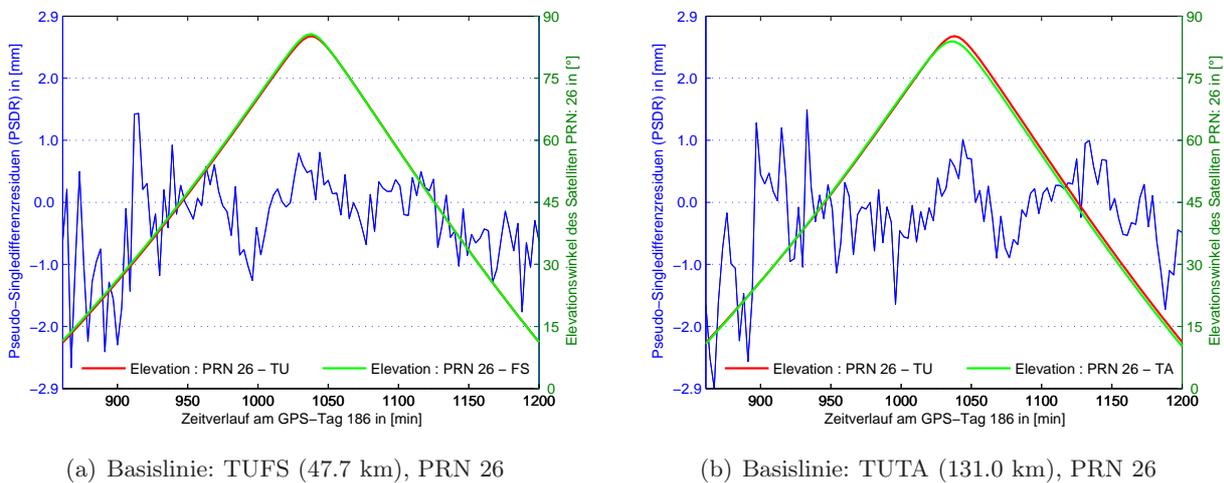


Abb. 8-8: Darstellung der PSDR mit Satellitenelevationen, DOY2004: 186

Auch für die PSDR wird eine Untersuchung bzgl. der Verteilungseigenschaft durchgeführt, weil die im Rahmen der Konvertierung von DDR in PSDR angewandte „zero mean“-Annahme in Gleichung (6-7) auf einer Normalverteilung der PSDR basiert. Sind PSDR normal verteilt, bleibt die Verteilungseigenschaft während dieses Konvertierungsprozesses erhalten. Analog zu den DDR werden alle PSDR einer Basislinie für die statistischen Untersuchungen verwendet. Als Beispiel wird wiederum die Basislinie TUSC am GPS-Tag 186 genommen (Abb. 8-9).

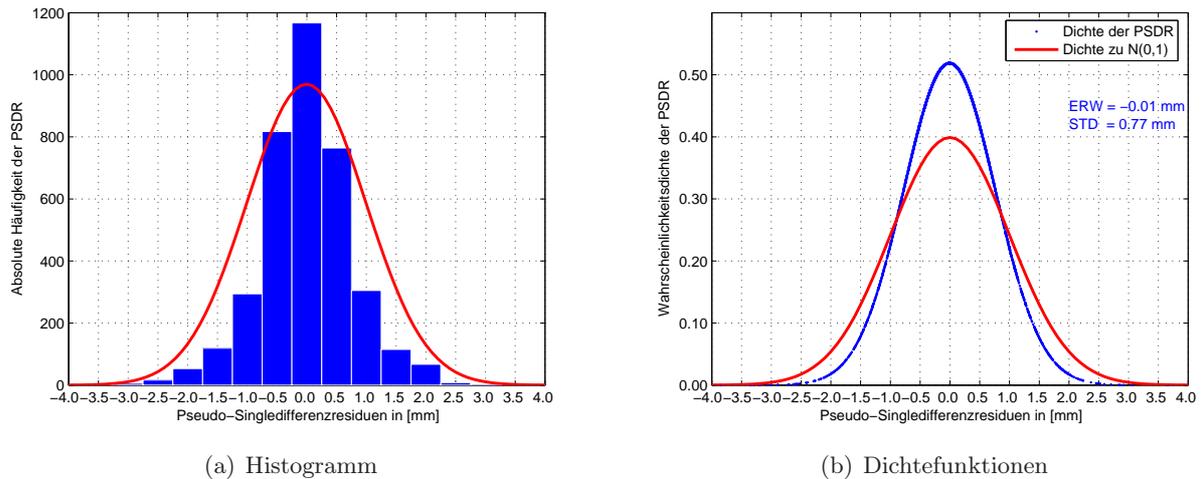


Abb. 8-9: Verteilung der PSDR für die Basislinie TUSC, DOY2004: 186

Beim ersten Blick auf Abb. 8-9(a) lässt sich die Annahme einer Normalverteilung von PSDR bestätigen. Im Vergleich zu den oben beschriebenen DDR ist nahezu eine Verdopplung der im Histogramm dargestellten absoluten Häufigkeit der PSDR in der Umgebung von Null feststellbar. Außerdem kann durch den Vergleich der Breite der Zentralbereiche in den beiden Histogrammen 8-5(a) und 8-9(a) eine Verkleinerung der Variationsbreite der DDR gegenüber den PSDR nachgewiesen werden. Auf Grund dieser Verkleinerung nimmt die Standardabweichung der PSDR entsprechend ab und diese Abnahme liegt für alle Basislinien in der gleichen Größenordnung (vgl. Tab. 8-1 und Tab. 8-2). Es handelt sich um einen systematischen Effekt, der sich während des Konvertierungsprozesses von DDR in PSDR zeigt.

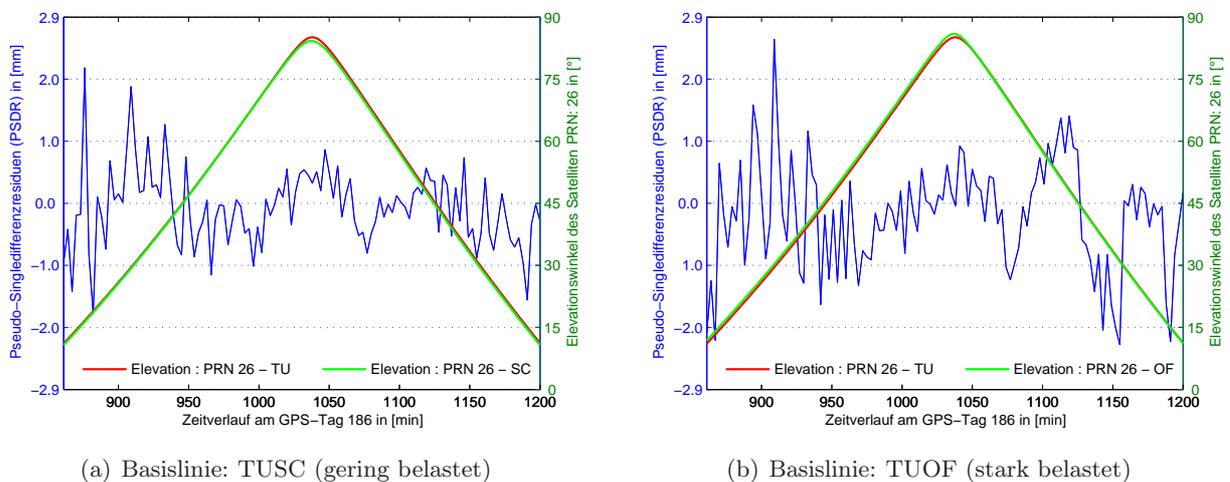


Abb. 8-10: PSDR-Vergleich hinsichtlich Mehrwegebelastung, DOY2004: 186, PRN 26

Die Einflüsse auf die Variation der DDR, die im Unterkapitel 8.2.1 erwähnt sind, wirken sich weiterhin auf die PSDR aus. Zur Veranschaulichung dieser Einflüsse werden der Satellit PRN 26 und die gleichen Basislinien, die beim Vergleich der DDR verwendet wurden, herangezogen. Abb. 8-10 verdeutlicht die Einflüsse der Mehrwegebelastung, wobei diese Einflüsse nicht nur vom Azimut und der Elevation des ankommenden Signals sondern auch von örtlichen Gegebenheiten abhängig sind. Ändert sich die Satellitenkonstellation mit fortschreitender Zeit, variiert die Richtung des ankommenden Signals. Unter verschiedenen örtlichen Bedingungen werden die Signale auf unterschiedliche Art und Weise reflektiert. Die Auswirkung des Wassergehaltes in der Atmosphäre auf die Schwankung der PSDR wird in Abb. 8-11 veranschaulicht. Beim Vergleich ist zu beachten, dass die Beobachtungsdaten an der Station FREI in den letzten vier Stunden an diesem Tag nicht vorhanden sind. In Tab. 8-2 werden die

Standardabweichungen der PSDR aller Basislinien für die beiden Tage 186 und 190 zusammengefasst.

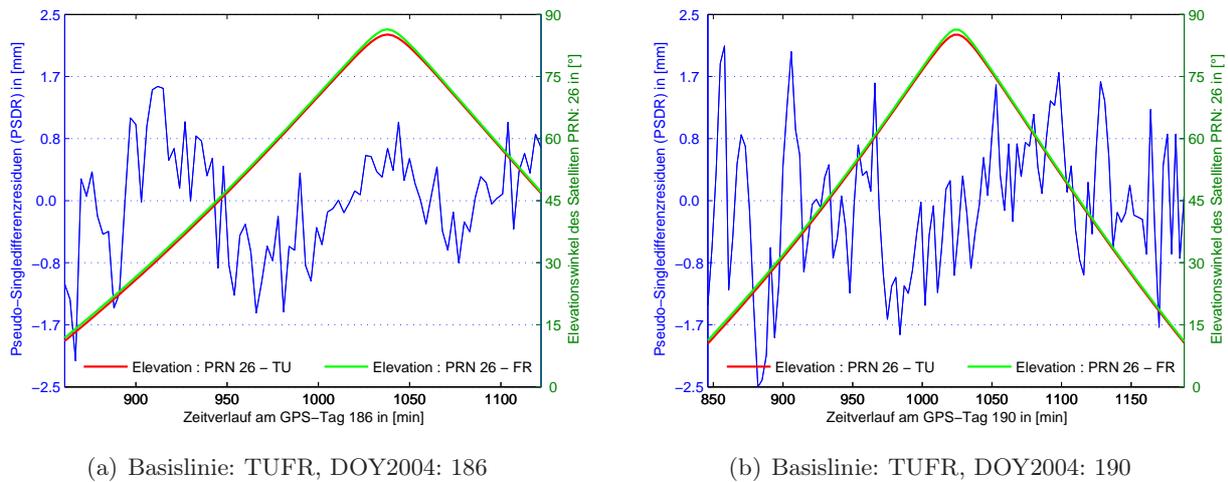


Abb. 8-11: PSDR-Vergleich hinsichtlich Wetterbedingungen, PRN 26

Tab. 8-2: Standardabweichungen der PSDR aller Basislinien, DOY2004: 186, 190

GPS-Tag	Standardabweichungen der PSDR [mm]														
	stark			mittel						gering					
DOY2004: 186/Station	ST	OF	HE	GE	VI	KA	IF	FR	FS	SI	HL	BI	SC	RA	TA
Standardabweichung	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9	0.8	0.8	0.9	0.7	0.8	0.8	0.8
Mittelwert	1.0			0.9						0.8					
DOY2004: 190/Station	ST	OF	HE	GE	VI	KA	IF	FR	FS	SI	HL	BI	SC	RA	TA
Standardabweichung	1.1	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.1	1.0	1.2	1.0	1.1	1.0	1.1
Mittelwert	1.2			1.1						1.1					

8.2.3 Darstellung und Untersuchung von PZDR

An PZDR sind jeweils ein Satellit und eine Station beteiligt. Im Vergleich zur Konvertierung von DDR in PSDR, die Informationen von mehreren Satelliten basiert, erfolgt die Konvertierung von PSDR in PZDR basierend auf mehreren Stationen. Auf gleiche Weise werden hier die repräsentativen Stationen FSTA und TAUB zur Darstellung der konvertierten PZDR ausgewählt, die von Mehrwegeeffekten wenig belastet sind und unterschiedliche Basislinienlängen aufweisen, um die Einflüsse der Basislinienlängen auf die Variation der PZDR zu dokumentieren (Abb. 8-12).

Beim Vergleich der beiden Grafiken in Abb. 8-12 ist der Einfluss der Basislinienlänge nicht zu erkennen. Die Variation der PZDR von langen Basislinien ist teilweise sogar kleiner als die von kurzen. Dies weist darauf hin, dass die Basislinienlänge in der Variation bzw. der Standardabweichung der auf oben beschriebenen Weg erhaltenen PZDR eine untergeordnete Rolle spielt.

Betrachtet man Abb. 8-12 und Abb. 8-8 vergleichend, so ist eine weitere Abnahme der Variationsbreite von PSDR in PZDR feststellbar. Diese systematische Abnahme der Standardabweichungen von PSDR in PZDR wirkt auf langen Basislinien stärker als auf kurzen und führt deshalb zu einer kleineren Variation der PZDR langer Basislinien. Die eigentlich existierenden Einflüsse der Basislinienlänge auf die Variation der PZDR sind im Vergleich zu diesem Effekt viel kleiner und werden dadurch nicht detektierbar. Allerdings bleibt der Zusammenhang zwischen der Varianz der Residuen und der Satellitenelevation erhalten.

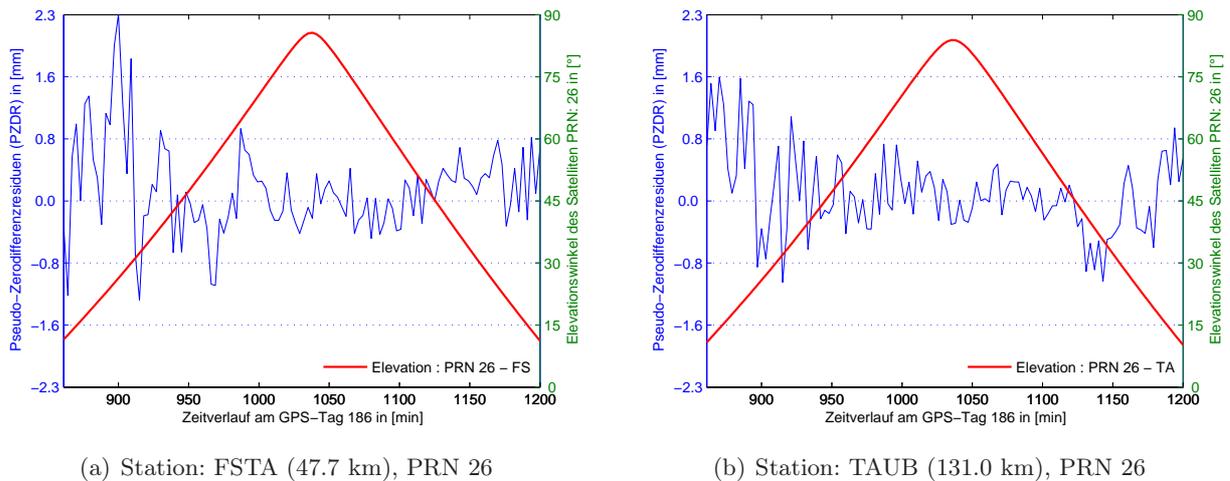


Abb. 8-12: Darstellung der PZDR mit Satellitenelevationen, DOY2004: 186

Die Durchführung der stationsbasierten Konvertierung von PSDR in PZDR unter der „zero mean“-Annahme in Gleichung (6-13) beruht auf einer Normalverteilung der PZDR. Neben den satellitenbezogenen statistischen Untersuchungen werden hier auch stationsbezogene Untersuchungen durchgeführt, bspw. können die PZDR eines Satelliten zu allen Stationen analysiert und unter Berücksichtigung von Elevation bzw. Azimut im Vergleich zu einer Normalverteilung graphisch dargestellt werden (s. Abb. 8-13).

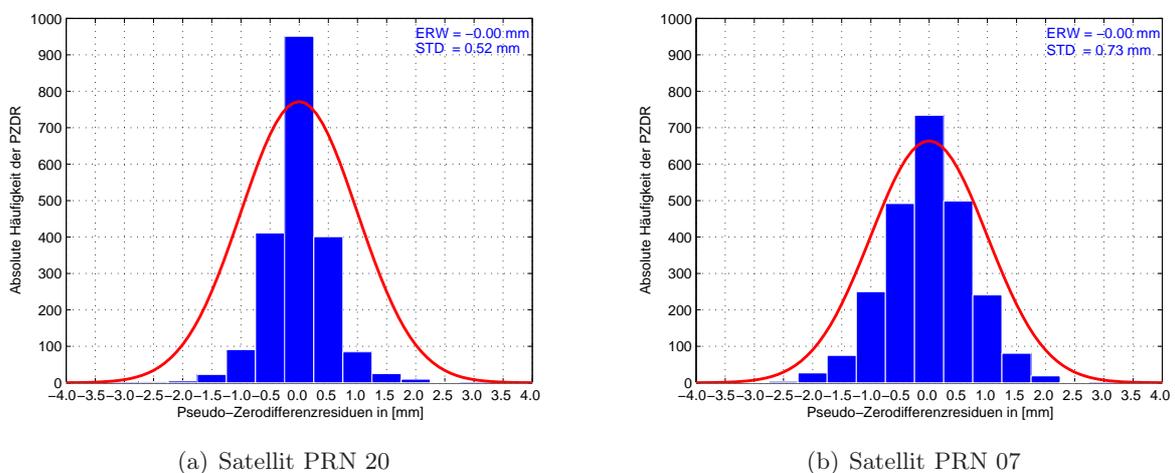


Abb. 8-13: Histogramme von PZDR (satellitenbezogen), DOY2004: 186

Durch eine Beurteilung der somit erhaltenen Veranschaulichung kann festgestellt werden, dass die in Abb. 8-13 dargestellte Verteilung der PZDR zwischen einem Satelliten und allen Stationen einer Normalverteilung entspricht. Im Vergleich zum Satelliten PRN 07 weisen die PZDR des Satelliten PRN 20 eine kleinere Standardabweichung auf und dies führt zu einer schmaleren Form des zugehörigen Histogramms. Der Unterschied der Standardabweichung ist auf die Satellitenkonstellation zurückzuführen. Signale mit größeren Elevationen werden von der Atmosphäre weniger beeinflusst als die mit kleineren Elevationen.

Abb. 8-14 stellt die Verteilung der Elevationen der beiden analysierten Satelliten dar. Die Elevationen des Satelliten PRN 20 sind in einem großen Wertebereich (10° bis 85°) gleichmäßig verteilt, wohingegen sich die Elevationen des Satelliten PRN 07 auf einen kleinen und niedrigen Wertebereich (kleiner als 50°) konzentrieren (vgl. Abb. 8-14(a) und Abb. 8-14(b)).

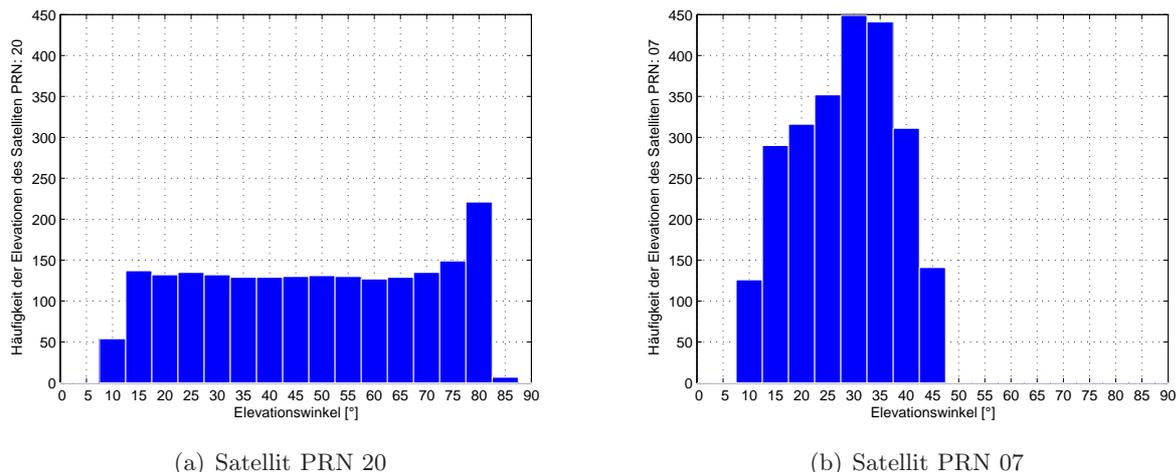


Abb. 8-14: Histogramme von Satellitenelevationen (satellitenbezogen), DOY2004: 186

Die Normalverteilungseigenschaft der PZDR kann auch unter zusätzlicher Berücksichtigung des Azimuts veranschaulicht werden. Allerdings ist es notwendig, im Vorfeld die PZDR entlang der Sichtlinie zwischen einem Satelliten und einer Station unter Anwendung einer Abbildungsfunktion (z.B. $MF_{Niell,w}$) in Zenitrichtung umzurechnen. Darüber hinaus müssen die stationsbezogenen Azimute satellitenbezogen angepasst werden. Um die Übersichtlichkeit der erzeugten Grafiken zu erhalten, werden alle PZDR innerhalb von 40 Epochen zur Darstellung verwendet.

Abb. 8-15(a) zeigt die Situation eines Satelliten, der am gesamten Gebiet von BW mit niedrigen Elevationen vorbeifliegt. Die entsprechenden PZDR existieren in diesem Fall nicht in allen azimuthalen Richtungen. Deshalb zeigt sich die azimuthale Verteilung der PZDR nahezu linienhaft. Im Gegensatz dazu stellt die Grafik 8-15(b) die Situation eines sich innerhalb der Darstellungsepochen im Zenit bewegenden Satelliten dar, woraus PZDR in allen azimuthalen Richtungen resultieren.

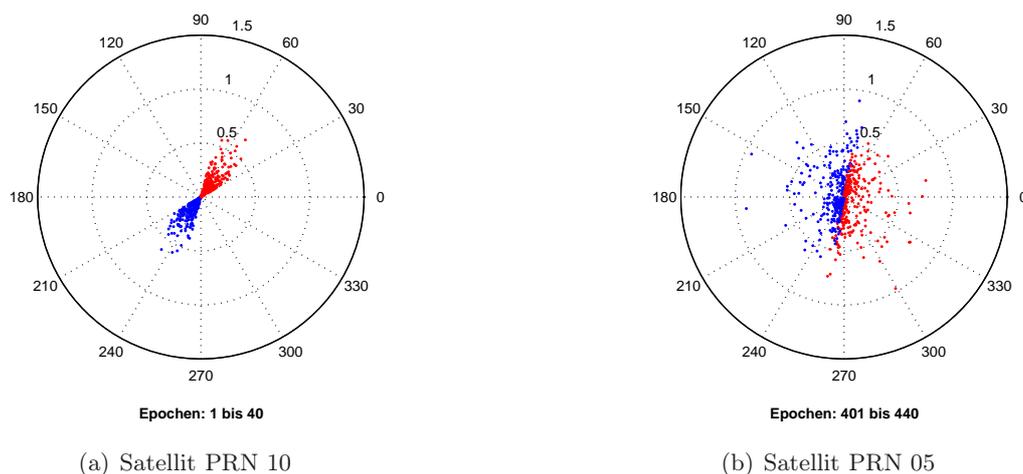


Abb. 8-15: Azimutale Darstellung der Verteilung von PZDR, DOY2004: 186

Trotz einer geringeren Anzahl von Stichproben (40 Epochen) sind die Merkmale einer Normalverteilung in Abb. 8-15 deutlich zu erkennen: Die positiven (blauen) bzw. negativen (roten) Werte der PZDR sind symmetrisch verteilt und die meisten Werte sind im Zentralbereich der Grafiken zu finden. Mit zunehmendem Abstand von den Kreismittelpunkten nimmt die Anzahl der PZDR rasch ab und es liegt eine stärkere Streuung vor.

Sind die PZDR satellitenbezogen normalverteilt, sollten sie theoretisch stationsbezogen ebenfalls normalverteilt sein. Ferner ist es interessant zu verifizieren, ob sich die Verteilung der Satellitenelevationen von Station zu Station stark unterscheidet und ob sie in diesem Fall die Standardabweichung der PZDR auch dominierend beeinflussen kann. Abb. 8-16 veranschaulicht die stationsbezogene Verteilung der PZDR aller Satelliten und der Stationen STUT bzw. TAUB; Abb. 8-17 stellt die Verteilung der zugehörigen Elevationen aller Satelliten dar.

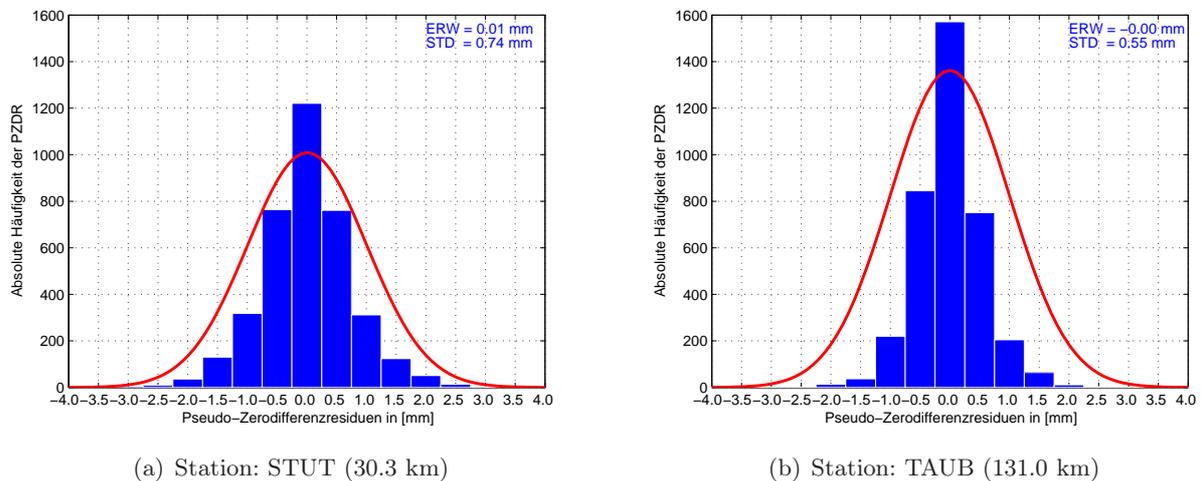


Abb. 8-16: Histogramme von PZDR (stationsbezogen), DOY2004: 186

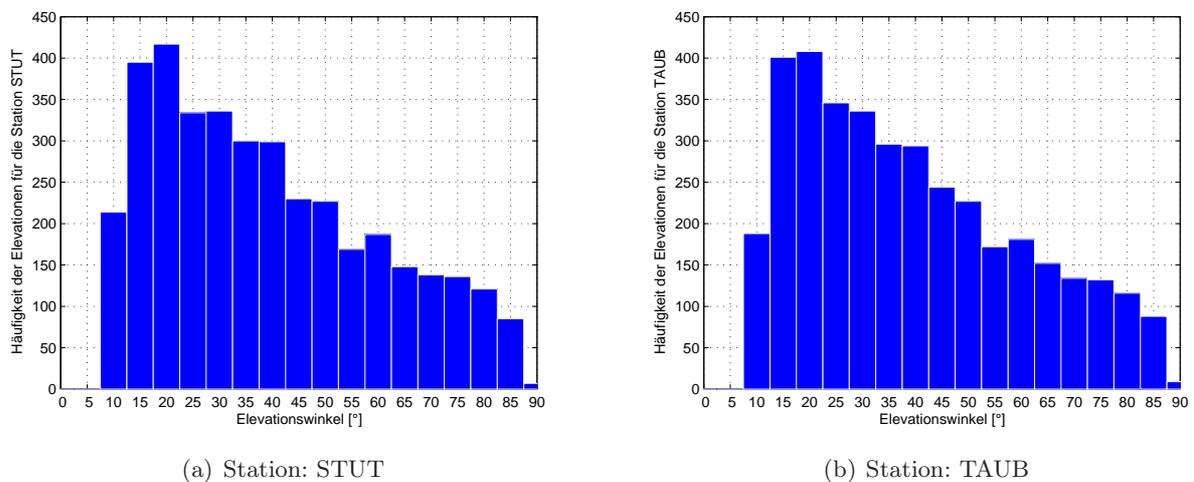


Abb. 8-17: Histogramme von Satellitenelevationen (stationsbezogen), DOY2004: 186

Abb. 8-16 zeigt, dass die stationsbezogene Verteilung der PZDR auch einer Normalverteilung entspricht. Durch einen einfachen Formvergleich dieser beiden Histogramme ist eine größere Standardabweichung der PZDR an der Station STUT feststellbar. Im Gegensatz zur satellitenbezogenen Darstellung in Abb. 8-14 ist der Unterschied bezüglich der Verteilung der zugehörigen Satellitenelevationen bei der stationsbezogenen Darstellung in Abb. 8-17 kaum feststellbar. Daher ist der Unterschied der Standardabweichungen von PZDR nicht auf die Verteilung der Satellitenelevationen sondern hauptsächlich auf die stationsspezifischen Einflussfaktoren, z.B. Basislinienlänge und Mehrwegeeffekte, zurückzuführen. Trotz der längeren Basislinie weisen die PZDR an der Station TAUB auf Grund geringerer Mehrwegebelastung eine kleinere Standardabweichung auf. Dies weist drauf hin, dass die Mehrwegeeffekte bei der Variation der PZDR eine größere Rolle spielen könnten als die Länge der Basislinien. Eine genaue Untersuchung der Größenordnung verschiedener Einflussfaktoren in den Standardabweichungen der PZDR wird in Unterkapitel 8.3 durchgeführt.

Abb. 8-18 stellt die Einflüsse der Mehrwegeffekte auf die Variation der PZDR deutlich dar, wobei eine sinusförmige Systematik an der Station OFFE zu erkennen ist. Durch Vergleich zwischen den beiden Grafiken in Abb. 8-19 kann festgestellt werden, wie stark sich die Wetterbedingungen auf die Variation der PZDR auswirken können.

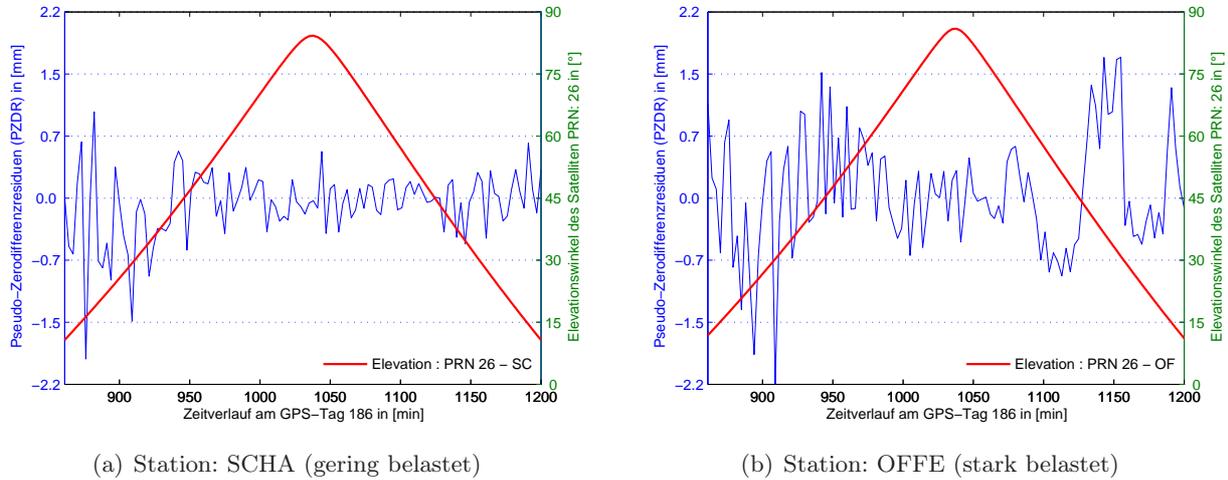


Abb. 8-18: PZDR-Vergleich hinsichtlich Mehrwegebelastung, DOY2004: 186, PRN 26

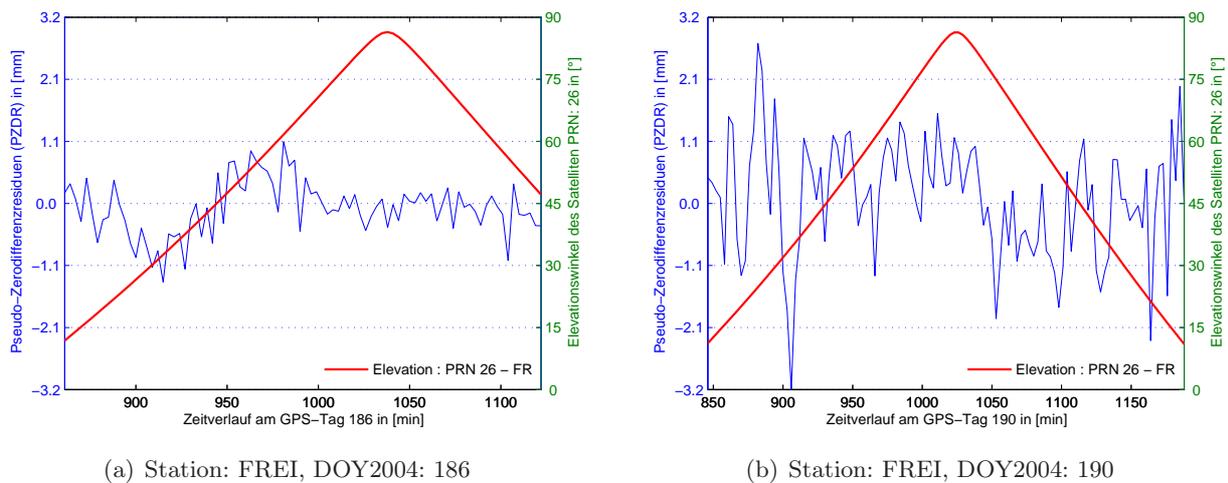


Abb. 8-19: PZDR-Vergleich hinsichtlich Wetterbedingungen, PRN 26

Vergleicht man die Grafiken 8-6, 8-10 und 8-18 miteinander, ist festzustellen, dass die graphisch veranschaulichten Einflüsse der Mehrwegeffekte bzw. der Wetterbedingungen auf die Variation der PZDR im Laufe der Konvertierung immer deutlicher zu erkennen sind. Dies hängt damit zusammen, dass die Komplexität der Residueninformationen durch den Konvertierungsprozess von DDR in PZDR Schritt für Schritt reduziert wird; dadurch verbessert sich die Interpretierbarkeit bspw. der jeweiligen graphischen Darstellungen der Residuen. Basierend auf der geringeren Komplexität der Residueninformationen werden die konvertierten PZDR statt der originären DDR aus der GNSS-Auswertung für die spätere Untersuchung der Größenordnung verschiedener Einflussfaktoren verwendet.

In Tab. 8-3 werden die stationsbezogenen Standardabweichungen der PZDR für die beiden GPS-Tage 186 und 190 zusammengefasst. Eine systematische Abnahme der Standardabweichungen von PSDR in PZDR ist auch hier deutlich ersichtlich (vgl. Tab. 8-2 und Tab. 8-3)

Tab. 8-3: Standardabweichungen der PZDR aller Stationen, DOY2004: 186, 190

GPS-Tag	Standardabweichungen der PZDR [mm]														
	stark			mittel						gering					
DOY2004: 186/Station	ST	OF	HE	GE	VI	KA	IF	FR	FS	SI	HL	BI	SC	RA	TA
Standardabweichung	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.5	0.6	0.6	0.5	0.5	0.6	0.6
Mittelwert	0.7			0.6						0.6					
DOY2004: 190/Station	ST	OF	HE	GE	VI	KA	IF	FR	FS	SI	HL	BI	SC	RA	TA
Standardabweichung	0.9	1.0	1.0	0.8	0.8	0.9	0.8	1.3	0.8	0.7	0.9	0.7	0.8	0.8	0.9
Mittelwert	0.9			0.9						0.8					

Am Schluss der Analyse der Residueninformationen bleibt lediglich die Frage offen, welcher systematische Effekt die Abnahme der Standardabweichungen von DDR in PSDR bzw. von PSDR in PZDR hervorruft. Diese Frage lässt sich unter Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes (FFG) auf die Bildung der DDR bzw. der PSDR beantworten.

Unter der Annahme, dass alle an DDR beteiligten Beobachtungen voneinander unabhängig sind, kann die Standardabweichung des DDR $\sigma_{ddr_{AB}^{12}}$ basierend auf Gleichung (6-1) durch FFG in Abhängigkeit von den Standardabweichungen $\sigma_{psdr_{AB}^1}$ und $\sigma_{psdr_{AB}^2}$ mittels

$$\sigma_{ddr_{AB}^{12}}^2 = \sigma_{psdr_{AB}^1}^2 + \sigma_{psdr_{AB}^2}^2 \quad (8-5)$$

ausgedrückt werden. Unter der Annahme $\sigma_{psdr_{AB}^1} = \sigma_{psdr_{AB}^2} = \sigma_{psdr}$ bei der entsprechenden Satellitenkonstellation und mit $\sigma_{ddr_{AB}^{12}} = \sigma_{ddr}$ erhält man

$$\frac{\sigma_{ddr}}{\sigma_{psdr}} = \sqrt{2} \approx 1.4. \quad (8-6)$$

Analog gilt diese Genauigkeitsherleitung auch für die Konvertierung von PSDR in PZDR:

$$\sigma_{psdr_{AB}^1}^2 = \sigma_{pzdr_A}^2 + \sigma_{pzdr_B}^2. \quad (8-7)$$

Für kurze Basislinien ist $\sigma_{pzdr_A} = \sigma_{pzdr_B} = \sigma_{pzdr}$ anzunehmen. Mit $\sigma_{psdr_{AB}^1} = \sigma_{psdr}$ ergibt sich der Quotient

$$\frac{\sigma_{psdr}}{\sigma_{pzdr}} = \sqrt{2} \approx 1.4. \quad (8-8)$$

Offensichtlich sind für die obere Herleitung gewisse Annahmen bzgl. der Satellitenkonstellation und der Länge der Basislinien getroffen. Für lange Basislinien einerseits auf Grund der Unterschiede der atmosphärischen Einflüsse sind solche Annahmen nicht mehr zutreffend; andererseits weisen die Standardabweichungen (σ_{ddr} , σ_{psdr} und σ_{pzdr}) auch größere Werte auf, wodurch sich dieser systematische Effekt bei langen Basislinien stärker auswirkt als auf kurze Basislinien.

Zur Kontrolle der theoretisch hergeleiteten Quotienten zwischen σ_{ddr} und σ_{psdr} bzw. σ_{psdr} und σ_{pzdr} (ca. 1.4) werden die Standardabweichungen von DDR, PSDR und PZDR am GPS-Tag 186 herangezogen, an dem die Einflüsse der Wetterbedingungen auf die Residuen im Vergleich zum GPS-Tag 190 geringer sind. Die berechneten Quotienten zwischen den Residuen sind in Tab. 8-4 zusammengestellt. Die Mittelwerte der berechneten Quotienten über alle Stationen stimmen mit den theoretisch hergeleiteten Werten sehr gut überein. Dies liefert den Beweis dafür, dass sich die systematische Abnahme der Standardabweichungen von DDR in PZDR durch das FFG erklären lässt.

Tab. 8-4: Quotienten zwischen den Standardabweichungen, DOY2004: 186

Residuen	Standardabweichungen am GPS-Tag 186														
	stark			mittel						gering					
Mehrwegebelastung	ST	OF	HE	GE	VI	KA	IF	FR	FS	SI	HL	BI	SC	RA	TA
Stationen	ST	OF	HE	GE	VI	KA	IF	FR	FS	SI	HL	BI	SC	RA	TA
DDR	1.3	1.4	1.3	1.2	1.2	1.2	1.1	1.2	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0	1.1	1.1
PSDR	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9	0.8	0.8	0.9	0.7	0.8	0.8	0.8
PZDR	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.5	0.6	0.6	0.5	0.5	0.6	0.6
$\sigma_{ddr}/\sigma_{psdr}$	1.3	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.4	1.3	1.4	1.4	1.2	1.4	1.3	1.4	1.4
$\sigma_{psdr}/\sigma_{pzdr}$	1.4	1.3	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.5	1.6	1.3	1.5	1.4	1.6	1.3	1.3

8.3 Größenordnung verschiedener Einflussfaktoren in PZDR

Durch eine gründliche Untersuchung der Verteilungseigenschaft der Residuen ist die Voraussetzung der Konvertierung von DDR über PSDR in PZDR bestätigt. Nun stellt sich die Frage, welche Faktoren neben der Basislinienlänge, den Mehrwegeeffekten und den Wetterbedingungen einen wesentlichen Einfluss auf die Variation der PZDR ausüben. In diesem Unterkapitel werden die zu untersuchenden Einflüsse zuerst in stationsabhängige und auf die Auswertestrategie bezogene Faktoren eingeteilt. Die Größenordnungen des jeweiligen Einflussfaktors werden basierend auf den Standardabweichungen der konvertierten PZDR bestimmt. Zu diesem Zweck werden DDR in Abhängigkeit von den in Unterkapitel 7.2.6 genannten vier Auswertevarianten erzeugt.

8.3.1 Einteilung der Einflussfaktoren

In Abb. 8-20 ist ein Überblick über die Einflussfaktoren bei der neutrosphärischen Modellbildung dargestellt [Mayer, 2006]. Die Modellierung der Neutrosphäreneinflüsse ist mit der Stationshöhe sowie den Antennenmodellen hoch korreliert und wird von mehreren systematischen Faktoren beeinflusst; dies ist u.a. von besonderer Bedeutung, da die Analyse der Wasserdampfverteilung im Rahmen der vorliegenden Arbeit im Vordergrund steht, welche von der neutrosphärischen Modellbildung abhängig ist. Hier wird weiterhin im Speziellen auf die stationsabhängigen (z.B. Basislinienlänge, Mehrwegeeffekt) und die auf die Auswertestrategie bezogenen Einflussfaktoren (z.B. Einführung einer elevationsabhängigen Gewichtung der Beobachtungen, Auswahl der neutrosphärischen Prädiktionsmodelle und Strategien zur Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten) eingegangen.

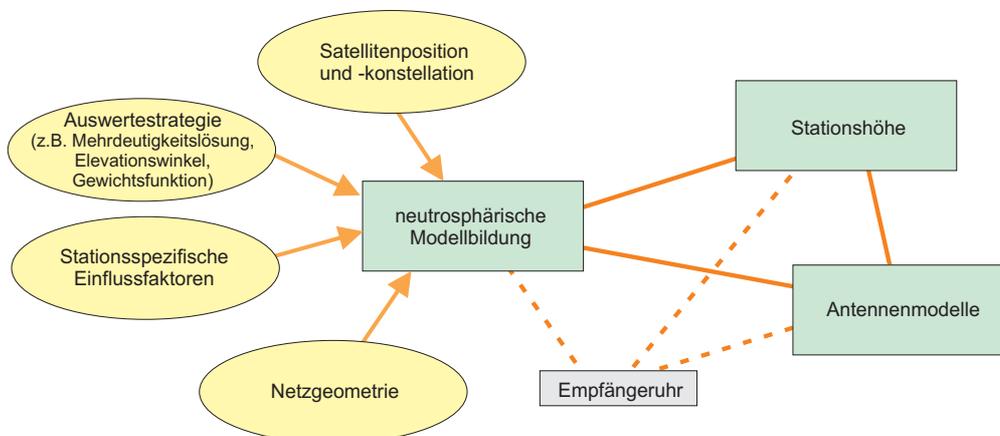
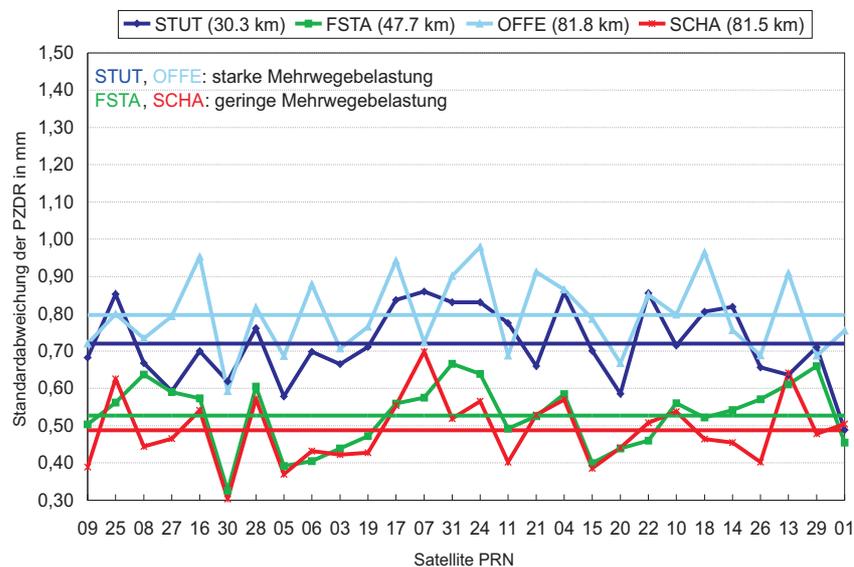


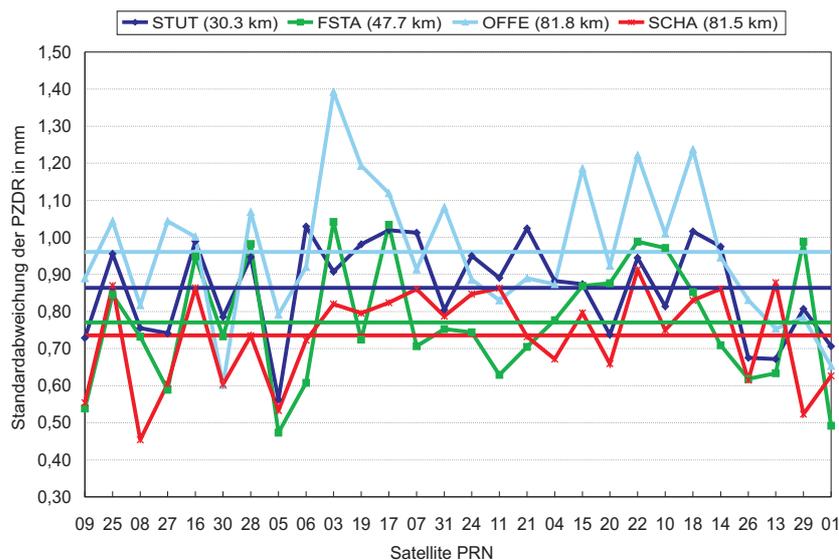
Abb. 8-20: Überblick der Einflussfaktoren bei der neutrosphärischen Modellbildung

8.3.2 Einflüsse der Basislinienlänge und Mehrwegeeffekte

Die berechneten Standardabweichungen für die einzelnen Satelliten und die ausgewählten Stationen an den beiden GPS-Tagen 186 und 190 werden in Abb. 8-21 dargestellt. Die Stationen STUT, FSTA, OFFE und SCHA wurden ausgewählt, um einerseits eine unterschiedlich starke Mehrwegebelastung visualisieren und analysieren zu können (s. Tab. 7-4), andererseits verschieden lange Basislinie untersuchen zu können. Der vertikale Abstand zwischen den oberen und den unteren zwei Kurven in den beiden Grafiken ist ein Maß für die Größenordnung der Mehrwegeefflüsse auf die Standardabweichungen von PZDR und beträgt mehr als 0.25 mm. Die Auswirkung der Basislinienlänge wird durch den Unterschied zwischen den beiden oberen bzw. unteren Kurvenpaaren repräsentiert, wobei dieser Unterschied deutlich unter 0.1 mm liegt. Bei feuchten Wetterbedingungen (Abb. 8-21(b)) ist die gesamte Darstellung um ca. 0.2 mm nach oben verschoben und die Einflüsse der Wetterbedingungen schwächen die Einflüsse der Mehrwegeeffekte ab, woraus sich in Abb. 8-21(b) ein Zusammenrücken von oberem und unterem Kurvenpaar ergibt.



(a) DOY2004: 186

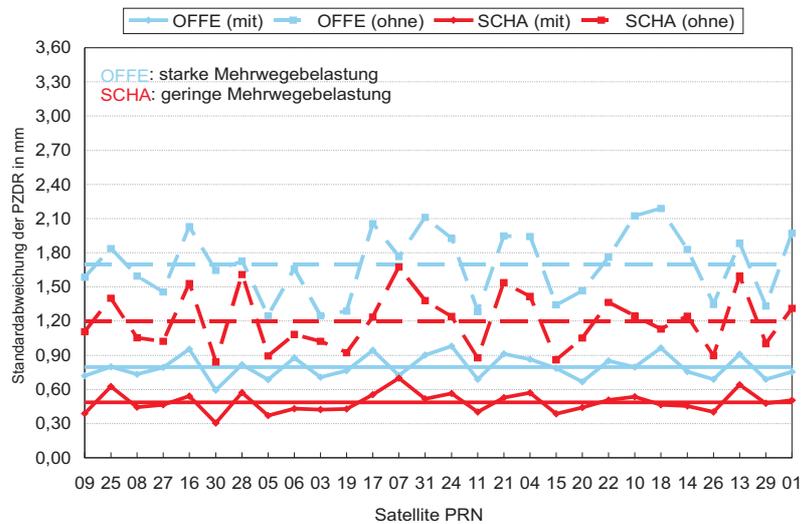


(b) DOY2004: 190

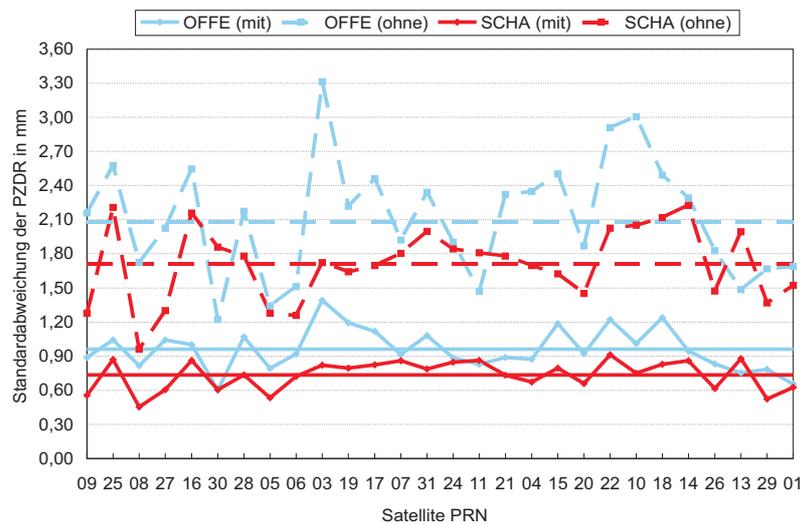
Abb. 8-21: Einflüsse der Mehrwegeeffekte und Basislinienlänge auf die Standardabweichung der PZDR

8.3.3 Einflüsse der elevationsabhängigen Gewichtung

In Abb. 8-22 stellen die gestrichelten Linien die Standardabweichungen der PZDR ohne die elevationsabhängige Gewichtung (s. Gleichung (6-6) und (6-12)) für die Beobachtungen dar, während die durchgezogenen Kurven die Ergebnisse mit Gewichtung veranschaulichen. Um die Einflüsse der Basislinienlänge bei dieser Untersuchung weitestgehend zu reduzieren, werden die Stationen OFFE und SCHA ausgewählt, die ungefähr gleich lange Entfernungen zur Referenzstation aufweisen. Es ist ersichtlich, dass die Gewichtung bei der Größenordnung und Variation der Standardabweichungen von PZDR eine entscheidende Rolle spielt. Diese Einflüsse betragen ca. 0.7 mm an der Station SCHA. Die Wetterbedingungen wirken sich auf die Ergebnisse mit Gewichtung ca. 0.2 mm und auf die ohne Gewichtung ca. 0.5 mm aus. Das bedeutet, dass die elevationsabhängige Gewichtung $\sin^2 E$ zur Stabilisierung der PZDR bei feuchtem Wetter einen großen Beitrag leistet. Der Unterschied des Abstands zwischen den beiden gleichfarbigen Kurvenpaaren in den Grafiken ist auf die Mehrwegeeinflüsse zurückzuführen.



(a) DOY2004: 186



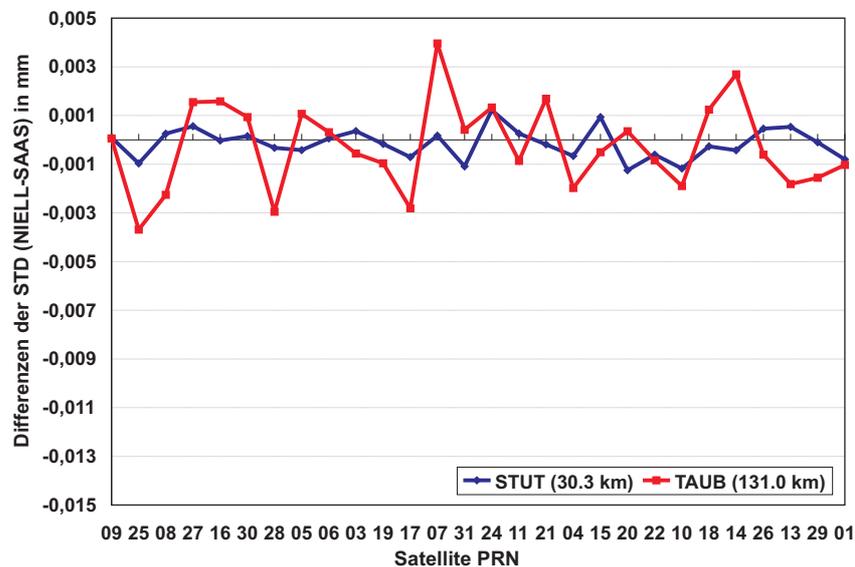
(b) DOY2004: 190

Abb. 8-22: Einflüsse der elevationsabhängigen Gewichtung auf die Standardabweichung der PZDR

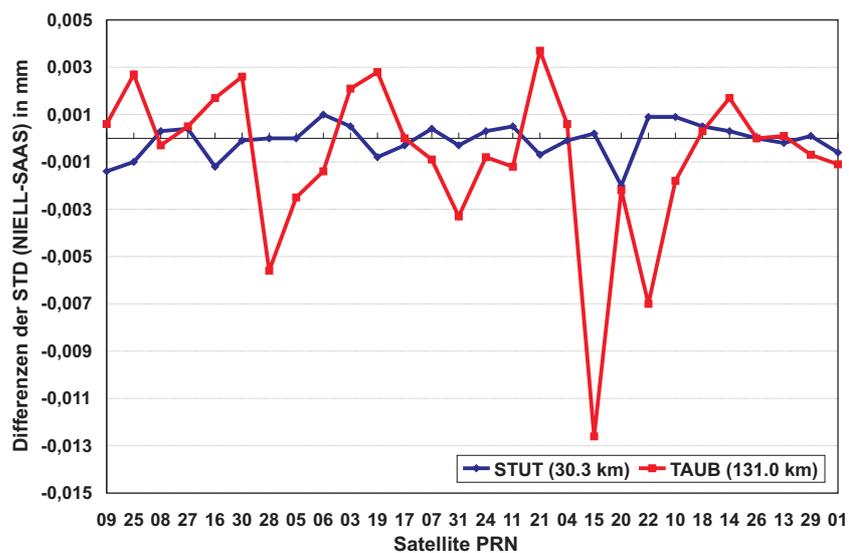
Bei den oben beschriebenen Untersuchungen ist zu berücksichtigen, dass die Konvertierung von DDR in PZDR unter der Anwendung der mit Gleichung (6-7) und (6-13) gegebenen „zero mean“-Annahme durchgeführt wird. Welchen Einfluss eine alternative „zero mean“-Annahme auf die PZDR ausübt, wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht untersucht.

8.3.4 Einflüsse der neutrosphärischen Prädiktionsmodelle

Der wesentliche Unterschied zwischen den angewendeten atmosphärischen Prädiktionsmodellen (Saastamoinen + $MF_{1/\cos Z}$ und Niell + $MF_{Niell,w}$) liegt in der Abbildungsfunktion, weil das Modell Niell bei der Berechnung der zenitalen neutrosphärischen Laufzeitverzögerung auf das Saastamoinen-Modell zurückgreift. Die beiden untersuchten Abbildungsfunktionen werden gewählt, da maximale Auswirkungen bzw. Unterschiede zu erwarten sind. Da alle Abbildungsfunktionen in der ersten Ordnung durch $1/\cos Z$ approximiert werden können, sind die dadurch entstehenden Unterschiede der Standardabweichungen bei PZDR sehr gering. Um diese Unterschiede graphisch darstellen zu können, werden tageweise Differenzen der Standardabweichungen zwischen den beiden Modellen gebildet. Die Differenzen liegen i.d.R. unter 0.01 mm (s. Abb. 8-23). Trotzdem ist der Unterschied der Variationsbreite auf Grund der Basislinienlänge in beiden Grafiken deutlich zu erkennen. Bei feuchten Wetterbedingungen steigen die absoluten Werte der Standardabweichungen von PZDR an den Stationen mit geringerer Mehrwegbelastung um ca. 0.13 mm an. Unter diesen Wetterbedingungen sind außerdem größere Differenzen zwischen den beiden Modellen in Abb. 8-23(b) zu erkennen.



(a) DOY2004: 186

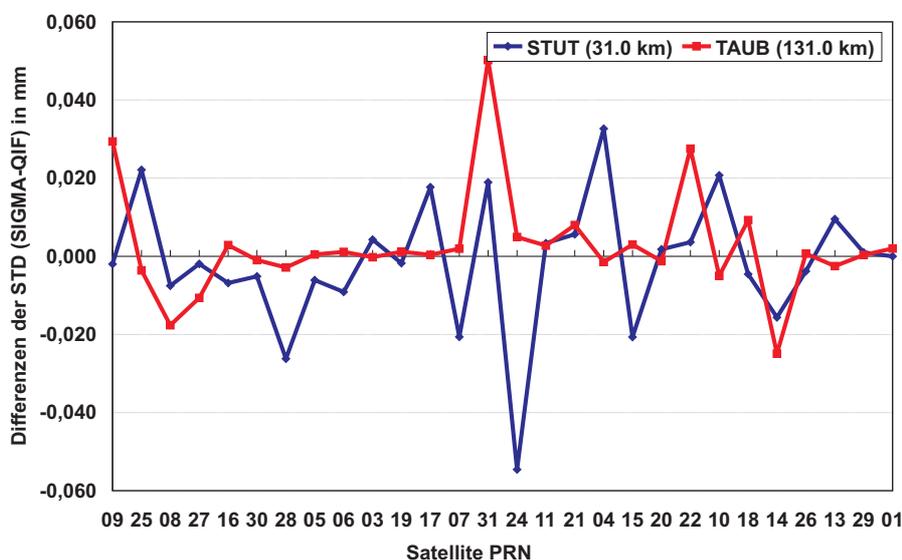


(b) DOY2004: 190

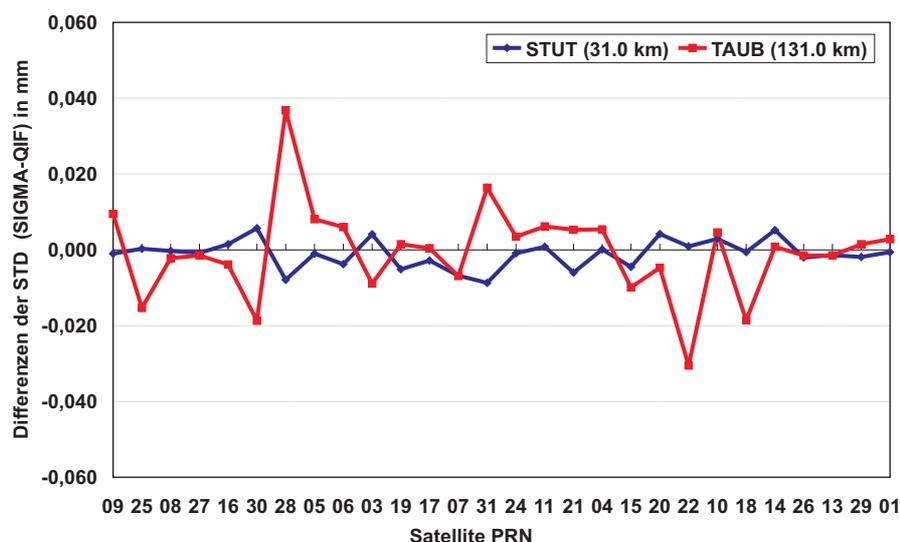
Abb. 8-23: Einflüsse der neutrosphärischen Prädiktionsmodelle auf die Standardabweichung der PZDR

8.3.5 Einflüsse der Strategien zur Phasenmehrdeutigkeitslösung

Durch Abb. 8-24 wird versucht, die Einflüsse der untersuchten Strategien zur Phasenmehrdeutigkeitslösung (SIGMA- und QIF-Strategie) auf die Standardabweichungen von PZDR graphisch darzustellen. Auf Grund der marginalen Unterschiede zwischen den Standardabweichungen der untersuchten GPS-Tage wird hier wie in Unterkapitel 8.3.3 eine relative Darstellung der Standardabweichungen verwendet. Nahezu alle Differenzen der beiden ausgesuchten repräsentativen Tage liegen im Intervall von -0.02 mm bis 0.02 mm. Durch die Differenzbildung sind die Einflüsse der Wetterbedingungen in den beiden Grafiken kaum detektierbar. Im Vergleich zum Prädiktionsmodell sind die Einflüsse der Strategien zur Phasenmehrdeutigkeitslösung gegenüber unterschiedlichen Wetterbedingungen weniger sensitiv. Deshalb ist die relative graphische Darstellung zur Interpretation der Einflüsse der Wetterbedingungen in diesem Falle nicht geeignet. Betrachtet man die absoluten Werte der Standardabweichungen, liegen die Einflüsse der Wettersituation an Stationen mit geringerer Mehrwegebelastung ebenfalls bei ca. 0.13 mm.



(a) DOY2004: 186



(b) DOY2004: 190

Abb. 8-24: Einflüsse der Phasenmehrdeutigkeitslösung auf die Standardabweichung der PZDR

Zum Schluss dieser Untersuchung bzgl. der Phasenmehrdeutigkeitslösung sind die Anzahl der gesamten zu lösenden Phasenmehrdeutigkeiten und die prozentualen Angaben der gelösten Phasenmehrdeutigkeiten der beiden Tage in Tab. 8-5 zusammengestellt. Die Anzahl der zu lösenden Phasenmehrdeutigkeiten an den beiden Tagen unterscheiden sich nur geringfügig. Die Phasenmehrdeutigkeitslösung erzielt ein besseres Ergebnis bei langen Basislinien und unter ruhigen und trockenen Wetterbedingungen. Auch erscheint die QIF-Strategie schwach signifikant weniger geeignet, um im untersuchten Anwendungsfall beste Ergebnisse zu erzielen.

Tab. 8-5: Vergleich der Phasenmehrdeutigkeitslösungen, DOY2004: 186, 190

Station	DOY2004: 186			DOY2004: 190		
	L5	L3	QIF	L5	L3	QIF
STUT/AMB ⁶	L5	L3	QIF	L5	L3	QIF
# AMB	51	51	102	51	51	102
% AMB	98.0%	82.4%	78.4%	98.0%	80.4%	76.5%
TAUB/AMB	L5	L3	QIF	L5	L3	QIF
# AMB	50	50	100	47	47	94
% AMB	92.0%	88.0%	82.0%	97.9%	85.1%	78.7%

8.3.6 Zusammenfassung aller Einflussfaktoren

Nach der Analyse der einzelnen Einflussfaktoren in den vergangenen Unterkapiteln können diese nun unter Berücksichtigung der Größenordnung des einzelnen Faktors miteinander verglichen werden. Die mittlere Basislinienlänge aller drei nach Mehrwegebelastrung klassifizierten Gruppen liegt bei ca. 75 km. Dadurch können die mittleren Standardabweichungen der PZDR aller drei Gruppen unter verschiedenen Aspekten in Tab. 8-6 zusammengestellt werden.

Tab. 8-6: Mittlere Standardabweichungen der PZDR, DOY2004: 186

Klassifizierung nach Stärke der Mehrwegebelastrung	mittlere Basislinienlänge [km]	Gewichtung		Basislinienlänge	
		mittl. STD ⁷ [mm]		STD [mm]	
		mit	ohne	kurz-Mittel	lang-Mittel
stark	71.0	0.73	1.63	0.01	0.06
mittel	75.9	0.61	1.40	0.03	0.05
gering	77.6	0.53	1.25	0.00	0.00
Klassifizierung nach Stärke der Mehrwegebelastrung	mittlere Basislinienlänge [km]	Gewichtung		Basislinienlänge	
		mittl. STD [mm]		STD [mm]	
		mit	ohne	kurz-Mittel	lang-Mittel
stark	71.0	0.7300	0.7296	0.7300	0.7304
mittel	75.9	0.6122	0.6073	0.6122	0.6107
gering	77.6	0.5290	0.5284	0.5290	0.5297

Zwar können die Stationen nach Stärke der Mehrwegebelastrung in drei Gruppen klassifiziert werden, aber innerhalb einer Gruppe wirken sich die Mehrwebeeinflüsse an jeder Station individuell aus. Diese Individualität von Mehrwebeeinflüssen führt zu Problemen bei der Dimensionierung der Einflüsse der Basislinienlänge. Darüber hinaus wirken sich die Mehrwebeeinflüsse auf die PZDR stärker aus als die Basislinienlänge. Unter diesen Umständen wird innerhalb einer Gruppe die Differenz zwischen der Standardabweichung der kürzesten bzw. der längsten Basislinie zum Gruppenmittelwert gebildet, um die Dimension der Einflüsse der Basislinienlänge verdeutlichen zu können.

⁶ Ambiguity (Phasenmehrdeutigkeit)

⁷ Standardabweichung

Alleinig basierend auf den Gruppenmittelwerten ist schwer zu beurteilen, welcher Faktor, die Strategien zur Phasenmehrdeutigkeitslösung oder die Auswahl der neutrosphärischen Prädiktionsmodelle, eine größere Rolle bei der Variation der PZDR spielt. Aber durch Vergleich der Variationsbereiche dieser beiden Faktoren (vgl. Abb. 8-23(a) und Abb. 8-24(a)) ist eindeutig festzustellen, dass die Strategie zur Phasenmehrdeutigkeitslösung die Variation der PZDR um das ca. Zehnfache stärker beeinflusst als die Auswahl der neutrosphärischen Prädiktionsmodelle.

Um einen Überblick zu den Einflüssen von Wetterbedingungen zu schaffen, kann Tab. 8-7 verwendet werden. Bei diesem Vergleich sollte allerdings lediglich die Gruppe mit geringen Mehrwegeeffekten analysiert werden, da bei den anderen beiden Gruppen neben den Wetterbedingungen die Mehrwegeeffekte selbst eine wichtige Rolle spielen. Unter Anwendung der elevationsabhängigen Gewichtung für die Beobachtungen wirken sich die Einflüsse der Wetterbedingungen auf die Standardabweichungen der PZDR reproduzierbar aus und ihre Größenordnung liegt bei ca. 0.13 mm. Da es sich hier um einen zufälligen Einflussfaktor handelt, kann die Größenordnung dieser Einflüsse durch extreme Wetterereignisse zeitlich bzw. räumlich sehr stark variieren. Der Ausreißer 0.43 in Tab. 8-7 ist auf eine größere Niederschlagsmenge an diesem Tag über der Station FREI zurückzuführen.

Tab. 8-7: Mittlere Standardabweichungen der PZDR, DOY2004: 190

Klassifizierung nach Stärke der Mehrwegebelastung	mittlere Basislinienlänge [km]	Gewichtung		Basislinienlänge	
		mittl. STD [mm]		STD [mm]	
		mit	ohne	kurz-Mittel	lang-Mittel
stark	71.0	0.92	2.10	0.06	0.01
mittel	75.9	0.82	1.86	0.04	0.43
gering	77.6	0.76	1.77	0.01	0.09
Klassifizierung nach Stärke der Mehrwegebelastung	mittlere Basislinienlänge [km]	Gewichtung		Basislinienlänge	
		mittl. STD [mm]		STD [mm]	
		mit	ohne	kurz-Mittel	lang-Mittel
stark	71.0	0.9191	0.9192	0.9191	0.9191
mittel	75.9	0.8203	0.8608	0.8203	0.8205
gering	77.6	0.7621	0.7613	0.7621	0.7625

Basierend auf bisherigen Untersuchungen lassen sich abschließend alle Einflussfaktoren nach ihren Größenordnungen quantifiziert und einer Vor- bzw. Nachkommastelle der Standardabweichung von PZDR zuordnen. Unter der Annahme, dass die Standardabweichung von PZDR durch eine Vorkommastelle und drei Nachkommastellen mittels

$$\sigma_{PZDR} = \underbrace{A}_1 \cdot \underbrace{B}_2 \underbrace{C}_{3,4} \underbrace{D}_5 \quad (8-9)$$

in der Einheit Millimeter ausgedrückt werden kann, repräsentiert jede Ziffer (1 bis 5) den entsprechenden Einflussfaktor, der diese Stelle der Standardabweichung von PZDR beeinflussen kann. Die Zuordnung der einzelnen Ziffern zu den Einflussfaktoren lautet:

- 1: Elevationsabhängige Gewichtung der Beobachtungen
- 2: Mehrwegeeffekt
- 3: Länge der Basislinie
- 4: Strategie zur Phasenmehrdeutigkeitslösung
- 5: Neutrosphärisches Prädiktionsmodell

9 Visualisierung von Wasserdampffeldern

In diesem Kapitel soll eine sinnvolle graphische Darstellungsmöglichkeit der ermittelten Wasserdampffelder auf Basis von Prädiktionsmodell, Zusatzparametern und PZDR entwickelt werden. Durch Vergleich der Visualisierungsergebnisse mit bzw. ohne Berücksichtigung der PZDR lässt sich die Frage beantworten, inwieweit die entsprechenden DDR einen signifikanten Beitrag bei der Bestimmung von Wasserdampffeldern leisten können. Es kann dabei ebenso untersucht werden, wie groß die DDR sein müssen, um einen signifikanten Einfluss auf die Visualisierungsergebnisse hervorzurufen. Darauf basierend können Entscheidungen getroffen werden, ob es unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit lohnenswert ist, die aus DDR abgeleiteten PZDR bei der Modellierung von Wasserdampffeldern zu verarbeiten, obwohl der Konvertierungsprozess einen hohen Rechen- und somit Zeitaufwand in Anspruch nimmt.

Zur Visualisierung von Wasserdampffeldern wird ein planares Einschichtmodell verwendet (s. Unterkapitel 9.1). Weiterhin werden Untersuchungen der Darstellungsmöglichkeiten behandelt und sowohl eine mögliche Handhabung der SSNP für die Referenzstation (TUEB) als auch ein geeignetes Inter- bzw. Extrapolationsverfahren der SSNP erarbeitet.

Für die Umsetzung der Visualisierung wird die kondensierte Wassermenge IPWV (Integrated Precipitable Water Vapor) verwendet, die durch eine Umrechnung der Laufzeitverzögerung der GNSS-Signale erhalten werden kann. Basierend auf einzelnen Grafiken von Wasserdampffeldern mit hoher zeitlicher Auflösung ist es möglich, Animationen in einem 3- bzw. 30-Minuten-Takt zu generieren.

Abschließend werden unterschiedliche Untersuchungen bezüglich der Modellierung und Visualisierung durchgeführt. Hinsichtlich der Genauigkeit und Wirtschaftlichkeit werden die Visualisierungsergebnisse der dreiteiligen Modellierung mit denen der zweiteiligen Modellierung verglichen. Zur Validierung der Ergebnisse werden unabhängig extern ermittelte Zusatzparameter vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) herangezogen. Des Weiteren wird versucht, Wetterdaten in die dreiteilige Modellbildung einzubeziehen und den neutrosphärischen Einfluss unter Anwendung des Oberflächendrucks zu modellieren.

9.1 Einschichtmodell der Neutrosphäre

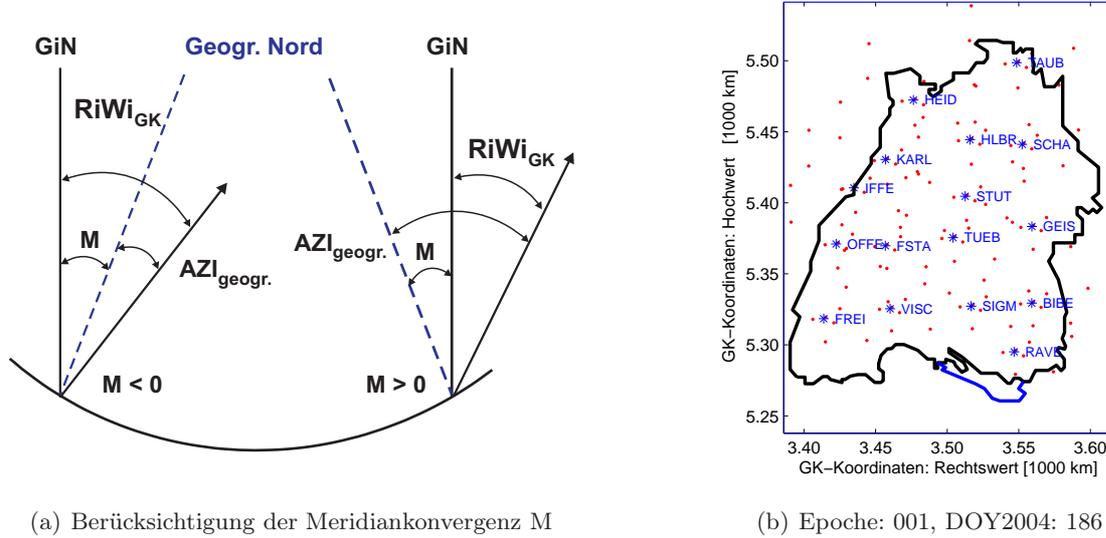
Basierend auf der Tatsache, dass 99% des gesamten Wasserdampfes der Atmosphäre in der Troposphäre enthalten sind, wird die Kartenebene des Wasserdampffeldes mit einer Höhe von 10 km über der Meeresoberfläche festgelegt. Die Referenzstationen sind durch ihre Gauß-Krüger (GK)-Koordinaten, die mittels der aus der GNSS-Auswertung erhaltenen dreidimensionalen kartesischen Koordinaten (X, Y, Z) über die entsprechenden geographischen Koordinaten (B, L) und die ellipsoidische Höhe h berechnet werden können, in der Kartenebene eindeutig zu identifizieren. Im Vergleich zu anderen Ansätzen [Reigber et al., 2004], welche routinemäßig basierend auf GNSS-Auswertungen Wasserdampffelder in Near-Real-Time ermitteln und dazu eine zweiteilige Modellbildung verwenden, die lediglich zenitale, stationsabhängige Informationen berücksichtigt, wird durch eine dreiteilige Modellbildung zusätzlich dem residualen neutrosphärischen Anteil Rechnung getragen, der Informationen entlang des von Satellit zu Beobachtungsstation zurückgelegten Signalweges enthält.

In Abhängigkeit von den Elevationswinkeln und den Azimuten der Satelliten können unter Berücksichtigung der Stationshöhe die GK-Koordinaten der Durchstoßpunkte der GNSS-Signale in der Kartenebene berechnet werden. Dabei ist darauf zu achten, dass sich die Azimute der Satelliten auf die astronomische Nordrichtung beziehen, während die Richtungswinkel der GK-Koordinaten bezüglich Gitternord (GiN) definiert sind. Die beiden Nordrichtungen unterscheiden sich durch die Meridiankonvergenz (M) und die Ost-West-Komponente der Lotabweichung, wobei die Lotabweichung im Vergleich zur Meridiankonvergenz eine untergeordnete Rolle spielt und somit bei der Umrechnung vernachlässigt wird. Die maximale Meridiankonvergenz beträgt ca. 0.9° und darf bei der Berechnung der

Richtungswinkel der Satelliten nicht vernachlässigt werden. Die Beziehung zwischen den astronomischen Azimuten (AZI_{astro}) und den berechneten Richtungswinkeln der Satelliten im GK-System $RiWi_{GK}$ kann mittels

$$RiWi_{GK} = AZI_{geogr} - M \approx AZI_{astro} - M \quad (9-1)$$

ausgedrückt werden (s. Abb. 9-1(a)).



(a) Berücksichtigung der Meridiankonvergenz M

(b) Epoche: 001, DOY2004: 186

Abb. 9-1: Durchstoßpunkte der GNSS-Signale in der Kartenebene

In Abhängigkeit von den Elevationswinkeln E der Satelliten und der Höhe der Kartenebene (10 km) sowie der ermittelten Stationshöhe H_s ergibt sich die Projektionslänge s

$$s = \frac{10 \text{ km} - H_s}{\tan E}, \quad (9-2)$$

wobei für die Stationshöhe H_s in diesem Fall die ellipsoidische Höhe [km] verwendet wird. Daraus folgt, dass die Geoidundulation bei der Visualisierung von Wasserdampffeldern nicht berücksichtigt werden muss. Der auf dem Einsichtmodell in 10 km Höhe (Kartenebene) gelegene Durchstoßpunkt der GNSS-Signale bspw. vom Satelliten 1 zur Empfangsstation A zu einer bestimmten Epoche lässt sich mittels der Projektionslänge s_A^1 und des Richtungswinkels $RiWi_A^1$ sowie der GK-Koordinaten der Empfangsstation (RW_A , HW_A) durch polares Anhängen unter Anwendung von

$$\begin{aligned} RW^1 &= RW_A + s_A^1 \cdot \sin RiWi_A^1 \\ HW^1 &= HW_A + s_A^1 \cdot \cos RiWi_A^1 \end{aligned} \quad (9-3)$$

eindeutig koordinieren. Die roten Punkte in Abb. 9-1(b) veranschaulichen die Durchstoßpunkte aller „sichtbaren“ Satelliten zu einer ausgewählten Epoche.

9.2 Zenitale Darstellung des Wasserdampfes

Die unter Anwendung von Gleichung (4-27) berechnete neutrosphärische Laufzeitverzögerung wird als „Slant Water Delay (SWD)“ bezeichnet. Je kleiner die Elevationswinkel der ankommenden Signale sind, umso länger sind die zurückgelegten Strecken der Signale in der Atmosphäre und umso größer sind die korrespondierenden Laufzeitverzögerungen. Zeichnet man die SWD-Werte direkt in der Kartenebene ein, bilden die SWD-Isolinien unter idealem atmosphärischem Verhalten und Annahme der Isotropie der Neutrosphäre auf Grund ihrer Elevationsabhängigkeit konzentrische Kreise. D.h., je näher sich die Durchstoßpunkte an der jeweiligen Referenzstation befinden, desto geringer sind die SWD-Werte. Diese

direkte Darstellungsmöglichkeit ist einerseits für die spätere Interpolation sehr ungünstig und andererseits ist sie für eine Interpretation der zeitlichen und räumlichen Variation der Wasserdampfesfelder ungeeignet. Daher muss die Elevationsabhängigkeit der SWD vor der graphischen Darstellung durch eine Abbildungsfunktion (z.B. $MF_{Niell,w}$) berücksichtigt werden. Die mittels einer Abbildungsfunktion in Zenitrichtung abgebildete Laufzeitverzögerung wird als „Zenith Water Delay (ZWD)“ bezeichnet.

9.2.1 Modellierung des Wasserdampfdrucks

Die umgerechneten ZWD-Werte sind an einer geeigneten Position der Kartenebene einzutragen, hierfür eignen sich weder der Projektionspunkt der Station in der Kartenebene selbst, noch der Durchstoßpunkt der einfallenden Signale. Würde sich die Wasserdampfverteilung in der Atmosphäre linear mit der Höhe ändern, könnten die ZWD-Werte repräsentativ in den Mittelpunkt der Projektion der Verbindungslinie zwischen Station und Durchstoßpunkt eingetragen werden. Der Wasserdampfgehalt nimmt jedoch mit zunehmender Höhe über der Erdoberfläche rasch ab, was bedeutet, dass ein repräsentativer Wert für den Massenmittelpunkt der ZWD-Werte bzw. der feuchten Luft gesucht werden muss.

Im Rahmen dieser Arbeit wird hierfür der Verlauf des Wasserdampfdrucks in Abhängigkeit von der Höhe als Referenz herangezogen. Aus der Fachliteratur sind mehrere Modellierungsmöglichkeiten für den Wasserdampfdruck bekannt. Im Folgenden werden drei Varianten kurz vorgestellt und einander gegenüber gestellt.

Variante 1: Modellierung in Abhängigkeit von T und rh

Unter Verwendung der meteorologischen Parameter, Temperatur T [K] und relative Luftfeuchtigkeit rh [%], die mit der Höhe über der Meeresoberfläche in Relation stehen, kann der partielle Wasserdampfdruck e höhenabhängig mittels der Gleichung (4-19) modelliert werden. Diese Modellierungsmethode wird auch in der BS5 und somit bei der GNSS-Auswertung verwendet.

Variante 2: Modellierung in Abhängigkeit von T , p und rh

Nach [Giacomo, 1982] und [Davis et al., 1993] besteht durch

$$\begin{aligned} e &= \frac{rh}{100} e_{Sät} rh_W \\ e_{Sät} &= 0.01e^{-6343.1645000/T+33.93711047-0.019121316 T+0.000012378847 T^2} \\ rh_W &= 1.00062 + 3.14p10^{-6} + 5.6(T - 273.15)^2 10^{-7} \end{aligned} \quad (9-4)$$

in Abhängigkeit von drei meteorologischen Parametern (T [K], rh [%], p [hPa]) eine zur Gleichung (4-19) alternative Möglichkeit für die Modellierung des Wasserdampfdrucks. Unter dem Sättigungsdampfdruck $e_{Sät}$ versteht man den maximal möglichen Wasserdampfdruck bei Umgebungstemperatur T .

Variante 3: Modellierung in Abhängigkeit von T

Diese Modellierungsvariante hängt ebenfalls vom Sättigungsdampfdruck $e_{Sät}$ ab. Allerdings erfolgt die Berechnung des Sättigungsdampfdrucks lediglich temperaturbasiert. Der Wasserdampfdruck e kann in diesem Fall nach [Berg, 1948] und [Zeuv und Komarov, 1987] durch

$$e = \frac{rh}{100} e_{Sät} \quad (9-5)$$

definiert werden. Die in [Goff und Gratch, 1946] angegebene und von [Goff, 1965] korrigierte Formel zur Berechnung des Sättigungsdampfdrucks lautet:

$$e_{Sät}(T) = 10^u \cdot e_1 \quad (9-6)$$

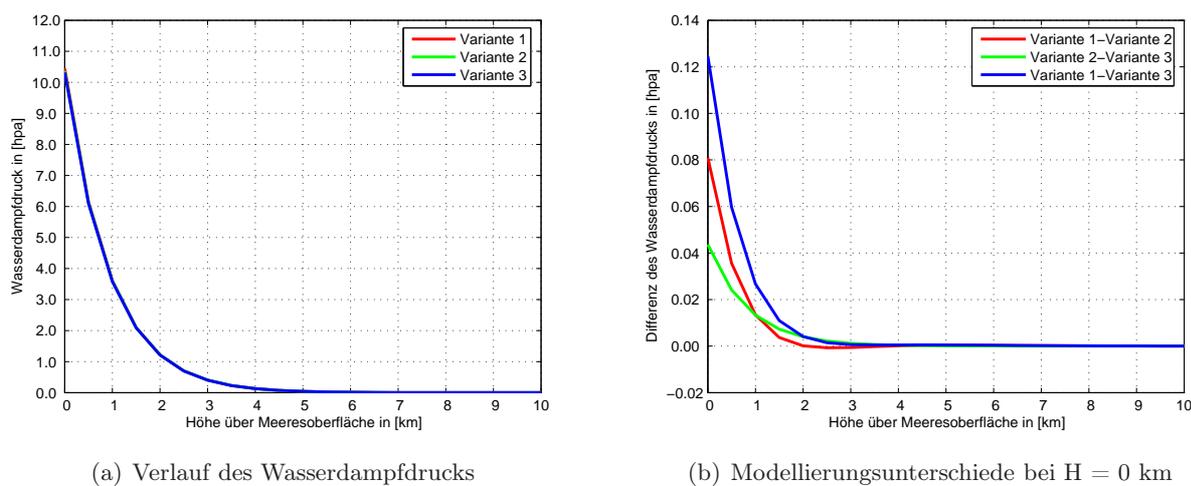
mit

$$\begin{aligned}
 u &= 10.79586 \cdot (1 - T_0/T) - 5.02808 \cdot \log_{10}(T/T_0) \\
 &+ 1.50474 \cdot 10^{-4} \cdot (1 - 10^{-8.29692 \cdot (T/T_0 - 1)}) \\
 &+ 4.2873 \cdot 10^{-4} \cdot (10^{4.76955 \cdot (1 - T_0/T)} - 1) - 2.2195983
 \end{aligned} \tag{9-7}$$

T_0 : Temperatur des Tripelpunktes von Wasser (273.15 K)

e_1 : Sättigungsdampfdruck am Tripelpunkt (1013.25 hPa).

Zum Vergleich aller drei Berechnungsvarianten wird der Verlauf des Wasserdampfdrucks in Abhängigkeit von der Höhe über der Meeresoberfläche in Abb. 9-2 veranschaulicht.



(a) Verlauf des Wasserdampfdrucks

(b) Modellierungsunterschiede bei $H = 0$ km

Abb. 9-2: Vergleich der Modellierungen von Wasserdampfdruck e

Unter Anwendung der Standardatmosphäre $T_0 = 18^\circ\text{C}$, $rh_0 = 50\%$ und $p_0 = 1013.25$ hPa nach [Hugentobler et al., 2005] beträgt der modellierte Wasserdampfdruck auf Meeresniveau ca. 10.4 hPa. Diese Größenordnung macht nur einen kleinen Teil des Luftdrucks (1013.25 hPa) aus. Mit zunehmender Höhe nimmt der Wasserdampfdruck exponentiell ab. Bei einer Höhe von ca. 2 km beträgt der Wasserdampfdruck nur noch etwa 10% des Wertes auf Meeresniveau und erreicht den Wert Null bei ca. 5 km (s. Abb. 9-2(a)). Außerdem sind die Unterschiede zwischen den drei Modellierungsvarianten sehr gering, die maximale Differenz wird für $H = 0$ km mit ca. 0.12 hPa angenommen (s. Abb. 9-2(b)).

9.2.2 Bestimmung der Projektionspunkte

Für die Festlegung des Massenmittelpunktes wird die Halbwertsbreite des Wasserdampfdrucks verwendet. Hierzu wird eine stationsbezogene Höhe h_m bestimmt, bis zu welcher der Wasserdampfdruck oberhalb der Station um die Hälfte des repräsentativen Wertes auf dem Stationsniveau abnimmt. Zur Bestimmung dieser Höhe wird zunächst der Wasserdampfdruck e_s in Abhängigkeit von der Stationshöhe H_s berechnet und halbiert. Dieser halbierte Wert entspricht einer Höhe H_m , die sich allerdings auf die Meeresoberfläche bezieht. Die Differenz zwischen H_m und H_s entspricht der gesuchten stationsbezogenen Höhe h_m für die Halbwertsbreite des Wasserdampfdrucks (s. Abb. 9-3). Diese Höhe h_m stellt eine stationsbezogene Höhe für den Massenmittelpunkt des Signalwegs dar und kann zur Bestimmung des Projektionspunktes des Massenmittelpunktes in der Kartenebene verwendet werden.

Für jede Station des SAPOS[®]-BW-Netzes wird h_m bestimmt und in Tab. 9-1 zusammengefasst. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Höhe h_m mit zunehmender Stationshöhe abnimmt. Allerdings liegen alle Werte, trotz teilweise beträchtlicher Höhenunterschiede zwischen den Baden-Württembergischen SAPOS[®]-Stationen, in der gleichen Größenordnung von ca. 650 m. Zur Bestimmung der Positionen aller Projektionspunkte der Massenmittelpunkte in der Kartenebene wird h_m mit 650 m als konstant

angenommen. Bei einer genauen und realitätsnahen Bestimmung der Höhe h_m , und somit zur Festsetzung der Halbwertsbreite des Wasserdampfdrucks sind jedoch meteorologische Daten notwendig, die bspw. eine Modellbildung in Abhängigkeit von der Jahreszeit ermöglichen, damit die Tatsache Rechnung tragen würde, dass im Sommer auf Grund hoher Lufttemperatur mehr Wasserdampf in der Atmosphäre vorhanden ist als im Winter.

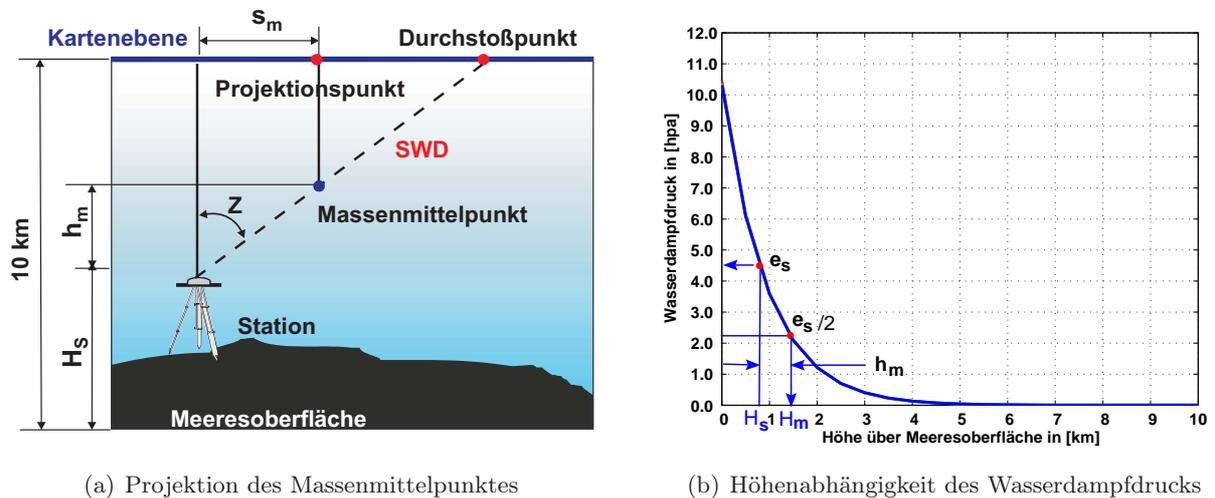


Abb. 9-3: Bestimmung der stationsbezogenen Höhe für die Halbwertsbreite von e

Tab. 9-1: h_m für alle SAPOS[®]-Stationen Baden-Württembergs

Station	HEID	KARL	IFFE	OFFE	HLBR	TAUB	STUT	FREI
H_s	169.46	183.53	186.09	234.12	235.42	247.97	341.64	365.07
H_m	819.06	832.93	835.49	882.72	884.02	896.37	988.64	1011.7
h_m	649.6	649.4	649.4	648.6	648.6	648.4	647.0	646.6
Station	TUEB	SCHA	RAVE	BIBE	SIGM	GEIS	FSTA	VISC
H_s	386.81	433.67	504.58	599.92	645.92	736.91	785.05	793.52
H_m	1033.0	1079.2	1149.0	1242.7	1287.9	1377.41	1424.7	1433.0
h_m	646.2	645.5	644.4	642.8	642.0	640.5	639.7	639.5

9.2.3 Realisierung der zenitalen Darstellung

Die zenitale Darstellung von Wasserdampffeldern erfolgt im Rahmen dieser Arbeit in den folgenden drei Schritten (s. Abb. 9-4(a)):

1. Schritt: Berechnung der SWD-Werte unter Berücksichtigung von DDR

Bei diesem Schritt wird angenommen, dass die geschätzten SSNP sowohl einen trockenen als auch einen feuchten Anteil enthalten und der prozentuale Betrag des feuchten Anteils in den SSNP mit dem im Prädiktionsmodell (hier: Saastamoinen-Modell) übereinstimmt. Unter dieser Annahme

$$\frac{SSNP_w}{SSNP_{ges}} = \frac{\Delta\rho_{Saas,w}^0}{\Delta\rho_{Saas,w}^0 + \Delta\rho_{Saas,d}^0} = F\% \quad (9-8)$$

ergibt sich aus der Gleichung (4-27)

$$SWD = \underbrace{MF_{Niell,w} \cdot \Delta\rho_{Saas,w}^0}_{\text{Prädiktionsmodell}} + \underbrace{MF_{Niell,w} \cdot SSNP_{ges} \cdot F\%}_{\text{Parameterschätzung}} + \underbrace{PZDR}_{\text{Pseudo-Residuen}} \quad (9-9)$$

azimutal-isotrop azimutal-anisotrop

wobei

$$\Delta\rho_{Saas,w}^0 = 0.002277D\left(\frac{1255}{T} + 0.205471\right)e$$

$$\Delta\rho_{Saas,d}^0 = 0.002277D(p - 0.155471e).$$

Hierbei wird zusätzlich angenommen, dass die geschätzten PZDR-Werte lediglich auf Grund von unvollständiger oder fehlerhafter neutrosphärischer Modellbildung realisiert sind; Einflüsse bspw. von Antennenmodell oder Mehrwegeeffekten werden ausgeschlossen.

2. Schritt: Umrechnung der SWD in ZWD durch $MF_{Niell,w}$

Dieser Schritt basiert auf der Erkenntnis in Unterkapitel 9.2, dass SWD-Werte für die anschließende Inter- bzw. Extrapolation von Wasserdampffeldern ungeeignet sind. Wird Gleichung (9-9) durch die Abbildungsfunktion $MF_{Niell,w}$ dividiert, erhält man:

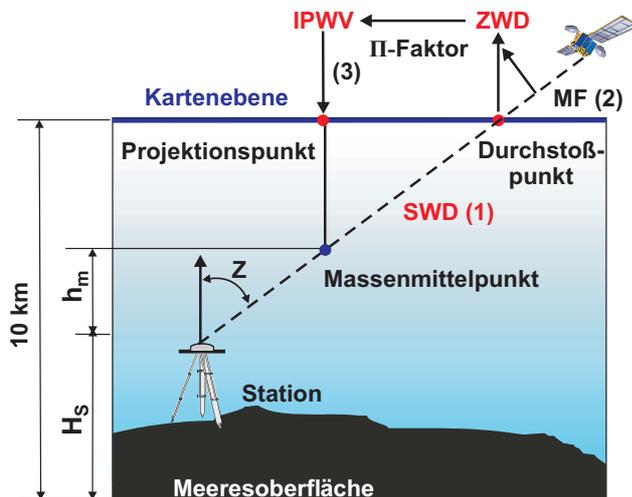
$$ZWD = \frac{SWD}{MF_{Niell,w}} = \Delta\rho_{Saas,w}^0 + SSNP_{ges} \cdot F_{\%} + \frac{PZDR}{MF_{Niell,w}}. \quad (9-10)$$

3. Schritt: Umrechnung der ZWD-Werte in IPWV-Werte und Darstellung in der Kartenebene

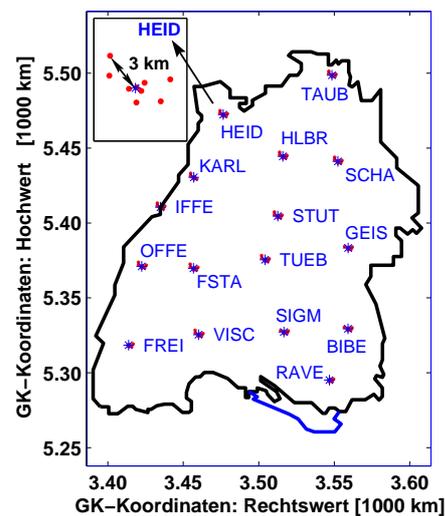
Die Beziehung zwischen ZWP und IPWV kann in Abhängigkeit eines Faktors Π mittels

$$IPWV = \Pi \cdot ZWD \quad (9-11)$$

dargestellt werden, wobei der Π -Faktor durch die Gleichung (4-9) berechnet werden kann. Für die Dichte des Wassers wird in diesem Fall der Maximalwert 999.975 kg/m^3 bei einer Temperatur von $3.98 \text{ }^\circ\text{C}$ unter dem Standard-Luftdruck von 1013.25 hPa verwendet. In der Realität variiert diese Größe jedoch in Abhängigkeit von Temperatur und Luftdruck. IPWV ist äquivalent zur Menge an flüssigem kondensiertem Wasser und wird i.d.R. in Säulenhöhe in der Einheit Millimeter angegeben. 6.5 mm der „feuchten“ zenitalen Laufzeitverzögerung entsprechen dabei ca. 1 mm IPWV.



(a) Drei Schritte von SWD zum IPWV



(b) Projektionspunkte in der Karte

Abb. 9-4: Darstellung der Projektionspunkte in der Kartenebene

Die berechneten IPWV-Werte werden in die entsprechenden Projektionspunkte der Massenmittelpunkte auf allen Verbindungslinien zwischen Beobachtungsstation und Durchstoßpunkt in die Kartenebene eingetragen. Im Vergleich zur Höhe der Kartenebene (10 km über der Meeresoberfläche) ist die stationsbezogene Höhe für die Halbwertsbreite h_m (650 m über allen Stationen) viel kleiner (maximal ca.

3.7 km). Dies führt dazu, dass sich die Projektionspunkte der Massenmittelpunkte in der Nähe der entsprechenden Station befinden (s. Abb. 9-4(b)). Gestützt auf diese Projektionspunkte lassen sich IPWV-Werte durch zweidimensionale Interpolation mit einem Gitterabstand von 1 km bestimmen. Darauf basierend können Wasserdampfkarten bzw. deren Isolinien mit einer zeitlichen Auflösung von maximal 3 Minuten sowie einer gesteigerten räumlichen Auflösung (ca. 130 anstatt 16 Stützstellen) erzeugt und analysiert werden.

9.3 Handhabung der SSNP im Rahmen der Visualisierung

SSNP werden durch Basislinienauswertung mittels Ausgleichungsverfahren für die beiden beteiligten Stationen einer Basislinie ermittelt. Diese Parameterschätzung ist jedoch mit der Bestimmung der Stationshöhe hoch korreliert. Bei einem minimalen Elevationswinkel von 10° liegt der Korrelationskoeffizient bei ca. 0.9 [Hugentobler et al., 2005]. Darüber hinaus wird die Genauigkeit der Parameterschätzung ebenfalls durch die Länge der Basislinie, Mehrwegeeffekte und die gewählte Auswertestrategie sowie sonstige zufällige Faktoren (z.B. Wetterbedingungen) beeinflusst. Zu Beginn dieses Unterkapitels werden die Einflüsse dieser Faktoren auf die Genauigkeit der geschätzten SSNP analysiert und ihre Größenordnungen basierend auf graphischen Darstellungen bestimmt.

Unter der Voraussetzung, dass Beobachtungsdaten über den gesamten Tag lückenlos vorhanden sind, werden in Abhängigkeit von einem festgelegten zeitlichen Gültigkeitsrahmen t_G (z.B. 2 Stunden) $24/t_G+1$ Parameter für jede Station geschätzt. Der letzte Parameter stellt dabei eine Prädiktion für das Verhalten der neutrosphärischen Zusatzparameter dar. Die Referenzstation TUEB ist an jeder Basislinienauswertung beteiligt und deren SSNP liegen somit insgesamt 15-mal (Anzahl der Basislinien) vor. In diesem Fall ist eine geeignete Behandlung der SSNP der Referenzstation TUEB erforderlich. Auf Grund des i.d.R. vorliegenden großen zeitlichen Unterschieds zwischen den SSNP (2 Stunden) und den PZDR (3 Minuten) ist zu klären, ob durch Interpolationsverfahren ein interpolierter SSNP-Wert zur Verfügung gestellt werden kann und welches Interpolationsverfahren dafür geeignet ist.

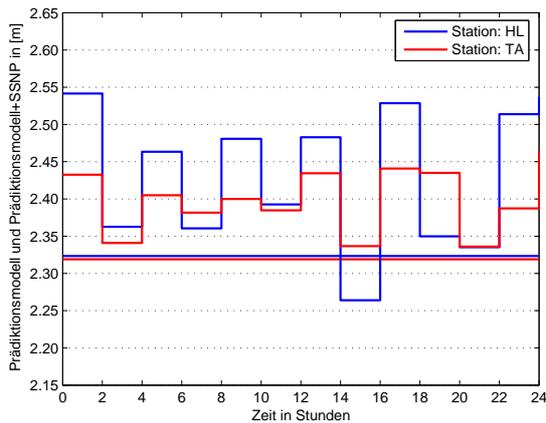
9.3.1 Analyse der Einflussfaktoren auf SSNP

Unter der Bezeichnung SSNP versteht man eigentlich Verbesserungen für die berechneten Werte des neutrosphärischen Prädiktionsmodells, die somit sowohl positives als auch negatives Vorzeichen aufweisen können. Bei den folgenden Untersuchungen werden die Auswertungsergebnisse des trockenen Tags DOY2004: 186 für die graphischen Darstellungen verwendet. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird im Zuge der Parameterschätzung kein Zwang auf die SSNP ausgeübt.

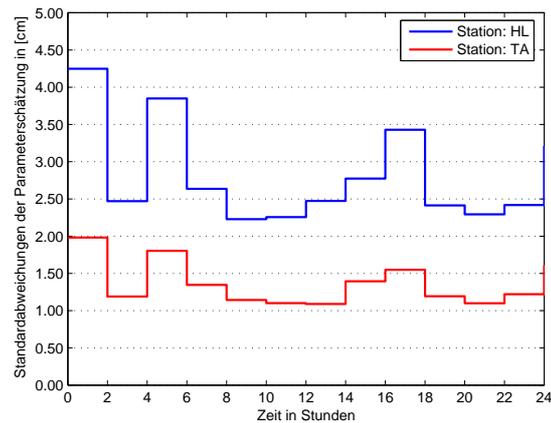
1. Einflüsse der Basislinienlänge

Abb. 9-5 soll die Einflüsse der Basislinienlänge u.a. auf die Standardabweichungen von SSNP veranschaulichen. Abb. 9-5(a) stellt sowohl den durch ein Prädiktionsmodell (z.B. Saastamoinen-Modell) berechneten Modellwert als auch den durch die zugehörigen SSNP verbesserten Gesamtwert der neutrosphärischen Laufzeitverzögerung dar. Dabei ergeben sich die SSNP durch Differenzbildung zwischen den beiden gleichfarbigen Kurven. Abb. 9-5(b) zeigt den Verlauf der entsprechenden Standardabweichungen der Parameterschätzung.

Die Stationshöhen der beiden dargestellten *SAPoS*[®]-Stationen (HLBR: 235.42 m und TAUB 247.97 m) sind vergleichbar. Dies ist bspw. ebenfalls durch nahezu identische Werte des Prädiktionsmodells in Abb. 9-5(a) zu erkennen. Die Basislinie TUTA (131.0 km) ist jedoch fast doppelt so lang wie die Basislinie TUHL (TUHL 70.1 km). Bei der kürzeren Basislinie sind sowohl die SSNP als auch die zugehörigen Standardabweichungen größer als die der längeren Basislinie. Der maximale Unterschied der Standardabweichungen liegt bei ca. 2.5 cm. Dies ist einerseits auf die hohe Korrelation zwischen Stationshöhe und Parameterschätzung und andererseits auch auf die räumliche Verteilung des Wasserdampfs zurückzuführen. Bei kürzeren Basislinien wirkt sich die Korrelation stärker aus als bei längeren Basislinien.



(a) Ergebnisse der Parameterschätzung

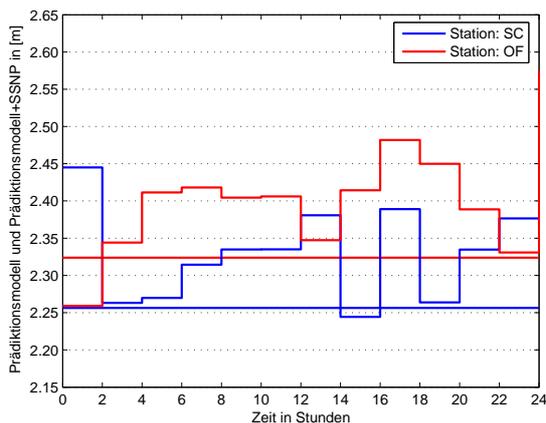


(b) Standardabweichungen der SSNP

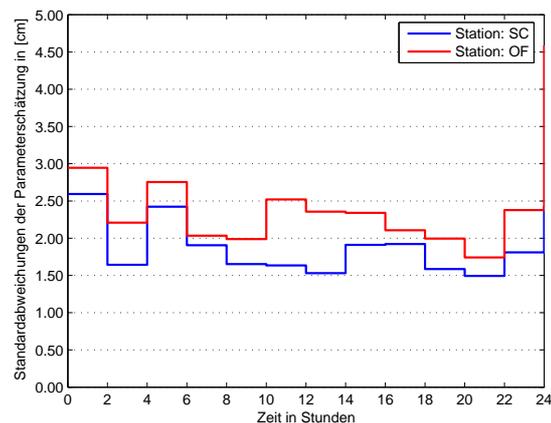
Abb. 9-5: Einflüsse der Basislinienlänge auf die SSNP

2. Einflüsse der Mehrwegeeffekte

Analog zur Analyse der PZDR-Werte sind die beiden Stationen SCHA und OFFE für die Untersuchung der Mehrwegeefflüsse besonders gut geeignet, weil sie mit der Referenzstation TUEB fast gleich lange Basislinien bilden, jedoch unterschiedlich stark mit Mehrwegeefflüssen belastet sind. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass die Einflüsse der Basislinienlänge weitgehend reduziert sind. Abb. 9-6(a) zeigt deutlich, dass die Station SCHA viel höher als die Station OFFE liegt. Die Auswirkung der Mehrwegeeffekte kann durch den Unterschied zwischen den beiden Treppenkurven in Abb. 9-6(b) verdeutlicht werden, wobei sich dieser innerhalb von ca. 1 cm bewegt. Neben den Mehrwegeefflüssen könnte dieser Unterschied noch Auswirkungen auf Grund unterschiedlicher Stationshöhen aufweisen. Dadurch wird der Anteil durch die Mehrwegeeffekte noch kleiner. Deshalb kann dieser Unterschied als „worst case“ betrachtet werden.



(a) Ergebnisse der Parameterschätzung



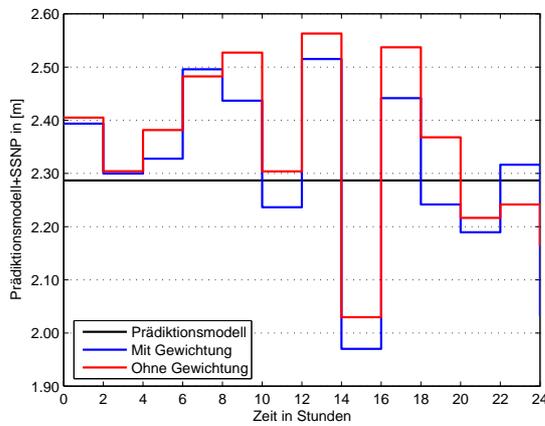
(b) Standardabweichungen der SSNP

Abb. 9-6: Einflüsse der Mehrwegeeffekte auf die SSNP; Basislinien: TUSC, TUOF

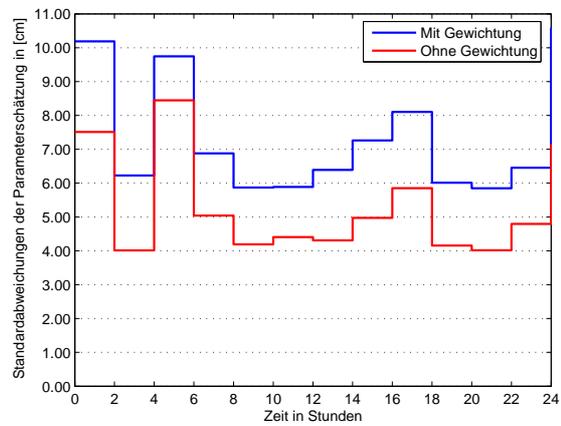
3. Einflüsse der elevationsabhängigen Gewichtung

Um die Einflüsse der elevationsabhängigen Gewichtung der GPS-Beobachtung auf die Genauigkeit der Parameterschätzung untersuchen zu können, werden die beiden repräsentativen Stationen STUT und TAUB beispielhaft analysiert, die hinsichtlich der Basislinienlänge und der Mehrwegeefflüsse Extremfälle darstellen (Basislinienlänge: TUST (30.3 km), TUTA (131.0 km); Mehrwegebelastung: STUT

stark, TAUB gering). Die Auswirkungen der Gewichtung an der Station STUT können als „worst case“ betrachtet werden, wohingegen die Einflüsse an der Station TAUB als „best case“ bezeichnet werden können.

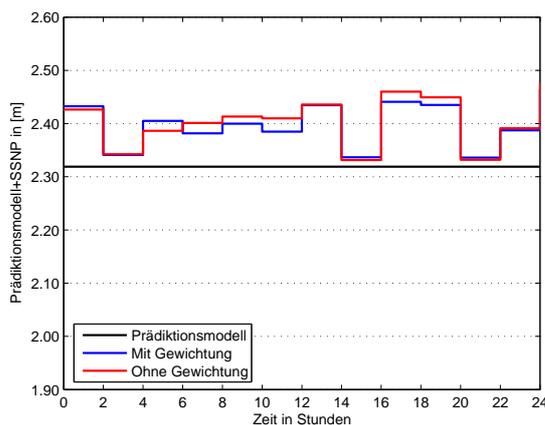


(a) Ergebnisse der Parameterschätzung

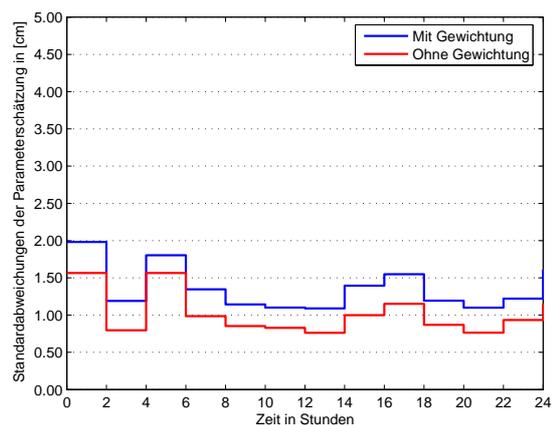


(b) Standardabweichungen der SSNP

Abb. 9-7: Einflüsse der Gewichtung auf die SSNP, Basislinie: TUST (30.3 km)



(a) Ergebnisse der Parameterschätzung



(b) Standardabweichungen der SSNP

Abb. 9-8: Einflüsse der Gewichtung auf die SSNP, Basislinie: TUTA (131.0 km)

Durch Vergleich der beiden Grafiken 9-7(b) und 9-8(b) ist festzustellen, dass die Einflüsse der elevationsabhängigen Gewichtung von der Basislinienlänge sehr stark abhängen. Mit abnehmender Basislinienlänge unterscheiden sich die geschätzten Parameter von wenigen Zentimetern bis zu einem Dezimeter (vgl. Abb. 9-7(a) und Abb. 9-8(a)). Die Einflüsse auf die Genauigkeit der SSNP bewegen sich zwischen ca. 5 mm bei langen bzw. bis zu ca. 3 cm bei kurzen Basislinien.

Darüber hinaus ist es auffällig, dass die ohne Gewichtung geschätzten Parameter eine bessere Genauigkeit aufweisen als die mit Gewichtung. Dies hängt damit zusammen, dass die Beobachtungen mit kleinen Elevationen bei der Auswertung ohne Gewichtung genau so behandelt werden wie die mit großen Elevationen. Dadurch tragen die Beobachtungen mit kleinen Elevationen zur Parameterschätzung mehr bei als bei der Auswertung mit Gewichtung. Solche Beobachtungen spielen bei der Dekorrelation zwischen den geschätzten Parametern und der Stationshöhe eine wichtige Rolle. Daher ist die erzielte bessere Genauigkeit der ohne Gewichtung geschätzten SSNP auf eine schwächere Korrelation zwischen der Parameterschätzung und der Bestimmung von Stationshöhen zurückzuführen.

4. Einflüsse der Strategien zur Phasenmehrdeutigkeitslösung

Basierend auf der Erkenntnis, dass die Phasenmehrdeutigkeitslösung bei längeren Basislinien bessere Ergebnisse erzielen kann, wird auch hier die Station STUT für die Untersuchung der Einflüsse der Strategien zur Phasenmehrdeutigkeitslösung auf die Genauigkeit der Parameterschätzung verwendet. Im Vergleich zu den bisherigen analysierten Faktoren sind die Einflüsse bspw. auf die Standardabweichung der geschätzten Parameter deutlich kleiner. Der maximale Unterschied liegt unter 1 cm (s. Abb. 9-9(b)). Bei den geschätzten Parametern verursacht dieser Einflussfaktor im schlimmsten Fall jedoch einen Unterschied von mehr als 1 dm (s. Abb. 9-9(a)).

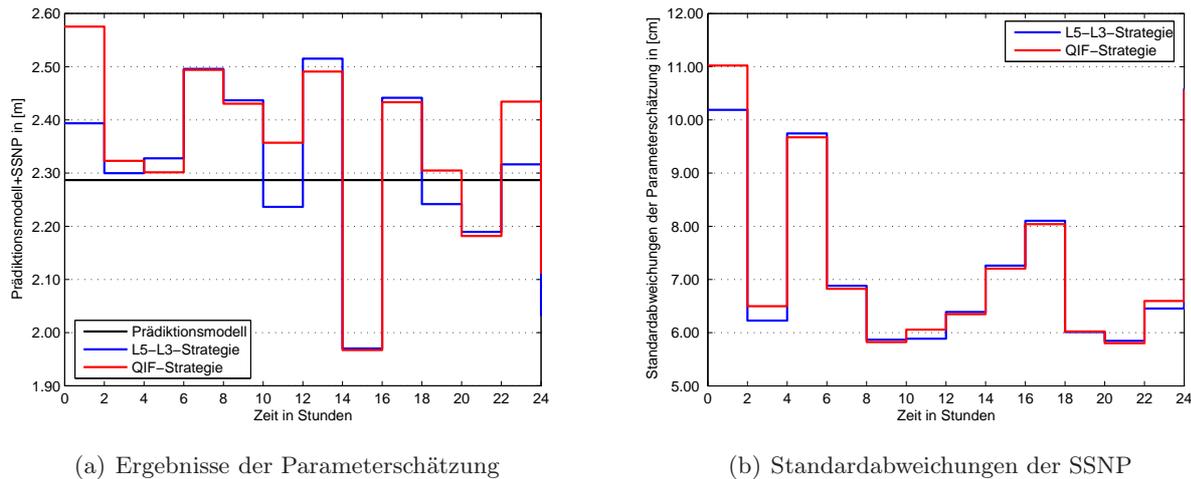


Abb. 9-9: Einflüsse der Phasenmehrdeutigkeitslösungen auf die SSNP, STUT

5. Einflüsse neutrophärischer Prädiktionsmodelle

In Unterkapitel 8.3.4 wurde festgestellt, dass sich die Auswahl der neutrosphärischen Prädiktionsmodelle bei langen Basislinien des SAPOS[®]-BW-Netztes stärker auswirkt als bei kürzeren. Deshalb wird für diese Untersuchung die Station TAUB herangezogen, welcher am weitesten von der Referenzstation TUEB entfernt ist und eine geringe Mehrwegebelastung aufweist. Abb. 9-10 zeigt, dass die Auswahl der neutrosphärischen Prädiktionsmodelle sehr geringe Einflüsse auf die geschätzten SSNP und ihre Genauigkeiten hat.

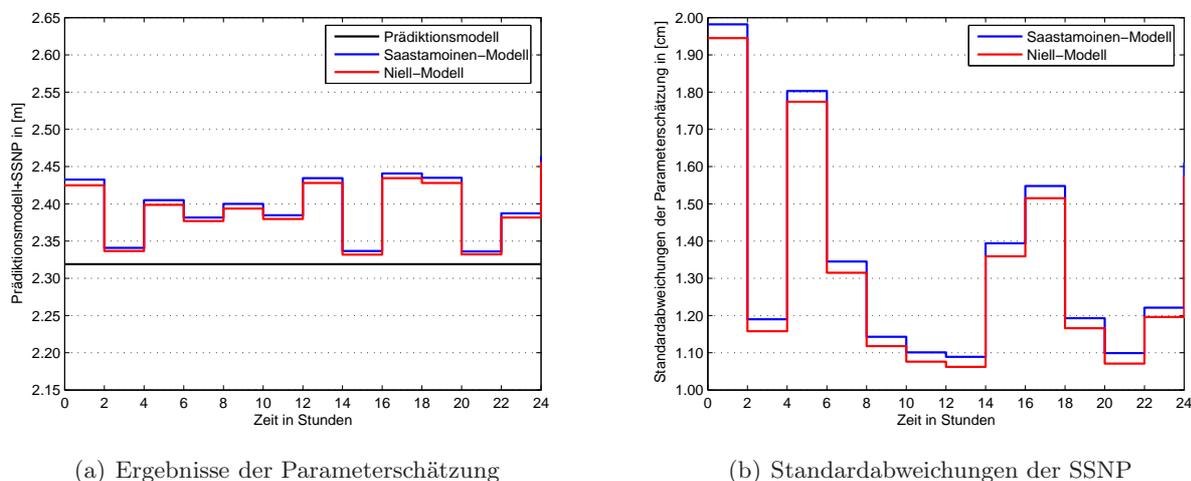


Abb. 9-10: Einflüsse neutrophärischer Prädiktionsmodelle auf die SSNP, TAUB

Die Auswirkungen der neutrosphärischen Prädiktionsmodelle auf die Standardabweichungen der geschätzten SSNP liegen deutlich unter einem Millimeter. Die unter Verwendung des Modells von Niell geschätzten Parameter werden systematisch genauer erhalten als die des Saastamoinen-Modells. Dies ist auf eine besser geeignete Abbildungsfunktion zurückzuführen.

6. Einflüsse der zeitlichen Gültigkeit der SSNP

Die Bestimmung von Wasserdampfverteilungen wird routinemäßig vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) durchgeführt. Hierbei werden SSNP mit einer zweistündigen zeitlichen Gültigkeit bestimmt. Um die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Wasserdampfwerte mit den BKG-Ergebnissen vergleichen zu können, werden SSNP i.d.R. mit dieser zeitlichen Auflösung bestimmt. Die bisher durchgeführten Untersuchungen der Einflussfaktoren basieren auf zweistündigen SSNP. Um zu verifizieren, wie stark sich die geschätzten Parameter und deren Standardabweichungen mit einer zeitlichen Gültigkeit von einer Stunde von denen der zweistündigen Lösung unterscheiden, wurden die Beobachtungen des SAPOS[®]-Netzes alternativ ausgewertet. Abb. 9-11 stellt beispielhaft die Ergebnisse der Station TAUB für den GPS-Tag 186 dar.

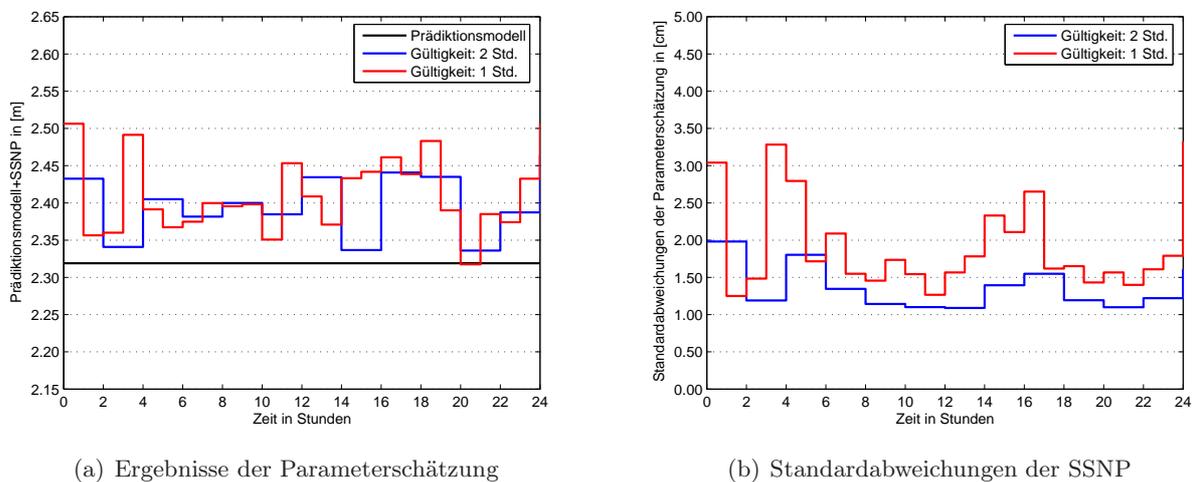


Abb. 9-11: Einflüsse der zeitlichen Gültigkeit auf die SSNP, TAUB

Bei einer Basislinienlösung unter gleichen Bedingungen verschlechtert sich die Genauigkeit der Parameterschätzung mit zunehmender Anzahl der zu schätzenden Parameter bzw. mit kürzerer zeitlicher Gültigkeit der SSNP (s. Abb. 9-11(b)). Der größte Unterschied zwischen beiden Kurven liegt bei ca. 15 cm. Allerdings korrespondiert mit diesem Zeitintervall die größte Standardabweichung von etwa 3.3 cm. Das bedeutet, wenn sich ein zeitabhängiger Fehlereinflussfaktor (z.B. Mehrwegeeffekte) innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls besonders stark auswirkt, weist der geschätzte Parameter entsprechend eine schlechte Genauigkeit auf. Diese zeitliche Abhängigkeit ist hauptsächlich auf die Satellitenkonstellation zurückzuführen.

Bei der Parameterschätzung basierend auf längeren Zeitintervallen wird diese Genauigkeitsverschlechterung durch weitere Beobachtungen, die bei günstigeren Satellitenkonstellation erfasst wurden und somit von diesem zeitabhängigen Einflussfaktor nicht so stark beeinflusst sind, vermindert. Wünschenswert wäre eine für jede Station individuell bestimmte zeitliche Gültigkeit für die Parameterschätzung. Bei Stationen, die weniger durch diesen Einflussfaktor belastet werden, kann das Zeitfenster, wie experimentelle Untersuchungen gezeigt haben, auf eine halbe Stunde reduziert werden, während das Zeitintervall bei qualitativ schlechteren Stationen mindestens vier Stunden betragen sollte, um die an die Parameterschätzung gestellte Genauigkeitsanforderung erfüllen zu können.

7. Einflüsse der Wetterbedingungen

Der durch Wetterbedingungen gegebene, zufällige Einflussfaktor soll abschließend näher betrachtet werden. Durch Niederschläge während des GPS-Tags 190 nehmen die geschätzten SSNP und deren Standardabweichungen vergleichend zu GPS-Tag 186 deutlich zu⁸ (s. Abb. 9-12).

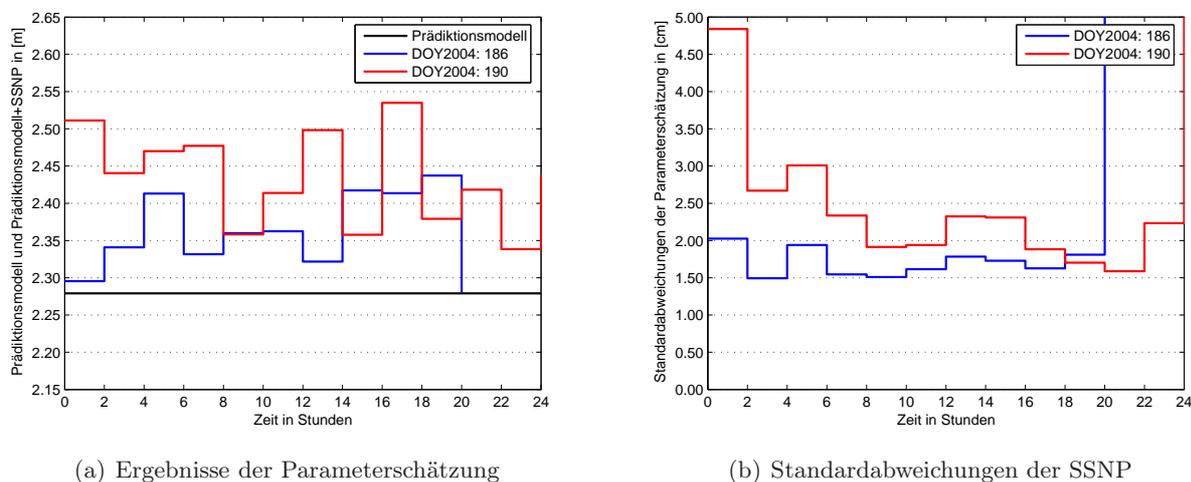


Abb. 9-12: Einflüsse der Wetterbedingungen auf die SSNP, Station: FREI

8. Zusammenfassung aller Einflussfaktoren

Die Einflussfaktoren 1 bis 5 sind systematische Einflüsse, während die Wetterbedingungen den zufälligen Faktoren zugeordnet sind. Durch die oben beschriebenen Vergleiche graphischer Darstellungen können die Einflüsse der systematischen Faktoren auf die Standardabweichungen der Parameterschätzung quantifiziert bzw. dimensioniert werden. Die Ergebnisse sind in Tab. 9-2 zusammengefasst:

Tab. 9-2: Größenordnung der Einflussfaktoren in SSNP, DOY2004: 186

Faktor-Nr.	1	2	3	4	5
Einflussfaktor	Basislinienlänge	Mehrwegebelastung	Gewichtung	Ambiguitylösung	Prädiktionsmodell
Dimension	ca. 3 cm	ca. 1 cm	5 mm - 2 cm	kleiner als 1 cm	kleiner als 1 mm

Unter der Voraussetzung gleicher zeitlicher Gültigkeit der SSNP resultieren aus den Einflussfaktoren 1 bis 3 Auswirkungen auf die Standardabweichung der geschätzten Parameter im Zentimeterbereich. Vergleicht man die Grafiken 9-5(b) und 9-6(b) miteinander, wird deutlich, dass ein Basislinienunterschied von ca. 60 km wesentlich stärkere Einflüsse auf die Standardabweichungen der SSNP ausübt als Mehrwegeeffekte. Zwar sind die Einflüsse der elevationsabhängigen Gewichtung in diesem Fall auch von großer Bedeutung, im Vergleich zur Basislinienlänge sind ihre Einflüsse jedoch deutlich geringer, wohingegen die Gewichtung bei der Standardabweichung von PZDR der wichtigste Einflussfaktor ist. Somit spielt unter diesen drei Faktoren die Basislinienlänge eine dominierende Rolle, u.a. da die Korrelation zwischen Stationshöhe und SSNP bei der Parameterschätzung abhängig von der Basislinienlänge ist. Im Vergleich zu den ersten drei haben die letzten beiden systematischen Faktoren 4 und 5 nur geringfügige Auswirkungen bspw. auf die Standardabweichungen der Parameterschätzung oder auf die Standardabweichungen von PZDR. Der Einfluss der zeitlichen Gültigkeit von SSNP kann als ein stationsspezifischer Faktor betrachtet werden. Bei Stationen mit geringer Mehrwegebelastung kann die zeitliche Gültigkeit für die SSNP bis auf eine Stunde heruntersetzt werden. Im Gegensatz dazu sollte

⁸Der extreme Anstieg der Standardabweichung um 20 Uhr am GPS-Tag 186 ist auf die fehlenden Beobachtungsdaten an dieser Station zurückzuführen.

die zeitliche Gültigkeit bei schlechten Stationen mehr als zwei Stunden betragen, um die Genauigkeitsanforderung der geschätzten SSNP zu erfüllen. Durch individuelle Bestimmung einer best angepassten zeitlichen Gültigkeit für die einzelnen Stationen lassen sich diese Einflüsse auf die Parameterschätzung weitgehend reduzieren.

Im Vergleich zur Basislinienlösung wird die Genauigkeit der Parameterschätzung bei einer Netzlösung, eine günstige Netzgeometrie vorausgesetzt, durch eine deutlich größere Anzahl von Beobachtungen erheblich gesteigert.

SSNP für die Stationen des EUREF-Netzes werden täglich ermittelt und stehen im Internet als EUREF-Produkt frei zur Verfügung. Die Entfernungen zwischen den EUREF-Stationen liegen zwischen 300 bis 500 km [Heck, 2003]. Auf Grund dieser mittels Netzlösung bestimmten, langen Basislinien weisen die geschätzten SSNP unter normalen Wetterbedingungen eine Genauigkeit von wenigen Millimetern auf. Eine *SAPOS*[®]-Station, die auch zum EUREF-Netz gehört, ist die Station KARL. Abb. 9-13 stellt die durch Basislinien- und Netzlösung im *SAPOS*[®]-Netz geschätzten sowie die im EUREF-Netz zur Verfügung stehenden SSNP der Station KARL an den beiden GPS-Tagen 186 und 190 vergleichend dar. Dabei ist zu beachten, dass sich die zeitliche Gültigkeit der geschätzten Parameter in beiden Realisierungen unterscheidet.

Analysiert man die beiden Grafiken in Abb. 9-13, weisen die SSNP unter feuchten Wetterbedingungen bei allen drei Varianten höhere Werte auf. Durch lange Basislinien mittels Netzlösung haben die im EUREF-Netz geschätzten SSNP die kleinsten Standardabweichungen. Die durch eine heruntergesetzte zeitliche Gültigkeit (1 Std.) hervorgerufene Zunahme der Parameteranzahl ist im Vergleich zum Anstieg der Beobachtungsanzahl in Netzlösungen zu klein, um einen Einfluss auf die Genauigkeiten ausüben zu können. Qualitativ stimmt der Verlauf der geschätzten SSNP der beiden Netzlösungen gut überein.

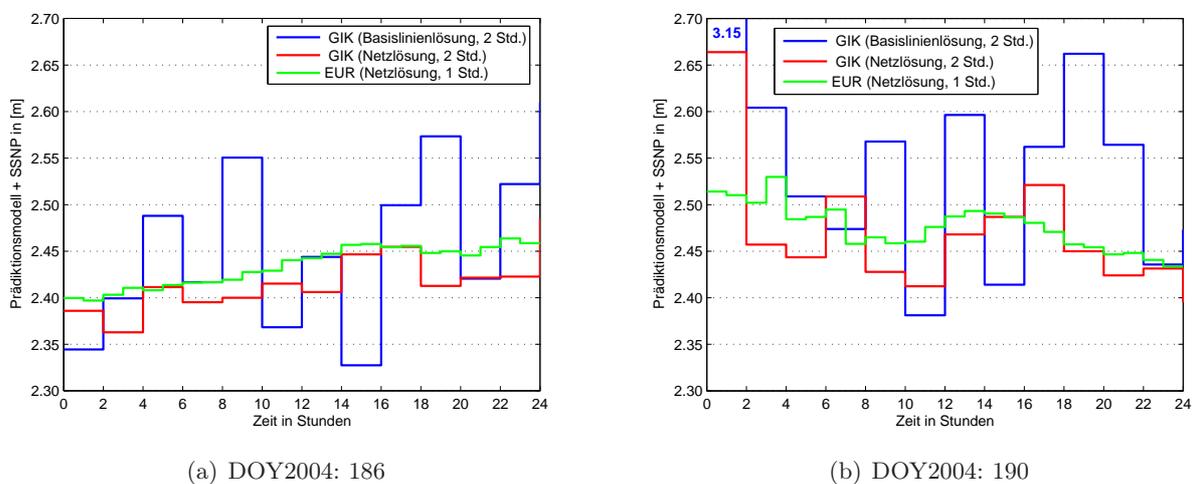


Abb. 9-13: Vergleich der Parameterschätzungen, Station: KARL

9.3.2 Mittelbildung der SSNP für die Referenzstation

Für die Referenzstation TUEB liegen die SSNP mehrmals vor, wodurch eine Mittelbildung der SSNP zur Steigerung der Zuverlässigkeit möglich wird. Es müssen jedoch Überlegungen angestellt werden, welche der verfügbaren Basislinien zur Mittelbildung herangezogen werden sollen. Hierbei muss im Besonderen geklärt werden, ob auch SSNP berücksichtigt werden sollen, die aus einem Ausgleichungsprozess stammen, bei dem ebenso Beobachtungen von minderwertiger Qualität (z.B. durch Mehrwegeinflüsse) verarbeitet wurden. Abb. 9-14 stellt für alle Basislinien die geschätzten SSNP und deren Standardabweichungen der Referenzstation TUEB des GPS-Tags 186 dar. Die geschätzten SSNP sind nach der Stärke der Mehrwegeinflüsse in drei Gruppen eingeteilt.

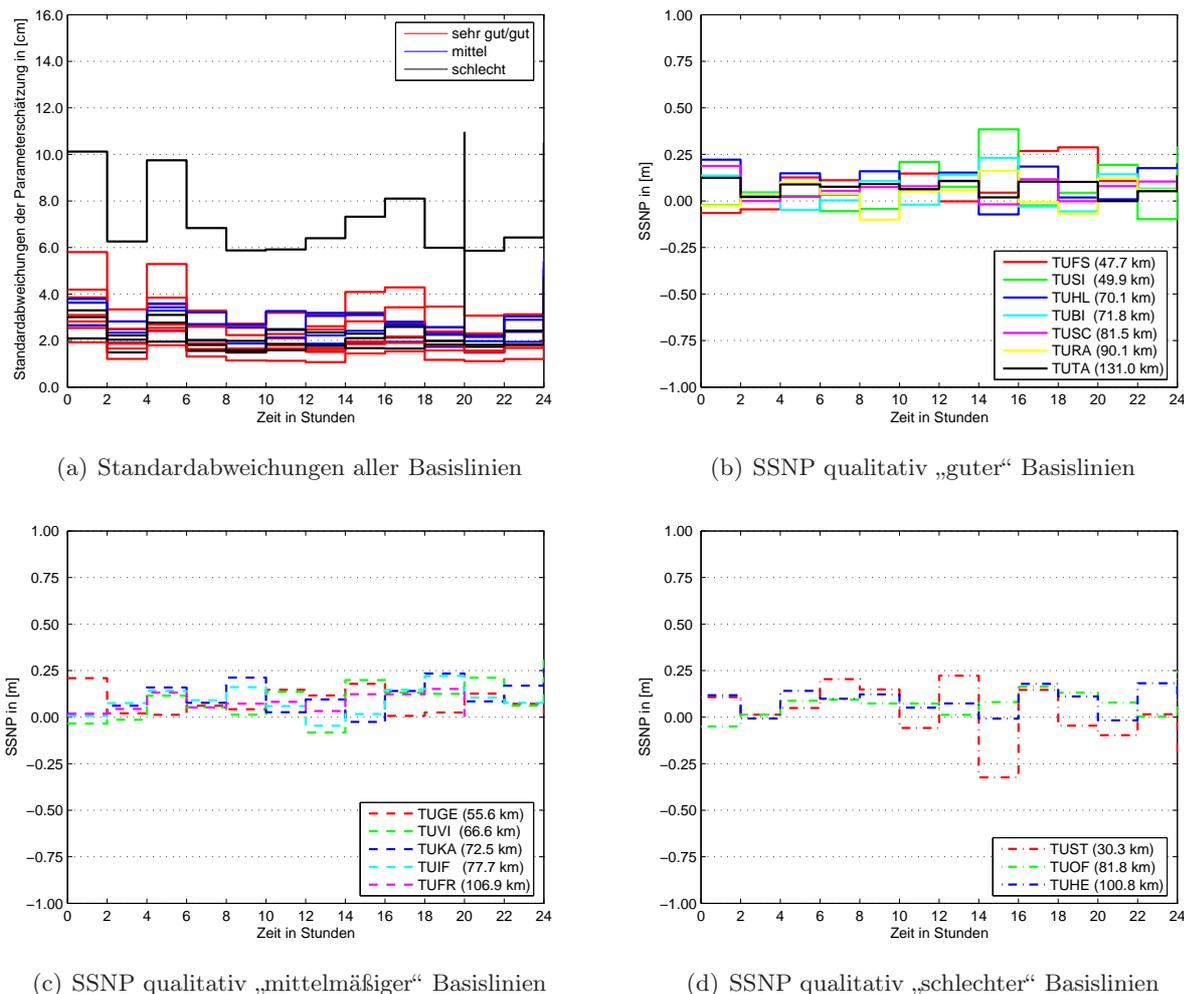
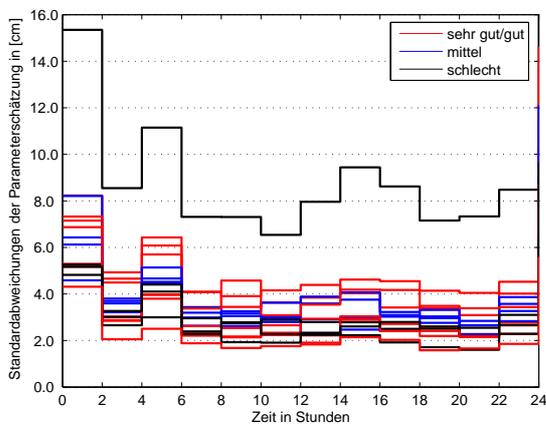


Abb. 9-14: SSNP für TUEB, DOY2004: 186; qualitativer Parameter: Mehrwegeeffluss

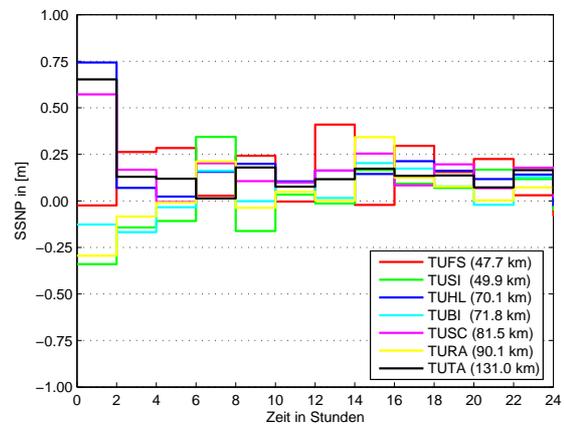
Betrachtet man zuerst die Standardabweichungen der SSNP in Abb. 9-14(a), fällt die Station STUT auf Grund der kürzesten Basislinie und starker Mehrwegebelastung auf. Basierend auf der Erkenntnis in Unterkapitel 9.3.1, dass die Genauigkeit der Parameterschätzung von allen o.g. Faktoren beeinflusst ist und die Basislinienlänge - nicht die Mehrwegebelastung - dominierend ist, kann nicht festgestellt werden, ob Stationen mit geringeren Mehrwegeeffläüssen auch kleinere Standardabweichungen der SSNP aufweisen; im Gegenteil, in vielen Fällen sind die Standardabweichungen von Stationen, die qualitativ gute GPS-Beobachtungen erfassen, größer. Die meisten geschätzten SSNP in allen drei Gruppen liegen im gleichen Wertebereich zwischen -0.1 m und 0.25 m. Lediglich kann der durch die Basislinie TUST geschätzte Parameter zwischen 14 und 16 Uhr als Ausreißer bezeichnet werden. Somit gibt es unter trockenen Wetterbedingungen keinen Grund, die Stationen mit stärkerer Mehrwegebelastung bei der Mittelbildung der SSNP für die Referenzstation auszuschließen.

Abb. 9-15 stellt analog zu Abb. 9-14 die Standardabweichungen und die SSNP der Station TUEB aller Basislinien unter feuchten Wetterbedingungen dar. Es ist leicht zu erkennen, dass die in den ersten zwei Stunden durch diejenigen Stationen geschätzten SSNP und deren Standardabweichungen für die Referenzstation extrem groß sind, die nördlich der Referenzstation liegen (z.B. HLBR, TAUB, SCHA und KARL). Im Gegensatz dazu verhalten sich die durch die südlichen Stationen (z.B. VISC, RAVE und BIBE) ermittelten SSNP relativ ruhig. Dies ist auf die räumliche Variation der Wettersituation zurückzuführen, da die Regenereignisse an diesem Tag im nördlichen Gebiet frühmorgens begannen und im Laufe der Zeit nach Süden zogen. Zur Bestätigung dieser Aussage kann Abb. 8-3 herangezogen werden. Da sich die Referenzstation in der Mitte des Gebiets befindet und die SSNP der Referenzstation

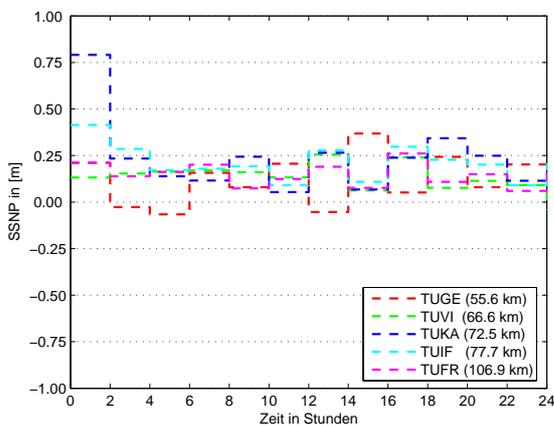
nördlich bzw. südlich unter verschiedenen Wetterbedingungen geschätzt sind, können wiederum alle Stationen zur Mittelbildung verwendet werden.



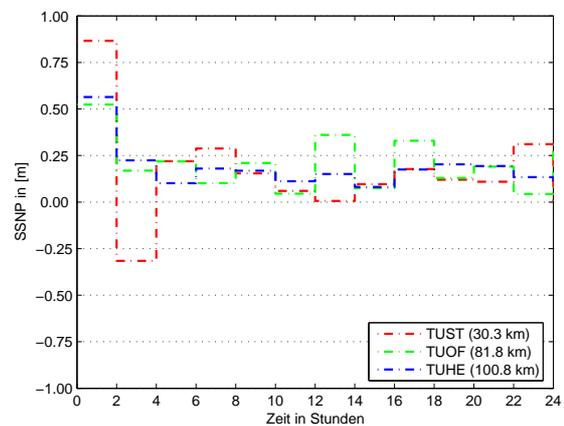
(a) Standardabweichungen aller Basislinien



(b) SSNP qualitativ „guter“ Basislinien



(c) SSNP qualitativ „mittelmäßiger“ Basislinien



(d) SSNP qualitativ „schlechter“ Basislinien

Abb. 9-15: SSNP für die Referenzstation TUEB, DOY2004: 190

9.3.3 Interpolation der SSNP

Die SSNP werden alle zwei Stunden geschätzt, während die PZDR im 3-Minuten-Takt vorhanden sind. Um eine Animation mit hoher zeitlicher Auflösung zu generieren, muss ein SSNP-Wert für jede Epoche (3 Minuten) bestimmt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Spline-Ansätze sowie lineare Inter- bzw. Extrapolationsalgorithmen untersucht. Bei der Durchführung der Interpolation werden die ersten $24/t_G$ geschätzten SSNP auf die jeweilige Mitte des Zeitintervalls bezogen. Weiterhin steht noch ein zusätzlicher $(24/t_G+1)$ ter SSNP-Wert zur Verfügung, da jedoch keine weiteren Beobachtungen nach dem zuletzt geschätzten Parameter vorhanden sind, weist dieser i.d.R. eine schlechtere Genauigkeit auf. Trotz der schlechteren Genauigkeit wird dieser SSNP auch bei der Interpolation berücksichtigt. Wird jeder Tag unabhängig vom vorhergehenden und vom nachfolgenden betrachtet, so kann im Zeitfenster zwischen 1 und 24 Uhr interpoliert werden, während zwischen 0 und 1 Uhr eine Extrapolation notwendig wird.

Die Qualität der Extrapolation ist ein entscheidendes Kriterium für die Auswahl des anzuwendenden Verfahrens, das zuverlässige und realistische interpolierte und extrapolierte SSNP liefern soll. Abb. 9-16 stellt die Interpolations- bzw. Extrapolationsergebnisse der beiden Verfahren gegenüber. Die beiden Verfahren unterscheiden sich in den Interpolationsbereichen i.Allg. nur marginal, lediglich

wenn konsekutive SSNP sehr kleine Änderungen aufweisen, was einer sehr ruhigen und stabilen Neutrosphäre entspricht, sind schwach signifikante Unterschiede zu detektieren, siehe Zeitfenster 18-22 Uhr in Abb. 9-16. Innerhalb der extrapolierten liefert das Splineverfahren extrem große und unrealistische Werte, wohingegen die durch das Linearverfahren extrapolierten SSNP mit den Werten durch Interpolationsverfahren deutlich besser zusammenpassen. Aus diesem Grund erscheint das Linearverfahren für Interpolation bzw. Extrapolation der SSNP zur Glättung der SSNP besser geeignet.

Zwischen 0 Uhr und 4 Uhr können die SSNP für die Station FREI am GPS-Tag 187 auf Grund einer vierstündigen Beobachtungslücke nicht geschätzt werden. In solchen Fällen wird die entsprechende Station beim Visualisierungsprozess des Wasserdampffeldes nicht berücksichtigt.

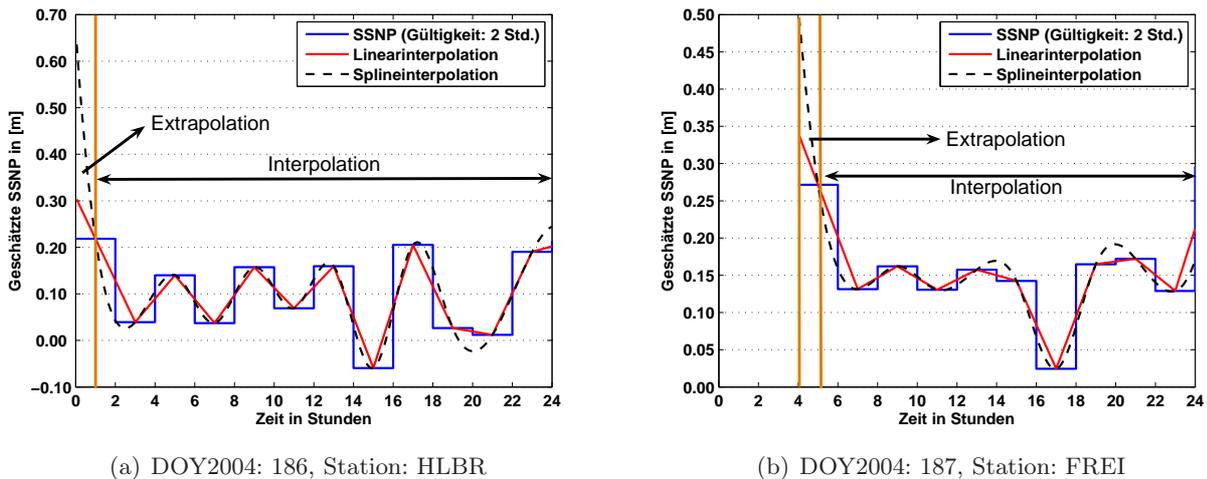


Abb. 9-16: Spline- und lineare Inter- bzw. Extrapolation der SSNP

9.4 Visualisierungsergebnisse

Nach der Mittelbildung und Interpolation von SSNP unter Anwendung der im Unterkapitel 9.2.3 vorgestellten dreistufigen Modellierung kann die Verteilung des atmosphärischen Wasserdampfs nun visualisiert werden. Dies erfolgt sowohl durch Darstellung von Isolinien als auch durch Erzeugung von Wasserdampfkarten. Die beiden Darstellungsmöglichkeiten werden im Folgenden im 3- bzw. 30-Minuten-Takt umgesetzt. Bei der Realisierung im 30-Minuten-Takt werden IPWV-Werte zunächst epochenweise berechnet, daran anschließend werden die Mittelwerte von IPWV aller 10 Epochen (30 Minuten) gebildet. Basierend auf den im 3- bzw. 30-Minuten-Takt erzeugten Einzelgrafiken können die zeitlichen Variationen des Wasserdampfs animiert veranschaulicht werden.

Durch Vergleich der Beiträge der einzelnen Anteile bei der Bestimmung von Wasserdampffeldern kann weiterhin festgestellt werden, in welcher Größenordnung die DDR liegen müssen, damit die konvertierten PZDR die Visualisierungsergebnisse signifikant beeinflussen können. Für den Fall, dass die Berücksichtigung von PZDR keinen signifikanten Beitrag zur Bestimmung von Wasserdampffeldern leisten kann, ist es nicht notwendig die anisotrope Komponente des feuchten Anteils der neutrosphärischen Laufzeitverzögerung mit hohem Rechen- und Zeitaufwand zu berücksichtigen.

9.4.1 Visualisierungsergebnisse im 3-Minuten-Takt

Abb. 9-17 stellt neben der Topographie von BW Isolinien und Wasserdampfverteilung einer Epoche dar. Um vorhandene ProgrammROUTINEN wirtschaftlich und elegant nutzen zu können, wird ein rechteckiger Darstellungsbereich zur Generierung der Isolinien und der Wasserdampfverteilung verwendet. Dieser Bereich wird für jede Visualisierungsepoche durch östliche und westliche Längen bzw. nördliche und südliche Breiten definiert. Hierdurch werden IPWV-Werte über das **SAPPOS**[®]-Gebiet hinaus

(Extrapolation) erhalten. Deshalb wird ein Gültigkeitsrahmen in Form einer gestrichelten Linie in die Ergebnisse eingezeichnet (s. Abb. 9-17).

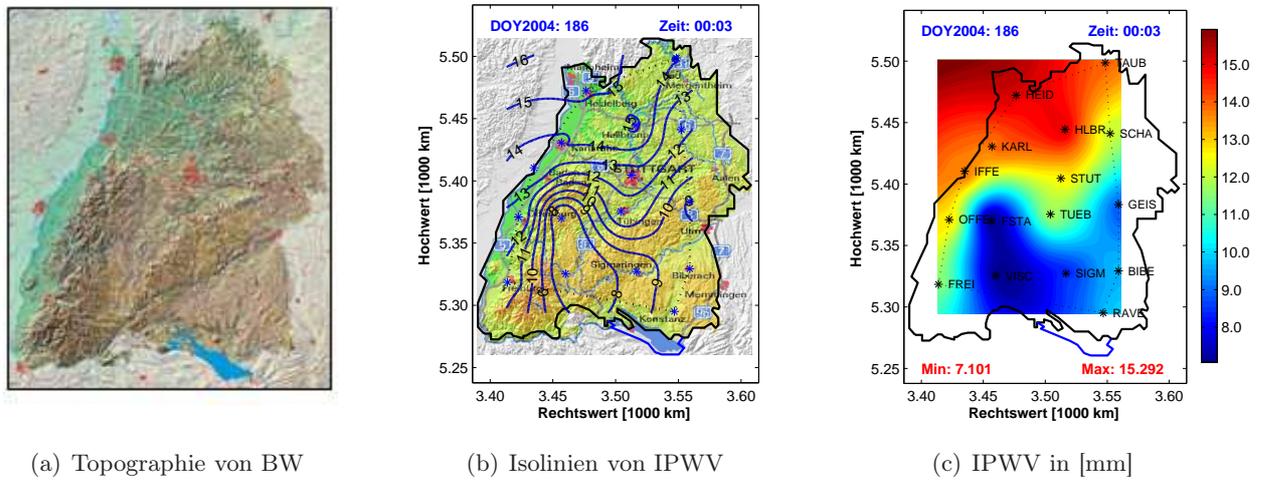


Abb. 9-17: Visualisierungsergebnisse einer Epoche, DOY2004: 186

Da die Stationshöhen bei der Bestimmung der Projektionspunkte der Massenmittelpunkte berücksichtigt werden, können die IPWV-Werte als die kondensierte Wasserdampfmenge zwischen der Kartenebene und der Erdoberfläche in Säulenhöhe interpretiert werden. Sie liegen in einem Wertebereich von 7-16 mm. Die Beträge der IPWV-Werte hängen stark von der Stationshöhe ab. Je höher die Station liegt, desto dünner ist die Atmosphäre über der Station und umso kleiner sind die IPWV-Werte. Dieser Zusammenhang ist durch Vergleich von Abb. 9-17(a) und Abb. 9-17(c) an den nördlich bzw. südlich liegenden Stationen (z.B. zwischen HEID und VISC) sehr deutlich zu erkennen.

9.4.2 Visualisierungsergebnisse im 30-Minuten-Takt

Durch die im 30-Minuten-Takt erzeugten Grafiken kann die Tagesvariation des Wasserdampfes mit geringerer zeitlicher Auflösung dargestellt werden als im 3-Minuten-Takt. Unter Anwendung der gleichen Skala stellt Abb. 9-18 das jeweilige Wasserdampfes am frühen Morgen, am Nachmittag und in der Nacht für den GPS-Tag 186 dar. Die Variation des Wasserdampfes im südlichen Bereich von BW ist besonders auffällig.

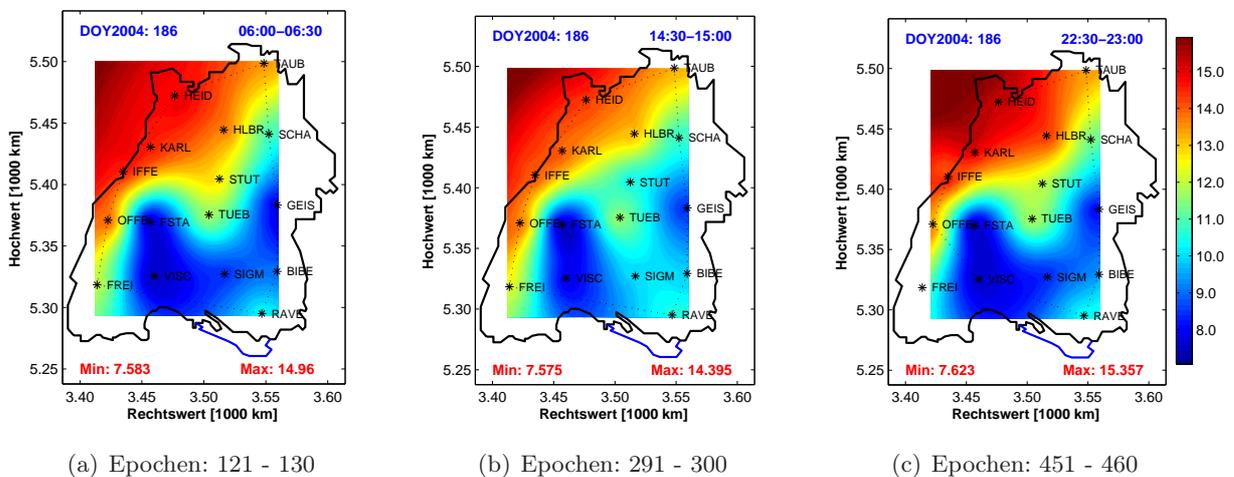


Abb. 9-18: Visualisierungsergebnisse aller 10 Epochen, IPWV in [mm], DOY2004: 186

Am frühen Morgen ist auf Grund der niedrigen Lufttemperatur der Wasserdampf nur in geringfügiger Menge in der Atmosphäre vorhanden. Im Laufe des Tags, mit zunehmender Lufttemperatur, verdunstet immer mehr Wasser und der Wasserdampfgehalt steigt entsprechend an. Nachmittags erreicht der Wasserdampfgehalt normalerweise seinen maximalen Wert. In der Nacht kühlt die Luft wieder ab und der Wasserdampf kondensiert zu flüssigem Wasser. In Abb. 9-18(c) unterscheidet sich der Gültigkeitsrahmen gegenüber den anderen beiden Grafiken (a, b), dies ist auf die fehlenden Beobachtungen an der Station FREI zurückzuführen.

Analog zu den oben beschriebenen Untersuchungen spielen die Wetterbedingungen beim Visualisierungsprozess auch eine wichtige Rolle. Diese zufälligen Einflüsse auf die Visualisierungsergebnisse sollen durch Abb. 9-19 belegt werden. Am GPS-Tag 190 wurde im ausgewählten Zeitintervall (4:00-5:30 Uhr) eine große Niederschlagsmenge über der Station KARL registriert. Die unter diesen Wetterbedingungen erzeugten Grafiken weisen im Vergleich zum GPS-Tag 186 mehr Inhomogenitäten und zeitliche Abhängigkeiten auf. Dies betrifft vor allem die nördlichen Gebiete in BW. Die in Unterkapitel 9.3.2 basierend auf der Analyse von SSNP getroffene meteorologische Aussage, dass die Regeneignisse am frühen Morgen dieses Tags im nördlichen Gebiet begannen und im Laufe der Zeit nach Süden zogen, kann hier bestätigt werden. Betrachtet man die Wasserdampfmenge nur über der Station KARL, werden größere IPWV-Werte innerhalb des ausgewählten Zeitintervalls am GPS-Tag 190 durch die dunklere Färbung visualisiert.

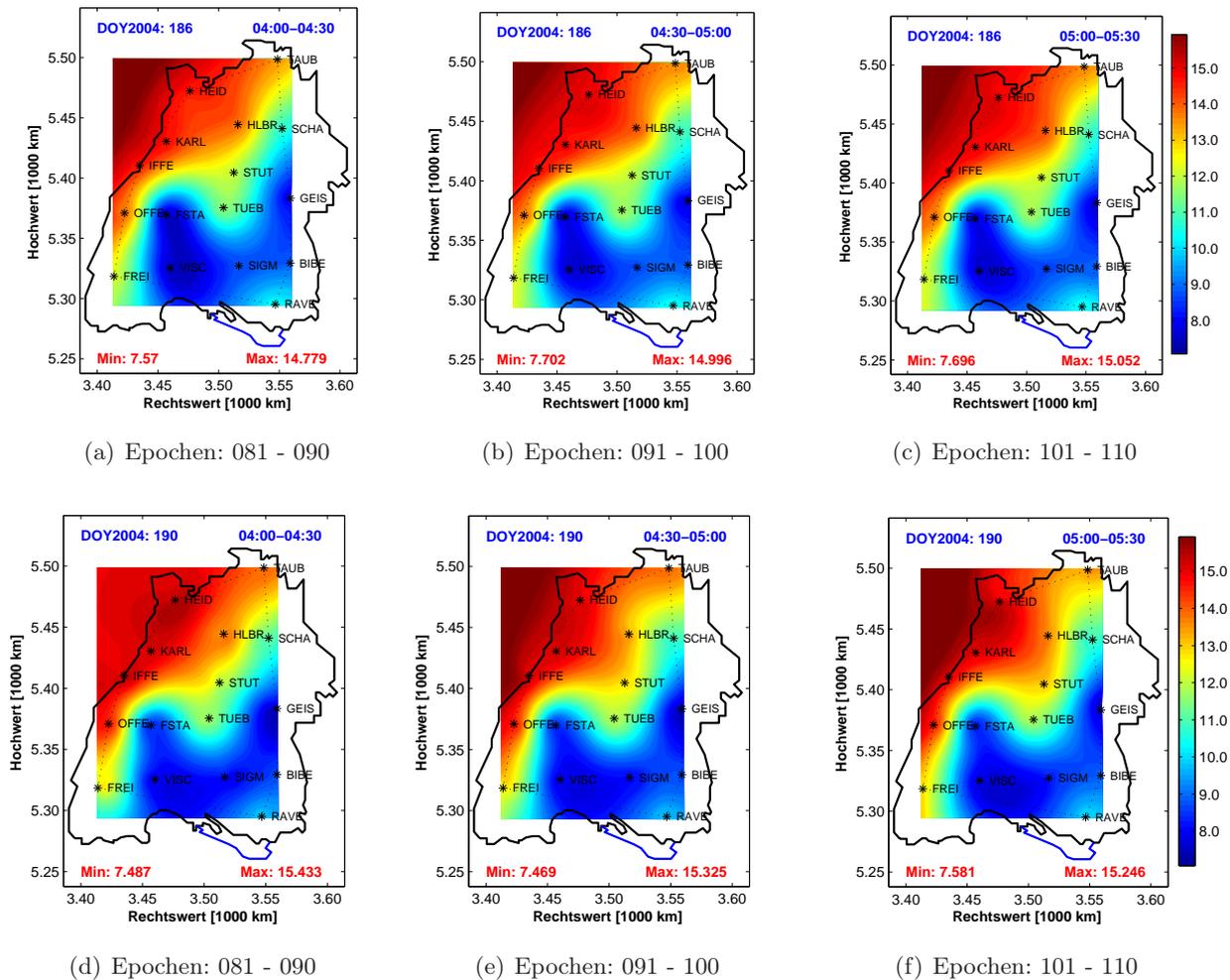


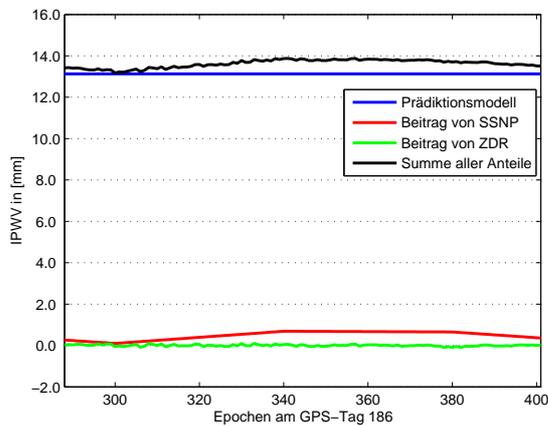
Abb. 9-19: Einflüsse der Wetterbedingungen auf Wasserdampfkarten, IPWV in [mm]

9.4.3 Analyse der Visualisierungsergebnisse

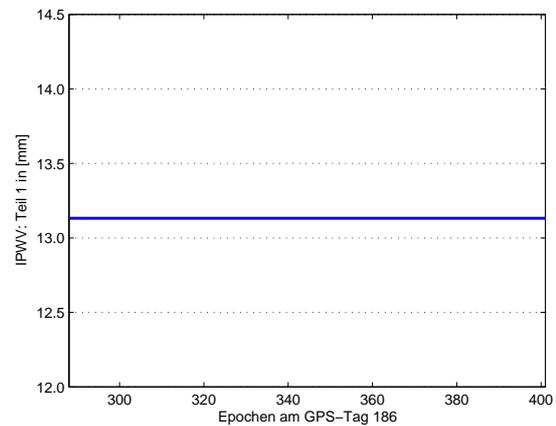
Ein Hauptziel dieser Analyse besteht darin, die Beiträge der einzelnen Anteile der dreiteiligen neutrosphärischen Modellierung zur IPWV-Visualisierung zu bestimmen und miteinander zu vergleichen. Zu diesem Zweck stellt Abb. 9-20 die einzelnen Anteile nicht nur in einer Grafik sondern auch getrennt dar.

Das Prädiktionsmodell besitzt den größten Anteil und spielt somit für die Bestimmung von Wasserdampffeldern die entscheidende Rolle. Basierend auf dem Saastamoinen-Modell mittels Extrapolation der meteorologischen Parameter hängt dieser Anteil jedoch nur von der Stationshöhe ab und bleibt für eine Station über den gesamten Untersuchungszeitraum konstant. Dieser Anteil liegt je nach Stationshöhe in einem Bereich von 7 mm bis 15 mm (s. Abb. 9-20(b)).

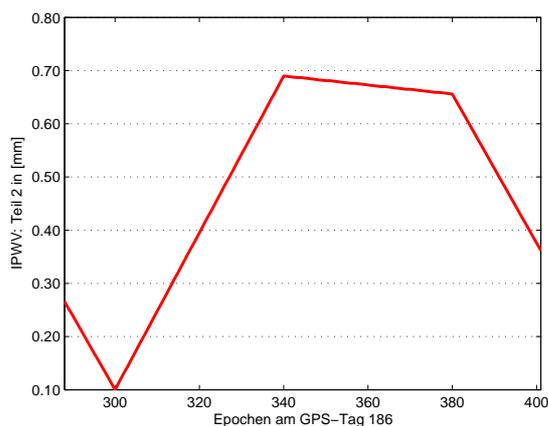
Unter der grundlegenden Annahme, dass die geschätzten SSNP sowohl den trockenen als auch den feuchten Anteil enthalten und die Verhältnisse der beiden Anteile mit denen des Prädiktionsmodells übereinstimmen, entspricht ein SSNP von ca. 18 cm einer kondensierten Wasserdampfmenge von etwa 1 mm Säulenhöhe (s. Abb. 9-20(c)). Bleiben die SSNP innerhalb von einem Meter, bewegen sich die resultierenden IPWV in einem Bereich von ca. 6 mm.



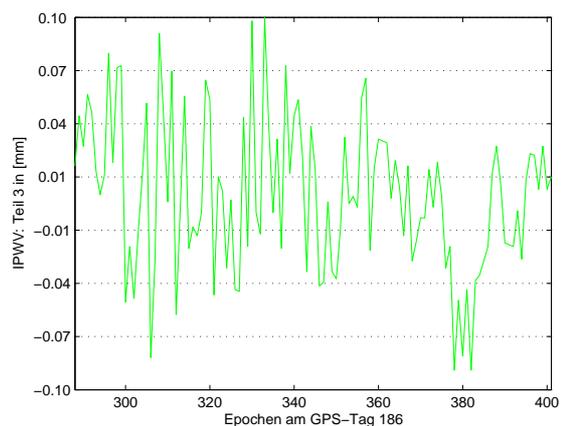
(a) Gesamte Darstellung



(b) Anteil 1: Prädiktionsmodell



(c) Anteil 2: Parameterschätzung (SSNP)



(d) Anteil 3: Azimutal-anisotroper Anteil (PZDR)

Abb. 9-20: Zenitale Beiträge der einzelnen IPWV-Anteile, Station: TAUB, PRN 26

Im Vergleich zu den anderen beiden Anteilen spielt der azimutal-anisotrope Anteil in diesem Fall eine untergeordnete Rolle. Da die meisten konvertierten PZDR des SAPOS[®]-BW-Netzes im Untersuchungszeitraum im Submillimeterbereich liegen, nehmen die daraus berechneten IPWV-Werte i.d.R.

Beträge unter 0.1 mm an (s. Abb. 9-20(d)). Zudem wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit davon ausgegangen, dass PZDR vollständig in der neutrosphärischen Modellbildung begründet sind.

Die Größe der PZDR stellt jedoch ein Maß für die Qualität der Modellierung physikalischer Prozesse dar. Die PZDR liegen dann in einem kleinen Bereich, wenn alle einwirkenden Einflussfaktoren, von der Entstehung der Satellitensignale im GPS-Satelliten über den Signalweg durch die Erdatmosphäre bis zum Empfang an der Beobachtungsstation, durch die angewendeten funktionalen und stochastischen Modelle ausreichend modelliert werden können. Im Bearbeitungsfall reicht die zweiteilige Modellierung durch Prädiktionsmodell und Zusatzparameterschätzung (SSNP) aus, um die räumliche Verteilung und die zeitliche Variation von Wasserdampffeldern zu beschreiben. Allerdings müssen unter extremen Wetterbedingungen, bei denen die Standardmethode das Wettergeschehen nicht mehr mit ausreichender Genauigkeit bzw. Zuverlässigkeit modellieren kann, die PZDR berücksichtigt werden, die somit wertvolle Informationen bzgl. zufälligen und nicht-modellierbaren systematischen Einflüsse beinhalten.

Im Folgenden soll auf der Basis der Visualisierungsergebnisse versucht werden, eine Größenordnung für DDR festzulegen, ab welcher die konvertierten PZDR bei der Modellierung nicht mehr zu vernachlässigen sind. Abb. 9-21 stellt die Visualisierungsergebnisse in IPWV, erhalten durch vergrößerte PZDR, im Vergleich mit dem nicht überhöhten Originalergebnis dar.

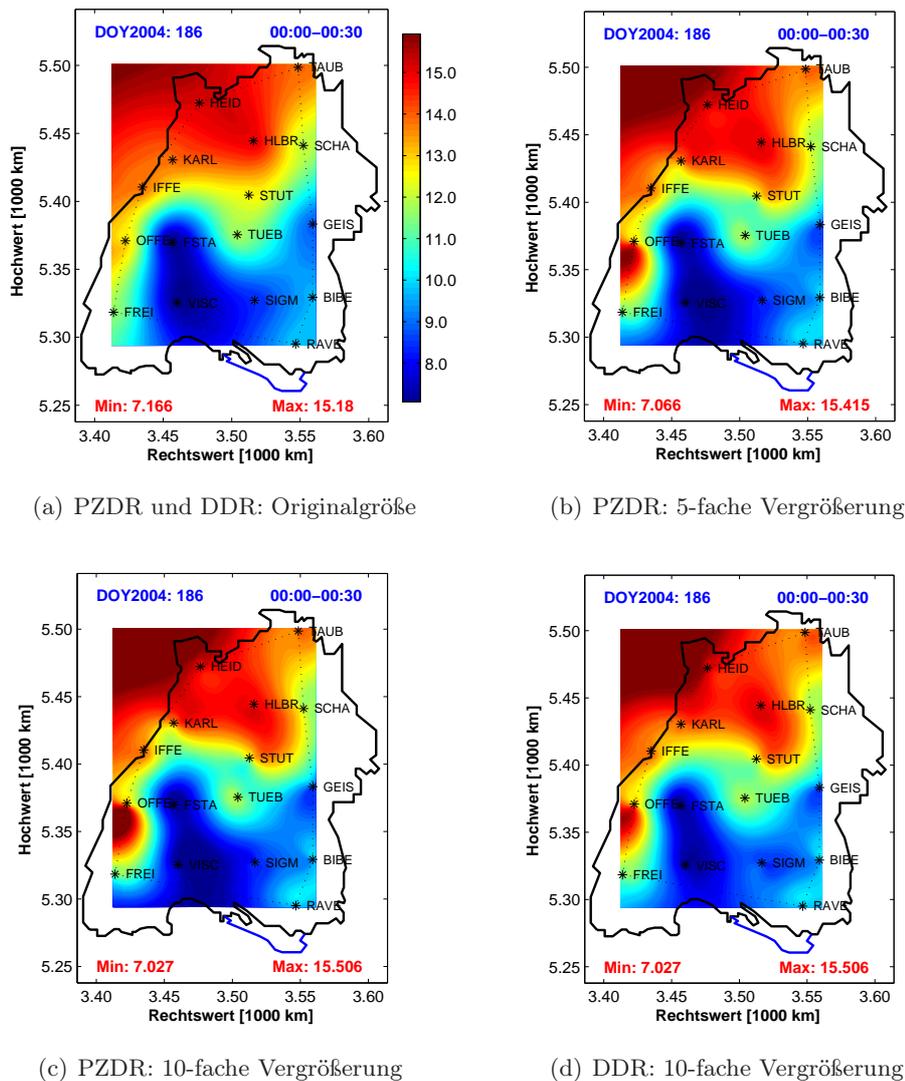


Abb. 9-21: Ergebnisse durch Überhöhung der Residuen, IPWV in [mm], Epochen: 001-010

Eine 5-fache Vergrößerung der PZDR ruft bemerkbare Unterschiede hervor. In diesem Fall liegen die meisten PZDR in einem Bereich von wenigen Millimetern. Durch eine 10-fache Vergrößerung sind die Unterschiede noch deutlicher zu erkennen, wobei die meisten PZDR größer als 5 mm sind. Ändert sich die Größenordnung der Residuen während der Konvertierung von DDR in PZDR nicht, kann diese Größenordnung 5 mm auch für die DDR verwendet werden. Um feststellen zu können, ob der Konvertierungsprozess die Größenordnung der Residuen beeinflusst, wurde eine 10-fache Vergrößerung der DDR durchgeführt. Mit daraus konvertierten PZDR werden die Wasserdampffelder erneut visualisiert und mit dem Ergebnis der 10-fachen Vergrößerung der PZDR verglichen (vgl. Abb. 9-21(c) und Abb. 9-21(d)). Es ist somit feststellbar, dass sich die Größenordnung der Residuen während der Konvertierung von DDR in PZDR kaum ändert. Darauf basierend ist die oben ermittelte Größenordnung von 5 mm für die DDR ebenso gültig. Dies bedeutet, dass die PZDR bei der neutrosphärischen Modellierung zur Bestimmung von Wasserdampffeldern insbesondere dann zu berücksichtigen sind, wenn die meisten gespeicherten DDR größer als 5 mm sind. Außerdem ist durch Vergleich der beiden Grafiken 9-21(a) und 9-21(d) zu erkennen, dass größere DDR zu detailreichen regionalen Variationen bzw. Inhomogenitäten in den Visualisierungsergebnissen von Wasserdampffeldern führen.

9.5 Vergleich der Visualisierungsergebnisse

Nachdem festgestellt wurde, dass die DDR in diesem Fall (SAPOS[®]-BW-Netz, Zeitraum: DOY2004: 186-193) keinen signifikanten Beitrag zur Bestimmung und Visualisierung von Wasserdampffeldern leisten, soll untersucht werden, wie stark sich die stationsgestützte zweiteilige Modellierung von der projektionspunktgestützten dreiteiligen Modellierung prinzipiell unterscheiden kann. Außerdem wird das Wasserdampffeld basierend auf der Parameterschätzung des BKG modelliert, um untersuchen zu können, ob mittels der EUREF-Stationen ein vergleichbares Visualisierungsergebnis zu erzielen ist. Des Weiteren wird ebenso versucht, den trockenen Anteil der neutrosphärischen Laufzeitverzögerung durch Messung des Oberflächendrucks zu bestimmen und ihn in die Modellbildung einzubeziehen.

9.5.1 Vergleich der zweiteiligen mit der dreiteiligen Modellierung

Abb. 9-22 stellt die mittels der zweiteiligen bzw. der dreiteiligen neutrosphärischen Modellierung erzeugten Isolinien von Wasserdampffeldern vergleichend dar. Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden neutrosphärischen Modellierungen besteht darin, dass die dreiteilige Modellierung durch Berücksichtigung der DDR das Raumsegment bzw. die Position der Satelliten in die Modellbildung einbezieht.

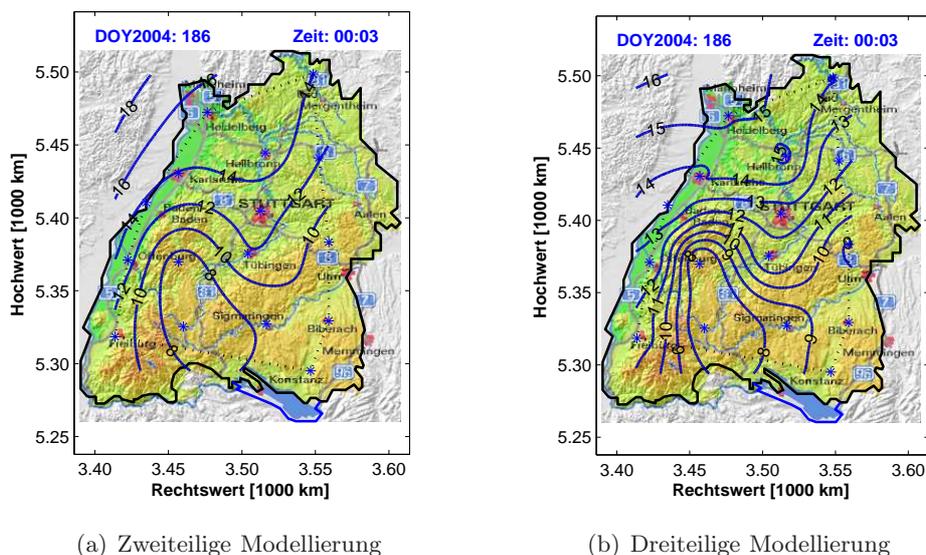
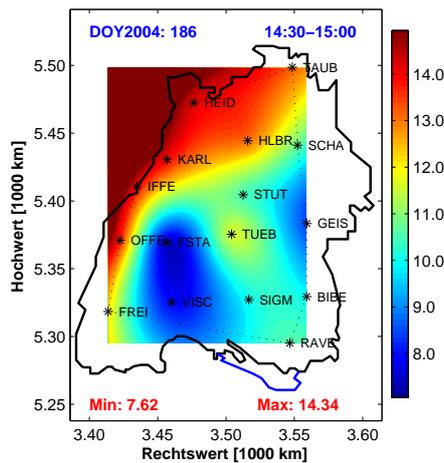


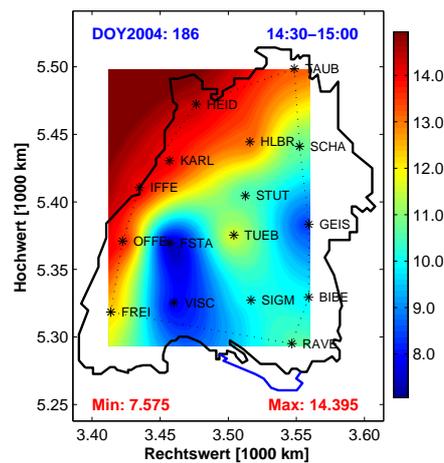
Abb. 9-22: Vergleich der Isolinien von Wasserdampffeldern

Hinsichtlich des Visualisierungsverfahrens ist die dreiteilige Modellierung von Projektionspunkten gestützt, während die zweiteilige Modellierung auf Stationen basiert ist. Auf Grund einer viel größeren Anzahl von Stützpunkten durch die Berücksichtigung von Satellitenpositionen lässt sich die räumliche Verteilung des Wasserdampfs durch die dreiteilige Modellierung detailreich aufgelöst beschreiben. Dieser Vorteil der dreiteiligen Modellierung ist durch einen Vergleich der Dichte der Isolinien in Abb. 9-22 feststellbar.

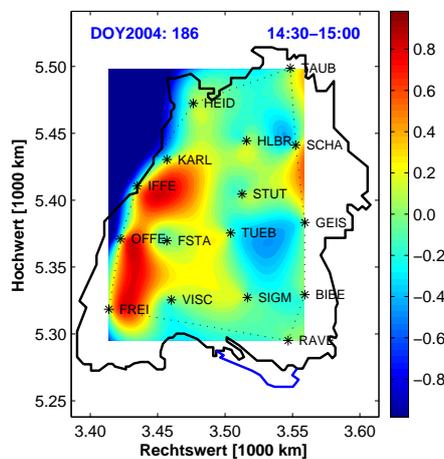
Abb. 9-23 stellt die Unterschiede dieser beiden Modellierungen unter trockenen Wetterbedingungen in den zugehörigen Wasserdampfkarten dar. Zum Vergleich werden die Visualisierungsergebnisse im 30-Minuten-Takt verwendet.



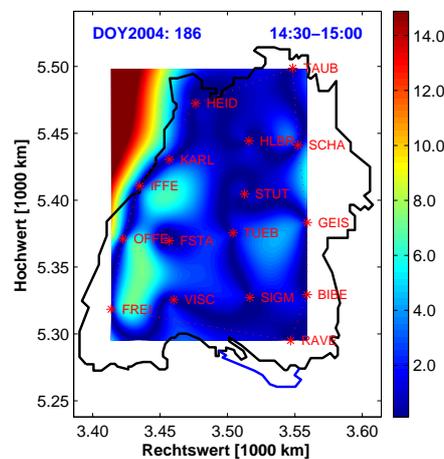
(a) Zweiteilige IPWV (M2) in [mm]



(b) Dreiteilige IPWV (M3) in [mm]



(c) Absolute Differenz (M3-M2) in [mm]



(d) Relative Differenz $|M3-M2|/M3$ in [%]

Abb. 9-23: Vergleich der Wasserdampfkarten der zweiteiligen (M2) und dreiteiligen Modellierung (M3)

Ein erster Blick liefert keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Wasserdampfkarten 9-23(a) und 9-23(b). Im Vergleich zum durch die zweiteilige Modellierung gegebenen Ergebnis können mehr Details in Abb. 9-23(b) festgestellt werden. Außerdem liefert die dreiteilige Modellierung außerhalb des Gültigkeitsrahmens zum Teil sinnvolle Zahlenwerte, während fast alle extrapolierten IPWV-Werte der zweiteiligen Modellierung außerhalb des Skalenbereichs liegen. Um die Unterschiede der beiden Modellierungsmethoden in Visualisierungsergebnissen und deren prozentualen Beitrag zum gesamten IPWV noch deutlicher präsentieren zu können, werden absolute bzw. relative Differenzbilder bezogen auf Gitterpunkte in einem Abstand von 1 km erzeugt und visualisiert (s. Abb. 9-23(c) und 9-23(d)).

In großen Teilen des Darstellungsgebiets bewegen sich die absoluten Differenzen an diesem Tag zwischen -0.2 mm und 0.2 mm und der höchste prozentuale Betrag der absoluten Differenzen der ermittelten IPWV-Werte liegt bei 6%. Die größten Zahlenwerte in den Differenzbildern sind i.d.R. im südwestlichen Bereich von BW zu finden. Unter feuchten Wetterbedingungen zeigen sich die Unterschiede zwischen den beiden Modellierungsvarianten in Abb. 9-24 noch deutlicher. In diesem Fall weisen die PZDR größere Zahlenwerte auf und der anisotrope Anteil der neutrosphärischen Einflüsse leistet einen größeren Beitrag zur Bestimmung und Visualisierung von Wasserdampffeldern. In der Nähe der Station FREI ist die größte relative Differenz von ca. 10% in Abb. 9-24(d) deutlich zu erkennen. Für Aufgaben, bei denen eine höhere Genauigkeitsanforderung bzw. eine bessere räumliche Auflösung im Vordergrund steht, empfiehlt sich somit die aufwendige dreiteilige Modellierungsmethode.

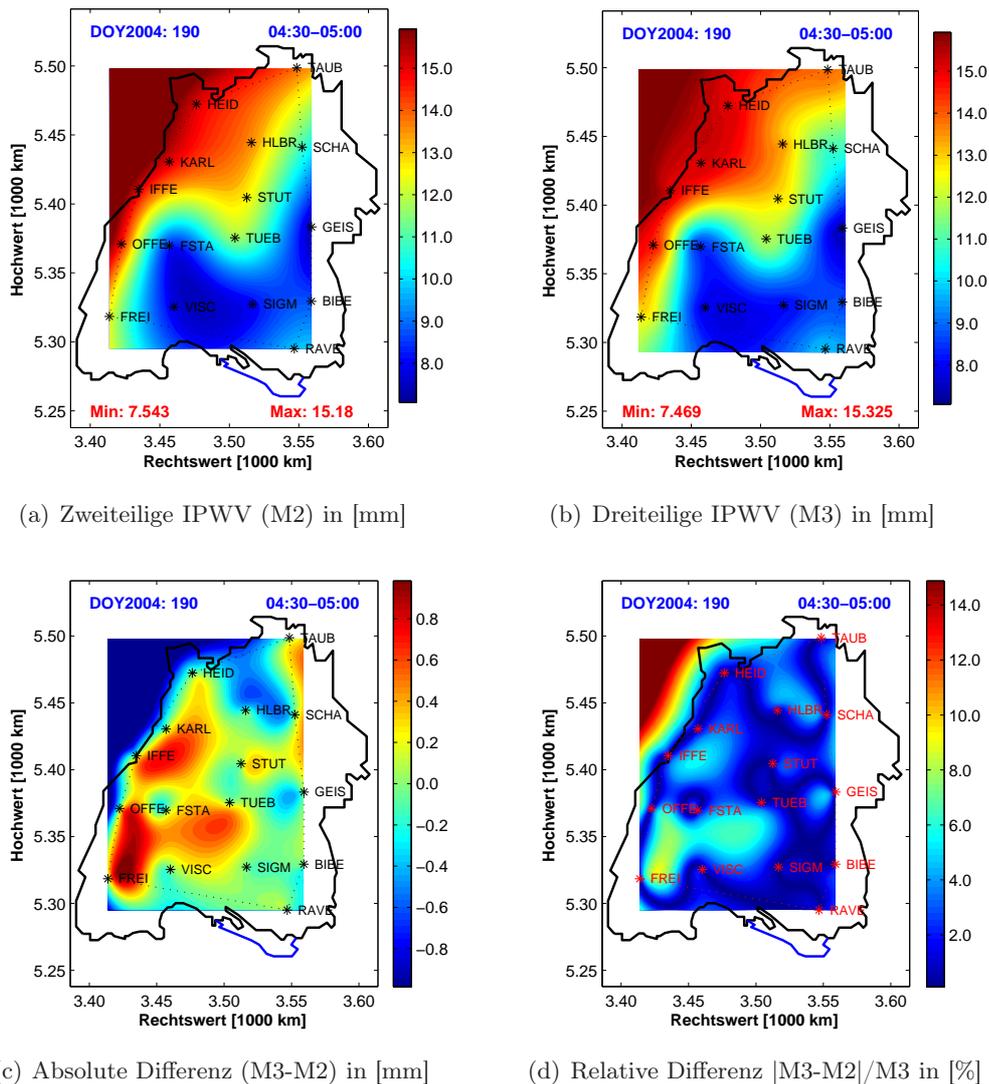


Abb. 9-24: Vergleich der Wasserdampfkarten der zweiteiligen (M2) und dreiteiligen (M3)

Zwar bietet die dreiteilige Modellierung unter Berücksichtigung von Residueninformation eine detailreichere Darstellungsmöglichkeit zur Präsentation der räumlichen Verteilung und der zeitlichen Variation von Wasserdampffeldern. Die Berücksichtigung der satellitenbezogenen Informationen ist jedoch mit hohem Zeit- und Rechenaufwand verbunden. Für einen Rechenvorgang von zehn Epochen mit anschließender Mittelbildung der IPWV-Werte benötigt die zweiteilige bzw. dreiteilige Modellierung 22 bzw. 220 Sekunden⁹. Vom Standpunkt der Wirtschaftlichkeit ist somit die zweiteilige Modellierung

⁹Hardware: Intel[®] Pentium[®] M Prozessor 1.40 GHz, 512 MB DDR-Ram

vorteilhafter; da nur die stationsbezogenen Informationen zur Berechnung und Visualisierung benötigt werden, läuft der Modellierungsprozess viel schneller und einfacher ab. Die erzielten Visualisierungsergebnisse der zweiteiligen Modellierung sind i.d.R. mit denen der dreiteiligen Modellierung zu vergleichen. Ohne die komplexe und zeitaufwendige Konvertierung von DDR in PZDR können graphische Darstellungen von Wasserdampffeldern direkt nach der GNSS-Auswertung erzeugt werden.

9.5.2 Vergleich der dreiteiligen Modellierung mit der BKG-Lösung

Basierend auf den Stationen des EPN (EUREF Permanent Network), die durch Rote Punkte in Abb. 9-25(a) gekennzeichnet sind, wird die Bestimmung von Neutrosphärenparametern auch vom BKG im Rahmen eines Sonderprojekts „Troposphere Parameter Estimation“ durchgeführt. Die täglichen Lösungen der einzelnen LAC (Local Analysis Centres) werden in einem Post-Processing-Modul nach dem heutigen IGS-Standard (1 Std.) epochenweise kombiniert, wodurch sich bspw. die gewichteten Mittelwerte der Neutrosphärenparameter ermitteln lassen, Ausreißertests durchgeführt werden können oder die Differenzen zwischen den individuell bestimmten und den gemittelten Lösungen analysiert werden können. Bezogen auf die Referenzepeche 11106 (GPS-Woche: 1110, GPS-Tag: 006), zu der die erste kombinierte Lösung berechnet wurde, können die geschätzten neutrosphärischen Laufzeitverzögerungen für ganz Deutschland in einer relativen Darstellungsform veranschaulicht werden (s. Abb. 9-25(b)).

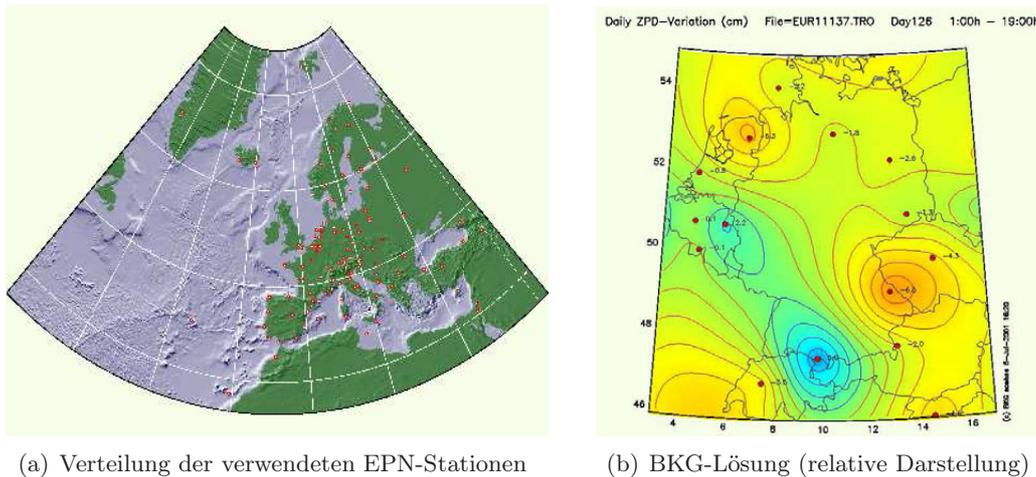


Abb. 9-25: Neutrosphärische Laufzeitverzögerung durch die BKG-Lösung

Quelle: http://www.epncb.oma.be/_organisation/projects/trop_sp/

Um die BKG-Lösung mit den Ergebnissen der in dieser Arbeit verwendeten dreiteiligen Modellierung vergleichen zu können, werden relevante EPN-Stationen (EUSK, KARL, OBE2, PFAN, WTZR und ZIMM) ausgewählt. Basierend auf deren geschätzten Neutrosphärenparametern kann das Wasserdampffeld über BW visualisiert werden. Vor der Visualisierung muss der feuchte Anteil extrahiert werden, da die vom BKG geschätzten Parameter die gesamte zenitale neutrosphärische Laufzeitverzögerung $\Delta\rho_{ges}^0$ beinhalten. Hierbei wird ebenfalls davon ausgegangen, dass die gesamte neutrosphärische Laufzeitverzögerung aus Prädiktionsmodell und Zusatzparametern besteht und die Zusatzparameter sowohl einen trockenen als auch einen feuchten Anteil beinhalten. Die folgenden Rechenformeln werden für die Extrahierung der feuchten Anteile benötigt:

$$\begin{aligned}
 SSNP_{ges} &= \Delta\rho_{ges}^0 - \Delta\rho_{Saas,d}^0 - \Delta\rho_{Saas,w}^0 \\
 SSNP_d &= SSNP_{ges} \frac{\Delta\rho_{Saas,d}^0}{\Delta\rho_{Saas,d}^0 + \Delta\rho_{Saas,w}^0} \\
 \Delta\rho_w^0 &= \Delta\rho_{ges}^0 - \Delta\rho_{Saas,d}^0 - SSNP_d \\
 IPWV &= \Pi \cdot \Delta\rho_w^0.
 \end{aligned} \tag{9-12}$$

Gestützt durch die ausgewählten EPN-Stationen und mittels der Neutrosphärenparameter des BKG wird das Wasserdampfgebiet über BW in den Grafiken 9-26(a) und 9-26(c) visualisiert. Zum Vergleich werden die entsprechenden Visualisierungsergebnisse der dreiteiligen Modellierung herangezogen.

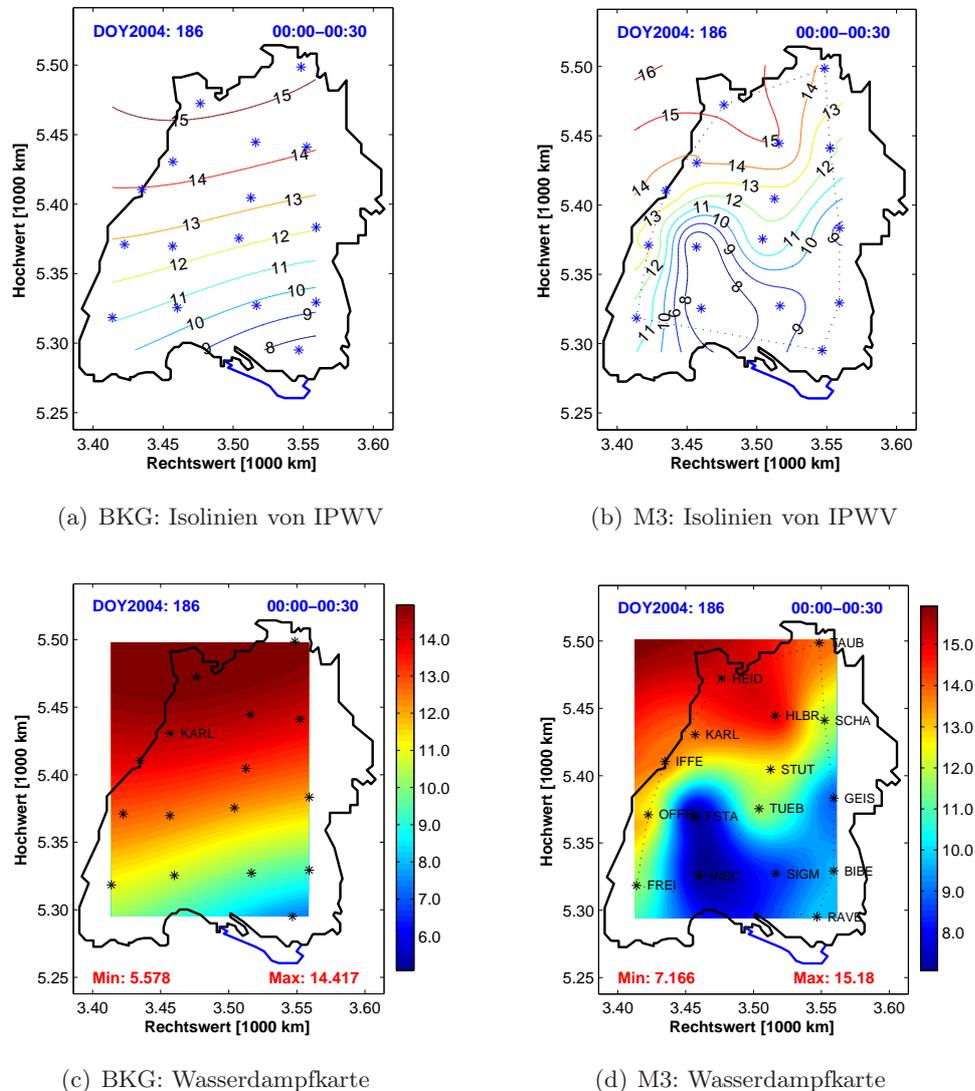


Abb. 9-26: Vergleich der dreiteiligen Modellierung mit der BKG-Lösung

Auf Grund der geringen Anzahl der einbezogenen EPN-Stationen und der großen Entfernungen zwischen den Stützpunkten zeigt sich die räumliche Verteilung des Wasserdampfgebietes in den Visualisierungsergebnissen von BKG sehr homogen. Der oben beschriebene Trend, dass die ermittelte Wasserdampfmenge von Norden nach Süden abnimmt, ist eindeutig erkennbar. Die BKG-Lösung ist zur Darstellung großräumiger Wasserdampfverteilungen z.B. für Deutschland oder Europa gedacht und ihre räumliche Auflösung reicht für lokale Anwendungen nicht aus. Im Vergleich zu dieser epochenbezogenen relativen Darstellung kann das neutrosphärische Verhalten durch Darstellung der absoluten Wasserdampfmenge besser veranschaulicht werden.

9.5.3 Neutrosphärische Modellierung durch den Oberflächenluftdruck

Am Schluss dieser Arbeit wird abweichend von der oben beschriebenen Modellbildung versucht, den feuchten Anteil der neutrosphärischen Laufzeitverzögerung durch Subtraktion des trockenen Anteils vom gesamten zu bestimmen. Durch Erfassung von meteorologischen Parametern z.B. Lufttemperatur,

Luftdruck und relativer Luftfeuchtigkeit kann der trockene Anteil in der Praxis mit guter Genauigkeit berechnet werden [Bevis et al., 1992]. Im behandelten Anwendungsfall stehen Druckinformationen des ECMWF (European Center for Medium range Weather Forecasting)-Wettermodells mit einer zeitlichen Gültigkeit von 6 Stunden und einer räumlichen Auflösung von 0.25 Grad zur Verfügung. Da sich die Druckinformationen in den Gitterpunkten auf das ECMWF-Höhenmodell beziehen und sich die durch Gitterpunkte interpolierten Stationshöhen von denen aus GNSS-Auswertungen zum Teil um bis zu 200 m unterscheiden, muss eine Reduktion dieser Druckwerte basierend auf den Höhenunterschieden mittels

$$\begin{aligned} p_1 - p_2 &= \rho \cdot g \cdot (h_2 - h_1) \\ \rho &= \frac{p}{R \cdot T} \\ T &= T_0 - 0.0065(h - h_0) \end{aligned} \quad (9-13)$$

mit

- ρ : Luftdichte in [kg/m³]
- p : Luftdruck in [Pa]
- T : Lufttemperatur in [K]
- h : Stationshöhe in [m]
- R : Gaskonstante für trockene Luft $R = 287.05$ [J/kg K]
- h_0 : Höhe der Meeresoberfläche $h_0 = 0$ [m]
- T_0 : Lufttemperatur in h_0 , $T_0 = 291.15$ [K]

durchgeführt werden. Unter Vernachlässigung der Strahlkrümmung ergibt sich der trockene Anteil der zenitalen neutrosphärischen Laufzeitverzögerung in Abhängigkeit vom Oberflächenluftdruck p :

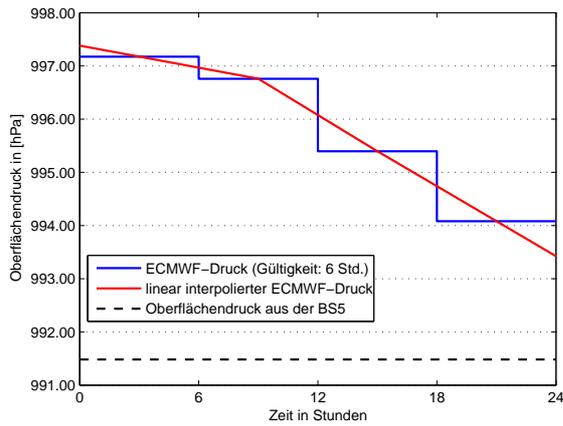
$$\Delta\rho_d^0(p) \approx \Delta\rho_{hydr}^0(p) = 0.002277Dp. \quad (9-14)$$

Die Größe D lässt sich mittels der Formel (4-14) in Abhängigkeit von der geographischen Breite und der Höhe der Station berechnen. Neben der o.g. Methode, unter Anwendung des Oberflächenluftdrucks, kann der trockene Anteil auch mittels der zweiteiligen Modellierung basierend auf Prädiktionsmodell und Zusatzparameter folgendermaßen bestimmt werden:

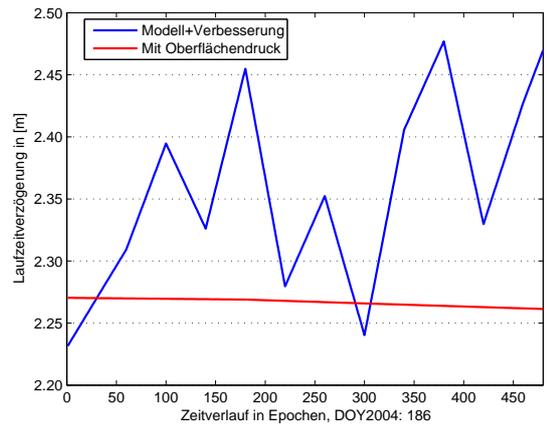
$$\begin{aligned} SSNP_d &= SSNP_{ges} \frac{\Delta\rho_{Saas,d}^0}{\Delta\rho_{Saas,d}^0 + \Delta\rho_{Saas,w}^0} \\ \Delta\rho_d^0 &= \rho_{Saas,d}^0 + SSNP_d \end{aligned} \quad (9-15)$$

Für die epochenweise Berechnung des trockenen Anteils der neutrosphärischen Laufzeitverzögerung unter Anwendung des Oberflächenluftdrucks werden die an die Stationshöhen angepassten Druckwerte auch zeitlich linear inter- bzw. extrapoliert (s. Abb. 9-27(a)). Die durch Modell und mittels des Oberflächenluftdrucks bestimmten trockenen Anteile der neutrosphärischen Laufzeitverzögerung werden in Abb. 9-27(b) zusammen dargestellt.

Zwischen den beiden Ergebnissen ist ein Offset von im Mittel ca. 5 cm deutlich zu erkennen. Dieser Offset lässt sich folgendermaßen erklären: Einerseits basiert die in BS5 implementierte meteorologische Modellierung auf der azimuthalen Isotropieannahme für die Neutrosphäre und wird durch Extrapolation der meteorologischen Parameter (T , p , rh) in der GNSS-Auswertung umgesetzt. In diesem Vergleichsfall unterscheiden sich die in BS5 modellierten Druckwerte von denen aus dem ECMWF-Wettermodell (s. Abb. 9-27(a)). Andererseits sind die Druckinformationen aus dem ECMWF-Wettermodell auch wiederum Modellwerte, die sich von den realen an der Erdoberfläche erfassten Druckwerten unterscheiden. Darüber hinaus werden diverse Vereinfachungen bei der Anpassung der ECMWF-Druckwerte an die Stationshöhen vorgenommen.



(a) Vergleich der modellierten Druckwerte



(b) Vergleich der berechneten trockenen Anteile

Abb. 9-27: Neutrosphärische Modellierung mit Oberflächenluftdruck, Station: KARL

Um den trockenen Anteil durch Wetterdaten genau und zuverlässig modellieren zu können, sind reale meteorologische Messungen von T , p , rh mit guter zeitlicher Auflösung notwendig. Darauf basierend, kombiniert mit der neutrosphärischen Modellierung, kann die feuchte Komponente aus dem mittels meteorologischer Daten bestimmten trockenen Anteil und dem gesamten Anteil aus GNSS-Auswertung mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden.

10 Zusammenfassung und Ausblick

In Unterkapitel 10.1 wird die vorliegende Arbeit zusammengefasst und in Unterkapitel 10.2 wird ein Ausblick hinsichtlich Modellerweiterung und -verfeinerung gegeben.

10.1 Zusammenfassung

Die neutrosphärischen Einflüsse auf die GNSS-Signale können durch Prädiktionsmodell und Zusatzparameterschätzung im Rahmen der GNSS-Auswertung modelliert werden. Dieser zweiteilige Ansatz der neutrosphärischen Modellierung ist Ausgangspunkt für die Untersuchung der vorliegenden Arbeit. Auf Basis der gewöhnlich zweiteiligen Modellierung wird eine Möglichkeit untersucht, Wasserdampf-felder unter Berücksichtigung von DDR aus GNSS-Auswertungen zeitlich und räumlich hochauflösend zu bestimmen.

Auf Grund des hohen Rechen- und Zeitaufwands bei der Konvertierung von DDR in PZDR legt diese Arbeit auf der Basis der Untersuchungsergebnisse eine Größenordnung für die DDR fest, ab welcher die Residueninformationen bei der neutrosphärischen Modellbildung zur Bestimmung von Wasserdampf-feldern nicht zu vernachlässigen sind. Der Ablauf dieser Arbeit lässt sich im Wesentlichen in die folgenden drei Schritte gliedern:

1. Die DDR aus der GNSS-Auswertung werden unter der „zero mean“-Annahme in PZDR konvertiert und die daraus resultierenden PZDR können bei der Berechnung der gesamten SWD-Werte entlang der Sichtlinie zwischen einem Satelliten und einer Empfangsstation berücksichtigt werden.
2. Die Einflüsse verschiedener Faktoren (z.B. Basislinienlänge, Mehrwegeeffekte und Auswertestrategie) bspw. auf die Genauigkeit der neutrosphärischen Modellierung werden durch rechnerische bzw. graphische Analyse von PZDR und SSNP dimensioniert.
3. Eine zenitale graphische Darstellungsmöglichkeit zur Präsentation der ermittelten Wasserdampfverteilungen wird in Abhängigkeit von den IPWV-Werten entwickelt. Anhand der einzelnen Berechnungen und Darstellungen für jede Epoche können Animationen in einem 3- bzw. 30-Minuten-Takt generiert werden.

Nach der Konvertierung von DDR in PZDR werden alle Residueninformationen hinsichtlich ihrer Verteilungseigenschaft untersucht, da die „zero mean“-Annahme eine Normalverteilung der DDR und Beibehaltung dieser Verteilung während des Konvertierungsprozesses voraussetzt. Anhand der Form der in Unterkapitel 8.2 dargestellten Histogramme und Dichtefunktionen von DDR, PSDR und PZDR kann belegt werden, dass die o.g. Voraussetzungen in jedem Konvertierungsschritt von DDR in PZDR erfüllt sind. Die Untersuchung von PZDR wurde dabei nicht nur stationsbezogen sondern auch satellitenbezogen durchgeführt. Die meisten Residuen liegen im Anwendungsfall (SAPOS[®]-BW-Netz, Zeitraum: DOY2004: 186-193) unter 2 mm. Eine Elevationsabhängigkeit ist bei allen Arten von Residuen vorhanden. Eine systematische Verkleinerung der Standardabweichungen nach jedem Konvertierungsschritt kann festgestellt werden und dies lässt sich durch das Fehlerfortpflanzungsgesetz erklären.

Vor dem Beginn der Untersuchung und Dimensionierung der Einflussfaktoren werden diese zunächst in systematische und zufällige Faktoren eingeteilt. Die zufälligen Faktoren werden bei der Dimensionierung ausgeschlossen. Bei systematischen Einflüssen wird zwischen stationsspezifischen und von der Auswertestrategie abhängigen Faktoren unterschieden. Bei PZDR spielt die elevationsabhängige Gewichtung eine dominierende Rolle, die Einfluss auf die Vorkommastelle der Standardabweichung (hier Millimeterbereich) hat. Bei SSNP wirkt sich die Basislinienlänge am stärksten aus, sie wirkt zusammen mit Mehrwegeeffekten und elevationsabhängiger Gewichtung auf die Vorkommastelle der Standardabweichung von SSNP, und zwar in Zentimeterbereich, ein. Bei PZDR spielt die Basislinienlänge eine untergeordnete Rolle, während die Mehrwegeeffekte auf die erste Nachkommastelle der Standardabweichung einwirken. Die Auswirkungen der anderen zwei systematischen Faktoren (Strategien zur

Phasenmehrdeutigkeitslösung, Auswahl der neutrosphärischen Prädiktionsmodelle) beeinflussen die Standardabweichungen von PZDR und SSNP nur geringfügig, wobei sich die Strategien zur Phasenmehrdeutigkeitslösung im Vergleich zu neutrosphärischen Prädiktionsmodellen in den beiden Fällen stärker auswirken.

Zur Visualisierung von Wasserdampffeldern wird auf Grund der Elevationsabhängigkeit von SWV-Werten die Größe IPWV gewählt, welche eine zenitale Darstellung von Wasserdampf als kondensiertes Wasser in Säulenhöhe ermöglicht.

Die SSNP der Referenzstation ergeben sich durch eine Mittelbildung, zu der alle Basislinien beitragen.

Mittels einer linearen Inter- bzw. Extrapolation der SSNP kann eine graphische Darstellung der ermittelten Wasserdampffelder auf der Basis von Prädiktionsmodell, Zusatzparametern und PZDR für jede Epoche erstellt werden. Durch eine Mittelbildung von IPWV-Werten über zehn Epochen (Takt-rate: 3 Minuten) lassen sich Wasserdampffelder alle 30 Minuten graphisch veranschaulichen. Bei der gewöhnlichen zweiteiligen Modellierung dienen zenitale Werte der Empfangsstationen als Stützpunkte für den Visualisierungsprozess. Im Vergleich dazu werden hier die Projektionspunkte der Massenmittelpunkte von SWV auf jeder Sichtlinie individuell bestimmt und als Stützpunkte für die Visualisierung verwendet. Basierend auf den einzelnen Darstellungen lassen sich Animationen im 3- bzw. 30-Minuten-Takt generieren, durch die die zeitlichen Variationen der Verteilung des Wasserdampfs veranschaulicht werden können.

Durch Vergleich der einzelnen Beiträge der drei IPWV-Anteile lässt sich die Frage beantworten, inwieweit die PZDR einen signifikanten Beitrag zur Bestimmung von Wasserdampffeldern leisten können. Bei den in dieser Arbeit verwendeten Datensätzen sind die Beiträge von Residuen so gering, dass sie bei der Modellierung vernachlässigt werden können. Kleine Residuenwerte besagen, dass sowohl das funktionale als auch das stochastische Modell bei der GNSS-Auswertung zutreffend definiert sind. Falls die Modelle in speziellen Fällen z.B. unter extremen Wetterbedingungen oder ungünstigen Beobachtungssituationen nicht mehr in der Lage sind, die Einflüsse auf GNSS-Beobachtungen zutreffend zu beschreiben, werden die Residuenwerte größer. Um solche Fälle zu simulieren und die dadurch entstehenden Einflüsse zu veranschaulichen werden die PZDR um das 5- bzw. 10-fache und ebenso die DDR um das 10-fache vergrößert. Dabei wird festgestellt, dass die Größenordnung der Residuen während des Konvertierungsprozesses von DDR in PZDR unverändert bleibt. Darauf basierend wird eine Größenordnung von ca. 5 mm für die DDR festgelegt, ab welcher die Residueninformationen bei der Modellierung zu berücksichtigen sind.

Des Weiteren werden die Visualisierungsergebnisse der zweiteiligen bzw. dreiteiligen neutrosphärischen Modellierung zur Bestimmung von Wasserdampffeldern miteinander verglichen. Auf Grund der kleinen Beiträge der Residueninformationen unterscheiden sich die Ergebnisse nur geringfügig voneinander. Trotzdem kann eine bessere räumliche Interpretation von Wasserdampffeldern durch Einbeziehen der satellitenbezogenen Informationen erreicht werden. Da die Berücksichtigung von DDR einen hohen Rechen- und Zeitaufwand in Anspruch nimmt, stellt die zweiteilige Modellierung jedoch eine wirtschaftliche Modellierungsmöglichkeit dar. Ob man in der Praxis die neutrosphärische Modellierung zur Bestimmung von Wasserdampffeldern mit oder ohne die DDR durchführt, hängt neben dem wirtschaftlichen Aspekt von der Aufgabenstellung und der Größenordnung der DDR ab.

Im Vergleich zur nicht für lokale Anwendungen konzipierten BKG-Lösung zeichnen sich die Ergebnisse der dreiteiligen neutrosphärischen Modellierung nicht nur durch eine bessere Interpretierbarkeit von Wasserdampfverteilungen mittels der absoluten Darstellung, sondern auch durch eine bessere räumliche Auflösung aus.

10.2 Ausblick

Durch die Anwendung der in dieser Arbeit vorgestellten dreiteiligen neutrosphärischen Modellierung kann gezeigt werden, dass eine Verbesserung hinsichtlich der zeitlichen und räumlichen Auflösung der bestimmten Wasserdampffelder durch diesen Modellansatz erreicht werden kann. Dieses Verfahren kann im Prinzip zur Bestimmung und Darstellung hochauflösender zweidimensionaler Wasserdampffelder eingesetzt werden.

Weiterhin sind Modellverfeinerungen, z.B. die Erweiterung der Modellierungs- bzw. Darstellungsdimension von 2D in 3D denkbar und damit hinreichend Entwicklungsraum bzw. Ansatzpunkte für weitere Untersuchungen und Experimente vorhanden.

Die wesentliche und schwierigste Erweiterung besteht in der Modellverbesserung zur Bestimmung der neutrosphärischen Einflüsse. Auf Grund komplexer physikalischer Prozesse in der Atmosphäre weisen die in der BS5 implementierten Modellansätze zur Beschreibung des atmosphärischen Verhaltens noch gewisse Unzulänglichkeiten auf. Im Rahmen der GNSS-Auswertung mit der BS5 versucht man die neutrosphärischen Einflüsse auf GNSS-Signale mittels eines einfachen Modells durch ZWD und Gradientenparameter zu beschreiben. Dieses einfache Modell ist bei inhomogener bzw. komplexer Atmosphäre nicht mehr in der Lage, die Neutrosphäreneinflüsse mit ausreichender Genauigkeit zu modellieren. Die Unzulänglichkeit dieses einfachen Modells wirkt sich durch Ausgleichung nach dem Prinzip der kleinsten Quadrate auf die Genauigkeit und Zuverlässigkeit aller geschätzten Parameter aus. Der in [Alber et al., 2000] beschriebene Algorithmus versucht den Mangel in der Modellierung durch Berücksichtigung von Residueninformationen unter einer idealen „zero mean“-Annahme zu beheben. Die limitierenden Modellierungsfehler sind jedoch auf eine „non zero mean“-Atmosphäre zurückzuführen. Deshalb nach [Elosegui und Davis, 2003] liefert dieser Konvertierungsalgorithmus nur genaue und zuverlässige PZDR, wenn sich die Atmosphäre genau so verhält, wie sie in der GNSS-Auswertung modelliert wird. Daher ist im Auswerteprogramm eine Modellverbesserung für komplexe Wetter-situationen notwendig.

Neben dem azimutal-anisotropen Anteil beinhalten die konvertierten PZDR noch Fehleranteile durch Mehrwegeeffekte und Antennenphasenzentrumsvariationen, die im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt wurden. Unter Anwendung absoluter Kalibrierwerte der Antennen ist davon auszugehen, dass die Fehler durch die Phasenzentrumsvariationen vernachlässigbar klein sind. Auf Grund kleiner Zahlenwerte von DDR werden hier die Einflüsse durch den Mehrwegeeffekt ebenfalls vernachlässigt. Basierend auf der Erkenntnis, dass die PZDR ab einer Größenordnung von 5 mm schon einen signifikanten Beitrag zur Bestimmung von Wasserdampffeldern leisten können, muss der Fehleranteil durch den Mehrwegeeffekt in diesem Fall von PZDR extrahiert werden. Da sich diese Fehlereinflüsse in unveränderter örtlicher Umgebung in Sternzeit wiederholen, empfehlen [Alber et al., 2000] und [Braun et al., 2000] die sog. „multipath maps“, die durch „stacking“ von täglichen Residuen erstellt werden und zur Reduktion von Mehrwegeeffekten verwendet werden können.

Weitere Verfeinerungen in der dreiteiligen Modellierung können durch Bestimmung stationsspezifischer zeitlicher Gültigkeit für die Parameterschätzung und Einführung einer besseren Glättungsfunktion der geschätzten SSNP unter Berücksichtigung der Satellitenkonstellation realisiert werden. Zur Bestimmung des Glättungsintervalls dieser Funktion sind weitere Untersuchungen notwendig, da auf Grund der Änderung der Satellitenkonstellation ein großes Glättungsintervall zu Informationsverlust und ein kleines Glättungsintervall zu großem Datenrauschen führen könnte.

Außerdem steckt weiteres Entwicklungspotential in der alternativen Modellbildung zur Bestimmung der feuchten Komponente durch Subtraktion des trockenen Anteils vom gesamten. So muss bspw. überprüft werden, inwieweit meteorologische Sensoren die Zuverlässigkeit der Ergebnisse steigern können. Ebenso erscheint eine Verifikation der Annahme, Zusatzparameter enthalten sowohl trockene als auch feuchte Anteile, sinnvoll.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde lediglich ein planares Einschichtmodell zur Bestimmung und Visualisierung von Wasserdampffeldern eingeführt und als Kartenebene in einer diskreten Höhe über der Meeresoberfläche festgelegt. Die unter Anwendung des einfachen Modellansatzes in kondensiertes, flüssiges Wasser umgerechneten IPWV-Werte können als die gesamte integrierte Wasserdampfmenge in der Neutrosphäre betrachtet werden. Daher liefern die Visualisierungsergebnisse dieser Arbeit nur zweidimensionale Informationen bzgl. der Verteilung des Wasserdampfs in der Kartenebene. Statt eines planaren Einschichtmodells kann im nächsten Schritt ein sphärisches Modell zur graphischen Darstellung verwendet werden. Um die räumlichen Informationen von Wasserdampffeldern in ein 3D-Wettermodell integrieren zu können, ist die dreidimensionale Verteilung des Wasserdampfs in der Meteorologie bzw. Klimaforschung von großem Interesse. Dazu müssen Höhenprofile durch tomographische Methoden erstellt werden. An der ETH Zürich wurde ein Softwarepaket AWATOS (Atmospheric Water Vapor Tomography Software) unter Anwendung von DDR von GNSS-Auswertungen entwickelt. Zur tomographischen Untersuchung bzw. Diskretisierung der Atmosphäre wird dabei ein dreidimensionales Würfelmodell verwendet. Die Signalwege in den einzelnen Würfeln lassen sich z.B. durch Strahlverfolgung (ray tracing) berechnen, wobei die Refraktionsindizes in den Würfeln als Unbekannte in der Beobachtungsgleichung definiert sind [Troller, 2004]. Der numerische Aufwand einer solchen 3D-Tomographie liegt nochmals um ein Vielfaches höher als bei der in dieser Arbeit verwendeten Methode.

Sind diese o.g. Modifikationen erfolgreich angebracht, so kann diese dreiteilige Modellbildung auf Grund der langen Dauer der Datenverarbeitung v.a. wirkungsvoll zur Steigerung der Detailfülle im Rahmen der Klimaforschung eingesetzt werden.

Literatur

- [Alber et al., 2000] Alber, C. Ware, R., Rocken, C. und Braun, J. (2000): Obtaining single path phase delays from GPS double differences. *Geophysical Research Letter* (27) S. 2661-2664, University Corporation for Atmospheric Research (UCAR), Boulder, Colorado.
- [Askne und Nordius, 1987] Askne, J. und H. Nordius (1987): Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data. *Radio Science* (22) 3/1987, S. 379-386.
- [Berg, 1948] Berg, H. (1948): Allgemeine Meteorologie: Einführung in die Physik der Atmosphäre. Dümmler Verlag, Bonn.
- [Beutler, 1998] Beutler, G. (1998): The role of GPS in space geodesy. In: Teunissen, P.J.G. und A. Kleusberg (Hrsg.): GPS for geodesy. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, S. 625-650.
- [Bevis et al., 1992] Bevis, M., Businger, S., Herring, T., Rocken, C., Anthes, R. und Ware, R. (1992): GPS meteorology: Remoting sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *Journal of Geophysical Research* (97) D14/1992, S. 15787-15801.
- [Bevis et al., 1994] Bevis, M., S. Businger, S.R. Chiswell, T.A. Herring, R.A. Anthes, C.R. Rocken und R.H. Ware (1994): GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water. *Journal of Applied Meteorology* (33) 3/1994, S. 379-386.
- [Braun et al., 2000] Braun, J., Rocken, C. und Ware, R. (2000): Validation of line-of-sight water vapor measurements with GPS. *Radio Science* (36), S. 459-472, GPS Research Group, University Corporation for Atmospheric Research (UCAR), Boulder, Colorado.
- [Businger et al., 1996] Businger, S., S. R. Chiswell, M. Bevis, J. Duan, R. Anthes, C. Rocken, R. Ware, T. M. Exner, T. Van Hove, F. Solheim, (1996): The promise of GPS in atmospheric monitoring. *Bull. Amer. Met. Soc.* (77), S. 5-18.
- [Chen und Herring, 1997] Chen, G. und T.A. Herring (1997): Effects of atmospheric azimuthal asymmetry on the analysis of space geodetic data. *Journal of Geophysical Research* (102) B9/1997, S. 20489-20502.
- [Davis et al., 1985] Davis, J., Herring, T., Shapiro, I., Rogers, A. und Elgered, G. (1985): Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. *Radio Science* (20) 6/1985, S. 1593-1607.
- [Davis et al., 1993] Davis, J.L., Elgered, G., Niell, A.E. und Kuehn, C.E. (1993): Ground-based measurements of gradients in the „wet“ radio refractivity of air. *Radio Science* (28) 6/1993, S. 1003-1018.
- [Elgered et al., 2005] Elgered, G., H.-P. Plag, H. van der Marel, S. Barlag, und J. Nash (Hrsg.) (2005): Exploitation of ground-based GPS for operational numerical weather prediction and climate operations: Final report - COST Action 716. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, ISBN 92-898-0012-7, 234 S.
- [Elosegui und Davis, 2003] Elosegui, P. und Davis, J. (2003): Accuracy assessment of GPS slant-path determinations. Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, MA, USA.
- [ESSA/NASA/USAF, 1966] ESSA/NASA/USAF (1966): U.S. standard atmosphere supplements, 1966. Committee on Extension to the Standard Atmosphere. U.S. Government Printing Office, Washington, Washington DC, USA.
- [Essen und Froome, 1951] Essen, L. und Froome, K. (1951): The refractive indices and dielectric constants of air and its principal constituents at 24,000 mc/s. *Proceeding of the Royal Society* (64B), S. 862-875.

- [Giacomo, 1982] Giacomo, P. (1982): Equation for the determination of the density of moist air (1981). *Metrologia* (18), S. 33-40.
- [Goff, 1965] Goff, J. (1965): Saturation pressure of water on the new kelvin scale. *Humidity and Moisture* (3), A. Wexler, Ed. Reinhold: S. 189-192.
- [Goff und Gratch, 1946] Goff, J. und Gratch, S. (1946): Low pressure properties of water from -160° to 212°F. *Trans. ASHVE* (52), S. 95-121.
- [Heck, 2003] Heck, B. (2003): Rechenverfahren und Auswertemodelle der Landesvermessung, Klassische und moderne Methoden, 3. neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- [Hopfield, 1969] Hopfield, H. (1969): Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. *Journal of Geophysical Research* (74) 18/1969, S. 4487-4499.
- [Howind, 2005] Howind, J. (2005): Analyse des stochastischen Modells von GPS-Trägerphasenbeobachtungen. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 584, München.
- [Höpcke, 1980] Höpcke, W. (1980): Fehlerlehre und Ausgleichsrechnung, Berlin, New York: de Gruyter (De- Gruyter-Lehrbuch).
- [Hugentobler et al., 2005] Hugentobler, U., Dach, R., Fridez, P. und Meindl, M. (2005): Bernese GPS Software Version 5.0 DRAFT. Universität Bern, Bern, Schweiz.
- [Kraus, 2001] Kraus, H. (2001): Die Atmosphäre der Erde: Eine Einführung in die Meteorologie, 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin.
- [Malberg, 2002] Malberg, H. (2002): Meteorologie und Klimatologie, Eine Einführung, 4., aktualisierte und erweiterte Auflage, Springer-Verlag, Berlin.
- [Mayer et al., 2004] Mayer, M., Wanninger, L., Dick, H.-G., Derenbach, H. und Heck, B. (2004): Mehrwegeeffekte auf den SAPOS[®]-Stationen Baden-Württembergs, Poster, Geodätische Woche 2004, Stuttgart 12.10-15.10. Link: https://www.gik.uni-karlsruhe.de/fileadmin/mitarbeiter/mayer/poster_gw2004/poster_gw_2004_mp.pdf
- [Mayer, 2006] Mayer, M. (2006): GPS-Modellbildung für den Bereich der Antarktischen Halbinsel. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 597, München (im Druck).
- [Niell, 1996] Niell, A.E. (1996): Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. *Journal of Geophysical Research* (101) B2/1996, S. 3227-3246.
- [Ordnance Survey, 2006] Ordnance Survey (2006): From one coordinate system to another : geodetic transformations. Link: <http://www.ordnancesurvey.co.uk/oswebsite/gps/information/coordinatesystemsinfo/guidecontents/guide6.html>
- [Owens, 1967] Owens, J.C. (1967): Optical refractive index of air: Dependence on pressure, temperature and composition. *Applied Optics* (6) 1/1967, S. 51-59.
- [Pitz, 2004] Pitz, C. (2004): Determination and validation of GPS-based slant water vapor values. Diploma thesis, Curitiba, Brasilien (unveröffentlicht).
- [Reigber et al., 2004] Reigber, C., G. Gendt und J. Wickert (2004): GPS Atmosphären-Sondierungs-Projekt (GASP) - Ein innovativer Ansatz zur Bestimmung von Atmosphärenparametern. Abschlussbericht; HGF-Strategiefonds-Projekt GASP - FKZ 01SF9922 des AWI, DLR, GFZ und GKSS. Scientific Technical Report; 04/02.

- [Rothacher, 1992] Rothacher, M. (1992): Orbits of satellite systems in space geodesy, Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 46, Schweizerische Geodätische Kommission, Zürich.
- [Rueger, 2002] Rueger, J.M. (2002): Refractive index formulae for electronic distance measurement with radio and millimetre waves. In: RUEGER, J.M. (Hrsg.): Refractive indices of light, infrared and radio waves in the atmosphere. UNISURV Report S-68, S. 1-52.
- [Saastamoinen, 1973] Saastamoinen, J. (1973): Contributions to the theory of atmospheric refraction. *Bulletin Geodesique* (48) 105, S. 279-298, (48) 106, S. 383-397, (49) 107, S. 13-34.
- [Troller, 2004] Troller, M. (2004): GPS based determination of the integrated and spatially distributed water vapor in the troposphere, Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Vol. 67, Schweizerische Geodätische Kommission, Zürich.
- [Wanninger, 2000a] Wanninger, L. (2000): Der Einfluß der Ionosphäre auf die Positionierung in Referenzstationsnetzen. 3. SAPOS-Symposium, München, 23.-24. Mai 2000, S. 129-140.
- [Wanninger, 2000b] Wanninger, L. (2000): Präzise Positionierung in regionalen GPS-Referenzstationsnetzen. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 508.
- [Wanninger, 2002] Wanninger, L. (2002): Die Bedeutung der Ionosphäre für Referenzstationsnetze. SAPOS-Symposium, Hannover, 21.-23. Mai 2002, S. 132-138.
- [Wetterzentrale, 2006] Wetterzentrale (2006): Link: www.wetterzentrale.de/topkarten/tkdwdar2.htm.
- [Zeuv und Komarov, 1987] Zeuv, V. und Komarov, V. (1987): Statistical models of the temperature and gaseous components of the atmosphere. D. Reidel Publishing Company.

Anhang

A. Graphische Oberfläche des MATLAB-Programmpakets¹⁰



Abb. A-1: Hauptmenü des entwickelten Programmpakets in MATLAB 7.0

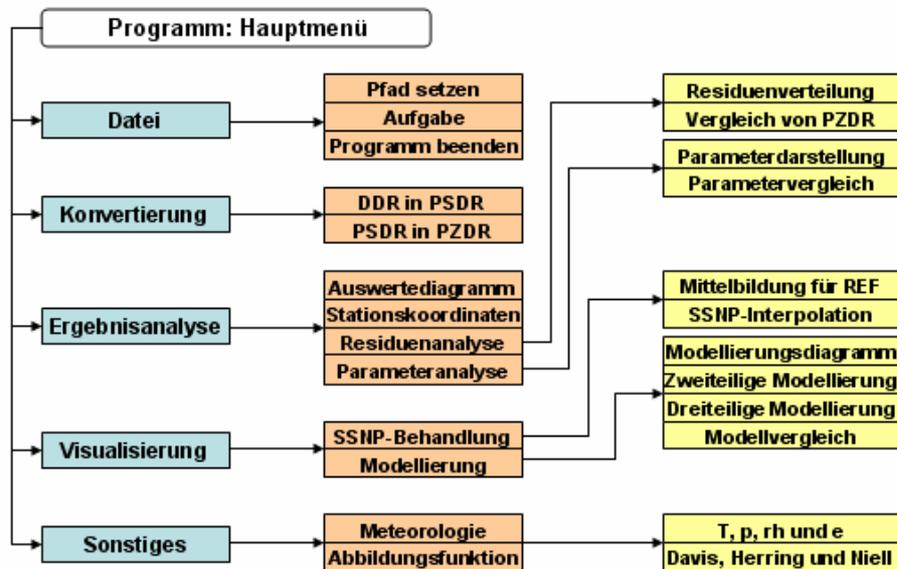


Abb. A-2: Menüstruktur des gesamten MATLAB-Programmpakets

¹⁰Der Entwurf der Menüoberfläche als eine Postkarte sollte die Botschaft der sog. GNSS-Meteorologie bringen.

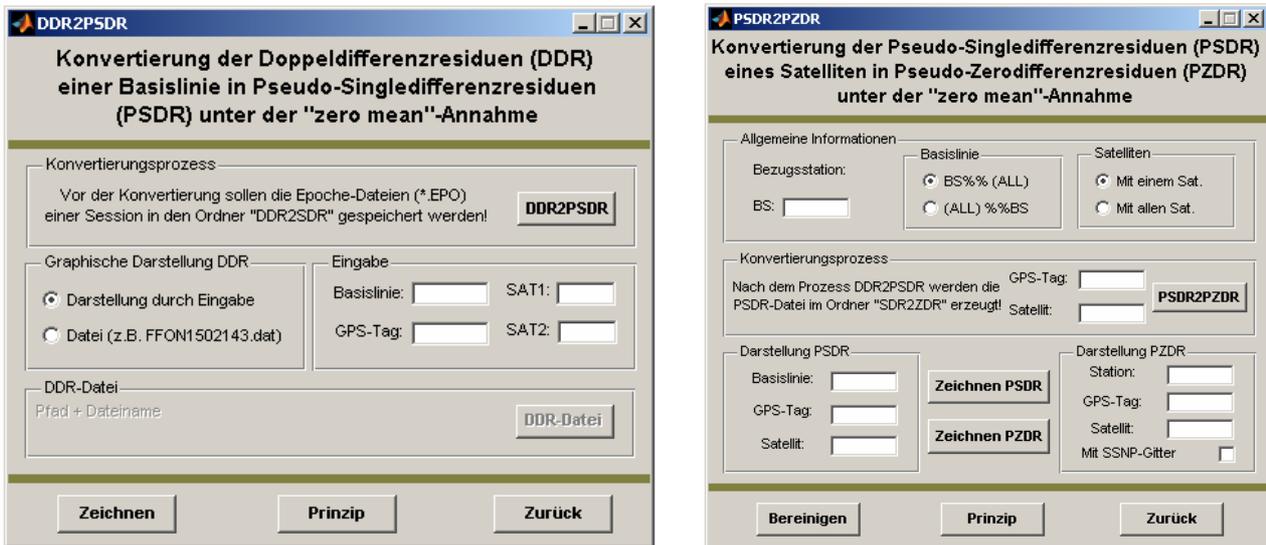


Abb. A-3: Programme zur Konvertierung der DDR in PZDR

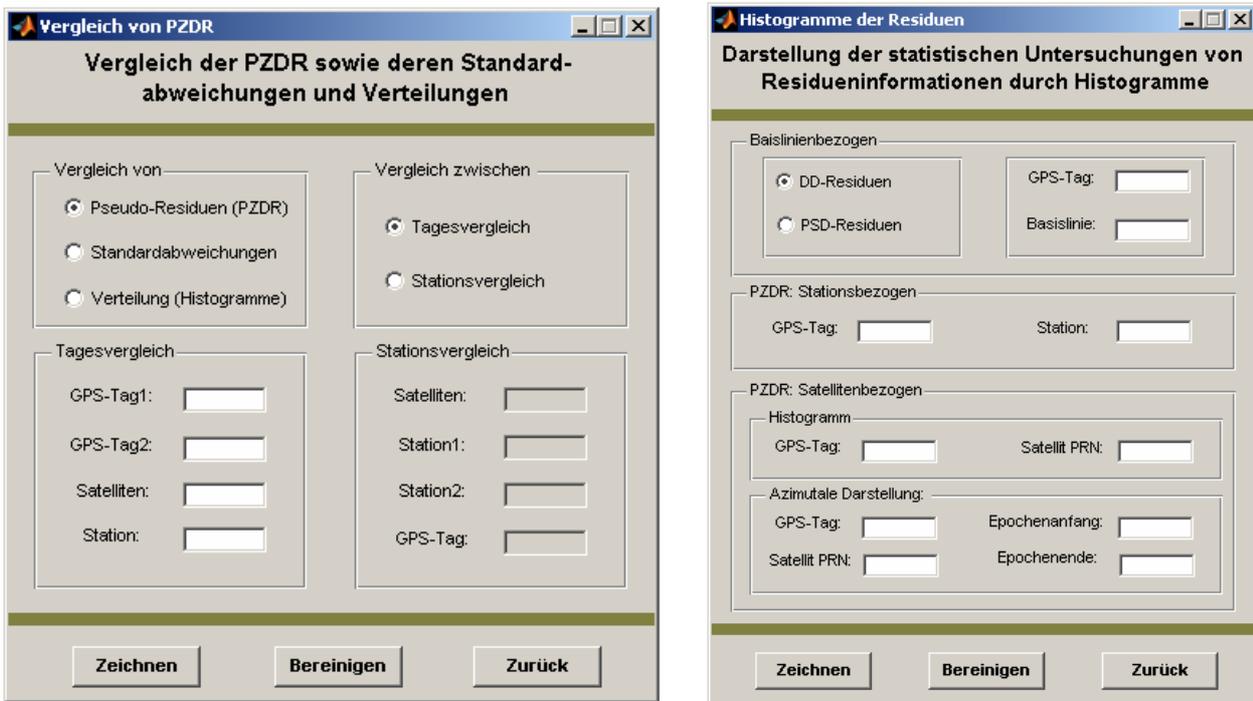


Abb. A-4: Programme zur Untersuchung von Residueninformationen

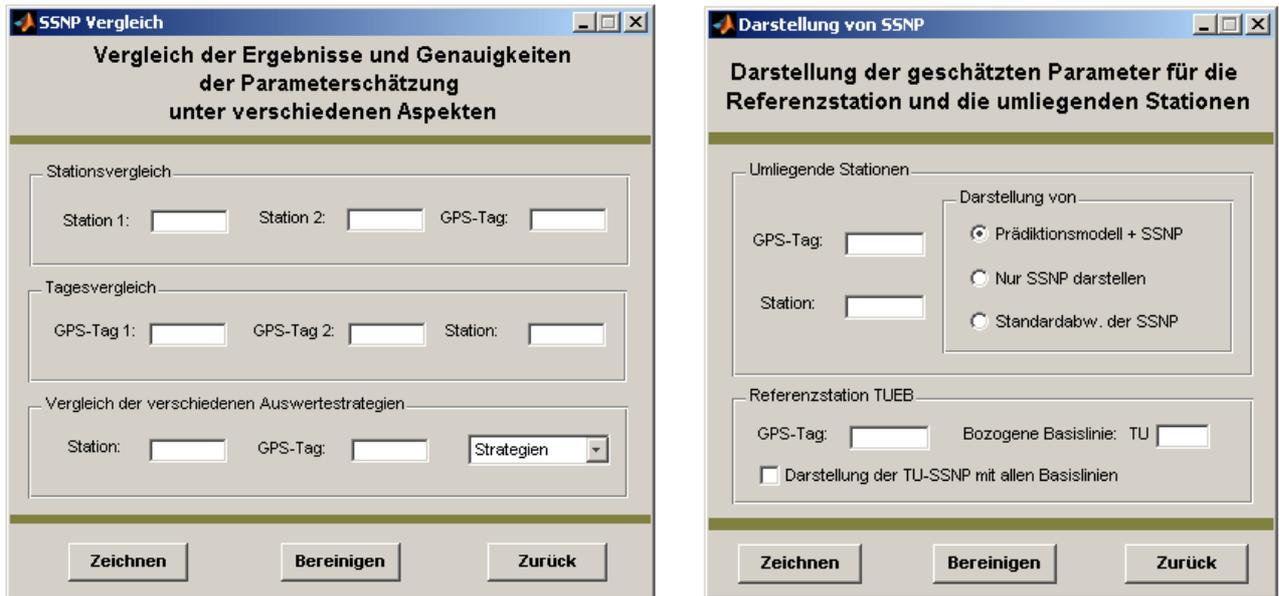


Abb. A-5: Programme zur Untersuchung von geschätzten Parametern

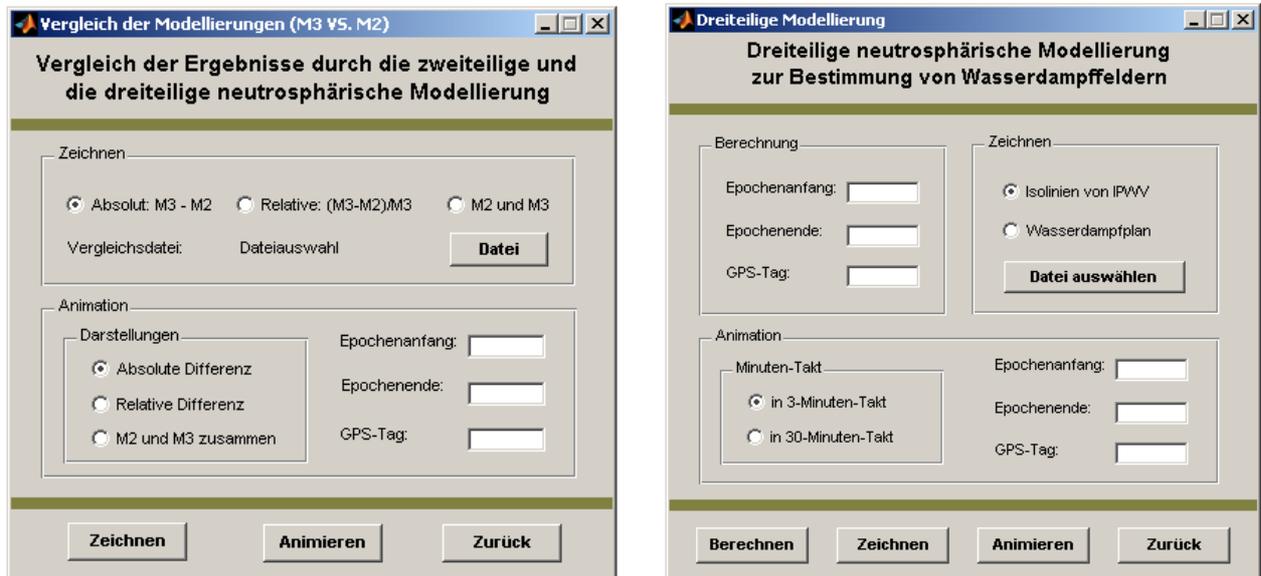


Abb. A-6: Programme für die neutrosphärische Modellierung

B. Auswertetabellen für die PZDR

Tab. B-1: Auswertestrategie : Standardauswertestrategie, DOY2004: 186

Mehrwegebelastung: Stationen mit starker und mittelmäßiger Mehrwegebelastung

Mehrwegebelastung	Standardabweichungen der PZDR [mm]							
	stark			mittelmäßig				
SAT-PRN/Station	STUT	OFFE	HEID	GEIS	VISC	KARL	IFFE	FREI
Basislinienlänge [km]	30.3	81.8	100.8	55.6	66.6	72.5	77.7	106.9
09	0.68	0.72	0.64	0.55	0.58	0.59	0.53	0.51
25	0.85	0.80	0.81	0.64	0.87	0.72	0.81	0.59
08	0.67	0.73	0.57	0.63	0.70	0.71	0.61	0.63
27	0.59	0.79	0.69	0.53	0.64	0.77	0.54	0.55
16	0.70	0.95	0.74	0.65	0.64	0.61	0.62	0.65
30	0.62	0.59	0.61	0.36	0.49	0.46	0.46	0.30
28	0.76	0.82	0.66	0.62	0.69	0.69	0.57	0.53
05	0.58	0.69	0.64	0.53	0.60	0.59	0.45	0.56
06	0.70	0.88	0.57	0.60	0.60	0.63	0.52	0.75
03	0.67	0.71	0.58	0.63	0.53	0.56	0.43	0.46
19	0.71	0.77	0.64	0.77	0.55	0.56	0.41	0.43
17	0.84	0.94	0.85	0.72	0.81	0.73	0.62	0.61
07	0.86	0.72	0.84	0.82	0.76	0.75	0.73	0.75
31	0.83	0.90	0.72	0.73	0.71	0.68	0.55	0.68
24	0.83	0.98	0.71	0.71	0.86	0.79	0.77	0.55
11	0.77	0.69	0.72	0.52	0.61	0.67	0.56	0.50
21	0.66	0.91	0.53	0.64	0.63	0.67	0.55	0.47
04	0.86	0.87	0.79	0.86	0.69	0.74	0.64	0.62
15	0.70	0.79	0.64	0.61	0.53	0.56	0.44	0.55
20	0.59	0.67	0.55	0.55	0.64	0.52	0.43	0.56
22	0.86	0.85	0.92	0.74	0.64	0.71	0.53	0.75
10	0.71	0.80	0.68	0.51	0.69	0.64	0.45	0.60
18	0.81	0.96	0.79	0.70	0.75	0.72	0.60	0.70
14	0.82	0.76	0.65	0.62	0.75	0.79	0.58	0.74
26	0.66	0.69	0.70	0.72	0.64	0.55	0.46	0.46
13	0.64	0.91	0.48	0.57	0.52	0.78	0.53	0.57
29	0.71	0.69	0.49	0.68	0.70	0.58	0.49	0.42
01	0.49	0.76	0.65	0.69	0.56	0.50	0.40	0.42
Mittelwert	0.72	0.80	0.67	0.64	0.66	0.65	0.54	0.57

Tab. B-2: Auswertestrategie : Standardauswertestrategie, DOY2004: 186
 Mehrwegebelastung: Stationen mit geringer Mehrwegebelastung

	Standardabweichungen der PZDR [mm]						
Mehrwegebelastung	gering						
SAT-PRN/Station	FSTA	SIGM	HLBR	BIBE	SCHA	RAVE	TAUB
Basislinienlänge [km]	47.7	49.9	70.1	71.8	81.5	91.0	131.0
09	0.50	0.52	0.59	0.39	0.39	0.45	0.52
25	0.56	0.65	0.70	0.60	0.63	0.79	0.69
08	0.64	0.63	0.58	0.48	0.44	0.63	0.53
27	0.59	0.49	0.50	0.46	0.47	0.57	0.50
16	0.57	0.59	0.58	0.46	0.54	0.51	0.51
30	0.33	0.43	0.46	0.31	0.30	0.39	0.34
28	0.60	0.57	0.70	0.50	0.57	0.65	0.55
05	0.39	0.44	0.64	0.38	0.37	0.39	0.38
06	0.40	0.54	0.52	0.40	0.43	0.43	0.49
03	0.44	0.47	0.43	0.37	0.42	0.51	0.43
19	0.47	0.56	0.64	0.37	0.43	0.47	0.52
17	0.56	0.65	0.62	0.50	0.55	0.62	0.55
07	0.58	0.65	0.60	0.70	0.70	0.70	0.71
31	0.67	0.55	0.61	0.57	0.52	0.62	0.62
24	0.64	0.65	0.69	0.57	0.57	0.62	0.65
11	0.49	0.58	0.57	0.41	0.40	0.52	0.62
21	0.53	0.51	0.56	0.40	0.53	0.53	0.43
04	0.58	0.69	0.64	0.59	0.57	0.62	0.63
15	0.40	0.50	0.50	0.35	0.39	0.52	0.46
20	0.44	0.46	0.48	0.36	0.44	0.53	0.48
22	0.46	0.58	0.61	0.50	0.51	0.61	0.57
10	0.56	0.50	0.60	0.48	0.54	0.56	0.52
18	0.52	0.66	0.65	0.46	0.46	0.58	0.49
14	0.54	0.52	0.73	0.62	0.45	0.51	0.52
26	0.57	0.53	0.56	0.45	0.40	0.52	0.51
13	0.61	0.61	0.50	0.52	0.64	0.59	0.62
29	0.66	0.52	0.50	0.42	0.48	0.61	0.48
01	0.45	0.48	0.67	0.43	0.50	0.47	0.45
Mittelwert	0.53	0.55	0.59	0.47	0.49	0.55	0.53

Tab. B-3: Auswertestrategie : Ohne elevationsabhängige Gewichtung, DOY2004: 186
 Mehrwegebelastung: Stationen mit starker und mittelmäßiger Mehrwegebelastung

Mehrwegebelastung	Standardabweichungen der PZDR [mm]							
	stark			mittelmäßig				
SAT-PRN/Station	STUT	OFFE	HEID	GEIS	VISC	KARL	IFFE	FREI
Basislinienlänge [km]	30.3	81.8	100.8	55.6	66.6	72.5	77.7	106.9
09	1.67	1.59	1.51	1.11	1.66	1.04	1.53	0.97
25	1.89	1.84	1.72	1.47	1.75	1.69	1.73	1.34
08	1.38	1.59	1.22	1.40	1.46	1.65	1.47	1.35
27	1.29	1.46	1.43	1.16	1.30	1.55	1.15	1.17
16	1.88	2.03	1.73	1.57	1.90	1.50	1.60	1.54
30	1.51	1.64	1.55	0.82	1.19	1.25	1.17	0.87
28	1.82	1.72	1.73	1.48	1.84	1.80	1.32	1.17
05	1.27	1.25	1.49	1.22	1.51	1.35	1.05	1.54
06	1.33	1.66	1.19	1.34	1.35	1.10	1.10	0.89
03	1.60	1.24	1.34	1.27	1.25	1.29	1.10	0.95
19	1.45	1.29	1.16	1.50	0.96	1.27	0.83	0.97
17	1.84	2.05	1.87	1.52	1.66	1.53	1.40	1.48
07	2.01	1.76	1.81	1.61	1.60	1.68	1.64	1.91
31	1.96	2.11	1.70	1.65	1.70	1.70	1.28	1.56
24	1.80	1.93	1.59	1.39	1.76	1.89	1.84	1.29
11	1.73	1.29	1.61	1.27	1.25	1.50	1.11	0.96
21	1.58	1.95	1.10	1.56	1.90	1.67	1.47	1.22
04	2.22	1.94	1.87	1.97	1.50	1.84	1.56	1.18
15	1.13	1.34	1.33	1.28	1.10	1.21	0.89	1.06
20	1.28	1.47	1.44	1.34	1.53	0.95	0.95	1.44
22	1.93	1.76	2.13	1.55	1.61	1.85	1.34	1.91
10	1.94	2.12	1.69	1.34	1.72	1.59	1.18	1.67
18	2.12	2.19	1.94	1.59	1.59	1.69	1.48	1.84
14	2.15	1.83	1.53	1.39	1.78	1.76	1.37	1.57
26	1.55	1.34	1.67	1.55	1.26	1.43	1.18	0.71
13	1.28	1.88	1.18	1.23	1.36	1.84	1.18	1.51
29	1.60	1.33	0.97	1.46	1.36	1.25	1.09	0.85
01	1.29	1.97	1.64	1.61	1.23	1.21	0.96	1.05
Mittelwert	1.66	1.70	1.54	1.42	1.50	1.50	1.28	1.28

Tab. B-4: Auswertestrategie : Ohne elevationsabhängige Gewichtung, DOY2004: 186
 Mehrwegebelastung: Stationen mit geringer Mehrwegebelastung

	Standardabweichungen der PZDR [mm]						
Mehrwegebelastung	gering						
SAT-PRN/Station	FSTA	SIGM	HLBR	BIBE	SCHA	RAVE	TAUB
Basislinienlänge [km]	47.7	49.9	70.1	71.8	81.5	91.0	131.0
09	1.19	1.77	1.21	1.00	1.11	1.10	1.32
25	1.23	1.48	1.70	1.43	1.40	1.82	1.51
08	1.33	1.56	1.42	0.99	1.05	1.58	1.24
27	1.22	0.99	1.12	0.93	1.02	1.17	1.08
16	1.74	1.48	1.63	1.25	1.53	1.54	1.30
30	0.76	1.07	0.95	0.81	0.84	0.97	0.70
28	1.34	1.41	1.61	1.27	1.61	1.46	1.44
05	1.11	0.93	1.52	0.91	0.89	0.80	0.91
06	1.06	1.04	0.99	0.84	1.08	0.99	1.04
03	0.94	1.06	0.97	0.92	1.02	1.11	0.85
19	0.94	1.38	1.28	0.72	0.92	0.97	1.12
17	1.33	1.42	1.29	1.24	1.23	1.27	1.26
07	1.43	1.39	1.32	1.76	1.67	1.56	1.53
31	1.34	1.21	1.45	1.41	1.38	1.49	1.53
24	1.35	1.56	1.59	1.37	1.24	1.45	1.48
11	1.04	1.25	1.23	0.86	0.88	1.13	1.25
21	1.60	1.41	1.70	1.19	1.54	1.64	1.05
04	1.64	1.53	1.56	1.44	1.42	1.25	1.66
15	0.78	1.02	0.78	0.74	0.86	1.20	1.09
20	1.06	0.95	1.00	0.88	1.05	1.10	1.05
22	1.24	1.55	1.45	1.36	1.36	1.55	1.84
10	1.40	1.21	1.69	1.26	1.25	1.45	1.37
18	1.33	1.52	1.47	1.06	1.13	1.35	1.27
14	1.32	1.16	1.77	1.63	1.24	1.46	1.22
26	1.19	1.47	1.34	0.94	0.90	1.26	1.32
13	1.11	1.04	0.99	1.44	1.59	1.41	1.21
29	1.46	1.23	0.95	0.89	1.00	1.47	1.04
01	1.32	1.16	1.53	1.04	1.31	0.86	1.13
Mittelwert	1.24	1.30	1.34	1.13	1.20	1.30	1.24

Tab. B-5: Auswertestrategie : Saastamoinen-Modell als Prädiktionsmodell, DOY2004: 186
 Mehrwegebelastung: Stationen mit starker und mittelmäßiger Mehrwegebelastung

Mehrwegebelastung	Standardabweichungen der PZDR [mm]							
	stark			mittelmäßig				
SAT-PRN/Station	STUT	OFFE	HEID	GEIS	VISC	KARL	IFFE	FREI
Basislinienlänge [km]	30.3	81.8	100.8	55.6	66.6	72.5	77.7	106.9
09	0.68	0.72	0.65	0.55	0.58	0.59	0.53	0.50
25	0.85	0.80	0.81	0.64	0.87	0.73	0.81	0.59
08	0.67	0.74	0.57	0.63	0.70	0.71	0.61	0.63
27	0.59	0.79	0.69	0.54	0.64	0.77	0.53	0.56
16	0.70	0.96	0.74	0.65	0.63	0.61	0.62	0.65
30	0.62	0.59	0.61	0.36	0.49	0.46	0.46	0.30
28	0.76	0.82	0.66	0.62	0.69	0.69	0.57	0.53
05	0.58	0.68	0.64	0.53	0.60	0.60	0.45	0.56
06	0.70	0.88	0.57	0.60	0.60	0.63	0.52	0.54
03	0.67	0.71	0.58	0.63	0.53	0.56	0.42	0.46
19	0.71	0.76	0.64	0.77	0.55	0.56	0.41	0.43
17	0.84	0.94	0.85	0.72	0.81	0.73	0.62	0.61
07	0.86	0.72	0.84	0.82	0.76	0.75	0.73	0.74
31	0.83	0.90	0.72	0.73	0.71	0.68	0.55	0.68
24	0.83	0.98	0.71	0.71	0.86	0.79	0.77	0.55
11	0.77	0.69	0.72	0.52	0.61	0.66	0.55	0.50
21	0.66	0.91	0.53	0.64	0.63	0.67	0.55	0.47
04	0.86	0.87	0.79	0.86	0.69	0.75	0.64	0.62
15	0.70	0.79	0.65	0.61	0.53	0.56	0.44	0.54
20	0.59	0.66	0.55	0.55	0.64	0.52	0.43	0.56
22	0.86	0.85	0.92	0.74	0.63	0.71	0.53	0.75
10	0.72	0.80	0.68	0.51	0.69	0.64	0.45	0.61
18	0.81	0.97	0.79	0.70	0.75	0.72	0.60	0.70
14	0.82	0.76	0.65	0.62	0.75	0.79	0.58	0.74
26	0.66	0.69	0.70	0.72	0.64	0.55	0.45	0.46
13	0.64	0.91	0.48	0.57	0.52	0.78	0.53	0.57
29	0.71	0.69	0.49	0.68	0.70	0.58	0.49	0.42
01	0.49	0.76	0.65	0.69	0.56	0.50	0.40	0.41
Mittelwert	0.72	0.80	0.67	0.64	0.66	0.65	0.54	0.56

Tab. B-6: Auswertestrategie : Saastamoinen-Modell als Prädiktionsmodell, DOY2004: 186
 Mehrwegebelastung: Stationen mit geringer Mehrwegebelastung

	Standardabweichungen der PZDR [mm]						
Mehrwegebelastung	gering						
SAT-PRN/Station	FSTA	SIGM	HLBR	BIBE	SCHA	RAVE	TAUB
Basislinienlänge [km]	47.7	49.9	70.1	71.8	81.5	91.0	131.0
09	0.51	0.52	0.60	0.39	0.39	0.45	0.52
25	0.56	0.65	0.71	0.60	0.62	0.79	0.70
08	0.64	0.63	0.58	0.48	0.45	0.63	0.53
27	0.59	0.49	0.50	0.46	0.47	0.57	0.50
16	0.58	0.59	0.59	0.46	0.55	0.51	0.50
30	0.33	0.43	0.46	0.31	0.30	0.39	0.34
28	0.60	0.57	0.70	0.50	0.57	0.65	0.56
05	0.39	0.44	0.64	0.38	0.37	0.39	0.38
06	0.41	0.54	0.52	0.40	0.43	0.43	0.49
03	0.44	0.47	0.43	0.37	0.42	0.51	0.43
19	0.47	0.56	0.64	0.37	0.43	0.47	0.53
17	0.56	0.65	0.62	0.50	0.55	0.62	0.55
07	0.58	0.65	0.60	0.70	0.70	0.70	0.71
31	0.67	0.55	0.62	0.57	0.52	0.62	0.62
24	0.64	0.65	0.70	0.57	0.57	0.62	0.65
11	0.49	0.58	0.57	0.41	0.40	0.52	0.62
21	0.52	0.52	0.56	0.40	0.53	0.53	0.43
04	0.59	0.68	0.64	0.60	0.57	0.62	0.63
15	0.40	0.50	0.50	0.35	0.38	0.52	0.46
20	0.44	0.46	0.49	0.36	0.44	0.53	0.48
22	0.46	0.59	0.61	0.51	0.51	0.61	0.57
10	0.56	0.50	0.60	0.48	0.54	0.56	0.53
18	0.52	0.65	0.65	0.46	0.47	0.58	0.49
14	0.54	0.52	0.73	0.62	0.45	0.51	0.52
26	0.57	0.53	0.56	0.45	0.40	0.52	0.51
13	0.61	0.61	0.50	0.52	0.64	0.59	0.62
29	0.66	0.52	0.50	0.41	0.48	0.61	0.48
01	0.45	0.48	0.67	0.43	0.51	0.46	0.45
Mittelwert	0.53	0.55	0.59	0.47	0.49	0.55	0.53

Tab. B-7: Auswertestrategie : QIF-Strategie zur Phasenmehrdeutigkeitslösung, DOY2004: 186
 Mehrwegebelastung: Stationen mit starker und mittelmäßiger Mehrwegebelastung

Mehrwegebelastung	Standardabweichungen der PZDR [mm]							
	stark			mittelmäßig				
SAT-PRN/Station	STUT	OFFE	HEID	GEIS	VISC	KARL	IFFE	FREI
Basislinienlänge [km]	30.3	81.8	100.8	55.6	66.6	72.5	77.7	106.9
09	0.68	0.72	0.66	0.56	0.62	0.59	0.52	0.49
25	0.83	0.80	0.80	0.65	0.83	0.64	0.78	0.59
08	0.68	0.73	0.57	0.63	0.71	0.72	0.61	0.63
27	0.59	0.80	0.69	0.53	0.64	0.77	0.53	0.55
16	0.71	0.95	0.74	0.65	0.64	0.62	0.62	0.65
30	0.62	0.56	0.60	0.36	0.47	0.46	0.44	0.32
28	0.79	0.82	0.66	0.61	0.67	0.69	0.59	0.53
05	0.58	0.69	0.63	0.53	0.57	0.56	0.43	0.60
06	0.71	0.87	0.56	0.60	0.60	0.62	0.52	0.55
03	0.66	0.71	0.58	0.63	0.52	0.56	0.43	0.46
19	0.71	0.77	0.65	0.77	0.54	0.58	0.41	0.43
17	0.82	0.96	0.84	0.72	0.81	0.76	0.62	0.61
07	0.88	0.74	0.85	0.84	0.74	0.74	0.73	0.73
31	0.81	0.90	0.73	0.72	0.73	0.68	0.53	0.68
24	0.89	0.99	0.72	0.70	0.85	0.79	0.76	0.55
11	0.77	0.71	0.72	0.53	0.61	0.65	0.54	0.51
21	0.65	0.92	0.52	0.64	0.63	0.68	0.55	0.47
04	0.83	0.86	0.80	0.86	0.67	0.74	0.65	0.61
15	0.72	0.78	0.65	0.61	0.53	0.57	0.45	0.55
20	0.58	0.67	0.54	0.55	0.63	0.52	0.43	0.56
22	0.85	0.84	0.92	0.73	0.62	0.69	0.55	0.73
10	0.69	0.74	0.68	0.49	0.68	0.64	0.45	0.60
18	0.81	0.95	0.77	0.70	0.71	0.70	0.58	0.70
14	0.83	0.75	0.65	0.62	0.77	0.76	0.59	0.74
26	0.66	0.69	0.69	0.72	0.63	0.55	0.46	0.46
13	0.63	0.91	0.48	0.57	0.51	0.76	0.52	0.57
29	0.71	0.69	0.48	0.68	0.68	0.57	0.49	0.42
01	0.49	0.75	0.66	0.69	0.56	0.50	0.40	0.41
Mittelwert	0.72	0.80	0.67	0.64	0.65	0.65	0.54	0.56

Tab. B-8: Auswertestrategie : QIF-Strategie zur Phasenmehrdeutigkeitslösung, DOY2004: 186
 Mehrwegebelastung: Stationen mit geringer Mehrwegebelastung

	Standardabweichungen der PZDR [mm]						
Mehrwegebelastung	gering						
SAT-PRN/Station	FSTA	SIGM	HLBR	BIBE	SCHA	RAVE	TAUB
Basislinienlänge [km]	47.7	49.9	70.1	71.8	81.5	91.0	131.0
09	0.50	0.53	0.60	0.40	0.39	0.45	0.49
25	0.58	0.63	0.70	0.57	0.63	0.78	0.70
08	0.62	0.63	0.56	0.48	0.43	0.62	0.54
27	0.59	0.49	0.50	0.44	0.47	0.57	0.51
16	0.58	0.58	0.57	0.45	0.54	0.51	0.50
30	0.33	0.43	0.46	0.30	0.30	0.39	0.34
28	0.60	0.58	0.70	0.50	0.60	0.64	0.56
05	0.41	0.43	0.64	0.35	0.36	0.39	0.38
06	0.41	0.54	0.52	0.40	0.45	0.43	0.49
03	0.44	0.47	0.43	0.37	0.42	0.51	0.43
19	0.47	0.57	0.63	0.38	0.43	0.47	0.52
17	0.57	0.65	0.62	0.50	0.56	0.61	0.55
07	0.58	0.65	0.58	0.69	0.70	0.69	0.71
31	0.67	0.61	0.60	0.58	0.51	0.63	0.57
24	0.66	0.66	0.71	0.56	0.56	0.61	0.64
11	0.50	0.58	0.58	0.41	0.40	0.53	0.62
21	0.52	0.51	0.56	0.41	0.53	0.51	0.42
04	0.59	0.68	0.63	0.60	0.57	0.60	0.63
15	0.40	0.51	0.49	0.35	0.39	0.53	0.46
20	0.44	0.46	0.49	0.36	0.44	0.52	0.48
22	0.46	0.59	0.61	0.50	0.50	0.58	0.54
10	0.56	0.49	0.60	0.49	0.55	0.54	0.53
18	0.53	0.64	0.67	0.44	0.47	0.55	0.48
14	0.54	0.53	0.73	0.61	0.45	0.51	0.55
26	0.57	0.53	0.56	0.45	0.40	0.52	0.51
13	0.61	0.60	0.51	0.52	0.64	0.61	0.62
29	0.66	0.52	0.50	0.41	0.48	0.60	0.48
01	0.46	0.49	0.66	0.44	0.50	0.46	0.45
Mittelwert	0.53	0.56	0.59	0.46	0.49	0.55	0.52

Tab. B-9: Auswertestrategie : Standardauswertestrategie, DOY2004: 190
 Mehrwegebelastung: Stationen mit starker und mittelmäßiger Mehrwegebelastung

Mehrwegebelastung	Standardabweichungen der PZDR [mm]							
	stark			mittelmäßig				
SAT-PRN/Station	STUT	OFFE	HEID	GEIS	VISC	KARL	IFFE	FREI
Basislinienlänge [km]	30.3	81.8	100.8	55.6	66.6	72.5	77.7	106.9
09	0.73	0.89	0.82	0.77	0.68	0.64	0.52	1.31
25	0.96	1.04	1.31	0.85	0.90	1.01	0.85	1.23
08	0.76	0.82	0.69	0.79	0.79	0.82	0.65	1.09
27	0.74	1.04	0.88	0.77	0.65	0.90	0.79	1.29
16	0.99	1.00	1.04	0.76	0.93	1.12	1.08	1.18
30	0.79	0.60	0.87	0.59	0.64	0.79	0.53	1.01
28	0.95	1.07	1.16	0.87	1.04	1.23	1.07	1.57
05	0.56	0.79	0.73	0.63	0.57	0.51	0.53	0.97
06	1.03	0.92	0.97	0.78	0.63	0.88	0.71	1.03
03	0.91	1.39	0.72	0.66	0.74	0.90	0.92	1.30
19	0.98	1.19	1.08	0.81	0.70	0.97	1.14	1.53
17	1.02	1.12	1.28	1.10	0.89	1.00	0.89	1.33
07	1.01	0.91	1.18	0.94	0.87	0.85	0.76	1.20
31	0.80	1.08	0.94	0.83	0.87	0.92	0.96	1.20
24	0.95	0.89	0.95	0.78	1.08	0.84	0.65	1.38
11	0.89	0.83	0.89	0.68	0.62	0.83	0.95	1.47
21	1.02	0.89	0.82	0.86	0.78	0.98	0.98	1.23
04	0.88	0.87	0.90	0.77	1.10	0.91	0.69	1.20
15	0.87	1.19	1.06	0.66	0.61	0.85	0.85	1.21
20	0.74	0.92	0.88	0.65	0.80	1.06	0.92	1.34
22	0.94	1.22	0.87	0.90	0.97	0.89	1.18	1.35
10	0.81	1.01	1.01	0.84	0.79	0.90	0.83	1.37
18	1.02	1.24	1.12	0.93	0.82	1.04	0.89	1.37
14	0.98	0.95	0.85	0.83	0.79	1.04	0.86	1.25
26	0.68	0.83	0.59	0.82	0.80	0.69	0.55	0.99
13	0.67	0.75	0.73	0.70	0.75	0.82	0.69	1.33
29	0.81	0.78	0.75	0.75	0.72	0.72	0.58	1.28
01	0.71	0.65	1.00	0.55	0.71	0.90	0.72	1.12
Mittelwert	0.86	0.96	0.93	0.78	0.79	0.89	0.81	1.25

Tab. B-10: Auswertestrategie : Standardauswertestrategie, DOY2004: 190
 Mehrwegebelastung: Stationen mit geringer Mehrwegebelastung

Mehrwegebelastung	Standardabweichungen der PZDR [mm]						
	gering						
SAT-PRN/Station	FSTA	SIGM	HLBR	BIBE	SCHA	RAVE	TAUB
Basislinienlänge [km]	47.7	49.9	70.1	71.8	81.5	91.0	131.0
09	0.54	0.63	0.69	0.50	0.55	0.54	0.75
25	0.85	0.73	1.29	0.64	0.87	0.98	1.14
08	0.73	0.67	0.72	0.56	0.45	0.90	0.61
27	0.59	0.79	0.55	0.85	0.61	0.83	0.74
16	0.95	0.78	0.85	0.72	0.86	0.77	0.73
30	0.73	0.55	0.76	0.54	0.60	0.69	0.85
28	0.98	0.75	0.88	0.88	0.73	0.97	0.98
05	0.47	0.48	0.58	0.59	0.53	0.54	0.67
06	0.61	0.76	1.01	0.63	0.72	0.71	0.77
03	1.04	0.58	0.84	0.44	0.82	0.55	0.92
19	0.72	0.68	0.84	0.60	0.80	0.66	0.74
17	1.03	1.03	0.91	0.79	0.82	1.01	0.85
07	0.71	0.87	1.04	0.80	0.86	0.78	1.10
31	0.75	0.63	0.92	0.75	0.79	0.68	1.35
24	0.74	0.93	0.86	0.65	0.85	0.92	0.79
11	0.63	0.64	0.90	0.58	0.86	0.59	0.89
21	0.70	0.77	0.81	0.80	0.73	0.69	0.68
04	0.78	0.81	0.91	0.70	0.67	0.81	1.11
15	0.87	0.60	0.92	0.50	0.80	0.56	0.81
20	0.88	0.59	0.79	0.58	0.66	0.62	0.75
22	0.99	0.76	0.76	0.64	0.91	0.77	1.00
10	0.97	0.81	0.82	0.80	0.75	0.85	0.75
18	0.85	0.77	1.16	0.69	0.83	0.82	0.91
14	0.71	0.61	1.03	0.70	0.86	0.69	1.04
26	0.62	0.64	0.56	0.77	0.62	0.73	0.69
13	0.63	0.67	0.67	0.76	0.88	0.76	0.93
29	0.99	0.74	0.54	0.79	0.52	0.80	0.74
01	0.49	0.58	1.23	0.43	0.63	0.75	0.62
Mittelwert	0.77	0.71	0.85	0.67	0.74	0.75	0.85

Tab. B-11: Auswertestrategie : Ohne elevationsabhängige Gewichtung, DOY2004: 190
 Mehrwegebelastung: Stationen mit starker und mittelmäßiger Mehrwegebelastung

Mehrwegebelastung	Standardabweichungen der PZDR [mm]							
	stark			mittelmäßig				
SAT-PRN/Station	STUT	OFFE	HEID	GEIS	VISC	KARL	IFFE	FREI
Basislinienlänge [km]	30.3	81.8	100.8	55.6	66.6	72.5	77.7	106.9
09	1.71	2.16	1.90	1.84	1.43	1.24	1.07	3.28
25	2.54	2.58	2.74	1.89	1.79	2.31	2.22	3.13
08	1.77	1.73	1.39	1.71	1.74	1.40	1.43	2.56
27	1.60	2.03	1.74	1.53	1.19	2.27	2.17	2.84
16	2.41	2.55	2.45	1.98	1.69	2.65	2.31	2.26
30	1.98	1.22	2.27	1.37	1.44	1.84	1.50	2.64
28	2.28	2.17	3.03	2.01	2.38	3.16	2.68	3.97
05	1.10	1.34	1.58	1.13	1.23	1.23	1.24	1.95
06	2.21	1.51	1.93	1.74	1.05	1.92	1.24	2.03
03	2.46	3.31	1.46	1.55	1.38	2.18	2.14	2.66
19	2.25	2.22	2.16	1.52	1.15	1.92	2.69	3.30
17	2.46	2.46	3.10	2.62	1.92	2.31	2.05	2.94
07	2.70	1.92	2.87	2.11	1.75	1.84	1.87	3.15
31	1.81	2.34	2.22	1.89	1.81	2.29	2.49	2.94
24	2.27	1.90	1.93	1.85	2.19	2.17	1.52	3.08
11	1.86	1.47	1.63	1.32	1.04	1.64	2.12	3.26
21	3.11	2.32	1.83	2.42	1.79	2.08	2.52	2.07
04	2.20	2.35	2.04	1.93	2.33	2.34	1.63	2.76
15	1.57	2.50	2.47	1.25	0.92	1.68	1.76	2.54
20	1.50	1.87	2.00	1.28	1.51	2.03	2.45	2.84
22	2.36	2.91	2.11	2.30	2.33	2.25	2.82	3.12
10	2.23	3.01	2.69	2.38	1.97	2.20	1.97	3.95
18	2.87	2.49	2.82	2.28	1.70	2.46	2.12	3.08
14	2.36	2.29	2.22	2.08	1.72	2.59	1.89	3.11
26	1.68	1.83	1.53	1.91	1.82	1.61	1.23	2.26
13	1.42	1.49	1.26	1.87	1.57	1.92	1.78	3.28
29	1.58	1.67	1.71	1.63	1.76	1.45	1.42	2.87
01	1.87	1.69	2.19	1.41	1.17	2.16	1.97	2.49
Mittelwert	2.08	2.12	2.12	1.81	1.63	2.04	1.94	2.87

Tab. B-12: Auswertestrategie : Ohne elevationsabhängige Gewichtung, DOY2004: 190
 Mehrwegebelastung: Stationen mit geringer Mehrwegebelastung

Mehrwegebelastung	Standardabweichungen der PZDR [mm]						
	gering						
SAT-PRN/Station	FSTA	SIGM	HLBR	BIBE	SCHA	RAVE	TAUB
Basislinienlänge [km]	47.7	49.9	70.1	71.8	81.5	91.0	131.0
09	1.47	1.64	1.45	1.30	1.28	1.48	2.10
25	2.03	1.66	2.91	1.43	2.21	2.05	2.62
08	1.15	1.42	1.81	1.29	0.96	1.75	1.40
27	1.36	1.44	1.23	1.87	1.30	1.57	1.61
16	2.24	2.09	2.12	1.73	2.16	1.83	1.76
30	2.10	1.39	2.04	1.43	1.86	1.79	2.53
28	2.38	1.68	2.23	2.16	1.78	2.22	2.50
05	1.00	1.04	1.06	1.63	1.28	1.09	1.41
06	1.36	1.58	2.12	1.17	1.26	1.24	1.76
03	2.76	1.45	1.68	0.95	1.72	1.18	2.33
19	1.35	1.30	1.34	1.11	1.64	1.25	1.47
17	2.58	2.37	2.12	1.95	1.70	2.00	2.03
07	1.48	2.03	2.41	1.87	1.80	1.73	2.15
31	1.92	1.68	2.00	1.66	2.00	1.70	3.35
24	1.84	1.90	1.86	1.69	1.84	2.13	1.98
11	1.35	1.19	1.74	1.10	1.81	1.13	1.90
21	1.66	1.95	2.25	2.30	1.78	2.27	1.61
04	2.11	1.94	2.12	1.72	1.70	1.98	2.30
15	1.63	1.12	1.59	0.87	1.62	0.91	1.71
20	1.91	1.32	1.66	1.41	1.45	1.48	1.50
22	2.44	1.84	2.05	1.69	2.03	2.18	2.82
10	2.82	2.11	1.93	1.88	2.05	1.79	2.03
18	2.14	1.72	3.07	1.76	2.12	2.08	2.44
14	1.61	1.42	2.06	2.03	2.23	1.67	2.41
26	1.85	1.62	1.40	1.94	1.47	1.79	1.59
13	1.41	1.30	1.28	1.64	1.99	1.65	1.70
29	2.13	1.87	1.54	1.93	1.37	1.53	1.89
01	1.25	1.72	2.28	1.43	1.52	1.36	1.16
Mittelwert	1.83	1.64	1.91	1.61	1.71	1.67	2.00

Tab. B-13: Auswertestrategie : Saastamoinen-Modell als Prädiktionsmodell, DOY2004: 190
 Mehrwegebelastung: Stationen mit starker und mittelmäßiger Mehrwegebelastung

Mehrwegebelastung	Standardabweichungen der PZDR [mm]							
	stark			mittelmäßig				
SAT-PRN/Station	STUT	OFFE	HEID	GEIS	VISC	KARL	IFFE	FREI
Basislinienlänge [km]	30.3	81.8	100.8	55.6	66.6	72.5	77.7	106.9
09	0.73	0.89	0.82	0.77	0.68	0.64	0.52	1.31
25	0.96	1.04	1.32	0.86	0.90	1.01	0.85	1.23
08	0.75	0.82	0.69	0.79	0.79	0.82	0.65	1.09
27	0.74	1.04	0.88	0.77	0.65	0.90	0.79	1.29
16	0.99	1.00	1.04	0.76	0.92	1.11	1.08	1.18
30	0.79	0.60	0.86	0.59	0.64	0.79	0.53	1.01
28	0.95	1.07	1.16	0.87	1.04	1.23	1.06	1.57
05	0.56	0.79	0.73	0.63	0.57	0.51	0.54	0.97
06	1.03	0.92	0.98	0.78	0.63	0.88	0.71	1.04
03	0.91	1.39	0.72	0.67	0.74	0.90	0.92	1.30
19	0.98	1.19	1.08	0.81	0.70	0.97	1.13	1.53
17	1.02	1.12	1.28	1.10	0.89	1.00	0.89	1.34
07	1.01	0.91	1.18	0.94	0.87	0.85	0.76	1.20
31	0.80	1.09	0.94	0.83	0.87	0.93	0.96	1.20
24	0.95	0.89	0.96	0.78	1.09	0.84	0.65	1.38
11	0.89	0.83	0.89	0.68	0.62	0.83	0.95	1.47
21	1.02	0.89	0.83	0.87	0.78	0.98	0.98	1.23
04	0.88	0.87	0.90	0.77	1.10	0.91	0.69	1.20
15	0.87	1.19	1.05	0.67	0.61	0.85	0.85	1.21
20	0.74	0.92	0.88	0.64	0.81	1.06	0.92	1.34
22	0.94	1.23	0.87	0.91	0.98	0.89	1.18	1.35
10	0.81	1.01	1.01	0.84	0.79	0.90	0.83	1.37
18	1.02	1.24	1.12	0.93	0.82	1.04	0.89	1.37
14	0.97	0.94	0.85	0.83	0.79	1.04	0.86	1.24
26	0.68	0.83	0.59	0.82	0.80	0.69	0.55	0.99
13	0.67	0.75	0.73	0.70	0.75	0.82	0.69	1.33
29	0.81	0.78	0.75	0.75	0.72	0.71	0.58	1.28
01	0.71	0.65	1.00	0.55	0.71	0.90	0.72	1.12
Mittelwert	0.86	0.97	0.93	0.78	0.80	0.89	0.81	1.25

Tab. B-14: Auswertestrategie : Saastamoinen-Modell als Prädiktionsmodell, DOY2004: 190
 Mehrwegebelastung: Stationen mit geringer Mehrwegebelastung

Mehrwegebelastung	Standardabweichungen der PZDR [mm]						
	gering						
SAT-PRN/Station	FSTA	SIGM	HLBR	BIBE	SCHA	RAVE	TAUB
Basislinienlänge [km]	47.7	49.9	70.1	71.8	81.5	91.0	131.0
09	0.54	0.63	0.69	0.50	0.55	0.54	0.75
25	0.84	0.72	1.29	0.65	0.87	0.98	1.14
08	0.73	0.67	0.72	0.56	0.46	0.91	0.61
27	0.59	0.80	0.55	0.84	0.60	0.83	0.74
16	0.95	0.78	0.85	0.72	0.87	0.77	0.73
30	0.74	0.55	0.76	0.54	0.60	0.69	0.84
28	0.98	0.75	0.88	0.89	0.73	0.97	0.99
05	0.47	0.48	0.58	0.59	0.53	0.54	0.67
06	0.61	0.76	1.01	0.63	0.72	0.72	0.77
03	1.04	0.58	0.84	0.45	0.82	0.55	0.92
19	0.73	0.68	0.84	0.60	0.80	0.66	0.74
17	1.04	1.03	0.91	0.79	0.82	1.00	0.85
07	0.71	0.87	1.04	0.79	0.86	0.78	1.10
31	0.75	0.63	0.92	0.75	0.79	0.69	1.35
24	0.75	0.93	0.87	0.66	0.85	0.92	0.79
11	0.63	0.63	0.90	0.59	0.86	0.59	0.89
21	0.71	0.77	0.81	0.80	0.73	0.69	0.68
04	0.78	0.81	0.91	0.70	0.67	0.81	1.11
15	0.87	0.60	0.93	0.50	0.80	0.55	0.82
20	0.88	0.59	0.79	0.58	0.66	0.62	0.75
22	0.99	0.76	0.76	0.64	0.91	0.77	1.00
10	0.97	0.81	0.82	0.80	0.75	0.85	0.75
18	0.85	0.77	1.17	0.68	0.83	0.81	0.91
14	0.71	0.61	1.02	0.69	0.86	0.68	1.04
26	0.62	0.64	0.56	0.78	0.62	0.73	0.69
13	0.63	0.67	0.67	0.76	0.88	0.76	0.93
29	0.99	0.74	0.54	0.78	0.53	0.80	0.74
01	0.49	0.58	1.23	0.43	0.62	0.75	0.62
Mittelwert	0.77	0.71	0.85	0.67	0.74	0.75	0.86

Tab. B-15: Auswertestrategie : QIF-Strategie zur Phasenmehrdeutigkeitslösung, DOY2004: 190
 Mehrwegebelastung: Stationen mit starker und mittelmäßiger Mehrwegebelastung

Mehrwegebelastung	Standardabweichungen der PZDR [mm]							
	stark			mittelmäßig				
SAT-PRN/Station	STUT	OFFE	HEID	GEIS	VISC	KARL	IFFE	FREI
Basislinienlänge [km]	30.3	81.8	100.8	55.6	66.6	72.5	77.7	106.9
09	0.73	0.89	0.82	0.78	0.68	0.64	0.53	1.30
25	0.96	1.05	1.31	0.85	0.87	1.02	0.87	1.21
08	0.76	0.82	0.69	0.79	0.79	0.82	0.65	1.09
27	0.74	1.05	0.88	0.78	0.65	0.90	0.77	1.29
16	0.99	1.00	1.04	0.75	0.93	1.10	1.06	1.19
30	0.78	0.61	0.85	0.60	0.64	0.79	0.52	0.98
28	0.95	1.08	1.17	0.87	0.98	1.22	1.03	1.57
05	0.56	0.79	0.72	0.63	0.56	0.50	0.51	0.97
06	1.03	0.91	1.01	0.78	0.63	0.90	0.68	1.03
03	0.90	1.39	0.72	0.66	0.75	0.90	0.91	1.30
19	0.99	1.19	1.06	0.81	0.70	0.97	1.16	1.52
17	1.02	1.12	1.28	1.11	0.89	0.99	0.92	1.33
07	1.02	0.91	1.18	0.94	0.87	0.86	0.77	1.17
31	0.81	1.08	0.95	0.83	0.87	0.92	0.97	1.21
24	0.95	0.88	0.96	0.79	1.09	0.84	0.66	1.38
11	0.89	0.83	0.89	0.68	0.60	0.84	0.95	1.46
21	1.03	0.88	0.82	0.85	0.78	0.97	0.99	1.23
04	0.88	0.85	0.90	0.77	1.11	0.91	0.68	1.20
15	0.88	1.20	1.03	0.66	0.62	0.85	0.78	1.21
20	0.73	0.92	0.88	0.64	0.81	1.05	0.94	1.34
22	0.94	1.22	0.86	0.89	0.97	0.87	1.19	1.35
10	0.81	1.01	1.02	0.80	0.80	0.90	0.86	1.37
18	1.02	1.24	1.13	0.94	0.82	1.04	0.87	1.37
14	0.97	0.95	0.86	0.83	0.80	1.04	0.87	1.26
26	0.68	0.83	0.59	0.82	0.79	0.69	0.54	0.97
13	0.67	0.75	0.73	0.70	0.75	0.82	0.68	1.34
29	0.81	0.78	0.75	0.75	0.72	0.70	0.59	1.27
01	0.71	0.65	1.00	0.56	0.71	0.90	0.71	1.12
Mittelwert	0.87	0.96	0.93	0.78	0.79	0.89	0.81	1.03

Tab. B-16: Auswertestrategie : QIF-Strategie zur Phasenmehrdeutigkeitslösung, DOY2004: 190
 Mehrwegebelastung: Stationen mit geringer Mehrwegebelastung

	Standardabweichungen der PZDR [mm]						
Mehrwegebelastung	gering						
SAT-PRN/Station	FSTA	SIGM	HLBR	BIBE	SCHA	RAVE	TAUB
Basislinienlänge [km]	47.7	49.9	70.1	71.8	81.5	91.0	131.0
09	0.54	0.63	0.69	0.50	0.55	0.53	0.74
25	0.85	0.73	1.30	0.64	0.87	0.99	1.16
08	0.73	0.67	0.69	0.56	0.45	0.90	0.61
27	0.59	0.79	0.55	0.85	0.60	0.83	0.74
16	0.94	0.79	0.86	0.72	0.86	0.77	0.73
30	0.69	0.55	0.76	0.54	0.60	0.69	0.86
28	1.00	0.75	0.91	0.86	0.73	0.97	0.95
05	0.48	0.48	0.57	0.59	0.54	0.53	0.66
06	0.61	0.76	1.00	0.62	0.73	0.71	0.77
03	1.04	0.59	0.85	0.45	0.82	0.55	0.93
19	0.72	0.68	0.84	0.60	0.80	0.66	0.74
17	1.01	1.03	0.91	0.79	0.82	1.01	0.85
07	0.70	0.87	1.02	0.80	0.86	0.78	1.11
31	0.75	0.64	0.93	0.73	0.80	0.68	1.33
24	0.75	0.93	0.85	0.66	0.84	0.92	0.78
11	0.63	0.64	0.90	0.59	0.87	0.59	0.88
21	0.71	0.77	0.80	0.80	0.73	0.69	0.68
04	0.78	0.81	0.88	0.70	0.67	0.81	1.11
15	0.86	0.60	0.93	0.50	0.79	0.56	0.82
20	0.88	0.58	0.79	0.60	0.65	0.62	0.75
22	0.95	0.74	0.76	0.64	0.91	0.77	1.03
10	0.96	0.81	0.82	0.81	0.75	0.84	0.75
18	0.84	0.77	1.15	0.69	0.83	0.82	0.93
14	0.71	0.61	1.02	0.70	0.85	0.69	1.04
26	0.61	0.64	0.56	0.78	0.61	0.73	0.70
13	0.63	0.67	0.67	0.76	0.88	0.76	0.93
29	0.98	0.74	0.54	0.78	0.52	0.80	0.74
01	0.49	0.58	1.23	0.43	0.63	0.75	0.62
Mittelwert	0.77	0.71	0.85	0.67	0.74	0.75	0.85

ISSN: 1612-9733
ISBN: 978-3-86644-115-6

www.uvka.de