



DGK Deutsche Geodätische Kommission
der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C

Dissertationen

Heft Nr. 744

Andreas Knöpfler

Korrektur stationsabhängiger Fehler bei GNSS

München 2015

**Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission beim Verlag C. H. Beck**

ISSN 0065-5325

ISBN 978-3-7696-5156-0

Diese Arbeit ist gleichzeitig veröffentlicht in:

**Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik
Karlsruher Institut für Technologie, Studiengang Geodäsie und Geoinformatik;
Karlsruhe 2015,1; ISSN 1612-9733 / ISBN 978-3-7315-0352-1**



Deutsche Geodätische Kommission
der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C

Dissertationen

Heft Nr. 744

Korrektur stationsabhängiger Fehler bei GNSS

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
von der Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
genehmigte Dissertation
von
Dipl.-Ing. Andreas Knöpfler
aus Wangen im Allgäu

München 2015

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung München

ISSN 0065-5325

ISBN 978-3-7696-5156-0

Diese Arbeit ist gleichzeitig veröffentlicht in:
Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik
Karlsruher Institut für Technologie, Studiengang Geodäsie und Geoinformatik;
Karlsruhe 2015,1; ISSN 1612-9733 / ISBN 978-3-7315-0352-1

Adresse der Deutschen Geodätischen Kommission:



Deutsche Geodätische Kommission

Alfons-Goppel-Straße 11 • D – 80 539 München

Telefon +49 – 89 – 23 031 1113 • Telefax +49 – 89 – 23 031 - 1283/ - 1100
e-mail hornik@dgfi.badw.de / rit@gfz-potsdam.de • <http://www.dgk.badw.de>

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Bernhard Heck,
Geodätisches Institut, Karlsruher Institut für Technologie

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Matthias Becker,
Institut für Geodäsie, Technische Universität Darmstadt

Tag der mündlichen Prüfung: 28.01.2015

Diese Dissertation ist auf dem Server der Deutschen Geodätischen Kommission unter [<http://dgk.badw.de/>](http://dgk.badw.de/)
sowie auf dem Server des Karlsruher Instituts für Technologie unter
[<http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000045959>](http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000045959) elektronisch publiziert

© 2015 Deutsche Geodätische Kommission, München

Alle Rechte vorbehalten. Ohne Genehmigung der Herausgeber ist es auch nicht gestattet,
die Veröffentlichung oder Teile daraus auf photomechanischem Wege (Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen

ISSN 0065-5325

ISBN 978-3-7696-5156-0

Zusammenfassung

GNSS-basierte Verfahren zur hochgenauen Positionsbestimmung werden seit vielen Jahren als Standardwerkzeug in unzähligen Disziplinen eingesetzt. Neben der stetigen Weiterentwicklung der zur Verfügung stehenden Geräte und dem Aufkommen zusätzlicher GNSS wurden die in der Auswertung eingesetzten Modelle fortlaufend verbessert. Parallel zur klassischen differentiellen Auswertung wurde mit Precise Point Positioning (PPP) ein Verfahren geschaffen, mit dem – bei ausreichender Beobachtungszeit – Stationskoordinaten mit den Genauigkeiten einer Basislinienlösung berechnet werden können. Dies wird durch die in den letzten Jahren gesteigerte Qualität der in die GNSS-Prozessierung eingehenden Produkte des International GNSS Service (IGS, <http://www.igs.org>, Stand: 03.02.2015) und seiner Analysezentren ermöglicht.

Durch gesteigerte Genauigkeitsanforderungen müssen die bei GNSS auftretenden Fehlereinflüsse immer besser modelliert werden. Durch intensive Forschung wurden sowohl das funktionale als auch das stochastische Modell bei GNSS in den vergangenen Jahren immer weiter verfeinert, um einzelne Fehlerkomponenten, wie beispielsweise das Antennenverhalten oder die troposphärische Laufzeitverzögerung besser korrigieren zu können. Mehrwegeeffekte stellen nach wie vor eine Hauptfehlerquelle bei der hochpräzisen Positionsbestimmung mit GNSS dar. In der vorliegenden Arbeit werden zur Korrektur von Mehrwegeeffekten und weiteren stationsabhängigen Fehlern, wie beispielsweise Restfehlern der Antennenkalibrierung, Stacking-Verfahren eingesetzt. Beim Stacking werden die Residuen einer PPP-Prozessierung über einen Zeitraum akkumuliert und daraus Korrekturen berechnet, welche in einem zweiten Auswertedurchlauf angebracht werden.

In zwei Testszenarien werden die berechneten Korrekturen in unterschiedlichen Varianten (über Berücksichtigung in der Kalibrierinformation bzw. einer separaten Korrekturdatei) einer erneuten Auswertung zugeführt. Die resultierenden Produkte (Residuen, Koordinaten, troposphärische Laufzeitverzögerungen) werden hinsichtlich verschiedener Kriterien analysiert. Bei der zweiten Variante wird zudem die Veränderung der Korrekturinformation der einzelnen Stationen über die Zeit untersucht. Insbesondere bei Stationen mit schlechter Datenqualität ist eine deutliche Verbesserung durch die Einführung der gestapelten Information feststellbar. Ergänzend werden Untersuchungen hinsichtlich der Notwendigkeit von Individualkalibrierungen der Empfängerantennen durchgeführt. Beobachtungsdaten verschiedener Stationen, für die Individualkalibrierungen vorliegen, werden zusätzlich unter Verwendung absoluter IGS-Typmittelwerte prozessiert und beide Datensätze anschließend mit Hilfe der jeweiligen Korrekturen erneut ausgewertet. Unterschiede in den Phasenzentrumsoffsets (PZO) der einzelnen Antennen lassen sich durch Stacking nicht korrigieren, jedoch können vom Typmittel abweichende Phasenzentrumsvariationen (PZV) stark verbessert werden.

Ergänzend werden verschiedene Modifikationen des gewählten Stackingverfahrens, bei dem mit festen Azimut- und Zenitdistanzinkrementen und einfacher Mittelbildung gearbeitet wurde, vorgeschlagen. Diese umfassen Alternativen zur Berechnung der gestapelten Korrekturwerte und unterbreiten einen Vorschlag zur Handhabung von Ausrüstungswechseln bei der Einführung gestapelter Information. Das Verfahren wurde primär für die Analyse und Korrektur der Daten permanenter GNSS-Stationen entwickelt, welche kontinuierlich über lange Zeit Daten erfassen und aufzeichnen.

Summary

Highly precise positioning techniques based on Global Navigation Satellite Systems (GNSS) have become a standard tool for numerous disciplines, benefitting from the continuous development of receiver equipment and the appearance of additional GNSS. In addition to the classical differential processing approach, the Precise Point Positioning (PPP) method is able to derive station coordinates with the same accuracy as a baseline setup, when sufficient observation time is available. The basis for PPP is the improved quality of external products for the GNSS data processing, for example the orbit and especially the satellite clock products of the International GNSS Service (IGS) and its analysis centers.

The increased usage of GNSS comes along with higher demands on accuracy. Therefore, the modelling of important error sources in GNSS is continuously upgraded. Intensive research led to a refinement of both the functional and the stochastic model in GNSS data processing in order to enable the correction of specific error components, for example the antenna behaviour or the tropospheric delay. Despite of the improvements in GNSS modelling, multipath effects still remain as a main error source in highly precise GNSS positioning. Within this work, stacking techniques are used to correct for multipath effects and further site dependent errors, for example residual errors in the calibration values of the receiving GNSS antenna. The method developed in this work is based on zero difference PPP residuals, which are accumulated over defined azimuth-elevation cells and over a fixed period of time (here: 10 d) and introduced as correction (so-called stacking maps) in a second PPP processing run. The main purpose of this approach aims for the improvement of data, recorded on continuously operating reference stations.

Within this work, two scenarios for the implementation of the corrections were investigated in detail: the combination of the stacking maps joined with the calibration information of the GNSS receiving antennas and in contrast to this approach the separate modelling of both aspects in a separate file. In order to check the effectivity of this method, the results (e.g., coordinates, residuals) before and after the introduction of the stacking maps were intensively analyzed. Within the second scenario (introduction of the correction in a separate file), the behaviour of the stacking maps over time was investigated by the analysis of so-called sliding stacking maps. Sliding stacking maps are generated as follows: calculation of a first stacking map from the residuals for example for day of year (DoY) 121 to 130 and introduction as correction for DoY 131, the next stacking map is computed from the residuals for DoY 122 to 131 and introduced for DoY 132 and so on. Especially sites with poor data quality show a significant improvement of the residual values after the implementation of stacked information. Furthermore, observations remain in the used data set, whereas they were eliminated in the processing without the introduction of stacking maps.

In addition, the necessity of expensive, site-dependent individual antenna calibration was checked. The focus was on the compensating level of the stacking approach with respect to unmodelled antenna effects based on the replacement of individual receiving antenna calibrations by type mean values of the IGS in combination with stacking maps. Therefore, data of selected sites were processed using both the existing individual antenna calibration sets and the IGS type mean values. In a second processing run, the calibration sets were introduced taking the corresponding stacking information into account. Differences in the phase center variations of the antennas can be corrected by the stacking maps. Discrepancies due to differences in the phase center offsets remain in the estimated site coordinates.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	xv
1 Einführung	1
2 Precise Point Positioning statischer GNSS-Beobachtungen	3
2.1 Grundlegende Beobachtungsgleichungen	3
2.2 Linearkombinationen	4
2.3 PPP	6
2.3.1 Funktionales Modell	6
2.3.2 Stochastisches Modell	9
2.4 Modellierung von Fehlereinflüssen bei PPP	10
2.4.1 Satellitenspezifische Effekte	11
2.4.2 Effekte des Signalwegs	15
2.4.3 Stationsspezifische Effekte	16
2.4.4 Schlussbetrachtung	24
3 Modellierung stationsabhängiger Fehler in GNSS-Beobachtungen	27
3.1 SNR-basierte Auswertung	27
3.2 Siderische Filterungstechniken	31
3.3 Räumliches Stacking	34
4 Einführung gestapelter Information in die GNSS-Auswertung	43
4.1 Grundidee	44
4.2 Stacking-Routinen	50
5 Datengrundlage	55
5.1 GURN	55
5.2 Externe Daten	58
6 Einführung von Stackingarten in die Prozessierung	61
6.1 TestszENARIO über einen kurzen Zeitraum mit PZV-Modifikation	61
6.1.1 PZV-Modifikation	62
6.1.2 Stapeln der Residuen	64
6.1.3 Auswirkungen auf die Residuen	66
6.1.4 Auswirkungen auf die Koordinaten	71
6.1.5 Resümee	73
6.2 Ergebnisse über einen längeren Zeitraum	73
6.2.1 Variationen der Stackingarten über die Zeit	76
6.2.2 Auswirkungen auf die Residuen	82
6.2.3 Auswirkungen auf die Koordinaten	94
6.2.4 Auswirkungen auf die Troposphärenparameter	99
6.2.5 Resümee	103
7 Zur Notwendigkeit von Individualkalibrierungen	107
7.1 Vergleich der Kalibrierwerte	107
7.2 Unterschiede der Stackingarten	110
7.3 Vergleich der Residuen	111
7.4 Vergleich der Koordinaten	113

7.5	Vergleich der Troposphärenparameter	115
7.6	Resümee	117
8	Erweiterungen	119
8.1	Variation der Zellgröße beim Stacking	119
8.2	Tests auf Ausreißer und Signifikanz	122
8.3	Alternativen zum zellbasierten Stacking	124
8.4	Herausforderungen	127
8.4.1	Individuelles Satellitenverhalten	128
8.4.2	Handhabung von Ausrüstungswechseln	130
9	Zusammenfassung und Ausblick	133
A	Anpassungen und Parameter BS	137
A.1	Modifikationen in der Bernese GNSS Software	137
A.2	Prozessierungsparameter in der BS52	140
B	Anhang	145
B.1	GURN: GNSS Upper Rhine Graben Network	145
B.2	Einfaches Stacking über einen längeren Zeitraum	149
B.3	Erweiterungen	154
	Literatur	155
	Dank	165

Abkürzungsverzeichnis

AIUB	Astronomisches Institut der Universität Bern, http://www.aiub.unibe.ch
ANTEX	ANTenna EXchange format specification
ARP	Antennenreferenzpunkt
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BPE	Bernese Processing Engine
BS	Bernese GNSS Software, http://www.bernese.unibe.ch
BS50	Bernese GPS Software, Version 5.0, http://www.bernese.unibe.ch
BS52	Bernese GNSS Software, Version 5.2, http://www.bernese.unibe.ch
CODE	Center for Orbit Determination in Europe
CORS	Continuously Operating Reference Station
DCB	Differential Code Biases
DoY	Day of Year
EOST	Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre, Strasbourg, Frankreich, http://www.eost.unistra.fr
EPN	EUREF GNSS Permanent Network, http://epncb.oma.be
ERP	Erdrotationsparameter
EUCOR	Europäische Konföderation der Oberrheinischen Universitäten, http://www.eucor-uni.org
GEONET	GPS Earth Observation NETwork, http://datahouse1.gsi.go.jp/terras/terras_english.html
GIK	Geodätisches Institut des Karlsruher Instituts für Technologie, http://www.gik.kit.edu
GMF	Global Mapping Function, Böhm u. a. [2006a]
GNSS	Global Navigation Satellite System
GREF	Integriertes Geodätisches Referenznetz Deutschlands, http://www.bkg.bund.de/gref
GURN	GNSS Upper Rhine Graben Network
IERS	International Earth Rotation and Reference Systems Service, http://www.iers.org
IGS	International GNSS Service, http://www.igs.org
ILRS	International Laser Ranging Service, http://ilrs.gsfc.nasa.gov
ITRF	International Terrestrial Reference Frame, http://itrf.ensg.ign.fr

IVS	International VLBI Service for Geodesy and Astrometry, http://ivscc.gsfc.nasa.gov
JPL	Jet Propulsion Laboratory, http://www.jpl.nasa.gov
KK	Korrelationskoeffizient
LEO	Low Earth Orbiter
LK	Linearkombination
NOAA	US National Oceanic and Atmospheric Administration, http://www.noaa.gov
PPP	Precise Point Positioning
PZO	Phasenzentrumsoffset der GNSS-Antenne
PZV	Phasenzentrumsvariationen der GNSS-Antenne
RINEX	Receiver INdependent EXchange format specification
SM	Stacking-Map
SNR	Signal-to-Noise-Ratio bzw. Signal-Rausch-Verhältnis
TAI	Temps Atomique International
TEC	Total Electron Content
TECU	Total Electron Content Unit
UT1	Universal Time
UTC	Universal Time Coordinated
VMF	Vienna Mapping Function, Böhm u. Schuh [2003]
ZLV	Troposphärische Laufzeitverzögerung in zenitaler Richtung (engl.: zenith path delay)

Stand der www-Adressen: 11.11.2014

1 Einführung

Auf die Nutzung von GNSS-Verfahren als täglich eingesetztes Werkzeug kann in vielen Fachdisziplinen heutzutage nicht mehr verzichtet werden. Je nach Anwendung existieren unterschiedliche Genauigkeitsanforderungen, welche von metergenauer Positionierung für beispielsweise GIS-Anwendungen über zentimetergenaue Echtzeitpositionierung, wie sie zum Beispiel in der Katastervermessung eingesetzt wird, bis hin zur hochgenauen Bestimmung von Punktkoordinaten in der Größenordnung weniger mm für Anwendungen wie Deformationsmessungen oder die Einrichtung von Grundlagentnetzen, reichen. Während in der heutigen Zeit Koordinatengenauigkeiten im cm-Bereich mit GNSS in der Regel problemlos in Echtzeit erreichbar sind, stellt die zuverlässige Berechnung hochgenauer 3D-Koordinaten im Postprocessing nach wie vor eine Herausforderung dar. Durch die stetige Weiterentwicklung der zur Verfügung stehenden GNSS-Geräte (Empfänger, Antennen) und eine fortlaufende Verbesserung der in den Auswerteprogrammen zur Verfügung stehenden Modelle und von extern einfließenden Daten können aktuell viele Fehlereinflüsse deutlich reduziert oder sogar gänzlich eliminiert werden. Ein Fokus liegt hierbei auf der Verbesserung des funktionalen Modells von GNSS. Beispielsweise konnte das Antennenmodell in der Auswertung durch die Bestimmung absoluter individueller Kalibrierinformation für einzelne GNSS-Empfangsantennen stark verbessert werden. Weitere Verbesserungen werden im stochastischen Modell erzielt, welches die Genauigkeiten der einzelnen Beobachtungen, die Beziehungen zwischen den Parametern und das Gewicht, mit dem ein einzelner Messwert zur Gesamtlösung beiträgt, beschreibt.

Trotz des derzeit hohen Entwicklungsstandes auf dem Gebiet der GNSS-Auswertung existieren nach wie vor Fehlereinflüsse, die sich auf die hochgenaue Positionsbestimmung im mm-Bereich auswirken, jedoch nur schwer modellierbar sind. Bei einer Aufspaltung der Fehler nach dem Ort ihres Auftretens in Satellit, Signalweg und GNSS-Station am Boden betrifft dies insbesondere die Situation an der GNSS-Station. Die hier auftretenden Fehler können als stationsabhängige Fehler zusammengefasst werden, die nicht oder unzureichend modellierte Fehlerquellen enthalten. Eine wesentliche Rolle spielen hierbei die Mehrwegeeffekte, die sich trotz hochmoderner Chokering-Antennen und verbesserter Empfängertechnologie noch immer auf die Positionsbestimmung auswirken. In der Forschung wurden in den vergangenen Jahren verschiedene Ansätze entwickelt, um die durch Mehrwegeeffekte verursachten Fehler zu bereinigen. In der vorliegenden Arbeit wurde ein Verfahren umgesetzt, mit dem durch Stapeln von Residuen einer PPP-Auswertung (Precise Point Positioning) Korrekturwerte berechnet werden, die in einem zweiten Auswerteschritt eingeführt werden. Der Fokus liegt hierbei auf einer einfachen Umsetzbarkeit, der Möglichkeit „historische“ GNSS-Daten ohne großen Zusatzaufwand verwenden und der Vorgabe, die Daten aller aktuellen und zukünftigen GNSS nutzen zu können. Zum Verständnis dieser Arbeit werden Grundkenntnisse auf dem GNSS-Sektor vorausgesetzt.

In Kapitel 2 werden kurz die grundlegenden Beobachtungsgleichungen und Linearkombinationen vorgestellt, die für das Verständnis des ebenfalls beschriebenen Verfahrens des Precise Point Positioning notwendig sind. Ergänzend sind Informationen zur Modellierung verschiedener Fehlereinflüsse auf PPP zusammengestellt. Im anschließenden Kapitel 3 werden verschiedene Forschungsansätze zur Modellierung und Beseitigung stationsabhängiger Fehler bei GNSS zusammengestellt, bevor in Kapitel 4 die der Arbeit zugrunde liegende Idee erläutert wird. Die Programmroutinen sowie die erforderlichen Anpassungen der wissenschaftlichen Auswertesoftware und die für die Prozessierung der Daten relevanten Parameter werden ebenso beschrieben.

Kapitel 5 enthält eine Zusammenstellung aller in der GNSS-Auswertung verwendeten Daten, welche die eigentlichen GNSS-Beobachtungen sowie die zusätzlich notwendigen Daten umfassen. Im anschließenden

umfangreichsten Teil dieser Arbeit (Kapitel 6) werden die zwei prozessierten Testszenarien und die durchgeführten Analysen der Ergebnisse umfassend beschrieben. Im nachfolgenden Kapitel 7 wird die Verwendung von Typmittelwerten für die Antennenmodelle in Kombination mit gestapelter Information als Ersatz von Individualkalibrierungen kritisch hinterfragt. Die Arbeit schließt mit Erweiterungsmöglichkeiten der entwickelten Vorgehensweise (Kapitel 8) und einer Zusammenfassung mit Ausblick (Kapitel 9).

2 Precise Point Positioning statischer GNSS-Beobachtungen

Bei der Methode des Precise Point Positioning (PPP) wird, im Gegensatz zur klassischen differenziellen Auswertung, bei der die simultanen Beobachtungen zweier Stationen durch geeignete Berechnungsverfahren gemeinsam, d.h. in Form sogenannter Basislinien ausgewertet werden, jede Station eines Netzes separat prozessiert. Dadurch werden Korrelationen zwischen den Daten einzelner Stationen vermieden, wodurch beispielsweise Einflüsse der Stationsumgebung separat für jede Station des Netzes analysiert werden können. Als nachteilig ist an dieser Methode zu sehen, dass Fehler, die nicht wie im Fall einer basislinienorientierten Auswertung durch Differenzbildung eliminiert werden können, durch entsprechende Modelle berücksichtigt oder als zusätzliche Parameter im Rahmen der Auswertung geschätzt werden müssen. In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die Grundlagen des PPP kurz erläutert und Modellierungsmöglichkeiten für verschiedene Einflussfaktoren bei PPP zusammengestellt.

2.1 Grundlegende Beobachtungsgleichungen

Grundlegend für die Prozessierung nach der Methode des PPP sind die undifferenzierten Phasenbeobachtungen (engl.: zero differences). Hierbei gehen verschiedene Zeitablesungen ein, welche beispielsweise nach [Rothacher, 1992, S. 26] wie folgt definiert sein können: Die Zeitpunkte \tilde{t}_i^S bzw. $\tilde{t}_{R i}$ sind die Zeitablesungen, welche am Satellit S zum Zeitpunkt t_i^S [GPS-Zeit] der Aussendung des Signals i bzw. am Empfänger zum Zeitpunkt $t_{R i}$ [GPS-Zeit] des Empfangs des Signals i aufgezeichnet werden. Die Synchronisationsfehler von Satelliten- und Empfängeruhr bezogen auf die GPS-Zeit lassen sich durch die Gl. 2-1 und 2-2 darstellen.

$$\Delta t_i^S = \tilde{t}_i^S - t_i^S, \quad (2-1)$$

$$\Delta t_{R i} = \tilde{t}_{R i} - t_{R i}. \quad (2-2)$$

Die undifferenzierten Phasenbeobachtungen können nach [Rothacher, 1992, S.29f] in Form von Gl. 2-3 in Längeneinheiten dargestellt werden. Hierbei wird angenommen, dass der Empfänger R ein Referenzsignal der gleichen Frequenz f (Wellenlänge λ) erzeugt wie der Satellit S .

$$\psi_{R i}^S = \lambda^S \cdot (\phi_R(\tilde{t}_{R i}) - \phi^S(\tilde{t}_i^S)), \quad (2-3)$$

mit

$$\begin{aligned} \psi_{R i}^S &: \text{Undifferenzierte Phasenbeobachtung,} \\ \lambda^S &: \text{Nominelle Wellenlänge des Satellitenoszillators,} \\ \phi_R(\tilde{t}_{R i}) &: \text{Erzeugte Referenzphase im Empfänger } R \text{ zum Zeitpunkt } \tilde{t}_{R i}, \\ \phi^S(\tilde{t}_i^S) &: \text{Erzeugte Phase durch Satellit } S \text{ zum Zeitpunkt } \tilde{t}_i^S. \end{aligned}$$

Werden die Synchronisationsfehler der Uhren (siehe Gl. 2-1 bzw. Gl. 2-2) berücksichtigt, ergibt sich Gl. 2-4.

$$\psi_{R i}^S = c \cdot \tau_{R i}^S + c \cdot \Delta t_{R i} - c \cdot \Delta t_i^S + \lambda^S \cdot N_R^S, \quad (2-4)$$

mit

$$\begin{aligned} c &: \text{Lichtgeschwindigkeit im Vakuum,} \\ \tau_{R i}^S &: \text{Laufzeit der Trägerwelle vom Satellit } S \text{ zum Empfänger } R, \\ N_R^S &: \text{Initiale Trägerphasenmehrdeutigkeit.} \end{aligned}$$

Die initiale Trägerphasenmehrdeutigkeit ist bei der Prozessierung mit Doppeldifferenzen eine zu bestimmende ganze Zahl. Im Falle einer PPP-Auswertung mit Zero-Differenzen unter Nutzung der ionosphärenfreien Linearkombination kann die Mehrdeutigkeit nur als Gleitkommazahl bestimmt werden.

Neben der unbekanntem Anzahl an Wellenlängen wird die Pseudoentfernung ($c \cdot \tau_{Ri}^S$) zwischen Satellit und Empfänger durch weitere Faktoren beeinflusst (siehe Gl. 2-5).

$$c \cdot \tau_{Ri}^S = \rho_{Ri}^S - \Delta\rho_{Ri,ion}^S + \Delta\rho_{Ri,trop}^S - \Delta\rho_{Ri,rel}^S, \quad (2-5)$$

mit

ρ_{Ri}^S : Euklidische Entfernung zwischen dem Satellit S zur Zeit t_i^S und dem Empfänger R

zur Zeit t_{Ri} ,

$\rho_{Ri,ion}^S$: Ionosphärische Refraktionskorrektur,

$\rho_{Ri,trop}^S$: Troposphärische Refraktionskorrektur,

$\rho_{Ri,rel}^S$: Periodische relativistische Korrektur.

Die periodische relativistische Korrektur der Satellitenuhr ist notwendig, um Fehler, welche durch die Exzentrizität der Satellitenbahn verursacht werden, zu eliminieren (siehe [Rothacher, 1992, S. 28]). Die Entfernung aus Phasenbeobachtungen (siehe Gl. 2-5) unterscheidet sich von den Pseudoentfernungen für Codebeobachtungen nur im Vorzeichen der ionosphärischen Korrektur. Im Falle der Codebeobachtungen liegt eine Verzögerung (\Rightarrow Gruppengeschwindigkeit), im Falle der Phasenbeobachtungen eine Beschleunigung (\Rightarrow Phasengeschwindigkeit) vor.

Die Beobachtungsgleichung für Trägerphasenmessungen kann zusammengefasst in Form von Gl. 2-6 dargestellt werden.

$$\rho_{Ri}^S - \Delta\rho_{Ri,ion}^S + \Delta\rho_{Ri,trop}^S - \Delta\rho_{Ri,rel}^S + c \cdot \Delta t_{Ri} - c \cdot \Delta t_i^S + \lambda^S N_R^S - \psi_{Ri}^{S'} = v_{Ri}^S, \quad (2-6)$$

mit

$\psi_{Ri}^{S'}$: Trägerphasenbeobachtung zwischen Satellit S und Empfänger R ,

v_{Ri}^S : Residuum.

2.2 Linearkombinationen

Im Rahmen der Auswertung von GNSS-Daten ist die Bildung sogenannter Linearkombinationen (LK) in vielen Fällen hilfreich oder sogar zwingend notwendig. Die LK werden hierbei aus den originären Phasen- und/oder Code-Beobachtungen auf L_1 , L_2 und in Zukunft auch L_5 gebildet. Nach [Rothacher, 1992, S.30ff] können Linearkombinationen L_l für Trägerphasenbeobachtungen in Form von Gl. 2-7 dargestellt werden. Diese Gleichung gilt entsprechend auch für Code-Beobachtungen.

$$\tilde{L}_l = a_{l,1} \cdot \tilde{L}_1 + a_{l,2} \cdot \tilde{L}_2, \quad (2-7)$$

mit

\tilde{L}_l : Linearkombination L_l in der Einheit Phasenzyklen,

$a_{l,1}, a_{l,2}$: Koeffizienten der Linearkombination,

\tilde{L}_1, \tilde{L}_2 : Originäre Trägerphasenbeobachtungen L_1 und L_2 in Zyklen des entsprechenden Trägers.

Hieraus kann die zugeordnete Frequenz f_l und Wellenlänge λ_l der Linearkombination L_l abgeleitet werden (siehe Gl. 2-8 und 2-9).

$$f_l = a_{l,1} \cdot f_1 + a_{l,2} \cdot f_2, \quad (2-8)$$

$$\lambda_l = \frac{c}{f_l} = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{a_{l,1} \cdot \lambda_2 + a_{l,2} \cdot \lambda_1}, \quad (2-9)$$

mit

- f_1, f_2 : Frequenzen der originären Träger L_1 und L_2 ,
- λ_1, λ_2 : Wellenlängen der originären Träger L_1 und L_2 ,
- c : Lichtgeschwindigkeit.

Die Umrechnung einer Linearkombination von der Einheit Phasenzyklen in Längeneinheiten kann nach Gl. 2-10 erfolgen.

$$L_l = \lambda_l \cdot \tilde{L}_l, \quad (l = 1, 2, \dots). \quad (2-10)$$

In Kombination mit Formel 2-7 ergibt sich daraus

$$L_l = x_{l,1} \cdot L_1 + x_{l,2} \cdot L_2, \quad (2-11)$$

wobei

$$x_{l,i} = a_{l,i} \cdot \frac{\lambda_l}{\lambda_i} \quad (2-12)$$

gilt.

Bei einer GNSS-Prozessierung nach dem PPP-Verfahren wird aus den originären Trägerphasenbeobachtungen (L_1, L_2 ; sehr geringes Messrauschen im mm-Bereich) die sogenannte ionosphärenfreie Linearkombination L_3 gebildet. Durch sie werden die ionosphärischen Laufzeitverzögerungen unter der Annahme, dass die Entfernungskorrektur umgekehrt proportional zum Quadrat der Frequenz ist, weitestgehend eliminiert. Neben L_3 können verschiedene weitere Linarkombinationen gebildet werden (siehe beispielsweise Rothacher [1992]), die jedoch für diese Arbeit keine Relevanz besitzen. In Tab. 2-1 sind verschiedene Charakteristika von L_1, L_2 und L_3 aufgelistet.

Tab. 2-1: Charakteristika verschiedener Linearkombinationen, in Anlehnung an [Rothacher, 1992, S.32]

LK	λ	LK-Koeffizienten		Beobachtungsrauschen	
	[cm]	$x_{l,1}$	$x_{l,2}$	[Längeneinheiten]	[Zyklen]
L_1	$\frac{c}{f_1}$ 19.03 ¹	1	0	1	1
L_2	$\frac{c}{f_2}$ 24.42 ²	0	1	$\frac{f_1}{f_2}$ 1.28	1
L_3	0	$\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}$ 2.546	$\frac{-f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}$ -1.546	$\frac{f_1 \sqrt{f_1^2 + f_2^2}}{f_1^2 - f_2^2}$ 3.227	-

¹ Berechnet mit $c=299\,792\,458$ m/s und $f_1=1575.42$ MHz aus Datei CONST. im Verzeichnis BERN52/GPS/GEN

² Mit $f_2=1227.60$ MHz

Abweichend von der in Tab. 2-1 angegebenen Wellenlänge für L_3 von 0 cm werden an anderen Stellen sich davon unterscheidende Werte angegeben. [Seeber, 2003, S. 263f] gibt für die Wellenlänge des ionosphärenfreien Signals einen Wert von ≈ 5.4 cm an (dort als L_0 bezeichnet). In [Wanninger, 2000, S. 15] beträgt die Wellenlänge des ionosphärenfreien Signals 0.6 cm, von [Dach u. a., 2007, S. 40] wird die formale Wellenlänge von L_3 mit ≈ 11 cm angegeben. Diese verschiedenen Werte für λ_3 zeigen, dass in der Fachwelt kein Konsens bei der Festlegung einer Wellenlänge für die ionosphärenfreie Linearkombination herrscht.

Nach [Rothacher, 1992, S.33] wird von den GPS-Satelliten eine dritte Frequenz abgestrahlt, welche für die Detektion atomarer Blitze reserviert ist und gelegentlich auch als L_3 bezeichnet wird. In dieser Arbeit bezieht sich L_3 jedoch immer auf die ionosphärenfreie Linearkombination.

Neben den reinen Linearkombinationen aus Code- bzw. Phaseninformationen existieren auch Mischformen, wie bspw. die sogenannte Melbourne-Wübbena-Linearkombination (Wübbena [1985] und Melbourne [1985]), welche aus Trägerphasen- (L_1 und L_2) und Code-Beobachtungen (P-Code P_1 und P_2) gebildet wird, jedoch in der vorliegenden Arbeit keine Anwendung findet.

2.3 PPP

Von Zumberge u. a. [1997a] wird Precise Point Positioning als Positionierungslösung im cm-Bereich vorgestellt. Hintergrund war die Verwendung reprozessierter Daten eines globalen Netzes zu Bestimmung hochgenauer Koordinaten für Stationen, die nicht Teil eines Permanentnetzes waren. Ergänzend geben Zumberge u. a. [1997b] als erreichbare Genauigkeit Größenordnungen im cm-/sub-dm-Bereich für statische/kinematische Beobachtungen an. Von Kouba u. Héroux [2001] wird Precise Point Positioning als einen neuer Auswertansatz vorgestellt, bei dem – im Gegensatz zur klassischen differenziellen Auswertung, bei der zeitsimultane Beobachtungen auf mindestens zwei Stationen notwendig sind – jede zu prozessierende Station separat betrachtet wird. Durch die Verwendung undifferenzierter Code- und Phasenbeobachtungen auf zwei Frequenzen und präziser GNSS-Produkte (beispielsweise des IGS) kann bei ausreichender Beobachtungszeit eine Positionierungsgenauigkeit erreicht werden, welche in der Größenordnung einer differenziellen Prozessierung liegt, so dass mit Beobachtungszeiten von mehr als 6 h eine Genauigkeit von 1 cm bis 2 cm in der Höhe und <1 cm in der Lage erreicht werden kann (siehe Kouba [2009]).

2.3.1 Funktionales Modell

Nach Kouba u. Héroux [2001] hängen die ionosphärenfreien Linearkombinationen für GPS-Pseudorange (P) und Trägerphasenbeobachtungen (L_3) zweier Frequenzen von der Empfängerposition, der Uhr, der Troposphäre und den Ambiguity-Parametern ab. Hieraus lässt sich die Beobachtungsgleichung für Phasenbeobachtungen (Gl. 2-14) ableiten.

$$\rho_E^S = \sqrt{(X^S - X_E)^2 + (Y^S - Y_E)^2 + (Z^S - Z_E)^2}, \quad (2-13)$$

$$L_3 = \rho_E^S + c(\delta t_E - \delta t^S) + LVA + R\lambda_3 + \epsilon, \quad (2-14)$$

mit

- ρ_E^S : Euklidische Entfernung zwischen Satellit S und Empfänger E ,
- X^S, Y^S, Z^S : Position des Satelliten S ,
- X_E, Y_E, Z_E : Position des Empfängers E ,
- L_3 : Ionosphärenfreie Linearkombination der L_1 - und L_2 -Trägerphasen,
- c : Lichtgeschwindigkeit im Vakuum,
- δt_E : Offset der Empfängeruhr zur GPS-Zeit,
- δt^S : Offset der Satellitenuhr zur GPS-Zeit,
- LVA : Laufzeitverzögerung durch neutrale Atmosphäre (primär: Troposphäre),
- R : Nichtganzzahlige Phasenmehrdeutigkeit der ionosphärenfreien Kombination der Trägerphasen,
- λ_3 : Wellenlänge der ionosphärenfreien Linearkombination,
- ϵ : Messrauschen, inkl. Mehrwegeeffekte und Biases.

Durch die Einführung externer Produkte, wie präziser Satellitenorbits ($\Rightarrow X^S, Y^S, Z^S$) und Satellitenuhrinformation ($\Rightarrow \delta t^S$) kann die Anzahl der zu bestimmenden Parameter reduziert werden. Die durch die Atmosphäre verursachte Laufzeitverzögerung LVA , welche in Abhängigkeit von der Zenitdistanz variiert, kann durch das Produkt einer zenitdistanzabhängigen Abbildungsfunktion $AF(z)$ und der Laufzeitverzögerung in zenitaler Richtung ZLV ausgedrückt werden:

$$LVA(z) = AF(z) \cdot ZLV. \quad (2-15)$$

Wie auf S. 15 beschrieben, kann die zenitale troposphärische Laufzeitverzögerung in einen trockenen und einen feuchten Anteil (ZLV_t, ZLV_f) mit den jeweiligen Abbildungsfunktionen (AF_t, AF_f) aufgespalten werden (siehe Gl. 2-25). Hierbei kann die trockene Komponente sehr gut durch Oberflächenmeteorologie und einfache Modelle, wie beispielsweise das im GNSS-Sektor weit verbreitete Modell von Saastamoinen (Saastamoinen [1972]), repräsentiert werden, so dass nur der feuchte Anteil als weiterer unbekannter Parameter verbleibt. Wird weiterhin vorausgesetzt, dass die Summe der zufälligen Fehler ϵ über die Zeit zu Null wird, lässt sich eine vereinfachte Form der Beobachtungsgleichung darstellen, welche das funktionale Modell der statischen Form des Precise Point Positioning (PPP) wiedergibt:

$$F(x) = \rho_E^S + c \cdot \delta t_E + AF(z) \cdot ZLV_f + R^i \cdot \lambda_3. \quad (2-16)$$

Im Vektor der unbekannt Parameter x (Dimension $u \times 1$) verbleiben die Stationsposition (X_E, Y_E, Z_E), der Empfängeruhrfehler (δt_E), der feuchte Anteil der troposphärischen Laufzeitverzögerung ZLV_f sowie die nichtganzzahlige Anzahl an Wellenlängen R^i . Der Index S kennzeichnet hierbei einen einzelnen Satelliten. Der Vektor der eingehenden Beobachtungen besitzt die Dimension $n \times 1$.

Zur Auswertung von GNSS-Daten durch vermittelnde Ausgleichung unter Anwendung der Methode der kleinsten Quadrate ist eine Linearisierung von Gl. 2-16 notwendig, welche mittels einer Taylorreihe in Form von

$$F(x) = F(x_0) + \frac{\partial F(x)}{\partial x}(x - x_0) + \dots \quad (2-17)$$

um einen Entwicklungspunkt x_0 (a priori-Werte) erfolgen kann. Das linearisierte Modell der Beobachtungsgleichungen kann durch

$$\mathbf{A} \cdot \underline{\Delta \hat{x}} = \underline{\Delta l} + \underline{v} \quad (2-18)$$

geschrieben werden, wobei \mathbf{A} die Designmatrix (Dimension $n \times u$), $\underline{\Delta\hat{\mathbf{x}}}$ der Vektor der ausgeglichenen reduzierten Unbekannten ($\underline{\Delta\mathbf{x}} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_0$, $u \times 1$), $\underline{\Delta\mathbf{l}}$ der Vektor der reduzierten Beobachtungen ($\underline{\Delta\mathbf{l}} = \underline{\mathbf{l}} - \mathbf{F}(x_0)$, $n \times 1$) und $\underline{\mathbf{v}}$ der Vektor der Residuen ($n \times 1$) ist. Die Designmatrix enthält die partiellen Ableitungen von $F(x)$ nach den Unbekannten und kann in der Form

$$\mathbf{A} = \left[\begin{array}{cccccc} \frac{\partial F(x)}{\partial X_E} & \frac{\partial F(x)}{\partial Y_E} & \frac{\partial F(x)}{\partial Z_E} & \frac{\partial F(x)}{\partial \delta t_E} & \frac{\partial F(x)}{\partial ZLV_f} & \frac{\partial F(x)}{\partial R^i} \end{array} \right]_{S=1 \dots n_S} \quad (2-19)$$

geschrieben werden. Zusammen mit der Gewichtsmatrix P , welche die Inverse der Kofaktormatrix Q_{ll} der Beobachtungen darstellt, kann die Bestimmung der ausgeglichenen Parameter durch

$$\underline{\Delta\hat{\mathbf{x}}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \underline{\Delta\mathbf{l}} \quad (2-20)$$

dargestellt werden. Die endgültigen Werte der geschätzten Parameter $\hat{\mathbf{x}}$ und die Residuen $\underline{\mathbf{v}}$ können durch

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x}_0 + \underline{\Delta\hat{\mathbf{x}}} \quad (2-21)$$

und

$$\underline{\mathbf{v}} = \mathbf{A} \cdot \underline{\Delta\hat{\mathbf{x}}} - \underline{\Delta\mathbf{l}} \quad (2-22)$$

berechnet werden. Ebenso kann die korrespondierende Kovarianz-Matrix $\mathbf{C}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}}$ und der a posteriori-Varianzfaktor $\hat{\sigma}_0^2$ durch

$$\mathbf{C}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}} = \sigma_0^2 (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \quad (2-23)$$

und

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\underline{\mathbf{v}}^T \mathbf{P} \underline{\mathbf{v}}}{n - u} \quad (2-24)$$

abgeleitet werden.

Der Vektor der Residuen $\underline{\mathbf{v}}$ repräsentiert die Unterschiede zwischen den eingehenden Originalbeobachtungen und den ausgeglichenen Beobachtungen. Im Rahmen der PPP-Prozessierung der GPS-Daten mit der Bernese GNSS Software (BS) erfolgen mehrere GPSEST-Durchläufe, wobei ein iteratives Datenscreening vorgenommen wird, bei dem die Grenzwerte für die Residuen nach und nach verringert werden. Beobachtungen, deren Residuen nach einem Durchlauf als Ausreißer detektiert werden, werden für den nächsten Durchlauf deaktiviert. Eine ausführliche Beschreibung der Prozessierungsparameter erfolgt in Kapitel A.2. Die am Ende der Prozessierung verbleibenden Residuen enthalten neben zufälligen auch systematische Anteile. Für jedes Residuum liegt neben dem Residuenwert auch die Beobachtungsepoche sowie die räumliche Richtung – repräsentiert durch Azimut und Zenitdistanz bzw. Elevation – vor, aus der das Signal empfangen wird.

Im oben vorgestellten Modell werden vier Parametertypen verwendet. Diese umfassen die Empfängerposition (X_E, Y_E, Z_E), die Empfängeruhr (δt_E), die Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung (ZLV) und die nichtganzzahligen Phasenmehrdeutigkeiten (R^i). Um die Daten von mehr als einer Epoche auswerten zu können, müssen die Veränderungen der einzelnen Parameter in der Ausgleichung stochastisch korrekt modelliert werden. Die Empfängerposition kann hierbei über längere Zeit konstant bleiben (im Falle eines statischen Aufbaus) oder Bewegungen von wenigen m/s (Fahrzeuge, Schiffe) bis zu mehreren km/s (tieffliegende Satelliten, sogenannte Low Earth Orbiters (LEO)) unterliegen. Die Empfängeruhr weist in der Regel eine Drift auf, welche von der Qualität des Oszillators abhängt. Im Fall einer internen Quarzuhr sind bei einer Frequenzstabilität in der Größenordnung von 10^{-10} Driftraten von umgerechnet einigen

cm/s möglich. Die zenitale troposphärische Laufzeitverzögerung ändert sich nur sehr langsam (wenige cm/h). Werden bei der Prozessierung Doppeldifferenzen (zwei Satelliten, zwei Empfänger) genutzt, werden die Uhrfehler sowohl der Satelliten als auch der Empfänger eliminiert.

Bei der Auswertung von GNSS-Beobachtungen unter Nutzung von Phasendaten werden die anfänglich unbekanntes Phasenmehrdeutigkeiten (Anzahl ganzer Wellenlängen zwischen Satellit und Empfänger) durch verschiedene Verfahren bestimmt. Im Falle einer differenziellen Auswertestrategie und erfolgreicher Festsetzung der Phasenmehrdeutigkeiten ist dies für jeden Satellit eine ganze Zahl und diese Lösung wird als sogenannte „fixed-Lösung“ bezeichnet. Bei der Prozessierung im PPP-Modus unter Nutzung der ionosphärenfreien Linearkombination L_3 ist nur eine Festsetzung auf Gleitkommazahlen (sogenannte „float-Lösung“) möglich. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass bei PPP die an einer Station empfangenen Signale isoliert ausgewertet werden, also keine Berechnung von Empfänger-Einfach-Differenzen möglich ist, bei denen der Satellitenuhrfehler eliminiert wird. Sollen nun die Phasenmehrdeutigkeiten auf eine ganze Zahl festgelegt werden, müssten entsprechende Satellitenuhrkorrekturen vorliegen. Mit der in den vergangenen Jahren gestiegenen Popularität von PPP wurden verschiedene Ansätze entwickelt, um Korrekturen von Satellitenuhren mit dieser Eigenschaft zu berechnen. Details hierzu sind unter anderem in Ge u. a. [2008] und Laurichesse u. a. [2009] aufgeführt. Nach der Bestimmung der initialen Werte (Ganzzahl bzw. Gleitkommazahl) der Phasenmehrdeutigkeiten werden diese konstant gehalten und in der weiteren Auswertung nur die Veränderungen der Phase betrachtet. Dies ist nur möglich, solange die Signale der Satelliten ungestört an der Station aufgezeichnet wurden. Wird der Signalweg zwischen Satellit und Empfänger auch nur kurz unterbrochen, weil beispielsweise ein Fahrzeug die Station passiert, tritt ein sogenannter cycle-slip auf, d.h. die Phasenmehrdeutigkeiten müssen ab diesem Zeitpunkt für diesen Satelliten neu bestimmt werden.

2.3.2 Stochastisches Modell

Im oben beschriebenen funktionalen Modell wird der mathematische Zusammenhang zwischen eingehenden GNSS-Beobachtungen und den zu bestimmenden unbekanntes Parametern (beispielsweise Stationskoordinaten) festgelegt. [Luo, 2013, Kap. 3.2.4] gibt einen guten Überblick des bei PPP genutzten stochastischen Modells, welches hier in gekürzter Form zusammengefasst wird. Das stochastische Modell wird bei der Ausgleichung zur Schätzung der unbekanntes Größen zusätzlich zum funktionalen Modell benötigt. Es enthält die Information über die Genauigkeiten der eingehenden Beobachtungen sowie die Korrelation zwischen einzelnen Beobachtungen. Das funktionale Modell für GNSS-Beobachtungen wurde in den vergangenen Jahren sukzessive erweitert und verbessert, beispielsweise durch die Bestimmung individueller Antennenkalibrierungen zur Verbesserung der Antennenmodelle, während im stochastischen Modell nach wie vor Unzulänglichkeiten enthalten sind. Zwar wurden die Gewichtsmodelle, welche den Einfluss einzelner Beobachtungen auf geschätzte Parameter definieren, weiterentwickelt, jedoch wurden die physikalischen Korrelationen zwischen einzelnen GNSS-Beobachtungen weitestgehend vernachlässigt.

Zur Berücksichtigung des stochastischen Modells wird bei der Bestimmung der unbekanntes Parameter die Inverse der Kofaktormatrix Q_u als Gewichtsmatrix P verwendet. Nach der Ausgleichung enthält die Kovarianz-Matrix die Genauigkeiten sowie die Korrelationen zwischen den geschätzten Parametern. In der Hauptdiagonale steht die Genauigkeitsinformation (Varianzen), in den Nebendiagonalen die Information zur physikalischen Korrelation der einzelnen Parameter (Kovarianzen). Eine realitätsnahe Gewichtung der einzelnen Beobachtungen in der GNSS-Auswertung stellt eine Herausforderung dar. Eine qualitativ gute Beobachtung soll in der Ausgleichung mit einem hohen Gewicht zur Bestimmung der

unbekannten Parameter beitragen, jedoch erschweren unmodellierbare Parameter, wie beispielsweise das Aufzeichnungsverhalten des GNSS-Empfängers, die Festlegung realistischer Gewichte. Im einfachsten Fall erfolgt die Gewichtung durch eine Einheitsmatrix, bei der jeder Beobachtung das gleiche Gewicht zugewiesen und Korrelationen zwischen den einzelnen Beobachtungen vernachlässigt werden. Für hochgenaue GNSS-Auswertungen ist dieses Gewichtsmodell unzureichend. Da Beobachtungen niedriger Elevationen stärker beispielsweise durch die atmosphärische Laufzeitverzögerung beeinträchtigt werden und somit eine schlechtere Genauigkeit aufweisen, kann der Elevationswinkel e bzw. die Zenitdistanz z als Parameter für die Gewichtung dieser Beobachtungen herangezogen werden. Ein in vielen GNSS-Programmen genutztes Gewichtsmodell ist $p = \cos(z)$. [Luo, 2013, S. 85] stellt verschiedene gebräuchliche Gewichtsmodelle gegenüber. Die elevationsabhängige Gewichtung stellt zwar einen einfachen Ansatz dar, vernachlässigt jedoch den Einfluss äußerer Faktoren (beispielsweise Mehrwegeeffekte) auf die Signalqualität. Ansätze zur Berücksichtigung des Signal-Rausch-Verhältnisses sind in Kap. 3.1 ab S. 27 zusammengestellt. Als weitere Möglichkeit führt Luo [2013] die Varianzkomponentenschätzung als verbessertes stochastisches Modell an. Während elevationsabhängige Gewichtungsansätze vor dem Ausgleichungsprozess eingreifen, werden bei einer Varianzkomponentenschätzung die Residuen nach der Ausgleichung analysiert.

Die physikalischen Korrelationen zwischen einzelnen Beobachtungen können in zeitliche, räumliche und Korrelationen zwischen einzelnen Frequenzen aufgeteilt werden und sind in der Regel im stochastischen Modell nicht berücksichtigt. Räumliche Korrelationen können durch die Beobachtungen verschiedener Satelliten an einer Station oder durch Beobachtungen verschiedener Stationen eines Satelliten gegeben sein. Durch die in der relativen Positionsbestimmung angewendete Differenzbildung können die durch räumliche Korrelationen verursachten Fehler weitestgehend eliminiert werden. Zeitliche Korrelationen können durch die Aufzeichnung von Beobachtungen eines Satelliten an einer Station zu verschiedenen Zeiten gegeben sein. Dies kann sowohl in der geänderten Satellitengeometrie, als auch durch geänderte äußere Bedingungen (beispielsweise Atmosphäre) hervorgerufen werden. Je mehr Zeit zwischen den einzelnen Beobachtungsepochen vergangen ist, desto geringer ist die zeitliche Korrelation zwischen diesen Beobachtungen.

2.4 Modellierung von Fehlereinflüssen bei PPP

Im Gegensatz zur differenziellen Prozessierung von GNSS-Daten, bei der verschiedenste Fehlereinflüsse durch Differenzbildung minimiert oder weitgehend eliminiert werden, müssen diese bei PPP in geeigneter Weise modelliert werden. Kouba u. Héroux [2001] listen eine Vielzahl von Einflüssen auf, welche im Folgenden dargestellt und ergänzt werden. Bei der Nutzung von Code-Information, welche Positionierungsgenauigkeiten auf m-Niveau ermöglicht, müssen Effekte korrigiert werden, deren Größenordnung ebenfalls im m-Bereich liegt. Dies umfasst beispielsweise relativistische Effekte erster Ordnung, Satellitenuhrfehler oder troposphärische Laufzeitverzögerungen. Werden zusätzlich Phasenbeobachtungen verwendet, mit denen bei ausreichender Beobachtungszeit eine Positionsgenauigkeit im niedrigen cm-Bereich oder besser möglich ist, müssen auch Fehler berücksichtigt werden, die sich in geringerem Maß auswirken. Eine Zusammenstellung verschiedener Fehlerquellen und deren Größenordnung ist in Tab. 2-2 zu finden. Nach Kouba u. Héroux [2001] werden für viele der im Folgenden genannten Effekte die Positionen von Sonne und Mond benötigt, welche frei verfügbaren Ephemeridendaten entnommen oder mittels einfacher Formeln berechnet werden können. Letzteres ist für eine millimetergenaue Positionsbestimmung ausreichend, da die relative Genauigkeit der Sonne-/Mondposition in einer Größenordnung von 1/1000 ausreichend ist. Die Handhabung der Planetenephemeriden im Rahmen dieser Arbeit ist Kap. A.2 beschrieben.

Tab. 2-2: Hauptfehlerbeträge bei GNSS für eine einzelne Pseudoentfernungsbeobachtung, nach [Seeber, 2003, S. 299], unter Verwendung aktueller Genauigkeiten für Orbit- und Uhrinformation des IGS

	Fehlerquelle	RMS Entfernung
Satellit	Orbit (Broadcast)	≈ 1 m
	Uhr (Broadcast)	≈ 1.5 m
Signalweg	Ionosphäre (2 Frequenzen)	cm–dm
	Ionosphäre (bestes Modell)	1–2 m
	Ionosphäre (durchschnittliches Modell)	5–10 m
	Ionosphäre (schlechtestes Modell)	10–50 m
	Troposphäre (Modell)	dm
	Mehrwege (Codebeobachtung)	1–2 m
Empfänger	Beobachtungsrauschen	0.2–1 m
	Hardwareverzögerungen	dm–m
	Antennenphasenzentrum	mm–cm

Die im Folgenden beschriebenen Effekte sind nach dem Ort des Auftretens unterteilt in satellitenspezifische, den Signalweg betreffende und stationsspezifische Effekte. Details zu den in dieser Arbeit verwendeten Daten und Modellen sind in Kapitel 5 ab S. 55 zusammengestellt.

2.4.1 Satellitenspezifische Effekte

In diesem Unterkapitel sind die für PPP relevanten Einflussfaktoren des Raumsegments nach einzelnen Bereichen sortiert zusammengestellt.

Orbits und Uhren

Zur Etablierung der PPP-Methode haben nicht zuletzt die in den vergangenen Jahren stetig gesteigerten Genauigkeiten der externen GNSS-Produkte (z.B. Orbits) beigetragen, die mit unterschiedlichen zeitlichen Verzögerungen und Genauigkeitsklassen frei im Internet zur Verfügung gestellt werden. Diese Produkte werden unabhängig durch verschiedene Analysezentren aus den Daten der Stationen des globalen IGS-Permanentnetzes berechnet und von der koordinierenden Stelle der Analysezentren (derzeit am NOAA/NGS, Stand: 19.10.2014) zu einer Gesamtlösung kombiniert. In Tab. 2-3 sind die zehn derzeitigen Analysezentren des IGS mit den dort verwendeten Softwarepaketen zusammengestellt (Stand: 19.10.2014, Quellen: <http://www.igs.org/about/analysis-centers> und <ftp://ftp.igs.org/pub/center/analysis>). Die Daten der einzelnen Analysezentren können auch separat von deren Servern heruntergeladen werden. Von elementarer Bedeutung in einer PPP-Prozessierung sind Orbit- und Uhrinformation der verwendeten Satelliten. Tab. 2-4 gibt einen Überblick dieser derzeit vom IGS für GPS bereitgestellten Daten. Durch die mehrfache tägliche Bereitstellung der Ultra-Rapid-Produkte verringert sich das durchschnittliche Alter der enthaltenen Daten auf 6 h. Hierdurch kann eine bessere Genauigkeit der prädierten Daten erreicht werden. Im Gegensatz zu allen anderen IGS-Produkten enthalten die Ultra-Rapid-Orbits des IGS 48 h, wobei die Beginn- und Endzeit mit jeder Aktualisierung um 6 h verschoben wird. Die ersten 24 h basieren hierbei auf den aktuellsten GPS-Beobachtungsdaten des IGS-Netzes. Zum Zeitpunkt der Aktualisierung weisen die beobachteten Orbits ein Alter von 3 h auf. Die folgenden 24 h enthalten prädierte Orbits, welche

Tab. 2-3: Übersicht der aktuellen IGS-Analysezentren, Stand: 19.10.2014

Institution	Abkürzung	Land	Software
Natural Resources Canada	NRCAN	Canada	CSRS-PPP
Geodetic Observatory Pecny	GOP-RIGTC	Czech Republic	Bernese GNSS Software
European Space Operations Center	ESOC	Germany	NAPEOS
GeoForschungsZentrum	GFZ	Germany	EPOS
Center for Orbit Determination in Europe	CODE	Switzerland	Bernese GNSS Software
Jet Propulsion Laboratory	JPL	USA	GIPSY/OASIS
National Oceanic and Atmospheric Administration / NGS	NOAA	USA	verschiedene
Scripps Institution of Oceanography	SIO	USA	GAMIT/GLOBK
U.S. Naval Observatory	USNO	USA	Bernese GNSS Software
Massachusetts Institute of Technology	MIT	USA	GAMIT/GLOBK

Tab. 2-4: Orbit- und Uhrprodukte des IGS; Orbitgenauigkeiten: mittlere 1D-RMS-Werte über die drei geozentrischen Koordinatenkomponenten (XYZ), Uhrgenauigkeiten: Standardabweichungen nach Entfernung von Biases für Satelliten- und Empfängeruhr; Quelle: <http://www.igs.org>, Stand: 25.06.2014

Typ		Genauigkeit	zeitl. Verzögerung	Aktualisierung	zeitl. Auflösung
Broadcast	Orbit	≈ 100 cm	Echtzeit	-	täglich
	SV-Uhr	≈ 2.5 ns			
Ultra-Rapid prädiziert	Orbit	≈ 5 cm	Echtzeit	03, 09, 15, 21 UTC	15 min
	SV-Uhr	≈ 1.5 ns			
Ultra-Rapid beobachtet	Orbit	≈ 3 cm	3–9 h	03, 09, 15, 21 UTC	15 min
	SV-Uhr	≈ 50 ps			
Rapid	Orbit	≈ 2.5 cm	17–41 h	täglich 17 UTC	15 min
	SV-Uhr	≈ 25 ps			5 min
Final	Orbit	≈ 2.5 cm	12–18 d	donnerstags	15 min
	SV-Uhr	≈ 20 ps			30 s

aus den beobachteten Orbits extrapoliert werden. Trotz dieses Vorgehens ist ein stetiger Übergang vom beobachteten auf den prädizierten Teil vorhanden. Neben den Orbit- und Uhrdaten der Satelliten werden auch für die in die Berechnung eingehenden IGS-Stationen die Uhrparameter geschätzt und im Internet zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus werden vom IGS auch finale Orbits der GLONASS-Satelliten, hochpräzise Koordinaten/Geschwindigkeiten der IGS-Stationen, sowie Parameter der Erdrotation und der Atmosphäre (Troposphäre und Ionosphäre) mit unterschiedlicher zeitlicher Verzögerung und Genauigkeit angeboten. Die Rapid-Produkte erreichen mittlerweile fast die gleiche Qualität wie die finalen Produkte. Die finalen Produkte weisen die größte Qualität und interne Konsistenz aller IGS-Produkte auf. Sie bilden die Basis für den IGS-Referenzrahmen und werden für Anwendungen genutzt, die höchste Konsistenz und Qualität beanspruchen und deren Prozessierung nicht zeitnah zur Aufzeichnung der Beobachtungen erfolgen muß. Weiterführende Informationen zu den vom IGS angebotenen Daten können der Webseite des Koordinators der Analysezentren unter <http://acc.igs.org> (Stand: 19.10.2014) entnommen werden.

Die vom IGS angebotenen Daten bieten bereits eine hohe Qualität. Um jedoch die bestmögliche Genauigkeit erzielen zu können, sollten bei der Prozessierung eigener GNSS-Daten die gleichen Korrekturmodelle

angewendet werden, wie sie von den IGS-Analysezentren bei der Berechnung der Produkte verwendet wurden (siehe auch [Dach u. a., 2007, S. 429]). Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Bernese GNSS Software zur Prozessierung der GPS-Daten eingesetzt, so dass die Produkte des CODE verwendet wurden, die ebenfalls mit der BS berechnet werden.

Sendeantenne

Ein wesentlicher satellitenspezifischer Faktor ist der Antennenoffset. Dieser beschreibt in einem satellitenfesten Koordinatensystem den Vektor vom Massenmittelpunkt (Ursprung) des Satelliten zum mittleren elektrischen Phasenzentrum der Sendeantenne des Satelliten. Die Z-Achse zeigt in Richtung des Erdmittelpunktes, die Y-Achse (Rotationsachse der Sonnensegel) entspricht dem Kreuzprodukt der Z-Achse mit dem Vektor Satellit-Sonne, die X-Achse vervollständigt das rechtshändige System (siehe ANTEX-Formatbeschreibung in der Version 1.4¹). Die Modellierung der Satellitenbahn bezieht sich auf dessen Massenmittelpunkt, die Abstrahlung der GNSS-Signale erfolgt jedoch durch die exzentrisch angeordnete Sendeantenne. Nach Kouba [2009] beziehen sich die präzisen Satellitenorbits und Uhren des IGS auf den Massenmittelpunkt, während die in der Broadcast-Navigations-Mitteilung enthaltenen Ephemeriden auf das mittlere Phasenzentrum bezogen sind. Mittels des Phasenzentrumsoffsets (PZO) kann daher für die Prozessierung der GNSS-Daten der Bezug zwischen Massen- und Phasenzentrum hergestellt werden. Für die aktuellen GPS- und GLONASS-Satelliten sind die Y-Komponenten zu Null gesetzt, die X- und Z-Komponenten durch die ermittelten Werte belegt.

Die zweite Komponente des Modells der Satelliten-Sende-Antenne sind die Variationen des Phasenzentrums. Sie beschreiben die Abweichungen des Sendeverhaltens von einer idealen Antenne, sind also richtungsabhängig. Die Phasenzentrumsvariationen (PZV) werden in Abhängigkeit von der Nadirdistanz angegeben, wobei von einer azimutalen Symmetrie ausgegangen wird. Die Bestimmung von PZO und PZV der Satelliten erfolgt durch Auswertung eines globalen GNSS-Netzes und Schätzung dieser Parameter im Zuge der Ausgleichung. Details hierzu sind beispielsweise in Schmid u. a. [2007] aufgeführt.

Phase-Wind-Up

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor ist der sogenannte phase-wind-up-Effekt (Wu u. a. [1993]). Die von den GPS-Satelliten abgestrahlten Signale sind rechtshändig zirkular polarisiert, wodurch die gemessene Trägerphase direkt von der gegenseitigen Ausrichtung von Sende- (Satellit) und Empfangsantenne (Empfänger) abhängt. Wird eine der Antennen (Satellit oder Empfänger) um ihre vertikale Achse gedreht, ändert sich die Phase des aufgezeichneten Signals um bis zu einen Zyklus (einer Wellenlänge) bei einer Drehung um 360°. Eine statisch aufgestellte GNSS-Empfangsantenne rotiert nicht um ihre vertikale Achse und ist gegenüber einer Referenzrichtung (meist: Geographisch-Nord) ausgerichtet. Zur optimalen Ausrichtung der Sonnensegel des Satelliten wird dieser langsam um die vertikale Achse gedreht. Hierdurch ändert sich die Geometrie zwischen Satellit und Empfänger. Zusätzlich unterliegen die Satelliten während sogenannter „eclipsing seasons“ schnellen Drehungen. Hierbei treten zwei Fälle auf:

- Noon-turns: der Satellit kreuzt die Gerade Sonne-Erdmittelpunkt auf der Sonnenseite der Erde
- Midnight-turns: der Satellit kreuzt die Gerade Sonne-Erdmittelpunkt auf der Schattenseite der Erde

In diesen beiden Fällen rotiert der Satellit mit hoher Geschwindigkeit (eine Umdrehung in weniger als 30 min). GNSS-Daten des betroffenen Satelliten, die während dieser Zeitspanne aufgezeichnet wurden, müssen um diesen Effekt korrigiert (siehe Bar-Sever [1996]) oder die Daten aus der Prozessierung entfernt

¹siehe <ftp://igs.cb.jpl.nasa.gov/pub/station/general/antex14.txt>, Stand: 06.02.2015

werden. Im Rahmen einer differenziellen Prozessierung mit Basislinien von wenigen 100 km kann dieser Effekt vernachlässigt werden, bei Basislinien von mehreren 1000 km nimmt dieser Effekt Größenordnungen von mehreren cm an und sollte korrigiert werden; bei PPP jedoch ist die Berücksichtigung unbedingt notwendig. Seit 1994 wird diese Korrektur in den von den IGS-Analysezentren genutzten Programmpaketen weitgehend angewendet. Wird dieser Effekt bei der Prozessierung der GNSS-Daten vernachlässigt und gleichzeitig die IGS Uhren und Orbits festgehalten, ergibt sich daraus ein Positions- und Uhrfehler in der Größenordnung von mehreren dm. Bei bewegten Empfangsantennen (beispielsweise auf Fahrzeugen) wird der phase-wind-up-Effekt durch den in der Auswertung geschätzten Empfängeruhrfehler kompensiert oder im Falle einer Berechnung auf Basis von Doppeldifferenzen eliminiert.

Bei der Prozessierung von Daten mit der Bernese GNSS Software kann dieser Effekt bei der Parameterschätzung im Programm GPSEST berücksichtigt werden. Hierbei kann ausgewählt werden, ob lediglich der geometrische Teil (Veränderung der Relativgeometrie Empfänger-Satellit) oder der komplette Effekt berücksichtigt wird, welcher auch die nominelle Bewegung der Fluglage des Satelliten enthält. Da der letztgenannte Einfluss vollständig in den Satellitenuhrkorrekturen berücksichtigt werden kann, muss bei einer PPP-Auswertung das Modell ausgewählt werden, welches auch bei der Berechnung der Satellitenuhrfehler verwendet wurde. In den operationellen CODE-Produkten wird seit DoY 257 2003 der geometrische Teil und seit DoY 309 2006 der komplette Effekt berücksichtigt (siehe Kontexthilfe der Bernese GNSS Software, Version 5.2). Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Prozessierungen wurden reprozedierte CODE-Produkte (Berücksichtigung des vollen Effekts) und die Option „ALWAYS“ im GPSEST-Panel (GPSEST 3.3, General options 3) gewählt.

Relativistische Effekte

Der Vollständigkeit halber werden an dieser Stelle relativistische Effekte, basierend auf [Luo, 2013, S. 58ff] kurz erwähnt. Relativistische Effekte haben wesentliche Auswirkungen auf das Uhrverhalten von GNSS-Satelliten und können in einen bezüglich der Frequenz konstanten sowie einen periodischen Anteil unterteilt werden. Der konstante Anteil setzt sich aus zwei Komponenten zusammen, wobei die erste Komponente durch die unterschiedlichen Gravitationspotenziale (Standort Erdoberfläche bzw. Satellit) und die zweite Komponente durch die Geschwindigkeit der GNSS-Satelliten bezüglich der Erdoberfläche verursacht werden. Nach der speziellen Relativitätstheorie vergeht die Zeit bei großen Geschwindigkeiten langsamer, so dass die Geschwindigkeit der GPS-Satelliten in der Größenordnung von etwa 3.8 km/s zu einer Verlangsamung der Satellitenuhr von etwa 7.2 $\mu\text{s}/\text{d}$ führt. Durch Unterschiede im Gravitationspotenzial zwischen auf der Erde befindlichen GNSS-Empfängern und den GNSS-Satelliten laufen die auf den Satelliten betriebenen, hochpräzisen Atomuhren schneller als eine baugleiche Uhr auf der Erde. Durch die Anpassung der nominellen, bei GPS verwendeten Grundfrequenz $f_0 = 10.23 \text{ MHz}$ mittels eines Anpassungsfaktors von $\Delta f/f_0 = -4.4647 \cdot 10^{-10}$ (siehe [IS-GPS-200, 2014, S. 14]) können diese beiden Effekte korrigiert werden, so dass die Grundfrequenz – von der Erde aus betrachtet – den nominellen Wert beträgt. Der periodische Anteil wird primär durch die Exzentrizität der Satellitenbahn verursacht, wird jedoch bereits in den vom IGS bereitgestellten Uhrprodukten für GPS und GLONASS korrigiert.

Neben dem Einfluss relativistischer Effekte auf die Satellitenuhren werden auch die Uhren der auf der Erde befindlichen GNSS-Empfänger beeinflusst. Durch den Sagnac-Effekt kann der durch die Erdrotation verursachte relativistische Effekt beschrieben werden. Dieser tritt auf, wenn das vom Satelliten ausgesendete Signal auf dem Weg zum Empfänger, bedingt durch die Erdrotation und die endliche Lichtgeschwindigkeit, einen längeren bzw. kürzeren Weg zurücklegen muss, wodurch Frequenzverschiebungen in der Größenordnung von $\Delta f/f_0 = 1 \cdot 10^{-12}$ verursacht werden können, die einem Empfängeruhrfehler

von 10 ns oder 3 m nach 3 h entsprechen ([Hofmann-Wellenhof u. a., 2008, S. 147]). Der Sagnac-Effekt wird unter anderem auch bei der Bestimmung von Änderungen der Erdrotationsraten mit Hilfe von Ringlaser-Kreiseln, wie beispielsweise an der Geodätischen Fundamentalstation in Wettzell, angewendet. Weitere Details zu relativistischen Effekten können beispielsweise in [Hofmann-Wellenhof u. a., 2008, S. 144ff] oder Petit u. Luzum [2010] nachgelesen werden.

2.4.2 Effekte des Signalwegs

Auf dem Weg vom Satelliten zum Empfänger durchlaufen die Signale die Erdatmosphäre. Diese kann nach verschiedenen Gesichtspunkten in Schichten mit bestimmten Eigenschaften aufgeteilt werden. Wird eine Unterteilung beispielsweise nach dem Grad der Ionisierung unternommen, wird nach Dieminger [1968] die erdnächste Schicht bis in eine Höhe von ca. 80 km als Neutrosphäre, der anschließende Bereich bis ca. 7000 km Höhe als Ionosphäre und die Schicht bis 90 000 km als Protonosphäre bezeichnet. Nach Hopfield [1971] genügt für die Anwendung in der Geodäsie eine Einteilung der Atmosphäre in Iono- und Neutrosphäre. Für die von den GNSS-Satelliten ausgesandten elektromagnetischen Signale ist die Ionosphäre ein dispersives Medium, d.h. der Brechungsindex ist frequenzabhängig. Bei der Nutzung von Zwei- oder Mehrfrequenzbeobachtungen kann der Einfluss der Ionosphäre auf die Positionierung durch die ionosphärenfreie Linearkombination L_3 der auf L_1 und L_2 ausgesendeten Signale weitestgehend eliminiert werden. Somit ist im Falle von PPP unter der Verwendung von L_3 das Beobachtungsmaterial um die ionosphärischen Effekte erster Ordnung bereinigt.

Troposphärische Laufzeitverzögerung

Im Gegensatz zum Einfluss der Ionosphäre kann die troposphärische Laufzeitverzögerung nicht durch Bildung von Linearkombinationen verschiedener Frequenzen eliminiert werden, da die Troposphäre gegenüber GNSS-Signalen nicht-dispersiv ist. Die Größe der Laufzeitverzögerung hängt hierbei wesentlich von der Länge des in der Troposphäre zurückgelegten Signalweges ab. Den kürzesten/längsten Weg durch die Atmosphäre durchlaufen die aus zenitaler/horizontnaher Richtung an einer Station eintreffenden GNSS-Signale, welche Laufzeitverzögerungen von typischerweise 2.4 m / >20 m unterliegen. Zudem weisen die troposphärisch bedingten Laufzeitverzögerungen durch die variierende Konzentration des Wasserdampfs eine starke räumliche und zeitliche Komponente auf. Der Einfachheit halber schlägt Hopfield [1969] eine Unterteilung des troposphärischen Einflusses in einen trockenen (ZLV_t) und einen feuchten (ZLV_f) Anteil vor. Da die Laufzeitverzögerung abhängig von der Zenitdistanz (Elevation) der Einfallsrichtung ist, wird hierbei der Wert in zenitaler Richtung (ZLV) angegeben und mittels einer Abbildungsfunktion (AF , engl.: mapping function) für die entsprechende Richtung skaliert. Hierbei werden unterschiedliche AF für den trockenen und feuchten Anteil verwendet. Die gesamte troposphärisch bedingte Laufzeitverzögerung kann wie folgt dargestellt werden:

$$LVA(z) = AF_t(z) \cdot ZLV_t + AF_f(z) \cdot ZLV_f \quad (2-25)$$

mit

$$\begin{aligned} LVA(z) &: \text{Troposphärische Laufzeitverzögerung für die Zenitdistanz } z, \\ AF_t(z), AF_f(z) &: \text{Zenitdistanzabhängige Abbildungsfunktion für den trockenen (} t \text{) und} \\ &\quad \text{feuchten (} f \text{) Anteil,} \\ ZLV_t, ZLV_f &: \text{Zenitale Laufzeitverzögerung für den trockenen und feuchten Anteil.} \end{aligned}$$

Nach Bevis u. a. [1992] beträgt der trockene Anteil der Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung auf Meeresniveau etwa 2.3 m und macht ca. 90 % der kompletten troposphärischen Laufzeitverzögerung aus. In erster

Linie ist der trockene Anteil in zenitaler Richtung vom Partialdruck der trockenen Luft abhängig, welcher zeitlich und räumlich nur langsam variiert. Über die Jahre wurde eine Vielzahl an Modellen entwickelt, die aus an der Erdoberfläche gemessenen Druckwerten (beispielsweise durch einen meteorologischen Sensor an der GNSS-Station) oder aus sogenannten Standardatmosphären die Komponente ZLV_t berechnen. Am gebräuchlichsten ist hierbei das von Saastamoinen entwickelte Modell (Saastamoinen [1972]), welches auch in den IERS-Konventionen von 2010 (Petit u. Luzum [2010]) empfohlen wird. Soll aus dem feuchten Anteil der troposphärischen Laufzeitverzögerung die Wasserdampfkonzentration der Atmosphäre bestimmt werden, so ist eine genaue Kenntnis des trockenen Anteils notwendig. Hierzu wurden Vorgehensweisen entwickelt, die basierend auf numerischen Wettermodellen und Strahlverfolgungsalgorithmen gute Werte für ZLV_t berechnen (beispielsweise Böhm u. a. [2006b]). Im Gegensatz zum trockenen kann der feuchte Anteil nicht durch Oberflächenmeteorologie mit der erforderlichen Genauigkeit berechnet werden. Zwar können Sensoren wie beispielsweise Wasserdampfadiometer den Wasserdampfgehalt der Atmosphäre bestimmen, jedoch steht diese Technologie nicht flächendeckend zur Verfügung und zudem ist die Kalibrierung dieser Sensoren sehr aufwändig (Elgered u. a. [1991]). Die Bestimmung der feuchten Komponente erfolgt daher im Rahmen der Parameterschätzung während der GNSS-Datenprozessierung durch Einführung zusätzlicher Unbekannter (siehe beispielsweise [Dach u. a., 2007, S. 246ff]). Alshawaf [2013] nutzt in ihrer Arbeit aus GNSS abgeleitete Wasserdampfinformation als Eingangsgröße zur Erzeugung kombinierter Wasserdampfkarten aus InSAR, GNSS und numerischen Wettermodellen. Von Luo u. a. [2008] wird eine Erweiterung der Troposphärenmodellierung zur GNSS-basierten Erstellung hochauflöser Wasserdampffelder vorgestellt.

2.4.3 Stationsspezifische Effekte

Differential Code Biases

Von den GPS-Satelliten werden mehrere Codes auf verschiedenen Frequenzen abgestrahlt. Jedes Code-Signal unterliegt hierbei eigenen, durch die Hardware des Satelliten verursachten Laufzeitverzögerungen. Diese können ein nicht-konstantes Verhalten über die Zeit aufweisen. Auf L_1 wird von den aktuellen GPS-Satelliten der unverschlüsselte C/A-Code (\Rightarrow C1) sowie auf L_1 und L_2 der verschlüsselte P-Code (\Rightarrow P1, P2) abgestrahlt. Geodätische Empfänger sind in der Lage, die verschlüsselten P-Code-Beobachtungen aufzuzeichnen. Bezüglich der empfangenen Code-Information können die GNSS-Empfänger nach [Dach u. a., 2007, S. 279ff] in drei Klassen eingeteilt werden:

- P1/P2: Empfänger zeichnen C1, P1 und P2 auf,
- C1/X2: Kreuzkorrelations-Empfänger: zeichnen C1 und eine Linearkombination X2 auf,
- C1/P2: Moderne Empfänger: zeichnen C1 und P2 auf.

Die mit X2 bezeichnete Linearkombination ist äquivalent zu $C1+(P2-P1)$. Neue GPS-Satelliten des Blocks IIR-M strahlen ein weiteres ziviles Code-Signal (C2) auf L_2 aus. Nach IGS-Mail Nummer 2744 vom 15.03.2000 (siehe <http://igscb.jpl.nasa.gov/pipermail/igsmail/2000/002818.html>, Stand: 19.10.2014), werden ab 02.04.2000 nur noch Uhrprodukte vom IGS zur Verfügung gestellt, die auf P1 und P2 basieren. Hintergrund sind satellitenspezifische Biases, welche C1/X2-Beobachtungen älterer Empfänger gegenüber P1/P2-Beobachtungen neuerer Empfänger aufweisen. Eine Vermischung verschiedener Biases würde sich negativ auf die Qualität der vom IGS bereitgestellten Uhrinformation auswirken. Durch die Einführung sogenannter Differential Code Biases (DCB) können die Beobachtungen älterer Empfänger auf das P1/P2-Niveau moderner Empfänger überführt werden. Diese mit P1-C1 bezeichneten DCBs werden empirisch für jeden Satelliten separat bestimmt und zu den C1-/X2-Beobachtungen addiert. Vom CODE in Bern werden diese DCBs routinemäßig geschätzt und zum Download zur Verfügung gestellt.

Erdgezeiten

Ein auf die GNSS-Beobachtungsstationen wirkender Effekt beruht auf den Gezeiten der festen Erde. Der Erdkörper wird durch die gleichen gravitativen Kräfte verformt, welche auch die Meeresgezeiten hervorrufen. Hierbei haben Sonne und Mond den größten Einfluss. Periodisch wirkende Gezeiten erzeugen vertikale sowie horizontale Verlagerungen der Station und werden durch Kugelfunktionen mit Grad n und Ordnung m beschrieben. Die Charakterisierung erfolgt durch die Love-Zahl (h_{nm}) und die Shida-Zahl (l_{nm}). Diese Parameter hängen nach Wahr [1981] von der geographischen Breite der Station und der Gezeitenfrequenz ab und müssen nach Petit u. Luzum [2010] angebracht werden, wenn Positionierungsgenauigkeiten von 1 mm erzielt werden sollen. Für Genauigkeiten in der Größenordnung von 5 mm werden nur die Gezeiten zweiten Grades, sowie ein Höhenkorrekturterm benötigt. Details zur Berechnung des Korrekturterms sind in [Kouba u. Héroux, 2001, S.17f] aufgeführt. Die Verlagerung der Station durch Erdgezeiten in radialer (wirkt auf die Stationshöhe)/horizontaler Richtung kann bis zu 30 cm/5 cm betragen. Der Korrekturwert der Erdgezeiten für eine Station setzt sich aus zwei Komponenten zusammen: ein breitenabhängiger, konstanter Anteil (engl.: permanent tide), sowie ein periodischer Anteil. Im Letzteren sind in erster Linie halb- und gantztägige Perioden enthalten. Werden bei der GNSS-Prozessierung Daten über einen Zeitraum von 24 h ausgewertet, fallen die periodischen Effekte der Erdgezeiten weitestgehend heraus. Der konstante Anteil, welcher in mittleren Breiten bis zu 12 cm in radialer Richtung betragen kann, verbleibt in der Positionslösung. Bei einer differenziellen Auswertung mit Basislinien <100 km unterliegen beide Stationen der annähernd identischen Auswirkung der Erdgezeiten, so dass die Relativpositionen weitestgehend unbeeinflusst hiervon sind. Für PPP jedoch müssen die Korrekturen des permanenten Anteils angebracht werden, da die Positionen in radialer/horizontaler Richtung um bis zu 12.5 cm/5 cm verfälscht sind, auch wenn die Beobachtungen einer langen Zeitspanne (beispielsweise Tageslösung aus 24 h-Daten) in die Auswertung einfließen (siehe Kouba u. Héroux [2001]).

Meeresgezeiten

Neben den festen Erdgezeiten wirken auch die Meeresgezeiten auf den Erdkörper. Hierbei wird dieser durch die sich verändernde Auflast der globalen Wassermassen verformt. Die auftretenden Perioden weisen einen überwiegend halb- und gantztägigen Zyklus auf, die Amplituden sind jedoch eine Größenordnung geringer als die der festen Erdgezeiten. Zudem wirken sie primär in Küstennähe und besitzen per Definition keinen konstanten Anteil (vgl. breitenabhängiger Term der Erdgezeiten). Nach Kouba u. Héroux [2001] können die Auflasteffekte der Meeresgezeiten bei einer statischen Positionsbestimmung auf mm-Niveau über 24 h sowie für Stationen, die eine ausreichende Entfernung zur Küste aufweisen, vernachlässigt werden. Bei der Prozessierung kinematischer Daten mit Genauigkeiten im cm-Bereich, sowie genauer statischer Punktbestimmung mit kurzen Beobachtungszeiten (deutlich kleiner als 24 h) in Küstenregionen müssen diese Effekte berücksichtigt werden. Sollen neben der Stationsposition auch lokale zenitale troposphärische Laufzeitverzögerungen (ZLV) und Empfängeruhrfehler bestimmt werden, müssen die Ozeangezeiten in jedem Fall – unabhängig von der Dauer der Beobachtung und dem Abstand zur Küste – in die Auswertung eingeführt werden. Andernfalls pausen sich die Auswirkungen in die ZLV und Uhrparameter durch (siehe Dragert u. a. [2000]). Weitere Details zur Modellierung der Meeresgezeiten sind in Kouba u. Héroux [2001] zusammengefasst.

Daten für die Meeresgezeiten sind frei im Internet verfügbar. Eine bedeutende Webseite zu dieser Thematik wird vom Onsala Space Observatory zur Verfügung gestellt, welche von M.S. Bos und H.-G. Scherneck betreut wird. Dieses Observatorium im Südosten Schwedens wird durch die Chalmers University of Technology in Gothenburg (Schweden) betrieben. Auf der Loading-Webseite <http://holt.oso.chalmers>.

se/loading (Stand: 10.07.2014) können die Daten der Meeresgezeiten individuell erzeugt werden. Vom Anwender ist hierbei folgende Auswahl notwendig:

- Gewünschtes Modell der Meeresgezeiten (beispielsweise GOT00.2, FES2004, ...)
- Gewünschtes Datenmaterial (horizontale/vertikale Verschiebungen, Schwere in $\mu\text{m}/\text{s}^2$ oder mgal)
- Korrektur der Auflasteffekte durch die Meeresgezeiten um die Bewegung des Massenzentrums der Erde durch die Meeresgezeiten (ja oder nein)
- Wahl des Ausgabeformats (BLQ oder HARPOS)

Zusätzlich müssen die Koordinaten der Stationen, für die Auflasteffekte berechnet werden sollen, in Form geographischer Koordinaten (Länge, Breite, Höhe) oder geozentrischer, kartesischer Koordinaten (X, Y, Z) eingegeben werden. Zuletzt ist die Angabe der Email-Adresse notwendig, an die die Ergebnisse nach der Generierung der Daten gesendet werden.

Ein Beispiel für wirkende Gezeitenkomponenten ist in Abb. 2-1 gegeben. In dieser Abbildung sind die Ozeangezeiten dargestellt, die durch den halbtäglichen Mondzyklus (engl.: principal lunar semi-diurnal) verursacht und mit M_2 bezeichnet werden. Diese stellt die größte Komponente der ozeanischen Gezeiten dar. Die Periode von M_2 beträgt etwa 12 h und 25 min, was einem halben Mondgezeitentag (engl.: tidal lunar day) entspricht. Innerhalb eines Mondgezeitentages dreht sich die Erde relativ zum Mond genau einmal um die eigene Achse. Insgesamt setzen sich die Ozeangezeiten aus der Überlagerung von elf Hauptkomponenten zusammen: M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 , Q_1 , M_f , M_m und S_{sa} . Die Beschriftung des Farbbalkens in dieser Abbildung ist nach persönlicher Rückfrage bei H.-G. Scherneck korrekt. Nach seiner Aussage ist eine nichtlineare Skalierung für die Farbcodierung dieser Abbildung die beste Wahl, da es – global gesehen – nur wenige Örtlichkeiten gibt, an denen die Amplitude mehr als 1 m beträgt. Die durch die Kombination dieser Gezeitenkomponenten auf die Erde ausgeübte, zeitabhängige Deformation wird als durch Meeresgezeiten verursachter Auflasteffekt (engl.: ocean tide loading) bezeichnet. Nach Kouba u. Héroux [2001] sind die Amplituden der durch M_2 bedingten Auflastdeformationen für an der Küste gelegene Stationen in der Regel kleiner als 5 cm in der Höhe und 2 cm in der Lage. Alternative

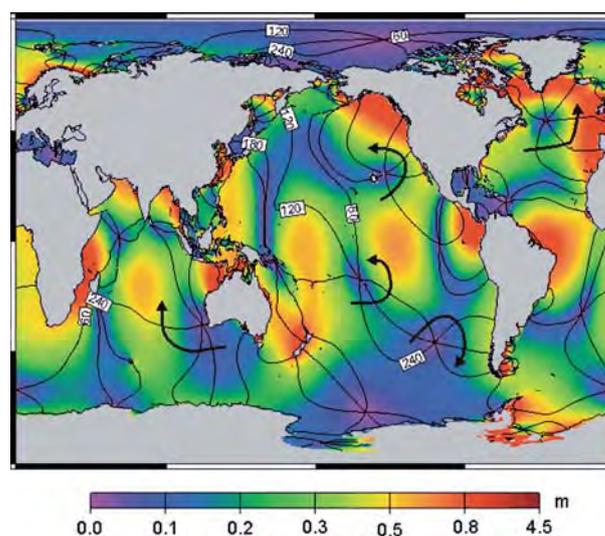


Abb. 2-1: Ozeangezeiten für die Komponente M_2 mit einer Periode von 12 h und 25 min; auftretende Amplitude farblich codiert, schwarze Linien: Phasenlage der Gezeiten; Quelle: <http://holt.oso.chalmers.se/loading/loadingprimer.html>, Stand: 10.07.2014

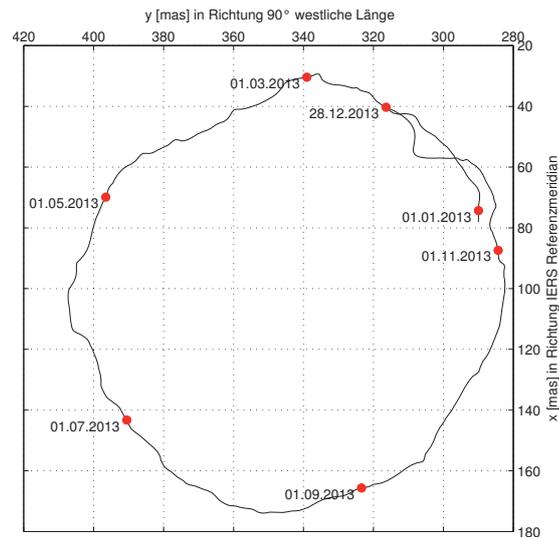


Abb. 2-2: Darstellung der Polbewegung zwischen 30.12.2012 und 28.12.2013 aus Erdrotationsparametern der finalen CODE-Lösungen für die GPS-Wochen 1721 bis 1772

Programme zur Generierung von Korrekturdaten werden vom National Astronomical Observatory of Japan in Mizusawa (Software GOTIC2, http://www.miz.nao.ac.jp/staffs/nao99/index_En.html, Stand: 10.07.2014) oder vom Scripps Institute of Oceanography in La Jolla, Kalifornien (Software SPOTL, <http://igppweb.ucsd.edu/~agnew/Spotl/spotlmain.html>, Stand: 10.07.2014) zur Verfügung gestellt.

Weiterführende Details zu Gezeiten (Erde, Ozean, Atmosphäre) und den dadurch verursachten Auflasteffekten können beispielsweise Wilhelm u. a. [1997] entnommen werden.

Erdrotationsparameter

Neben den oben genannten Einflussfaktoren führen Kouba u. Héroux [2001] auch die Erdrotationsparameter (ERP) als bei der GNSS-Postprozessierung zu berücksichtigende Effekte auf. Die Erdrotationsparameter setzen sich aus den Polkoordinaten (X_P , Y_P), welche den Durchstoßpunkt der Erdrotationsachse durch die Erdoberfläche definieren, sowie der Differenz $UT1 - UTC$ zusammen. Durch die Angabe der Polkoordinaten kann der Richtungsunterschied zwischen der aktuellen Erdrotationsachse und der z-Achse des terrestrischen Referenzrahmens (engl.: Terrestrial Reference Frame, TRF) bestimmt werden. $UT1$ ist die fundamentale Zeitskala in der geodätischen Astronomie und der Satellitengeodäsie, da sie die aktuelle Orientierung des konventionellen terrestrischen Systems gegenüber dem raumfesten System definiert. Daher ist $UT1$ auch die grundlegende Zeitskala in der Navigation. Jedoch enthält $UT1$ alle Variationen der Erdrotationsrate und ist daher keine homogene Zeitskala ([Seeber, 2003, S. 34]). Für viele Anwendungen (insbesondere in der Navigation) wird eine Zeitskala benötigt, welche sowohl eine möglichst homogene Zeiteinheit, als auch eine bestmögliche Anpassung an $UT1$ und damit die Erdrotation, darstellt. Daher wurde im Jahr 1972 eine umfassende Zeitskala, die sogenannte Universal Time Coordinated (UTC) definiert. Diese Zeitskala kann durch $UTC = TAI - n \cdot 1\text{s}$ beschrieben werden. TAI (franz.: Temps Atomique International) stellt hierbei eine einfach zugängliche, streng homogene Zeitskala dar (weitere Details hierzu siehe Seeber [2003]). Die Anpassung von UTC an eine geänderte Rotationsrate der Erde wird hierbei durch die Subtraktion einer festgelegten Anzahl sogenannter Schaltsekunden n von TAI vorgenommen. Abb. 2-2 zeigt den Verlauf der Polbewegung im Zeitraum zwischen 30.12.2012 und 28.12.2013. Die Einheit der Rechts-/Hochachse hierbei ist mas (milliarcsecond). Die X- und Y-Koordinaten geben die Lage des zälestischen Ephemeridenpols (engl.: Celestial Ephemerides Pole, CEP) relativ zum

IERS Referenzpol (engl.: IERS Reference Pole, IRP) an. Die positive X-Achse zeigt in Richtung des IERS Referenzmeridians (engl.: IERS Reference Meridian, IRM), die positive Y-Achse in Richtung 90° westlicher Länge (Quelle: <http://www.iers.org/IERS/EN/Science/EarthRotation/EOP.html>, Stand: 25.11.2014); der IRM ist der konventionell festgelegte Nullmeridian (0° Länge). Die kreisförmige Figur für das Jahr 2013 hat einen Durchmesser von ca. 145 mas bzw. 125 mas in Richtung der x- bzw. y-Achse. Mittels einer groben Umrechnung (Erdumfang: 40 000 km) ergibt dies in metrischen Einheiten ca. 4.48 m bzw. 3.86 m. Erdrotationsparameter zur Verwendung in GNSS-Auswerteprogrammen werden von verschiedenen Diensten und IGS-Analysezentren zum freien Download im Internet angeboten. Als Beispiel für den Inhalt einer derartigen Datei sind nachfolgend ausschnittsweise die täglichen ERP für die GPS-Woche 1797 gegeben, welche vom CODE in Bern zur Verfügung gestellt wird (Quelle: <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/BSWUSER52/ORB/2014/COD17997.ERP.Z>, Stand: 11.07.2014). In der Datei sind die Polkoordinaten, die Differenz zwischen UT1 und UTC, die Schaltsekunden, sowie Genauigkeiten für die aufgeführten Werte gegeben.

Um eine konsistente GNSS-Auswertung – insbesondere bei PPP – zu gewährleisten, wird in [Dach u. a., 2007, S.429] empfohlen, keine in die Prozessierung einfließenden Daten unterschiedlicher Quellen zu mischen, sondern auf die Daten eines einzigen Analysezentrums zurückzugreifen. Werden GNSS-Daten mit der Bernese GNSS Software ausgewertet, wird zudem empfohlen, die Daten des CODE zu verwenden, da in diesem Analysezentrum für die Prozessierung der Daten ebenfalls diese Software zum Einsatz kommt.

CODE'S 3-DAY FINAL ERP RESULTS FOR WEEK 1797

26-JUN-14 07:58

NUTATION MODEL		: IAU2000R06		SUBDAILY POLE MODEL: IERS2010						
DATE	TIME	X-POLE	Y-POLE	UT1-UTC	GPS-UTC	RMS XP	RMS YP	RMS DT	...	
YYYY MM DD HH MM		(")	(")	(S)	(S) REM	(")	(")	(S)	...	
2014	6 15 12 0	0.15336	0.43116	-0.292187	16. GPS	0.00001	0.00001	0.000001	...	
2014	6 16 12 0	0.15504	0.43037	-0.293097	16. GPS	0.00001	0.00001	0.000001	...	
2014	6 17 12 0	0.15661	0.42978	-0.294153	16. GPS	0.00001	0.00001	0.000001	...	
2014	6 18 12 0	0.15789	0.42924	-0.295292	16. GPS	0.00001	0.00001	0.000001	...	
2014	6 19 12 0	0.15918	0.42857	-0.296465	16. GPS	0.00001	0.00001	0.000001	...	
2014	6 20 12 0	0.16044	0.42778	-0.297581	16. GPS	0.00001	0.00001	0.000001	...	
2014	6 21 12 0	0.16139	0.42680	-0.298548	16. GPS	0.00001	0.00001	0.000001	...	

Die Differenzen zwischen der GPS-Zeit und UTC sind neben den ERP-Dateien auch in der Datei GPSUTC. vertafelt, welche auf der Webseite <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/BSWUSER52/GEN> (Stand: 11.07.2014) in stets aktualisierter Form zur Download zur Verfügung gestellt wird und als Eingabedatei für die Bernese GNSS Software vorgehalten werden muss. Nachfolgend wird ein Ausschnitt des Inhalts dieser Datei mit Stand vom 11.07.2014 dargestellt. Die derzeit letzte Schaltsekunde wurde am 1. Juli 2012 eingefügt.

DIFFERENCE OF GPS-TIME MINUS UTC-TIME

GPS-UTC (SEC)	VALID SINCE YYYY MM DD HH MM SS.SS
12.	1997 07 01 00 00 00.00
13.	1999 01 01 00 00 00.00
14.	2006 01 01 00 00 00.00
15.	2009 01 01 00 00 00.00
16.	2012 07 01 00 00 00.00

Werden Erdrotationsparameter zusammen mit den Festlegungen der siderischen Zeit, sowie Präzession und Nutation verwendet, kann auf einfachem Weg die Transformation zwischen dem terrestrischen und dem inertialen Referenzrahmen, wie er bei der Auswertung global erfasster GNSS-Daten benötigt wird, durchgeführt werden. Details hierzu sind in den Konventionen des IERS (beispielsweise Petit u. Luzum [2010]) hinterlegt. Die daraus abgeleiteten Orbits im konventionellen terrestrischen Referenzrahmen (ITRF) (beispielsweise Orbits des IGS oder des CODE) berücksichtigen daher direkt die ERP. Ein Nutzer, der die IGS Orbits festhält und direkt im ITRF arbeitet, wendet dabei automatisch die ERP an. Erfolgt die Auswertung jedoch mit einer Software, die in einem inertialen Referenzrahmen arbeitet, müssen die zu den festgehaltenen Orbits passenden ERP berücksichtigt werden ([Kouba u. Héroux, 2001, S.18f]).

Wird bei der Punktbestimmung ein terrestrischer Referenzrahmen zusammen mit fixierten Orbits eines Analysezentrum verwendet, so ist nach Kouba u. Héroux [2001] ein subtägliches ERP-Modell notwendig, um Positionierungsgenauigkeiten im sub-cm-Bereich zu erreichen. Dieses Modell ist sowohl von täglichen als auch subtäglichen Perioden dominiert, welche durch die Meereszeiten verursacht werden. In den aktuell vom CODE zur Verfügung gestellten ERP-Dateien sind diese gemäß den IERS-Konventionen 2010 (siehe Petit u. Luzum [2010]) enthalten (siehe Ausschnitt der ERP-Datei oben) und auch in der Bernese GPS Software verfügbar. Die subtäglichen ERP-Bewegungen können Größenordnungen von bis zur 3 cm an der Erdoberfläche annehmen. Dieser Effekt sollte nach Kouba u. Héroux [2001] insbesondere dann berücksichtigt werden, wenn bei der präzisen Punktbestimmung Beobachtungsdaten von deutlich weniger als 24 h vorliegen. Bei Auswertungen, die einen Zeitraum von 24 h umfassen, fallen die subtäglichen ERP-Bewegungen – ebenso wie die durch die Meereszeiten verursachten Auflasteffekte – nahezu heraus.

Empfangsantenne

Wie bereits zuvor beschrieben, werden zur korrekten Handhabung der Satellitensendeantennen entsprechende Modelle berechnet und in die Prozessierung eingeführt. Dies ist ebenso für die auf den GNSS-Stationen eingesetzten Empfangsantennen notwendig. Während die Bestimmung der Antennenparameter (PZO, PZV) der Satellitenantennen meist durch die Prozessierung global erfasster GNSS-Daten erfolgt, wurden für die Empfangsantennen in den vergangenen Jahren verschiedene Verfahren zur Kalibrierung entwickelt. Eines der ersten standardisierten Verfahren wurde vom National Geodetic Survey (NGS) der USA vorgeschlagen und seit 1994 praktiziert. Hierbei werden die Antennen relativ zu einer Masterantenne des Typs Dorne Margolin T (AOAD/M_T) kalibriert (Mader [1999]). Eine Grundannahme bei diesem Verfahren ist, dass die Masterantenne lediglich Höhenoffsets des elektrischen Phasenzentrums für L_1 und L_2 besitzt. Bei dieser Form der Kalibrierung wurden azimutale Variationen aufgrund einer damals vorherrschenden, nur beschränkten Satellitenkonstellation über die Antennenhemisphäre vernachlässigt und lediglich elevationsabhängige PZV berechnet (Rotationssymmetrie). Zudem weist die azimutale Variation für hochwertige geodätische Antennen nur eine minimale Ausprägung auf. Da bei langen Basislinien die auf zwei Stationen simultan beobachteten Satelliten unter verschiedenen Elevationswinkeln sichtbar sind, treffen einige Annahmen der Relativkalibrierung nicht mehr zu (Bilich u. Mader [2010]). Daher wurden von verschiedenen Institutionen Kalibrierverfahren auf Absolutniveau entwickelt: ein roboterbasiertes Verfahren (Wübbena u. a. [1996], Wübbena u. a. [2001]), welches reale GNSS-Signale nutzt und ein Verfahren welches in einem mikrowellentoten Raum mit künstlich erzeugten Signalen erfolgt (Zeimetz [2011]). Zum Vergleich der existierenden Verfahren wurde im Vorfeld des 7. GNSS-Antennenworkshops (März 2009 in Dresden) ein Ringversuch durchgeführt. Hierbei wurden drei verschiedene geodätische Antennen wiederholt mittels unterschiedlicher, absoluter Verfahren (Roboterkalibrierung am Institut für Erdmessung Hannover, relatives Feldverfahren am Geodätischen Institut der Universität Dresden (Wanninger [2002]) und Laborverfahren am Institut für Geodäsie und Geoinformation der Universität Bonn) kalibriert und die Ergebnisse gegeneinander evaluiert. Die einzelnen Verfahren weisen zwar individuelle, systematische

Effekte auf, zeigen insgesamt jedoch eine gute Übereinstimmung, Details hierzu sind in Zeimetz [2011] zusammengestellt.

Ein Kalibrierdatensatz für GNSS-Empfangsantennen besteht aus PZO und PZV. Der PZO besteht aus den drei Komponenten Nord/Ost/Höhe, welche in einem antennenfesten Koordinatensystem gegeben sind. Der Ursprung dieses Koordinatensystems liegt in Antennenreferenzpunkt (ARP), welcher in der Regel durch den Schnittpunkt der tiefsten Antennenebene mit der senkrecht stehenden Symmetrieachse repräsentiert wird. Die Ausrichtung der Nord-Achse ist je nach Antenne unterschiedlich definiert, beispielsweise in Richtung der Anschlussbuchse des Antennenkabels. Die Definition der ARP von Antennen, für die Typmittelwerte des IGS vorliegen, ist in Form von Pseudografiken (grafische Repräsentation der Antennenurrisse durch ASCII-Zeichen) beim IGS unter <ftp://igs.cb.jpl.nasa.gov/pub/station/general/antenna.gra> (Stand: 07.10.2014) verfügbar. Mit der IGS-Mail Nr. 6987² vom 28.10.2014 wurde auch ein Referenzpunkt für die Nordausrichtung der Antennen (engl.: north reference point, NRP) in der gra-Datei eingeführt. In den Pseudografiken wird dieser mit der Abkürzung NRP eingeführt. Zur Festlegung der Nordrichtung an den Antennen wurden vier Hauptmerkmale festgelegt: MMI (engl.: man-machine interface), NOM (engl.: north orientation mark, placed on antenna by manufacturer), RCX (engl.: receiver connector, connect antenna to external receiver) und UNK (engl.: unknown). Aufgrund der Vielzahl verschiedener Antennen wurden zwölf weitere Merkmale definiert. Die Kalibrierinformation wird in der Regel in Form standardisierter Dateien im ANTEX-Format (ANTenna EXchange) abgelegt (derzeit aktuell: Version 1.4, siehe <ftp://igs.cb.jpl.nasa.gov/pub/station/general/antex14.txt>, Stand: 07.10.2014). Da das Empfangsverhalten der GNSS-Antennen frequenzabhängig ist, werden für jede zu nutzende Frequenz separate Werte für PZO und PZV bestimmt und in den ANTEX-Dateien abgelegt. Die Bestimmung erfolgt mit den oben erwähnten Verfahren. In der verfügbaren individuellen Kalibrierinformation der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Stationen waren meist Kalibrierwerte für GPS L_1 und L_2 (G01 und G02) sowie GLONASS L_1 und L_2 (R01 und R02) enthalten. Da bei GLONASS aktuell die Unterscheidung der Satelliten noch durch die abgestrahlte Frequenz erfolgt (FDMA: Frequency Division Multiple Access), müsste korrekterweise für jeden Satelliten separate Kalibrierinformation vorliegen. Der Einfachheit halber werden jedoch meist nur die Kalibrierwerte für eine Frequenz (Kanal 0) abgelegt.

Bei der Verwendung von Antennenkorrekturen ist darauf zu achten, dass kompatible Korrekturdatensätze verwendet werden. Ein solcher, konsistenter Datensatz auf Absolutniveau mit individuellen Parametern für jeden Satelliten und Typmittelwerte für die gängigsten Empfangsantennen wird vom IGS unter <ftp://igs.cb.jpl.nasa.gov/pub/station/general/igs08.atx> (Stand: 19.10.2014) zur Verfügung gestellt. State of the Art sind aktuell Kalibrierungen auf Absolutniveau nach IGS-Standard. Ebenso darf keine Vermischung absoluter und relativer Kalibrierinformation erfolgen.

Mehrwegeeffekte

Für die bereits genannten stationsabhängigen Effekte wurden viele Modelle und Korrekturen entwickelt, welche diese Fehlereinflüsse weitgehend modellieren. Eine weitere Hauptfehlerquelle bei der Positionierung im cm-Bereich sind die sogenannten Mehrwegeeffekte. Diese entstehen durch Überlagerung des direkten Satellitensignals mit reflektierten Anteilen des gleichen Signals. Eine Prinzipskizze zum Auftreten von Mehrwegeeffekten ist in Abb. 2-3 dargestellt. Bei Mehrwegeeffekten trifft in der Empfängerantenne nicht nur das direkte, vom Satelliten ausgesendete Signal, sondern zusätzlich ein oder mehrere Signale des gleichen Satelliten ein, die reflektiert wurden (siehe Abb. 2-3 links). Unter Umständen trifft an der Antenne nur ein reflektiertes Signal ein (siehe Abb. 2-3 rechts).

²siehe <http://igs.cb.jpl.nasa.gov/pipermail/igsmail/2014/008177.html>, Stand: 23.11.2014

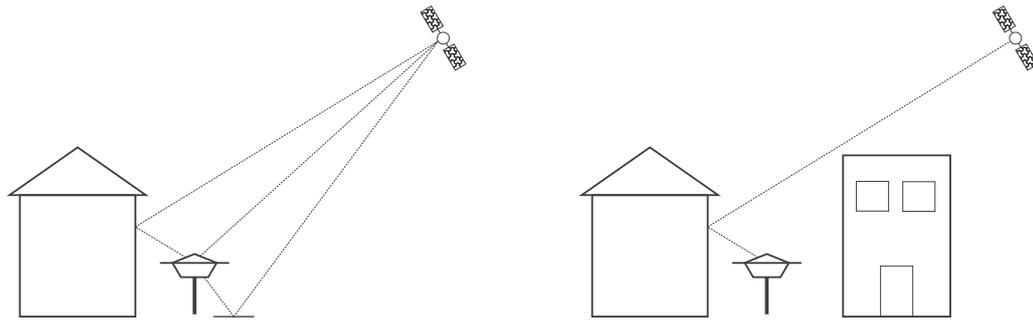


Abb. 2-3: Prinzipskizze zu Mehrwegeeffekten nach [Seeber, 2003, S. 316]

Mehrwegeeffekte beeinflussen sowohl die Code- als auch die Phasenbeobachtungen. Nach [Seeber, 2003, S. 316] kann der verursachte Fehler bei P-Code-Beobachtungen dm bis m, bei C/A-Code-Beobachtungen einige m bis hin zu mehr als 100 m (Braasch [1996]) betragen. Treten sehr starke Mehrwegeeffekte auf, ist unter Umständen keine Positionslösung durch den Empfänger bestimmbar. Bei der Standortwahl für GNSS-Permanentstationen muss daher mit großer Sorgfalt vorgegangen werden, um Mehrwegeeffekte weitestgehend auszuschließen. Nach [Georgiadou u. Kleusberg, 1988, S. 173] und [Hofmann-Wellenhof u. a., 2008, S. 157] können sie Fehler in den Phasenmessungen von bis zu einem Viertel der Wellenlänge (4.8 cm für L_1 , 6.1 cm für L_2) annehmen. Werden bei der Prozessierung der GNSS-Daten Linearkombinationen der Trägerphasen verwendet, kann dieser Fehler größere Werte annehmen. Nach [Wildt, 2006, S. 61] können bei Verwendung der ionosphärenfreien Linearkombination L_3 mehrwegebedingte Fehler von maximal 21.55 cm hervorgerufen werden. Nach Seeber [2003] können Mehrwegeeffekte in zwei Gruppen unterteilt werden: Fern- und Nahfeldeffekte (engl.: far-field, near-field). Effekte, die durch weit entfernte Reflektoren hervorgerufen werden, weisen ein kurzperiodisches Verhalten auf (Größenordnung bis zu einer halben Stunde, [Seeber, 2003, S. 317]). Sie können durch langzeitstatische Beobachtungen (mehrere Stunden) eliminiert werden. Fehler der Gruppe der Nahfeldeffekte können aufgrund ihres langperiodischen Verhaltens nicht durch lange Beobachtungszeiten beseitigt werden. Sie weisen nach Wübbena u. a. [2006] Perioden von mehreren Stunden auf. Diese Effekte werden durch die direkte Antennenumgebung, zu dem auch der Antennenträger gezählt wird, hervorgerufen. Durch einen entsprechenden Aufbau können die Effekte des Nahfelds im Rahmen der absoluten Roboterkalibrierung berücksichtigt werden. Beispielsweise wurden vor der deutschlandweiten GNSS-Kampagne zur Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes im Jahr 2008 die eingesetzten Antennen mit verschiedenen Unterbauvarianten oder von Dilbner u. a. [2005] die auf dem Satelliten GOCE montierte GNSS-Antenne mit einem Teil des Umfeldes kalibriert. Eine Reduktion von Mehrwegeeffekten kann bereits vor der Errichtung einer Station durch die Wahl eines geeigneten Standortes und die Verwendung von Choking-Antennen erfolgen. Das von den Satelliten ausgestrahlte Signal weist eine rechtshändige Polarisierung auf. Wird dieses Signal reflektiert, ändert sich die Polarisierung (\Rightarrow linkshändige Polarisierung). Durch Mehrfachreflexion kann das in der Antenne eintreffende Signal wieder rechtshändig polarisiert sein, weist aber eine deutlich geringere Signalstärke auf. Mittlerweile sind GNSS-Empfangsantennen verfügbar, die sensitiv gegenüber der Polarisierung sind, d.h. sie erfassen nur Signale, die rechtshändig polarisiert sind.

Während Mehrwegeeffekte für die Mehrheit der GNSS-Nutzer eine Fehlerquelle darstellen, nutzen verschiedene Wissenschaftler dieses Signal. Löfgren u. Haas [2014] haben am Onsala Space Observatory in Schweden eine GNSS-Pegelstation errichtet, die mittels zweier GNSS-Antennen direkte und reflektierte Signale aufzeichnet, so dass aus diesen Daten Variationen des Meeresspiegels bestimmt werden können. Das GeoForschungsZentrum (GFZ) in Potsdam forscht seit mehreren Jahren auf dem Gebiet der GNSS-

Reflektometrie³. Ziel ist die Ableitung physikalischer Eigenschaften der reflektierenden Oberflächen zur Nutzung dieser Daten beispielsweise in der Wettervorhersage oder der Tsunami-Detektion. Träger zum Empfang der reflektierten Signale können beispielsweise Satelliten (siehe Beyerle u. Hocke [2001]) oder auch Luftfahrzeuge, wie beispielsweise ein Zeppelin (siehe Semmling u. a. [2013]) sein.

2.4.4 Schlussbetrachtung

Nach der in den vorangehenden Unterkapiteln erfolgten Aufzählung und Beschreibung verschiedener Fehlereinflüsse, die bei einer GNSS-Auswertung nach der Precise Point Positioning Methode berücksichtigt werden müssen, erfolgt abschließend eine Zusammenstellung der wichtigsten Einflussfaktoren und deren Auswirkungen auf die Stationsposition bei unterlassener Korrektur (siehe Tab. 2-5) sowie eine Gegenüberstellung von Vor- und Nachteilen der Verwendung von PPP gegenüber einer differenziellen Auswertung. Während die Vernachlässigung der PZV der Satellitenantenne einen marginalen Effekt auf die

Tab. 2-5: Zusammenstellung wichtiger Einflussfaktoren auf die Positionsbestimmung mittels PPP nach Heßelbarth [2009]

	Zu korrigierende Größe	Fehler bei unterlassener Korrektur
PZO der Satellitenantenne	Geometrische Distanz und Satellitenkoordinaten	Lage: wenige cm, Höhe: bis zu 10 cm
PZV der Satellitenantenne	Phasenbeobachtungen	Lage: -, Höhe: max 1 mm
Phase Wind Up	Phasenbeobachtungen	Lage und Höhe: wenige mm
Erdgezeiten	Stationskoordinaten	Lage: bis wenige cm, Höhe: bis einige dm
Ozeanische Auflasten	Stationskoordinaten (v.a. küstennahe Stationen)	Lage: -, Höhe: bis zu 5 cm
Subtägliche Polbewegung	Stationskoordinaten	Lage: wenige cm, Höhe: -

zu bestimmende Koordinate hat, wirken sich andere Parameter deutlich stärker auf die Stationsposition aus. Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, ob der zu korrigierende Effekt eine zeitliche Variabilität aufweist (beispielsweise die Erdgezeiten) oder konstant ist (beispielsweise der PZO der Satellitenantenne), so dass die Beobachtungsdauer eine Rolle spielt. Nach Kouba u. Héroux [2001] werden die durch die subtägliche Polbewegung und ozeanische Auflasten verursachten Koordinatenänderungen bei einer Auswertung von 24h-Daten weitestgehend eliminiert, müssen bei kürzeren Beobachtungszeiten mit hohen Genauigkeitsanforderungen jedoch berücksichtigt werden. Im Gegensatz dazu müssen die aus einem konstanten und einem periodischen Anteil zusammengesetzten Erdgezeiten in jedem Fall berücksichtigt werden. Während der periodische Teil durch die Verwendung von Beobachtungsdaten über 24 h weitgehend verschwindet, verbleibt der konstante Anteil (engl.: permanent tide), welcher nach Kouba u. Héroux [2001] Werte von mehr als 1 dm annehmen kann.

Abschließend werden Vor- und Nachteile von PPP gegenüber einer differenziellen Auswertung zusammengestellt und prädestinierte Anwendungsgebiete aufgezeigt. Bei einer differenziellen Auswertung können verschiedene Fehlereinflüsse durch Bildung von Beobachtungs-Differenzen stark reduziert bzw. gänzlich eliminiert werden. Eine Zusammenstellung hierzu ist in Tab. 2-6 gegeben. Die enthaltenen Informationen basieren auf [Bauer, 1997, S. 206ff]. Mit dieser Tabelle wird deutlich, dass Fehler, die durch Differenzbildung

³siehe <http://www.gfz-potsdam.de/forschung/ueberblick/departments/department-1/gpsgalileo-erdbeobachtung/themen/gnss-reflektometrie/>, Stand: 01.11.2014

Tab. 2-6: Bildbare Differenzen von GNSS-Beobachtungen nach [Bauer, 1997, S. 206ff]

Differenz	Eingehende Daten	Eliminierte/reduzierte Fehler
Satelliten-Einfachdifferenz	Differenz der Trägermischphasen zweier Satelliten, die simultan an einem Empfänger aufgezeichnet werden	Empfängeruhrfehler
Empfänger-Einfachdifferenz	Differenz der Trägermischphasen eines Satelliten, die simultan an zwei Empfängern aufgezeichnet werden	Satellitenuhrfehler, bei kurzen Basislinien auch ionosphärische und troposphärische Laufzeitverzögerungen
Empfänger-Satelliten-Doppeldifferenz	Differenz von Empfänger-Einfachdifferenzen zu zwei Satelliten	Empfängeruhrfehler, Satellitenuhrfehler
Dreifachdifferenz	Differenz von Doppeldifferenzen verschiedener Epochen	Phasenmehrdeutigkeiten

eliminiert werden können, anderweitig in einer PPP-Prozessierung berücksichtigt werden müssen, um ähnliche Genauigkeiten wie bei einer differenziellen Auswertung zu erreichen. Dies kann durch die Verwendung zusätzlicher Daten, wie beispielsweise präziser Orbit- und Uhrinformation oder durch geeignete Modelle im Rahmen der GNSS-Prozessierung erfolgen. Eine weitere Gegenüberstellung von PPP und DGNSS liefern Rizos u. a. [2012].

Auch wenn bei der Auswertemethode PPP ein deutlich größerer Aufwand zum Erreichen größtmöglicher Genauigkeiten notwendig ist, bietet dieses Verfahren verschiedene Vorteile. Zur Berechnung der Positionslösung sind bei PPP lediglich die Daten eines Empfängers notwendig, so dass keine simultanen Beobachtungen auf zwei Stationen vorliegen müssen. In Regionen, die ein dichtes Netz permanenter GNSS-Stationen aufweisen, deren Daten frei im Internet verfügbar sind und von einem Nutzer ergänzend zu den von ihm erfassten Daten heruntergeladen und einer differenziellen Auswertung zugeführt werden können, weisen die entstehenden Basislinien geringe Längen auf (maximal mehrere 100 km). In entlegenen Erdteilen wäre hierfür die Auswertung langer Basislinien notwendig, so dass PPP hier in der Lage ist, bessere Ergebnisse zu liefern. Des weiteren bietet PPP die Möglichkeit, unter Verwendung präziser Orbitinformation hochgenaue Positionen in einem globalen Referenzrahmen zu berechnen, während bei DGNSS eine der beiden Stationen einer Basislinie auf einem koordinatenmäßig bekannten Punkt stehen muss. Zudem können mit PPP die Daten einzelner Stationen analysiert werden, ohne dass durch Differenzbildung etwaige Effekte einer Station auf die zweite Station übertragen werden und das Ergebnis verfälschen. Für Nutzer, denen nur eine GNSS-Ausrüstung zur Verfügung steht und die nicht über eine geeignete Auswertesoftware verfügen, stehen seit einigen Jahren verschiedene online-Berechnungsdienste zur Verfügung, die in vielen Fällen auf PPP basieren. Zur Auswertung müssen lediglich die selbst aufgezeichneten Daten per Email oder Upload dem Dienst übermittelt werden. Die Ergebnisse werden in der Regel zeitnah (wenige min bis h) dem Nutzer per Email übermittelt oder als Download zur Verfügung gestellt. Eine aktuelle Zusammenstellung verschiedener online-Dienste ist in Heßelbarth u. Wanninger [2013] zu finden.

3 Modellierung stationsabhängiger Fehler in GNSS-Beobachtungen

Im vorangehenden Kapitel wurden verschiedene Einflussfaktoren beschrieben, die sich – mit Fokus auf die Auswertemethode Precise Point Positioning – negativ auf die erreichbare Positionierungsgenauigkeit, auswirken. Während viele Fehlereinflüsse wirksam durch die Einführung externer Daten (beispielsweise präziser Orbits) reduziert oder durch entsprechende Modelle (beispielsweise für Erd- und Meereszeiten) berücksichtigt werden, können an einer GNSS-Permanentstation Effekte auftreten, die eine hochpräzise Positionsbestimmung beeinträchtigen. Diese Fehler werden unter den Begriffen stationsabhängige bzw. stationsspezifische Fehler bzw. Effekte zusammengefasst. Zu ihnen können die im vorangehenden Kapitel beschriebenen Mehrwegeeffekte und Restfehler in den Kalibrierwerten der GNSS-Empfangsantenne gezählt werden. Trotz hochgenauer Verfahren zur Bestimmung individueller Kalibrierwerte gelten diese strenggenommen nur am Ort der Kalibrierung, da die Antenne am Einsatzort ein durch äußere Umstände (Monumentierung, Antennenträger, Nah-/Fernfeld, ...) abweichendes Verhalten zeigen kann. In diesem Kapitel werden verschiedene Herangehensweisen vorgestellt, die Ansätze enthalten, mit denen stationsspezifische Effekte reduziert bzw. eliminiert werden können. In Kap. 3.1 werden Ansätze beschrieben, die das stochastische Modell der GNSS-Prozessierung verbessern. Mit den in den Kap. 3.2 und 3.3 beschriebenen Verfahren werden Verbesserungen im funktionalen Modell vorgestellt.

3.1 SNR-basierte Auswertung

Bei der Aufzeichnung von GNSS-Daten durch den Empfänger kann neben den Code- und Phaseninformationen auch das sogenannte Signal-Rausch-Verhältnis (engl.: Signal-to-Noise-Ratio, SNR), welches das Verhältnis zwischen der Energie des empfangenen Signals und der Energie des Rauschens beschreibt, gespeichert werden. Diese logarithmische Messgröße kann in Dezibel (dB), einem dimensionslosen Verhältnis elektrischer Energie- oder Leistungsgrößen angegeben werden (Seeber [2003]). Bis dato geben allerdings nur wenige Gerätehersteller dieses Verhältnis in dB an, meist werden firmeneigene Einheiten verwendet. Die Formeln zur Umrechnung in eine standardisierte Größe (beispielsweise dB) wird nur von wenigen Herstellern für ausgewählte Geräte preisgegeben. Somit ist ein direkter Vergleich dieser Größen zwischen zwei Geräten verschiedener Hersteller sehr schwierig. Nach Bilich u. Larson [2007] haben die auf Trägerphasenmessungen wirkenden Mehrwegeeffekte direkten Einfluss auf die vom Empfänger registrierten SNR-Werte. Die in den Variationen der SNR-Daten enthaltenen Frequenzanteile können direkt mit der Mehrwegesituation der Station in Verbindung gebracht werden. Der Zusammenhang zwischen Fehlern in der Trägerphasenmessung und der SNR-Information für Mehrwegeeffekte wurde beispielsweise von Georgiadou u. Kleusberg [1988] und Comp u. Axelrad [1998] beschrieben.

In den vergangenen Jahren wurden verschiedene Ansätze untersucht, das Signal-Rausch-Verhältnis in die Auswertung einfließen zu lassen. Nach [Axelrad u. a., 1996, S. 651] sind die Mehrwegeeffekte, die Codebeobachtungen beeinflussen, gegenüber Veränderungen der äußeren Einflüsse deutlich stabiler als die Auswirkungen auf Phasenbeobachtungen. Letztere werden bereits durch minimale geometrische Veränderungen (beispielsweise Umbau der Antenne) oder Änderung der Reflexionseigenschaften (beispielsweise veränderte Bodenfeuchte) beeinflusst. Das SNR ist ein Maß für die Amplitude des vom Empfänger wiederhergestellten Phasensignals. Es ist abhängig von der Leistungsfähigkeit des Empfängerkorrelators, der Antennenempfangscharakteristik und den Mehrwegeeffekten. Das Mehrwegesignal, welches bei einer differenziellen Auswertung in den Phasenresiduen verbleibt, weist je nach Entfernung des Reflektors eine unterschiedliche Charakteristik auf. Ein entfernter Reflektor erzeugt höherfrequente Variationen im Mehrwegesignal als ein nahegelegener Reflektor (Georgiadou u. Kleusberg [1988]). Dies ist darin begründet, dass sich bei einem entfernten Reflektor die Reflexionsgeometrie schneller ändert als bei einem nahegelegenen

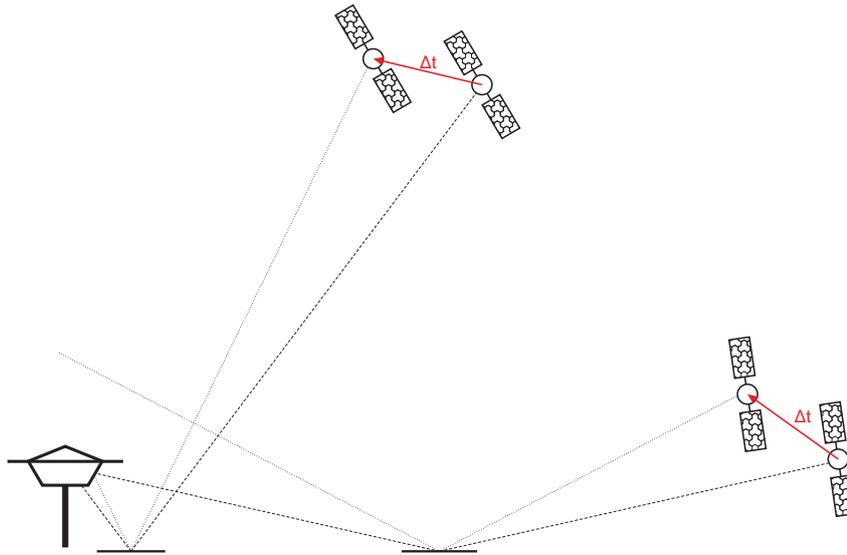


Abb. 3-1: Änderung der Reflexionsgeometrie naher und entfernter Reflektoren durch geänderte Satellitengeometrie

Reflektor (siehe Abb. 3-1). Nach Axelrad u. a. [1996] haben die Komponenten des Mehrwegesignals in der Theorie individuelle, konstante Frequenzen, so dass diese mittels Spektralanalyse gut identifiziert werden können. In der Praxis jedoch sind die Frequenzen variabel, da die Bewegung des Satelliten relativ zum Vektor Antenne-Reflektor nicht konstant ist. Im von Axelrad u. a. [1996] verwendeten Algorithmus zur Reduktion der Mehrwegeeffekte in Phasenmessungen werden verschiedene Annahmen getroffen: die Amplituden des an der Antenne ankommenden direkten Signals und des Mehrwegesignals sind konstant; die Antennencharakteristik (engl.: antenna gain pattern) ist weitestgehend glatt und in erster Näherung unabhängig von Elevation und Azimut; die Frequenzen der Mehrwegesignale sind für eine Zeitspanne konstant, in der sie korrekt identifiziert werden können. Hierfür werden typischerweise zwei Mehrwegesignale benötigt. Die Bestimmung sogenannter Mehrwegeprofile für differenzielle Phasenbeobachtungen erfolgt in einem mehrstufigen Prozess (Details siehe [Axelrad u. a., 1996, S. 653]). Zur Korrektur des Mehrwegeeffektes wird dieses Profil von den korrespondierenden Phasenbeobachtungen subtrahiert.

Die Leistungsfähigkeit des von Axelrad u. a. [1996] verwendeten Algorithmus hängt unter anderem davon ab, wie gut die Mehrwegesignalfrequenzen bestimmt werden können. Die schnelle Fourier-Transformation (engl.: Fast Fourier Transformation, FFT) liefert hierbei nicht die notwendige Auflösung, so dass auf Lomb-Periodogramme übergegangen wurde, was aber eine größere Nutzerinteraktion erforderte. Außerdem spielen die Genauigkeit, mit der der eingesetzte Empfänger das SNR aufzeichnen kann, und die Annahme bezüglich der Antennencharakteristik eine entscheidende Rolle. Dennoch konnten die differenziellen Phasenfehler beinahe auf das Rauschniveau des Empfängers reduziert werden.

In seiner Dissertation beschreibt Rost [2011] die Nutzung des Signal-Rausch-Verhältnisses zur Mehrwegereduzierung bei Phasenmessungen und gibt einen Überblick über unterschiedliche Möglichkeiten zur Reduzierung des Mehrwegeeffektes. Aspekte, die hierbei behandelt werden, sind Stationsauswahl, Antennen- und Empfängertechnologie, Signalstruktur, Modellierung der Beobachtungsgrößen sowie Stationskalibrierung. Beim zuletzt genannten Punkt werden vier verschiedene Verfahren beschrieben, basierend auf Stationsnetzen, temporärer Referenzstation, statistischer Auswertung und der Verwendung von Signalqualitätswerten. Rost [2011] nutzt in seiner Arbeit die in Rost u. Wanninger [2009] beschriebenen Signalqualitätsmessungen. Hierbei wird das vom Empfänger aufgezeichnete Verhältnis zwischen Signalstärke und Systemrauschen verwendet. Für die Signalstärke kann hierbei entweder die Stärke des modulierten

Signals am Korrelatorausgang (S_{Korr}) oder die Stärke des unmodulierten Trägers an der Empfangsantenne (C_{Ant}) (siehe [Rost u. Wanninger, 2009, S. 82]) verwendet werden.

Ein alternative Erweiterung des stochastischen Modells für die Prozessierung langzeitstatischer GNSS-Beobachtungen wird von Luo u. a. [2009] vorgestellt. Da die Signalstärke der GNSS-Beobachtungen und die Zenitdistanz, unter der die Signale an einer Station eintreffen, stark korreliert sind, stellt die Zenitdistanz ein gutes Maß für die Signalqualität von GNSS-Beobachtungen dar. In den meisten Softwareprogrammen zur Auswertung von GNSS-Daten wurde daher ein einfaches Gewichtsmodell, wie beispielsweise $w = \cos^2(z)$ implementiert. Während dieses Modell bei ungestörten GNSS-Signalen die Realität gut abbildet, stößt es bei Signalen, die Mehrwege- oder Beugungseffekten unterliegen, an seine Grenzen, da hierbei die Korrelation zwischen Zenitdistanz und Signalqualität abgeschwächt wird. Luo u. a. [2009] zeigen Beispiele, in denen die vom Empfänger aufgezeichneten SNR-Werte stark vom zenitdistanzbasierten Gewichtsmodell abweichen. Dieses einfache Modell, welches lediglich auf der Satellitengeometrie beruht, führt zu einer Heruntergewichtung der Beobachtungen niedriger Elevationen, ihr Beitrag zur Schätzung der Parameter im Rahmen der Ausgleichung wird dadurch stark reduziert. Unter bestimmten Umständen ist jedoch die Verwendung von Beobachtungen niedriger Elevationen von großer Bedeutung, beispielsweise bei der Prozessierung von GNSS-Daten, die in hohen geographischen Breiten aufgezeichnet wurden. Mayer [2006] kann in seiner Arbeit nachweisen, dass die Nutzung von Daten niedriger Elevation die Parameterschätzung stabilisieren und zur Genauigkeitssteigerung der Höhenkomponente beitragen kann.

Im Gegensatz zu anderen Ansätzen wird die Gewichtung im von Luo u. a. [2009] propagierten Ansatz direkt aus den in den Beobachtungsdaten enthaltenen SNR-Werten berechnet. Für die in dieser Untersuchung genutzten Daten lagen die SNR-Werte entweder bereits in Form standardisierter SNR0-Werte vor oder konnten mittels offengelegter Formeln aus den herstellerabhängigen Einheiten nach SNR0 umgerechnet werden. Bei SNR0 handelt es sich um das normierte Verhältnis von Signal- und Rauschleistung. In den standardisierten SNR-Werten werden anschließend für alle prozessierten Kombinationen von Empfänger und Antenne im gesamten Untersuchungszeitraum die Minima/Maxima gesucht. Mit Hilfe der empirisch abgeleiteten Formel

$$f(SNR0_{L_{1,2}}^i) = \left(\frac{SNR0_{L_{1,2}}^i - SNR0_{L_{1,2}}^{min}}{SNR0_{L_{1,2}}^{max} - SNR0_{L_{1,2}}^{min}} \right)^2 \quad (3-1)$$

kann für jeden individuellen SNR0-Wert (Index i) der GPS-Frequenzen L_1 und L_2 ein Beobachtungsgewicht für diese Empfänger-Antennen-Kombination berechnet werden. Im Rahmen der Untersuchung von Luo u. a. [2009] wird eine differenzielle GNSS-Prozessierung durchgeführt, so dass nach der Berechnung der notwendigen Linearkombinationen die Kovarianz-Matrix unter Nutzung dieser Gewichte aufgestellt werden kann. Die in Luo u. a. [2009] dargestellten Beispiele zeigen, dass das klassische Gewichtsmodell $w = \cos^2(z)$ über große Zenitdistanzbereiche deutlich kleinere Gewichte ausgibt als das vorgestellte Modell mit $w = f(SNR0_{L_{1,2}}^i)$. Der Einfluss des neuen Modells auf die Prozessierung wird nach Implementierung der Routinen in der Bernese GPS Software (Version 5.0) an verschiedenen Basislinien mit einer durchschnittlichen Länge von mehr als 100 km gezeigt. Hierbei wurden sowohl Basislinien zwischen Stationen auf der antarktischen Halbinsel als auch innerhalb von SAPOS®Baden-Württemberg ausgewertet. Bei der Prozessierung wurden zunächst die Phasenmehrdeutigkeiten unter Nutzung der wide-lane-Linearkombination (L_5) und anschließend mit der ionosphärenfreien Linearkombination (L_3) mit Hilfe der sogenannten SIGMA-Strategie der BS (Dach u. a. [2007]) gelöst. Diese Prozessierungen wurden mit den beiden Elevationswinkeln 3° und 10° durchgeführt. Während bei der Auswertevariante mit einer Mindestelevation von 10° nur unwesentlich mehr Phasenmehrdeutigkeiten gelöst werden können, werden bei 3° Elevation signifikant mehr Ambiguitäten gelöst. Zusätzlich wird das Verhalten der normierten Doppeldifferenzresiduen nach

der Ausgleichung analysiert, deren Amplitude und Variation durch die Verwendung des neuen Modells signifikant reduziert wurden. Neben den bereits genannten Parametern werden von Luo u. a. [2009] auch die sogenannten stationspezifischen Neutrosphärenparameter (SSNP) untersucht, welche die durch die neutrale Erdatmosphäre bedingte Laufzeitverzögerung der GNSS-Signale wiedergeben und im Rahmen der GNSS-Prozessierung als Zusatzparameter geschätzt werden können. Hierbei kann gezeigt werden, dass sich die Absolutwerte zwischen den Prozessierungsvarianten um bis zu 10 % vom mittleren SSNP einer Station unterscheiden, die Standardabweichungen jedoch um durchschnittlich 25 % geringer ausfallen, wenn das SNR-basierte Gewichtsmodell angewendet wird. Die Verbesserung fällt hierbei umso größer aus, je stärker eine Station durch Mehrwegeeffekte belastet ist. Bezogen auf die Wiederholbarkeit der Koordinaten können Luo u. a. [2009] keine signifikante Verbesserung durch die Einführung des neuen Gewichtsmodells im untersuchten Datenmaterial feststellen. Sie führen dies auf die gute Datenqualität der untersuchten Stationen, den Einfluss der langen Beobachtungsperioden (24 h), sowie die nicht vollständige Elimination der atmosphärischen Effekte durch Differenzbildung zurück. Insgesamt betrachtet ermöglicht das neue Verfahren eine realitätsnähere Gewichtung der GNSS-Beobachtungen, weist jedoch aufgrund der aufwändigen Implementierung und der gesteigerten Rechenzeiten auch Schwachpunkte auf.

Prinzipiell ist die Verwendung der SNR-Werte ein geeigneter Ansatz zur Reduktion der auf das empfangene Signal wirkenden Fehlereinflüsse, da direkt vom GNSS-Empfänger registrierte zusätzliche Daten in die Auswertung einfließen. In der Praxis jedoch erweist sich dieses Verfahren oft als schwierig umsetzbar. Primär muss die SNR-Information im Datenmaterial enthalten sein. In der Regel werden in der GNSS-Auswertung Beobachtungsdaten im RINEX-Format verwendet, welche aus dem herstellerspezifischen Rohdatenformat erzeugt werden. Je nach Art der Umwandlung werden die SNR-Daten dabei nicht ins RINEX-Format übertragen. Zudem besteht die Möglichkeit, dass SNR-Daten, welche im Herstellerformat mit hoher Auflösung vorliegen, durch die Konvertierungssoftware nur wenigen SNR-Bereichen zugeordnet werden. Wie bereits oben erwähnt, erfolgt die Ausgabe der SNR-Information nicht in einer standardisierten Einheit, sondern wird je nach Hersteller unterschiedlich gehandhabt. Algorithmen, welche eine Umrechnung der proprietären Daten in eine standardisierte Einheit erlauben, werden von den Herstellern meist nicht veröffentlicht. In der Regel werden von den Stationsbetreibern nur RINEX-Daten archiviert, so dass selbst bei zusätzlicher Verfügbarkeit der herstellerspezifischen Rohdaten keine adäquate Nutzung der SNR-Daten in einer GNSS-Auswertung möglich ist. Eine Verbesserung könnten die neueren Versionen des RINEX-Formates (aktuellste Version: 3.02, Quelle: <http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/data/format/rinex302.pdf>, Stand: 27.10.2014) leisten. Sie setzen bei der Bereitstellung von rohen Signalstärken voraus, dass diese in der Einheit dBHz abgespeichert werden, falls sie direkt am Korrelatorausgang des Empfängers ohne Verbesserung von Korrelationsverlusten abgegriffen werden. Hierzu können die in dBHz ausgegebenen Werte als Kennzahlen nach Tab. 3-1 abgespeichert werden. Ein Wert der Kennzahl von fünf steht hierbei für SNR0 von etwa 35 dBHz, was einer durchschnittlichen Signalqualität entspricht. Beträgt der Wert der Kennzahl Null, so ist der zugehörige SNR0-Wert nicht bekannt oder nicht vorhanden. Neben den Kennzahlen können optional die rohen SNR-Beobachtungen abgespeichert werden. Hierbei soll, wenn möglich, die Einheit dBHz verwendet werden. Im RINEX-Header kann hierbei unter dem Eintrag **SIGNAL STRENGTH UNIT** die Einheit der abgespeicherten SNR-Werte hinterlegt werden. Auch wenn in den Beobachtungsdateien, die im modifizierten RINEX-Format abgespeichert werden, die Signalqualität in der standardisierten Einheit dBHz abgelegt werden kann, verbleiben trotzdem Unterschiede in den Daten, die durch das Empfängerverhalten und/oder stationspezifische Effekte hervorgerufen werden. Eine Lösung für die Prozessierung „historischer“ GNSS-Daten, die in älteren Versionen des RINEX-Formates archiviert sind, beispielsweise zur Berechnung langer Zeitreihen für geodynamische Untersuchungen, stellt die SNR-basierte Lösung nicht dar. Ebenso weist diese Art der Verbesserung Schwächen auf, wenn größere und heterogene GNSS-Netze (viele unterschiedliche Betreiber und eingesetzte Empfänger) prozessiert

Tab. 3-1: Standardisierte RINEX-Kennzahlen für SNR, Quelle: RINEX Working Group (IGS) u. RTCM-SC104 [2013]

Standardisiertes Signal/ Rauschverhältnis (SNR0) dBHz	Signal/Rauschverhältnis RINEX
<12	1
12-17	2
18-23	3
24-29	4
30-35	5
36-41	6
42-47	7
48-53	8
≥54	9

werden sollen. Daher wurden für diese Arbeit alternative Wege der Korrektur stationsabhängiger Fehler in GNSS-Beobachtungen gesucht.

3.2 Siderische Filterungstechniken

Eine alternative Möglichkeit der Reduktion des Mehrwegeefflusses auf GPS-Beobachtungen ist durch sogenanntes siderisches Filtern gegeben. Hierbei wird davon ausgegangen, dass sich bei GPS die Mehrwegecharakteristik einer Station bei identischer Satellitenkonstellation und unveränderten Umgebungsbedingungen täglich wiederholt. Ein Konzept zur siderischen Filterung wurde erstmals von Bock [1991] vorgestellt. Da die Umlaufzeit der GPS-Satelliten nicht einem mittleren Sonntag (24 h), sondern einem mittleren siderischen Tag (24 h - 3 min 55.909 s, nach [Seeber, 2003, S. 34]) entspricht, kommt eine Wiederholung der identischen Satellitenkonstellation jeden Tag ca. 3 min 56 s (236 s) früher zustande. Diese Tatsache kann ausgenutzt werden, um Mehrwegeeffekte zu reduzieren. Ursprünglich wurde davon ausgegangen, dass die Umlaufzeiten aller GPS-Satelliten genau einen siderischen Tag betragen. Seeber u. a. [1998] stellten als erste fest, dass die Umlaufzeiten weder siderisch noch für alle Satelliten identisch sind. In den damaligen Untersuchungen (1997) konnten Werte zwischen 240 s und 256 s statt der angenommenen 236 s detektiert werden. Werden vom Kontrollzentrum Bahnmanöver mit einzelnen Satelliten unternommen, weichen die Umlaufzeiten in der Regel ebenfalls von einem siderischen Tag ab. Bahnmanöver sind beispielsweise notwendig, wenn die aktuelle Bahn eines Satelliten zu stark von der nominell festgelegten Bahn abweicht.

Durch die Verfügbarkeit zeitlich hochaufgelöster Rohdaten permanenter GNSS-Stationen werden nicht mehr nur statische GNSS-Auswertungen, die ein Koordinatentripel pro Tag ergeben, sondern auch kinematische Auswertungen durchgeführt, die Koordinatentripel mit der Rate der aufgezeichneten Beobachtungen liefern können. Unter anderem werden kinematische Prozessierungen eingesetzt, um geophysikalische Fragestellungen, wie z. B. Vulkandeformationen (beispielsweise Larson u. a. [2001]) oder die Ausbreitung seismischer Wellen nach einem Erdbeben (beispielsweise Kouba [2003]) zu untersuchen. Choi u. a. [2004] nutzen die Technik des siderischen Filterns für die Verbesserung von GPS-Daten, die mit einer Rate von 1 Hz aufgezeichnet und kinematisch ausgewertet wurden. In den Untersuchungen wird ebenfalls gezeigt, dass die analysierten Satelliten jeweils unterschiedliche Umlaufzeiten besitzen, die auch im Verlauf eines Jahres variieren, was auf verschiedene Ursachen zurückzuführen ist. Ebenso kann sich die mittlere Umlaufzeit aller Satelliten, die oberhalb einer bestimmten Elevation sichtbar sind, im Laufe eines Tages

ändern, was darin begründet ist, dass zu unterschiedlichen Tageszeiten unterschiedliche Satelliten mit individuellen, stark unterschiedlichen Umlaufperioden sichtbar sind. Die Abweichung der Umlaufzeiten von einem siderischen Tag ist darin begründet, dass das Verteidigungsministerium der USA die Bodenspuren der GPS-Satelliten (engl.: ground tracks), also die geographische Länge des aufsteigenden Bahnknotens in einem Bereich von $\pm 2^\circ$ des nominellen Wertes fest hält (Chao u. Schmitt [1991]). Bahnmanöver der GPS-Satelliten sind deshalb unter anderem dann notwendig, wenn der aufsteigende Bahnknoten sich außerhalb des festgelegten Toleranzbereichs befindet. Choi u. a. [2004] berechnen die individuellen Umlaufzeiten der GPS-Satelliten aus den Broadcast-Ephemeriden mit Hilfe des 3. Keplerschen Gesetzes. Die Anwendung der siderischen Filterung erfolgt bei Choi u. a. [2004] nicht auf Beobachtungs- sondern Koordinatenebene. Dabei ist ein Referenztag notwendig, für welchen angenommen wird, dass keine Bewegungen der Station stattgefunden haben. Zur Filterung wird zunächst die zeitlich hoch aufgelöste Positionszeitreihe dieses Referenztages einem Tiefpassfilter zugeführt, um hochfrequentes Rauschen zu entfernen, anschließend wird die Zeitreihe um die entsprechende Anzahl siderischer Perioden verschoben und von der Positionszeitreihe des betrachtenden Tages abgezogen. Da zu einer Positionsbestimmung immer mehrere Satelliten beitragen, wird hierfür die mittlere siderische Periode der eingehenden Satelliten verwendet. Solange die Satellitenkonstellation unverändert ist, bleibt auch die gemittelte siderische Periode konstant. Somit können die Positionszeitreihen immer nur stückweise gefiltert werden. Bei den von Choi u. a. [2004] untersuchten Koordinatenzeitreihen mehrerer Stationen für ein Zeitfenster konnte das Rauschniveau deutlich gesenkt werden. Durch Analyse der spektralen Leistungsdichte konnte nachgewiesen werden, dass der modifizierte siderische Filter gegenüber ungefilterten oder mit einfachem siderischem Filter bearbeiteten Zeitreihen für die untersuchten Daten die Stationsschätzungen für Frequenzen kleiner als 0.004 Hz deutlich verbessert.

Nach [Lau, 2012, S. 9] und Georgiadou u. Kleusberg [1988] beträgt die maximale theoretische Amplitude des Fehlers durch Mehrwegeeffekte bei einer Phasenmessung ein Viertel der genutzten Wellenlänge des Signals, bei GPS L_1 also etwa 5 cm, so dass sich Mehrwegeeffekte hauptsächlich auf Anwendungen auswirken, die eine Genauigkeit im cm-Bereich oder besser benötigen. Für kinematische Auswertungen kann eine Korrektur der durch Mehrwegeeffekte verursachten Fehler, wie bereits oben erwähnt, durch zwei Arten der Filterung erfolgen: zum einen auf Beobachtungsebene, zum anderen auf Koordinatenebene. In beiden Fällen wird die siderische Umlaufzeit der GPS-Satelliten benötigt. Im Gegensatz zu anderen Ansätzen wird diese von Lau [2012] aus der großen Halbachse der Satellitenbahn und der Korrektur der mittleren Bewegung berechnet (entspricht dem 3. Keplerschen Gesetz, siehe Gl. 3-2 und 3-3). Diese Informationen sind in den übertragenen Broadcast-Ephemeriden enthalten.

$$n = \sqrt{\frac{\mu_E}{a^3}} + \Delta n \quad (3-2)$$

n : Mittlere Winkelgeschwindigkeit des Satelliten

μ_E : Geozentrische Gravitationskonstante der Erde: $3.986\,005 \cdot 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$

a : Große Halbachse der Satellitenbahn

Δn : Korrektur der mittleren Bewegung

$$T_0 = \frac{4\pi}{n} \quad (3-3)$$

T_0 : Zweifache Umlaufzeit des GPS-Satelliten

$$T_a = 86400 - T_0 \quad (3-4)$$

T_a : Zeitunterschied zu Sonntag (86 400 s)

Dieses Vorgehen zur Berechnung der Umlaufzeiten nimmt wenig Rechenleistung in Anspruch und kann außerdem für Echtzeit-Anwendungen eingesetzt werden, da direkt aus den Broadcast-Ephemeriden die aktuellen Umlaufzeiten berechnet werden können. Ein Update der Broadcast-Ephemeriden erfolgt alle zwei Stunden, so dass für einen kompletten Tag die siderische Umlaufzeit für einen Satelliten aus zwölf Einzelbestimmungen gemittelt werden kann. Die Zeitunterschiede zu einem Sonntag für aufeinanderfolgende Tage sollten nur kleine Unterschiede aufweisen, außer es wurden vom Kontrollzentrum Bahnmanöver mit diesem Satelliten durchgeführt.

Beim von Lau [2012] vorgeschlagenen Verfahren zur Reduzierung von Mehrwegeeffekten durch Filterung im Koordinatenraum werden die zu untersuchenden Tage, ebenso wie bei Choi u. a. [2004], auf einen Referenztag bezogen. Eine derartige Filterung ist nur bei einer kinematischen Auswertung mit hoher Datenrate möglich. Wird nur eine Position pro Tag bestimmt, kann dieses Verfahren nicht angewendet werden. Ebenso kann auch keine Filterung einzelner Satellitensignale mit deren spezifischer Umlaufzeit erfolgen, sondern es muss eine mittlere Umlaufzeit aller Satelliten verwendet werden. Lau [2012] nutzt hierbei die mittlere Umlaufzeit aller Satelliten, die zur Beobachtungsepoche am Beobachtungsort sichtbar sind, wodurch eine verbesserte Filterung im Vergleich zur Verwendung der Umlaufzeiten aller Satelliten möglich ist. Auch bei dieser Art der Filterung wird geprüft, ob sich die Umlaufzeiten zweier aufeinanderfolgender Tage stark unterscheiden (beispielsweise verursacht durch Bahnmanöver). Sollte die Umlaufzeit eines Satelliten stark zum Vortag abweichen, wird dieser Satellit aus der Berechnung der mittleren Umlaufzeit ausgeschlossen.

Für kurze oder mittlere Basislinienlängen enthalten die Doppeldifferenzresiduen einer differenziellen Auswertung hauptsächlich durch Mehrwegeeffekte verursachte Fehleranteile. Nach Lau [2012] steigert die auf siderischen Umlaufzeiten basierende Filterung das Rauschen der Koordinatenlösungen um den Faktor 2, weshalb Tiefpassfilter zur Eliminierung des Rauschens in Koordinaten- und Messresiduen eingesetzt werden müssen. Lau [2012] verwendet hierbei einen Resistor-Capacitor-Filter (exponentiell gewichteter gleitender Mittelwert) nach Roberts [2004].

Von Lau [2012] wurde als Testszenario eine kurze Basislinie (ca. 14 m) mit GPS-Rover-Ausrüstungen (Empfänger Leica SR530 mit Antenne Leica AT502) mehrfach statisch beobachtet bzw. die Daten einer längeren Basislinie (ca. 6.5 km) zwischen zwei mit Chokering-Antennen ausgerüsteten IGS-Stationen verwendet. In beiden Fällen wurden Daten mit einer Rate von 1 Hz genutzt. Die Daten wurden sowohl im Koordinaten- als auch im Beobachtungsraum gefiltert. Anschließend wurden die RMS-Werte der gefilterten Zeitreihen mit den ungefilterten Zeitreihen verglichen. Für die kurze Basislinie, welche auf einem Dach mit schlechten GNSS-Bedingungen (viele reflektierende Metallflächen) aufgezeichnet wurde, ergaben sich in den einzelnen Koordinatenkomponenten (N, E, Up) durch beide Arten der Filterung Verbesserungen der RMS-Werte der Residuen von ca. 50%. Ein signifikanter Unterschied der beiden Filterungsarten war nicht erkennbar, obwohl nach [Lau, 2012, S. 13] in der Theorie die Filterung auf Beobachtungsebene ein geringfügig besseres Ergebnis liefern sollte als die Filterung auf Koordinatenebene. Bei der Analyse der Ergebnisse der längeren Basislinie waren nur in der Ostkomponente der Koordinaten Verbesserungen in der Größenordnung von etwa 40% erkennbar. Lau [2012] vermutet als Ursache hierfür einen geringeren Mehrwegeeinfluss auf den beiden verwendeten Stationen sowie den positiven Einfluss der besseren GNSS-Empfangsantennen (Chokering) dieser Stationen.

Die Nutzung siderischer Filterungstechniken stellt zwar einen gangbaren Weg zur Reduktion von Mehrwegeeffekten dar, weist jedoch einige Unzulänglichkeiten auf (beispielsweise Variation der Umlaufzeiten). Durch

die unterschiedlichen Konstellationen aktueller und zukünftiger GNSS besitzt jedes Positionierungssystem eine spezifische nominelle Umlaufzeit. Bei Nutzung eines einzelnen GNSS ist die Mehrwegereduktion durch siderische Filtungstechniken noch möglich, bei einer Kombination verschiedener GNSS wird die Umsetzung dieser Vorgehensweise jedoch schwierig bis unmöglich. Da in dieser Arbeit ein einfaches und ohne zusätzliche Daten auskommendes Werkzeug zur Reduktion stationsabhängiger Fehler entwickelt werden soll, welches auch in der Zukunft bei der Kombination verschiedener GNSS anwendbar ist, wurde nach einem alternativen Weg gesucht.

3.3 Räumliches Stacking

Ein interessanter Ansatz, Fehler nicht direkt in der GNSS-Auswertung, sondern nachfolgend in der Analyse der daraus abgeleiteten Koordinatenzeitreihen zu korrigieren, wird von Wdowinski u. a. [1997] vorgestellt. Hierbei werden Koordinatenzeitreihen mehrerer Permanentstationen über einen Zeitraum von 100 d betrachtet. Zunächst werden in der Koordinatenzeitreihe enthaltene Ausreißer statistisch fundiert eliminiert. Als Ausreißer werden hierbei Punkte definiert, deren Fehler größer als das dreifache quadratische Mittel (engl.: root mean square, RMS) in jeder Koordinatenkomponente ist oder die um mehr als den dreifachen RMS-Wert vom Mittel einer Koordinatenkomponente abweichen. Ausreißer der ersten Form werden durch deutlich kürzere Beobachtungszeiten (kein vollständiger Datensatz über 24 h) verursacht, Ausreißer des zweiten Typs in der Lage kommen vermutlich durch falsche Festsetzung der Phasenmehrdeutigkeiten in der Software, Ausreißer des zweiten Typs in der Höhe durch Fehler in den Orbits oder dem Referenzrahmen zustande. Nach dem Entfernen eines möglichen Trends durch lineare Regression wird eine Technik zur räumlichen Filterung (engl.: spatial filtering) angewendet. Hierbei werden Fehler, die auf alle Stationen im gleichen Maß wirken, eliminiert. Nach Berechnung des Residuums der betrachteten Koordinatenkomponente für den entsprechenden Tag (siehe Formel 3-5) wird das sogenannte Stacking (deutsch: Stapeln), wie in Formel 3-6 dargestellt, durchgeführt. Abschließend wird die gefilterte Koordinatenkomponente $\hat{O}_S(d)$ durch Subtraktion des gemittelten Residuums aller Stationen von der berechneten Koordinatenkomponente (siehe Formel 3-7) ermittelt.

$$\epsilon_s(d) = O_s(d) - C_s(d) \quad (3-5)$$

$\epsilon_s(d)$: Residuum der Station s für Tag d

$O_s(d)$: Berechnete Koordinatenkomponente der Station s

$C_s(d)$: Erwartungswert der Koordinatenkomponente der Station s

$$\epsilon(d) = \frac{\sum_{s=1}^S \epsilon_s(d)}{S} \quad (3-6)$$

$\epsilon(d)$: Gemitteltes Residuum aller Stationen für Tag d

S : Gesamtzahl aller Stationen

$$\hat{O}_s(d) = O_s(d) - \epsilon(d) \quad (3-7)$$

Durch dieses Filterungsverfahren werden Fehler (insbesondere von Orbit und Referenzrahmen) in Zeitreihen, die auf alle Stationen einer Region in gleichem Maß wirken, deutlich reduziert. Die Streuung gefilterter Zeitreihen fällt deutlich geringer aus als die der rohen Zeitreihen. Jedoch wird bei diesem Verfahren jeglicher tektonische Einfluss im gemittelten Residuum aller Stationen vernachlässigt.

Hurst u. Bar-Sever [1998] beschreiben die Nutzung von Stacking zur Bestimmung von Kalibrierinformation, welche sowohl die Variationen des Phasenzentrums der GNSS-Antenne als auch den Einfluss der Stationsumgebung enthält. Bei dieser Art der Kalibrierung wird mittels der Software GIPSY-OASIS II und dem von Zumbege u. a. [1997a] vorgeschlagenen Verfahren des Precise Point Positioning ein 90–100 d umfassender Datensatz einer Zeitspanne von insgesamt 300–360 d von Permanentstationen ausgewertet. Hierdurch wird eine Mittelung der Phasenresiduen über unterschiedliche Wettersituationen erreicht. Die aus der Ausgleichung stammenden Residuen werden nach der Prozessierung der GNSS-Daten den über die Antennenhemisphäre verteilten Zellen der Größe $2^\circ \times 5^\circ$ (Elevation \times Azimut) zugeordnet. Nach der Zuordnung aller Residuen wird der Mittelwert aller in einer Zelle enthaltener Residuen gebildet. Zellen, die keine Residuen enthalten, bekommen den Wert der nächstgelegenen Zelle zugewiesen. Die Berechnung der Korrektur einer Beobachtung erfolgt durch bilineare Interpolation der einzelnen Zellen. Die Korrekturen werden additiv in der eingehenden PZV-Information angebracht. Somit werden sowohl das Antennenverhalten als auch die Einflüsse der Umgebung in der Prozessierung der Daten berücksichtigt.

Nach der Einführung der Korrekturdaten in die Prozessierung stellen Hurst u. Bar-Sever [1998] zwei Effekte fest: zum einen nimmt die Empfindlichkeit der finalen Lösung der Stationskoordinaten gegenüber einer Änderung der Mindestelevation um eine Größenordnung ab und zum anderen kann an einigen Stationen eine Verbesserung der Lösung erreicht werden. Hurst u. Bar-Sever [1998] definieren hierbei eine verbesserte Lösung durch weniger im Lauf der Prozessierung ausgeschlossene Phasenbeobachtungen, eine Verringerung des RMS der Residuen nach der Ausgleichung sowie eine bessere Übereinstimmung der Tageslösungen. Die Änderung der Mindestelevation kann sich nach Niell [1997] und Rothacher u. a. [1995] mit Änderungen von bis zu 10 cm auf die Stationsposition auswirken. Änderungen der Mindestelevation können durch modifizierte Aufzeichnungseinstellungen des GNSS-Empfängers, veränderte Umgebungssituation (beispielsweise Vegetationswachstum) oder auch angepasste Prozessierungsparameter in der Datenauswertung hervorgerufen werden. Hurst u. Bar-Sever [1998] zeigen an mehreren Beispielstationen, dass die Einführung ihrer Stationskorrekturen die Auswirkung einer Elevationsänderung auf die Stationskoordinaten deutlich verringert. Ebenso können sie nachweisen, dass auf einigen untersuchten Stationen durch die Einführung der Korrektur deutlich mehr Beobachtungen in der GNSS-Prozessierung verbleiben. Auf vielen Stationen ist nur eine geringe Verbesserung erzielbar, was Hurst u. Bar-Sever [1998] auf die guten Umgebungsbedingungen und gute Antennenmodelle für die dort eingesetzten GNSS-Antennen zurückführen. Zum Zeitpunkt dieser Untersuchungen wurden vom IGS Antennenmodelle publiziert, welche relativ zu einer Antenne des Typs „Dorne Margolin“ bestimmt wurden. Hierbei galt die Annahme, dass Antennen dieses Typs lediglich einen Phasenzentrumsoffset in der Höhe (110.0 mm für GPS L_1 und 128.0 mm für GPS L_2), jedoch keine horizontalen Phasenzentrumsoffsets sowie keine Phasenzentrumsvariationen besitzen. Durch einen Vergleich der von Hurst u. Bar-Sever [1998] bestimmten Korrekturwerte ausgewählter Stationen mit den PZV-Informationen, die vom IGS für diese Antennen publiziert wurden, konnten signifikante Unterschiede aufgezeigt werden; das heißt, dass neben den PZV-Unterschieden noch weitere Effekte in den Daten enthalten sind. Durch die Verwendung der neuen Korrekturwerte konnte die Auswirkung von Elevationsänderungen auf die Position dieser Station deutlich verringert werden.

In Iwabuchi u. a. [2004] wird die Generierung und Nutzung von sogenannten Stackingmaps in drei unterschiedlichen Softwarepaketen gezeigt. Ziel dieser Untersuchung ist eine verbesserte Bestimmung der zenitalen troposphärischen Laufzeitverzögerung (engl.: Zenith Tropospheric Delay, ZTD). Da diese in der Regel für kleine Zeitintervalle bestimmt werden, sind die Variationen des Phasenzentrums der GNSS-Empfangsantenne sowie die Mehrwegeeffekte die in diesem Zeitraum größten wirkenden Fehlerquellen. Zur Untersuchung werden die Daten einer Messkampagne aus dem Jahr 2000 verwendet, welche mit drei Softwarepaketen (Bernese GPS Software (Beutler u. a. [2000]), GAMIT (King u. Bock [1997]) und

GIPSY (Zumberge u. a. [1997a])) in unterschiedlichen Varianten ausgewertet wurden. Mit den beiden erstgenannten Softwarepaketen wird eine klassische differenzielle Auswertung durchgeführt, mit GIPSY im PPP-Modus (Precise Point Positioning) prozessiert. Mit GIPSY werden drei Varianten berechnet, die sich in der Datenrate unterscheiden und in zwei Varianten werden auch a priori-Stackingmaps in die Prozessierung eingeführt. Im Stacking-Schritt verwenden Iwabuchi u. a. [2004] die Residuen nach der Ausgleichung und stapeln diese über zehn Tage in Zellen mit einer Größe von $1^\circ \times 1^\circ$ (Azimut \times Elevation). Die Mindestanzahl an Residuen pro Zelle beträgt zehn. Die Residuen nach der Ausgleichung der beiden differenziellen Ansätze (Bernese, GAMIT) weisen eine ähnliche Charakteristik auf, wogegen die Residuen aus den PPP-Varianten durch signifikant höhere Standardabweichungen gekennzeichnet sind. Ebenso lassen sich die Residuencharakteristika einzelner Antennentypen deutlich unterscheiden. Die Residuen der PPP-Varianten, in die a priori-Stackingmaps eingeführt werden, sind gegenüber denen aus Varianten ohne a priori-Stackingmaps signifikant kleiner. Die Verkleinerung der Residuen ist vor allem bei stärker mit Mehrwegeeffekten belasteten Stationen stärker ausgeprägt.

Shoji u. a. [2004] untersuchen, ob durch den Einsatz von gestapelten Residuen die Bestimmung des atmosphärischen Wasserdampfgehalts mittels GPS verbessert werden kann. Hierzu werden Kampagnendaten eines Testnetzes in Japan verwendet, in dem 75 Stationen mit einem durchschnittlichen Abstand von 1–3 km auf einer Fläche von etwa $20 \times 20 \text{ km}^2$ aufgebaut wurden. Hauptziel des Projekts ist die Bestimmung von Variationen des Wasserdampfs in einem lokalen Rahmen (räumlich: $<10\text{--}20 \text{ km}$, zeitlich: wenige Stunden). Als Antennenkorrekturwerte werden Daten eines relativen Modells der US National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) verwendet, welches Phasenzentrumsoffsets (PZO) und elevationsabhängige Phasenzentrumsvariationen (PZV) bezogen auf eine Antenne des Typs „Dorne Margolin“ enthält. Zur Auswertung wird das Verfahren des Precise Point Positioning mit dem Softwarepaket GIPSY OASIS II (Zumberge u. a. [1997a]) verwendet.

Die Bestimmung der sogenannten Multipath Stacking (MPS) Map erfolgt durch Stapeln der Residuen nach der Ausgleichung in Zellen von $2^\circ \times 5^\circ$ (Elevation \times Azimut) und anschließende Mittelung der Residuen einer Zelle. Diese gemittelten Residuen werden im nächsten Schritt an die PZV-Werte angebracht, um ein verbessertes Korrekturmodell zu erhalten. Die Bestimmung erfolgt iterativ in vier Schritten, wobei die Zwangsbedingungen der Koordinaten stufenweise verkleinert (999 m, 100 m, 10 m, 1 m, 1 mm) und die im vorigen Schritt bestimmten Korrekturmodelle im folgenden Schritt eingeführt werden. Hierdurch werden die Korrekturmodelle und Koordinatenzeitreihen vier Mal verbessert. Das a priori eingeführte Antennenmodell des NOAA enthält lediglich elevationsabhängige PZV, jedoch keine azimutalen Korrekturen. Durch die Einführung der durch Stacking bestimmten Korrekturmodelle können azimutale Asymmetrien beseitigt werden, die durch die Abweichung der realen Antennencharakteristik vom eingeführten Antennenmodell entstehen. Shoji u. a. [2004] zeigen ebenfalls auf, dass bei Nutzung von PPP starke Korrelationen der Residuen nach der Ausgleichung einzelner Stationen, auch bei größerem Stationsabstand, auftreten können. Als Ursache nennen sie gemeinsame Einflüsse, wie bspw. Fehler in den Orbits und den Satellitenuhrkorrekturen, welche essentiell für PPP sind. Zur Untersuchung dieses Sachverhaltes werden über 570 Stationen des nationalen Permanentnetzes GEONET (GPS Earth Observation NETwork, http://terras.gsi.go.jp/ja/terras_english.html) ausgewählt und die Daten mit der gleichen Strategie ausgewertet. Einziger Unterschied hierbei ist das Antennenmodell: es wird ein neues Antennenmodell nach Hatanaka u. a. [2001a,b] verwendet, welches neben den PZV auch die Einflüsse der Antennenradomes sowie die Mehrwegeeffekte der metallischen Pfeileroberflächen berücksichtigt. Die Residuen jedes GPS-Satelliten für alle ausgewählten GEONET-Stationen werden gemittelt und anschließend von den korrespondierenden Residuen jeder Kampagnestation subtrahiert. Die mit diesen Daten berechneten Korrelationskoeffizienten fallen deutlich kleiner aus als die Korrelationskoeffizienten

ohne die Residuenverbesserung aus dem großen, übergeordneten Netz. Wird statt PPP eine differenzielle Auswertung unter Nutzung von Doppeldifferenzen durchgeführt, werden die auf allen Stationen durch Orbit- und Satellitenuhrfehler verursachten Fehlereinflüsse in großem Umfang eliminiert. Allerdings können mit einer Doppeldifferenz-Strategie nur relative Residuenwerte berechnet werden, die dann mittels einer sogenannten zero-mean-Annahme (Alber u. a. [2000]) auf absolutes Niveau gebracht werden müssen. Hierbei werden zwei Annahmen getroffen:

1. Bei der Transformation von undifferenzierten zu einfach-differenzierten Beobachtungen zwischen Empfängern werden die Fehler der Satellitenuhren eliminiert. Da der Uhrfehler des Satelliten einer einzelnen Epoche identisch für alle Beobachtungen zu diesem Satelliten ist, sollte das gewichtete Mittel der undifferenzierten Residuen Null ergeben.
2. Bei der Berechnung von Doppeldifferenzen werden Empfängeruhrfehler eliminiert. Da der Empfängeruhrfehler für alle Beobachtungen dieses Empfängers identisch ist, sollte das gewichtete Mittel der einfach differenzierten Residuen Null ergeben.

Ragheb u. a. [2007] verwenden Daten mit einer Auflösung von 1 Hz und vergleichen hierbei koordinaten- und beobachtungsbasierte Ansätze. Beim ersten Ansatz werden die Koordinatenresiduen unter Nutzung der optimalen siderischen Umlaufzeit (23 h 55 min 54 s) gestapelt. Anschließend werden diese Mittelwerte von den Werten des zu untersuchenden Tages abgezogen (Filterung im Koordinatenraum). Beim zweiten Ansatz wird eine ähnliche Methode unter Nutzung von Doppeldifferenz-Phasen-Residuen angewendet (Filterung im Beobachtungsraum). Für die Untersuchungen werden Daten sehr kurzer Basislinien (max. 350 m) verwendet, so dass die Fehler von Satellitenuhr, Orbit und Atmosphäre weitestgehend eliminiert werden ([Ragheb u. a., 2007, S. 326]). Die Auswertung der Daten erfolgt durch Bildung epochenweiser Doppeldifferenzen im kinematischen Modus, so dass für jede Messepoche ein Koordinatentripel geschätzt wird. Anstelle einer mittleren siderischen Umlaufzeit wird mittels Autokorrelation in Schrittweiten von 1 s in einem Intervall von ± 30 s um die nominelle siderische Periode herum der optimale Versatz bestimmt. Für die Autokorrelation werden Zeitfenster zwischen 30 s und 10 h verwendet, wobei erst Zeitfenster größer als 2 h verlässliche Ergebnisse liefern. Diese Prozedur wird in ähnlicher Weise für die Phasenresiduen durchgeführt, mit dem Unterschied, dass der Versatz nur für eine Komponente bestimmt werden muss (Koordinaten: drei Komponenten). Anschließend werden die Residuen mit diesem bestimmten Versatz über einen oder mehrere Tage gestapelt. Für die Filterung im Koordinatenraum werden Residuen bezogen auf das Langzeit-Koordinaten-Mittel der Station verwendet. Nach der Stapelung werden diese Residuen von den korrespondierenden Residuen des betrachteten Tages abgezogen. Zur Stapelung kann eine unterschiedliche Anzahl an Tagen verwendet werden.

Das phasenbasierte Stapeln erfolgt in zwei Schritten:

1. Fixieren der Koordinaten der unbekannt Station und Prozessieren der Daten mit dem Ziel, Doppeldifferenz-Phasenresiduen für alle unabhängigen Satellitenpaare jeder Frequenz zu erhalten, die anschließend gestapelt werden.
2. Erneute Prozessierung der Daten unter Subtraktion der gestapelten Phasenresiduen von den korrespondierenden L_1 - und L_2 -Doppeldifferenz-Phasenbeobachtungen des zu untersuchenden Tages.

Bei den untersuchten Datensätzen erzielen sowohl der koordinaten- als auch der phasenbasierte Ansatz deutliche Verbesserungen der Koordinatenzeitreihen. Die mit dem ersten Ansatz erhaltenen Ergebnisse der untersuchten Daten fallen hierbei geringfügig besser aus als die des zweiten Ansatzes. Mit der bei den Untersuchungen eingesetzten Software GASP (GPS Ambiguity Search Program; Al-Haifi [1996],

Corbett [1994]) weist der koordinatenbasierte Ansatz deutlich höhere Prozessierungszeiten auf als das phasenbasierte Vorgehen, da in jeder Messepoche die Phasenmehrdeutigkeiten separat und unabhängig neu geschätzt werden.

In Lidberg u. a. [2009] werden stationsabhängige Effekte auf verschiedenen Stationen des schwedischen GNSS-Permanentnetzes SWEPOS (<http://swepos.lmv.lm.se>) sowie ausgewählter europäischer IGS Stationen untersucht. Hierbei werden insbesondere die Einflüsse der Antenne, eines gegebenenfalls vorhandenen Radoms auf der GNSS-Antenne, des Stationsaufbaus und der Stationsumgebung analysiert. Die durch die Kalibrierung der GNSS-Antennen bekannten PZV werden je nach Einsatz (Feldmessungen, Permanentstationen) und Umgebungsbedingungen beeinflusst. Diese zusätzlichen Einflüsse machen eine Stationskalibrierung notwendig. Zur Analyse der Daten (sechs Jahre, 1999-2004) wurde GIPSY-OASIS II mit einer PPP-Strategie verwendet. Aus den Tageslösungen der Residuen nach der Ausgleichung (ionosphärenfreie Linearkombination L_3) wurden Monatsmittel als Funktion der Elevation berechnet und Gesamtmittelwerte in Form von Skyplots mit einer Auflösung von $2^\circ \times 5$ (Elevation \times Azimut) dargestellt. Viele der SWEPOS-Stationen zeigen für niedrige Elevationen (bis ca. 30°) ein „SWEPOS pattern“, welches mit großer Wahrscheinlichkeit durch eine auf der Oberfläche der Betonpfeiler befestigte Stahlplatte (Durchmesser 34 cm), auf der die Antenne befestigt ist, verursacht wird. Stationen, die von diesem Aufbau abweichen, weisen eine andere Residuencharakteristik auf. Neben den Einflüssen der Monumentierung sind in den Skyplots auch deutlich Einflüsse der direkten Umgebung der Antenne (beispielsweise Zäune, Hütten) zu erkennen.

Huisman u. a. [2009] nutzen Mehrwegekarten (engl.: multipath maps) um die Charakteristik von CORS (Continuously Operating Reference Station) darzustellen. Zur Erstellung dieser Karten werden die undifferenzierten Phasenresiduen einer Station über einen längeren Zeitraum (zwei bis drei Wochen) gemittelt und sphärisch in Abhängigkeit von Elevation und Azimut dargestellt. Falls nur Doppeldifferenzresiduen aus einer differenziellen GNSS-Auswertung vorliegen, müssen diese zunächst in undifferenzierte Residuen umgerechnet werden. Nach Alber u. a. [2000] werden die undifferenzierten Phasenresiduen durch Mehrwegeeffekte der Trägerphase an der GNSS-Station, unmodellerte Variationen des Antennenphasenzentrums und unmodellerte atmosphärische Laufzeitverzögerungen dominiert. Unter der Annahme, dass die letztgenannten Fehler von Tag zu Tag variieren und durch Mittelung über mehrere Tage zu Null werden, enthalten die undifferenzierten Phasenresiduen hauptsächlich die durch Mehrwegeeffekte und unmodellerte Antennencharakteristik verursachten Fehler. Zur Untersuchung werden mehrere Stationen in Westaustralien verwendet, deren Daten mit der Bernese GPS Software (Dach u. a. [2007]) ausgewertet wurden. Die in der differenziellen Auswertung berechneten Doppeldifferenzresiduen der ionosphärenfreien Linearkombination wurden mit dem von Alber u. a. [2000] vorgestellten Algorithmus in undifferenzierte Phasenresiduen umgerechnet. Mit den hierbei getroffenen Annahmen können undifferenzierte Phasenresiduen aus Doppeldifferenzresiduen berechnet werden. Iwabuchi u. a. [2004] haben diese Vorgehensweise mit zwei differenziellen Softwarepaketen (Bernese GPS Software, Dach u. a. [2007]; GAMIT, King u. Bock [1997]) angewendet und mit den undifferenzierten Residuen einer PPP-Software (GIPSY, Zumberge u. a. [1997a]) verglichen. Dabei lieferten beide Varianten (differenziell und PPP) ähnliche Ergebnisse.

Für die Projektion der Residuen in eine Mehrwegekarte werden die Residuen zunächst rasterförmig mit einer flächentreuen sinusoidalen Projektion als Funktion von Elevation und Azimut angeordnet. Die Rastergröße dieser Projektion ist so gewählt, dass jede Zelle im Skyplot die gleiche Größe besitzt (siehe Formel 3-8). Die von Huisman u. a. [2009] gewählte Projektion ist identisch mit der von van der Marel u. Gündlich [2003] gewählten Darstellung, einziger Unterschied ist die Anpassung auf die südliche Hemisphäre.

$$S_{\alpha,\varepsilon} = \left\{ (x, y) \left| \begin{array}{l} x \in [(\alpha - \alpha_0) \cos(\varepsilon) - s/2, (\alpha - \alpha_0) \cos(\varepsilon) + s/2] \\ y \in [\varepsilon - s/2, \varepsilon + s/2] \end{array} \right. \right. \quad (3-8)$$

$S_{\alpha,\varepsilon}$: Gebiet um den Rasterpunkt (α, ε)

x : Rechtswert des Rasterpunktes in der Projektion

y : Hochwert des Rasterpunktes in der Projektion

α : Azimut

α_0 : Zentraler Meridian der Projektion

ε : Elevation

s : Rastergröße

Außer für das Azimut α_0 ist das Azimut der sinusoidalen Projektion eine gekrümmte Linie, die stärkste Krümmung tritt im Azimut $\alpha_0 + 180^\circ$ auf. Für Mehrwegekarten in der südlichen Hemisphäre (Testgebiet: Australien) wurde $\alpha_0 = 180^\circ$ gewählt, so dass die Ergebnisse die größte Verzerrung in südlicher Richtung aufweisen, da dort auf Grund der GPS-Konstellation keine Daten vorhanden sind. Der Mehrwege-Wert eines Rasterpunktes in einer Mehrwegekarte wird aus dem Mittel aller undifferenzierten Residuen berechnet, die im Gebiet um den untersuchten Rasterpunkt liegen (siehe Formel 3-9). Jedes undifferenzierte Residuum kann dabei nur in einem Gebiet liegen.

$$m(\alpha, \varepsilon) = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i \mid r_i \in S_{\alpha,\varepsilon} \right. \quad (3-9)$$

$m(\alpha, \varepsilon)$: Mehrwege-Wert eines Rasterpunktes in Abhängigkeit von Elevation und Azimut

N : Anzahl der undifferenzierten Residuen in Gebiet um den Rasterpunkt

r_i : Undifferenziertes Residuum im Gebiet um den Rasterpunkt $S_{\alpha,\varepsilon}$

Aus den nach Formel 3-9 berechneten Mehrwegewerten kann eine Polardarstellung der Satellitenspuren mit den jeweiligen Mehrwegewerten für jedes Residuum visualisiert werden. Aus dieser Darstellung kann mittels linearer Interpolation eine Darstellung des Fingerabdrucks der Station in einer flächentreuen sinusoidalen Projektion generiert werden.

In der Theorie enthält die Mehrwegekarte nur die wiederholbaren Mehrwegeeffekte, wodurch die Differenz zweier Mehrwegekarten für jede Rasterzelle den Wert Null ergeben sollte. Durch unmodellerte atmosphärische Effekte wird diese Differenz in der Regel nicht zu Null. Die Residuen lassen sich nach Formel 3-10 berechnen.

$$e_i(\alpha, \varepsilon) = m_i^1(\alpha, \varepsilon) - m^j(\alpha, \varepsilon) \quad (3-10)$$

$e_i(\alpha, \varepsilon)$: Residuum für einen Rasterpunkt (α, ε) eines einzelnen Tages i

m_i^1 : Mehrwegewert eines Tages i

m^j : Mehrwegewert aus j Tagen

Durch Stacking der undifferenzierten Residuen über mehrere Tage können die unmodellierten atmosphärischen Laufzeitfehler weitestgehend eliminiert werden und es verbleiben hauptsächlich die systematischen Fehler (Mehrwege, Antennenrestfehler). Die empirische Standardabweichung kann mit Formel 3-11 berechnet werden.

$$\hat{\sigma}_{e^j}(\alpha, \varepsilon) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^j e_i^T e_i}{\left(\sum_{i=1}^j N_i \right) - 1}} \quad (3-11)$$

$\hat{\sigma}_{e_j}(\alpha, \varepsilon)$: Empirische Standardabweichung der Residuen für Rasterpunkt (α, ε) über j Tage

e_i : Spaltenvektor der Residuen für Tag i

N_i : Anzahl der Residuen

Für die Festlegung der optimalen Anzahl an Tagen, über die ein Stacking der undifferenzierten Residuen erfolgen soll, gibt es unterschiedliche Betrachtungsweisen: Huisman u. a. [2009] wählen hierfür einen Zeitraum von 30 d, Braun u. a. [2003] verwenden nur die Daten von drei Tagen, Shoji u. a. [2004] hingegen nutzen die Daten von 51 d. Neben einer Darstellung in Form eines Skyplots (in Abhängigkeit von Azimut und Elevation) empfehlen Huisman u. a. [2009] auch eine rein elevationsabhängige Darstellung. Elevationsabhängige Fehler (bspw. verbleibende Fehlmodellierungen der PZV) werden hierdurch betont.

Iwabuchi u. a. [2011] nutzen Stacking, um eine verbesserte Schätzung troposphärischer Laufzeitverzögerungen durchführen zu können. Demnach können Stackingkarten der einzelnen Stationen unter anderem die durch Mehrwegeeffekte erzeugten, systematischen Fehler reduzieren. Der dominante Fehler, welcher die Residuen nach der Ausgleichung beeinflusst, kann durch die Einführung der Stackingkarten verringert werden, während das Signal-Rausch-Verhältnis der troposphärischen Laufzeitverzögerung in schräger Richtung deutlich verbessert wird. Die Prozessierung der GEONET-Daten (Miyazaki u. a. [1998] erfolgt hierbei mit der Software RTNet (<http://www.gps-solutions.com>), in der eine Sampling-Rate von 1 min, eine Mindestelevation von 10° und die Global Mapping Function (GMF, Böhm u. a. [2006a]) verwendet wird. Die Stackingkarten mit einer Auflösung von $1^\circ \times 1^\circ$ (Azimut \times Elevation) werden aus den Residuen nach der Ausgleichung der einzelnen Stationen erzeugt. Hierdurch sollen die an den Stationen wirkenden Mehrwegeeffekte und systematische Fehler im Antennenmodell (vor allem PZV) reduziert werden.

Die Stackingkarten werden hierbei immer aus den Daten eines Monats generiert. In den in Iwabuchi u. a. [2011] dargestellten Beispielen sind deutliche Unterschiede der Stackingkarten nach einem Antennenwechsel (geodätische Antenne \Rightarrow Chokering-Antenne) erkennbar. Ebenso sind Unterschiede in den Karten einzelner Monate erkennbar. In einem der dargestellten Plots treten Oszillationen der Residuen in azimuthaler Richtung auf, welche von den Autoren als die Mehrwegeeffekte, die aus einem stabförmigen Pfeiler in der Nähe der Station resultieren, identifiziert werden. In einem anderen Plot treten Oszillationen in Elevationsrichtung auf, welche nach Ansicht der Autoren durch die Stationsumgebung verursacht werden. Jedoch sind Änderungen in den Stackingkarten nicht immer durch Änderungen im Stationsumfeld bedingt. In einem gezeigten Beispiel wurde eine Station als statische Station ausgewertet, welche jedoch durch die koseismische Bewegung des Erdbebens vom 11.03.2011 bewegt wurde. Für die Zeit nach dem Erdbeben wurde in der Auswertung zunächst die präseismische Koordinate angehalten.

In Moore u. a. [2014] wird ein ähnliches Vorgehen beschrieben, wie es vom Autor in den nachfolgenden Kapiteln vorgeschlagen wird. Hierbei generieren die Autoren dieses Artikels aus den Phasenresiduen nach der Ausgleichung sogenannte empirische Stationsmodelle (engl.: empirical site model, ESM) zur Beseitigung unmodellierter stationsabhängiger Fehler. Die rohen GNSS-Daten werden mit dem Programmpaket GAMIT (Herring u. a. [2010]) ausgewertet, wobei die Uhrfehler von Satellit und Empfänger in einem Datenbearbeitungsschritt nach der Ausgleichung geschätzt werden, nachdem die Phasenmehrdeutigkeiten festgesetzt wurden, um undifferenzierte, mit fixen Ambiguities berechnete Residuen nach der Ausgleichung zu erhalten. Ein alternatives Verfahren zur Umwandlung von Doppeldifferenz-Phasenresiduen in undifferenzierte Phasenresiduen wird von Alber u. a. [2000] beschrieben. Zur Erstellung eines ESM wird für die Antennenhemisphäre jeder zu untersuchenden Station der Median aus den Phasenresiduen nach der Ausgleichung einer Zelle, welche eine Auflösung in Azimut- und Elevationsrichtung von 0.5° besitzt, berechnet. Anschließend werden das ESM sowie das absolute IGS-Antennenmodell kombiniert. Da beide

Modelle eine unterschiedliche räumliche Auflösung besitzen, werden mittels bilinearer Interpolation die Werte des PZV-Rasters auf das Raster des ESM umgerechnet. Anschließend werden die PZV und das ESM nach Formel 3-12 umgerechnet und im ANTEX-Format in eine für jede Station separate Datei geschrieben.

$$L_{3,ESM} = 2.5457 \cdot L_{1,PZV} - 1.5457 \cdot L_{2,PZV} + e_{Azi,Ele} \quad (3-12)$$

$L_{3,ESM}$: L_3 -Wert des ESM

$L_{1,PZV}, L_{2,PZV}$: PZV-Werte für L_1 bzw. L_2

$e_{Azi,Ele}$: Median des Residuenwerts in der korrespondierenden Zelle

Im Originaltext ist statt von L_3 von LC die Rede, die Berechnungsformel (Gl. 3-12) lässt aufgrund der verwendeten Faktoren für L_1 und L_2 den Schluss zu, dass es sich hierbei um die im Sprachgebrauch des Autors bekannte ionosphärenfreie Linearkombination L_3 handelt. Moore u. a. [2014] berechnen für jedes Kalenderjahr ein eigenes ESM. Ebenso wird ein neues ESM berechnet, wenn an einer Station ein Antennenwechsel durchgeführt wurde. Falls einzelne Zellen keine Residuen enthalten, wird für diese Zellen im ESM keine Interpolation vorgenommen.

Zum Test der ESM an realen Daten wurde ein regionales Netz, bestehend aus ca. 60 Stationen, mit Daten des Zeitraums Beginn 2010 bis Ende 2012 prozessiert. Anschließend wurde der RMS der Phase der einzelnen Stationen ohne/mit Nutzung des ESM verglichen. Der RMS der Phase wurde dabei als Funktion von Azimut und Elevation mit einer Schrittweite von 0.5° bestimmt, wobei Zellen, die keine Beobachtungen enthielten, von der Berechnung ausgeschlossen wurden. Für jede Station wurde pro Jahr ein RMS berechnet, selbst dann, wenn ein Ausrüstungswechsel auf der Station vorgenommen wurde. Die Autoren konnten durch die Einführung des ESM einen signifikanten Rückgang des RMS der Phase beobachten. Der Median der Phase über alle Stationen ging hierbei von 5.2 mm auf 2.3 mm zurück. Zur weiteren Untersuchung der Einführung der ESM wurden von Moore u. a. [2014] Lomb-Scargle-Periodogramme (Scargle [1982]) berechnet. Hierbei wurden die Periodogramme für die trendbereinigten Zeitreihen der Höhenkomponente (ohne/mit ESM) sowie deren Differenz genutzt. Für die Mehrzahl der analysierten Stationen konnten Maxima für das drakonitische Jahr (351.4 d) nachgewiesen werden. Ein drakonitisches Jahr beschreibt hierbei die durchschnittliche Umlaufdauer eines GPS-Satelliten im inertialen Raum relativ zur Sonne, d.h. die Zeitspanne, die zwischen zwei Durchläufen eines raumfesten Bahnknotenpunktes liegt. Ähnliche Ergebnisse wurden beispielsweise auch von King u. Watson [2010] veröffentlicht.

Moore u. a. [2014] konnten keine einheitliche Änderung der Spektren über alle Stationen feststellen. Bei einigen Stationen wurden die Spektren signifikant durch die Einführung des ESM verändert (höhere, aber auch geringere Amplitude beim drakonitischen Jahr und dessen Oberfrequenzen), andere zeigten kein erkennbares Verhalten. Im Artikel von Moore u. a. [2014] ist eine weitere Untersuchung zum Einsatz vom ESM bei der Bestimmung der relativen geometrischen Beziehungen (engl.: local ties) zwischen einzelnen GNSS-Stationen der Örtlichkeit Yarragadee (Australien) beschrieben. Die Untersuchungen von Moore u. a. [2014] zeigen, dass die Wahl der Auswerteparameter in der GNSS-Prozessierung Einfluss auf die Wirksamkeit der ESM hat. Die Schätzung von Uhrfehlern, Troposphärenparametern und die Wahl eines niedrigen Elevationswinkels verringern die Wirksamkeit der ESM, durch Mehrwege verursachte Fehler zu reduzieren. Bei der Anwendung von ESM auf Stationen, welche nahe an einem großen, ebenen Reflektor aufgebaut sind, kann der Einsatz von ESM die Positionsbestimmung verschlechtern, auch wenn der RMS der Phase verbessert wurde.

Sollen die Daten lange existierender permanenter GNSS-Stationen ausgewertet und die existierenden Fehlereinflüsse korrigiert werden, bietet Stacking hierzu ideale Voraussetzungen. Da bei dieser Technik neben den für die GNSS-Auswertung notwendigen Daten (Orbits, Uhrinformation, ...) lediglich die archivierten GNSS-Beobachtungen ohne weitere Zusatzinformationen (beispielsweise SNR-Werte) erforderlich sind, eignet sie sich auch gut zur Neuauswertung „historischer“ Daten. Wie den oben aufgeführten Literaturstellen zu entnehmen ist, können verschiedene Stackingansätze verfolgt werden: Stacking im Beobachtungs- bzw. Koordinatenraum oder auch zeitliches bzw. räumliches Stacking. Im Rahmen dieser Arbeit wird das räumliche Stacking, bezogen auf die Einfallrichtung der GNSS-Signale in der GNSS-Empfangsantenne, verwendet. Dadurch können Probleme, die durch unterschiedliche siderische Umlaufzeiten hervorgerufen werden, umgangen werden. Zudem bietet diese Art des räumlichen Stackings die Möglichkeit, die Signale unterschiedlicher GNSS separat zu analysieren und zu korrigieren. In dieser Arbeit werden zur Generierung der Korrekturen direkt die undifferenzierten Residuen einer GNSS-Auswertung im PPP-Modus verwendet, die – im Gegensatz zu anderen Publikationen – keine Rückrechnung von Doppeldifferenzresiduen erfordert, bei welcher Annahmen getroffen werden müssen. Im von Moore u. a. [2014] vorgeschlagenen Verfahren werden die Korrekturen aus den Daten eines kompletten Jahres berechnet und zusammen mit den Phasenzentrumsvariationen der jeweiligen Antenne zu einem empirischen Stationsmodell kombiniert. Abweichend hiervon werden in dieser Arbeit die Korrekturen aus den Daten eines kürzeren Zeitraums (10 d) und in gleitender Form berechnet (siehe Kap. 6.2 auf S. 76), da gezeigt werden konnte, dass die stationsabhängigen Einflüsse zeitlichen Variationen unterworfen sind. Für einen ersten Test wurden auch in dieser Arbeit die Korrekturen mit den Phasenzentrumsvariationen der entsprechenden Antenne kombiniert (siehe Kap. 6.1), in der finalen Variante jedoch wurden die Verbesserungen als separate Dateien der Auswertung zugeführt (siehe Kap. 6.2).

4 Einführung gestapelter Information in die GNSS-Auswertung

Im vorigen Kapitel wurden verschiedene Forschungsansätze erläutert, deren vorrangiges Ziel darin besteht, den Einfluss von Mehrwegeeffekten in den aufgezeichneten Beobachtungen von GNSS-Permanentstationen zu reduzieren bzw. zu eliminieren. Eine Möglichkeit bietet die Verwendung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses, wobei vorausgesetzt wird, dass diese Information in den Beobachtungsdaten enthalten ist. Das SNR wurde in den zurückliegenden Jahren oft nicht oder nur in einer herstellerspezifischen Einheit in den RINEX-Beobachtungsdaten abgelegt. Eine Umrechnung in eine standardisierte Einheit zur Berücksichtigung dieser Daten kann nur durch Offenlegung der notwendigen Algorithmen durch die Hersteller erfolgen, was oft nicht der Fall ist. Die Verwendung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses zur Fehlerkorrektur ist demnach nur möglich, wenn bestimmte Voraussetzungen erfüllt sind. Andere Verfahren nutzen siderische Filterungstechniken, welchen die sich wiederholende Satellitengeometrie nach einem siderischen Tag zugrunde liegt. Hierbei gilt die Annahme, dass bei identischer Satellitenkonstellation und unveränderter Umgebung gleiche Reflexionsbedingungen vorherrschen, die den Satellitenempfang an einer Station immer in gleicher Weise beeinträchtigen. Diese Voraussetzungen sind – wie viele Untersuchungen gezeigt haben – nur schwer einzuhalten, da beispielsweise die einzelnen GPS-Satelliten von ihrer nominalen Umlaufzeit abweichen. Bei der Nutzung eines GNSS können diese individuellen Abweichungen noch berücksichtigt werden, mit der steigenden Anzahl verfügbarer GNSS mit unterschiedlichen Umlaufzeiten ist dies nicht mehr möglich.

Einen vielversprechenden Ansatz stellt das räumliche Stacking dar, bei dem Residuen aus einer GNSS-Auswertung hinsichtlich ihrer Raumrichtung, aus der sie in der Empfangsantenne eintreffen, analysiert und daraus Korrekturen abgeleitet werden, die in einen erneuten Auswertedurchlauf eingehen. Dieses Verfahren nutzt die Residuen, die im Rahmen der Parameterschätzung bei der Ausgleichung von GNSS-Beobachtungen bestimmt werden, so dass keine Zusatzdaten wie beim SNR-basierten Ansatz oder identische siderische Umlaufzeiten notwendig sind. Zudem können mit dem Aufkommen zukünftiger GNSS für diese Systeme separat Korrekturen bestimmt und eingeführt werden. In den nachfolgenden Unterkapiteln wird zunächst die zugrunde liegende Idee und anschließend die programmtechnische Umsetzung erläutert. Ebenso werden die an der zur Prozessierung der GNSS-Daten verwendeten Bernese GNSS Software notwendigen Anpassungen beschrieben und die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Prozessierungsparameter dargestellt. Die deutschsprachigen Begriffe Stapelung/stapeln/gestapelt werden in dieser Arbeit als Synonyme für die aus dem englischen Sprachgebrauch stammenden Begriffe Stacking/stacken/gestackt verwendet.

In den nachfolgenden Kapiteln werden oftmals ebene Darstellungen der Antennenhemisphäre (engl.: skyplot) verwendet, die an dieser Stelle kurz vorgestellt werden. Abb. 4-1 zeigt eine einfache Prinzipskizze dieser Darstellung. Die dargestellten Koordinatenachsen dienen an dieser Stelle nur der Erklärung und sind in den sonstigen Abbildungen dieser Art nicht enthalten. Die Zeichnungsebene ist die Normalebene zur lokalen Flächennormalen und verläuft durch das mittlere Phasenzentrum der Antenne. Die Rechtsachse läuft vom mittleren Phasenzentrum nach Osten, die Hochachse nach Norden. Der lokale Zenit wird im Ursprung des zweidimensionalen Koordinatensystems dargestellt. Die konzentrischen Kreise stellen (von innen nach außen) die Elevationen 60° , 30° und 0° dar, wobei 0° gleichbedeutend mit dem lokalen Horizont ist. Um niedrige Elevationen nicht gestaucht darzustellen, steigt der Radius, welcher die Elevationen darstellt, linear an. Wird für den Kreis der Elevation 0° der Radius 1 LE angesetzt, beträgt der Radius für die Elevationen 30° bzw. 60° dementsprechend 0.6666 LE bzw. 0.3333 LE. Die konzentrischen Kreise der Elevationsstufen sind nicht in allen Abbildungen enthalten. Einige Grafiken dieses Typs enthalten in Nord-/Ost-/Süd-/Westrichtung Winkelangaben (0° , 90° , 180° , 270°), welche das Azimut in $[\circ]$ angeben.

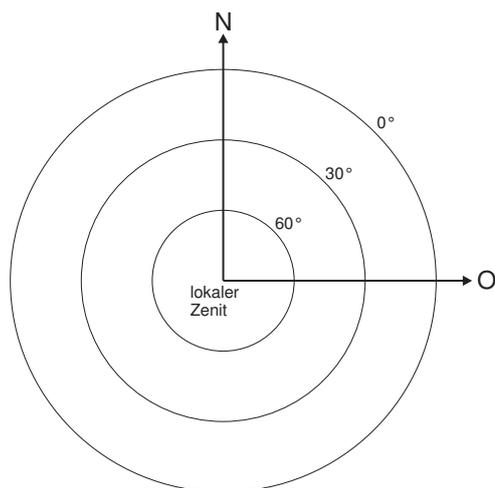


Abb. 4-1: Schematische Darstellung der ebenen Darstellung der Antennenhemisphäre (Skyplot)

Diese Art der Darstellung entspricht der mittabstandstreuen, azimutalen Abbildung nach J. H. Lambert (siehe Kuntz [1990]).

4.1 Grundidee

Die Modellierung von Fehlereinflüssen kann einerseits durch Berücksichtigung entsprechender Korrekturen im funktionalen Modell oder durch Erweiterung des stochastischen Modells erfolgen. Während andere Arbeiten durch modifizierte Gewichtungsfunktionen oder die Berücksichtigung von Korrelationen zwischen Beobachtungen (siehe beispielsweise Luo [2013]) das stochastische Modell verbessern, wird in dieser Arbeit der Weg über ein Korrekturmodell verfolgt, welches im funktionalen Modell Anwendung findet. Zur Bestimmung stationsabhängiger Fehlereinflüsse sind die Residuen einer PPP-Auswertung hervorragend geeignet, da – im Gegensatz zu einer differenziellen Auswertung – jede Station eines Netzes separat analysiert werden kann, ohne dass Einflüsse, welchen eine der beiden Stationen einer Basislinie unterliegt, durch die Differenzbildung auf die andere Station übertragen werden. Diese Annahme setzt jedoch voraus, dass Fehlereinflüsse, die beispielsweise über die Satelliten einwirken, bestmöglich durch geeignete Modelle und in die Auswertung eingeführte Produkte modelliert werden (siehe Kap. 2.4).

Wird die Antennenhemisphäre in einzelne Zellen unterteilt, die beispielsweise durch ein bestimmtes Azimut-/Zenitdistanzinkrement definiert sind, und werden die in dieser Zelle liegenden Residuen über einen festgelegten Zeitraum (mehrere Tage) gestapelt, so ist davon auszugehen, dass sich die zufälligen Anteile der Residuen über die Zeit aufheben, systematische Anteile jedoch kontinuierlich aufsummieren. Das arithmetische Mittel aller Residuen dieser Zellen im vorgegebenen Zeitraum spiegelt daher einen gegebenenfalls vorhandenen systematischen Einfluss aus dieser Richtung der Antennenhemisphäre wider, da Signale aus dieser Richtung immer um einen Betrag der gleichen Größenordnung verfälscht werden. Wird der so bestimmte Wert als Korrektur – analog zu den PZV der GNSS-Antenne – vor der Parameterschätzung an jede aus dieser Richtung in der GNSS-Antenne eintreffende Beobachtung angebracht, so sollte der systematische Effekt in den finalen Residuen nicht mehr zu sehen sein. Dies stellt eine räumliche Stapelung dar, wobei räumlich in diesem Fall durch einen Azimut- und Zenitdistanzbereich begrenzten Raumsektor definiert ist, und die Residuen der Signale gestapelt werden, die aus diesem Raumsektor in der Antenne der GNSS-Station eintreffen. Ein anderer Ansatz der räumlichen Stapelung wird von Ragheb u. a. [2007] verwendet, bei dem Koordinatenzeitreihen gestapelt werden und räum-

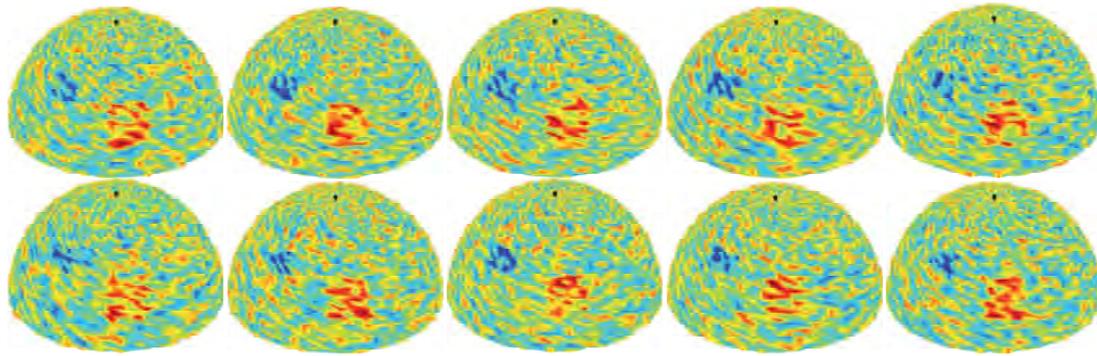


Abb. 4-2: Schematische Darstellung zufälliger und systematischer Fehler auf der Antennenhemisphäre für zehn aufeinanderfolgende Tage; schwarzer Punkt: lokaler Zenit

lich somit über die 3D-Raumposition definiert wird. Eine anschauliche Darstellung der in dieser Arbeit verfolgten räumlichen Stapelung ist in den Abb. 4-2 bis 4-4 gegeben. In diesen simulierten Plots wird die Antennenhemisphäre durch die Schale einer Halbkugel repräsentiert, auf der die Residuenwerte in Abhängigkeit von Azimut und Elevation visualisiert werden. Die einzelnen Plots stehen hierbei für die Residuenwerte von zehn aufeinanderfolgenden Tagen. Der Blickwinkel der Aufnahme in Elevationsrichtung beträgt 30° . Die azimutale Ausrichtung spielt in dieser Darstellung keine Rolle, ist jedoch in allen Einzelabbildungen identisch. Der schwarze Punkt in den Abbildungen markiert die Richtung des lokalen Zenits. Eine glatte Oberfläche der Halbkugel wäre gleichbedeutend mit einem konstanten Residuenwert für Beobachtungen aus allen Richtungen. Der Idealfall wäre gegeben, wenn alle Residuenwerte den Wert Null aufwiesen. Zur Simulation der Realität sind in Abb. 4-2 über die gesamte Oberfläche der Halbkugel zufällig generierte Fehler als Einbuchtungen (Blautöne) oder Ausbeulungen (Rottöne) in unterschiedlicher Ausprägung verteilt. Zusätzlich wurden in zwei Bereichen systematische Fehler unterschiedlicher Stärke zu den zufälligen Fehlern addiert (Bereich 1: rötlich eingefärbt, in der Mitte; Bereich 2: bläulich eingefärbt, links oberhalb der Mitte). Die einzelnen Plots repräsentieren die Residuenverteilung an einzelnen Tagen. In den Plots ist die Variation der zufällig verteilten Fehler gut erkennbar, ebenso lassen sich die zwei Regionen, in denen systematische Fehler angebracht wurden, erahnen. In Abb. 4-3 sind die über zehn

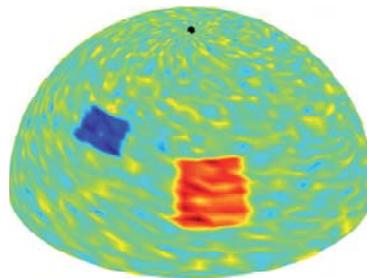


Abb. 4-3: Über zehn Tage gestapelte und gemittelte Fehleranteile; schwarzer Punkt: lokaler Zenit

Tage gemittelten Residuen der kompletten simulierten Antennenhemisphäre dargestellt. Deutlich treten die beiden als systematische Fehler eingeführten Bereiche hervor (roter und blauer Bereich). Auf der übrigen Fläche sind lediglich zufällige Fehler mit geringer Ausprägung zu erkennen. Die so erzeugten Korrekturwerte werden im nächsten Schritt von den ursprünglichen Residuen subtrahiert, wodurch die systematischen Komponenten der ursprünglichen Residuen deutlich reduziert werden. In Abb. 4-4 sind die um die in Abb. 4-3 dargestellten Verbesserungen korrigierten ursprünglichen Residuen aus Abb. 4-2 dargestellt. Erwartungsgemäß konnten die durch systematische Fehler beeinträchtigten Residuen durch die Einführung der gestapelten Information bereinigt werden. Es verbleiben lediglich zufällige Anteile. Im realen Einsatz sollen die berechneten Korrekturen jedoch nicht an die aus der GNSS-Auswertung

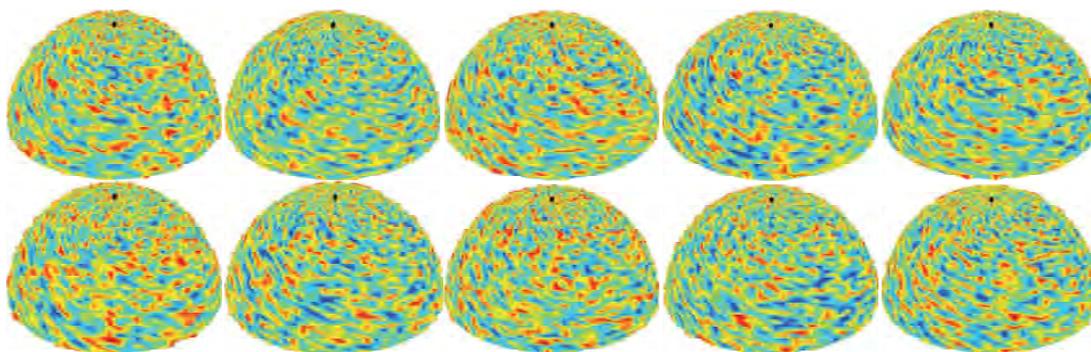


Abb. 4-4: Schematische Darstellung zufälliger und systematischer Fehler auf der Antennenhemisphäre für zehn aufeinanderfolgende Tage, korrigiert um systematische Anteile; schwarzer Punkt: lokaler Zenit

stammenden Residuen angebracht, sondern in einen erneuten Prozessierungsdurchlauf integriert werden, wie eine schematische Darstellung in Abb. 4-5 zeigt. Als erster Schritt wird eine GNSS-Prozessierung im PPP-Modus durchgeführt, aus der, neben Koordinaten und weiteren Produkten (beispielsweise der troposphärischen Laufzeitverzögerung in zenitaler Richtung), die rohen Residuen – für jede Station separat – hervorgehen. Diese Residuen werden einer separaten, in Matlab realisierten Software zugeführt und dort gestapelt. Das hierbei entstehende Produkt, die sogenannte Stackingmap (SM), enthält die stationsabhängigen Korrekturen, die einzelnen Raumrichtungsbereichen zugeordnet sind. In einem zweiten GNSS-Auswerteschritt wird diese SM als Korrektur eingeführt. Die in diesem Durchlauf entstehenden Residuen sind um die auf die Station einwirkenden systematischen Anteile reduziert. Im Nachfolgenden werden die Residuen, welche im ersten Prozessierungsschritt berechnet wurden, als rohe Residuen bezeichnet, die die im zweiten Prozessierungsdurchlauf generiert wurden, als gestapelte (gestackte) Residuen. Wie bereits oben erwähnt, sollen die durch Stapeln der Residuen erzeugten Korrekturen in ähnlicher

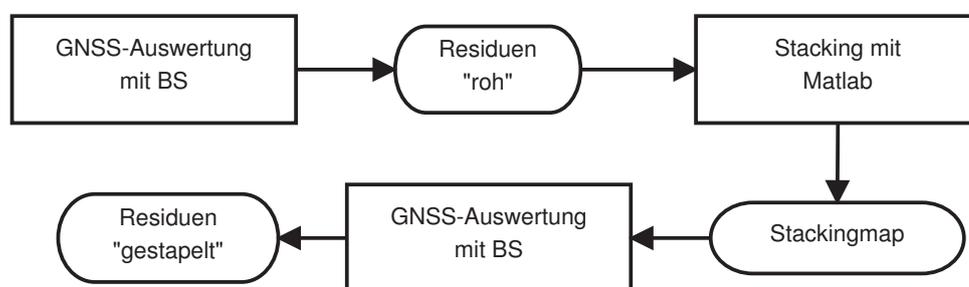


Abb. 4-5: Schematischer Ablauf der Einführung gestapelter Information in die GNSS-Auswertung

Weise wie die PZV der GNSS-Empfangsantennen in die Prozessierung eingeführt werden. Zum ersten Test des Verfahrens werden die gestapelten Werte direkt an die PZV der entsprechenden Antenne angebracht und diese modifizierte Antenneninformation wird im zweiten GNSS-Auswerteschritt eingeführt. Der Vorteil hierbei ist, dass keine Änderungen der Auswertesoftware (Bernese GNSS Software) notwendig sind. Nachteilig ist, dass viele Versionen der PZV-Datei vorgehalten werden müssen. Ebenso muss beim Einsatz gleicher Antennenmodelle auf verschiedenen Stationen und der Nutzung von IGS-Typmittelwerten dieses Antennenmodell mehrfach mit den Korrekturen für die einzelnen Stationen in der Datei abgelegt sein. Gleichzeitig muss dabei sichergestellt werden, dass die Korrekturen der richtigen Station zugeordnet werden.

Für die in dieser Arbeit genutzten GNSS-Daten (siehe Kap. 5.1) liegen in vielen Fällen Individualkalibrierungen der eingesetzten Antennen auf Absolutniveau vor. Abweichend von der sonst üblichen Bezeichnung nach IGS-Standard, beispielsweise TRM59800.00 SCIS für eine Trimble-Antenne des Typs 59800.00

mit SCIS-Radom, wurde für diese individuell kalibrierten Antennen eine Bezeichnung verwendet, die neben Antennen- und Radomtyp auch Teile der Seriennummer dieser Antenne enthält, also beispielsweise TRM59800-SCIS-44381. Dieser modifizierte Antennenname wurde sowohl in der STA-Datei, welche bei der Prozessierung von GNSS-Daten mit der BS alle stationsrelevanten Informationen enthält, als auch in der Datei der Antennenparameter angewendet. Somit konnte in der Auswertung sichergestellt werden, dass das korrekte Antennenmodell verwendet wird. Im Normalfall erfolgt die Zuordnung individueller Kalibrierwerte in der BS unter Verwendung der IGS-Bezeichnungen lediglich durch die Seriennummer der Antenne. Kommt in einem zu prozessierenden Netz von GNSS-Stationen ein Antennentyp mehrfach vor, wobei nur für eine Antenne dieses Typs eine Individualkalibrierung vorliegt, steht in der Datei der Antennenparameter für den Typmittelwert ein Bereich von Seriennummern, für die individuell kalibrierte Antenne die entsprechende Seriennummer. Durch die vom Autor gewählte alternative Antennenbezeichnung wird in jedem Fall sichergestellt, dass – ein korrekter Eintrag in der STA-Datei vorausgesetzt – das richtige Antennenmodell in der Prozessierung angewendet wird. Dieser Vorteil gilt auch bei Nutzung der gestapelten Information. Sind in einem Netz gleichzeitig mehrere GNSS-Antennen des gleichen Typs im Einsatz, für die Typmittelwerte genutzt werden sollen, muss die Zuordnung individueller Stackingmaps mit großer Sorgfalt erfolgen. Gegebenenfalls kann eine individuelle Antennenbezeichnung, wie vom Autor vorgeschlagen, sinnvoll sein.

Da das Empfangsverhalten der GNSS-Antennen abhängig von der Frequenz und dem verwendeten GNSS ist, sind in den Kalibrierdaten die Werte der PZO und PZV getrennt aufgeführt. Für neuere Antennen liegen in der Regel sowohl Kalibrierwerte für die GPS-Frequenzen L_1 und L_2 , als auch für die GLONASS-Frequenzen L_1 und L_2 vor. Während bei GPS die Unterscheidung der einzelnen Satelliten durch individuelle aufmodulierte Codes (CDMA: Code Division Multiple Access) erfolgt, werden die GLONASS-Satelliten aktuell noch durch individuelle Frequenzen jedes Satelliten (FDMA: Frequency Division Multiple Access) unterschieden, wodurch für jede Frequenz (\Rightarrow jeden Satelliten) eine separate Kalibrierinformation vorliegen müsste. Der Einfachheit halber werden jedoch meist nur die Kalibrierwerte für eine Frequenz (Kanal 0) abgelegt. Zur Unterscheidung der GNSS und Frequenzen werden GPS L_1 und L_2 in den Kalibrierdateien mit G01 und G02, GLONASS L_1 und L_2 mit R01 und R02 bezeichnet. Da im Rahmen dieser Arbeit lediglich GPS-Daten ausgewertet wurden, werden nur Stackingmaps für GPS erzeugt.

Die PPP-Prozessierung in der Bernese GNSS Software erfolgt unter Nutzung der ionosphärenfreien Linearkombination L_3 , durch die ionosphärisch bedingte Fehlereinflüsse weitestgehend eliminiert werden. Die eingehenden Beobachtungsdaten (GPS L_1 und L_2) werden nach Gl. 4-1 zur ionosphärenfreien Linearkombination in metrischer Schreibweise umgerechnet. Mit $f_1 = 1575.42$ MHz und $f_2 = 1227.60$ MHz aus der Datei CONST. (enthält allgemeine Konstanten zur Nutzung in der BS) im Verzeichnis BERN52/GPS/GEN ergeben sich die Faktoren von L_1 bzw. L_2 zu 2.546 bzw. -1.546. Von Moore u. a. [2014] wird diese Umrechnung in der gleichen Form genutzt.

$$L_3 = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} L_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} L_2 \quad (4-1)$$

mit

L_3 : Ionosphärenfreie Linearkombination

f_1, f_2 : Frequenz von L_1 bzw. L_2

L_1, L_2 : Beobachtungen auf L_1 bzw. L_2

Die in der GNSS-Auswertung berechneten Residuen liegen daher auch in der Linearkombination L_3 vor. Zur Einführung der daraus generierten Stackingmaps in die Datei der Antenneninformation ist eine

Umrechnung von L_3 nach L_1 und L_2 notwendig. Diese Umrechnung ist ohne Festlegung einer Annahme nicht möglich (Gleichung mit zwei Unbekannten L_1 und L_2). Da der zweite GNSS-Auswertedurchlauf bis auf die Einführung der gestapelten Information mit den identischen Prozessierungsparametern erfolgt, wird erneut die ionosphärenfreie Linearkombination genutzt. Die PZV-Werte für L_1 und L_2 werden dabei nicht separat, sondern ebenfalls in Form der Linearkombination L_3 genutzt. Die Umrechnung der PZV von L_1 und L_2 nach L_3 erfolgt nach Formel 4-1. Daher ist die Festlegung $L_2 \stackrel{!}{=} 0$ legitim und die Rückrechnung kann mit Formel 4-2 erfolgen.

$$L_1 = \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2} L_3 \tag{4-2}$$

Zum Test dieses Vorgehens wurden die PZV-Werte (individuelle, absolute Roboterkalibrierung) der auf der Station KARL verwendeten GNSS-Empfangsantenne (LEIAR25.R4 mit LEIT Radom) von L_1 und L_2 nach L_3 und mit $L_2 \stackrel{!}{=} 0$ wieder nach L_1 umgerechnet. In der neuen PZV-Datei wurden die L_2 -Werte ebenso zu Null gesetzt wie die GLONASS-Werte, da nur GPS-Daten ausgewertet wurden. Mit der originären und der modifizierten PZV-Datei wurde testweise ein Tag (DoY 199 2013) prozessiert, und die Resultate werden nachfolgend analysiert.

Ein Vergleich der Koordinaten zeigt, dass zwischen den Prozessierungsvarianten keine signifikanten Unterschiede bestehen. Lediglich in der Z-Komponente tritt ein Unterschied im Sub-mm-Bereich auf. Eine Darstellung der Unterschiede der in der Prozessierung berechneten Residuen ist in Abb. 4-6 gegeben. Abb. 4-6(a) zeigt die Differenz der mit originärer und modifizierter PZV-Information berechneten Residuen in Form eines Skyplots. Die Differenzen der Residuen für den untersuchten Tag liegen bei maximal 3.2 mm. Die Anzahl der Residuen in den beiden Auswertevarianten unterscheidet sich nur geringfügig. Die Variante mit den auf L_3 umgerechneten PZV-Werten liefert sogar geringfügig mehr Werte als die originäre Variante. Für den Großteil der in beiden Varianten vorkommenden Residuen beträgt die Differenz 0 mm, nur wenige weisen eine von Null verschiedene Differenz auf (siehe Abb. 4-6(b)). Demnach hat

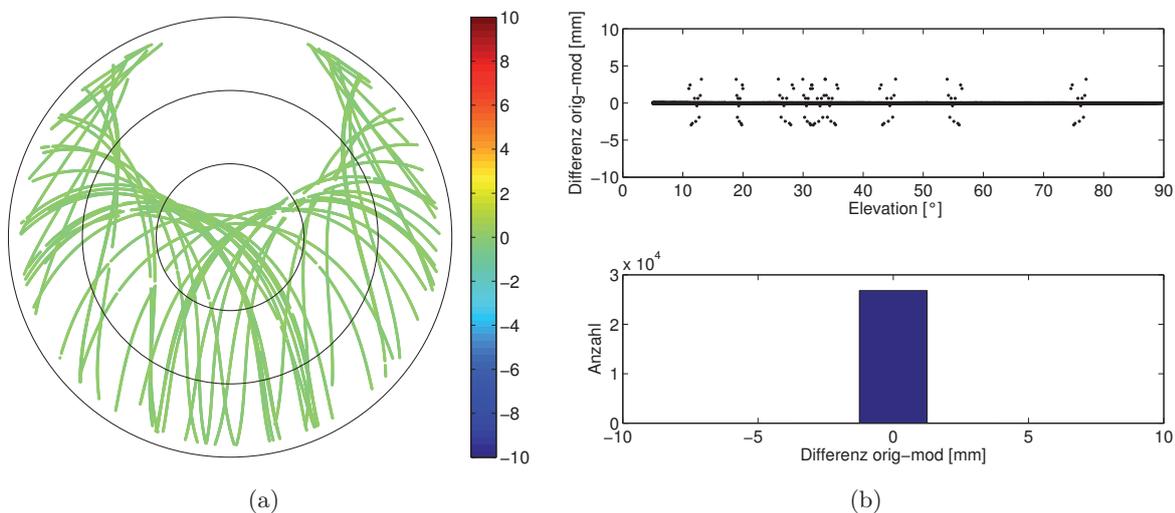


Abb. 4-6: Unterschiede der Rohresiduen aus den Prozessierungen mit originären und auf L_3 umgerechneten PZV für Station KARL, DoY 199 2013; Differenzen: originäre minus modifizierte PZV
 (a) Skyplot der Differenzen [mm]
 (b) oben: Differenz [mm] in Abhängigkeit von der Elevation [°], unten: Histogramm der Differenzen

die Einführung von auf L_3 umgerechneten PZV-Informationen in die Prozessierung keine wesentlichen Auswirkungen auf die Residuen. Um dies zu verifizieren werden die gleichen Untersuchungen mit den in Tab. 4-1 aufgeführten Stationen für den gleichen Tag (DoY 199 2013) durchgeführt. Dabei wurden sowohl Stationen ausgewählt, für die individuelle Kalibrierwerte vorliegen, als auch Stationen, für die lediglich IGS-Typmittelwerte zur Verfügung stehen. Für die Antenne, die auf der Station WLBH eingesetzt wird, liegen lediglich elevationsabhängige Kalibrierwerte vor, für die übrigen sind die PZV azimut- und elevationsabhängig. Bei den zusätzlich untersuchten Stationen unterscheiden sich die Residuen nicht,

Tab. 4-1: Ausgewählte Stationen für Untersuchungen zur Auswirkung der Umrechnung der PZV-Information von L_1 und L_2 auf L_3 und Rückrechnung auf L_1 und L_2 mit $L_2 \stackrel{!}{=} 0$

Station	Kalibrierinformation	Antennentyp
0384	abs. ind.	TRM59800.00 SCIS
BFO1	abs. ind.	TRM29659.00 TCWD
BIWI	IGS	LEIAX1202 GG NONE
STJ9	IGS	ASH701945B_M SNOW
WLBH	IGS	ASH701933A_M NONE

das heißt alle Differenzen sind Null. Die Koordinaten sind in beiden Prozessierungsvarianten ebenfalls identisch. Daher wird bei den folgenden Untersuchungen davon ausgegangen, dass durch die Umrechnung der PZV-Werte von L_1 und L_2 nach L_3 und Rückrechnung nach L_1 und L_2 mit Setzen der L_2 -Werte auf Null keine signifikanten Unterschiede in den Ergebnissen verbleiben. Hierdurch können die gestapelten L_3 -Residuen mit $L_2 \stackrel{!}{=} 0$ auf L_1 umgerechnet und direkt in eine erneute Auswertung eingeführt werden. Woraus die Residuenunterschiede bei der Station KARL herrühren, ist nicht nachvollziehbar (siehe Abb. 4-6(b)).

Wird in den Einstellparametern des Programms GPSEST, welches bei der Nutzung der BS zur Schätzung der ausgeglichenen Parameter genutzt wird, die Ausgabe der geschätzten Residuen aktiviert, stehen dem Nutzer die Residuenarten REAL, NORMALIZED und NORM_APRIORI zur Auswahl. Die ausführliche Definition der einzelnen Residuentypen ist [Dach u. a., 2007, S. 144ff] entnommen. Im Terminus der BS werden die Residuen, welche sich aus der Differenz aus ausgeglichenen minus originären Beobachtungen berechnen, als Real-Residuen bezeichnet. Die Residuen des Typs NORMALIZED sind Real-Residuen, welche durch die Quadratwurzel des entsprechenden Diagonalelements der Kovarianzmatrix der Residuen geteilt wurden (siehe Formel 4-3)

$$v_{norm}(i) = \frac{v(i)}{\sqrt{D_{ii}(\underline{v})}}. \quad (4-3)$$

Die Kovarianzmatrix der Residuen wird aus der Differenz der inversen Gewichtsmatrix der originären Beobachtungen und der Kovarianzmatrix der ausgeglichenen Beobachtungen berechnet (siehe Gl. 4-4)

$$D(\underline{v}) = \mathbf{P}^{-1} - D(\underline{y}) \quad (4-4)$$

mit

$$D(\underline{y}) = \mathbf{A}(\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T. \quad (4-5)$$

Während die Real-Residuen in der Linearkombination ausgegeben werden, die in der GNSS-Prozessierung verwendet wird, erfolgt bei der Verwendung von normierten Residuen stets eine Umrechnung in L_1 -Einweg-Trägerphasenresiduen. Soll in der GNSS-Auswertung eine Ausreißerdetektion mittels des Pro-

gramms RESRMS durchgeführt werden, müssen bei der Verwendung von Daten niedriger Elevationen, der Anwendung eines elevationsabhängigen Gewichtsmodells oder der Verwendung stationsspezifischer Gewichte normierte Residuen gespeichert werden ([Dach u. a., 2007, S. 145]). Bei Auswahl der Option NORM_APRIORI wird die Umrechnung der Real-Residuen in normierte Residuen unter Verwendung der apriori-Varianz der Beobachtungen vorgenommen (siehe Gl. 4-6)

$$D(\mathbf{v}) \simeq P^{-1}. \quad (4-6)$$

Die Verwendung von NORM_APRIORI kann bei einer Präeliminierung und späteren Resubstitution im Rahmen der Parameterschätzung sinnvoll sein. Details hierzu sind in [Dach u. a., 2007, S. 145f] aufgeführt, für diese Arbeit jedoch nicht von Belang.

Zur Berechnung von Stackingmaps und deren Einführung als Korrektur in einen erneuten Prozessierungsdurchlauf wird die volle, nicht normierte Residueninformation benötigt. Zur Residuen-Ausreißerdetektion wird in der PPP-Prozessierung mit der BS das Programm RESRMS verwendet. Wie bereits oben erwähnt, empfehlen [Dach u. a., 2007, S. 133 und 145] die Verwendung normierter Residuen in RESRMS. [Fuhrmann u. a., 2010, S. 50ff] führten testweise Real-Residuen in den mit RESRMS durchgeführten Ausreißertest ein, wodurch deutlich mehr Residuen als Ausreißer detektiert und aus der Auswertung entfernt wurden. Um einerseits eine optimale Ausreißerdetektion durchführen und andererseits die Real-Residuen für die Erzeugung der Stackingmaps nutzen zu können, wurde ein zweistufiges Vorgehen umgesetzt. Im ersten Schritt erfolgt ein iterativer Ausreißertest unter Nutzung der normierten Residuen, im zweiten Schritt wird das bereinigte Datenmaterial einem erneuten GPSEST-Durchlauf mit den weitgehend identischen Einstellungen zugeführt. Der einzige Unterschied besteht im ausgegebenen Residuentyp: es werden Real-Residuen exportiert, die zur späteren Weiterverarbeitung anschließend mittels RESFMT vom binären ins ASCII-Format umgewandelt werden. Für jede prozessierte Station und jeden bearbeiteten DoY wird eine Residuendatei ausgegeben. Details zum Prozessierungsablauf in der BS sind in Kap. A.2 ab S. 140 aufgeführt.

Zum ersten Test der Vorgehensweise werden die gestapelten Residuen an die originären PZV angebracht und die modifizierte Antenneninformation einem neuen Prozessierungsdurchlauf zugeführt. Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Kap. 6.1 ab S. 61 aufgeführt.

4.2 Stacking-Routinen

In diesem Unterkapitel wird die zum Stapeln der Residuen entwickelte und programmtechnisch umgesetzte Vorgehensweise dargestellt. Die Verarbeitung der von der BS ausgegebenen Real-Residuen erfolgt außerhalb der BS in Programmen, die in der Programmiersprache Matlab realisiert sind. Derzeit werden diese Programme separat in der Matlab-Umgebung gestartet. Falls in der Zukunft der Bedarf für eine Integration des Residuenstapelns direkt in die BS besteht, können diese Programme zu eigenständigen Programmen kompiliert und in den Prozessierungsablauf integriert werden. In Abb. 4-7 ist eine schematische Darstellung des Stapelungs-Ablaufes gegeben. Im Hauptprogramm ist das Zeitfenster hinterlegt, in welchem ein Stapeln der Residuen durchgeführt werden soll (beispielsweise DoY 001 bis 365 2013), ebenso wird dort definiert, wie viele Tage der Stackingzeitraum (beispielsweise zehn Tage) umfassen soll. Zusätzlich können dort die zu bearbeitenden Stationen festgelegt werden. Zunächst wird geprüft, ob das Datenmaterial vollständig vorhanden ist, d.h. ob für alle gewählten Stationen im festgelegten Zeitfenster sämtliche Residuendateien existieren. Ist dies nicht der Fall, werden die fehlenden Tage ausgegeben und der Nutzer kann entscheiden, ob trotz der fehlenden Daten der Stackingdurchlauf gestartet werden soll. Im nächsten

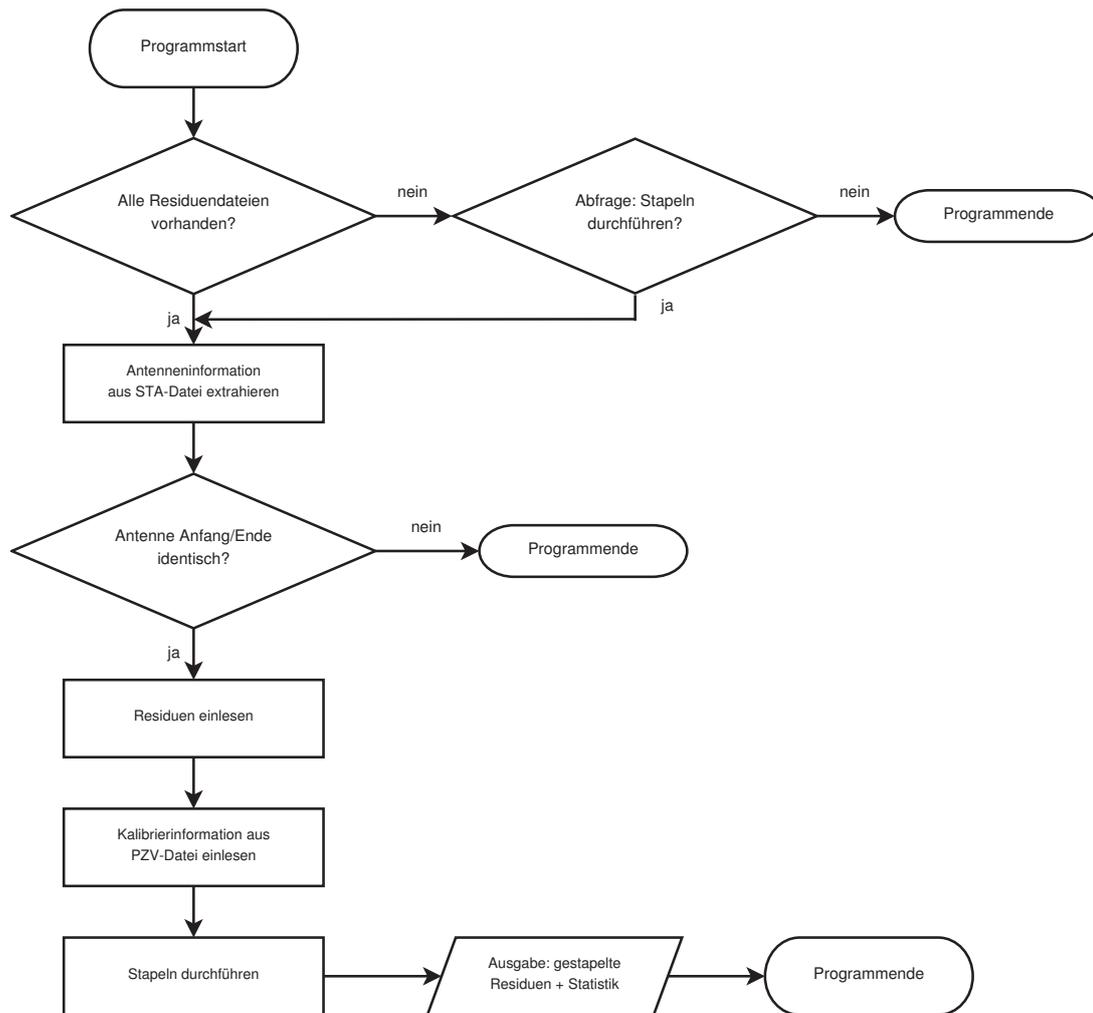


Abb. 4-7: Übersicht des Stacking-Ablaufes

Schritt wird aus der STA-Datei (enthält Information über auf den Stationen eingesetzten Hardware) die Antenneninformation zu Beginn und Ende des Stackingzeitraumes für die aktuell bearbeitete Station ausgelesen. Im Falle eines Antennenwechsels wird die Stapelung der Residuen abgebrochen, da keine konsistente Stackinginformation über den gewählten Zeitraum generiert werden kann. Bei identischer Antenne wird die Residueninformation des gewählten Zeitraums in eine Matrix eingelesen und aus der Datei der Kalibrierinformationen für die gewählte Antenne die Headerinformation extrahiert, welche bei der Ausgabe der gestapelten Residueninformation benötigt wird.

Die von der BS ausgegebene Residueninformation umfasst neben dem Residuenwert auch Elevation und Azimut sowie Satellitennummer und Epoche (\Rightarrow Beobachtungszeit). Für das räumliche Stapeln sind nur die ersten drei Informationen erforderlich. Es erfolgt eine Zuordnung der einzelnen Residuen zu definierten Zellen, welche festgelegte Bereiche der Antennenhemisphäre umfassen. Im einfachsten Fall sind dies durch ein vorgegebenes Inkrement in Azimut- und Elevationsrichtung definierte Zellen mit einer Größe von beispielsweise $5^\circ \times 2^\circ$. Dieser einfache Fall wurde in den in dieser Arbeit entwickelten Routinen realisiert. Darüberhinaus sind alternative Festlegungen, wie sie beispielsweise von Fuhrmann u. a. [2014a] vorgeschlagen werden, möglich. Eine Zusammenstellung verschiedener Alternativen ist in Kap. 8.1 gegeben.

Die Einführung der gestapelten Residueninformation soll in der BS zunächst additiv auf die PZV-Werte, später als separate Datei in jedoch gleicher Formatierung erfolgen. Die PZV-Information ist in Matrizenform in einer ASCII-Datei hinterlegt, wobei die einzelnen Spalten die Stützstellen in Zenitdistanz-, die einzelnen Zeilen in Azimutrichtung enthalten, dabei beträgt die Schrittweite in zenitaler und azimutaler Richtung gewöhnlich 5°. In der Datei der Kalibrierinformation sind Zeilen für die Azimute 0° und 360° enthalten, deren PZV-Werte identisch sind, also doppelt vorliegen. Für die Zuweisung der Residuen zu einzelnen Zellen werden die Stützpunkte des PZV-Rasters als Zellmittelpunkte und das halbe Inkrement in zenitaler ($\Delta z/2$) und azimutaler ($\Delta A/2$) Richtung für die Zellbegrenzung gewählt. Formal kann dies wie folgt ausgedrückt werden:

$$\text{Bereich Zenitdistanz} = [z \mid z_{\text{Mittelpunkt}} - \Delta z/2, z_{\text{Mittelpunkt}} + \Delta z/2 [$$

$$\text{Bereich Azimut} = [A \mid A_{\text{Mittelpunkt}} - \Delta A/2, A_{\text{Mittelpunkt}} + \Delta A/2 [$$

Um eine einfache Zellzuordnung der Residuen auch bei Azimuten von 0° und 360° durchzuführen, wurde eine Erweiterung der Residuenmatrix nach dem in Abb. 4-8 dargestellten Schema durchgeführt. Die senkrechten/waagrechten Linien stehen hierbei für die Azimute/Zenitdistanzen der Rasterpunkte. Residuen, die Azimute zwischen $360^\circ - \Delta A$ und 360° aufweisen, werden kopiert und mit um 360° reduzierten Azimuten (grün markierter Bereich in Abb. 4-8) zur Matrix hinzugefügt. Zusätzlich werden Residuen, deren Azimute Werte zwischen 0° und $0^\circ + \Delta A$ annehmen, mit um 360° erweiterten Azimuten (orange markierter Bereich in Abb. 4-8) ebenfalls kopiert und zur Matrix hinzugefügt. Beim eigentlichen Stapelvorgang werden alle

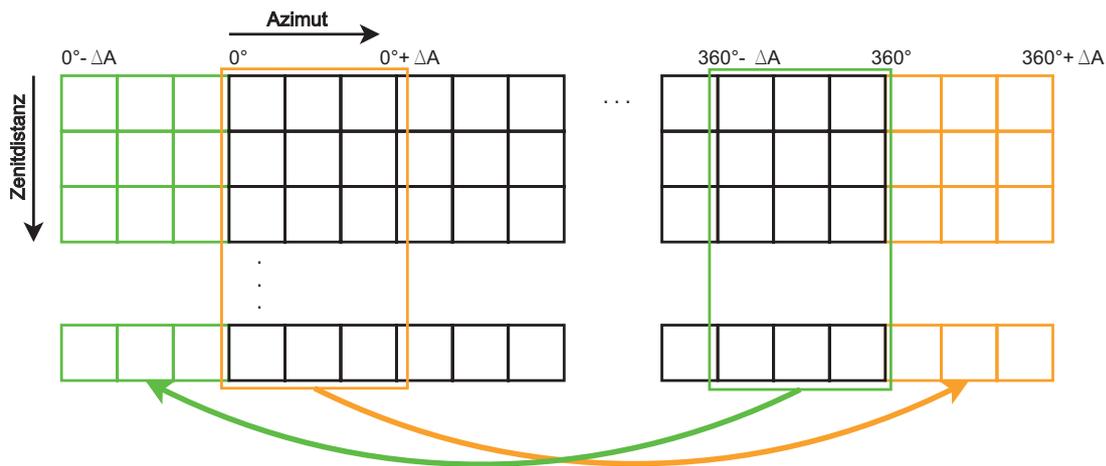


Abb. 4-8: Erweiterungsschema der Residuenmatrix

eingeliesenen Residuen des Stapelungszeitraumes einer Station über deren Azimut- und Elevationswerte einzelnen Zellen zugewiesen. Enthält eine Zelle ein oder mehrere Residuen, wird der Mittelwert gebildet und mit umgekehrtem Vorzeichen in einer neuen Matrix abgespeichert, leere Zellen werden mit NaN (Not a Number) belegt. Die Vorzeichenanpassung ist für die spätere korrekte Anbringung der gestapelten Werte in der BS notwendig. Der abgelegte Mittelwert aller Residuen einer Zelle wird hierbei als gestapelter bzw. gestackter Wert, die Gesamtheit aller gestapelten Werte inklusive deren räumlicher Zuordnung als Stackingmap bezeichnet. Zur ersten Verifikation der Wirksamkeit des Stacking ist die Bildung des Mittelwertes ausreichend. Darüber hinaus sind auch andere Vorgehensweisen denkbar, wie sie in Kap. 8.2 ab S. 122 vorgeschlagen werden. Zusätzlich zum gestapelten Residuenwert werden die Standardabweichung der Residuen und die Differenz zwischen größtem und kleinstem Residuenwert in einer ASCII-Datei zur späteren Analyse gespeichert. Im letzten Stackingsschritt werden die gestapelten Werte von der Dimension m in die Dimension mm umgerechnet und entweder direkt an die PZV-Werte der entsprechenden Antenne angebracht (siehe Kap. 6.1) oder im Format der Datei der Antenneninformationen der BS separat abgespeichert (siehe Kap. 6.2). Zellen, die in der Residuenmatrix mit NaN belegt wurden, werden als 0.00

ausgegeben. Wichtig bei der Ausgabe der gestapelten Information in eine neue Datei im Bernese-internen PZV-Format ist die Belegung der PZO-Werte. Diese müssen mit 0.00 belegt werden, jedoch darf der dort ebenfalls festzulegende Faktor nicht 0.00 sein, da sonst die Korrekturen nicht angebracht werden. In den vom Autor durchgeführten Prozessierungen wurde dieser Faktor auf 1 gesetzt. Die Antennenkorrekturdatei der BS enthält die Information aller im Netz verwendeten Antennen. Für die Untersuchungen mit Einführung einer separaten Datei der gestapelten Information wurden die Dateien der einzelnen Stationen für einen Stackingzeitraum mittels eines Batch-Skriptes zusammengeführt.

In der Literatur sind unterschiedliche Angaben zum zeitlichen Umfang des Stackingzeitraums zu finden. Diese reichen von wenigen Tagen (beispielsweise zehn Tage bei Iwabuchi u. a. [2004]) bis hin zu einem kompletten Jahr (beispielsweise in Moore u. a. [2014]). Per se kann nicht angenommen werden, dass die Stackingmap einer Station über die Zeit ein unveränderliches Verhalten aufweist. Veränderungen im Stationsumfeld, beispielsweise durch die Vegetation im Jahresverlauf oder veränderte Reflexionsbedingungen durch anhaltende Schlechtwetterperioden oder Schnee, können zu modifizierten Empfangsbedingungen führen. Daher wurde vom Autor ein sogenanntes gleitendes Stacking durchgeführt, bei dem fortlaufend Stackingmaps über einen festgelegten Zeitraum erzeugt, analysiert und in die Prozessierung eingeführt wurden. Details hierzu sind in Kap. 6.2 ab S. 73 zu finden.

Nach den ersten erfolgreichen Untersuchungen zur Einführung gestapelter Information über die Addition zu den PZV der GNSS-Empfangsantenne (siehe Kap. 6.1) wird die Integration über separate Dateien in die BS angestrebt. Hierzu ist die Erweiterung der für die Prozessierung der GPS-Daten genutzten Bernese GNSS Software (Version 5.2, Dach u. a. [2007]) notwendig. Details zu den erforderlichen Modifikationen in der Software sind in Kap. A.1 zusammengestellt. Die bei der Prozessierung verwendeten Parameter und der Ablauf der PPP-Prozessierung mit der BS52 sind in Kap. A.2 erläutert.

5 Datengrundlage

In diesem Kapitel werden die in die Prozessierung eingehenden Daten ausführlich beschrieben. Die Zusammenstellung beginnt mit einem kurzen Abriss über geodätische Arbeiten, die in der Region des Oberrheingrabens stattgefunden haben. Basierend auf diesen Arbeiten wurde das nachfolgend beschriebene GNSS Upper Rhine Graben Network (GURN) ins Leben gerufen, dessen Daten in dieser Arbeit verwendet wurden. Neben den eigentlichen GNSS-Beobachtungen fließen weitere Daten in die Prozessierung ein, deren Erläuterung dieses Kapitel abschließt.

5.1 GURN

Die in dieser Arbeit verwendeten GNSS-Daten wurden in der Region des Oberrheingrabens und angrenzender Gebiete aufgezeichnet. Der Oberrheingraben ist Teil des Europäischen Känozoischen Grabensystems, welches sich vom Mittelmeer bis zur Nordsee erstreckt. Details zu Geologie dieser Region sind beispielsweise in Ziegler [1992] und Schumacher [2002] zusammengestellt. Der Oberrheingraben gilt als eine der tektonisch aktivsten Zonen in Mitteleuropa, die Wiederholungsrate von Erdbeben mit einer Magnitude von 5 beträgt nach Behrmann u. a. [2003] etwa 30 Jahre. Eines der verheerendsten Erdbeben in dieser Region hat sich im Jahr 1356 ereignet, wodurch die Stadt Basel (Schweiz) zu großen Teilen zerstört wurde (Illies u. Greiner [1978]). Auf Grund der aktiven Tektonik besteht ein großes Interesse verschiedener Wissenschaftsdisziplinen diese Region detaillierter zu untersuchen. Neben der Geologie und Geophysik spielt insbesondere die Geodäsie eine wichtige Rolle bei der Bestimmung aktueller Bewegungsraten zur Verfeinerung der bestehenden geodynamischen Modelle. Eine über 100 Jahre zurückreichende Datenbasis ist durch Nivellements verschiedener Institutionen gegeben. Demoulin u. a. [1998] haben beispielsweise aus 40 Jahren Nivellementdaten im Südschwarzwald Hebungsraten von 0.2 mm/Jahr bis 1.1 mm/Jahr abgeleitet. Weitere bedeutende Auswertungen von Nivellements in der Region des Oberrheingrabens wurden auch von Zippelt u. Mälzer [1981] durchgeführt. Fuhrmann u. a. [2014b] haben für eine länderübergreifende Auswertung von Nivellementdaten Beobachtungen aus Deutschland (Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz), Frankreich und der Schweiz ausgewertet, welche bis ins Jahr 1867 zurückgehen. Neben verschiedenen lokalen Effekten konnten sie im Zentrum des Oberrheingrabens Senkungsraten relativ zu den Grabenschultern in der Größenordnung von 0.5 mm/Jahr bis 0.8 mm/Jahr detektieren.

Durch das Verfahren des Nivellements können vertikale Änderungsraten zwar mit hoher Präzision bestimmt werden, Wiederholungsmessungen können jedoch aufgrund des hohen Aufwands lediglich im Abstand vieler Jahre durchgeführt werden und entfallen in der Zukunft aufgrund von Kostengründen oder der Entwicklung alternativer Verfahren (GNSS, InSAR). Demgegenüber bieten globale Satellitennavigationsverfahren, wie beispielsweise GPS, die Möglichkeit 3D-Positionen mit hoher zeitlicher Auflösung zu bestimmen. GPS wird daher bereits seit vielen Jahren zur Bestimmung tektonischer Bewegungen im Oberrheingraben verwendet. Von Nocquet u. Calais [2003] wurde aus Daten permanenter GPS-Stationen der Jahre 1996 bis 2001 ein Geschwindigkeitsfeld für Westeuropa abgeleitet. Hierbei wurden die Daten von mehr als 60 über Europa verteilter CORS ausgewertet und daraus ein Geschwindigkeitsfeld abgeleitet. In der Region des Oberrheingrabens wurden lediglich die Stationen KARL (Karlsruhe) und STJ9 (Strasbourg, Frankreich) verwendet. Diese beiden Stationen weisen relativ zur Bewegung von Zentraleuropa sehr kleine Geschwindigkeiten auf. Eine weitere Studie mit einem verdichteten Netz permanenter GPS-Stationen im Bereich der Alpen und des südlichen Rheingrabens wurde von Tesauro u. a. [2005] durchgeführt, wobei die verwendeten Zeitreihen der Permanentstationen in vielen Fällen weniger als zwei Jahre und bei wenigen Stationen maximal knapp sieben Jahre umfassen. Ein verdichtetes Netz, bestehend aus wenigen Permanentstationen und mehreren temporär besetzten Kampagnenstationen, wurde von Rózsa u. a. [2005a] und Rózsa u. a.

[2005b] im Rahmen des Projektes EUCOR-URGENT gemessen und ausgewertet. EUCOR (Europäische Konföderation der Oberrheinischen Universitäten) wurde im Jahr 1989 gegründet und bietet mit der Oberrhein-Universität einen trinationalen Campus aus fünf französischen, deutschen und schweizerischen Universitäten, die in den Bereichen Lehre, Forschung, Verwaltung, Kultur und Sport zusammenarbeiten (<http://www.eucor-uni.org>, Stand: 11.11.2014). Im Projekt URGENT (Upper Rhine Graben Evolution

Tab. 5-1: Zusammenstellung der fünf EUCOR-Universitäten, Stand der www-Links: 11.11.2014

Universität	Stadt	Land	Link
Université de Haute-Alsace	Mulhouse	Frankreich	http://www.uha.fr
Université de Strasbourg	Strasbourg	Frankreich	http://www.unistra.fr
Universität Freiburg	Freiburg	Deutschland	http://www.uni-freiburg.de
Karlsruher Institut für Technologie	Karlsruhe	Deutschland	http://www.kit.edu
Universität Basel	Basel	Schweiz	http://www.unibas.ch

and Neotectonics), welches im Zeitraum 1999 bis 2008 durchgeführt wurde, arbeiteten 25 Universitäten und staatliche Einrichtungen aus Deutschland, Frankreich, der Schweiz und den Niederlanden zusammen. Hauptaktivität bildete die Forschung im Bereich der Erdbebengefährdung, der Plattentektonik, der Faltenentwicklung und der Wasserressourcenverwaltung (Quelle: <http://www.eucor-uni.org>, Stand: 11.11.2014). Weitere Informationen zu EUCOR-URGENT sind auf der Internetseite des Projekts unter <http://comp1.geol.unibas.ch> (Stand: 11.11.2014) zusammengestellt. Die Ergebnisse von Rózsa u. a. [2005a] und Rózsa u. a. [2005b] zeigen, dass die zu erwartenden Bewegungsraten im Oberrheingraben Größenordnungen von weniger als 1 mm/Jahr betragen und nur zuverlässig mit GPS bestimmt werden können, wenn Zeitreihen von mehr als sechs Jahren zur Verfügung stehen ([Rózsa u. a., 2005b, S. 437]). Diese Angabe gilt nur für die Lagekomponente, für die Höhenänderungen sind deutlich längere Zeitreihen notwendig.

Durch die hierbei verwendeten Kampagnen-Stationen, die lediglich während weniger Messkampagnen besetzt waren, kann zwar das geodätische Netz verdichtet werden, jedoch steigt das Fehlerpotenzial durch beispielsweise Zentrierfehler beim Aufbau und wechselnde Ausrüstungen. Ebenso können sich jahreszeitlich bedingte, quasi-zyklische Bewegungen der Stationen negativ auf die geschätzten Bewegungsraten auswirken. In vielen Geodynamik-Projekten, in denen früher Kampagnenmessungen mit GPS durchgeführt wurden, werden stattdessen vermehrt Permanentstationen installiert, so dass einerseits Aufbaufehler durch mehrfachen Auf- und Abbau nicht entstehen können und andererseits eine durchgehende Datenbasis über viele Jahre geschaffen wird, so dass mittels Zeitreihen auf Basis von Tageslösungen verbesserte Aussagen zum Bewegungsverhalten möglich sind. Basierend auf diesem Hintergrund wurde im September des Jahres 2008 zwischen dem Institut de Physique du Globe de Strasbourg (Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre, EOST, Université de Strasbourg, Frankreich, <http://www.eost.unistra.fr>, Stand: 11.11.2014) und dem Geodätischen Institut (GIK) der Universität Karlsruhe (heute: Karlsruher Institut für Technologie, KIT, <http://www.gik.kit.edu>, Stand: 11.11.2014) die Kooperation GURN ins Leben gerufen. Ziel dieser Kooperation ist die geodätisch-geowissenschaftliche Forschung im Rahmen des transnationalen Projekts TOPO-WECEP (Western and Central European Platform, <http://www.topo-wecep.eu>, Stand: 11.11.2014, Cloetingh u. a. [2007]). Die in dieser Arbeit genutzten GNSS-Stationen sind Teil des GURN. Dieses Netz umfasst derzeit ca. 80 von verschiedenen Anbietern betriebene permanente GNSS-Stationen im Bereich des Oberrheingrabens (siehe Abb. 5-1). Eine detaillierte Zusammenstellung der Stationen ist in Tab. B-1 auf S. 145f zu finden. Auf deutscher Seite werden vorrangig Stationen von SAPOS[®]Baden-Württemberg und SAPOS[®]Rheinland-Pfalz verwendet. Zusätzlich fließen die Daten verschiedener EPN- und GREF-Stationen ein. Im südlichen Bereich wird das Netz durch Stationen der schweizerischen Landesvermessung swisstopo ergänzt. Auf französischer Seite werden Stationen ver-

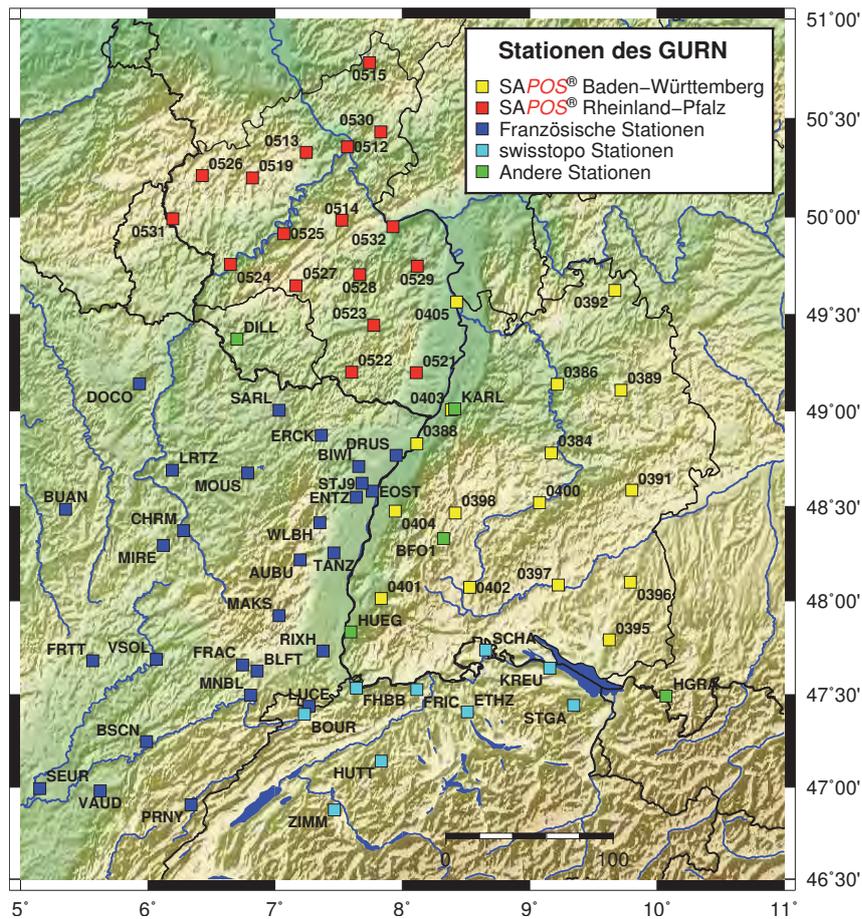


Abb. 5-1: Übersichtskarte GURN; bei Örtlichkeiten, an denen zwei oder mehr Stationen installiert sind, wurde nur eine Station dargestellt; Stand: 31.12.2013

schiedener privater und öffentlicher Anbieter genutzt. Zusätzlich werden die Daten einiger vom EOST betriebener Stationen verwendet. Die Stationen der öffentlichen und privaten Anbieter wurden primär vor dem Hintergrund errichtet, Echtzeitdaten für RTK-Positionierungen im cm-Bereich zu generieren. Daher sind sie vorrangig auf Gebäuden installiert, wodurch sowohl ein einfacher Zugang zu Stromversorgung und Kommunikationsverbindungen als auch gute Abschattungsfreiheit sowie Sicherheit gegenüber Beschädigungen gewährleistet ist. Eine Nutzung dieser Stationen für geodynamische Zwecke stand hierbei bisher im Hintergrund, nach [Faulhaber, 2007, S. 69] sollen die SAPOS®-Stationen in Zukunft vermehrt auch wissenschaftlichen Zwecken, insbesondere der Geodynamik und Atmosphärenforschung, dienen. Demgegenüber stehen Stationen, die beispielsweise vom EOST auf speziell für diesen Zweck errichteten Pfeilern aufgebaut wurden, um mit den dort gesammelten Daten geodynamische Untersuchungen durchzuführen. Die am Black-Forest-Observatory betriebene Station BFO1 wurde mit einem Betonfundament im anstehenden Fels gegründet, als Monumentierung wurde hierbei eine Dreibein-Konstruktion gewählt (siehe <http://www.bfo.geophys.uni-stuttgart.de/GPS/GPS.html>, Stand: 10.11.2014).

Die Historie der im GURN gesammelten Daten beginnt im Jahr 2002, in dem SAPOS®Baden-Württemberg mit der Archivierung der RINEX-Beobachtungen begann. Die Daten der SAPOS®-Stationen von Rheinland-Pfalz liegen seit dem Jahr 2004 vor, die französischen Stationen sind meist jüngeren Ursprungs. Durch Abschluss eines Vertrages mit swisstopo im Jahr 2009 stehen seit DoY 195 2009 auch Daten ausgewählter Stationen in der Schweiz zur Verfügung. Sämtliche Beobachtungsdaten liegen im RINEX-Format in gepackter Form vor und fließen jede Nacht automatisch auf die am EOST betriebenen Server. Die Datenrate

der archivierten RINEX-Dateien liegt bei 15 s bzw. 30 s. In unregelmäßigen Abständen werden die Daten aus Strasbourg auf den zur GNSS-Prozessierung genutzten Server am GIK kopiert und zusätzlich auf externen Datenträgern gesichert.

Im GURN liegen absolute, individuelle Kalibrierwerte vorrangig für die SAPOS®-Stationen in Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz sowie wenige weitere Stationen vor. Existieren individuelle Kalibrierwerte auf absolutem Niveau, so werden diese in der Prozessierung der GNSS-Daten genutzt. Für die übrigen Stationen werden vom IGS bereitgestellte Typmittelwerte auf absolutem Niveau eingeführt (siehe beispielsweise Schmid u. a. [2007]). Im vom IGS verfügbaren Datensatz sind neben Modellwerten für Empfangsantennen auch die PZO und nadirabhängigen PZV der einzelnen GNSS-Satelliten abgelegt. Weitere Ausführungen zur Modellierung der GNSS-Empfangsantennen sind in Kap. 2.4.3 ab S. 21 aufgeführt. Grundsätzlich muss bei der hochpräzisen Auswertung eines GNSS-Netzes immer auf eine konsistente Modellierung der Antennenmodelle geachtet werden, d.h. eine Mischung absoluter und relativer Kalibrierinformation darf nicht erfolgen. Liegen für einzelne Antennen absolute Individualkalibrierungen vor, so sind diese Typmittelwerten auf absolutem Niveau vorzuziehen, da die einzelnen Antennen sowohl in PZO, als auch in PZV deutlich vom Typmittel abweichen können. Untersuchungen zu dieser Problematik sind in Kap. 7 ab S. 107 aufgeführt.

5.2 Externe Daten

Zusätzlich zu den im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Daten der GNSS-Stationen sowie den gegebenenfalls vorhandenen Kalibrierwerten sind für die GPS-Prozessierung weitere Daten notwendig. Eine Zusammenstellung aller einfließenden Daten ist in Tab. 5-2 gegeben.

Tab. 5-2: In die Prozessierung mit der Bernese GNSS Software eingehende Daten

Datentyp	zeitl. Auflösung	Datenquelle
Stationsinformationsdatei	-	-
Näherungskordinaten	-	-
Meeresgezeiten	-	http://holt.oso.chalmers.se/loading ¹
Beobachtungsdaten (RINEX)	15 s ^{2,3} , 30 s ³	verschiedene Anbieter
Präzise Orbits	15 min	} ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE ¹
Erdrotationsparameter	1 d	
Präzise Satellitenuhren	30 s	
Globale Ionosphären Daten	2 h	
Differenzielle Code Biases	-	ftp://ftp.unibe.ch/aiub/BSWUSER50/ORB ¹

¹ Stand www-Links: 11.11.2014

² Trotz teilweise vorliegender höherer zeitlicher Auflösung wird die Auswertung mit einer einheitlichen Datenrate von 30 s durchgeführt

³ verschiedene Anbieter (siehe Kap. 5.1)

Die beiden zuerst aufgeführten Dateien sind zwar keine von extern in die Prozessierung einfließende Information, besitzen jedoch eine hohe Relevanz für die Auswertung und werden an dieser Stelle deshalb mit aufgeführt. Mit die wichtigste in die Prozessierung eingehende Information ist die Datei der Stations-

konfiguration (Endung .STA). In ihr sind alle bekannten Änderungen, die auf einer Station vorgenommen wurden, enthalten. Die hierzu notwendige Information wurde den Log-Dateien der einzelnen Stationen entnommen, welche die (im Idealfall lückenlose) Stationshistorie enthalten. In der STA-Datei sind jeweils die Zeiträume vermerkt, in denen auf einer Station eine bestimmte Antennen-Empfänger-Kombination eingesetzt wurde. Neben Empfängertyp und der zugehörigen Seriennummer ist hier auch der eingesetzte Typ der GNSS-Empfangsantenne und die korrespondierende Seriennummer aufgeführt, welche essentiell für die Verwendung des korrekten Antennenmodells sind. Als weitere Daten sind die Stationsexzentrizitäten, getrennt nach Lage und Höhe, sowie ergänzende Bemerkungen, wie beispielsweise die auf dem Empfänger installierte Firmware, enthalten. Falsche Einträge in dieser Datei können sich direkt auf die Ergebnisse der Prozessierung auswirken, wenn beispielsweise ein falsches Antennenmodell oder eine falsche Antennenhöhe verwendet wird. Leider werden die Log-Dateien von einigen der stationsbetreibenden Institutionen nicht permanent fortgeführt und in vielen Fällen abweichend vom standardisierten Format des IGS (<ftp://ftp.igs.org/pub/station/general/blank.log>, Stand: 13.11.2014) ausgefüllt, so dass eine automatisierte Generierung der STA-Datei nicht möglich ist. Zur Überprüfung der Log-Dateien stellt der IGS eine kostenlose, webbasierte Software unter http://igs.cb.jpl.nasa.gov/network/sitelog_tester.php (Stand: 13.11.2014) zur Verfügung, die hochgeladene Log-Dateien auf Abweichungen von der Formatvorgabe untersucht. Die in der Datei der Näherungskordinaten (Endung .CRD) für alle GURN-Stationen enthaltene Position wurde den Log-Dateien entnommen und fließt als a priori-Information in CODSP ein. Dort werden aus den Code-Daten neue Näherungskordinaten geschätzt, die in alle weiteren Prozessierungsschritte eingehen.

Die Wichtigkeit der Einführung von Daten der Meereszeiten wurde bereits in Kap. 2.4.3 ab S. 16 beschrieben. Der Vollständigkeit halber werden sie an dieser Stelle mit aufgeführt. Die GNSS-Beobachtungsdaten der einzelnen Stationen liegen im standardisierten RINEX-Format (siehe <http://igs.cb.jpl.nasa.gov/components/formats.html>, Stand: 13.11.2014) vor, die aktuellste Version dieses Formats ist 3.02. Zur Reduzierung des Datenvolumens werden diese Daten zusätzlich mittels der frei verfügbaren Software RNXCMP (<http://terras.gsi.go.jp/ja/crx2rn.html>, Stand: 13.11.2014) in das Hatanaka-komprimierte RINEX-Format gewandelt. Details zu diesem Format können bei Hatanaka [2008] nachgelesen werden. Zusätzlich werden die entstehenden Dateien in der Regel zu Dateien mit den Endungen .Z (komprimiertes UNIX-Format) oder .gz (GNU-zip-Format, <http://www.gnu.org/software/gzip>, Stand: 13.11.2014) gepackt. Je nach Stationsbetreiber werden Beobachtungen mit einer Datenrate von 15 s bzw. 30 s zur Verfügung gestellt. Bei den für diese Arbeit durchgeführten GPS-Prozessierungen wurde, durch Ausdünnen der Daten auf 30 s bei der Konvertierung ins Bernese-interne Format, eine einheitliche Datenrate für alle Stationen verwendet.

Die im Folgenden beschriebenen Daten wurden vom Center for Orbit Determination in Europe (CODE), welches am Astronomischen Institut der Universität Bern (AIUB, <http://www.aiub.unibe.ch>, Stand: 13.11.2014) angesiedelt ist, heruntergeladen. CODE ist eine seit 1992 bestehende Arbeitsgemeinschaft des AIUB, des schweizerischen Bundesamtes für Landestopografie swisstopo (<http://www.swisstopo.ch>, Stand: 13.11.2014), des deutschen Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (<http://www.bkg.bund.de>, Stand: 13.11.2014), sowie des Instituts für Astronomische und Physikalische Geodäsie der Technischen Universität München (<http://www.iapg.bgu.tum.de>, Stand: 13.11.2014) und trägt als eines der Analysezentren des IGS (siehe Tab. 2-3 auf S. 12) zur Berechnung der IGS-Produkte bei. Details zu den vom CODE bereitgestellten Produkten sind u.a. in Dach u. a. [2013] zusammengestellt. [Dach u. a., 2007, S. 231] empfehlen für eine bestmögliche PPP-Prozessierung mit der BS die Produkte des CODE zu verwenden, um Inkonsistenzen zu vermeiden.

Die für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten GPS-Prozessierungen genutzten präzisen Orbits (Endung .EPH) liegen mit einer zeitlichen Auflösung von 15 min im SP3c-Format vor. SP3c ist ein vom IGS propagiertes, standardisiertes Format für die Bereitstellung von Orbit-Daten für GPS und GLONASS (siehe <http://igscb.jpl.nasa.gov/components/formats.html>, Stand: 13.11.2014). Die Orbits einzelner Tage wurden jeweils aus der Mitte einer drei Tage umfassenden Schätzung entnommen und weisen daher eine hohe Konsistenz aufeinanderfolgender Tage auf. Die Orbits sind im geodätischen Datum IGB08 gegeben, welches in Kap. A.2 erläutert wurde. Als Eingangsdaten der Erdrotationsparameter wurden die finalen ERP-Ergebnisse eingeführt, die jeweils eine komplette GPS-Woche umfassen und vom CODE im IERS-Format (<ftp://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/data/format/erp.txt>, Stand: 13.11.2014) zur Verfügung gestellt werden. Die präzisen Satellitenuhren des CODE sind im RINEX-Uhrformat mit einer zeitlichen Auflösung von 30 s verfügbar (Endung .CLK). Dieses Format stellt eine Erweiterung des RINEX-Formates dar und ist in der aktuellsten Version (3.02) unter <http://igscb.jpl.nasa.gov/components/formats.html> (Stand: 13.11.2014) dokumentiert. Die Berechnung der PPP-Lösungen erfolgt unter Verwendung der ionosphärenfreien Linearkombination L_3 , wodurch der Einfluss der ionosphärischen Laufzeitverzögerung zu großen Teilen beseitigt werden kann, verbleibende Restfehler können durch die Einführung globaler Ionosphärenmodelle minimiert werden. In dieser Arbeit wurden hierfür die globalen Ionosphärenkarten des CODE verwendet, welche mit einer zeitlichen Auflösung von 2 h in einem Bernese-Format zum Herunterladen bereitgestellt werden. Sie enthalten die Koeffizienten des Ionosphärenmodells in Form einer Entwicklung nach Kugelflächenfunktionen bis Grad und Ordnung 15. Die Werte und der RMS der einzelnen Koeffizienten sind hierbei in der Einheit TECU angegeben. Die Einheit TECU steht für TEC-Unit, also der Einheit des vollständigen Elektronengehalts (engl.: Total Electron Content). Der TEC-Wert kann nach Formel 5-1 (Seeber [2003]) berechnet werden

$$TEC = \int_S^E n_e(s) ds. \quad (5-1)$$

Der Wert des Integrals gibt die Anzahl der Elektronen an, die in einer Säule mit der Grundfläche 1 m^2 entlang des Signalwegs s vom Satelliten S zum Empfänger E enthalten sind. Die Einheit 1 TECU entspricht $1 \cdot 10^{16} \text{ el/m}^2$. Wie bereits in Kap. 2.4.3 ab S. 16 beschrieben wurde, werden die Uhrprodukte des IGS und seiner Analysezentren seit 02.04.2000 basierend auf der damals getroffenen Bias-Konvention bereitgestellt. Sollen Daten von sogenannten C1/X2-Empfängern (siehe Dach u. a. [2007]) ausgewertet werden, ist die Verwendung der DCB-Information (Dateiendung .DCB) notwendig, um eine korrekte Verwendung der IGS-Uhrprodukte zu gewährleisten. Sämtliche Daten des CODE werden in UNIX-komprimierter Form (Endung .Z) bereitgestellt.

6 Einführung von Stackingkarten in die Prozessierung

In Kap. 4 wurden die Grundidee des in dieser Arbeit angewendeten Verfahrens des Stapelns von Residuenwerten zur Korrektur stationenspezifischer Fehler sowie die entwickelten Routinen ausführlich beschrieben. Ebenso erfolgte die Darstellung der in der Bernese GNSS Software notwendigen Modifikationen zur Einführung dieser Korrekturen über eine separate Datei sowie der in der GNSS-Auswertung verwendeten Prozessierungsparameter. Im darauffolgenden Kap. 5 wurde die Datengrundlage der GNSS-Beobachtungen und sonstiger für die GNSS-Prozessierung notwendiger Daten beschrieben. In diesem Kapitel werden nun die Ergebnisse zweier Untersuchungen zur Einführung gestapelter Information in die mit der Bernese GNSS Software durchgeführte Auswertung im PPP-Modus vorgestellt. Die erste Variante wurde mit der originären Version der BS durchgeführt, wobei die Einführung der gestapelten Residuen aus dem ersten Prozessierungsdurchlauf durch Berücksichtigung dieser Werte in der PZV-Information erfolgte. Zum Test der Wirksamkeit wurde vor der ersten Prozessierung für ausgewählte Stationen ein Sektor der PZV künstlich verfälscht, die Daten eines Zeitraums von 10 d prozessiert, die hieraus entstandenen Residuen gestapelt, an die PZV-Information des ersten Durchlaufs angebracht und einer erneuten Prozessierung zugeführt. In der zweiten Variante wurde mit der originären Kalibrierinformation ein längerer Zeitraum (120 d) prozessiert und anschließend ein gleitendes Stacking (siehe Kap. 6.2) durchgeführt. Diese Korrekturinformation wurde über separate Dateien im Bernese-internen Format der Antennenparameter einer erneuten Prozessierung in der modifizierten BS zugeführt. Die Ergebnisse beider Varianten werden nachfolgend ausführlich beschrieben, analysiert und jeweils abschließend beurteilt.

Auf den in GURN enthaltenen Stationen werden meist sowohl GPS- als auch GLONASS-Signale aufgezeichnet und archiviert. Liegen für Antennen Individualkalibrierungen auf absolutem Niveau vor, enthalten diese in der Regel PZO und PZV für GPS, in einigen Fällen auch für GLONASS. Da hierdurch keine konsistenten Kalibrierdatensätze für alle Stationen vorhanden sind und eine Kombination verschiedener GNSS nach wie vor eine Herausforderung in der Prozessierung darstellt und viele Unwägbarkeiten mit sich bringt, wurden im Rahmen dieser Arbeit lediglich GPS-Daten in der PPP-Prozessierung verwendet.

6.1 Testscenario über einen kurzen Zeitraum mit PZV-Modifikation

Zur Untersuchung der Praktikabilität und der Wirksamkeit der Einführung gestapelter Residuen in die Prozessierung von GNSS-Daten wurde ein erstes Testscenario entwickelt. Zunächst wurden drei Stationen ausgewählt, bei denen im für diese Untersuchung gewählten Zeitraum (DoY 199 bis 208 2013) keine Änderungen der GNSS-Hardware vorgenommen wurden: 0384, BFO1 und KARL. Die zur Korrektur der empfangenen Signale verwendeten gestapelten Residuen werden hierbei auf die PZV der Empfangsantennen addiert. Hierbei ist die in Kap. 4.1 beschriebene Umrechnung der PZV notwendig. Die in den Antennendateien enthaltenen PZV-Werte für G01 und G02 werden mit Formel 4-1 nach L_3 umgerechnet, die im Raster der PZV-Information gestackten Werte davon subtrahiert und die resultierenden Werte mit der Festsetzung von $L_2 \stackrel{!}{=} 0$ wieder nach L_1 zurückgerechnet. Da in der verwendeten PPP-Prozessierung die ionosphärenfreie Linearkombination verwendet wird, gehen die separat aufgezeichneten L_1 - und L_2 -Beobachtungen nur in Form dieser Linearkombination in die Prozessierung ein, ebenso wie die nach L_3 umgerechneten PZV-Werte. Wie in Kap. 4.1 auf S. 48 gezeigt wurde, ist dieses Vorgehen legitim. Zur Untersuchung der Wirksamkeit der Einführung gestapelter Residuen als Korrektur wurde die PZV-Information ausgewählter Stationen in einem identischen Bereich (Sektor) der Antennenhemisphäre durch Addition eines konstanten Wertes modifiziert. Die Änderung erfolgte auf L_3 -Niveau, so dass auch hier die oben beschriebene Umrechnung der auf G01 und G02 vorliegenden PZV-Information vorgenommen wurde. Nach [Georgiadou u. Kleusberg, 1988, S. 173] kann der durch Mehrwegeeffekte bedingte

Phasenfehler eine Größenordnung von bis zu 90° annehmen, was einem Entfernungsfehler von einem Viertel der Wellenlänge entspricht. Die Wellenlängen von $L_1/L_2/L_3$ betragen 19.03 cm/24.42 cm/10.70 cm.

Der Wert für L_3 ist nach Aussage von [Dach u. a., 2007, S. 40] die formale Wellenlänge für die ionosphärenfreie Linearkombination, ein Viertel hiervon beträgt demnach 2.675 cm. Dies liegt zwischen den auf L_3 -Niveau um 25 mm und 27 mm modifizierten PZV-Werten, so dass nach der Aussage von Georgiadou u. Kleusberg [1988] durch die Größenordnung der vorgenommenen Modifikationen der PZV-Werte Mehrwegefehler gut repräsentiert sind. Zur Modifikation der PZV wurden in einem vordefinierten Sektor der Antennenhemisphäre Werte unterschiedlicher Größe von 0 mm bis 30 mm auf die nach L_3 umgerechneten PZV-Werte addiert. Nach der Veränderung der PZV wurden die „neuen“ Kalibrierwerte einer Prozessierung zugeführt, die daraus gewonnenen Residuen gestapelt, als Korrektur an die Kalibrierwerte des ersten Auswertedurchlaufes angebracht und ein erneuter Durchlauf mit der korrigierten Antenneninformation durchgeführt. Erwartet wurde, dass durch das Anbringen der gestapelten Information die PZV-Werte im modifizierten Sektor wieder auf das ursprüngliche Niveau korrigiert werden. Da beim Vorgang der Stapelung nicht nur die Residuen des veränderten Bereichs, sondern der gesamten Antennenhemisphäre verwendet werden, muss als Referenz bei der Untersuchung des Effekts auf Parameter, wie beispielsweise Koordinaten, eine Prozessierungsvariante herangezogen werden, in der die ursprünglichen, unveränderten PZV-Werte nach dem ersten Auswertedurchlauf durch gestapelte Information korrigiert wurden.

6.1.1 PZV-Modifikation

Wie oben erwähnt, wurden die PZV der ausgewählten Stationen in einem auf allen Stationen identischen Sektor auf L_3 -Ebene um einen festen Betrag additiv verändert. Der Sektor umfasst den Azimutbereich von 210° bis 240° und den Zenitdistanzbereich von 30° bis 70°. Als Modifikation wurden in diesem Sektor künstlich generierte Fehler in der Größenordnung von 0 mm, 3 mm, 5 mm, 7 mm, 10 mm, 13 mm, 15 mm, 17 mm, 20 mm, 23 mm, 25 mm, 27 mm und 30 mm an die aus L_1 und L_2 auf L_3 ungerechneten PZV-Werte angebracht. Die modifizierten PZV-Werte wurden danach mit der Vorgabe $L_2 \stackrel{!}{=} 0$ auf L_1/L_2 -Niveau zurückgerechnet, in einer neuen PZV-Datei abgespeichert und in die Prozessierung eingeführt. Hierbei ergaben sich beispielhaft die in Tab. 6-1 aufgeführten Werte. Beispielhaft ist im Folgenden für die Station

Tab. 6-1: Auswirkungen der Modifikation von L_3 -PZV-Werten auf L_1 - und L_2 -PZV-Werte; die Werte sind beispielhaft in der Dimension mm

Modifikation um	0.0	3.0	5.0	7.0	10.0	13.0	15.0	17.0	20.0	23.0	25.0	27.0	30.0
L_3 -Wert [mm]	2.0	5.0	7.0	9.0	12.0	15.0	17.0	19.0	22.0	25.0	27.0	29.0	32.0
L_1 -Wert [mm]	0.8	2.0	2.7	3.5	4.7	5.9	6.7	7.5	8.6	9.8	10.6	11.4	12.6
L_2 -Wert [mm]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

0384 je ein Ausschnitt aus der originären (um 0 mm verändert), um 15 mm und um 30 mm auf L_3 -Niveau veränderten und mit $L_2 \stackrel{!}{=} 0$ nach L_1 zurückgerechneten PZV-Datei dargestellt, der den modifizierten Sektor der Antennenhemisphäre enthält. Werte, die verändert wurden, sind in grün dargestellt. Die beiden ersten und letzten Zeilen sowie die erste und letzte Spalte liegen außerhalb des modifizierten PZV-Sektors, weisen demnach für alle drei dargestellten Varianten identische Werte auf. Die einzelnen Spalten stehen für die Zenitdistanzen, die einzelnen Zeilen für die Azimutwerte der Zellmittelpunkte.

PZV L1

Veränderung: 0 mm auf L3-Niveau => originär

A/Z	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
200	-3.98	-5.00	-5.75	-6.14	-6.15	-5.78	-5.13	-4.25	-3.12	-1.65	0.37
205	-4.02	-5.05	-5.80	-6.19	-6.17	-5.80	-5.14	-4.27	-3.17	-1.73	0.23
210	-4.06	-5.10	-5.85	-6.22	-6.19	-5.79	-5.13	-4.29	-3.22	-1.83	0.08
215	-4.10	-5.14	-5.89	-6.23	-6.19	-5.77	-5.13	-4.29	-3.27	-1.93	-0.05
220	-4.13	-5.18	-5.91	-6.24	-6.16	-5.75	-5.11	-4.30	-3.31	-2.01	-0.15
225	-4.14	-5.20	-5.93	-6.23	-6.14	-5.72	-5.08	-4.31	-3.37	-2.07	-0.22
230	-4.15	-5.20	-5.92	-6.22	-6.13	-5.70	-5.07	-4.32	-3.40	-2.11	-0.25
235	-4.15	-5.19	-5.91	-6.20	-6.10	-5.68	-5.07	-4.34	-3.40	-2.11	-0.22
240	-4.13	-5.17	-5.89	-6.18	-6.08	-5.66	-5.06	-4.33	-3.40	-2.06	-0.13
245	-4.11	-5.15	-5.86	-6.17	-6.06	-5.65	-5.06	-4.32	-3.36	-1.98	0.01
250	-4.07	-5.11	-5.83	-6.14	-6.05	-5.65	-5.04	-4.29	-3.29	-1.86	0.19

PZV L1

Veränderung: 15 mm auf L3-Niveau

A/Z	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
200	-3.98	-5.00	-5.75	-6.14	-6.15	-5.78	-5.13	-4.25	-3.12	-1.65	0.37
205	-4.02	-5.05	-5.80	-6.19	-6.17	-5.80	-5.14	-4.27	-3.17	-1.73	0.23
210	-4.06	0.79	0.04	-0.33	-0.29	0.10	0.76	1.61	2.67	4.06	0.08
215	-4.10	0.76	0.00	-0.34	-0.29	0.12	0.77	1.60	2.62	3.97	-0.05
220	-4.13	0.71	-0.02	-0.34	-0.27	0.14	0.78	1.59	2.58	3.88	-0.15
225	-4.14	0.69	-0.04	-0.34	-0.25	0.18	0.81	1.58	2.53	3.82	-0.22
230	-4.15	0.70	-0.03	-0.33	-0.23	0.19	0.82	1.57	2.50	3.78	-0.25
235	-4.15	0.70	-0.02	-0.31	-0.20	0.22	0.82	1.56	2.49	3.78	-0.22
240	-4.13	0.72	0.00	-0.29	-0.18	0.23	0.83	1.56	2.49	3.83	-0.13
245	-4.11	-5.15	-5.86	-6.17	-6.06	-5.65	-5.06	-4.32	-3.36	-1.98	0.01
250	-4.07	-5.11	-5.83	-6.14	-6.05	-5.65	-5.04	-4.29	-3.29	-1.86	0.19

PZV L1

Veränderung: 30 mm auf L3-Niveau

A/Z	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
200	-3.98	-5.00	-5.75	-6.14	-6.15	-5.78	-5.13	-4.25	-3.12	-1.65	0.37
205	-4.02	-5.05	-5.80	-6.19	-6.17	-5.80	-5.14	-4.27	-3.17	-1.73	0.23
210	-4.06	6.68	5.93	5.57	5.60	5.99	6.65	7.50	8.57	9.95	0.08
215	-4.10	6.65	5.90	5.55	5.60	6.01	6.66	7.49	8.51	9.86	-0.05
220	-4.13	6.61	5.87	5.55	5.62	6.03	6.67	7.48	8.47	9.78	-0.15
225	-4.14	6.59	5.86	5.55	5.64	6.07	6.70	7.47	8.42	9.71	-0.22
230	-4.15	6.59	5.86	5.57	5.66	6.09	6.71	7.46	8.39	9.67	-0.25
235	-4.15	6.59	5.87	5.58	5.69	6.11	6.71	7.45	8.38	9.67	-0.22
240	-4.13	6.61	5.90	5.60	5.71	6.12	6.72	7.46	8.38	9.72	-0.13
245	-4.11	-5.15	-5.86	-6.17	-6.06	-5.65	-5.06	-4.32	-3.36	-1.98	0.01
250	-4.07	-5.11	-5.83	-6.14	-6.05	-5.65	-5.04	-4.29	-3.29	-1.86	0.19

In den unteren beiden Ausschnitten der PZV-Dateien ist deutlich der modifizierte Sektor im Bereich der Zenitdistanz 30° bis 70° und im azimuthalen Bereich 210° bis 240° erkennbar. Eine Veränderung der PZV-Werte um 15 mm/30 mm auf L₃-Niveau bewirkt mit der getroffenen Voraussetzung von $L_2 \stackrel{!}{=} 0$ bei der Rückrechnung eine Änderung der L₁-PZV-Werte um 5.89 mm/11.78 mm.

6.1.2 Stapeln der Residuen

Nach der im vorigen Unterkapitel beschriebenen Veränderung der PZV-Information einzelner Antennen wurden diese modifizierten PZV-Dateien in die Prozessierung eingeführt und die Daten der Stationen 0384, BFO1 und KARL für den Zeitraum DoY 199 bis 208 des Jahres 2013 prozessiert. Insgesamt wurden 13 Varianten berechnet, wobei jede Variante einem im modifizierten PZV-Sektor addierten Wert entspricht (0 mm, ..., 30 mm). Die aus diesen Prozessierungen resultierenden Residuen wurden über den gesamten Zeitraum gestapelt (Stackingzeitraum = 10 d) und als Korrektur an die korrespondierende PZV-Information angebracht, so dass jeweils eine neue PZV-Datei erstellt wurde. Zum Stapeln der Residuen wurde das Raster der PZV-Information, dessen Schrittweite sowohl in azimutaler als auch zenitaler Richtung 5° beträgt, genutzt. Die in den PZV-Dateien abgelegten Rasterpunkte wurden hierbei als Mittelpunkte der Stackingzellen festgelegt. In Abb. 6-1 ist das Schema der für die Untersuchung gewählten Zellen dargestellt. Zur vereinfachten Stapelung wurde eine Erweiterung der Matrix, in der die Residuen aus der Auswertung

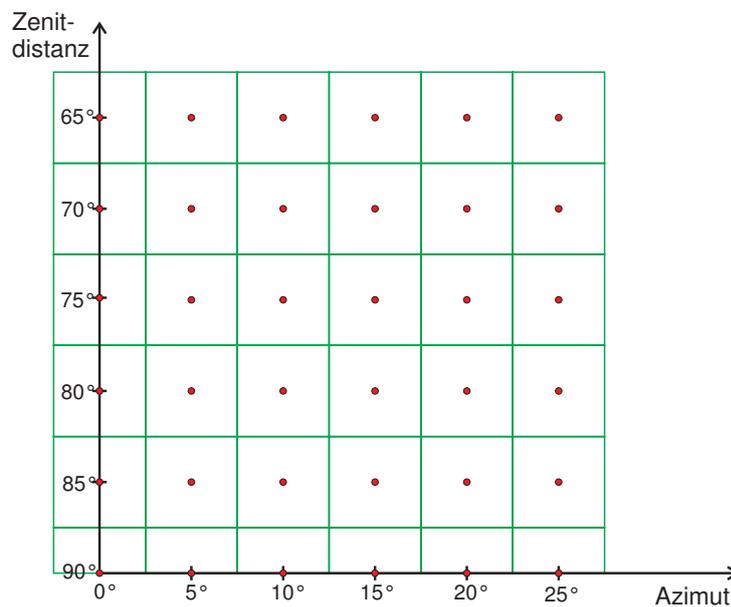


Abb. 6-1: Schema der Stacking-Zellen für einfache Stacking-Variante mit Zellengröße $5^\circ \times 5^\circ$ (Azimut \times Elevation)

sowie die zugehörigen Werte für Zenitdistanz und Azimut enthalten sind, wie in Kap. 4.2 beschrieben erweitert (siehe Abb. 4-8). Anschließend wurden alle Residuen einzelnen Zellen zugeordnet, wobei für die zenitale und azimutale Richtung folgende Festlegung verwendet wurde:

$$\text{Bereich Zenitdistanz} = [z \mid z_{\text{Mittelpunkt}} - \Delta z/2, z_{\text{Mittelpunkt}} + \Delta z/2 [,$$

$$\text{Bereich Azimut} = [A \mid A_{\text{Mittelpunkt}} - \Delta A/2, A_{\text{Mittelpunkt}} + \Delta A/2 [.$$

Δz bzw. ΔA sind hierbei der Abstand der Zellmittelpunkte in zenitaler bzw. azimutaler Richtung. Der Mittelwert aller Residuen einer Zelle wurde als Korrekturwert für diese Zelle festgelegt und an den zugehörigen Wert der PZV-Datei angebracht. Hierbei wurde die oben genannte Umrechnung von L_3 nach L_1 und L_2 angewendet.

Ausgangspunkt der ersten Untersuchung war die Annahme, dass durch die Stapelung der Residuen des ersten Prozessierungsschritts mit künstlich verfälschter PZV-Information und die Anbringung dieser Korrektur die PZV-Daten wieder auf das ursprüngliche Niveau gebracht werden können. Dies kann bereits vor der Einführung der neu entstandenen PZV-Datei in einem neuen Auswerteschritt durch Analyse

der PZV-Dateien geschehen. Als Referenz müssen hierbei die unveränderten (Addition von 0.0 mm) und ebenfalls um die gestapelten Residuen verbesserten PZV-Werte herangezogen werden. Im Folgenden sind die bereits oben dargestellten Ausschnitte der originären, sowie um 15 mm und 30 mm auf L₃-Niveau modifizierten PZV-Werte dargestellt, hier allerdings nach dem Anbringen der korrespondierenden, gestapelten Information: diese wurde von den PZV-Werten subtrahiert. Die grün gedruckten Zahlen markieren den Sektor der modifizierten PZV-Werte, die rot dargestellten Zahlenwerte sind unverändert aus der obigen Darstellung übernommen, da die entsprechenden Zellen keine Residuen enthalten und somit kein gestapelter Wert zur Korrektur bestimmt werden konnte.

PZV L1

Veränderung: 0 mm auf L3-Niveau => originär, gestackter Wert subtrahiert

A/Z	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
200	-2.34	-4.16	-4.36	-5.12	-5.42	-6.80	-4.03	-4.86	-3.32	-0.70	1.19
205	-3.52	-4.86	-6.00	-5.49	-6.09	-5.43	-5.02	-5.59	-2.81	-1.16	3.38
210	-3.74	-4.92	-6.76	-5.90	-6.93	-5.19	-5.57	-5.20	-3.43	-1.24	1.19
215	-4.54	-4.99	-6.57	-4.97	-6.19	-5.55	-5.62	-4.16	-4.43	-1.93	1.86
220	-5.17	-4.69	-5.55	-5.16	-7.13	-5.30	-4.27	-8.82	-4.73	-0.37	-0.85
225	-4.85	-4.71	-7.44	-6.23	-5.55	-3.52	-5.63	-4.69	-9.02	-2.07	4.01
230	-5.32	-6.42	-5.92	-5.73	-6.13	-5.65	-5.79	-4.32	-3.40	-0.38	0.22
235	-4.75	-5.19	-3.51	-4.74	-7.03	-5.68	-5.07	-4.34	1.15	-1.61	-0.68
240	-4.86	-4.67	-5.87	-3.54	-6.08	-5.66	-4.89	-3.74	-4.95	-5.46	-1.58
245	-4.42	-5.83	-6.59	-6.17	-5.18	-5.84	-6.80	-5.91	-5.08	-4.14	2.60
250	-4.50	-5.11	-6.36	-7.33	-5.52	-5.65	-5.76	-4.51	-4.14	-1.86	0.19

PZV L1

Veränderung: 15 mm auf L3-Niveau, gestackter Wert subtrahiert

A/Z	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
200	-2.09	-3.80	-3.17	-3.86	-4.03	-4.26	-1.38	-2.68	-2.19	0.35	1.93
205	-3.40	-6.05	-5.24	-6.26	-5.15	-4.49	-4.57	-4.85	-1.40	0.43	5.69
210	-3.77	-2.23	-4.20	-2.66	-3.76	-1.41	-0.53	-1.23	0.47	3.88	2.75
215	-4.48	-1.77	-3.75	-2.30	-0.29	-2.18	-1.90	-0.20	-0.96	3.97	4.54
220	-4.45	-1.56	-2.45	-1.81	-3.82	-1.60	-0.53	-5.30	-1.21	3.80	0.33
225	-4.20	-1.20	-4.10	-0.34	-1.83	0.08	-2.25	-1.24	-5.57	3.82	5.31
230	-3.92	-2.25	-0.03	-2.28	-2.72	-2.30	-2.43	1.57	2.50	2.50	1.41
235	-5.23	0.70	-0.19	-1.41	-3.68	0.22	0.82	1.56	4.00	2.00	-0.22
240	-4.51	0.39	-2.13	-0.08	-0.18	0.23	-1.10	-0.73	-1.59	-3.48	0.21
245	-3.36	-4.87	-5.62	-6.17	-4.03	-4.76	-6.24	-4.90	-4.46	-3.46	3.13
250	-3.30	-5.11	-5.03	-6.38	-4.45	-5.65	-4.42	-3.20	-2.95	-1.86	0.19

PZV L1

Veränderung: 30 mm auf L3-Niveau, gestackter Wert subtrahiert

A/Z	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
200	-1.84	-3.45	-2.31	-2.96	-3.05	-2.32	0.64	-1.09	-1.64	0.84	2.22
205	-3.26	-7.55	-4.82	-7.47	-4.74	-4.26	-4.83	-4.63	-0.35	1.76	7.96
210	-4.01	1.15	-0.60	0.81	-0.41	1.72	4.06	2.49	4.29	8.92	4.16
215	-4.97	1.29	-0.42	0.15	5.60	0.79	1.88	3.38	2.08	9.86	7.38
220	-4.27	1.60	0.91	1.28	-0.80	2.34	3.14	-1.88	2.21	7.92	1.55
225	-3.77	2.15	-0.53	5.55	1.84	3.74	1.04	2.10	-2.24	9.71	6.75
230	-2.75	1.61	5.86	1.48	0.70	0.97	0.79	7.46	8.39	5.44	2.60
235	-5.99	6.59	3.09	1.89	-0.36	6.11	6.71	7.45	6.04	5.33	-0.31
240	-4.40	5.44	1.87	3.39	5.71	6.12	2.52	2.30	1.50	-0.40	1.89
245	-2.47	-3.92	-4.55	-6.17	-3.02	-3.84	-5.78	-4.18	-3.91	-2.81	3.70
250	-2.19	-5.11	-3.55	-5.55	-3.51	-5.65	-3.13	-2.39	-1.86	-1.86	0.19

In den dargestellten Zahlenwerten ist gut erkennbar, dass die künstlich erzeugten Fehler in der PZV-Information durch die Anbringung der gestackten Information deutlich verbessert werden können. Eine vollständige Korrektur, d.h. die Zurückführung auf identische Werte, wie die unveränderten, um die entsprechende gestapelte Information verbesserte PZV-Werte, ist nicht möglich. Außerdem ist in den dargestellten Ausschnitten erkennbar, dass die einzelnen Werte der unveränderten PZV-Datei durch gestapelte Werte verändert werden. Hierbei sind durchaus Werte in der Größenordnung von mehreren Millimetern möglich, beispielsweise beim Wert für die Zenitdistanz 65° und das Azimut 235° , der in der originären PZV-Datei den Wert -3.40 mm und nach der Einführung gestapelter Information den Wert 1.15 mm annimmt, was eine Veränderung von 4.55 mm bedeutet. In diesen Korrekturwert sind 440 Residuen dieser Zelle eingeflossen, wobei die Standardabweichung der eingehenden Residuen auf L_3 -Ebene 12.5 mm beträgt. Für andere Zellen höherer Elevation (=geringerer Zenitdistanz) weisen die Residuen eine geringere Streuung auf, so dass die Standardabweichung der gestackten Residuen abnimmt.

Die Einführung gestapelter Information ist somit in der Lage, künstlich eingeführte Fehler zu großen Teilen zu korrigieren. Ziel dieser ersten Untersuchung ist nicht, eine vollständige Fehlerkorrektur und damit identische Ergebnisse wie die als „fehlerfrei“ eingeführten PZV zu erreichen, sondern lediglich zu zeigen, dass der gewählte Ansatz mit der Einführung gestapelter Werte einen einfach gangbaren Weg zur Fehlerkorrektur darstellt.

6.1.3 Auswirkungen auf die Residuen

In diesem Unterkapitel wird der Effekt der Einführung gestapelter Residuen als Korrektur auf die in einem zweiten Prozessierungsschritt bestimmten Residuen analysiert. Die hierbei untersuchten Daten entstammen einem erneuten Prozessierungsdurchlauf der Stationen 0384, BFO1 und KARL im Zeitraum DoY 199 bis 208 2013, wobei die Residuen der ersten Prozessierung des gleichen Zeitraums gestapelt und als Korrektur eingeführt wurden. Um einen ersten Eindruck zu gewinnen, wurden Plots erstellt, die die Residuenwerte einzelner Auswertevarianten zeigen. Beispielhaft hierfür steht Abb. 6-2. Dort ist der Ausschnitt der Antennenhemisphäre dargestellt, die den modifizierten PZV-Sektor (rot-umrandet dargestellt) in vier Auswertevarianten enthält. Die einzelnen Varianten sind: unveränderte PZV (erster Prozessierungsdurchlauf), unveränderte PZV mit Einführung der gestapelten Information aus erstem Prozessierungsdurchlauf, modifizierte PZV (erster Prozessierungsdurchlauf), modifizierte PZV mit Einführung der gestapelten Information aus erstem Prozessierungsdurchlauf. In den Plots sind die Modifikationen auf L_3 -Ebene um 15 mm bzw. 30 mm dargestellt. Zwischen den beiden linken Plots sind in den originären (ohne Einführung gestapelter Information) und durch Stacking verbesserter Residuen visuell kaum Unterschiede erkennbar. Sichtbar ist jedoch, dass die Variation der Residuen durchaus ein sehr kleinräumiges Verhalten aufweisen kann, so dass die für diese Untersuchung gewählte Zellgröße bei der Stapelung zu groß gewählt war. Der dritte Plot von links in Abb. 6-2(a) zeigt, verglichen mit dem ersten Plot der gleichen Abbildung, eine geänderte farbliche Codierung der Residuen, welche durch die Modifikation der PZV-Werte um 15 mm hervorgerufen wird. Im dritten Plot in Abb. 6-2(b) (Modifikation um 30 mm) tritt dieses Verhalten verstärkt zu Tage. Teilweise wurden die Beobachtungen durch die künstliche Verfälschung der PZV so stark verändert, dass sie im Lauf der Prozessierung als Ausreißer detektiert und von der weiteren Prozessierung ausgeschlossen wurden. Dies ist in den Plots durch fehlende Segmente der einzelnen Satellitenspuren erkennbar. Die vierte Spalte der dargestellten Plots zeigt die mit modifizierten PZV nach Berücksichtigung der gestapelten Residuen des ersten Auswertedurchlaufs berechneten Residuen. Der positive Einfluss der Korrekturinformation wird durch die geänderte Farbskalierung, welche große Ähnlichkeit mit der Originalversion unter Verwendung gestapelter Information aufweist, sowie durch gefüllte Lücken im Verlauf der Satellitenspuren sichtbar. Eine komplette Vervollständigung der Satellitenspuren wurde nicht erzielt.

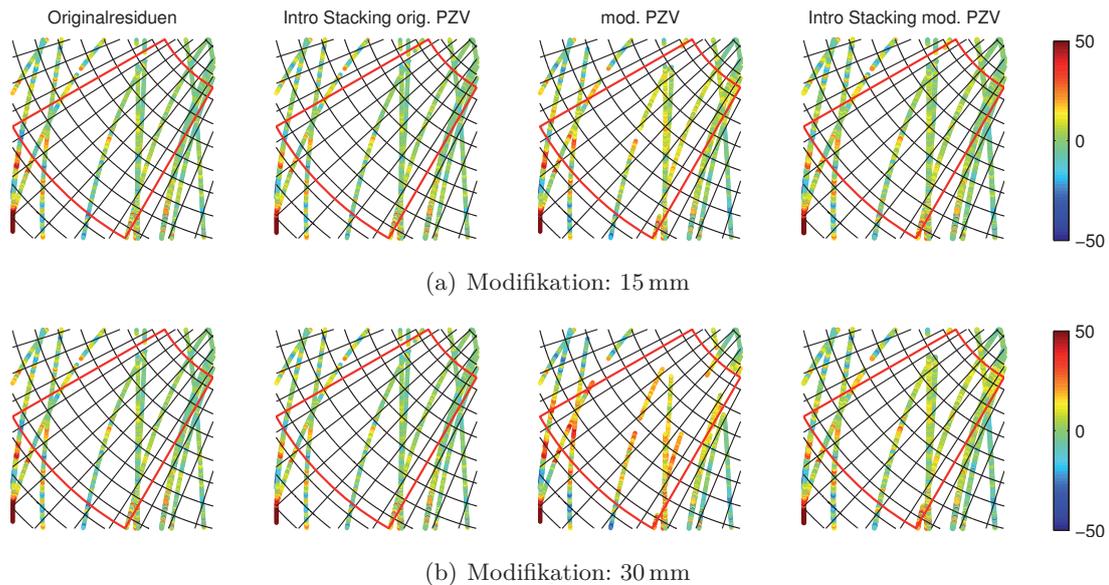


Abb. 6-2: Residuenplots der Station KARL für DoY 199 2013 aus Prozessierungen verschiedener Varianten; rot-umrandeter Bereich: modifizierter PZV-Sektor; Farbskala: Residuenwerte in [mm]; schwarze Gitterlinien: gewähltes Stackingraster (Azimut \times Zenitdistanz = $5^\circ \times 5^\circ$)

Zusätzlich zur grafischen Darstellung sind in Tab. 6-2 verschiedene Kennzahlen der Residuen zusammengestellt. Hierbei handelt es sich um die Residuen, die dem ersten Auswertedurchlauf mit Einführung der modifizierten PZV-Information entstammen; eine Korrektur durch gestapelte Residuen wurde noch nicht vorgenommen. Neben der Untersuchung aller Residuen der Antennenhemisphäre werden zusätzlich die Residuen im modifizierten Sektor sowie die Residuen in einem Referenzsektor (Zenitdistanz $\leq 10^\circ$) analysiert. In den einzelnen Spalten der Tabelle sind die Ergebnisse der verschiedenen Varianten aufgeführt; die Zeilen enthalten für jeden Bereich der Antennenhemisphäre die Mittelwerte der Residuenanzahl, der Extremwerte minimaler und maximaler Residuenwerte in [mm], sowie den gemittelten Residuenwert in diesem Bereich. Die Mittelbildung wurde hierbei über alle in die Stapelprozedur eingehenden Tage (DoY 199 bis 208 2013) vorgenommen. Bei der Betrachtung der Gesamtzahl der Residuen fällt auf, dass die Station BFO1 deutlich weniger Residuen aufweist als die beiden anderen Stationen. Dies ist durch die Lage der Station begründet, so dass im Osten der Station große Teile der Antennenhemisphäre durch Vegetation, aber auch Topographie beeinträchtigt werden. Bei allen drei Stationen ist erkennbar, dass mit steigender Größe des auf L_3 -Niveau auf die PZV-Werte addierten Wertes die Gesamtzahl der Residuen abnimmt. Die Extremwerte (Min/Max) der gesamten Antennenhemisphäre ändern sich nur in geringem Maß, ebenso bleibt der Mittelwert aller Residuen weitgehend konstant, lediglich bei der Station KARL tritt eine Änderung von 0.1 mm auf. Ein anderes Bild ergibt sich bei den Residuen im modifizierten Sektor. Hier nimmt die Anzahl der Residuen mit steigendem Modifikationswert ebenfalls ab, jedoch tritt hier auch eine Änderung der Extremwerte und des mittleren Residuenwerts in diesem Sektor auf: sowohl Minimal- als auch Maximalwerte steigen an, ebenso der mittlere Residuenwert. Bis zu einer Modifikation von 7 mm auf L_3 -Niveau bleibt die Residuenanzahl annähernd stabil, bei größeren Änderungen sinkt sie – insbesondere bei der Station KARL – deutlich ab. In Abb. 6-3 ist der Mittelwert der prozentualen Abnahme der Residuenanzahl bezogen auf den Mittelwert der Residuenanzahl aus der nichtmodifizierten Variante im untersuchten Zeitraum dargestellt. Bei 0384 und BFO1 beträgt die Residuenanzahl bei der Modifikation der PZV um 30 mm noch gut 87 % der originären Residuenanzahl, bei KARL ist ein Rückgang von über 30 % zu verzeichnen. Die Abnahme der Residuenanzahl wird durch die Elimination von Beobachtungen im Lauf der Prozessierung hervorgerufen. Durch die Modifikation werden bei KARL demnach mehr Beobachtungen als Ausreißer deklariert und vom Beobachtungsmaterial ausgeschlossen, als bei den beiden

Tab. 6-2: Mittelwerte von: Anzahl der Residuen/Minima [mm]/Maxima [mm]/Residuenwert [mm] über komplette Artenhemisphäre/modifizierten Sektor/Referenzsektor (Zeitdistanz $\leq 10^\circ$) der drei untersuchten Stationen im Zeitraum DoY 199 bis 208 2013 aus Prozessierung mit originären (Änderung um 0mm) und modifizierten PZV

Änderung PZV [mm]		0	3	5	7	10	13	15	17	20	23	25	27	30
alle Residuen														
Anzahl	27206	27203	27202	27201	27199	27196	27192	27189	27188	27186	27182	27177	27172	27167
Min	-136.4	-136.0	-135.7	-135.4	-137.3	-140.3	-140.2	-140.0	-133.2	-132.2	-131.3	-130.3	-129.3	-128.3
Max	161.6	162.8	163.5	164.3	165.9	167.3	166.8	167.8	164.2	164.7	164.7	162.9	162.0	161.8
Wert	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Residuen im modifizierten Sektor														
Anzahl	981	981	981	980	979	976	975	975	975	963	955	940	913	858
Min	-35.3	-33.8	-32.8	-31.8	-30.3	-28.8	-27.7	-26.7	-25.2	-23.7	-23.7	-22.7	-20.9	-17.8
Max	30.6	32.4	33.6	34.8	36.1	37.9	38.1	39.3	39.7	41.8	41.8	43.3	44.5	44.0
Wert	-0.2	1.2	2.1	3.0	4.3	5.7	6.5	7.4	8.7	10.0	10.0	10.8	11.7	12.9
Residuen im Referenzsektor														
Anzahl	1272	1272	1272	1272	1272	1272	1272	1272	1272	1272	1272	1272	1271	1271
Min	-11.2	-11.3	-11.5	-11.7	-12.0	-12.4	-12.6	-13.0	-13.0	-13.2	-13.6	-13.4	-13.5	-13.4
Max	7.9	7.9	8.1	8.2	8.2	8.4	8.5	8.6	8.7	8.7	8.9	9.1	9.2	9.6
Wert	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.5	-1.5	-1.4
alle Residuen														
Anzahl	19201	19202	19194	19194	19190	19188	19186	19168	19163	19126	19109	19109	19088	19033
Min	-116.6	-116.9	-117.7	-117.8	-115.3	-113.2	-116.4	-116.9	-118.5	-119.7	-120.7	-120.7	-121.2	-119.3
Max	96.1	97.5	97.8	97.8	97.8	98.4	98.6	99.5	100.6	102.6	105.2	105.2	105.9	106.1
Wert	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
Residuen im modifizierten Sektor														
Anzahl	899	899	898	897	893	892	889	881	871	852	843	826	785	755
Min	-24.5	-22.6	-21.8	-21.0	-19.8	-18.6	-17.7	-17.3	-18.0	-16.9	-16.1	-15.5	-14.5	-14.5
Max	28.7	29.8	30.8	30.7	32.3	33.8	34.9	35.3	36.8	38.4	39.5	40.0	41.8	41.8
Wert	0.4	1.6	2.5	3.2	4.5	5.7	6.5	7.3	8.5	9.7	10.6	11.4	12.7	12.7
Residuen im Referenzsektor														
Anzahl	1226	1226	1226	1226	1226	1226	1226	1226	1226	1226	1226	1226	1225	1225
Min	-8.8	-9.0	-9.1	-9.2	-9.4	-9.6	-9.8	-10.0	-9.9	-10.3	-10.5	-10.8	-11.1	-11.1
Max	11.2	11.1	11.0	11.0	11.1	11.0	11.0	11.0	11.2	11.2	11.4	11.5	11.7	11.8
Wert	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
alle Residuen														
Anzahl	26538	26529	26525	26515	26490	26449	26425	26385	26312	26213	26143	26064	25920	25920
Min	-148.4	-147.8	-147.4	-146.9	-147.9	-151.6	-151.0	-150.9	-152.0	-151.7	-151.6	-151.2	-151.1	-151.1
Max	160.4	160.1	159.4	159.4	159.3	159.4	160.0	161.7	161.8	162.1	162.6	162.3	162.7	162.7
Wert	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Residuen im modifizierten Sektor														
Anzahl	886	882	878	875	861	846	835	820	783	735	702	665	606	606
Min	-36.5	-34.8	-33.7	-33.8	-32.3	-30.7	-30.1	-29.0	-28.3	-26.7	-26.2	-25.3	-23.5	-23.5
Max	33.7	34.9	35.4	36.2	37.2	37.6	38.1	39.0	39.0	40.1	40.1	41.3	42.6	42.6
Wert	-0.6	0.7	1.6	2.4	3.7	4.9	5.7	6.6	7.9	9.3	10.2	11.2	12.8	12.8
Residuen im Referenzsektor														
Anzahl	1337	1337	1337	1337	1338	1338	1337	1337	1334	1334	1333	1332	1331	1331
Min	-14.0	-14.0	-13.9	-13.9	-14.0	-14.1	-13.9	-13.9	-14.1	-14.3	-14.2	-13.8	-13.6	-13.6
Max	14.6	14.6	14.7	14.6	14.7	14.8	14.9	14.9	15.0	15.0	15.1	15.0	15.0	15.0
Wert	0.8	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

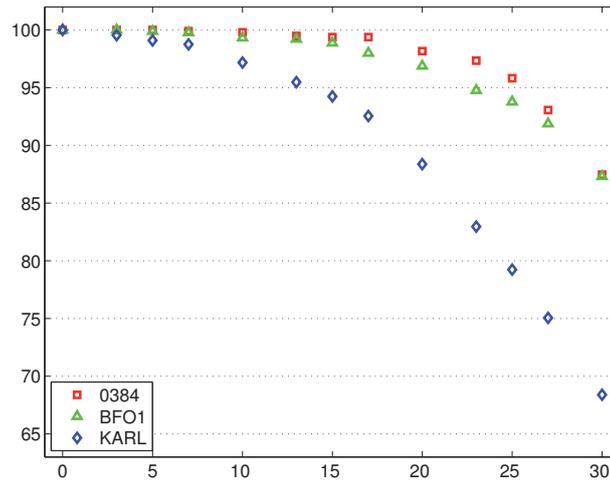


Abb. 6-3: Entwicklung der Residuenanzahl im modifizierten Sektor in Abhängigkeit vom addierten Wert auf L_3 -PZV; Rechtsachse: auf L_3 addierter Wert [mm], Hochachse: Verhältnis des Mittelwerts der Residuenanzahl mit veränderten PZV zu unveränderten PZV des modifizierten Sektors [%] im Zeitraum DoY 199 bis 208 2013

anderen Stationen. Im Referenzsektor der einzelnen Stationen treten durch die Modifikation nur minimale Änderungen auf. Der Effekt der künstlich erzeugten Fehler ist direkt in den verbleibenden Residuen erkennbar. Wie im vorigen Unterkapitel gezeigt wurde, kann durch die Einführung gestapelter Information die Modifikation der PZV-Information zu großen Teilen rückgängig gemacht werden. Im Folgenden werden die Residuen analysiert, die nach Einführung der durch die gestapelten Residuen korrigierten PZV-Werte in einem erneuten Prozessierungsdurchlauf berechnet werden. In Tab. 6-3 sind, analog zur obigen Tabelle, die Ergebnisse zusammengestellt. Die Gesamtzahl aller Residuen der kompletten Antennenhemisphäre bleibt bei 0384 und BFO1 in allen Varianten weitgehend konstant, lediglich bei der Station KARL ist eine geringe Abnahme der Residuenzahl erkennbar. Die gemittelten Minima der kompletten Antennenhemisphäre ändern sich gegenüber der Variante ohne die Einführung gestapelter Information kaum. Die Werte der Maxima werden bei allen Stationen verringert, bei 0384 teilweise sogar um mehr als 10 mm. Die gemittelten Mittelwerte der Residuen aller Tage des Stackingzeitraumes liegen nach diesem Prozessierungsdurchlauf näher bei Null. Interessant ist, dass bei der Variante ohne Modifikation die Gesamtzahl der Residuen auf allen untersuchten Stationen zunimmt, d.h. die Einführung gestapelter Information wirkt sich positiv auf das eingehende Datenmaterial aus, da mehr Beobachtungen in der Prozessierung verbleiben.

Der positive Einfluss der gestapelten Information ist gut in den Residuen des modifizierten Sektors erkennbar. Im Gegensatz zur Prozessierung ohne Korrektur (vgl. Tab. 6-2 ist bei 0384 und BFO1 nur eine geringe Abnahme der Residuenzahl mit steigendem Modifikationswert feststellbar, einzig bei KARL nimmt die Anzahl der Residuen von 892 (0 mm) auf 842 (30 mm) ab. Bei allen drei untersuchten Stationen verringern sich die gemittelten Maximalwerte der Residuen im modifizierten Vektor, bei 0384 werden auch die Minima für Zenitdistanzen 0° bis 15° betragsmäßig verkleinert. Der gemittelte Residuenwert in diesem Sektor liegt bei allen Stationen in allen Varianten nun näher bei Null, steigt jedoch mit zunehmender Modifikation an. Eine vollständige Korrektur auf den Wert der unveränderten PZV erfolgt nicht.

Die Anzahl der Residuen im Referenzsektor ist bei allen Stationen nahezu unverändert, die Bandbreite der Min/Max-Werte wird leicht positiv beeinflusst. Auffallend ist, dass der gemittelte Residuenwert im Referenzsektor nach der Einführung gestapelter Residuenwerte deutlich näher bei Null liegt als in der Variante ohne Korrektur. Es werden also auch Signale, die aus fast zenitaler Richtung in der Station eintreffen, positiv beeinflusst.

Tab. 6-3: Mittelwerte von: Anzahl der Residuen/Minima [mm]/Maxima [mm]/Residuenwert [mm] über komplette Antennenhemisphäre/modifizierten Sektor/Referenzsektor (Zeitdistanz $\leq 10^\circ$) der drei untersuchten Stationen im Zeitraum DoY 199 bis 208 2013 aus Prozessierung mit originären (Änderung um 0 mm) und modifizierten PZV inklusive Berücksichtigung der gestackten Residuen

	Änderung PZV [mm]																													
	0	3	5	7	10	13	15	17	20	23	25	27	30	0	3	5	7	10	13	15	17	20	23	25	27	30				
alle Residuen																														
Anzahl	27215	27215	27216	27214	27214	27211	27212	27212	27213	27212	27211	27209	27208	27215	27215	27216	27214	27214	27211	27212	27212	27213	27212	27211	27209	27208				
Min	-139.6	-139.1	-138.9	-139.8	-139.8	-139.4	-139.3	-139.1	-138.9	-138.7	-138.6	-138.4	-138.4	-139.6	-139.1	-138.9	-139.8	-139.8	-139.4	-139.3	-139.1	-138.9	-138.7	-138.6	-138.4	-138.4				
Max	154.2	154.5	154.7	154.6	154.9	154.7	154.8	154.8	155.2	155.5	155.8	156.2	156.8	154.2	154.5	154.7	154.6	154.9	154.7	154.8	155.2	155.5	155.8	156.2	156.8					
Wert	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1				
Residuen im modifizierten Sektor																														
Anzahl	981	981	981	981	981	981	980	980	980	980	980	980	980	981	981	981	981	981	981	980	980	980	980	980	980	980				
Min	-28.7	-28.4	-28.2	-28.1	-27.8	-27.4	-27.3	-27.1	-26.9	-26.5	-26.5	-26.6	-26.8	-28.7	-28.4	-28.2	-28.1	-27.8	-27.4	-27.3	-27.1	-26.9	-26.5	-26.5	-26.6	-26.8				
Max	30.3	30.7	31.0	31.4	32.0	32.6	32.9	33.3	33.9	34.6	34.6	35.0	35.4	36.2	30.3	30.7	31.0	31.4	32.0	32.6	32.9	33.3	33.9	34.6	34.6	35.0	35.4	36.2		
Wert	0.3	0.7	1.0	1.2	1.6	2.0	2.3	2.5	3.0	3.4	3.4	3.7	4.1	4.7	0.3	0.7	1.0	1.2	1.6	2.0	2.3	2.5	3.0	3.4	3.4	3.7	4.1	4.7		
Residuen im Referenzsektor																														
Anzahl	1272	1272	1272	1272	1272	1272	1272	1272	1272	1272	1272	1272	1272	1272	1272	1272	1272	1272	1272	1272	1272	1272	1272	1272	1272	1272				
Min	-9.2	-9.3	-9.3	-9.3	-9.3	-9.3	-9.4	-9.4	-9.4	-9.6	-9.7	-9.8	-10.0	-9.2	-9.3	-9.3	-9.3	-9.3	-9.3	-9.4	-9.4	-9.4	-9.6	-9.7	-9.8	-10.0				
Max	8.2	8.3	8.3	8.3	8.3	8.4	8.9	8.9	9.0	8.7	8.8	8.8	8.7	8.2	8.3	8.3	8.3	8.3	8.4	8.9	8.9	9.0	8.7	8.8	8.8	8.7				
Wert	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.6	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.6				
alle Residuen																														
Anzahl	19301	19297	19294	19295	19294	19294	19292	19295	19296	19288	19279	19278	19274	19301	19297	19294	19295	19294	19294	19292	19295	19296	19288	19279	19278	19274				
Min	-116.2	-116.5	-116.7	-116.8	-114.5	-115.1	-115.3	-115.6	-116.2	-117.3	-117.7	-118.4	-119.5	-116.2	-116.5	-116.7	-116.8	-114.5	-115.1	-115.3	-115.6	-116.2	-117.3	-117.7	-118.4	-119.5				
Max	95.6	95.6	95.5	95.4	95.4	95.8	96.0	96.4	96.8	97.2	97.6	98.0	98.8	95.6	95.6	95.5	95.4	95.4	95.8	96.0	96.4	96.8	97.2	97.6	98.0	98.8				
Wert	0	0	0	-0.1	-0.1	-0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1	-0.1	-0.1	0	0	0	0	0	0	0				
Residuen im modifizierten Sektor																														
Anzahl	900	900	899	898	898	898	898	898	898	897	894	892	892	900	900	899	898	898	898	898	898	898	897	894	892	892				
Min	-24.6	-24.1	-23.7	-23.2	-22.8	-22.1	-21.9	-21.6	-21.2	-20.9	-20.9	-20.5	-20.2	-24.6	-24.1	-23.7	-23.2	-22.8	-22.1	-21.9	-21.6	-21.2	-20.9	-20.9	-20.5	-20.2				
Max	28.5	29.2	29.6	30.0	30.3	31.0	31.4	32.0	32.7	33.3	33.8	34.4	34.0	28.5	29.2	29.6	30.0	30.3	31.0	31.4	32.0	32.7	33.3	33.8	34.4	34.0				
Wert	0.1	0.6	0.8	1.1	1.5	1.9	2.1	2.4	2.9	3.3	3.6	3.9	4.4	0.1	0.6	0.8	1.1	1.5	1.9	2.1	2.4	2.9	3.3	3.6	3.9	4.4				
Residuen im Referenzsektor																														
Anzahl	1226	1226	1226	1226	1226	1226	1226	1226	1226	1226	1226	1226	1226	1226	1226	1226	1226	1226	1226	1226	1226	1226	1226	1226	1226	1226				
Min	-9.3	-9.4	-9.5	-9.5	-9.5	-9.7	-9.8	-9.9	-9.8	-9.8	-9.9	-10.0	-10.0	-9.3	-9.4	-9.5	-9.5	-9.5	-9.7	-9.8	-9.9	-9.8	-9.9	-10.0	-10.0	-10.0				
Max	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.2	10.3	10.2	10.2	10.2	10.2	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.2	10.3	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2				
Wert	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3				
alle Residuen																														
Anzahl	26654	26649	26654	26643	26636	26624	26613	26591	26576	26541	26523	26516	26493	26654	26649	26654	26643	26636	26624	26613	26591	26576	26541	26523	26516	26493				
Min	-144.1	-145.6	-145.7	-145.5	-145.5	-151.2	-151.2	-151.3	-151.3	-151.2	-151.3	-150.9	-150.5	-144.1	-145.6	-145.7	-145.5	-145.5	-151.2	-151.2	-151.3	-151.3	-151.2	-151.3	-150.9	-150.5				
Max	160.2	156.3	156.0	156.0	156.0	155.8	155.7	155.7	154.1	154.0	154.3	153.9	154.1	160.2	156.3	156.0	156.0	156.0	155.8	155.7	155.7	154.1	154.0	154.3	153.9	154.1				
Wert	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1				
Residuen im modifizierten Sektor																														
Anzahl	892	890	889	887	884	882	880	877	871	864	859	852	842	892	890	889	887	884	882	880	877	871	864	859	852	842				
Min	-36.9	-36.2	-35.8	-35.5	-34.4	-33.8	-33.3	-32.9	-32.3	-31.6	-31.2	-30.8	-30.8	-36.9	-36.2	-35.8	-35.5	-34.4	-33.8	-33.3	-32.9	-32.3	-31.6	-31.2	-30.8	-30.8				
Max	33.6	34.4	33.9	34.3	34.9	35.8	35.6	36.0	36.6	37.4	37.3	36.5	35.7	33.6	34.4	33.9	34.3	34.9	35.8	35.6	36.0	36.6	37.4	37.3	36.5	35.7				
Wert	-0.3	0.1	0.3	0.7	1.0	1.5	1.8	2.0	2.5	3.1	3.4	3.8	4.4	-0.3	0.1	0.3	0.7	1.0	1.5	1.8	2.0	2.5	3.1	3.4	3.8	4.4				
Residuen im Referenzsektor																														
Anzahl	1342	1342	1342	1342	1342	1342	1342	1341	1341	1340	1340	1338	1336	1342	1342	1342	1342	1342	1342	1341	1341	1340	1340	1338	1336	1336				
Min	-13.2	-13.2	-13.2	-13.3	-13.3	-13.3	-13.6	-13.3	-13.3	-13.2	-13.3	-13.4	-13.2	-13.2	-13.2	-13.2	-13.3	-13.3	-13.3	-13.6	-13.3	-13.3	-13.2	-13.3	-13.4	-13.2				
Max	12.7	12.5	12.4	12.4	12.4	12.5	12.5	12.7	12.8	13.0	13.1	13.4	13.4	12.7	12.5	12.4	12.4	12.4	12.5	12.5	12.7	12.8	13.0	13.1	13.4	13.4				
Wert	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1				

6.1.4 Auswirkungen auf die Koordinaten

Nach der Untersuchung der unter Verwendung gestapelter Information berechneten Residuen werden im Folgenden die Auswirkungen der Korrektur auf die Koordinaten analysiert. In Tab. 6-4 sind die Koordinatenunterschiede im topozentrischen System (ΔN , ΔE , ΔUp) der prozessierten Versionen zusammengestellt. Die Differenzen wurden jeweils zur Variante mit den originären PZV („PZV modifiziert um 0 mm“) gebildet. Die Differenzen der einzelnen Koordinatenkomponenten zur ursprünglichen Version ohne Modifikation der PZV nehmen mit zunehmendem Wert der PZV-Veränderung zu. Hierbei ist bei den Stationen 0384 und KARL die Lagekomponente stärker betroffen als die Höhenkomponente, wobei die Auswirkungen auf beide Lagekomponenten eine ähnliche Größenordnung annehmen. Bei BFO1 ist ΔN stärker betroffen als ΔE , die Auswirkung auf die Höhenkomponente erreicht hierbei größere Werte als die der Lagekomponenten und fällt mit zunehmender Modifikation doppelt so groß aus wie bei der Ostkomponente. Die Erklärung für das abweichende Verhalten von BFO1 ist die starke Abschattung dieser Station (siehe Abb. 6-4). Im Azimutbereich 0° bis ca. 130° erreichen kaum Signale unterhalb einer Elevation von 30° die Station. Die relative Fläche des modifizierten Sektors im Vergleich zur Gesamtfläche der Antennenhemisphäre (sogenanntes Nordloch ausgenommen) ist bei dieser Station deutlich größer als bei 0384 und KARL. Veränderungen in diesem Sektor wirken sich daher stärker auf die zu schätzenden Parameter aus als bei Stationen, die keine Abschattungen aufweisen. Der Effekt der Einführung gestapelter

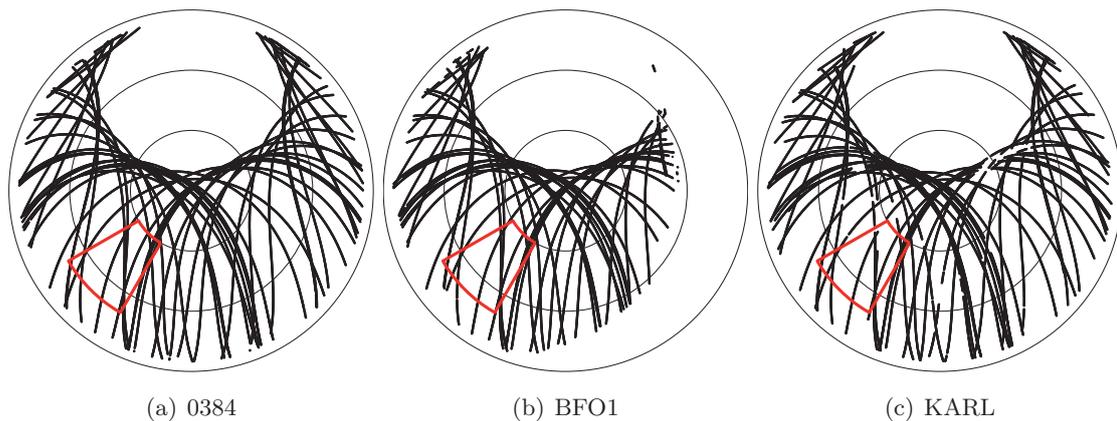


Abb. 6-4: Plot der Residuen für DoY 200 2013 mit originären PZV ohne Modifikation; rot-umrandeter Bereich: PZV-Sektor, der in anderen Versionen modifiziert wurde; konzentrische Kreise (von innen nach aussen): Zenitdistanz 30° , 60° , 90°

Residuen auf die Koordinaten ist im unteren Teil von Tab. 6-4 erkennbar. Bereits bei der Version ohne Modifikation der PZV ist eine Auswirkung auf die Koordinaten nach Einführung der gestapelten Information erkennbar. Bei den untersuchten Stationen wird die Nord-/Ost-/Höhenkomponente betragsmäßig um bis zu $0.29\text{ mm}/0.15\text{ mm}/0.87\text{ mm}$ verändert. Die Koordinatendifferenzen der Varianten mit Modifikation der PZV gehen durch die Einführung der gestapelten Information nicht auf Null zurück, sie erreichen eine ähnliche Größenordnung wie die Koordinaten, die ohne die Einführung der gestapelten Residuen berechnet wurden. Ein möglicher Grund hierfür ist die Tatsache, dass die PZV im modifizierten Sektor trotz Korrektur noch von den ursprünglichen Werten abweichen und somit der Mittelwert der gestapelten Residuen im modifizierten Sektor nach der Einführung gestapelter Residuen nicht vollständig auf Null zurückgeht. Möglicherweise könnte durch ein iteratives Stapeln der Residuen diese Unzulänglichkeit behoben werden.

Tab. 6-4: Mittelwert der Koordinatenänderung durch Modifikation in PZV-Sektor (oberer Teil) und durch Verbesserung des modifizierten Sektors durch gestapelte Residuen (unterer Teil) im Zeitraum DoY 199 bis 208 2013; Differenzen: originäre Version ohne Stacking minus individuelle Version; Werte in [mm]

PZV modifiziert um		0 mm	3 mm	5 mm	7 mm	10 mm	13 mm	15 mm	17 mm	20 mm	23 mm	25 mm	27 mm	30 mm	
0384	ΔN	0.00	0.88	1.46	2.03	2.90	3.76	4.32	4.90	5.70	6.48	6.92	7.26	7.58	
	ΔE	0.00	0.89	1.50	2.11	3.00	3.91	4.55	5.16	6.00	6.82	7.29	7.74	8.21	
	ΔUp	0.00	0.48	0.80	1.12	1.60	2.07	2.39	2.70	3.12	3.50	3.77	3.93	4.17	
BFO1	ΔN	0.00	1.00	1.64	2.27	3.23	4.20	4.82	5.40	6.30	7.06	7.61	8.05	8.48	
	ΔE	0.00	0.73	1.08	1.51	2.22	2.88	3.23	3.54	4.12	4.47	4.81	5.09	5.10	
	ΔUp	0.00	1.06	1.83	2.56	3.66	4.74	5.58	6.31	7.52	8.91	9.65	10.26	11.52	
KARL	ΔN	0.00	0.81	1.35	1.88	2.68	3.43	3.86	4.31	4.89	5.36	5.59	5.77	6.03	
	ΔE	0.00	0.80	1.34	1.86	2.65	3.37	3.78	4.24	4.78	5.25	5.48	5.72	6.09	
	ΔUp	0.00	0.52	0.83	1.13	1.54	2.03	2.40	2.70	3.18	3.73	4.18	4.46	4.63	
PZV modifiziert und Stacking angebracht															
0384	ΔN	0.17	0.99	1.54	2.09	2.90	3.73	4.27	4.81	5.60	6.38	6.87	7.30	7.85	
	ΔE	0.09	0.90	1.46	2.01	2.78	3.63	4.17	4.70	5.51	6.27	6.78	7.26	7.90	
	ΔUp	-0.87	-0.31	0.05	0.42	0.98	1.51	1.88	2.24	2.78	3.32	3.68	3.99	4.44	
BFO1	ΔN	0.25	1.19	1.79	2.40	3.34	4.26	4.87	5.47	6.37	7.19	7.75	8.27	8.92	
	ΔE	-0.15	0.56	0.91	1.41	2.13	2.80	3.28	3.73	4.42	5.09	5.47	5.88	6.38	
	ΔUp	0.16	1.24	2.05	2.72	3.86	5.00	5.69	6.41	7.52	8.76	9.46	10.12	11.26	
KARL	ΔN	0.29	1.06	1.57	2.09	2.82	3.56	4.04	4.52	5.14	5.72	6.06	6.40	6.87	
	ΔE	0.02	0.78	1.28	1.76	2.50	3.22	3.68	4.17	4.78	5.43	5.77	6.16	6.65	
	ΔUp	0.51	1.05	1.40	1.76	2.33	2.88	3.22	3.56	4.09	4.58	4.94	5.29	5.65	

6.1.5 Resüme

Das Hauptziel des hier vorgestellten Testszenarios war zu untersuchen, ob die Grundidee der auf einfache Weise umsetzbaren Berücksichtigung gestapelter Information durch Addition auf die PZV-Werte einen gangbaren Weg darstellt. Prinzipiell lassen sich die durch Stapelung von originären Residuen eines ersten Prozessierungsdurchlaufes bestimmbar Korrekturen und durch Subtraktion dieser Werte von den PZV der korrespondierenden Antenne neue verbesserte PZV berechnen, die in einen zweiten Prozessierungsschritt eingeführt werden können. Hierbei sind Umrechnungen notwendig, um die auf L_3 -Ebene vorliegenden Real-Residuen an die L_1 - und L_2 -PZV anbringen zu können. Durch die Erzeugung künstlich verfälschter PZV, Einführung dieser Werte in einen Prozessierungsdurchlauf, Berechnung der Korrektur durch Stapeln der erzeugten Residuen und Anbringen der Korrektur an die verfälschten PZV konnte gezeigt werden, dass hierdurch PZV in ähnlicher Größenordnung wie die originären, unverfälschten PZV berechnet werden können. Durch die Einführung der korrigierten PZV können die Residuen, im Vergleich zur Auswertung unter Nutzung der verfälschten PZV, stark verringert werden. Die Koordinaten der Variante mit unveränderten PZV und Berücksichtigung der durch Stapeln erzeugten Korrektur werden durch die Einführung gestapelter Residuen um mehrere Zehntel mm verändert. Falls die Annahme, dass Stacking stationsspezifische Fehler eliminieren kann, stimmt, so kann diese Koordinatenveränderung als Verbesserung angesehen werden. Die Ursache für das Verbleiben der größeren Koordinatenunterschiede der Varianten mit PZV-Modifikation und Einführung gestapelter Residuen zur ursprünglichen Auswertung ist unklar.

Das gewählte Vorgehen zeigt, dass die Einführung gestapelter Information auf dem Weg über die PZV gangbar ist und zu guten Ergebnissen führt. Das angewendete Verfahren kann daher fortgeführt und verfeinert werden. Wie in den Residuenplots (vgl. Abb. 6-2) erkennbar ist, weisen die Residuen teilweise eine sehr kleinräumige Struktur auf, die mit der gewählten Zellgröße (Azimut \times Zenitdistanz = $5^\circ \times 5^\circ$) nicht abgebildet werden kann. Für weitergehende Untersuchungen ist daher eine kleinere Zellgröße empfehlenswert. Der Weg der Einführung der Korrektur über die PZV-Information ist zwar gangbar und einfach umsetzbar, jedoch für einen routinemäßigen Einsatz von Stacking nicht praktikabel, da eine Vielzahl an unterschiedlichen Dateien mit Kalibrierinformation vorgehalten werden muss. Zudem ist die im PZV-Raster gewählte Zellauflösung zu grob, so dass für die Verwendung kleinerer Zellen bei der Stapelung der Residuen die PZV-Information interpoliert werden müsste. Sinnvoller ist daher die separate Verwendung von Kalibrier- und Korrekturinformation, wobei für letztere durchaus ein bewährtes Format der Kalibrierinformation verwendet werden sollte. Dies kann bei Auswertungen mit der Bernese GNSS Software (Dach u. a. [2007]) das Bernese-interne Format oder alternativ das standardisierte ANTEX-Format sein. Durch die separate Datei der Korrektur kann eine von der Kalibrierinformation abweichende Zellauflösung gewählt werden, während die Antennenparameter in ihrer originären Form verbleiben. In dieser ersten Untersuchung wurde auf die Analyse der Auswirkungen auf sonstige Schätzwerte – wie beispielsweise die stationsspezifischen Troposphärenparameter – verzichtet, da lediglich die Grundfunktionalität der Einführung gestapelter Information untersucht werden sollte.

6.2 Ergebnisse über einen längeren Zeitraum

Zur Untersuchung des Einflusses der Einführung gestackter Daten wurde die einfache Stackingvariante mit fixer azimuthaler/zenitaler Zellgröße und separater Datei für die gestackte Information über einen Zeitraum von 120 d (DoY 121 bis 241 des Jahres 2013) angewandt. Hierfür wurden zehn Stationen unterschiedlicher GNSS-Qualität ausgewählt. Zur Beurteilung der GNSS-Qualität wurde vorrangig eine Mehrwegeanalyse herangezogen, die für alle Stationen des GURN zwischen DoY 127 und 133 des Jahres 2012 durchgeführt wurde. Hierbei wurde die Software WaSoft/Multipath (Wanninger u. May [2000],

<http://www.wasoft.de>, Stand: 07.10.2014) verwendet. In Abb. 6-5 sind die Ergebnisse der Mehrwegeanalyse für die drei Stationen 0403, BUAN und 0387 aufgeführt. In den Plots ist die Mehrwegebelastung

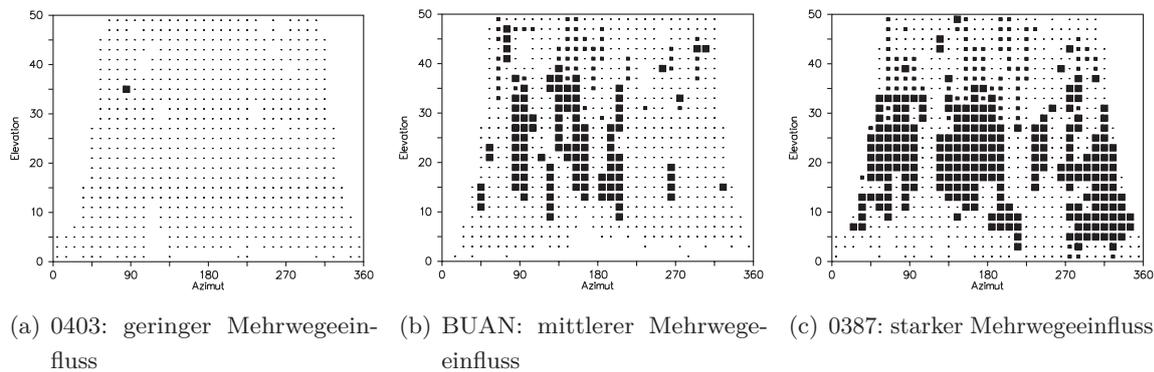


Abb. 6-5: Mehrwegeanalyse im GURN für Zeitraum DoY 127 bis 133 2012; kleines/mittleres/großes Quadrat: Daten vorhanden und geringer/mittlerer/starker Mehrwegeeinfluss für dieses Pixel

dieser Stationen im Bereich Azimut = 0 ... 360° (Rechtsachse) und Elevation = 0 ... 50° (Hochachse) dargestellt. Bei Signalen, die oberhalb einer Elevation von 50° in der Antenne eintreffen, wird in der Software davon ausgegangen, dass keine Mehrwegebelastung vorliegt. Je mehr große Quadrate für eine Station vorliegen, d.h. je „schwärzer“ der Plot ist, desto größer ist die Mehrwegebelastung. Für die Berechnung der Mehrwegeeinflüsse mit WaSoft/Multipath muss ein Netz aus mindestens drei Stationen definiert werden, deren Abstände maximal wenige 100 km betragen können. Optimal ist die Definition eines Netzes, welches aus fünf bis sieben Stationen besteht. Die Netzkonfiguration kann sich stark auf das Ergebnis der Mehrwegebelastung einzelner Stationen auswirken, so dass bei der Prozessierung überlappender Mehrwegenetze an einer Station unterschiedliche Mehrwegebelastungen durch die Software detektiert werden. Auch wenn sich diese Plots und die daraus abgeleiteten Mehrwegeindizes einer Station von Netz zu Netz unterscheiden, ist eine Grundaussage möglich, ob eine Station starken oder schwachen Mehrwegeeinflüssen unterworfen ist.

Der Zeitraum der Mehrwegeanalyse liegt zwar ein Jahr vor dem Zeitraum der Stackinguntersuchung, jedoch haben diverse andere am GIK durchgeführte Mehrwegeuntersuchungen der Stationen von *SAPPOS*[®]Baden-Württemberg und *SAPPOS*[®]Rheinland-Pfalz gezeigt, dass die verwendeten Stationen über die Jahre meist ein stabiles Mehrwegeverhalten aufweisen. Die zur Auswahl verwendeten Mehrwegeplots unterscheiden sich kaum von denen vorhergehender oder späterer Analysen. Lediglich an einzelnen Stationen konnten über die Jahre Veränderungen detektiert werden, welche zwischen zwei Mehrwegeuntersuchungen stattgefunden haben, weil beispielsweise ein Gerüst zur Gebäudesanierung in direkter Umgebung einer GNSS-Antenne montiert wurde. Daher kann die oben genannte Mehrwegeanalyse als Auswahlkriterium herangezogen werden. Zusätzlich zur Mehrwegeanalyse wurden die Koordinatenzeitreihen einer differenziellen Auswertung von GURN herangezogen, um Stationen mit einer geringen bzw. starken Streuung der Koordinaten zu detektieren. Die gewählten Stationen sind in Tab. 6-5 mit ihren Charakteristika aufgeführt. Für die Stackinguntersuchung wurden je fünf Stationen mit geringer bzw. starker Mehrwegebelastung ausgewählt. Ebenso wurde darauf geachtet, dass sowohl Stationen untersucht werden, für die eine absolute individuelle Kalibrierinformation (abs. ind.) vorliegt, als auch Stationen, für die mangels Individualkalibrierung Typmittelwerte des IGS auf Absolutniveau (abs. IGS) in die Prozessierung eingeführt werden müssen. Für Stationen mit geringer Mehrwegebelastung werden nur geringe Auswirkungen auf die Residuen und Koordinatenzeitreihen durch die Einführung gestackter Residueninformation erwartet. Für stark durch Mehrwegeeinflüsse belastete Stationen sollten die Residuen nach einer Neuprozessierung mit Einführung der gestackten Information – über die Antennenhemisphäre gesehen – ein glatteres Verhalten mit geringerer Amplitude zeigen. Ebenso weisen die Stationen eine unterschiedliche Streuung der Koordinatenzeitreihen

Tab. 6-5: Genutzte Stationen für die Stackinguntersuchung über einen längeren Zeitraum mit den Charakteristika Mehrwegebelastrung und Streuung der Koordinatenzeitreihe, sowie Antennentyp und vorliegende Kalibrierinformation: abs. ind.: Individualkalibrierung auf Absolutniveau, abs. IGS: Typmittelwerte des IGS auf Absolutniveau

Station	Mehrwegebelastrung		Streuung der Koordinaten		Antennentyp und Kalibrierinformation	
	schwach	stark	schwach	stark		
0387		✓	✓		TRM59800.00 SCIS	abs. ind.
0403	✓		✓		TRM59800.00 SCIS	abs. ind.
0515		✓	✓		LEIAT504GG NONE	abs. ind.
0529	✓		✓		LEIAT504GG LEIS	abs. ind.
AUBU		✓		✓	TRM41249.00 NONE	abs. IGS
DOCO		✓	✓		TPSCR.G3 TPSH	abs. IGS
STJ9	✓		✓		ASH701945B_M SNOW	abs. IGS
WLBH		✓		✓	ASH701933A_M NONE	abs. IGS
ZIM2	✓		✓		TRM59800.00 NONE	abs. ind.
ZIMM	✓		✓		TRM29659.00 NONE	abs. IGS

auf. Der Effekt der Einführung gestackter Information auf die Koordinatenzeitreihen wird im Folgenden analysiert. Aus den Erfahrungen der ersten Untersuchungen über einen kleinen Zeitraum ergaben sich geringe Verschiebungen einzelner Koordinatenkomponenten. Zur Untersuchung des Einflusses der Koordinatenänderungen auf die Stationsgeschwindigkeiten, welche aus den Koordinatenzeitreihen abgeleitet werden können, sind Zeitreihen von mehreren Jahren notwendig; der gewählte Untersuchungszeitraum von etwa 120 d ist zu kurz um verlässliche Stationsgeschwindigkeiten im Bereich von mm/Jahr schätzen zu können.

Als Parameter für das Stacking wurde ein gleitender Zeitraum von zehn Tagen gewählt, die Zellgröße wurde auf ein festes Zellgitter mit azimutaler/zenitaler Schrittweite von $2^\circ/1^\circ$ festgelegt. Das Raster, in dem die gestackte Residueninformation abgelegt wurde, erstreckte sich im zenitalen Bereich von $0^\circ, 1^\circ, \dots, 90^\circ$ und im azimutalen Bereich von $0^\circ, 2^\circ, \dots, 360^\circ$. Die Zelle, in der Residuen dem Rasterpunkt zugeordnet wurden, wurde durch Rasterpunkt \pm halbe Schrittweite in zenitaler und azimutaler Richtung begrenzt. Alle Residuen des gewählten Zeitraums wurden den korrespondierenden Zellen zugeordnet. Der Mittelwert aller Residuen einer Zelle wurde mit umgekehrtem Vorzeichen als gestackter Wert in einer separaten Datei abgelegt. Auf eine Anpassung des Azimutinkrements in Abhängigkeit von der Zenitdistanz mit dem Ziel flächengleicher Zellen oder eine statistische Untersuchung der innerhalb einer Zelle vorhandenen Residuen wie beispielsweise in Fuhrmann u. a. [2010] oder Fuhrmann u. a. [2014a] wurde in dieser Untersuchung verzichtet. Dadurch wurde keine Mindestanzahl an Residuen festgelegt, so dass der abgelegte Korrekturwert unter Umständen nur aus einem oder wenigen Residuen berechnet wird. Zellen, die keine Residuen enthalten, werden mit Nullen belegt.

Das Schema des gleitenden Stackings ist in Abb. 6-6 dargestellt. Nach rechts sind die einzelnen, zu stapelnden Tage aufgeführt, nach unten die jeweils um einen Tag in Richtung positiver Zeitachse verschobenen Stackingzeiträume. Die Daten in den orange hinterlegten Zellen werden gestapelt und bei der Prozessierung der Daten des grün hinterlegten Tages eingeführt. Somit werden für den zu prozessierenden Tag die Daten der zehn vergangenen Tage zum Stacking verwendet. Alternative Vorgehensweisen, bei denen der zu prozessierende Tag in der Mitte des gestackten Zeitraumes liegt oder bei denen eine festgelegte Anzahl an

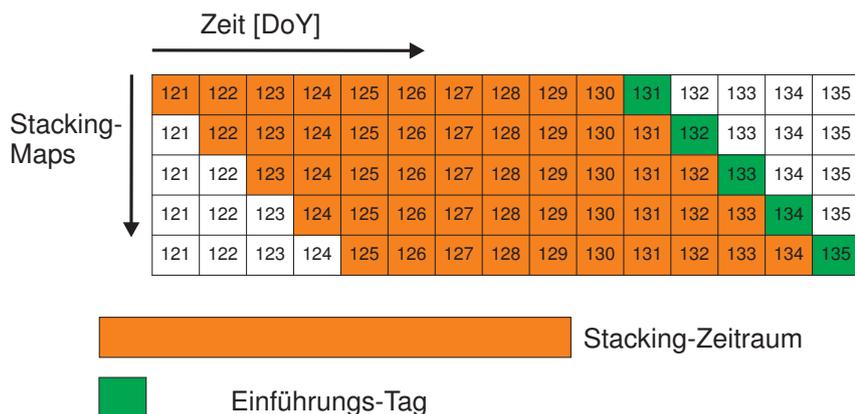


Abb. 6-6: Schema des gleitenden Stackings über einen Zeitraum von zehn Tagen

Tagen vor/nach dem zu prozessierenden Tag gestapelt wird, sind ebenfalls denkbar. Im Untersuchungszeitraum sind die Daten aller Stationen an allen Tagen vorhanden. Eine Ausnahme bilden die Stationen 0529 (DoY 180 2013 fehlt) und DOCO (DoY 232 2013 fehlt). Ein Stacking wird dennoch durchgeführt. Hierdurch kann untersucht werden, ob das Fehlen eines einzelnen Tages beim Stacking Auswirkungen auf die untersuchten Parameter zeigt.

6.2.1 Variationen der Stackingkarten über die Zeit

Bevor der Einfluss der in die Prozessierung eingeführten gestapelten Information auf die daraus resultierenden Daten (Koordinaten, Residuen, ...) untersucht wird, erfolgt zunächst die Analyse des Verhaltens der gleitend generierten Stackingmaps im Untersuchungszeitraum. Diese Untersuchung soll Aufschluss darüber geben, inwieweit die gestackten Residuen einer Station über die Zeit variieren. Für jeden zehn Tage umfassenden Stackingzeitraum wurden die Residuen jeder Station in Form eines sogenannten Skyplots dargestellt. Falls für eine Rasterzelle ein gestackter Wert vorlag, wurde diese Zelle mit dem farblich codierten Wert im Plot dargestellt. Im Folgenden wird Stackingmap durch SM, der Plural Stackingmaps durch SMs abgekürzt. Hierbei wurden unterschiedliche Skalierungen der farblichen Codierung gewählt. Um einen ersten Eindruck zu gewinnen, wurde die Skalierung auf ± 80 mm (gestackter Residuenwert auf L_3 -Niveau) gesetzt. Dadurch können in erster Linie Unterschiede zwischen gestackten Residuen niedriger (kleiner 30°) und höherer Elevation gut dargestellt werden. Erstere weisen in der Regel deutlich größere Beträge auf als letztere. Um systematische Strukturen höherer Elevation deutlicher darzustellen, wurden Plots mit einer Skalierung von ± 40 mm generiert. Die so entstandenen Darstellungen der einzelnen Zeiträume wurden zu Animationen zusammengefasst um eine erste, einfache visuelle Analyse zu ermöglichen.

In Abb. 6-7 sind die SMs der Stationen 0387, 0515 und DOCO für den Stackingzeitraum DoY 121 bis 130 des Jahres 2013 dargestellt. Für 0387 treten in dieser Darstellung systematische Effekte in diesem Zeitraum lediglich im nordwestlichen Bereich für Elevationen kleiner als 30° auf. Bei 0515 sind über den gesamten Azimutbereich in niedriger Elevation systematische Effekte geringer Ausprägung erkennbar. Zusätzlich tritt in nordöstlicher Richtung im Elevationsbereich zwischen 30° und 60° ein sich über alle untersuchten Tage wiederholendes Muster auf. An der Station DOCO ist deutlich ein Streifenmuster im östlichen bis südlichen Bereich für Elevationen unter 30° erkennbar, welches mit nur geringer Variation im gesamten Untersuchungszeitraum reproduziert werden kann. Durch die zunächst gewählte farbliche Skalierung ist für alle Stationen erkennbar, dass im untersuchten Zeitraum sichtbare Variationen zwischen einzelnen SMs vorrangig im Elevationsbereich unterhalb von ca. 30° auftreten. Wird die alternative Skalierung mit

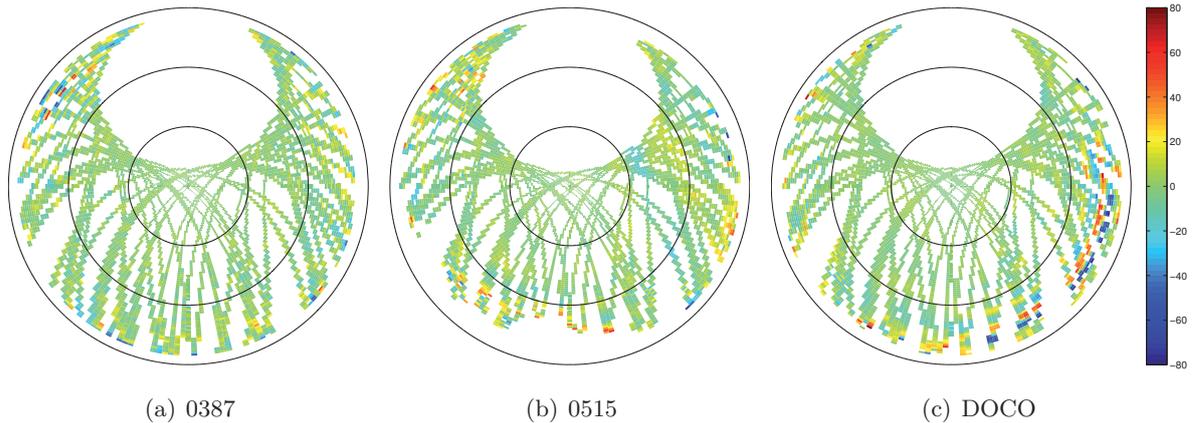


Abb. 6-7: SMs für den Zeitraum DoY 121 bis 130 2013; farbliche Skalierung: Wert des gestackten L_3 -Residuums in [mm]; konzentrische Kreise (von aussen nach innen): Elevationen 0° , 30° , 60°

± 40 mm gewählt, so lassen sich auch in höheren Elevationsbereichen Variationen feststellen, die von der Größenordnung her jedoch deutlich geringer ausfallen als die Variationen geringerer Elevationen (siehe Abb. 6-8). Generell ist jedoch festzustellen, dass bei allen untersuchten Stationen im Untersuchungszeitraum reproduzierbare Strukturen in den SMs vorhanden sind, die je nach Station stärker oder schwächer ausgeprägt sind. Größere Variationen zwischen den SMs einzelner Tage lassen sich durch die rein visuelle

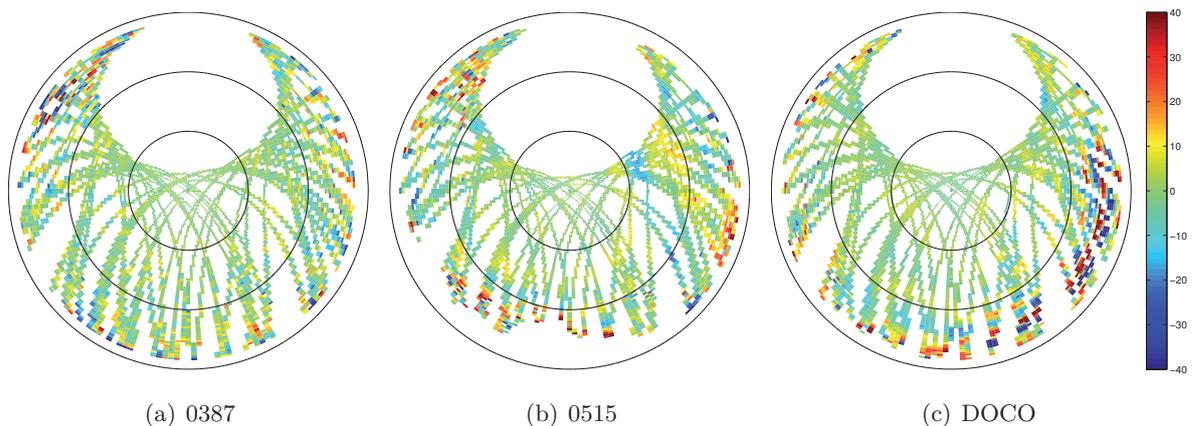


Abb. 6-8: SMs für den Zeitraum DoY 121 bis 130 2013; farbliche Skalierung: Wert des gestackten L_3 -Residuums in [mm]; konzentrische Kreise (von aussen nach innen): Elevationen 0° , 30° , 60° ; Farbskalierung gegenüber Abb. 6-7 modifiziert

Analyse der einzelnen Plots nicht detektieren. Vorrangig sind Variationen der Zellen für Elevationen kleiner als 30° erkennbar. Zur genaueren Untersuchung wurden Plots erzeugt, in welchen die Differenzen der einzelnen Zellen einer SM zur ersten vorhandenen SM einer Station berechnet werden. Zeigen sich hierbei nur marginale Unterschiede über den gesamten Zeitraum, so scheint sich die Empfangssituation der Station im Untersuchungszeitraum nicht geändert zu haben. Treten jedoch mit der Zeit immer größer werdende Differenzen auf, so deutet dies auf veränderte Empfangsbedingungen hin. Die erste vorliegende SM der untersuchten Stationen (Stackingzeitraum: zehn Tage) liegt für den Zeitraum DoY 121 bis 130 2013 vor, die letzte für DoY 231 bis 240. Um einen Eindruck der Veränderung der SMs zu gewinnen, sind in Abb. 6-9 die Differenzen der SMs der Start-DoY 122, 177 und 231 zur ersten SM (Start-DoY 121) der Station 0403 dargestellt. Im Differenzplot Abb. 6-9(a), welcher in der Zeitachse des gleitenden Stackings nur um einen Tag in positiver Richtung verschoben ist, sind nur im niedrigen Elevationsbereich Zellen erkennbar,

die deutlich von Null verschiedene Werte aufweisen. Zellen, die oberhalb einer Elevation von 30° liegen, zeigen keine erkennbaren Unterschiede. Bei größerer zeitlicher Verschiebung (56 d: Abb. 6-9(b) bzw. 110 Tage: Abb. 6-9(c)) steigt die Anzahl der Zellen, deren Werte signifikant von Null abweichen, deutlich an. Ebenso weisen Zellen größerer Elevation von Null verschiedene Werte auf. Um einen ersten Eindruck der

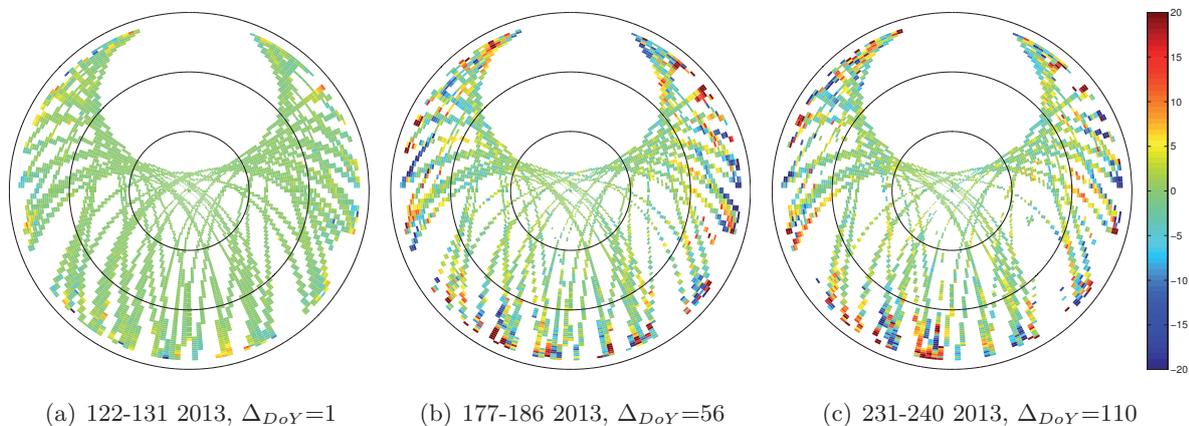


Abb. 6-9: Differenzen der SMs der Station 0403 für drei ausgewählte Stackingzeiträume zur SM für Zeitraum DoY 121 bis 130 2013; farbliche Skalierung: Wert des gestackten L_3 -Residuums in [mm]; konzentrische Kreise (von aussen nach innen): Elevationen 0°, 30°, 60°

Variation der SMs zu gewinnen, ist eine visuelle Analyse gut geeignet. Eine tiefergehende Untersuchung kann sie jedoch nicht ersetzen. Ein gutes Verfahren hierfür ist die Berechnung der Korrelation. Die gestackte Information liegt in Matrizenform vor, so dass mittels Matlab einfach die Korrelation zweier Matrizen mit der Funktion `corr2` berechnet werden kann. Ein Aufruf der Form `r = corr2(A,B)` berechnet den Korrelationskoeffizienten r der beiden Matrizen \mathbf{A} und \mathbf{B} . r kann hierbei Werte zwischen -1 und 1 annehmen, wobei 1 für eine vollständige Übereinstimmung der beiden Matrizen steht. Zur Berechnung von r wird Formel 6-1 verwendet. Die beiden Matrizen \mathbf{A} und \mathbf{B} müssen die gleiche Dimension aufweisen und alle Matrizenpositionen müssen besetzt sein.

$$r = \frac{\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})(B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{(\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})^2)(\sum_m \sum_n (B_{mn} - \bar{B})^2)}} \quad (6-1)$$

r : Korrelationskoeffizient

m, n : Zeilen-, Spaltenindex

\mathbf{A}, \mathbf{B} : Matrizen

\bar{A}, \bar{B} : Mittelwert aller Matricelemente von \mathbf{A} bzw. \mathbf{B}

Zur detaillierten Analyse der SMs wurden zwei Korrelationskoeffizienten (KK) berechnet. Um eine mögliche Degenerierung der SMs über die Zeit zu untersuchen, wurde der KK zwischen der ersten vorliegenden SM (Start-DoY 121) und jeder weiteren SM berechnet. Des weiteren wurde der KK zwischen SMs aufeinanderfolgender Stacking-Zeiträume bestimmt. Um gleichzeitig den Einfluss des Stackingzeitraumes zu untersuchen, wurden zusätzliche SMs mit einem Umfang von 20 und 50 d generiert. Die KK wurden anschließend gemeinsam in einem Plot dargestellt. Das Symbol des KK wurde jeweils am ersten Tag des Stackingzeitraumes der untersuchten SM geplottet. Die Stackingzeiträume sind hierbei farblich codiert (blau: 10 d, rot: 20 d, grün: 50 d). Für die Korrelationskoeffizienten wurden die Symbole Kreis (KK zwischen untersuchter SM und erster SM) beziehungsweise Dreieck (KK zwischen untersuchter SM und SM des

vorigen Zeitraums) gewählt. Zusätzlich wurden im Plot senkrechte gestrichelte Linien dargestellt, welche den Zeitraum begrenzen, den die erste vorhandene SM umfasst. So enthält die erste vorhandene SM des Stackingzeitraumes von zehn Tagen die Residuen der DoY 121 bis einschließlich 130, d.h. erst die an DoY 131 beginnende SM enthält Daten, die nicht in der ersten SM enthalten sind. Die Farben dieser Linien korrespondieren mit der oben genannten farblichen Codierung der Stackingzeiträume. Da auf den ersten Blick die SM lediglich für Elevationen kleiner als 30° variieren, wurden neben den KK der kompletten SMs (oberer Plot) auch die KK der SM für Elevationen $\geq 30^\circ$ berechnet (unterer Plot). Die Plots der KK für die Stationen 0515 und STJ9 sind in Abb. 6-10 dargestellt. In den Plots beider Stationen ist deutlich erkennbar,

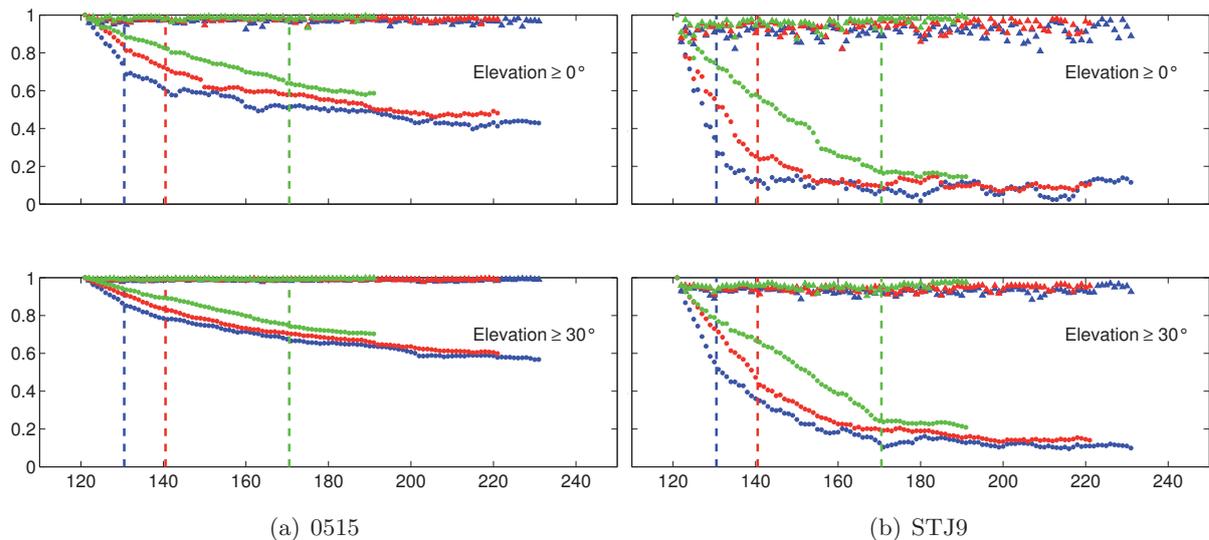


Abb. 6-10: Korrelationskoeffizienten (KK) der Stackingmaps (SMs) verschiedener Stackingzeiträume: 10/20/50 d in blau/rot/grün; Symbole: Dreieck: KK der SM aufeinanderfolgender Tage, Kreis: KK zur ersten SM, jeweils am ersten Tag der SM eingetragen; senkrechte gestrichelte Linien: Ende des Zeitraums der ersten SM; oben: komplette SM, unten: nur Bereiche der SM mit Elevationen $\geq 30^\circ$; Rechtsachse: DoY 2013, Hochachse: Korrelationskoeffizient

dass die konsekutiven SMs (Dreiecke) eine sehr große Übereinstimmung (KK nahe eins) aufweisen. Ursache hierfür ist die große identische Datenmenge, die den SMs aufeinanderfolgender Zeiträume zugrunde liegt. Bei einem Stackingzeitraum von 10/20/50 d beträgt der Überlappungszeitraum demnach 9/19/49 d, was einer identischen Datengrundlage von 90/95/98 % entspricht. Die KK des 50-tägigen Stackingzeitraumes weisen daher erwartungsgemäß im Plot die größte Korrelation auf. Konträr hierzu verhalten sich die KK einzelner SM bezogen auf die erste SM (Kreise), welche im Laufe der Zeit signifikant zurückgehen. Wichtig ist hierbei die Beachtung des Endes des Überlappungszeitraumes, d.h. ab wann in den SMs der untersuchten Stackingzeiträume keine Daten der ersten SM mehr enthalten sind. Für die SMs der kompletten Antennenhemisphäre der Station 0515 (siehe Abb. 6-10(a) oben) liegen die Korrelationskoeffizienten zwischen der ersten SM (ab DoY 121) und der ersten SM, die keine Daten des ersten Zeitraums mehr enthält, für alle untersuchten Stackingzeiträume bei ca. 0.7. Mit fortschreitender Zeit ist eine weitere Abnahme des KK sichtbar, wobei der Rückgang mit zunehmender Länge des Stackingzeitraums langsamer voranschreitet.

Während bei der Station 0515 die konsekutiven SMs eine hohe Korrelation (Mittelwerte der Stackingzeiträume 0.97/0.98/0.98 mit Standardabweichungen von jeweils 0.01) aufweisen, weichen die KK bei STJ9 signifikant stärker voneinander ab und weisen eine größere Streuung auf (Mittelwerte der Stackingzeiträume 0.91/0.94/0.96 mit Standardabweichungen von jeweils 0.3). Am Ende des Überlappungszeitraumes mit der ersten SM sind die KK auf 0.27/0.24/0.16 gesunken.

Die oben getroffene Annahme, dass die SMs lediglich für Elevationen kleiner 30° variieren, kann durch Betrachtung der KK nicht bestätigt werden, wie die unteren Plots in Abb. 6-10 belegen. Dort sind die KK für die Bereiche der SMs aufgetragen, welche Elevationen $\geq 30^\circ$ aufweisen. Auf den ersten Blick fällt der glattere Verlauf gegenüber den oberen Plots ins Auge. Außerdem ist die Änderungsrate gegenüber der ersten SM geringer, d.h. am Ende des Überlappungszeitraumes weist der KK der kompletten SM einen geringeren Wert auf als der der SM mit Elevationen $\geq 30^\circ$. Trotzdem treten auch für größere Elevationen Variationen in den SMs über die Zeit auf. Restfehler der Troposphärenmodellierung scheiden als Ursache aus (siehe auch Huisman u. a. [2009]), da dieses Verhalten ebenso für einen langen Stackingzeitraum von 50 d und an allen untersuchten Stationen auftritt.

Insgesamt betrachtet können die untersuchten Stationen – bezogen auf das zeitliche Korrelationsverhalten der SMs – in zwei Klassen eingeteilt werden: Stationen mit kleiner und Stationen mit großer Streuung der KK aufeinanderfolgender Tage. Bei den erstgenannten Stationen ist zudem ein deutlich langsamerer Rückgang der KK zwischen der ersten vorhandenen und den nachfolgenden SMs zu verzeichnen. Eine geringe Streuung der KK aufeinanderfolgender SMs sowie ein langsamer Rückgang der KK zur ersten SM spricht für eine hohe Reproduzierbarkeit der generierten SMs, d.h. die SM dieser Station weist systematische Muster auf, welche über die Zeit stabil auftreten und sich zu großen Teilen in allen SMs wiederfinden. Im gegenteiligen Fall sind auf der Station keine signifikanten Muster nachweisbar und die erzeugten SMs weisen ein mehr oder weniger zufälliges Rauschen auf. Unter Umständen wirken auf die letztgenannten Stationen keine oder nur sehr geringe stationsspezifische Einflüsse, die keiner Korrektur bedürfen. Ein Entscheidungskriterium hierbei könnte die mittlere Streuung der KK aufeinanderfolgender SMs sowie die Änderungsrate der SMs bezogen auf eine Referenz-SM darstellen. Die Untersuchung der KK zeigt jedoch auch, dass die generierten SMs kein statisches Produkt darstellen, sondern einer zeitlichen Veränderung unterliegen und daher die Nutzung gleitend erzeugter SMs sinnvoll ist.

Für diese erste Untersuchung wurde ein Zeitfenster gewählt, in welchem auf den ausgewählten Stationen keine Änderungen (beispielsweise Ausrüstungswechsel) vorgenommen wurden. Um die Entwicklung der SMs einzelner Stationen über einen längeren Zeitraum und unterschiedliche Hardware auf einer Station beurteilen zu können, müssten beispielsweise Daten in einem Zeitfenster vor und nach einem Antennenwechsel prozessiert und analysiert werden. Ein mögliches Vorgehen hierzu ist in Kap. 8.4.2 beschrieben. Ebenso ist denkbar, jeweils die Daten zweier ausgewählter Wochen in jedem Quartal ohne und mit eingeführter gestackter Information auszuwerten, um Veränderungen der Stationsqualität zu detektieren.

Neben dem Verhalten der SMs über den gesamten Untersuchungszeitraum ist auch ein Vergleich mit den Ergebnissen der Untersuchung mit WaSoft/Multipath interessant. Um diesen Vergleich visuell einfacher durchführen zu können, wurden Mehrwegeplots generiert, die von den bisher genutzten Plots (siehe Abb. 6-5) abweichen. Statt der rechteckigen Darstellung wurde nun auch die Skyplot-Darstellung gewählt. Die bisher genutzte Codierung der Stärke des Mehrwegeeinflusses über die Größe der Punkte der Gitterwerte wurde durch eine farbliche Codierung ersetzt. In den neuen Plots sind Bereiche mit geringer/mittlerer/-starker Mehrwegebelastung durch grüne/gelbe/rote Füllung der Zellen markiert. Zellen, die keine Daten aufweisen, sind weiß belassen. Um einen fairen Vergleich zwischen SM und Mehrwegeplots (Daten mit WaSoft/Multipath prozessiert) durchführen zu können, wurden Daten herangezogen, die beinahe den identischen Zeitraum abdecken. Für die SMs wurden Real-Residuen der DoY 158 bis 167 des Jahres 2013 verwendet (aus PPP-Prozessierung mit BS52), die abgebildeten Mehrwegeplots sind die aus Tageslösungen der DoY 160 bis 166 2013 abgeleiteten, gemittelten Mehrwegeplots. An dieser Stelle wird nochmals darauf hingewiesen, dass bei der PPP-Prozessierung jede Station separat ausgewertet wird, während bei der

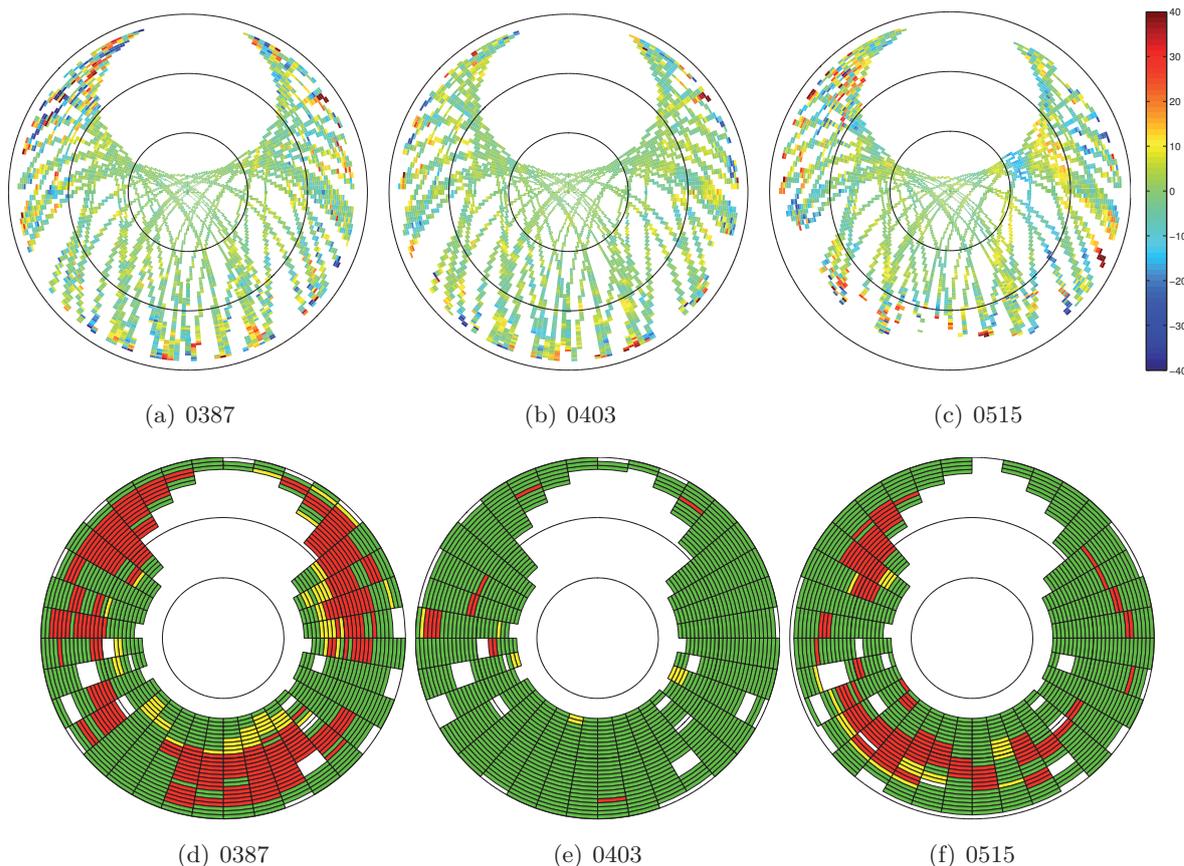


Abb. 6-11: oben: SMS des Zeitraums DoY 158 bis 167 2013; gestackte Werte in [mm]; unten: Mehrwegeanalyse in SAPOS[®]Baden-Württemberg und SAPOS[®]Rheinland-Pfalz für Zeitraum DoY 160-166 2013; Darstellung in Form von Skyplots; grün/gelb/rot: Daten vorhanden und geringer/mittlerer/starker Mehrwegeeinfluss für diese Zelle; konzentrische Kreise (von aussen nach innen): Elevationen 0°, 30°, 60°

Generierung der Mehrwegeplots immer eine differenzielle Auswertung erfolgt, wodurch Effekte, welche nur eine Station beeinflussen, durchaus auch auf andere Stationen des Netzes übertragen werden können. Beim Vergleich der SMS aus Abb. 6-11 oben mit den Mehrwegeplots aus Abb. 6-11 unten fällt zuerst auf, dass die Information in den SMS erst ab einer Elevation von 3° vorliegt (Mindestelevation bei PPP: 3°), während die Mehrwegeplots bei einer Elevation von 0° (Mindestelevation bei WaSoft/Multipath: 0°) beginnen. Die Auflösung der Stackingzellen wurde mit 2° in azimuthaler und 1° in zenitaler Richtung gewählt, die Auflösung der Mehrwegeplots beträgt 5°×2°. Die unterschiedliche Wahl der Zellgröße erklärt daher auch die vielen leeren Zellen der SM, wogegen bei der Mehrwegedarstellung, abgesehen vom sogenannten Nordloch, fast alle Zellen farbig gefüllt sind.

Für die Station 0387 (Abb. 6-11 links) ist nur in einzelnen Bereichen der Antennenhemisphäre eine gute Übereinstimmung zwischen SM und Mehrwegeplot erkennbar. Größere Bereiche mit großen Residuenwerte im nordwestlichen Bereich der SM zeigen eine gute Übereinstimmung mit rot-markierten Flächen in der Mehrwegedarstellung. Im nordöstlichen Sektor weisen einzelne Zellen der SM größere Werte auf, jedoch nicht im gleichen Umfang, wie die Mehrwegebelastung im unteren Plot dargestellt ist. Ebenso zeigt der Mehrwegeplot im südlichen Bereich dieser Station starke Belastungen, welche nur zu Teilen in der SM detektiert werden.

Bei der Station 0403 zeigt Mehrwegeplot (Abb. 6-11(e)) nur eine sehr geringe Belastung (nur wenige rote Zellen). Die korrespondierende SM weist ebenfalls nur wenige Bereiche mit extremen Residuenwerten auf, jedoch existieren in der SM dieser Station auch Bereiche der Antennenhemisphäre, die ein systematisches Verhalten zeigen. In Ost-Richtung, bei einer Elevation von ca. 10° bis 20° , ist ein größerer Bereich gelb markiert. Ebenso ist bei genauem Hinsehen in südwestlicher Richtung bei etwa 50° Elevation ein schwaches Streifenmuster erkennbar, bei dem sich Gelb- und Türkistöne abwechseln. In der GNSS-Fachliteratur (beispielsweise [Rost u. Wanninger, 2009, S. 85]) werden als Verursacher eines derartigen Streifenmusters der Residuen Mehrwegeeffekte genannt.

Bei der Station 0515 ist zunächst auffallend, dass im Mehrwegeplot (Abb. 6-11(f)) vom südöstlichen bis zum westlichen Bereich deutlich mehr Zellen im Elevationsbereich unter 30° farbig dargestellt sind als in der zugehörigen SM. Entweder werden durch die unterschiedliche Zellgröße im Mehrwegeplot mehr Zellen in niedriger Elevation belegt, die jedoch nur sehr wenige Daten enthalten, oder es liegen für diese Station Daten in diesem Bereich vor, welche jedoch eine schlechte Qualität aufweisen und daher von der in der PPP-Auswertung genutzten Software (BS52) eliminiert, von der Mehrwegesoftware (WaSoft/Multipath) jedoch akzeptiert wurden. In der SM dieser Station ist in Richtung Ostnordost im Elevationsbereich zwischen etwa 30° und 60° ein reproduzierbares Muster erkennbar, welches im Mehrwegeplot nicht in Erscheinung tritt bzw. bei der zugehörigen Datenanalyse nicht als Mehrwegeeffekt ausgewiesen wird. Als Ursache hierfür könnten äußere Effekte oder auch Abweichungen des realen Empfangsverhaltens der GNSS-Antenne vom eingeführten Antennenmodell (absolute, individuelle Kalibrierung) in Betracht kommen. Zudem wird bei WaSoft/Multipath die Annahme getroffen, dass Signale, welche aus Elevationen über 50° eintreffen, frei von Mehrwegeeffekten sind. Im südwestlichen Bereich sind jedoch Ähnlichkeiten zwischen SM und Mehrwegeplot erkennbar, ebenso im nordwestlichen Sektor der Antennenhemisphäre.

Insgesamt betrachtet zeigt der Vergleich der SMs mit den Mehrwegeplots ein gemischtes Bild: In manchen Bereichen besteht eine gute Übereinstimmung, während andere Bereiche wieder deutliche Unterschiede zeigen. Dies kann einerseits an der unterschiedlichen Ausrichtung der zugrundeliegenden Analyse liegen: WaSoft/Multipath ist speziell auf die Detektion von Mehrwegeeffekten zugeschnitten, bei der Erzeugung der SMs werden die aus der PPP-Prozessierung stammenden Real-Residuen zellbasiert gemittelt. Außerdem wird im einen Fall eine differenzielle und im anderen Fall eine PPP-Auswertung verwendet. Ergänzend muss erwähnt werden, dass bei der PPP-Prozessierung individuelle Kalibrierwerte auf Absolutniveau für die drei abgebildeten Stationen 0387, 0403 und 0515 verwendet werden, in der Auswertung mit WaSoft/Multipath jedoch keine Antennenmodelle verwendet wurden. Eine Neuauswertung der Mehrwegeanalyse mit Einführung von Kalibrierinformation und Vergleich Ergebnisse erscheint daher sinnvoll, wurde im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht durchgeführt.

6.2.2 Auswirkungen auf die Residuen

Nach der Untersuchung des Verhaltens der gestackten Residuen über den Untersuchungszeitraum werden im Folgenden Parameter analysiert, die durch Prozessierung ohne/mit Nutzung der gestackten Information bestimmt wurden. Zunächst wird visuell der Einfluss der gestackten Information auf die originären Residuen analysiert, bevor auf den gemittelten Residuenwert und die Anzahl der Residuen eingegangen wird. Anschließend erfolgt eine vergleichende Analyse der Residuen ohne/mit Einführung der gestackten Information. Um einen ersten Eindruck über die Auswirkungen der Einführung gestapelter Information auf die am Ende der Prozessierung ausgegebenen Residuen zu gewinnen, wurden Plots generiert, die auf der linken Seite die Residuen aus der Prozessierung ohne gestackte Information („roh“) und auf der

rechten Seite die Residuen aus der Auswertung unter Nutzung der gestackten Information („gestackt“) des identischen Tages zeigen. Beispielhaft wurden hierzu die beiden Stationen 0515 und ZIM2 ausgewählt (siehe Abb. 6-12). Bei Station 0515 ist im nordöstlichen Sektor des linken Plots (Auswertung ohne Einführung

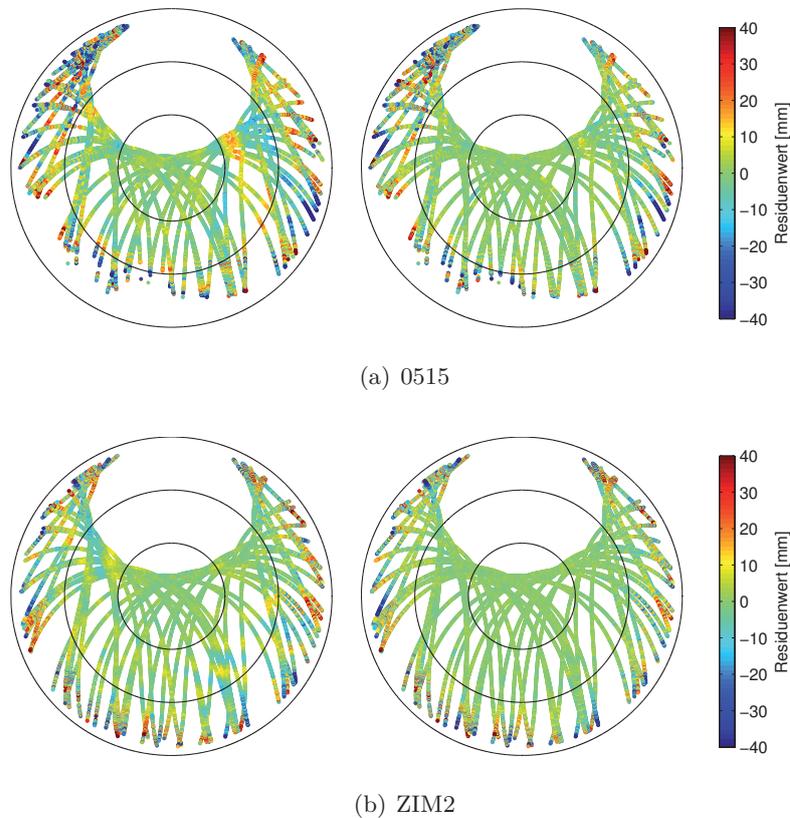


Abb. 6-12: Vergleich der Residuen aus einer Auswertung ohne (links) und mit (rechts) Einführung gestackter Information für DoY 131 2013 für die Stationen 0515 (oben) und ZIM2 (unten)

gestackter Information) von Abb. 6-12(a) das bereits oben bei der Analyse der SMs angesprochene, deutlich erkennbare Muster bei einer Elevation von ca. 50° gut zu sehen. Dieses verschwindet durch die Einführung der SM, welche aus den Residuen der zehn vorangegangenen Tage berechnet wurde, beinahe vollständig. Ein ähnliches, von der Ausdehnung her etwas kleineres Muster im nordwestlichen Bereich bei einer Elevation von ca. 40° wird ebenso stark geschwächt. Ebenso ist in anderen Bereichen der Antennenhemisphäre eine sichtbare Veränderung der Residuen von Werten, deren Betrag deutlich von Null verschieden war, hin in Richtung Null erkennbar. Für Elevationen unter 30° sind kleinere Änderungen erkennbar, jedoch treten nach wie vor Residuenwerte auf, die sich deutlich von Null unterscheiden.

Bei ZIM2 sind im Residuenplot der Auswertung ohne Einführung gestackter Information (Abb. 6-12(b), links) signifikante Muster an verschiedenen Stellen der Antennenhemisphäre erkennbar, wie beispielsweise ein Streifenmuster im südöstlichen Sektor zwischen 30° und 60° Elevation oder eine Signatur im gleichen Elevationsbereich des nordwestlichen Sektors. Diese Strukturen verschwinden durch die Verwendung gestackter Information beinahe vollständig (siehe Abb. 6-12(b), rechts). Die Variationen der Residuen im niedrigen Elevationsbereich dieser Station werden jedoch nicht vollständig beseitigt.

Prinzipiell ist die hier gewählte, einfache Form des Stackings in der Lage, systematische Effekte der Residuen zu beseitigen und dadurch eine Verkleinerung der Residuen zu erzielen. Unter Verbesserung

ist hierbei eine Korrektur der Residuenwerte in Richtung Null, sowie ein Verbleib von mehr Residuen in der Auswertung zu verstehen. Auf Letzteres wird in späteren Untersuchungen eingegangen. Für die weitere Analyse der Residuen wurden Grafiken erstellt, die für den untersuchten Zeitraum den Mittelwert und die Gesamtzahl der Residuen enthalten. In den Plots wurde jeweils die Prozessierung ohne/mit (Bezeichnung in Grafiken: „roh“ bzw. „gestackt“) Einführung der gestapelten Residueninformation getrennt dargestellt. Ebenso ist die Differenz der Residuenanzahl für alle Residuen und in Elevationsstufen aufgeteilt abgebildet. In Abb. 6-13(a) und 6-13(b) sind die Residuenergebnisse für die beiden Stationen 0403 und WLBH dargestellt. Sie unterscheiden sich bereits auf den ersten Blick deutlich. Die später beginnende Zeitreihe der gestackten Residuen (mit Nutzung der gestackten Information) ist darin begründet, dass die ersten zehn Tage der rohen Zeitreihe (ohne Nutzung der gestackten Information) für die Generierung der SM genutzt wurden, welche dann am elften Tag in die Prozessierung eingeführt wurde. Somit liegen erst ab dem elften Tag Prozessierungsergebnisse unter Nutzung der gestackten Information vor.

Während der Mittelwert der Residuen (obere Plots in Abb. 6-13) für WLBH über den gesamten Zeitraum weitgehend stabil bleibt, sowohl für die rohe als auch die gestackte Variante, variiert dieser für 0403 deutlich stärker. Die Gesamtzahl der Residuen (mittlere Plots in Abb. 6-13) bleibt für 0403 weitgehend unverändert, während bei WLBH in der Variante unter Nutzung der gestackten Information deutlich mehr Residuen vorhanden sind. Mehr vorhandene Residuen in der Prozessierung mit gestackter Information bedeutet, dass vom eingehenden Datenmaterial weniger Beobachtungen im Laufe der Prozessierung eliminiert werden. Auffallend ist bei der Residuenanzahl von 0403, dass ab DoY 173 signifikant mehr Beobachtungen

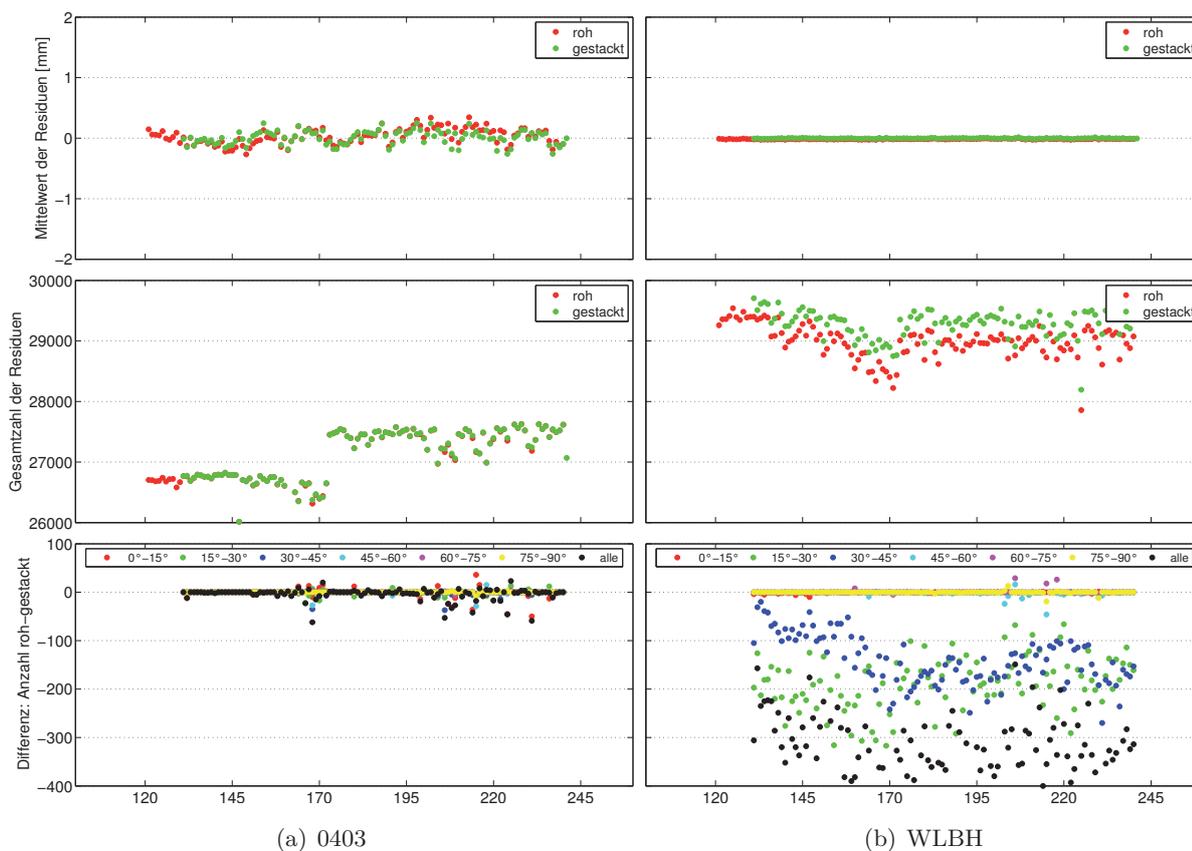


Abb. 6-13: Residuenanalyse ohne/mit Einführung gestackter Information im Zeitraum DoY 121-240 2013; oben: gemittelter Wert über alle Residuen [mm]; Mitte: Gesamtzahl der Residuen; unten: Differenz der Residuenanzahl: roh minus gestackt, nach Elevationsstufen (farbliche Codierung siehe Grafik in unterster Zeile) und für alle Residuen (schwarz)

vorhanden sind. Dieses Verhalten ist auch bei anderen Stationen vorhanden. Zur Klärung dieser Tatsache wurden die eingehenden RINEX-Beobachtungsdateien mit dem frei verfügbaren Softwaretool TEQC (Estey u. Meertens [1999]) einem sogenannten „quality check“ unterzogen, bei dem verschiedenste Informationen der RINEX-Datei entnommen werden. Dies sind beispielsweise Start- und Endzeit der vorliegenden Beobachtungen, die verwendete Ausrüstung, aber auch Informationen darüber, welche GNSS-Satelliten aufgezeichnet wurden. Da in dieser Arbeit nur Daten der GPS-Satelliten verwendet werden, ist in diesem Fall die unter „NAVSTAR GPS SVs w/o OBS“ abgelegte Information von Interesse, welche die GPS-Satelliten ausgibt, für die keine Beobachtungsdaten vorliegen. TEQC besitzt keine Benutzeroberfläche, sondern wird über die Kommandozeile ausgeführt und eignet sich daher sehr gut zur Bearbeitung vieler einzelner Beobachtungsdateien mittels Batch-Skripten. Neben der Extraktion von Information aus den RINEX-Dateien können mit TEQC auch Veränderungen in den Dateien (beispielsweise Korrektur von Header-Einträgen) vorgenommen werden. In Tab. 6-6 sind ausschnittsweise die Ergebnisse dieser Analyse für alle untersuchten Stationen abgelegt. Ein Blick auf die Tabelle zeigt, dass bei den meisten Stationen ab DoY 173 ein Satellit weniger fehlt als noch am Tag zuvor. Anscheinend tracken viele Stationen seit DoY 173 den GPS-Satelliten 27. Interessant ist jedoch, dass AUBU, ZIM2 und ZIMM bereits früher Daten dieses Satelliten aufzeichnen. Ebenso wird der GPS-Satellit 32 nicht von den Stationen AUBU, STJ9 und WLBH getrackt, obwohl dieser von allen anderen Stationen über den gesamten Zeitraum aufgezeichnet wird. In ZIMM fehlt der GPS-Satellit 27 in den RINEX-Beobachtungsdaten lediglich im Zeitraum DoY 127 bis 150. Ein unterschiedliches Empfangsverhalten verschiedener Empfängertypen scheidet als Ursache aus, da beispielsweise auf AUBU, STJ9, WLBH und ZIMM der identische Empfänger zum Einsatz kommt, die Anzahl fehlender GPS-Satelliten jedoch unterschiedlich ist. Die Firmware der drei erstgenannten Stationen ist Version „1.1-3“, auf ZIMM wurde zum Zeitpunkt der Untersuchung die Firmware „Nav 1.20“ eingesetzt. Möglicherweise spielt neben dem eingesetzten Empfänger auch die auf der Station montierte GNSS-Antenne, welche auf allen vier Stationen unterschiedlichen Typs ist, eine Rolle. Welche individuellen Aufzeichnungsparameter auf den einzelnen Stationen eingestellt waren, lässt sich aus den vorhandenen Daten nicht rekonstruieren. Die Erklärung für das unterschiedliche Empfangsverhalten konnte durch NANU-Meldungen (Notice Advisory to Navstar Users) zum Zustand von GPS gefunden werden. Diese können unter <http://www.navcen.uscg.gov/?pageName=selectNanuByNumber> (Stand: 09.02.2015) abgerufen werden. Der Satellit mit der Bezeichnung PRN27 wurde an DoY 135 2013 ins Weltall befördert (NANU 2013031) und sein Zustand an DoY 172 2013 auf „usable“ gesetzt (NANU 2013035). Die Aufzeichnungseinstellungen des Empfängers von bspw. der Station ZIMM scheinen so gesetzt zu sein, dass dort die Daten aller verfügbaren GPS-Satelliten – unabhängig von ihrem Zustand – aufgezeichnet werden. Der Zustand des Satelliten mit der Bezeichnung PRN30 wurde an DoY 121 2013 auf „decommissioned“ gesetzt, da er zuvor wiederholt kurzzeitig ausgefallen war (NANU 2013027). In den unteren Plots von Abb. 6-13 sind die Differenzen „roh minus gestackt“ nach verschiedenen Elevationsstufen getrennt aufgeführt. Hieraus kann abgeleitet werden, in welchen Elevationsbereichen ein Zuwachs an Residuen bei der Nutzung gestackter Information zu verzeichnen ist, was sich letztendlich auch auf die geschätzten Koordinaten auswirken kann (Untersuchung im folgenden Unterkapitel). Da sich bei Station 0403 durch die Einführung gestackter Information die Gesamtzahl der Residuen nur unwesentlich ändert, ist auch keine signifikante Zunahme der Residuenanzahl in den einzelnen Elevationsstufen zu verzeichnen. Ebenso wird der Mittelwert der Residuen nur geringfügig durch die Einführung gestackter Information modifiziert, so dass davon auszugehen ist, dass keine signifikanten Änderungen in den Koordinaten dieser Station zu erwarten sind. Hiervon unterscheidet sich die Residuenentwicklung auf Station WLBH stark. Im Elevationsbereich zwischen 0° und 15° sowie oberhalb von 45° ist keine signifikante Änderung detektierbar, im Bereich zwischen 15° und 30° (grüne Punkte) sowie im Bereich zwischen 30° und 45° (blaue Punkte) ist eine deutliche Zunahme der Residuenanzahl zu verzeichnen, was sich auch auf die Gesamtzahl der Residuen (schwarze Punkte) auswirkt. Zudem nimmt bei WLBH die Anzahl der Residuen im Elevationsbereich zwischen 30° und 45° im Zeitraum zwischen DoY 130 und 170 zu. Ähnliches ist für die Station AUBU

Tab. 6-6: Auflistung der fehlenden GPS-Satelliten in RINEX-Beobachtungsdateien, extrahiert mit TEQC (Estey u. Meertens [1999])

DOY	0403	0515	0529	AUBU	DOCO	STJ9	WLBH	ZIM2	ZIMM
	Trimble	Leica	Leica	Trimble	TPS	Trimble	Trimble	Trimble	Trimble
	NETR5	GRX1200	GRX1200	NETRS	NETG3	NETRS	NETRS	NETR5	NETRS
		GGPRO	+GNSS						
121	27,30	27,30	27,30	30,32	27,30	27,30,32	27,30,32	27	
122	27,30	27,30	27,30	30,32	27,30	27,30,32	27,30,32	27	
123	27,30	27,30	27,30	30,32	27,30	27,30,32	27,30,32	27	
124	27,30	27,30	27,30	30,32	27,30	27,30,32	27,30,32	27	
125	27,30	27,30	27,30	30,32	27,30	27,30,32	27,30,32	27	
126	27,30	27,30	27,30	30,32	27,30	27,30,32	27,30,32	27	
.
.
169	27,30	27,30	27,30	30,32	27,30	27,30,32	27,30,32	30	30
170	27,30	27,30	27,30	30,32	27,30	27,30,32	27,30,32	30	
171	27,30	27,30	27,30	30,32	27,30	27,30,32	27,30,32	30	30
172	27,30	27,30	27,30	30,32	30	27,30,32	27,30,32	30	30
173	30	30	30	32	30	30,32	30,32	30	30
174	30	30	30	32	30	30,32	30,32	30	30
175	30	30	30	32	30	30,32	30,32	30	30
176	30	30	30	32	30	30,32	30,32	30	30
177	30	30	30	32	30	30,32	30,32	30	30
178	30	30	30	32	30	30,32	30,32	30	30
.
.

sichtbar und wird nachfolgend genauer untersucht. Ein ähnliches Verhalten wie bei WLBH ist auch bei der Station 0515 zu beobachten, wobei dort auch im Elevationsbereich zwischen 45° und 60° signifikant mehr Residuen bei Nutzung der gestackten Information vorhanden sind, jedoch keine signifikante Zunahme der Residuenanzahl einzelner Elevationsbereiche erkennbar ist. Auf den Stationen 0387, DOCO, STJ9, ZIM2 und ZIMM sind nur geringe Unterschiede in der Residuenanzahl festzustellen.

Die Station AUBU zeigt eine ähnliche Zunahme der Residuenanzahl wie WLBH, jedoch nimmt bei WLBH die Anzahl der durch die Einführung von Stacking in die Prozessierung zusätzlich vorhandenen Residuen kein annähernd konstantes Niveau über den gesamten Untersuchungszeitraum an (vgl. Niveau der schwarzen Punkte im untersten Plot von Abb. 6-13(b) bei ca. -300), sondern steigt zwischen DoY 131 und etwa DoY 160 allmählich von ca. -150 auf ca. -280 an. Eine signifikante Änderung der Gesamtresiduenanzahl wie beispielsweise bei Station 0403 (siehe Abb. 6-13(a)) ist über den Untersuchungszeitraum nicht zu verzeichnen, jedoch ist im Bereich von DoY 170 ein kurzzeitiger Rückgang der Residuenanzahl erkennbar, welche nach DoY 172 wieder auf das ursprüngliche Niveau zurückgeht. Auffällig ist außerdem, dass die Differenz der Residuenanzahl (roh minus gestackt) vom Beginn der Residuenzeitreihe bis etwa DoY 170 zunimmt. Ein ähnliches Verhalten konnte bereits bei WLBH beobachtet werden. Zur detaillierteren Untersuchung dieses Sachverhaltes wurden neue Plots erstellt, welche die Differenz der Residuenanzahl getrennt nach einzelnen Azimut- und Elevationsbereichen darstellen. Hiermit wird untersucht, ob die Zunahme der Residuenanzahl einem bestimmten Richtungssektor zugeordnet werden kann. Diese Plots sind für die Stationen AUBU und

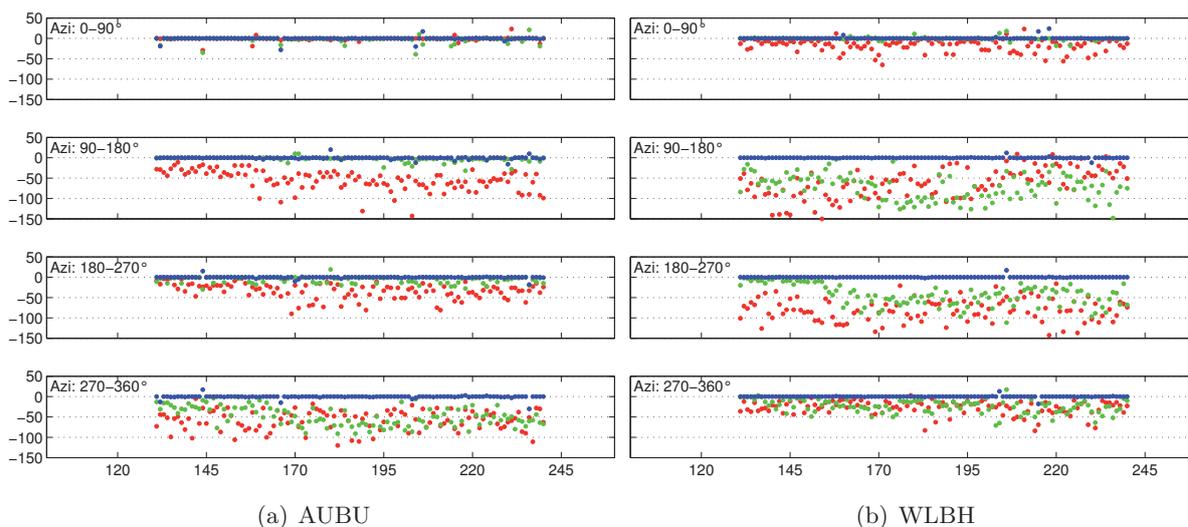


Abb. 6-14: Differenz der Residuenanzahl ohne minus mit Einführung gestackter Information im Zeitraum DoY 131-240 2013; Unterteilung in Azimutbereiche (Zeilen der Grafik) und Elevationsbereiche (farbliche Codierung) mit 0° – 30° (rot), 30° – 60° (grün), 60° – 90° (blau)

WLBH in Abb. 6-14 dargestellt. In den SMs von AUBU und WLBH ist im Untersuchungszeitraum visuell keine signifikante Veränderung festzustellen. Bei der Station AUBU ist hierbei im azimutalen Sektor 0° – 90° keine signifikante Änderung der Residuenanzahl erkennbar. An wenigen Tagen ist in einzelnen Elevationsbereichen sogar eine Abnahme der Residuenanzahl (Differenz positiv) durch die Einführung gestackter Information (beispielsweise DoY 236 für Elevationsbereich 30° – 60° , grüner Punkt) zu verzeichnen. Hiervon unterscheiden sich die restlichen azimutalen Sektoren dieser Station. Während im Elevationsbereich größer als 60° (blaue Punkte) kaum eine erkennbare Änderung der Residuenanzahl auftritt, sind in den niedrigeren Elevationen in den meisten Fällen mehr Residuen in der Prozessierungsvariante mit Einführung gestackter Information vorhanden (Differenz negativ). Im südöstlichen Sektor (Azimutbereich 90° – 180°) sind für Elevationen kleiner als 30° (rote Punkte) mehr Residuen durch die Nutzung der gestackten Information vorhanden. Hierbei ist eine Zunahme der Residuenanzahl in diesem Sektor bis etwa DoY 160 erkennbar. Geringere Auswirkungen sind im südwestlichen Bereich sichtbar, in dem für die Elevationsbereiche 0° – 30° und 30° – 60° mehr Residuen vorhanden sind, wobei die Zunahme im zweitgenannten Bereich geringer ausfällt. Im nordwestlichen Sektor sind für Elevationen bis 60° mehr Residuen vorhanden, wobei bis ca. DoY 170 auch ein geringer Anstieg der verbleibenden Residuenanzahl im Elevationsbereich 30° – 60° erkennbar ist.

Während bei AUBU im nordöstlichen Sektor die Einführung gestackter Information keine signifikante Erhöhung der Residuenanzahl hervorruft, sind bei WLBH (siehe Abb. 6-14(b)) im Elevationsbereich unter 30° mehr Residuen verfügbar. Bei größeren Elevationen ist in diesem azimutalen Sektor keine deutliche Verbesserung erkennbar. Im azimutalen Bereich zwischen 90° und 180° sind sowohl für den Elevationsbereich 0° – 30° , als auch für 30° – 60° durch die Nutzung der SMs in der zweiten Auswertung deutlich mehr Residuen vorhanden. Im durch grüne Punkte dargestellten Elevationsbereich (30° – 60° Elevation) ist eine geringe Zunahme der Residuenanzahl zwischen DoY 131 und 170 feststellbar (Differenz Anzahl roh minus gestackt sinkt von ca. -50 auf ca. -100 , ab etwa DoY 200 scheint der Betrag der Differenz wieder etwas kleiner zu werden). Signifikant ist der positive Effekt der Zunahme der Residuenanzahl durch die gestackte Information im südwestlichen Sektor für Elevationen bis 60° . Während für den im Plot rot dargestellten Elevationsbereich kein wahrnehmbarer Trend im untersuchten Zeitraum erkennbar ist, wird die Differenz zwischen der Residuenanzahl ohne/mit gestackter Information für den durch grüne Punkte repräsentierten Elevationsbereich in diesem Sektor ab etwa DoY 150 größer. Im nordwestlichen Sektor

(azimutaler Bereich zwischen 270° und 360°) ist für Elevationen bis 60° eine geringe, jedoch signifikante Zunahme der Residuenanzahl erkennbar.

Bezogen auf das Verhalten der Zunahme der Residuenanzahl durch die Einführung gestackter Information über die Zeit können die untersuchten Stationen in zwei Gruppen eingeteilt werden: Erstens die Stationen mit nicht signifikanter oder nur sehr geringer Zunahme und zweitens die Stationen mit deutlichem Zuwachs an Residuen. Wie vorangehend beschrieben kann die letzte Gruppe nochmals unterteilt werden in Stationen, deren Residuenzuwachs über die Zeit – abgesehen vom Rauschen der Residuenzeitreihe – quasi konstant ist und in Stationen, deren Residuenzuwachs über die Zeit variabel ist (z.B. AUBU und WLBH). Eine Erklärung für das auffällige Verhalten der letztgenannten Stationen kann durch die Örtlichkeit gegeben werden. Während beinahe alle anderen Stationen einen weitgehend abschattungsfreien Antennenhorizont aufweisen (Montage auf Hausdächern bzw. Pfeiler in vegetations- und bebauungsarmer Umgebung), sind AUBU und WLBH durch Pfeiler realisiert, die zum großen Teil von Wald umgeben sind. Für die Station WLBH liegt eine von EOST zur Verfügung gestellte Panoramaaufnahme vor, in welche vom Verfasser – basierend auf frei im Internet verfügbarer Luftbildinformation (beispielsweise <http://www.bing.com/maps/?mkt=de-de>, Stand: 18.11.2014) – die ungefähren Himmelsrichtungen eingetragen wurden (siehe Abb. 6-15). Die Topographie des Geländes (Anstieg des Geländes von Ost nach West) ist in der Panoramaaufnahme nur schwer erkennbar. Diese Aufnahme belegt die auch in den Plots der



Abb. 6-15: Panoramaaufnahme vom Pfeilerstandort der Station WLBH (zur Verfügung gestellt von EOST), ergänzt um ungefähre Himmelsrichtungen aus frei im Internet verfügbaren Luftbildern

Rohresiduen erkennbare Abschattungssituation, durch die in vielen azimutalen Bereichen keine Beobachtungen unterhalb einer Elevation von ca. 20° aufgezeichnet werden. Mit großer Wahrscheinlichkeit wird die zeitliche Veränderung der Residuenanzahl durch das Wachstum der Vegetation im Untersuchungszeitraum verursacht. Der in den Plots dargestellte Zeitraum beginnt bei DoY 131 2013 (11.05.2013) und endet bei DoY 240 2013 (28.08.2013). Während Abschattungen, welche durch ganzjährig belaubte Nadelbäume verursacht werden, abgesehen vom Größenwachstum der Bäume im Jahresverlauf, annähernd konstant bleiben, sind die Einflüsse durch laubabwerfende Gehölze variabel. Während der Vegetationsperiode werden GNSS-Signale hierbei vorwiegend durch das Laub verrauscht bzw. abgeschattet. In der vegetationslosen Zeit geht die nur durch Laubgehölze verursachte Beeinflussung bzw. Abschattung weitgehend zurück, so dass nur der Einfluss von Stamm und Ästen verbleibt. Die Differenz zwischen der Residuenanzahl ohne/mit Nutzung gestackter Information bei der Prozessierung müsste daher für Bereiche der Antennenhemisphäre, in denen nur Einflüsse durch laubabwerfende Gehölze verursacht werden, vom Frühjahr bis Sommer größer werden, während sie zwischen Sommer und Spätherbst wieder geringer werden müsste.

Zur besseren Identifikation der Richtung, aus der die Signale, welche als zusätzliche Residuen in der Auswertung mit gestackter Information verbleiben, in der Empfangsantenne eintreffen, wurden weitere Plots erstellt (siehe Abb. 6-16). In diesen Skyplots ist die Antennenhemisphäre in vier azimutale Sektoren aufgeteilt, welche wiederum in jeweils drei Elevationsbereiche unterteilt sind. Die prozentuale Zunahme der Residuenanzahl gegenüber der Prozessierung ohne gestackte Information ist farblich codiert (Farbzuordnung siehe Bildunterschrift). Die schwarzen Punkte markieren die zusätzlich durch den positiven Einfluss der gestackten Daten in der Auswertung verbleibenden Residuen. Die steigende Differenz der

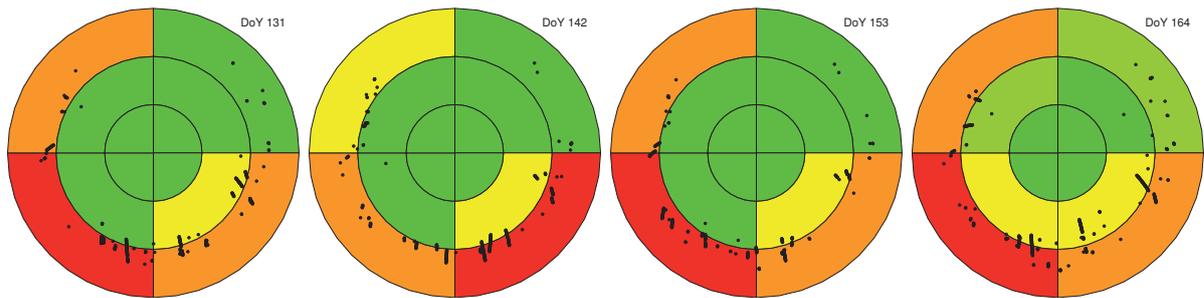


Abb. 6-16: Station WLBH: nach Sektoren unterteilte Zunahme der Residuenanzahl nach Einführung gestackter Information gegenüber roher Prozessierung an DoY 131, 142, 153, 164 2013; grün/hellgrün/gelb/orange/rot: Zunahme um 0–1%/1–2%/2–5%/5–10%/>10%; azimuthale Aufteilung: 0°–90°, 90°–180°, 180°–270° und 270°–360°; Elevationsstufen: 0°–30°, 30°–60° und 60°–90°; schwarze Punkte: durch Stacking in Auswertung hinzugekommene Residuen

Residuenanzahl der Station WLBH im Elevationsbereich 30°–60° (grüne Punkte in Abb. 6-14) im südwestlichen Sektor ab etwa DoY 150, wird aller Wahrscheinlichkeit nach durch die Zunahme der Belaubung des im Panoramabild in Richtung Süd-Süd-West stehenden Laubbaumes verursacht. Während bei der originären Prozessierung die vorhandenen, jedoch mit fortschreitendem Jahresverlauf durch die zunehmende Belaubung verrauschteren Signale im Laufe der Auswertung eliminiert werden, kann die Einführung gestackter Information diesen Einfluss reduzieren, so dass die Signale, welche aus dieser Richtung in der Empfangsantenne eintreffen, in der Auswertung verbleiben. Die Größenordnung der Residuenanzahl im gleichen azimuthalen Bereich, welche für Elevationen unter 30° durch die gestackte Information zusätzlich vorhanden sind, ist über die Zeit annähernd konstant. Die Signale aus dieser Richtung durchlaufen die dort stehenden Nadelbäume. Signale, die den Wipfelbereich dieser Bäume passieren und stark verrauscht vom Empfänger aufgezeichnet werden, fallen in der rohen Prozessierung heraus, durch die Korrektur mittels Stacking können jedoch deutlich mehr dieser Signale genutzt werden. Da sich die Belaubungssituation dieser Bäume im Jahresverlauf nicht verändert, weist die Zunahme der Residuenanzahl in diesem Sektor durch die Einführung gestackter Information ein nur durch Streuung variierendes, hohes Niveau auf. Zur Verifikation dieser Annahmen müssten die an die Zeitreihe anschließenden Daten prozessiert werden, um nachzuweisen, dass die Differenz der Residuenanzahl zwischen den mit rohen und mit gestackten Daten durchgeführten Auswertungen, im Herbst in den beschriebenen Sektoren zurückgeht.

Durch den für diese Untersuchung gewählten Stackingzeitraum von zehn Tagen kann die Entwicklung der Vegetation in den SMs erfasst werden, während bei der Wahl deutlich größerer Zeiträume eine Verschmierung der gestackten Information stattfindet, durch die die variablen vegetativen Einflüsse nicht erfasst und korrigiert werden könnten. Die Wahl der Länge des Stackingzeitraums hängt daher von den auf die Stationen eines Netzes wirkenden äußeren Einflüssen ab. Bei Einflüssen durch Vegetation sollten daher in der Regel kürzere Stackingzeiträume gewählt werden, um die Variation des Bewuchses über die Zeit besser erfassen zu können. Werden die stationsspezifischen Einflüsse vorrangig durch das bauliche Umfeld (nähere und entferntere Umgebung) hervorgerufen, kann ein größerer Zeitraum gewählt werden, über den ein Stacking stattfindet. Die Festlegung des Stackingzeitraums hängt daher auch von den zu erwartenden Einflüssen und dem Umfeld der Stationen des zu prozessierenden Netzes ab. Die Wahl eines einheitlichen Zeitraums für alle Stationen eines Netzes kann daher unter Umständen zu nicht optimalen Ergebnissen an einzelnen Stationen führen. In Tab. 6-7 ist die Residuenentwicklung für alle ausgewählten Stationen im Untersuchungszeitraum dargestellt. Sie enthält für die beiden Prozessierungsvarianten (roh, gestackt) die Mittelwerte aller Residuen einer Station über den gesamten Zeitraum (Spalten 2 und 3), die gemittelte Gesamtzahl aller Residuen einer Station (Spalten 4 und 5), sowie die prozentuale Zunahme der

Tab. 6-7: Residuenentwicklung im Zeitraum DoY 131-240 2013, gemittelt über alle Tage, inklusive Standardabweichung

Station	Mittel aller Residuen [mm]		Gesamtzahl aller Residuen		Zunahme der Residuenanzahl [%]							
	roh	gestackt	roh	gestackt	0°-15°	15°-30°	30°-45°	45°-60°	60°-75°	75°-90°	gesamt	
0387	-0.04±0.13	-0.01±0.11	26885± 432	26910± 431	0.13±0.19	0.17±0.24	0.07±0.17	0.03±0.10	0.02±0.17	0.00±0.05	0.09±0.10	
0403	0.03±0.13	0.01±0.12	27031± 798	27035± 798	0.03±0.18	0.01±0.07	0.02±0.10	0.02±0.10	0.00±0.03	0.00±0.04	0.02±0.05	
0515	-0.10±0.08	0.00±0.07	24204± 387	24426± 372	0.15±0.20	1.64±0.58	0.54±0.46	2.19±0.69	0.03±0.08	0.03±0.16	0.91±0.28	
0529	-0.02±0.13	-0.01±0.11	27224± 453	27223± 454	0.01±0.09	-0.01±0.08	0.00±0.06	0.00±0.02	0.00±0.02	0.00±0.01	0.00±0.03	
AUBU	0.03±0.03	0.01±0.03	19574± 272	19784± 271	0.05±0.32	3.42±0.92	1.13±0.50	0.05±0.15	0.05±0.16	0.03±0.29	1.07±0.29	
DOCO	-0.13±0.10	-0.03±0.08	24715±3191	24760±3196	0.56±0.57	0.32±0.27	0.01±0.17	0.01±0.07	0.01±0.08	0.03±0.13	0.18±0.16	
STJ9	0.03±0.05	0.01±0.05	23707± 317	23710± 315	0.03±0.14	0.01±0.12	0.01±0.07	0.00±0.03	0.01±0.05	0.00±0.01	0.01±0.04	
WLBH	-0.02±0.01	0.00±0.01	16947± 257	17278± 229	1.67±5.82	6.51±1.98	2.86±1.09	0.04±0.14	-0.02±0.13	0.01±0.13	1.96±0.45	
ZIM2	0.16±0.11	0.03±0.10	26493± 710	26502± 708	0.07±0.17	0.04±0.14	0.03±0.10	0.03±0.13	0.02±0.13	0.00±0.03	0.04±0.06	
ZIMM	0.10±0.09	0.02±0.09	26295± 703	26299± 701	0.06±0.20	0.02±0.07	0.00±0.05	0.00±0.05	0.01±0.10	0.00±0.01	0.02±0.05	

Residuenanzahl in der gestackten Variante für einzelne Elevationsbereiche und die Gesamtzahl der Residuen. Ergänzend sind zu jedem Wert der Residuenanzahl die korrespondierenden Standardabweichungen angegeben.

Die über den Untersuchungszeitraum gemittelten Residuenwerte der einzelnen Stationen liegen in der gestackten Version näher bei Null als in der Version ohne Einführung gestackter Daten, jedoch nehmen die Standardabweichungen der einzelnen Werte meist die gleiche Größenordnung an wie der Wert selbst. Bei der gemittelten Gesamtzahl der Residuen fällt auf, dass sich die Anzahl vorhandener Residuen von Station zu Station stark unterscheidet. Stationen mit deutlich weniger Residuen sind hierbei AUBU und WLBH, was durch stärkere Abschattungen zu begründen ist. Die großen Standardabweichungen an der Station DOCO werden durch Aufzeichnungsprobleme an einigen Tagen hervorgerufen. Wird die Berechnung der Standardabweichungen der Gesamtresiduenanzahl in je einen Zeitabschnitt bis/ab DoY 172/173 geteilt (Begründung siehe Tab. 6-6), so nehmen die Standardabweichungen der zwei Zeitabschnitte kleinere Werte an. Jedoch kann nicht von konstanter Residuenanzahl aufeinanderfolgender Tage gesprochen werden.

Die große Standardabweichung der Station WLBH im Elevationsbereich zwischen 0° und 15° liegt an einigen Ausreißern einzelner Tage, an denen eine Zunahme der Residuenanzahl um bis zu 35 % erfolgt ist; für diesen Tag jedoch betrug die Differenz der Residuenanzahl in diesem Elevationsbereich lediglich fünf Residuen, die Gesamtzahl der Residuen aus der Prozessierung mit gestackter Information demnach nur 19 Residuen, was durch die starke Abschattung an dieser Station hervorgerufen wird. Der Zuwachs der Residuenanzahl im Elevationsbereich zwischen 0° und 15° ist auf allen Stationen nicht signifikant. Hierbei ist zu erwähnen, dass die Auswertung der Daten mit einem minimalen Elevationswinkel von 3° erfolgt ist. Im Elevationsbereich zwischen 15° und 30° jedoch kann ein signifikanter Zuwachs der Residuenanzahl für die Stationen 0515, AUBU und WLBH festgestellt werden. Zwischen 30° und 45° weisen AUBU und WLBH erkennbar mehr Residuen auf, für die nächste Elevationsstufe (45° bis 60°), ist ein Zuwachs bei 0515 zu verzeichnen. Für alle höheren Elevationsbereiche treten keine signifikanten Unterschiede zur rohen Prozessierungsvariante auf. Insgesamt betrachtet ist eine Zunahme der Gesamtresiduenanzahl um ca. 1 % bis 2 % bei den Stationen 0515, AUBU und WLBH zu erkennen.

Um einen weiteren, detaillierten Einblick in das Verhalten der Residuen durch die Einführung gestackter Information in die Prozessierung zu erhalten, wurden ergänzende Untersuchungen durchgeführt. Hierzu wurden Histogramme generiert, welche die Verteilung der Residuenanzahl über den Wert des Residuums darstellen. Die hierbei gewählten Klassen der Residuenwerte reichen von ≤ -20 mm in Schritten von 1 mm bis ≥ 20 mm, d.h. es wurden beispielsweise alle Residuenwerte, die zwischen -0.5 mm und 0.5 mm liegen, einer Klasse zugeordnet. Alle Residuenwerte, die ≤ -20 mm bzw. ≥ 20 mm sind, wurden hierbei den äußersten Klassen zugeordnet. Diese Zuordnung wurde für alle Tage durchgeführt, an denen sowohl Residuen aus der „rohen“ als auch der „gestackten“ Prozessierung vorlagen (in der Regel: DoY 131 bis 240 2013 = 110 d). Für jede Klasse, die die Anzahl der Residuen der untersuchten Station in einem vorgegebenen Wertebereich enthält, konnte anschließend der Median und die Standardabweichung sowohl für die „rohe“ als auch die „gestackte“ Prozessierung berechnet und dargestellt werden. Zudem wurde die prozentuale Zunahme der Residuenanzahl aus der „gestackten“ gegenüber der „rohen“ Prozessierung für jeden Medianwert berechnet. Abb. 6-17 zeigt diese Plots für die Stationen 0515, DOCO und STJ9. Vor allem in den Plots für 0515 und DOCO von Abb. 6-17 ist zu erkennen, dass sich die Anzahl der Residuen der „rohen“ (rot) und „gestackten“ (grün) Variante signifikant unterscheidet. Die Kurve der Balkenköpfe der „rohen“ und „gestackten“ Version zeigen einen erkennbar anderen Verlauf, während bei STJ9 der Verlauf nur geringe Unterschiede aufweist. Für 0515 nimmt die Anzahl der Residuen in den Klassen zwischen -4 mm und $+4$ mm stark zu, während sie außerhalb dieses Bereiches deutlich abnimmt.

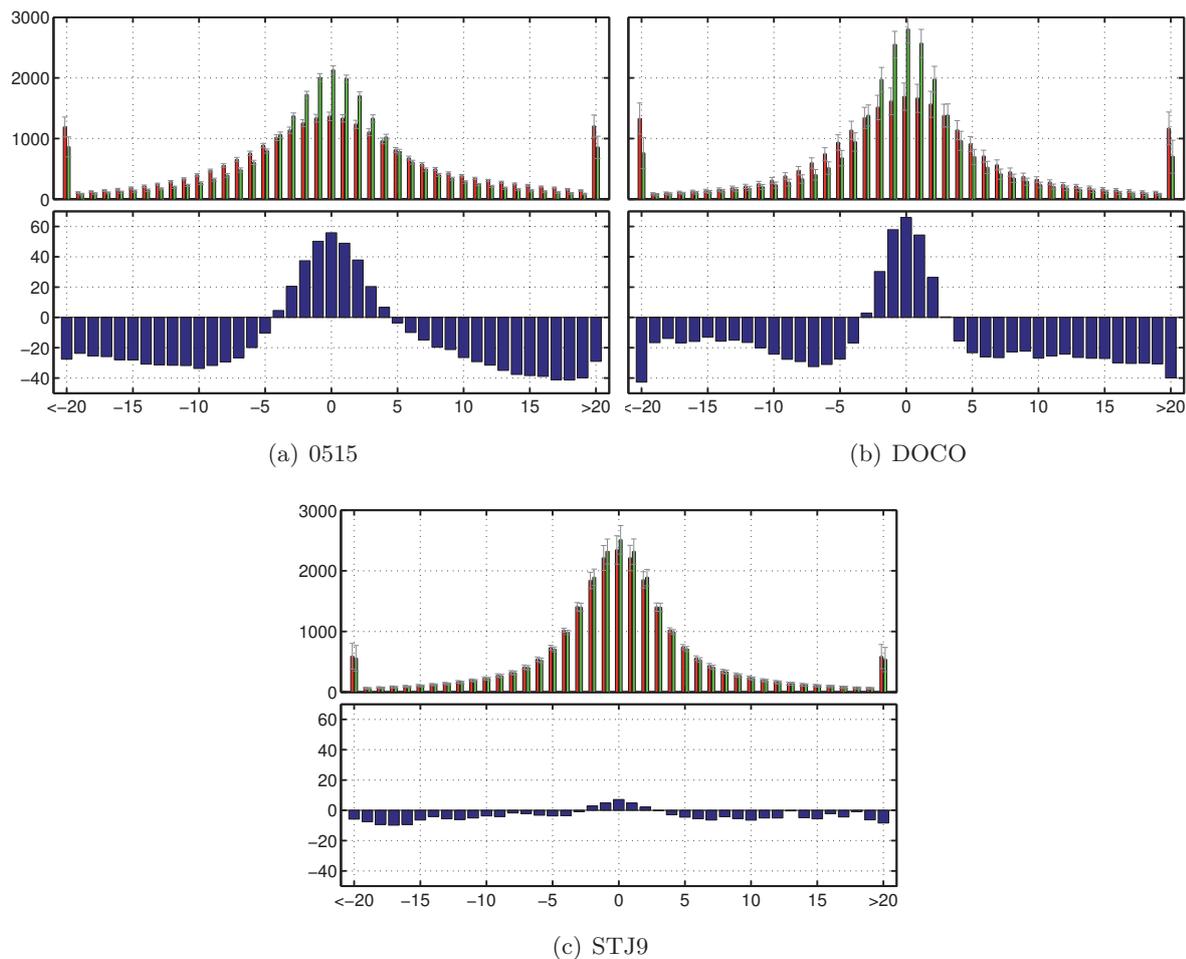


Abb. 6-17: obere Plots: Histogramm der Mediane der Residuenanzahl im Zeitraum DoY 131 bis 240 2013 über Residuenwerte; rot/grün ohne/mit Einführung gestackter Information; graue Balken: Standardabweichung der Residuenanzahl; Rechtsachse: Klassen der Residuenwerte [mm], Hochachse: Anzahl der Residuen einer Klasse; untere Plots: Prozentuale Zu-/Abnahme des Medians gestackt vs. roh nach Residuenklasse; Rechtsachse: Klassen der Residuenwerte [mm], Hochachse: Zunahme der Residuenanzahl [%]

Der maximale Rückgang der Residuenanzahl beträgt hierbei mehr als 40 % (Intervalle [16.5 mm,17.5 mm] und [17.5 mm,18.5 mm]), die maximale Zunahme über 55 % (Intervall [-0.5 mm,+0.5 mm]) bezogen auf die Residuenanzahl der „rohen“ Version. Die Standardabweichungen der Residuenanzahl bewegen sich zwischen 13 und 157, wenn die kumulativen Klassen ganz links und ganz rechts vernachlässigt werden. Der Verlauf der Residuenzu-/abnahme ist hierbei nicht exakt symmetrisch zu Null, d.h. die Abnahme im Bereich der positiven Residuenwerte ist größer als im negativen Bereich. Für die Station DOCO fallen die prozentualen Abnahmen der Residuenzahl geringer aus als bei 0515, jedoch wird die Anzahl der Residuen in den kumulativen Bereichen (Extremwerte der Residuen) stärker reduziert. Ein Zuwachs der Residuenanzahl ist bei dieser Station im Intervall [-3.5 mm,+3.5 mm] feststellbar, wobei in der zentralen Klasse um 0 mm im Schnitt über 65 % mehr Residuen in der „gestackten“ Variante vorhanden sind. Die Standardabweichungen der Residuenanzahl sind bei DOCO im Vergleich zu 0515 deutlich größer, was auf eine stärkere Variation der Residuenanzahl in den Residuenklassen der einzelnen prozessierten Tage hinweist. Der Verlauf des prozentualen Zuwachses ist ebenfalls unsymmetrisch und die prozentuale Abnahme der Residuenanzahl im Bereich der positiven Residuen ebenfalls größer als im Bereich der negativen Residuen.

Bei der Station STJ9 ist der Einfluss der gestackten Information auf die Residuenanzahl deutlich geringer als bei den zuvor betrachteten Stationen. Die Ab-/Zunahme liegt hierbei unter 10% verglichen zur Auswertung ohne Einführung gestackter Information, die Standardabweichungen der Residuenanzahl liegen in der Größenordnung der Station DOCO.

Als Erweiterung der oben durchgeführten Analyse der Veränderung der Residuenwerte einzelner Elevationsstufen wurden sogenannte Boxplots erstellt. Hierzu wurden alle Residuen einer Station, die im Untersuchungszeitraum (DoY 131 bis 240 2013) vorhanden waren, nach Prozessierungsvariante getrennt, extrahiert und einzelnen Elevationsklassen zugeordnet. Die Elevationsklassen umfassen hierbei jeweils einen Elevationsbereich von 5° . Die Klassenmittelpunkte wurden auf $0^\circ, 5^\circ, \dots, 90^\circ$ festgelegt, wobei die unterste Klasse bei keiner Station belegt wurde, da in der Auswertung eine Mindestelevation von 3° eingestellt war. Die Residuenwerte jeder Klasse wurden anschließend gemeinsam für die „rohe“ und „gestackte“ Prozessierung in einem Boxplot dargestellt. Die Darstellungen für die Stationen 0403 und WLBH sind in Abb. 6-18 zu finden. Der untere/obere Rand jeder rot bzw. grün umrandeten Box gibt

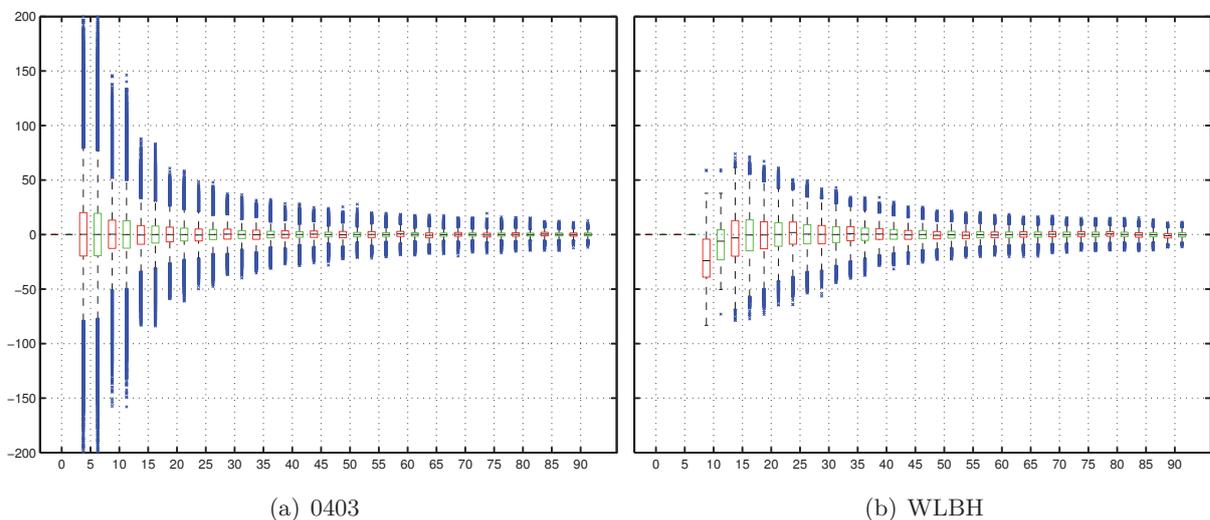


Abb. 6-18: Boxplot der Residuenwerte nach Elevationsbereichen; rot/grün Prozessierung ohne/mit Verwendung gestackter Information; blaue Kreuze: Ausreißer; Rechtsachse: Mittelpunkte der Elevationsbereiche [$^\circ$]; Hochachse: Residuenwert [mm]

hierbei das untere/obere Quartil der Residuenwerte dieses Elevationsbereichs an, d.h. 50% der Daten liegen innerhalb der unteren/oberen Grenze der Box bzw. je 25% liegen unterhalb/oberhalb dieser Grenzen. Die Höhe der Box (Interquartilsabstand) ist ein Maß für die Streuung der Residuenwerte. Der waagrechte Strich innerhalb der Box stellt den Median aller Werte einer Klasse dar. Die senkrechte gestrichelte Linie (schwarz) unter/oberhalb jeder Box markiert die sogenannten Whisker, deren Länge der 1,5-fache Interquartilsabstand ist. Alle Punkte außerhalb der Whisker werden als Ausreißer (blaue Kreuze) markiert. Die Werte auf der Rechtsachse stehen für die einzelnen Elevationsstufen. Zur Wahrung der Übersichtlichkeit sind die Boxplots einer Elevationsstufe für die beiden Prozessierungsvarianten versetzt angeordnet: die Werte der „rohen“ Variante (rote Box) befinden sich links, die Werte der „gestackten“ Variante (grüne Box) rechts des Mittelwerts der Elevationsstufe.

Da für die Prozessierung der GPS-Daten eine Mindestelevation von 3° gewählt wurde, ist die unterste Klasse für die weitgehend abschattungsfreie Station 0403 nicht besetzt. Da bei WLBH große Abschattungen in niedrigen Elevationen vorhanden sind (siehe auch vorangehende Untersuchungen), sind hier die beiden

untersten Klassen nicht mit Werten belegt. Erwartungsgemäß ist die Ausdehnung der Boxen sowohl für 0403 als auch für WLBH bei niedrigen Elevationen größer als bei höheren Elevationen, da die Residuenwerte im niedrigen Elevationsbereich stark streuen. Auffallend ist, dass für alle Elevationsstufen viele Ausreißer vorliegen, mit Ausnahme der Werte für WLBH um 10° . Dies könnte durch die Zusammenführung aller Residuenwerte eines Elevationsbereiches über den gesamten Untersuchungszeitraum hervorgerufen werden. Etwaige Systematiken einzelner Tage könnten hierbei als Ausreißer markiert werden. Die Boxausdehnung der Prozessierung mit gestackter Information der Station 0403 ist geringfügig kleiner als die der „rohen“ Prozessierung. Eine Verschiebung des Medians ist bei der gewählten Skalierung der Hochachse kaum auszumachen. Hiervon unterscheidet sich der Plot der Station WLBH. Während die Boxausdehnung der Prozessierung mit gestackter Information nur geringfügig kleiner wird, ist insbesondere bei den Elevationsstufen um 10° und um 20° eine deutliche Verschiebung des Medians in Richtung Null erkennbar. Dies bestätigt die bereits oben getroffene Vermutung, dass bei dieser Station insbesondere die durch die abschattende Vegetation verrauschten Signale niedriger Elevation durch Stacking signifikant korrigiert werden können. Ähnliches lässt sich auch für die durch Mehrwegeeffekte negativ beeinflussten Daten der Station DOCO beobachten, bei der die Medianwerte verschiedener Elevationsstufen (auch größerer Elevationen, bspw. 65°) in Richtung Null korrigiert werden.

6.2.3 Auswirkungen auf die Koordinaten

Nach der ausführlichen Diskussion der Auswirkung der Einführung gestackter Information auf die Residuen steht nun der Effekt auf die Koordinaten im Fokus. Zunächst wird der Unterschied der geschätzten Koordinaten ohne/mit Nutzung gestackter Information analysiert. Hierzu wurden Histogramme erstellt, welche die Differenzen (ohne minus mit gestackter Information) der topozentrischen Koordinatenkomponenten (ΔN , ΔE und ΔUp) enthalten. Die Balkenbreite der einzelnen Klassen wurde auf 0.25 mm festgelegt. Durch die Differenzbildung wird der eurasische Trend und mögliche Eigenbewegungen der Stationen entfernt, da sie in beiden Zeitreihen („roh“, „gestackt“) enthalten sind. In den Differenzzeitreihen verbleiben lediglich die Effekte, welche durch die Einführung gestackter Information hervorgerufen werden. In Abb. 6-19 sind die Histogramme für die Stationen 0403 und WLBH dargestellt.

Bei der Station 0403 ist direkt erkennbar, dass die Streuung der Differenzzeitreihe für alle drei Koordinatenkomponenten sehr klein ausfällt. Ebenso ist in den drei Histogrammen kein sichtbarer Versatz gegenüber der Nulllinie feststellbar, so dass die Einführung gestackter Information in die Prozessierung bei dieser Station im untersuchten Zeitfenster keine Koordinatenverschiebung verursacht. Ein anderes Bild bietet sich für die Station WLBH. Hier tritt eine größere Streuung der Koordinatendifferenzen in allen drei Koordinatenkomponenten, insbesondere der Höhe auf, zudem ist für ΔE ein kleiner und für ΔUp ein größerer Versatz in positiver Richtung zu erkennen. Bei dieser Station wirkt sich die Einführung gestapelter Information erkennbar auf die Positionsbestimmung aus. In Tab. 6-8 sind die Mediane sowie die Standardabweichungen der Differenzzeitreihen, nach Koordinatenkomponenten getrennt, für alle untersuchten Stationen aufgeführt. Sie bestätigen die oben getroffenen Aussagen über die Streuung und den Offset der einzelnen Komponenten. Der Median der Nordkomponente der Stationen 0515, AUBU und WLBH deutet auf einen Offset gegenüber Null hin, was eine Nord-Süd-Verschiebung der Koordinaten dieser Stationen, verursacht durch die Einführung der gestackten Information, bedeutet. Die Standardabweichung dieser Komponenten bewegt sich jedoch in der gleichen Größenordnung wie der scheinbare Offset. Rein visuell betrachtet ist die Differenzzeitreihe für ΔN der Station 0515 leicht ins Negative verschoben, der Station AUBU ins Positive. Verschiebung ins Negative bedeutet hierbei, dass die geschätzte Position der Auswertung mit Einführung gestackter Information nördlicher liegt als die der Auswertung ohne gestackte Information. Wie oben bereits erwähnt, bewirkt die Nutzung gestackter Information in der Prozessierung

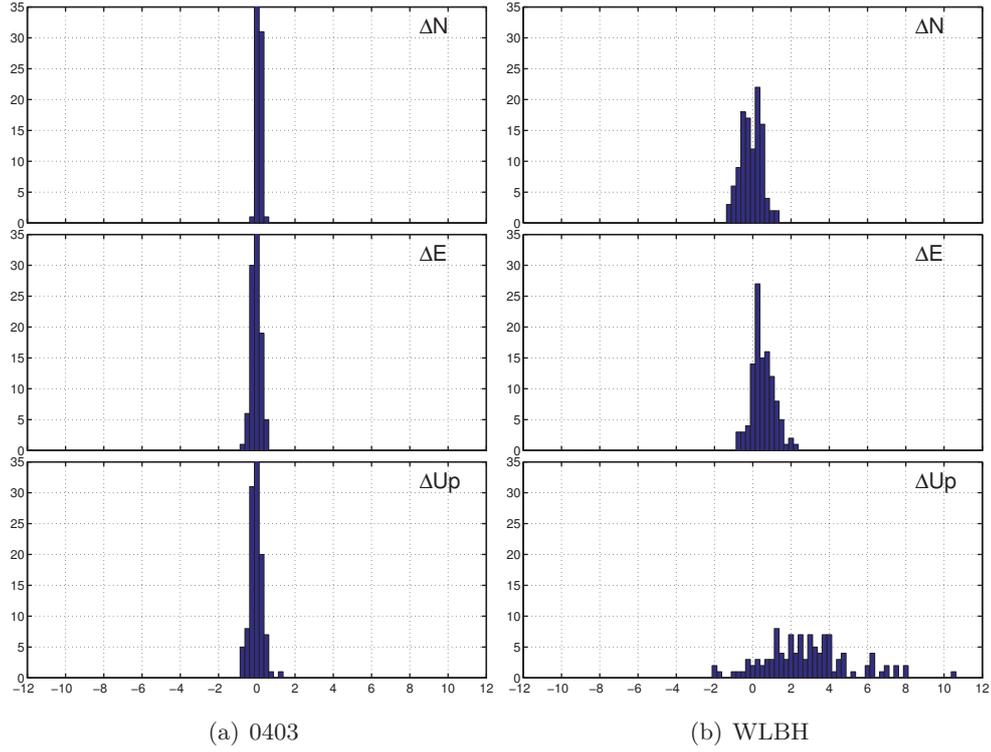


Abb. 6-19: Histogramme der Differenz der Koordinatenzeitreihen ohne minus mit Einführung gestackter Information im Zeitraum DoY 131-240 2013 im topozentrischen Koordinatensystem; Rechtsachse: Differenz [mm], Hochachse: [Anzahl d], Balkenbreite 0.25 mm

Tab. 6-8: Median und Standardabweichungen der Differenz roh minus gestackt der einzelnen Koordinatenkomponenten im Zeitraum DoY 131-240 2013; alle Werte in [mm]

Station	ΔN	ΔE	ΔU_p
0387	-0.05 ± 0.15	-0.42 ± 0.27	0.12 ± 0.37
0403	0.04 ± 0.12	-0.04 ± 0.21	-0.06 ± 0.31
0515	-0.27 ± 0.27	0.25 ± 0.55	0.85 ± 0.73
0529	-0.03 ± 0.10	-0.06 ± 0.16	-0.06 ± 0.26
AUBU	0.30 ± 0.25	0.62 ± 0.68	0.42 ± 1.28
DOCO	-0.03 ± 0.31	-0.08 ± 0.44	0.35 ± 1.21
STJ9	-0.06 ± 0.11	-0.06 ± 0.21	0.05 ± 0.29
WLBH	-0.10 ± 0.55	0.48 ± 0.58	2.65 ± 2.27
ZIM2	0.07 ± 0.13	-0.18 ± 0.37	-0.32 ± 0.46
ZIMM	0.02 ± 0.11	-0.12 ± 0.23	0.08 ± 0.37

eine Zunahme der Residuenanzahl sowie die Änderung der geschätzten Residuenwerte, so dass Auswirkungen auf die berechneten Koordinaten möglich sind. Hierbei spielt der Sektor der Antennenhemisphäre, in dem die Residuenanzahl/-werte stark verändert werden, eine entscheidende Rolle. Wird beispielsweise die Residuenanzahl niedriger Elevationen in allen azimutalen Richtungen einer Station erhöht, sollte der Effekt vorrangig in der Höhenkomponente sichtbar sein, da sich Beobachtungen niedriger Elevation stark auf die Höhe auswirken. Im Folgenden wird dieser Zusammenhang untersucht. Hierbei werden insbesondere die Stationen analysiert, bei welchen ein Offset in den Koordinatenkomponenten zwischen der Prozessierung ohne und mit gestackter Information erkennbar ist. Hierzu werden die Histogramme der Koordinaten (vgl. Abb. 6-19), die Plots der nach Sektoren unterteilten Residuenanzahl (vgl. Abb. 6-14), sowie die Darstellungen der prozentualen Zunahme der Residuenanzahl (vgl. Abb. 6-16) herangezogen. Ebenso sind die Boxplots der Residuenwerte nach einzelnen Elevationsstufen (vgl. Abb. 6-18) hilfreich für die Interpretation. Untersuchenswerte Stationen sind hierbei 0515, AUBU und WLBH.

Bei der Station 0515 sind durch die Einführung gestackter Information im nordöstlichen Sektor im Elevationsbereich zwischen 30° und 60° deutlich mehr Residuen vorhanden. Im südöstlichen Sektor sind die Unterschiede in der Residuenanzahl gering, im südwestlichen Bereich ist für Elevationen kleiner als 30° ein signifikanter, für Elevationen zwischen 30° und 60° ein geringer Zuwachs an Residuen zu verzeichnen. Im nordwestlichen Sektor nimmt die Residuenanzahl vorrangig für Elevationen unter 30° zu. Aus den Plots, welche die prozentuale Zunahme der Residuenanzahl farblich codiert darstellen (vgl. Abb. 6-16) ist für 0515 erkennbar, dass im Untersuchungszeitraum die größten Zunahmen im mittleren Elevationsbereich (30° bis 60°) des nordöstlichen Sektors etwa im Azimutbereich zwischen 50° und 70° , sowie im niederen Elevationsbereich (unter 30°) des südwestlichen Sektors erkennbar sind. Im Boxplot für 0515 sind geringe Verbesserungen, jedoch keine starken Veränderungen über alle Elevationsbereiche sichtbar. Somit sind die Veränderungen der Höhenkomponente von 0515 durch die Zunahme der Residuenanzahl niedriger Elevationen und die scheinbare Verschiebung in Ost-West-Richtung durch die veränderte Residuenanzahl in mittleren Elevationen und Richtung Ost-Nord-Ost erklärbar.

Für AUBU zeigt der nach Sektoren unterteilte Plot der Residuenanzahl sowohl im südöstlichen als auch im nordwestlichen Sektor der niedrigsten Elevationsstufe (kleiner 30°) eine signifikante Zunahme. Im letztgenannten azimutalen Sektor ist auch eine Zunahme im mittleren Elevationsbereich (30° bis 60°) zu verzeichnen. Im farblich codierten Plot der prozentualen Zunahme werden die identischen azimutalen Bereiche ausgewiesen, die größten Zunahmen liegen in den azimutalen Bereichen zwischen 130° und 180° (Elevationsbereich ca. 15° bis 50°), sowie zwischen 270° und 310° (Elevationsbereich ca. 15° bis 35°). Im Boxplot der Residuenwerte über die Elevationsstufen ist keine große Variation erkennbar. Die in den Koordinatenplots für ΔE erkennbare Verschiebung in Ost-West-Richtung kann durch die Zunahme im mittleren Elevationsbereich der Azimutrichtung Ost-Nord-Ost erklärt werden. Für den scheinbaren Versatz in der Höhe ist keine eindeutige Erklärung ableitbar.

Der Zuwachs der Residuenanzahl der Station WLBH ist im nordöstlichen Sektor der Hemisphäre vorrangig im Elevationsbereich 0° bis 30° angesiedelt (siehe Abb. 6-14(b)). In südöstlichen und südwestlichen azimutalen Bereichen sind bis zu einer Elevation von 60° in der Variante mit Einführung gestackter Information mehr Residuen vorhanden. Im nordöstlichen Bereich liegen bis zu einer Elevation von 60° geringfügig mehr Residuen durch die Berücksichtigung der Stackingkorrektur vor. Im farblich codierten Plot über die prozentuale Zunahme der Residuenanzahl (siehe Abb. B-5 im Anhang) ist erkennbar, dass der Residuenzuwachs vorrangig bei einer Elevation von $30.0 \pm 10.0^\circ$ erfolgt. Da die Station WLBH auf einer Waldlichtung steht und der GNSS-Empfang vorrangig durch Bäume abgeschattet wird, ist dies

der geringstmögliche Elevationsbereich zum Empfang von Satellitensignalen. Im zugehörigen Boxplot der Verteilung der Residuenwerte gegenüber der Elevation (siehe Abb. 6-18(b)) werden erst ab einer Elevation zwischen $10.0 \pm 2.5^\circ$ Residuen aufgeführt. Diese Residuen werden durch die Einführung der gestackten Information stark verbessert, so dass der Median aller Residuenwerte der Elevationsstufe $10.0 \pm 2.5^\circ$ deutlich näher bei Null liegt (vgl. rote und grüne Box für Elevationsbereich $10.0 \pm 2.5^\circ$ in Abb. 6-18(b)). In den Plots der Koordinatendifferenzen für ΔN , ΔE und ΔUp (vgl. Abb. 6-19(b)) streut die Höhenkomponente in deutlich größerem Maß als die Lagekomponenten. Das Zentrum der Balken im Histogramm von ΔUp ist – trotz der großen Streuung der einzelnen Tageslösungen – erkennbar um ca. 2 mm in positiver Richtung verschoben. Da der Residuenzuwachs über beinahe den gesamten Azimutbereich der niedrigsten auf dieser Station empfangbaren Satellitensignale zu verzeichnen ist, wirken sich die vorhandenen zusätzlichen Signale vorrangig auf die Höhe aus.

Zusätzlich zur Untersuchung der Koordinatendifferenz zwischen „roher“ und „gestackter“ Auswertung wird im Folgenden die Veränderung der Streuung der Koordinaten durch die Einführung gestackter Information untersucht. Im Idealfall sollte durch die Einführung der SMs als Korrektur eine positive Entwicklung in der Streuung der Koordinatenzeitreihen erkennbar sein, d.h. die Standardabweichung der Koordinatenkomponenten sollte abnehmen. Zur Untersuchung dieses Sachverhaltes wurden die geozentrischen XYZ-Koordinaten, welche sowohl für die Prozessierung ohne bzw. mit Einführung gestackter Information vorlagen, extrahiert. Da der untersuchte Zeitraum etwa 120 d umfasst, muss der eurasische Trend, welcher beispielsweise für die Station 0515 – in geozentrischen Koordinatenkomponenten ausgedrückte – Geschwindigkeiten v_x , v_y und v_z in der Größenordnung von -0.0147 m/Jahr, 0.0165 m/Jahr und 0.0101 m/Jahr annimmt, entfernt werden, bevor weitergehende Untersuchungen hinsichtlich Standardabweichungen, usw. durchgeführt werden können. Die beiden Koordinatenzeitreihen („roh“, „gestackt“) wurden unter Anwendung des von Altamimi u. a. [2012] veröffentlichten Eulerpoles durch das im Folgenden beschriebene Vorgehen um den eurasischen Trend reduziert. Zunächst erfolgt eine Umrechnung des in mas/Jahr gegebenen Eulervektors $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ in rad/Jahr. Anschließend können mittels Gl. 6-2 die eurasischen Geschwindigkeitskomponenten der Station im geozentrischen Koordinatensystem in m/Jahr berechnet werden. Hierbei geht als Stationskoordinate der Median der Koordinatenkomponenten einer Station ein.

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (6-2)$$

v_x, v_y, v_z : Geschwindigkeitskomponente in x-, y- und z-Richtung in [m/Jahr]

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$: x-, y-, z-Komponente des Eulervektors in [rad/Jahr]

x, y, z : x-, y-, z-Koordinate in [m]

Anschließend wird der berechnete Geschwindigkeitsvektor von m/Jahr in m/d umgerechnet. Bei der folgenden Eliminierung des eurasischen Trends wird der erste Tag der Zeitreihe festgehalten und für die restlichen Tage jeweils die Differenz des MJD (Modifiziertes Julianisches Datum \Rightarrow fortlaufende Nummerierung der Tage auch bei Jahreswechsel) berechnet. Die eigentliche Reduktion des eurasischen Trends erfolgt dann nach Gl. 6-3.

$$\begin{pmatrix} x_{korr} \\ y_{korr} \\ z_{korr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{mit\ Trend} \\ y_{mit\ Trend} \\ z_{mit\ Trend} \end{pmatrix} - \Delta_{MJD} \cdot \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} \quad (6-3)$$

$x_{korr}, y_{korr}, z_{korr}$: Trendbereinigte x-, y-, z-Koordinate in [m]

$x_{mit\ Trend}, y_{mit\ Trend}, z_{mit\ Trend}$: Trendbehaftete x-, y-, z-Koordinate in [m]

Δ_{MJD} : Differenz Anzahl Tage zum ersten Tag der Zeitreihe

Die um den eurasischen Trend bereinigten Koordinatenzeitreihen wurden anschließend in geographische Koordinaten (Breite, Länge, ellipsoidische Höhe) umgerechnet, wobei die Parameter des GRS80 aus [Heck, 2003, S. 64] verwendet wurden. Um möglichst kleine metrische Größen für den Vergleich heranziehen zu können, wurde von den geographischen Koordinaten der gemeinsame Median beider Zeitreihen („roh“, „gestackt“) für B, L und H abgezogen (Wert der Zeitreihe minus Median) und die Winkeldifferenzen anschließend in die topozentrischen Lagekomponenten ΔN , ΔE umgerechnet. Eine Umrechnung der Höhenkomponente ist nicht notwendig. Die Koordinatenzeitreihen der Stationen des GURN sollen unter anderem zur Bestimmung der Stationsbewegungen verwendet werden, um für das Gebiet des Oberrheingrabens ein neues, verbessertes geodynamisches Modell ableiten zu können. Daher muss auch untersucht werden, inwieweit sich die Einführung gestackter Information auf die Stationsgeschwindigkeiten auswirkt. Hierzu wurde mittels der Matlab-Funktion `robustfit` eine Regressionsgerade in die um den eurasischen Trend bereinigten Zeitreihen der einzelnen Koordinatenkomponenten geschätzt. Dies ist zwar rein rechnerisch möglich und wird auch in den Plots dargestellt, jedoch lassen sich aufgrund der geringen Länge der hierfür genutzten Zeitreihe und der teilweise vorhandenen großen Streuung keine belastbaren Aussagen ableiten. Um gesicherte Aussagen zum Verhalten der Stationsgeschwindigkeit treffen zu können, ist die Analyse einer längeren Zeitreihe (zwei Jahre oder mehr) notwendig. In Abb. 6-20 sind die Koordinatenzeitreihen der Stationen STJ9 und WLBH dargestellt. Bei STJ9 ist direkt der sehr kleine Unterschied zwischen „roher“ (rot) und „gestackter“ (grün) Zeitreihe erkennbar. Lediglich für die Ostkomponente sind geringe Differenzen sichtbar, die Tageslösungen der Nord- und Höhenkomponente sind meist identisch. Die Streuung der Nordkomponente fällt signifikant geringer aus als die der Ost- und Höhenkomponente. Die Regressionsgeraden sind weitgehend deckungsgleich, jedoch ist deren Aussagekraft angesichts der kurzen Zeitreihe, wie bereits oben erwähnt, gering. Bei WLBH sind die größeren Differenzen zwischen den beiden Prozessierungsvarianten insbesondere für die Ost- und Höhenkomponente direkt erkennbar. Auch wenn die Regressionsgeraden hier nur bedingt als Indikatoren einer Veränderung der Stationsgeschwindigkeit (\Rightarrow Neigung der Geraden) genutzt werden können, so kann deren Abstand doch als Maß für den durch die Einführung gestackter Information in die Datenprozessierung verursachten Koordinatenoffset in ΔE und ΔUp herangezogen werden. Eine Zusammenfassung von statistischen Parametern für alle Stationen ist in Tab. 6-9 gegeben. Wie bereits oben erwähnt, sind die Standardabweichungen der Koordinatenkomponente ΔN signifikant geringer als die der anderen Komponenten. Die Einführung gestackter Information hat nur marginale Auswirkung auf die Streuung der einzelnen Koordinatenkomponenten. Die Standardabweichungen ohne/mit Einführung gestackter Information unterscheiden sich lediglich im sub-mm-Bereich. Da sowohl Verbesserungen (Standardabweichung gestackt kleiner als Standardabweichung roh) als auch Verschlechterungen (Standardabweichung gestackt größer als Standardabweichung roh), jedoch ohne erkennbare Systematik auftreten, lässt sich bezüglich des Effekts der Einführung der gestackten Information auf die Genauigkeit einer Koordinatenzeitreihe an dieser Stelle keine Aussage treffen.

Im unteren Teil von Tab. 6-9 sind die aus den Parametern der geschätzten Regressionsgeraden berechneten Offsets zur Nulllinie in der Mitte des untersuchten Zeitraumes (DoY 186 2013) für die einzelnen Koordinatenkomponenten in beiden Varianten aufgeführt. Wichtig ist hierbei die Betrachtung der Differenz der Offset-Werte von „roh“ und „gestackt“ und nicht der individuelle Offset allein. Viele Offsets fallen sehr gering aus, jedoch weisen einzelne Koordinatenkomponenten einzelner Stationen erkennbare Verschiebungen auf: 0387 (ΔE), 0515 (alle Komponenten), AUBU (Lagekomponenten) sowie WLBH (ΔE und ΔUp).

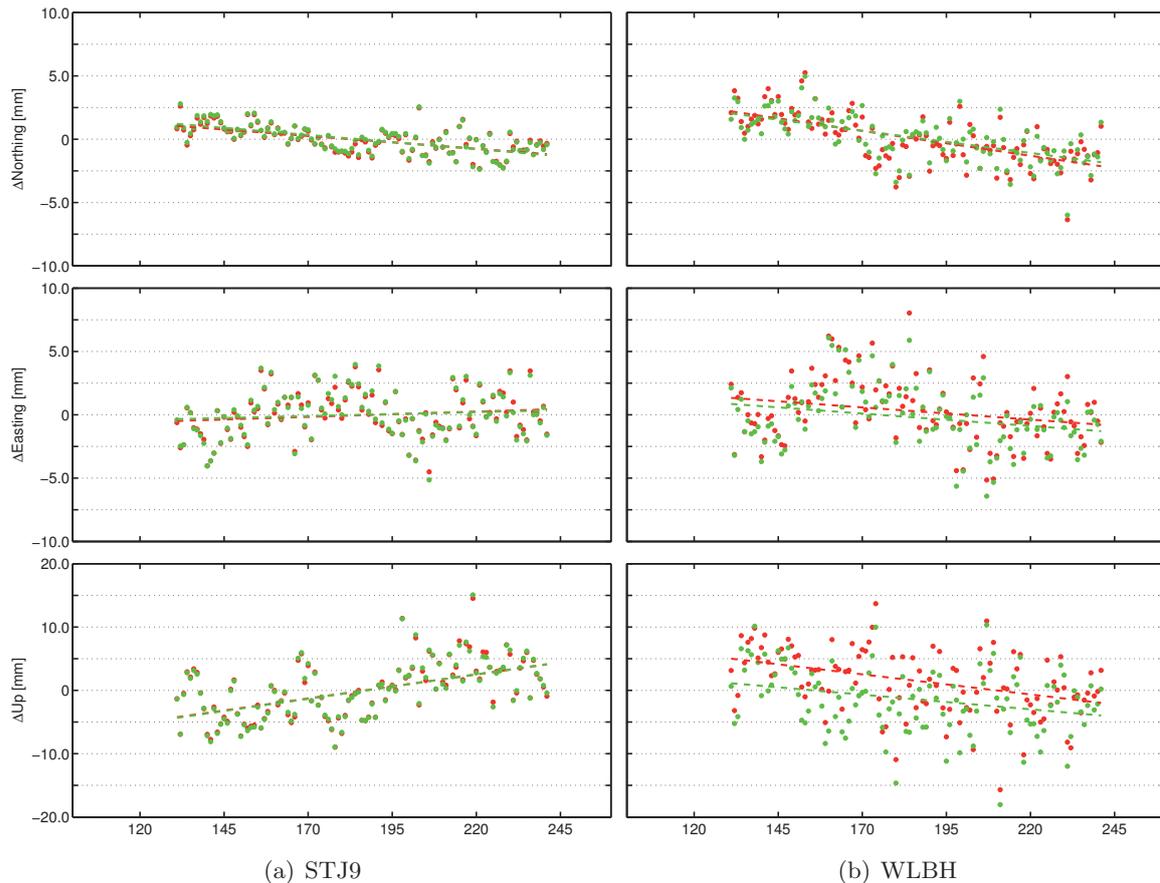


Abb. 6-20: Um den eurasischen Trend bereinigte Koordinatenzeitreihen ohne (rot) und mit (grün) Einführung gestackter Information, reduziert um den gemeinsamen Median der jeweiligen Koordinatenkomponente im Zeitraum DoY 131 bis 240 2013; gestrichelte Linien: geschätzte Regressionsgeraden; Rechtsachse: DoY 2013, Hochachse: Koordinatenkomponente [mm]

6.2.4 Auswirkungen auf die Troposphärenparameter

In den in der PPP-Prozessierung zu schätzenden Parametern ist neben den Stationskoordinaten und dem Empfängeruhrfehler auch der feuchte Anteil der zenitalen troposphärischen Laufzeitverzögerung ZLV_f enthalten. Neben der Notwendigkeit der genauen Bestimmung dieses Parameters für eine hochgenaue Positionierungslösung liefert die ZLV_f das Ausgangsprodukt für verschiedenste Anwendungen. Ein Beispiel hierfür ist das Projekt E-GVAP (<http://egvap.dmi.dk>, Stand: 03.11.2014), welches die Mitglieder des EUMETNET (The Network of European Meteorological Services, <http://www.eumetnet.eu>, Stand: 03.11.2014) mit Laufzeitverzögerungen für GNSS und Schätzwerten für Wasserdampf zum Einsatz in der operationellen Meteorologie in Nahe-Echtzeit versorgt. Diese Daten werden aus der Prozessierung eines Netzes permanenter GNSS-Stationen (Anzahl derzeit >1500), welche hauptsächlich auf dem europäischen Kontinent stehen, abgeleitet. Alshawaf u. a. [2013] nutzen den aus GNSS abgeleiteten Wasserdampfgehalt als verbesserte Korrektur von InSAR-Auswertungen und zur Berechnung flächenhafter Wasserdampfverteilung. Da der Parameter ZLV_f zunehmend an Bedeutung gewinnt, wird an dieser Stelle die Auswirkung der Einführung gestackter Information auf die zenitale troposphärische Laufzeitverzögerung untersucht.

Tab. 6-9: Standardabweichungen der Koordinatenzeitreihen ohne eurasischen Trend und vertikaler Offset der Regressionsgeraden von der Nulllinie der Hochachse in der Mitte des Zeitraums DoY 131 bis 240 2013; alle Werte in [mm]

Station	ΔN		ΔE		ΔUp	
	roh	gestackt	roh	gestackt	roh	gestackt
Standardabweichungen						
0387	1.14	1.19	2.00	2.04	5.91	5.94
0403	0.92	0.93	1.59	1.57	6.03	6.00
0515	1.09	1.04	2.21	2.30	5.13	4.96
0529	1.40	1.44	1.92	1.87	5.72	5.74
AUBU	1.35	1.31	1.99	1.88	5.27	4.86
DOCO	1.24	1.22	2.51	2.45	5.06	5.15
STJ9	1.06	1.10	1.79	1.86	4.43	4.47
WLBH	2.00	1.83	2.53	2.44	5.18	5.22
ZIM2	1.03	1.04	1.62	1.54	5.99	5.97
ZIMM	1.02	1.04	1.62	1.57	5.65	5.66
Offsets in der Mitte des Zeitraums						
0387	0.02	0.05	-0.32	0.06	-0.12	-0.25
0403	0.03	-0.03	-0.01	0.02	0.31	0.36
0515	-0.12	0.14	-0.09	-0.35	0.51	-0.42
0529	0.11	0.13	0.07	0.07	0.49	0.59
AUBU	0.27	-0.01	0.39	-0.33	0.49	0.29
DOCO	-0.01	-0.03	0.08	0.18	0.42	0.13
STJ9	-0.07	-0.02	-0.03	0.00	-0.07	-0.10
WLBH	0.03	0.11	0.28	-0.21	1.51	-1.42
ZIM2	0.05	-0.05	-0.08	0.05	0.15	0.46
ZIMM	-0.03	-0.05	0.04	0.14	0.06	-0.04

Bei der Prozessierung der Beobachtungsdaten mit der BS werden zwei troposphärische Parameter durch GPSEST geschätzt. Dies sind die troposphärische Laufzeitverzögerung in zenitaler Richtung und deren horizontale Gradienten. Erstere enthalten den a priori-Modellwert, welcher dem trockenen Anteil ZLV_t entspricht und durch den geschätzten feuchten Anteil ZLV_f ergänzt wird. Letztere bestehen aus zwei azimuthalen Gradienten (Nord- und Ostkomponente), welche eine Verkippung des troposphärischen Zenits gegenüber dem topozenitrischen Zenit beschreiben. Details zu den horizontalen Gradienten sind beispielsweise in Meindl u. a. [2004] zusammengestellt. Die von Meindl u. a. [2004] durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die Einführung horizontaler Gradienten bei der Verwendung von Beobachtungen niedriger Elevationen eine deutliche/geringe Verbesserung der Lagekoordinaten/Höhen (über 30%/bis zu 10%) ermöglicht. In der BS stehen verschiedene Modelle für die Bestimmung der horizontalen Gradienten zur Auswahl. Bei den durchgeführten Prozessierungen im Rahmen dieser Arbeit wurde das Modell „CHENHER“ nach Chen u. Herring [1997] gewählt. Da die Zusammensetzung der Atmosphäre in zenitaler Richtung stärker variiert als eine mögliche Verkippung des troposphärischen Zenits, wurden die ZLV (Gesamtwert aus ZLV_t und ZLV_f) mit einer zeitlichen Auflösung von 1 h, die horizontalen Gradienten mit einer zeitlichen Auflösung von 24 h berechnet.

Die PPP-Prozessierung erfolgt tagesweise, so dass pro Tag 25 Werte für ZLV zur jeweils vollen Stunde mit einer Gültigkeit von einer Stunde geschätzt werden (00:00, 01:00, ... 24:00), ebenso liegen je zwei horizontale Gradienten vor (00:00 und 24:00), zwischen denen linear interpoliert wird. Durch die separate Prozessierung aufeinanderfolgender Tage (jeweils von 00:00 bis 24:00 UTC) sind die überlappenden ZLV doppelt bestimmt und können sich zwischen zwei aufeinanderfolgenden Tagen unterscheiden. Zur Berechnung eines stetigen Verlaufs der ZLV wurden die Tageslösungen von 30 d (DoY 131-160 2013) mittels ADDNEQ2 zu einer Gesamtlösung auf Basis der gespeicherten Normalgleichungsinformation kombiniert. Die zeitliche Auflösung der ZLV wurde unverändert mit 1 h übernommen, die der horizontalen Gradienten auf 12 h erhöht, wobei zwischen den Stützstellen linear interpoliert wurde. In den Dateien der geschätzten Troposphärenparameter, wird zu jedem zenitalen Wert ein interpolierter Gradientenwert in Nord- und Ostrichtung abgelegt.

In Abb. 6-21 sind die berechneten Laufzeitverzögerungen in Zenitrichtung für die Stationen 0515, WLBH, ZIM2 und ZIMM im Zeitraum DoY 131 bis 160 2013 dargestellt. Der obere Plot zeigt den Gesamtwert (Summe aus a priori-Modellwert und geschätzter Verbesserung) der zenitalen Laufzeitverzögerung der Varianten ohne (rot bzw. magenta) bzw. mit Einführung der gestackten Information (grün bzw. blau), der untere Plot enthält die Differenzen der beiden Varianten (ohne Stacking minus mit Stacking). Die unterschiedlichen Farben sind durch die Art der Kalibrierinformation begründet: die GNSS-Antennen der Stationen 0515 und ZIM2 sind absolut individuell kalibriert und diese Information wurde in der GNSS-Prozessierung verwendet, für die Stationen WLBH und ZIMM liegen keine Individualkalibrierungen vor, daher wurden hier die IGS-Typmittelwerte eingeführt. Verwendet wurden die gleitenden Stackingmaps der zurückliegenden zehn Tage mit einer Auflösung von $2^\circ \times 1^\circ$ (Azimut \times Elevation). In den Plots der Gesamtwerte ist erkennbar, dass grundsätzlich eine gute Übereinstimmung der ZLV vorliegt, da die Kurven weitgehend deckungsgleich sind. Lediglich bei der Station WLBH ist erkennbar, dass Unterschiede auftreten. In den Plots wird außerdem deutlich, dass der Verlauf der ZLV im ausgewählten Zeitintervall an den Stationen unterschiedlich ist. Die im Abstand von nur knapp 20 m installierten Stationen ZIM2 und ZIMM weisen – visuell betrachtet – einen identischen Verlauf der ZLV auf, im Verlauf von WLBH sind ähnliche Muster erkennbar (Abstand zu ZIMM ca. 170 km), die ZLV von 0515 (Abstand zu ZIMM ca. 430 km) weichen jedoch deutlich ab. Dies ist aller Wahrscheinlichkeit nach in regionalen Unterschieden der Troposphäre im untersuchten Zeitraum begründet. Deutlich erkennbar ist auch die Korrelation der ZLV mit der Stationshöhe: die Medianwerte der ZLV liegen für die Station 0515 bei 2.37 ± 0.03 m (ell. Höhe: 220 m), für WLBH bei 2.21 ± 0.02 m (770 m), sowie bei ZIM2 und ZIMM jeweils bei 2.16 ± 0.02 m (906 m).

Die Differenzen der ZLV ohne minus mit Einführung der gestapelten Information unterscheiden sich auf den einzelnen Stationen deutlich. Während auf ZIM2 und ZIMM kein Offset zur Nulllinie erkennbar ist und die Standardabweichung der Differenz gering ausfällt, ist bei 0515 eine geringe Verschiebung bei größerer Streuung und bei WLBH ein deutlich erkennbarer Versatz mit großem Rauschen sichtbar. Auch wenn die Differenzen ein starkes Rauschen aufweisen, ist der Versatz gegenüber der Nulllinie deutlich erkennbar. Die Kenngrößen Median und Standardabweichung der Differenzen sind in Tab. 6-10 zusammengestellt. Zusätzlich sind in dieser Tabelle die Differenzen der Höhenkomponente (ΔUp) der originären minus der Version mit gestapelter Information, sowie der Quotient aus ΔUp und ΔZLV aufgeführt. Von den zehn untersuchten Stationen weisen 0515, AUBU, DOCO und WLBH deutliche Differenzen zwischen den beiden Prozessierungsvarianten auf. Dies sind Stationen, deren Stackingmaps deutlich erkennbare Signaturen enthalten haben und bei denen, abgesehen von DOCO, durch die Einführung der gestapelten Information erkennbar mehr Beobachtungen nach der GNSS-Prozessierung im Datenmaterial verblieben sind (vgl. Tab. 6-7).

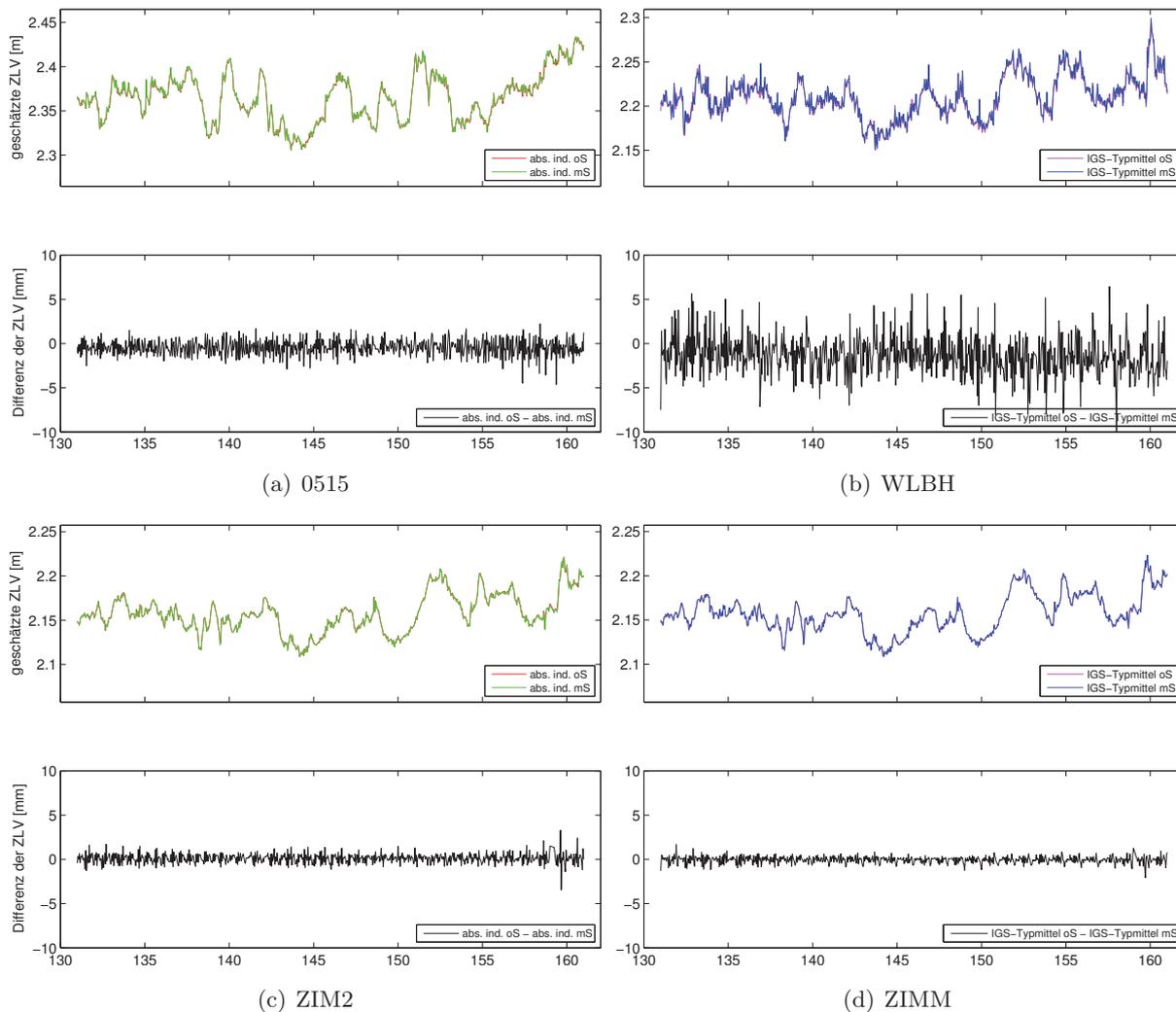


Abb. 6-21: Zenitale troposphärische Laufzeitverzögerungen für Zeitraum DoY 131 bis 160 2013; oben: Absolutwert für Varianten ohne (oS) und mit (mS) Einführung gestackter Information; unten: Differenz oS minus mS

Die Parameter Stationshöhe, zenitale troposphärische Laufzeitverzögerung und Empfängeruhrfehler weisen eine strenge Korrelation auf, d.h. eine durch modifizierte Parameter in der GNSS-Auswertung bedingte Änderung der geschätzten Stationshöhe hat direkte Auswirkung auf die geschätzte ZLV und den Empfängeruhrfehler (Santerre [1991], Rothacher [2002]). Der Effekt auf die ZLV besitzt jedoch ein umgekehrtes Vorzeichen: eine durch modifizierte Parameter größere Stationshöhe ($H - H_{mod} < 0$) resultiert in einem kürzeren zurückzulegenden Weg der Signale durch die Atmosphäre ($ZLV - ZLV_{mod} > 0$). Der Quotient aus ΔUp und ΔZLV weist für die meisten der in Tab. 6-10 aufgeführten Stationen ein negatives Vorzeichen auf, die Größenordnung des Betrags des Quotienten nimmt für die einzelnen Stationen meist ähnliche Größenordnungen an. Lediglich die Quotienten der Stationen 0403, 0529 und AUBU zeigen ein abweichendes Verhalten.

Neben den troposphärisch bedingten Laufzeitverzögerungen in Zenitrichtung wurden auch die horizontalen Gradienten in der GNSS-Prozessierung und der Kombination mit ADDNEQ2 berechnet. Die Ergebnisse der Gradienten aus der Auswertung ohne (rot bzw. magenta) und mit (grün bzw. blau) Einführung gestackter Information sind für ausgewählte Stationen in Abb. 6-22 dargestellt. Die Farbwahl wurde, wie bereits oben beschrieben, nach der einfließenden Kalibrierinformation getroffen. Zur Übersichtlichkeit wurde in

Tab. 6-10: Median und Standardabweichungen der Differenzen der zenitalen troposphärischen Laufzeitverzögerungen, sowie Höhenunterschiede ohne minus mit Nutzung gestackter Information im Zeitraum DoY 131-160 2013, Werte in mm; zusätzlich: Quotient aus Höhenänderung und ΔZLV (ohne Einheit)

Station	ΔZLV	σ	ΔU_p	$\frac{\Delta U_p}{\Delta ZLV}$
0387	-0.07	0.48	0.12	-1.71
0403	-0.02	0.38	-0.08	4.00
0515	-0.51	0.90	0.99	-1.94
0529	-0.02	0.35	-0.01	0.50
AUBU	-0.36	1.12	0.07	-0.19
DOCO	-0.22	0.88	0.52	-2.36
STJ9	-0.10	0.46	0.20	-2.00
WLBH	-1.47	2.26	2.50	-1.70
ZIM2	0.13	0.56	-0.32	-2.46
ZIMM	-0.03	0.40	0.08	-2.66

diesen Plots nur jeder vierte Datenpunkt dargestellt und die Werte der Nordkomponente mit einem Punkt, die der Ostkomponente mit einem Kreuz gekennzeichnet. Die nach vorliegender Kalibrierinformation getroffene Farbwahl wurde wie in Abb. 6-21 beibehalten. In den oberen Plots sind die Absolutwerte der Gradienten dargestellt. Die Schätzwerte der Nord- und Ostkomponenten weisen für die vier dargestellten Stationen Werte im Intervall $[-2 \text{ mm}, +2 \text{ mm}]$ auf, wobei die Variationen der Stationen ZIM2 und ZIMM geringer ausfallen. Bereits in den Plots der Absolutwerte sind geringe bzw. große Unterschiede zwischen den Varianten ohne und mit Stacking der Stationen 0515 bzw. WLBH erkennbar, während die Gradienten von ZIM2 und ZIMM in Abb. 6-22(c) und 6-22(d) weitgehend deckungsgleich verlaufen. Noch deutlicher treten die Differenzen in den unteren Plots der Differenzen hervor. Bei 0515 weisen die Nord- und Ostkomponenten geringe Unterschiede im Bereich von -0.1 mm bis 0.1 mm auf, wobei die durch Kreuze markierte Differenz der Ostkomponente meist positive Werte annimmt, während die Nordkomponente über die Zeit variiert; ein annähernd konstanter Offset über die Zeit ist also nicht gegeben. Die Differenzen der Gradienten von WLBH liegen teilweise außerhalb des gewählten Plotmaßstabes. Um trotzdem eine Vergleichbarkeit der einzelnen Plots zu gewährleisten, wurde der Maßstab nicht modifiziert. Die starke Variation der Gradienten von WLBH kann durch die Abschattungssituation an dieser Station erklärt werden. Wie in Abb. 6-15 erkennbar ist, existiert an dieser Station eine starke Abschattung niedriger Elevationsbereiche durch Vegetation. Ebenso deutlich wird dies auch in den Stackingmaps dieser Station (siehe Abb. B-6), in denen die niedrigsten Residuen bei Elevationen zwischen 10° und 15° existieren. Nach Meindl u. a. [2004] tragen jedoch die Beobachtungen in niedrigen Elevationen entscheidend zur Genauigkeit der horizontalen Troposphärengradienten bei. In den von Meindl u. a. [2004] vorgestellten Ergebnissen konnte die Genauigkeit der Gradienten um bis zu Faktor drei gesteigert werden, wenn die Minimalelevation von 10° auf 3° heruntersetzt wurde. Die geschätzten Gradienten von WLBH sind daher nur unter Vorbehalt nutzbar.

6.2.5 Resümee

In den vorangehenden Unterkapiteln wurde eine verbesserte Stacking-Variante verwendet und deren Auswirkungen auf verschiedene Parameter ausführlich analysiert. Im Unterschied zum in Kap. 6.1 vorgestellten Testscenario wurde die aus originären Residuen abgeleitete Korrekturinformation mittels separater Dateien in die Prozessierung eingeführt, wodurch eine von der PZV-Information abweichende, feinere Rasterweite

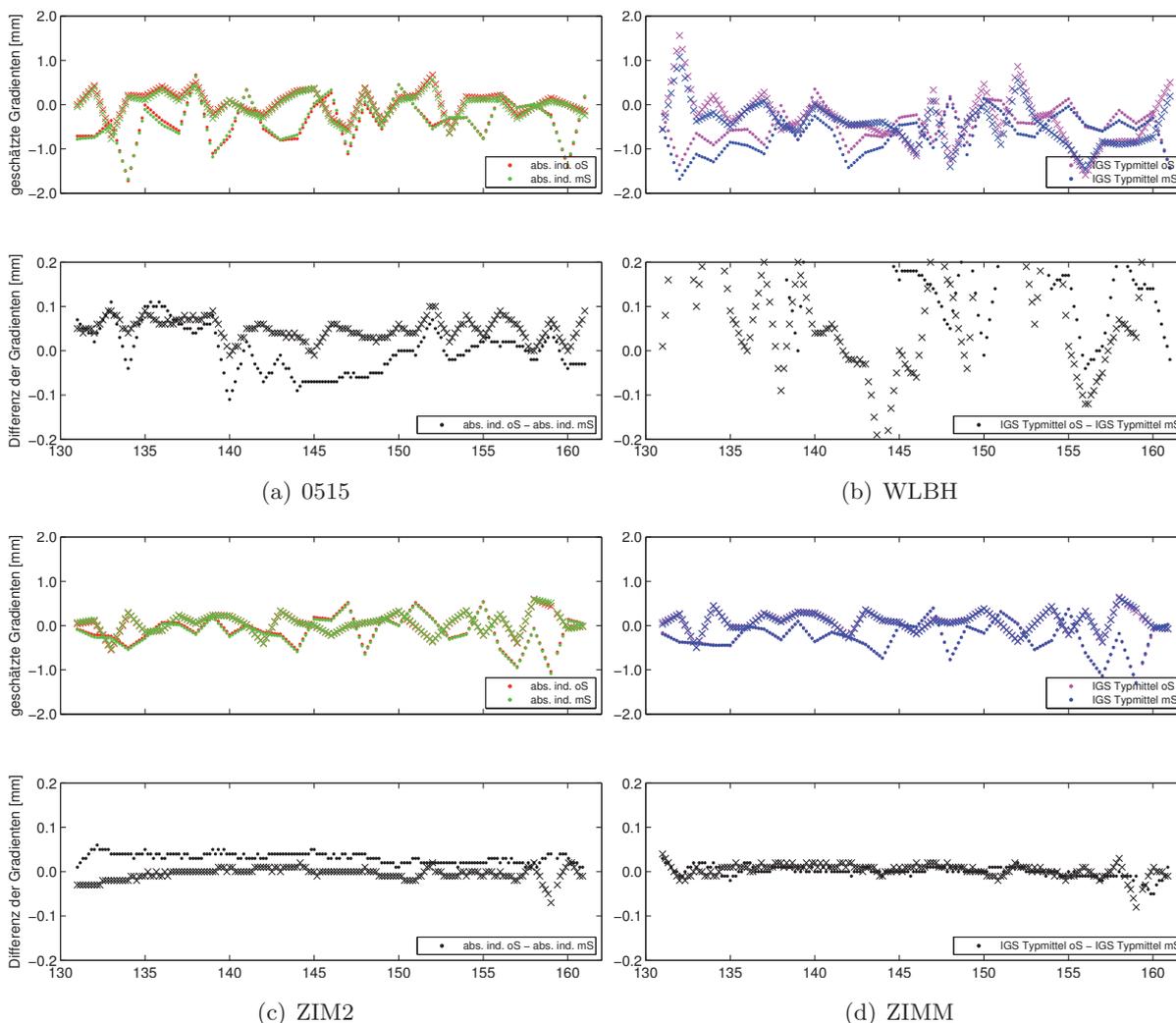


Abb. 6-22: Horizontale Gradienten der zenitalen troposphärischen Laufzeitverzögerungen für Zeitraum DoY 131 bis 160 2013; oben: Absolutwert für Varianten ohne (oS) und mit (mS) Einführung gestackter Information; unten: Differenz oS minus mS; Punkt: Nordkomponente, Kreuz: Ostkomponente; nur jeder vierte Datenpunkt dargestellt

genutzt werden konnte. Insgesamt wurden in dieser Untersuchung die Daten von zehn Stationen des GURN über einen Zeitraum von 120 d prozessiert. Zur Berechnung der gestapelten Korrekturen wurde das gleitende Stacking angewendet, bei dem die Korrekturinformation für den aktuellen Tag aus den zehn vergangenen Tagen berechnet wurde. In den berechneten Stackingmaps einiger untersuchter Stationen sind signifikante, über einen längeren Zeitraum reproduzierbare, individuelle Stationsmuster enthalten, während andere Stationen kein auffälliges Verhalten zeigen. Eine Analyse der Variation der Stackingmaps über die Zeit konnte zeigen, dass zwischen den Stackingmaps aufeinanderfolgender Zeiträume eine hohe Korrelation besteht. Jedoch ist eine Abnahme der Korrelation zwischen einer Referenz-Stackingmap und den Stackingmaps weiterer Zeiträume mit fortschreitender Zeit festzustellen. Dies deutet klar auf eine Variabilität der Einflüsse auf eine Station im Lauf der Zeit hin. Bei Stationen, die keine signifikanten Muster in den Stackingmaps enthalten, ist eine stärkere Variation der Korrelation aufeinanderfolgender Stackingmaps sowie ein stärkerer Rückgang der Korrelation bezogen auf eine Referenz-Stackingmap zu verzeichnen, da die bestimmten Korrekturen eher zufälliger Natur sind. Unter Umständen ist für letztgenannte Stationen ein Verzicht auf die Berücksichtigung von Korrekturinformation aus gestapelten Residuen, vorzuziehen.

Als Maß für die Wirksamkeit des angewendeten Verfahrens kann der Vergleich zwischen Residuen ohne und mit der Einführung gestapelter Information dienen. Die in dieser Arbeit verwendeten Residuen wurden aus der Differenz der in die GNSS-Auswertung eingehenden Originalbeobachtungen und der im Rahmen der Auswertung geschätzten Beobachtungen berechnet, repräsentieren also eine an die originären Daten anzubringende Verbesserung. Je kleiner diese Verbesserung ist, desto besser ist die Übereinstimmung zwischen eingehenden Beobachtungen, den in der Auswertung eingesetzten Verbesserungen und Modellen sowie den geschätzten Beobachtungen. Weisen die aus einer Prozessierung ohne Einführung von Korrekturinformation berechneten Residuen signifikante Muster (Abweichungen von Null) auf, die nach einer Prozessierung der identischen Rohdaten mit Einführung der aus gestapelten Residuen abgeleiteten Korrektur weitgehend verschwinden, so ist dies ein Indiz für die Wirksamkeit der berechneten Korrekturinformation. Die Residuen der Stationen, die erkennbare Strukturen vor der Einführung der Korrektur aufwiesen, konnten signifikant verbessert werden, d.h. nach der Einführung der gestapelten Residueninformation in einen erneuten Prozessierungsdurchlauf waren diese Muster weitestgehend verschwunden. Außerdem wurden im Rahmen der GNSS-Auswertung weniger Originalbeobachtungen als Ausreißer eliminiert, so dass die Gesamtzahl der verbleibenden Residuen erhöht werden konnte. Durch verschiedene Untersuchungen konnte die Zunahme der Residuenanzahl sowie die Verbesserung der Residuenwerte nachgewiesen werden. Wie zuvor erwähnt, wurden die größten Verbesserungen bei Stationen mit deutlicher Residuensignatur erzielt. Auch wenn bei einigen Stationen in niedrigen Elevationsbereichen eine Zunahme der Residuenanzahl sowie eine Verbesserung der Residuenwerte erreicht werden konnte, nehmen die Residuenwerte nach der Korrektur in niedrigen Elevationen keine einheitlichen Werte an, sondern weisen nach wie vor deutliche Streuungen auf.

Ein wesentlicher Aspekt bei der Anbringung von Korrekturen im Rahmen einer Positionsbestimmung mit GNSS ist die Auswirkung auf die Koordinatenlösungen. Hierbei wurden die Differenzen zwischen einer Lösung ohne und mit der Einführung gestapelter Information berechnet und analysiert. Analog zu den Feststellungen bei der Analyse der Stackingmaps und der Residuenentwicklung sind die Auswirkungen bei Stationen mit deutlicher Residuensignatur größer als bei Stationen, deren Residuen nur ein Rauschen und keine systematischen Effekte aufzeigen. Die Beträge der Mediane der topozentrischen Koordinatendifferenzen (ΔN , ΔE , ΔUp) nehmen im untersuchten Zeitraum von 110 d Werte für die Lage von maximal 0.62 mm und für die Höhe von maximal 2.65 mm an. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die dieser Untersuchung zugrunde liegenden Differenzzeitreihen keinen konstanten Versatz, sondern je nach Station eine große Streuung aufweisen. Da die Daten der in dieser Arbeit verwendeten GNSS-Permanentstationen für geodynamische Untersuchungen in der Region des Oberrheingrabens verwendet werden, wurde ansatzweise der Einfluss der eingeführten Korrekturen auf die Bestimmung der aus Koordinatenzeitreihen abgeleiteten Stationsgeschwindigkeiten untersucht. Aufgrund der geringen Länge der untersuchten Zeitreihe (110 d) können hierzu jedoch keine gesicherten Aussagen getroffen werden. Hierfür ist die Auswertung und Analyse der Daten eines Zeitumfangs von 2 Jahren oder mehr erforderlich.

In den vergangenen Jahren ist das Interesse verschiedener Disziplinen an der aus GNSS abgeleiteten troposphärischen Laufzeitverzögerung gestiegen, so dass dieser Aspekt ebenfalls untersucht wurde. Für einen ausgewählten Zeitraum wurden die troposphärische Laufzeitverzögerung sowie die horizontalen Gradienten ohne bzw. mit Einführung gestapelter Information analysiert. Wie bei den zuvor untersuchten Parametern treten die größten Unterschiede wiederum bei Stationen mit sichtbarer Residuensignatur auf. Neben größeren Streuungen sind auch Verschiebungen der Differenzzeitreihen gegenüber der Nulllinie erkennbar. Diese korrelieren wiederum stark mit den durch die Korrekturen bedingten Höhenänderungen der Stationen.

7 Zur Notwendigkeit von Individualkalibrierungen

Die mit Stacking eröffneten Möglichkeiten einer individuellen Stationskalibrierung geben Grund zur Überlegung, ob für CORS eine individuelle Kalibrierung der GNSS-Empfangsantenne auf Absolutniveau noch notwendig ist oder ob absolute Typmittelwerte (beispielsweise des IGS) sowie die Einführung gestapelter Information das gleiche Ergebnis liefern. Zum Vorabcheck, ob eine derartige Untersuchung notwendig ist, werden für die fünf Stationen der in Kap. 6.2 untersuchten CORS, für die individuelle Absolutkalibrierungen (PZO und azimut-/elevationsabhängige PZV) vorliegen, die Unterschiede zu den korrespondierenden IGS-Typmittelwerten betrachtet. Sollten hierbei große Differenzen auftreten, so ist eine erneute Prozessierung der Daten unter Verwendung von IGS-Typmittelwerten anstelle der Individualkalibrierungen, Stacking der hieraus stammenden Residuen sowie eine Einführung der gestapelten Information in einen neuen Prozessierungsdurchlauf sinnvoll. Detaillierte Ausführungen zu Antennenkalibrierwerten sind in Kap. 5.1 ab S. 55 zu finden. Aktuell werden mittels Roboterkalibrierung PZO und PZV der GNSS-Empfangsantennen für GPS und GLONASS-Signale, im Rahmen von Kammerkalibrierungen, bei denen künstlich generierte Signale verwendet werden, auch bereits für Galileo-Signale bestimmt. Da in dieser Arbeit lediglich GPS-Daten ausgewertet wurden, beschränkt sich die Untersuchung der Kalibrierinformation lediglich auf G01 (GPS L_1) und G02 (GPS L_2).

7.1 Vergleich der Kalibrierwerte

Durch die Einführung gestackter Information in die Prozessierung werden neben Mehrwegeeffekten und sonstigen äußeren Einflüssen zusätzlich Restfehler der Kalibrierung, vornehmlich der PZV, korrigiert. Daher ist in dieser Untersuchung eine Analyse der PZV-Information notwendig. Ein korrekter Vergleich der PZV verschiedener Kalibrierungen ist jedoch nur möglich, wenn die Kalibrierinformation zuvor auf identische PZO-Werte umgerechnet wird. Hierzu steht am GIK das Programm CCANTEX (Version 1.0, 2009) von WaSoft (<http://www.wasoft.de>, Stand: 07.10.2014) zur Verfügung. Mit CCANTEX können vorhandene Kalibrierdaten im ANTEX-Format beispielsweise auf andere PZO umgerechnet werden ohne die Korrekturwirkung zu verändern. Erste Testumrechnungen einzelner atx-Dateien haben gezeigt, dass bei Umrechnung dieser Dateien auf die dort hinterlegten PZO die PZV um einen konstanten Betrag verschoben werden. Hierbei ist anzumerken, dass die Individualkalibrierungen mit dem Roboterverfahren bestimmt und die PZV im Zenit mit 0.00 mm festgelegt wurden. In Abb. 7-1 sind die zenitdistanzabhängigen (Zeile NOAZI der atx-Datei) originären (Signatur: - - -) und transformierten (- · -) PZV der IGS-Typmittelwerte einer Antenne des Typs LEIAT504GG LEIS sowie deren Differenzen (· · ·) für G01 (rot) und G02 (blau) dargestellt. Die Stützpunkte der Kurven sind durch Quadrate (G01) bzw. Kreuze (G02) gekennzeichnet. Als originär werden in diesem Fall die ursprünglichen, in der originären atx-Datei stehenden PZV-Werte bezeichnet. Für die Berechnung der transformierten Werte wurde die originäre atx-Datei mittels CCANTEX auf den in dieser Datei stehenden PZO (jede Frequenz separat) umgerechnet. In der entstehenden atx-Datei stehen die identischen PZO, lediglich die PZV wurden modifiziert, die Korrekturwirkung des Parametersatzes ist dadurch unverändert. In Abb. 7-1 ist deutlich erkennbar, dass die originären und transformierten PZV lediglich um einen konstanten Betrag verschoben sind, so dass die Differenz der beiden Kurven über alle Zenitdistanzen einen konstanten Wert annimmt. Laut Aussage von Herrn Wanninger, dem Autor von CCANTEX (persönliche Kommunikation: 10.10.2014), kann das Niveau der PZV beliebig um einen konstanten Offset verändert werden, ohne dass die 3D-Korrekturwirkung beeinträchtigt wird, lediglich die Zeitkomponente (Empfängeruhr) wird modifiziert. Für die Berechnung der Unterschiede zwischen den PZV der Individualkalibrierungen und der Typmittelwerte wird folgende Vorverarbeitung durchgeführt: jede atx-Datei (individuell und Typmittel) wird mittels CCANTEX auf die dort enthaltenen IGS-PZO umgerechnet. In den Dateien der Individualkalibrierung werden die PZO

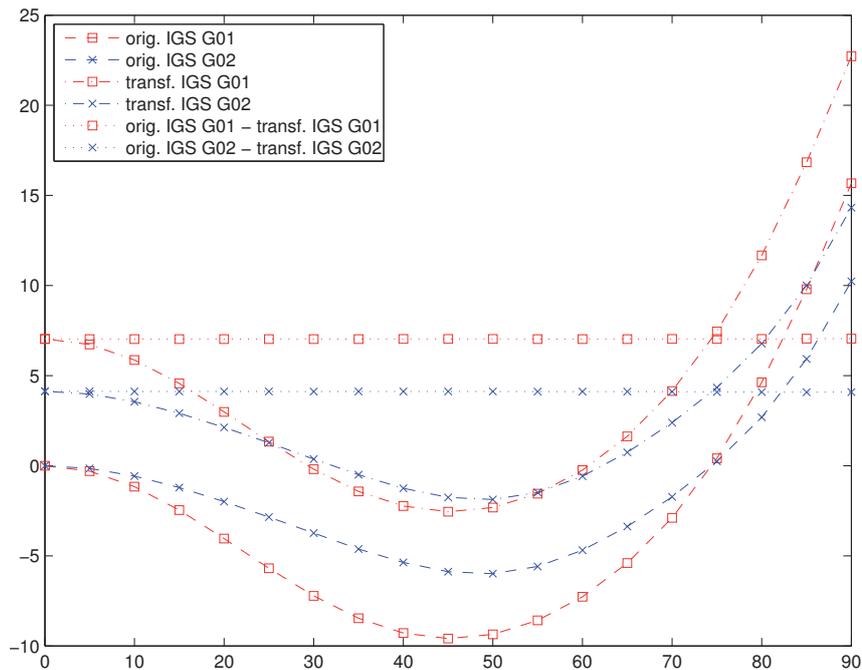


Abb. 7-1: Zenitdistanzabhängige originäre (---) und transformierte (- · -, mit CCANTEX auf IGS-PZO dieser Antenne umgerechnet) PZV der IGS-Typmittelwerte einer Antenne des Typs LEIAT504GG LEIS sowie deren Differenzen (···) für G01 (rot) und G02 (blau); Rechtsachse: Zenitdistanz [°], Hochachse: PZV-Wert bzw. Differenz [mm]

hierbei durch die IGS-PZO ersetzt und die PZV so transformiert, dass durch den neu entstandenen Parametersatz die identische Korrekturwirkung erzielt wird. Der PZV-Wert im Zenit beträgt dadurch nicht mehr Null. Die PZO in den Dateien der IGS-Typmittelwerte bleiben unverändert, lediglich die PZV werden so angepasst, dass das Mittel der PZV im Zenitdistanzbereich 15° bis 65° Null ergibt, wodurch die PZV im Zenit ebenfalls von Null abweichen.

Da in der Auswertung der GPS-Daten die Linearkombination L_3 verwendet wird, werden die in den atx-Dateien enthaltenen PZO- und PZV-Werte (G01, G02) für einen Vergleich der Individual- bzw. IGS-Kalibrierwerte direkt nach L_3 umgerechnet und anschließend die Differenz zwischen den auf die IGS-PZO transformierten Individualkalibrierungen und dem zugehörigen Typmittelwert gebildet. Die Berechnung der PZO und PZV erfolgt hierbei wie die Berechnung der ionosphärenfreien Linearkombination (siehe Formel 4-1 auf S. 47). L_1 bzw. L_2 werden für die PZO und PZV-Werte durch die entsprechenden Einträge G01 bzw. G02 in der atx-Datei ersetzt. Dieses Vorgehen wird ebenso in der BS angewendet (Routine BERN52/INC/FOR/D_PHA ECC.f90, Subroutine SEARCH_OFF). In Tab. 7-1 sind die fünf in beiden Varianten (Individualkalibrierung, IGS-Typmittel) prozessierten Stationen mit den dort eingesetzten Antennentypen, den Differenzen der auf L_3 umgerechneten PZO (individuell minus Typmittel) und den minimalen/maximalen Differenzen der auf L_3 umgerechneten, auf die IGS-PZO transformierten PZV-Werte aufgeführt. Diese Tabelle zeigt, dass sich die individuellen Kalibrierungen der einzelnen Antennen gegenüber den IGS-Typmittelwerten unterscheiden. Die Unterschiede in den Lagekomponenten der PZO bewegen sich zwischen -2.69 mm und 1.10 mm, die der Höhenkomponente zwischen -4.82 mm und 1.64 mm. Die Kalibrierwerte zweier identischer Antennen des Typs TRM59800.00 SCIS unterscheiden sich hierbei in unterschiedlicher Form vom IGS-Typmittel. Die Differenzen der auf den jeweiligen IGS-PZO und zu L_3 umgerechneten PZV weisen ebenfalls größere Differenzen auf, deren Minimal-/Maximalwerte bis zu -8.69 mm/5.34 mm annehmen. Eine grafische Darstellung der PZV-Differenzen zwischen individueller und Typkalibrierung auf L_3 -Ebene ist in Abb. 7-2 gegeben. In dieser Abbildung ist deutlich erkennbar, dass die

Tab. 7-1: Übersicht der Stationen mit den im Zeitraum DoY 121 bis 240 2013 eingesetzten Antennen, der Differenzen der PZO-Werte für L_3 , sowie der minimalen/maximalen Differenzen der auf den IGS-PZO der jeweiligen Antenne umgerechneten PZV-Werte [mm] auf L_3 ; Differenzen jeweils Individualkalibrierung - IGS-Typmittel; Kalibrierniveau: absolut

Station	Antenne	Diff. PZO L_3			PZV-Diff. L_3	
		N	E	Up	min	max
0387	TRM59800.00 SCIS	-0.02	0.88	1.64	-4.99	3.90
0403	TRM59800.00 SCIS	-0.51	0.66	-0.56	-5.54	4.44
0515	LEIAT504GG NONE	-1.10	-1.53	0.53	-8.69	5.34
0529	LEIAT504GG LEIS	-2.69	0.02	-4.82	-8.29	3.05
ZIM2	TRM59800.00 NONE	0.06	1.10	1.40	-1.61	4.14

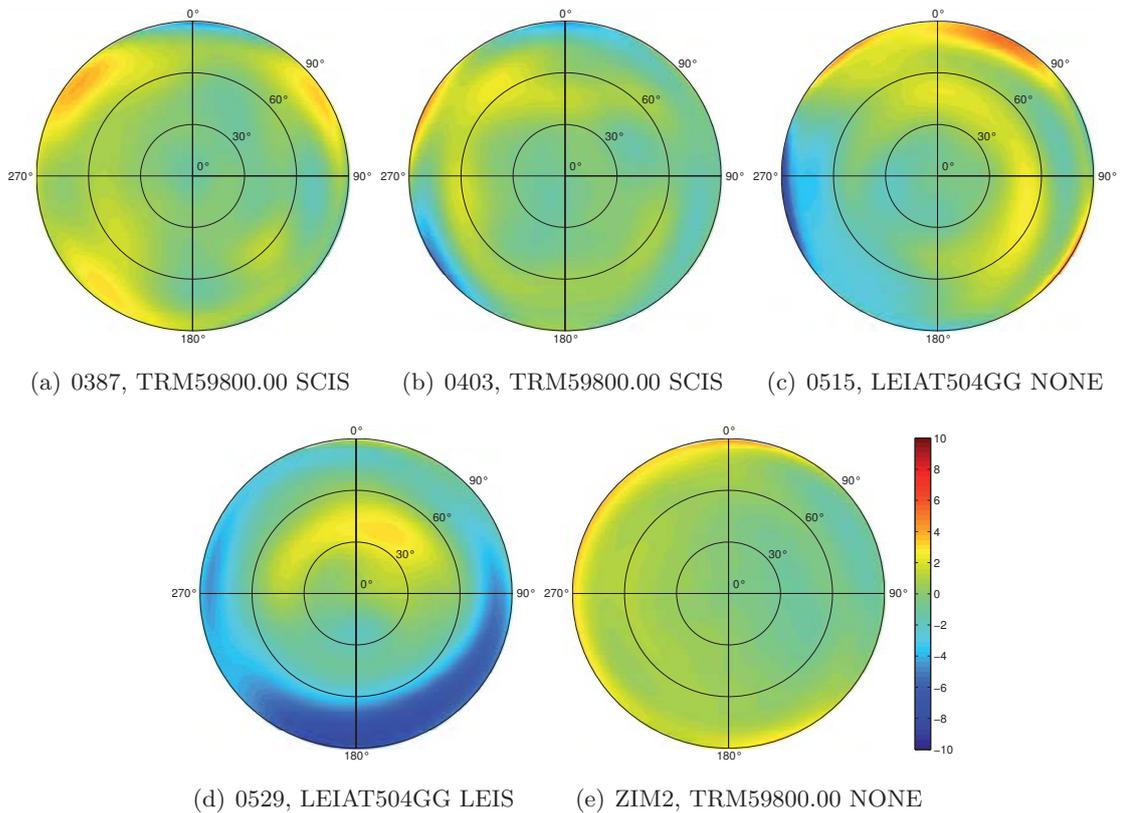


Abb. 7-2: Differenz der auf den IGS-PZO der jeweiligen Antenne umgerechneten individuellen PZV-Werte zum IGS-Typmittel auf L_3 -Niveau der einzelnen Stationen mit den dort genutzten Antennentypen; Werte der Farbskala in [mm]; konzentrische Kreise (von innen nach aussen): Zenitdistanz 30°, 60°, 90°

beiden Antennen des gleichen Typs bezogen auf die IGS-Typmittelwerte ein unterschiedliches Verhalten aufweisen (Abb. 7-2(a) und 7-2(b)). Fairerweise muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass die vorliegenden Roboterkalibrierungen dieser beiden Antennen zu unterschiedlichen Zeitpunkten stattgefunden haben: die auf 0387 verwendete Antenne wurde am 15.08.2008, die auf 0403 eingesetzte Antenne am 07.01.2011 kalibriert. Die Kalibrierungen fanden jeweils bei der Berliner GNSS-Landeskalibriereinrichtung⁴ statt. Möglicherweise wirken sich Veränderungen im Umfeld der Kalibrierstelle oder kleine, vom Hersteller an diesem Antennentyp durchgeführte Modifikationen auf das individuelle Verhalten aus.

Auch die PZV der beiden Antennen des Typs LEIAT504GG ohne (NONE) und mit LEIS-Radom (LEIS) weichen vom IGS-Typmittel ab, während die Individualkalibrierung der auf ZIM2 eingesetzten Antenne weitestgehend dem IGS-Typmittel entspricht. Hier sind nur geringe Unterschiede in niedrigen Elevationen zu verzeichnen. Die Unterschiede zwischen den Individualkalibrierungen und den IGS-Typmittelwerten sind zwar je nach Antenne mehr oder weniger stark ausgeprägt, können sich jedoch auf die Prozessierungsergebnisse auswirken. Daher ist eine vergleichende Untersuchung zweier Versionen unter Verwendung der Individualkalibrierungen beziehungsweise mit Nutzung der vom IGS publizierten Typmittelwerte in jedem Fall sinnvoll. Hierzu wurden die GPS-Daten erneut prozessiert. Für Stationen mit vorliegender Individualkalibrierung wurde die Antenneninformation in der STA-Datei modifiziert, so dass stattdessen die IGS-Typmittelwerte verwendet wurden. Nach dem Durchlauf des kompletten Zeitraums (DoY 121-240 2013) wurden die Residuen der einzelnen Stationen gleitend gestapelt (Stackingzeitraum: 10 d, Zellgröße: $2^\circ \times 1^\circ$, Azimut \times Elevation) und als Korrektur in einem erneuten Prozessierungsdurchlauf eingeführt.

Für Antennen, deren individuelle PZV nur geringe Unterschiede zu den IGS-Typmittelwerten aufweisen, sollten die Differenzen der Stackingmaps ebenfalls geringe Werte aufweisen. Ob sich die Unterschiede der PZO auf die Stackingmaps oder lediglich auf die geschätzten Koordinaten auswirken, lässt sich vorab nur schwer abschätzen.

7.2 Unterschiede der Stackingkarten

Grundlage dieser Untersuchungen sind PPP-Auswertungen, die einerseits mit der individuellen, andererseits mit der Kalibrierinformation der IGS-Typmittelwerte durchgeführt wurden. Zunächst werden die Unterschiede in den Stackingmaps untersucht, welche lediglich durch die Verwendung der unterschiedlicher Kalibrierinformation herrühren. Hierzu wurden Differenzplots und Statistiken erstellt, die im Folgenden analysiert werden. Zur Kontrolle wurden jeweils auch die fünf Stationen, bei denen bereits in den vorangegangenen Prozessierungen IGS-Typmittelwerte mangels Individualkalibrierungen eingesetzt wurden, mitprozessiert. Die Ergebnisse der erneuten Prozessierung dieser Stationen dürfen sich, da keine Änderung der für diese Stationen verwendeten Informationen vorgenommen wurde, nicht von den früheren Auswertungen unterscheiden.

In Abb. 7-3 sind die Differenzplots der Stackingmaps der Prozessierung mit absoluten Individualkalibrierungen minus der Stackingmaps mit IGS-Typmittelwerten für den zehntägigen Stackingzeitraum DoY 121-130 2013 dargestellt. Erwartungsgemäß weisen die Stationen, deren PZV der Individualkalibrierungen erkennbar von den PZV der Typmittelwerte abweichen, signifikante Unterschiede in den mit beiden Versionen generierten Stackingmaps auf. Die Differenzen der Station ZIM2, deren individuelle

⁴http://www.stadtentwicklung.berlin.de/geoinformation/landesvermessung/landeskabriereinrichtung/de/kalibrierung_gnss.shtml, Stand: 17.10.2014

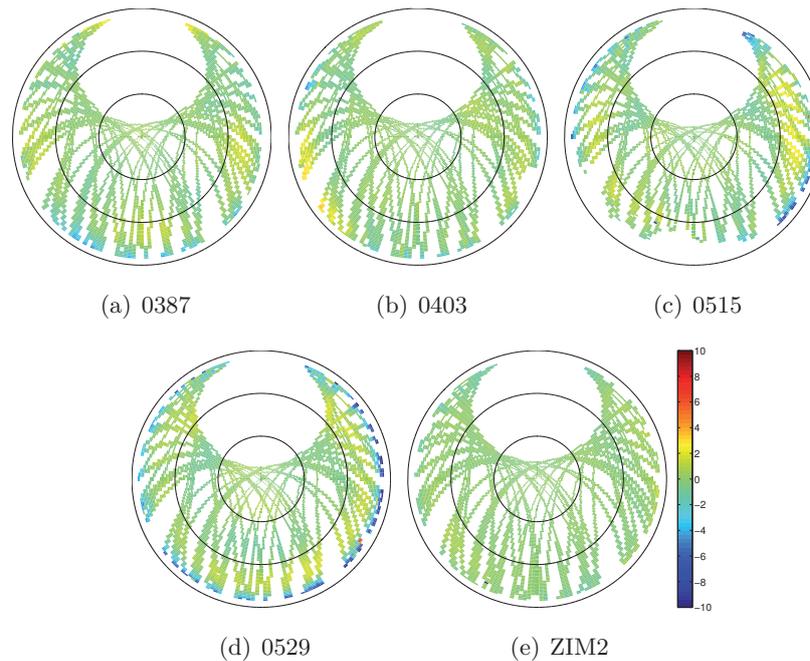


Abb. 7-3: Differenz der Stackingmaps der L_3 -Residuen: Prozessierung mit individuellen Kalibrierwerten minus Prozessierung mit IGS-Typmittelwerten (jeweils Absolutniveau); Stackingzeitraum: DoY 121-130 2013; Werte der Farbskala in [mm]; konzentrische Kreise (von innen nach aussen): Zenitdistanz 30° , 60° , 90°

Tab. 7-2: Medianwerte der minimalen/maximalen Differenzen der gleitenden Stackingmaps (Individualkalibrierung - IGS-Typmittel, Stackingzeitraum: 10 d) im Zeitraum DoY 121-240 2013; Werte in [mm]

Station	Median(Min)	Median(Max)
0387	-5.15	3.93
0403	-4.77	3.62
0515	-11.53	3.60
0529	-10.76	3.16
ZIM2	-2.62	1.44

PZV sich nur minimal vom den Typmittelwerten unterschieden haben, weisen nur sehr geringe Werte auf. Die Variation der Differenzplots über die Zeit ist – visuell betrachtet – sehr gering. An einzelnen Tage existieren bei verschiedenen Stationen einzelne Zellen, die deutlich größere Differenzen aufweisen, als andere. Die größten Werte weisen, wie bereits bei den Differenzen der PZV-Werte, die beiden Stationen von SAPOS®Rheinland-Pfalz (0515 und 0529) in niedrigen Elevationsbereichen auf. Die Medianwerte der minimalen/maximalen Unterschiede zwischen den Stackingmaps über den gesamten untersuchten Zeitraum (DoY 121-240 2013) sind in Tab. 7-2 zusammengestellt. Die Differenzen der testweise mitprozessierten Stationen (Verwendung von IGS-Typmittelwerte in beiden Versionen) liegen korrekterweise alle bei 0 mm. Diese Extremwerte bewegen sich in einer ähnlichen Größenordnung wie die in Tab. 7-1 dargestellten Extrema der PZV.

7.3 Vergleich der Residuen

Ein wichtiges Kriterium zum Ersatz der Individualkalibrierungen durch Typmittelwerte und Korrektur von Unterschieden durch die Einführung gestapelter Information ist die Auswirkung auf geschätzte Residuen

und die Koordinatenwerte. In diesem Unterkapitel werden die in beiden Varianten nach der Einführung der jeweiligen gestackten Information berechneten Residuen gegeneinander verglichen. Zunächst wird untersucht, ob – abgesehen von den eigentlichen Residuenwerten – die zeitlich und räumlich gleichen Residuen, identifizierbar über Satellitennummer, Epoche, Elevation und Azimut, ausgegeben werden. Zusätzlich werden die Differenzen der zuvor als identisch ausgewiesenen Residuen berechnet und analysiert. Residuen, die lediglich in einer Prozessierungsvariante existieren, wurden beim iterativen Datenscreening im Laufe der Prozessierung nicht als Ausreißer detektiert, sondern verbleiben in den Daten. Die Kombination der eingeführten Antenneninformation mit der zugehörigen gestapelten Information wirkt sich für dieses Residuum positiv aus, so dass es im Datenmaterial der Prozessierung verbleiben kann.

In Abb. 7-4 sind die Differenzen der zeitlich und räumlich identischen Residuen der fünf in beiden Varianten prozessierten Stationen für DoY 131 2013 nach der Einführung gestapelter Residuen dargestellt. Zusätzlich sind Residuen, die gegebenenfalls nur in der Variante mit individuellen Kalibrierwerten/IGS-Typmittelwerten vorkommen, durch rote/blau Quadrare gekennzeichnet. Für den ausgewählten DoY treten lediglich bei den Stationen 0515 und ZIM2 Residuen auf, die nur in einer der beiden Varianten vorkommen. Insgesamt betrachtet weisen die Differenzen der Residuen meist Werte in der Nähe von Null auf. Lediglich in niedrigen Elevationsbereichen nehmen die Differenzen auch größere Werte an. Die größten Werte sind hierbei an der Station 0529 Abb. 7-4(d) erkennbar. Die Ergebnisse des Vergleichs im gesamten

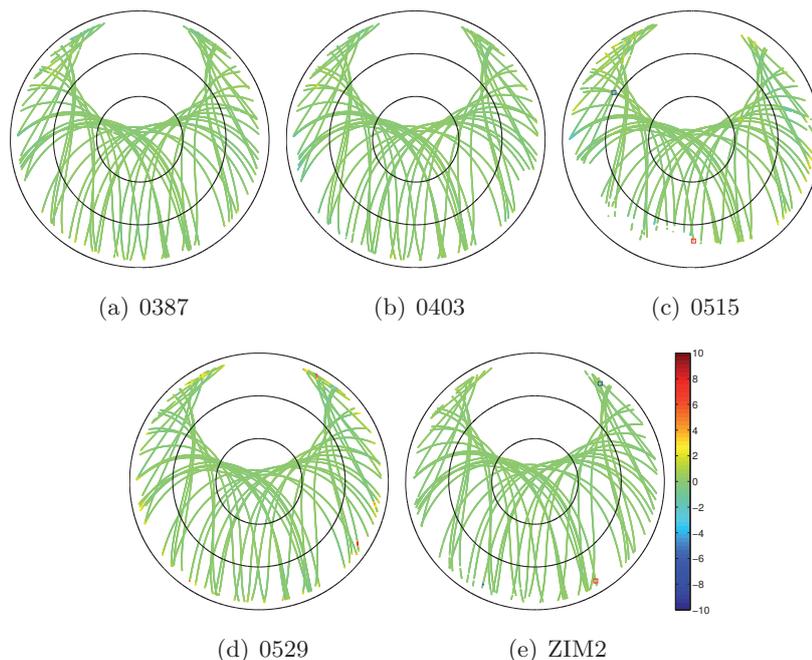


Abb. 7-4: Differenz der L_3 -Residuen für DoY 131 2013: Prozessierung mit individuellen Kalibrierwerten minus Prozessierung mit IGS-Typmittel (jeweils Absolutniveau), in beiden Fällen mit Einführung der gestapelten Residueninformation; Werte der Farbskala in [mm]; rote/blau Quadrate: Residuen treten nur in Prozessierung mit Individualkalibrierung/IGS-Typmittel auf; konzentrische Kreise (von innen nach aussen): Zenitdistanz 30°, 60°, 90°

Untersuchungszeitraum (DoY 131 bis 241 2013) sind in Tab. 7-3 zusammengestellt. Die Medianwerte der Minima/Maxima nehmen hierbei Werte an, die betragsmäßig unter 4 mm liegen. Lediglich die Maxima der Stationen 0515 und 0529 überschreiten hierbei 6 mm. Eine Analyse der einzelnen Tage zeigt, dass die Stationen 0387 und 0403 nur wenige, deutlich vom Wert des Medians abweichende Residuendifferenzen aufweisen. Bei 0515 treten mehr Ausreißer in beiden Extremwerte auf, bei 0529 lediglich in den Maxima,

Tab. 7-3: Zusammenstellung der Medianwerte der Extrema und des Medians aller Residuendifferenzen der Tageslösungen zwischen Prozessierung mit individuellen Kalibrierwerten und IGS-Typmittelwerten im Zeitraum DoY 131 bis 241 2013; Werte in [mm]; sowie Anzahl der Tage, an denen Residuen nur in einzelnen Varianten auftreten

Station	Min	Max	Median aller Residuen	Anzahl DoY	
				nur ind.	nur IGS
0387	-2.62	3.56	0.0010	27	33
0403	-2.76	2.41	-0.0020	11	9
0515	-3.72	6.50	0.0035	46	68
0529	-2.62	7.42	0.0026	11	15
ZIM2	-1.11	2.06	-0.0016	19	4

die Beträge der Min-/Max-Werte von ZIM2 nehmen die geringsten Werte der untersuchten Stationen an. Das Verhalten des Auftretens von Residuen, die lediglich in einer Variante vorkommen (Spalten 5 und 6 in Tab. 7-3) ist von Station zu Station unterschiedlich. Bei den hier angegebenen Zahlen wurde nicht berücksichtigt, dass an einer Station an einem Tag beide Varianten Residuen enthalten können, die in der jeweils anderen Version nicht enthalten sind. Somit kann aus der Differenz der Gesamtzahl der untersuchten Tage (DoY 131-241 = 111 d) und der in der Tabelle gegebenen Anzahl der Tage nicht auf die Anzahl der Tage mit räumlich und zeitlich identischen Residuen geschlossen werden. Beispielsweise existieren bei der Station 0515 an den DoY 134 und 136 2013 für beide Varianten jeweils zwei Residuen, die in der anderen Variante nicht vorkommen. Die Anzahl der Residuen, die nur in einer Variante vorkommen, liegt in der Regel bei Werten von weniger als fünf, in einzelnen Fällen werden Werte bis knapp 40 angenommen. Gemessen an der Gesamtzahl der Residuen eines Tages, welche für alle fünf untersuchten Stationen in der Regel bei mehr als 24000 liegt, ist dies jedoch ein sehr geringer Prozentsatz, so dass nicht von einem systematischen Verhalten ausgegangen werden kann, da die Position in der Antennenhemisphäre, in der die Zusatzresiduen auftreten, zudem variiert. Bis auf geringe Unterschiede liefern die beiden Varianten – bezogen auf die Residuen – gleiche Ergebnisse, d.h. dass durch die Verwendung von IGS-Typmittelwerten in Kombination mit gestapelter Information weitgehend das gleiche Ergebnis erzielt werden kann wie bei Verwendung von Individualkalibrierungen und zugehöriger gestapelter Residuen.

7.4 Vergleich der Koordinaten

Ein wesentlicher Punkt beim Übergang von Individualkalibrierungen auf Typmittelwerte sind mögliche Effekte auf die geschätzten Koordinaten. In diesem Unterkapitel werden die in beiden Varianten nach der Einführung der gestapelten Information berechneten Koordinaten untersucht. Hierzu wurden die Koordinatendifferenzen aus der Variante mit absoluten individuellen Kalibrierwerten minus der Variante mit den IGS-Typmittelwerten berechnet. Zur besseren Interpretierbarkeit wurden die geozentrischen Differenzen Δx , Δy und Δz hierbei in die topozentrischen Differenzen ΔN , ΔE und ΔU_p umgerechnet. Die Koordinatendifferenzen der zur Kontrolle in beiden Varianten mit IGS-Typmittelwerten prozessierten Stationen betragen an allen Tagen in allen Komponenten 0 mm. Die Differenzen der fünf untersuchten Stationen im analysierten Zeitraum sind in Abb. 7-5 dargestellt. Zusätzlich enthält Tab. 7-4 die Mediane und Standardabweichungen der Koordinatendifferenzen (Variante absolut individuell minus Variante IGS-Typmittel). Die Differenzen auf den einzelnen Stationen zeigen stationsspezifische, systematische und über den gesamten Untersuchungszeitraum (DoY 131-241 2013) reproduzierbare Unterschiede in den einzelnen Koordinatendifferenzen, welche durch konstante Offsets erkennbar sind. Die Größenordnung der Unterschiede variiert je nach Station in den einzelnen Komponenten. Von den fünf untersuchten

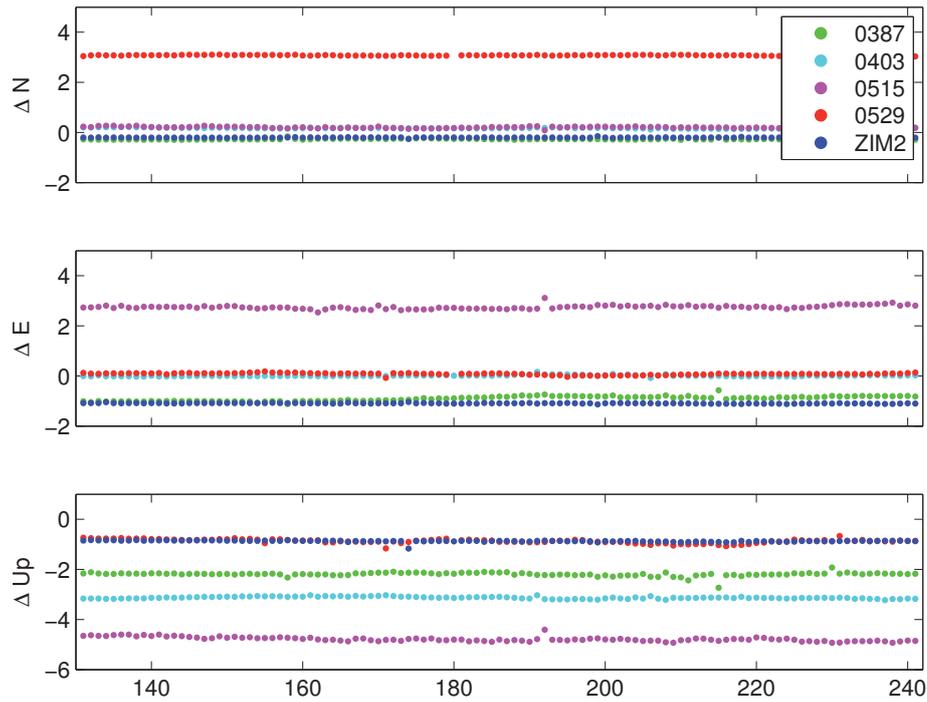


Abb. 7-5: Differenzen der einzelnen Koordinatenkomponenten ΔN , ΔE , ΔUp ; Variante mit abs. ind. Kalibrierwerte minus Variante mit IGS-Typmittelwerten jeweils inklusive gestapelte Residueninformation; Rechtsachse: DoY des Jahres 2013, Hochachse: Differenz [mm]

Stationen weist 0529 die mit gut 3 mm deutlich größte Differenz in ΔN auf, die Differenzen der anderen Stationen für diese Koordinatenkomponente liegen betragsmäßig bei max. 0.27 mm. Für ΔE sind die Differenzen von 0403 und 0529 nahe bei Null, für 0387 und ZIM2 liegen sie bei ca. -1 mm, während sie bei 0515 fast 3 mm betragen. Während die Vorzeichen der Lagekomponenten ΔN und ΔE variieren, ist das Vorzeichen der Höhenkomponente ΔUp in allen Fällen negativ. Der mit Abstand größte Unterschied der Höhenkomponente tritt mit knapp -5 mm bei der Station 0515 auf. Die geringe Standardabweichung der Differenzen der einzelnen Koordinatenkomponenten belegt die gute Reproduzierbarkeit der Koordinaten. Die Koordinatendifferenzen unterscheiden sich deutlich von den Differenzen der PZO (vgl. Tab. 7-1 auf S.

Tab. 7-4: Zusammenstellung der Medianwerte der Koordinatendifferenzen der Tageslösungen und deren Standardabweichungen zwischen Prozessierung mit individuellen Kalibrierwerten und IGS-Typmittelwerten (jeweils nach Einführung der gestapelten Residueninformation) im Zeitraum DoY 131 bis 241 2013; Werte in [mm]

Station	ΔN	$\sigma_{\Delta N}$	ΔE	$\sigma_{\Delta E}$	ΔUp	$\sigma_{\Delta Up}$
0387	-0.27	0.02	-0.88	0.10	-2.18	0.08
0403	0.17	0.02	0.01	0.03	-3.13	0.04
0515	0.20	0.03	2.75	0.07	-4.80	0.09
0529	3.08	0.02	0.09	0.04	-0.86	0.08
ZIM2	-0.20	0.01	-1.09	0.01	-0.87	0.03

109). Ein direkter Vergleich dieser zwei Größen ist nicht möglich, da beim Antennenmodell immer die Kombination aus beiden Komponenten (PZO und PZV) berücksichtigt werden muss. Testberechnungen mit Kalibrierwerten, deren PZO in allen drei Komponenten mittels CCANTEX auf 0 mm umgerechnet wurden, so dass sämtliche Information zum Antennenmodell in den PZV enthalten ist, liefern – bezogen auf die Koordinaten – weitestgehend identische Ergebnisse. Die Unterschiede zwischen den Antennenmodellen (abs. ind. vs. IGS-Typmittel) können daher als zusätzliche Stationsexzentrizität angesehen werden, welche durch die Einführung gestapelter Information nicht kompensiert werden kann. Für geodynamische Fragestellungen, bei denen das Bewegungsverhalten einzelner Stationen oder zwischen mehreren Stationen analysiert wird, spielt die absolute Stationsposition keine Rolle. Wird jedoch die genaue absolute Position benötigt, fallen die Unterschiede zwischen dem aus einer individuellen Absolutkalibrierung stammenden Antennenmodell gegenüber dem Modell der Typmittelwerte ins Gewicht. Eine Untersuchung eines kleinen Testnetzes dreier nahe beieinander gelegener Stationen (Abstand weniger 10er Meter) mit Prozessierung in beiden Varianten (individuelle Kalibrierwerte und Typmittelwerte, jeweils auf Absolutniveau) und der Vergleich mit terrestrisch gemessenen Koordinatenunterschieden könnte hierbei aufzeigen, welche Variante die Realität besser repräsentiert. Eine derartige Untersuchung wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt.

7.5 Vergleich der Troposphärenparameter

Nach dem Vergleich der Stackingmaps, der Residuen und der Koordinaten werden nun die geschätzten Troposphärenparameter, wieder nach zenitaler Laufzeitverzögerung und horizontalen Gradienten getrennt, analysiert. In oberen Teil von Abb. 7-6 sind die Absolutwerte der ZLV für die Varianten mit absoluten Individualkalibrierungen und IGS-Typmittelwerten nach Einführung der jeweiligen Stackinginformation für die Stationen 0529 und ZIM2 dargestellt, der untere Teil enthält die Differenzen abs. ind. minus IGS-Typmittelwert. Die eingehenden Werte wurden wie im vorigen Kapitel beschrieben durch die Kombination der Normalgleichungen mittels ADDNEQ für den Zeitraum DoY 131 bis 160 2013 zusammengefasst. In der

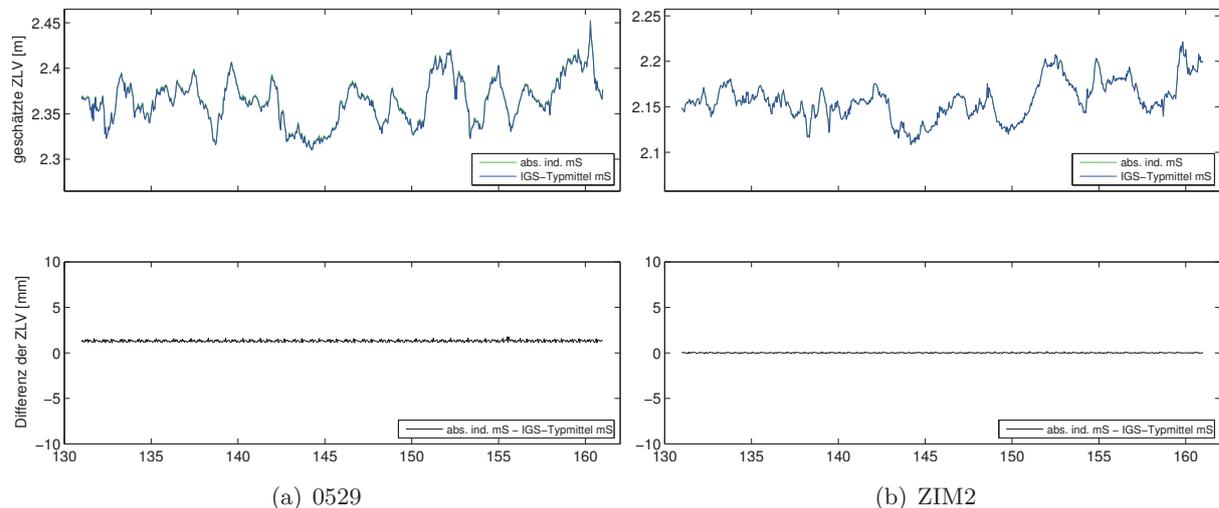


Abb. 7-6: Zenitale troposphärische Laufzeitverzögerungen für Zeitraum DoY 131 bis 160 2013; oben: Absolutwert für Varianten mit abs. ind. Kalibrierwerten und IGS-Typmittelwerten mit Einführung gestackter Information [m]; unten: Differenz abs. ind. minus IGS-Typmittel [mm]

Darstellung der Absolutwerte der beiden Stationen sind für 0529 geringe und für ZIM2 keine sichtbaren Unterschiede erkennbar. Aufgrund der großen räumlichen Distanz zwischen den beiden Stationen (Abstand ca. 320 km) unterscheidet sich der Verlauf der *ZLV* an diesen beiden Stationen. Die im unteren Bereich von Abb. 7-6 dargestellten Differenzen zwischen den beiden Varianten weisen eine sehr geringe Streuung (Größenordnung 0.02 mm) auf. Während der Median der Differenzen bei ZIM2 bei 0.01 mm liegt, ist bei 0529 eine gut erkennbare Verschiebung gegenüber der Nulllinie um ca. 1.31 mm erkennbar, d.h. die *ZLV*, die mit absoluten Individualkalibrierungen bestimmt wurden, weisen geringfügig größere Werte auf als die unter Nutzung der IGS-Typmittelwerte berechneten *ZLV*. Bei den Stationen, deren *ZLV* an dieser Stelle nicht abgebildet sind, liegen die Offsets bei 0.06 mm (Station 0387), 0.42 mm (0403) und 1.08 mm (0515). Zwischen der Stationshöhe und der *ZLV* besteht in der Regel eine starke Korrelation, d.h. eine Zunahme der Stationshöhe hat einen Rückgang der *ZLV* zur Folge. Dieser Zusammenhang lässt sich bei den fünf in beiden Varianten untersuchten Stationen nicht erkennen. Beispielsweise unterliegt die Station 0387 einer Höhenänderung von -2.18 mm durch Verwendung von IGS-Typmittelwerten anstelle der Individualkalibrierung, in beiden Fällen unter Einführung der gestackten Information, der Median der Differenz aller geschätzten *ZLV* dieser Station liegt jedoch bei 0.06 mm.

Nach den *ZLV* werden nun die geschätzten horizontalen Gradienten der beiden Auswertevarianten analysiert. In Abb. 7-7 sind die Absolutwerte (oben) und Differenzen (unten) der beiden Stationen 0403 und 0515 dargestellt. Der Verlauf der Absolutwerte der Gradienten wurde durch die alternative

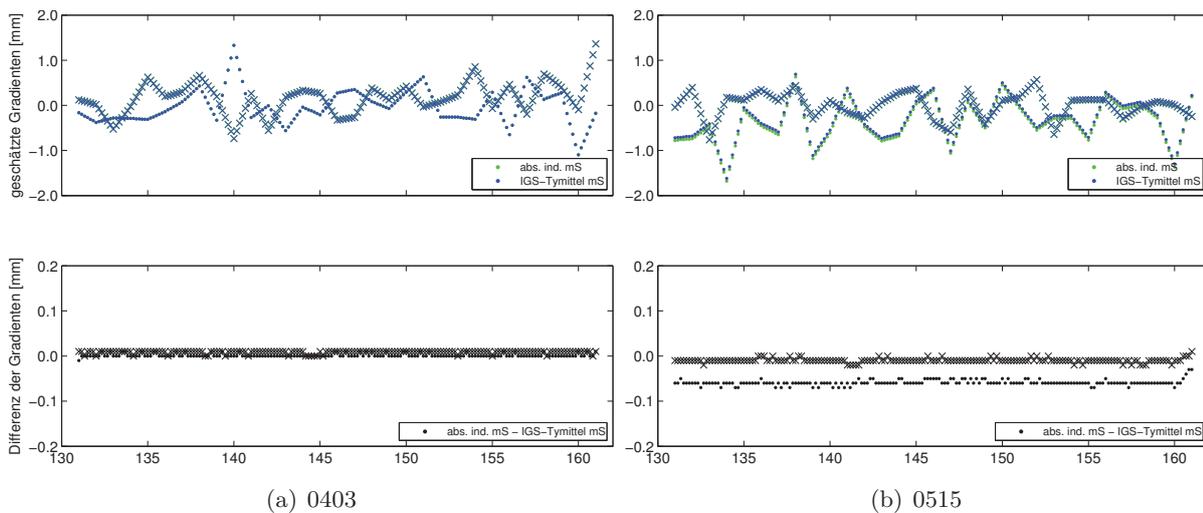


Abb. 7-7: Horizontale Gradienten der zenitalen troposphärischen Laufzeitverzögerungen für Zeitraum DoY 131 bis 160 2013; oben: Absolutwert für Varianten mit abs. ind. Kalibrierwerten und IGS-Typmittelwerten mit Einführung gestackter Information; unten: Differenz abs. ind. minus IGS-Typmittel; Punkt: Nordkomponente, Kreuz: Ostkomponente; nur jeder vierte Datenpunkt dargestellt

Verwendung von IGS-Typmittelwerten nicht wesentlich beeinträchtigt. Bei horizontalen Gradienten der Station 0403 sind keine, bei den Gradienten von 0515 nur in der Ostkomponente geringe Unterschiede erkennbar. Die Differenzplots (Abb. 7-7 unten) bestätigen dies. Für 0403 nehmen die Differenzen Werte nahe 0 mm an, bei 0515 liegt die Ostkomponente nahe Null, während die Differenz der Nordkomponente einen Wert von -0.06 mm annimmt. Die Differenzen der übrigen Stationen fallen kleiner aus, lediglich die Nord- bzw. Ostkomponente der Stationen 0387 bzw. 0529 erreichen Werte von -0.03 mm bzw. 0.03 mm.

7.6 Resümees

Bei den Untersuchungen der Kalibrierwerte wurden zunächst die Differenzen zwischen den Individualkalibrierungen und Typmittelwerten (jeweils auf Absolutniveau) von fünf ausgewählten Stationen im Untersuchungszeitraum betrachtet. Sowohl die PZO, als auch die auf den jeweiligen IGS-PZO umgerechneten PZV weisen Unterschiede auf. Während eine dieser Antennen gut mit dem IGS-Typmittel übereinstimmt, liegen bei den anderen Antennen Abweichungen bis zu mehreren mm (PZV auf L_3 -Niveau) vor. Diese PZV-Differenzen schlagen sich direkt in den Residuen nieder, die aus der Prozessierung mit den Individualkalibrierungen bzw. Typmittelwerten entstammen. Die Residuen von Prozessierungen mit Individual- und Typmittelwerten nach der Einführung der korrespondierenden Stackinginformation sind weitestgehend identisch, lediglich vereinzelte kleine Bereiche weisen größere Unterschiede auf. Nur in Einzelfällen existieren zusätzliche Residuen, die in der jeweils anderen Variante nicht vorkommen.

Aufgrund der Unterschiede in den Kalibrierwerten (Individual- vs. Typmittelwerte) weichen die Koordinatendifferenzen der Prozessierungsvarianten mit beiden Kalibrierdatensätzen nach Einführung der gestackten Information sowohl in der Lage- als auch der Höhenkomponente voneinander ab. Die Beträge der Lageunterschiede weisen hierbei bis zu 3 mm, die der Höhendifferenzen bis zu 5 mm auf. Interessanterweise sind die Differenzen der Höhenwerte (Individualkalibrierung minus Typmittelwert) an allen untersuchten Stationen negativ. Zusätzlich wurden ebenfalls die Auswirkungen auf die zenitale troposphärische Laufzeitverzögerung untersucht. Im untersuchten Zeitraum ist bei drei der fünf untersuchten Stationen ein reproduzierbarer Versatz zwischen den beiden Lösungen erkennbar. Der Median der Differenz nimmt hierbei Werte von bis zu 1.31 mm an, jedoch korrespondieren diese Stationen nicht mit den Stationen, deren Höhendifferenzen die größten Beträge annehmen.

Der Ersatz von Individualkalibrierungen durch Typmittelwerte mit ergänzender Einführung gestapelter Residueninformation führt nicht zum gleichen Ergebnis. Unterschiede in den Residuen, welche durch Differenzen in den PZV hervorgerufen werden, können durch die Verwendung gestackter Information weitestgehend behoben werden. Offsets in den Unterschieden der Kombination aus PZO und PZV wirken wie Stationsexzentrizitäten und können somit durch Stacking nicht korrigiert werden. Für Stationen, deren Antennen nicht absolut individuell kalibriert wurden und für die in der Auswertung somit Typmittelwerte eingesetzt werden, die im Extremfall nur in Form von PZO und rein elevationsabhängiger PZV-Information vorliegt, kann das reale Antennenverhalten durch die zusätzliche Verwendung von gestapelter Residueninformation besser modelliert werden.

8 Erweiterungen

Der Fokus dieser Arbeit lag auf der Entwicklung eines einfach umsetzbaren Verfahrens zur Ableitung von Korrekturwerten aus den Residuen einer PPP-Auswertung und deren Verwendung in einem erneuten Auswertedurchlauf. Die Wirksamkeit der entwickelten, einfachen Methodik konnte in verschiedenen Untersuchungen belegt werden, jedoch bietet die zur Berechnung der Korrekturwerte eingesetzte Methode Verbesserungspotenzial. In den nachfolgenden Kapiteln werden verschiedene Ansätze vorgeschlagen und Herausforderungen aufgezählt, die mit einer Verbesserung des Verfahrens einhergehen.

8.1 Variation der Zellgröße beim Stacking

Die Wahl der in dieser Arbeit gewählten Festlegung der Zellgröße über konstante Inkremente von Azimut und Zenitdistanz kann zwar einfach programmtechnisch umgesetzt werden, hat jedoch den entscheidenden Nachteil, dass die Zellgröße mit abnehmender Zenitdistanz (= zunehmender Elevation) abnimmt. Somit wird die Zelle, in der die Residuen gestapelt werden, immer kleiner und dadurch sind weniger Residuen darin enthalten. Die Veränderung der Zellfläche ist dabei streng mit der Veränderung der Bogenlänge des durch das Azimutinkrement ΔA definierten Bogenstücks b_i eines Parallelkreises, welcher die Schnittlinie einer Halbkugel mit einer Parallelebene zur Äquatorebene darstellt, verknüpft. Anschaulich ist dies in Abb. 8-1 dargestellt. Der Radius r_i des Parallelkreises kann durch

$$r_i = r_0 \cdot \sin(z_i) \quad (8-1)$$

berechnet werden. Sind das Azimutinkrement ΔA (in $[\circ]$), die Zenitdistanz z_i (in $[\circ]$) und der Radius r_0 in (in LE) vorgegeben, kann die Länge des Bogenstücks b_i durch

$$\frac{\Delta A}{360^\circ} = \frac{b_i}{2\pi \cdot r_0 \cdot \sin(z_i)} \quad (8-2)$$

bzw.

$$b_i = \frac{\pi}{180^\circ} \cdot \Delta A \cdot r_0 \cdot \sin(z_i) \quad (8-3)$$

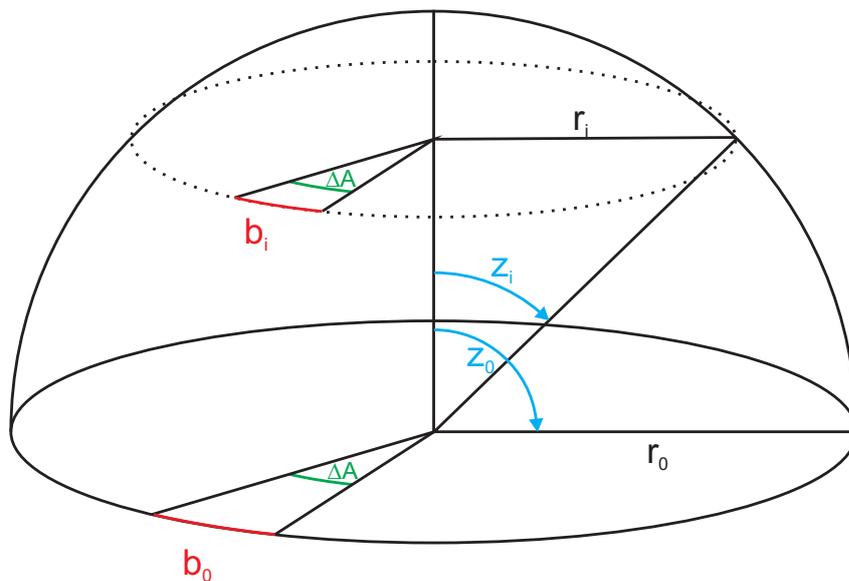


Abb. 8-1: Schematische Darstellung der Änderung der Bogenlänge mit abnehmender Zenitdistanz z

Tab. 8-1: Änderung der Bogenlänge b_i (in Längeneinheiten) in Abhängigkeit der Zenitdistanz [°]

Zenitdistanz z_i [°]	90	85	80	60	40	20	10
Bogenlänge b_i [LE]	100	99.619	98.481	86.603	64.279	34.202	17.365

berechnet werden. Zur Veranschaulichung der Längenabnahme von b_i in Abhängigkeit von der Zenitdistanz sind beispielhafte Werte in Tab. 8-1 gegeben. Von Fuhrmann u. a. [2010] bzw. Fuhrmann u. a. [2014a] wurde eine Vorgehensweise entwickelt, die diesem Missstand Rechnung trägt und über alle Zenitdistanzbereiche annähernd gleiche Zellgrößen erzeugt. Die an dieser Stelle vorgestellte Variante basiert auf Fuhrmann u. a. [2010], die für jede Zenitdistanzstufe eine individuelle Bogenlänge b_i berechnen, deren Unterschied zur Bogenlänge b_0 möglichst gering ist, wobei das Azimutinkrement $\Delta A_0 = \Delta A(z = 90^\circ)$ die Bogenlänge b_0 festlegt. Hierbei ist zu beachten, dass nicht für alle Zenitdistanzstufen die identische Bogenlänge gewählt werden kann, da andernfalls Restbogenstücke entstehen, die von der vorgegebenen Bogenlänge abweichen. Ein Gleichsetzen der Bogenlängen b_0 und b_i ergibt

$$b_0 = b_i \quad (8-4)$$

$$\frac{\pi}{180^\circ} \cdot \Delta A_0 \cdot r_0 \cdot \sin(z_0) = \frac{\pi}{180^\circ} \cdot \Delta A_i \cdot r_0 \cdot \sin(z_i). \quad (8-5)$$

Mit $\sin(z_0) = \sin(90^\circ) = 1$ ergibt sich daraus

$$\Delta A_0 = \Delta A_i \cdot \sin(z_i) \quad (8-6)$$

und somit

$$\Delta A_i = \frac{\Delta A_0}{\sin(z_i)}. \quad (8-7)$$

ΔA_0 muss so gewählt werden, dass sich durch $360^\circ/\Delta A_0$ eine Ganzzahl (engl.: Integer) ergibt. Die ganzzahlige Anzahl der Zellen in Abhängigkeit der Zenitdistanz $N(z_i)$ kann durch Rundung (\approx)

$$N(z_i) \approx \frac{360^\circ}{\Delta A_i} \quad (8-8)$$

$$\approx \frac{360^\circ \cdot \sin(z_i)}{\Delta A_0} \quad (8-9)$$

berechnet werden, wodurch sich das korrespondierende Azimutinkrement $\Delta A_{i,\text{INT}}$ durch

$$\Delta A_{i,\text{INT}} = \frac{360^\circ}{N(z_i)} \quad (8-10)$$

ergibt. In Abb. 8-2 sind Plots mit verschiedenen Zellgrößen, sowohl mit fester (linke Spalte), als auch mit angepasster azimuthaler Auflösung (rechte Spalte) dargestellt. Die Abnahme der Zellgröße in den Plots der linken Spalte ist deutlich erkennbar, während die Plots mit variablem Azimutinkrement deutlich homogener erscheinen. In Tab. 8-2 sind für verschiedene Azimutinkremente (ΔA_0) die Anzahl der Zellen für ausgewählte Zenitdistanzstufen zusammengestellt. Wird eine Zelleinteilung in der Form eines festen Azimutinkrements über alle Zenitdistanzen und einer festen Schrittweite in Zenitrichtung gewählt, kann diese einfach in eine Matrix abgebildet werden, deren Zeilen/Spalten die einzelnen Azimut-/Zenitdistanzstufen repräsentieren. Sind in den einzelnen Elementen dieser Matrix die gestapelten Residuen der zugehörigen Zelle abgelegt, kann diese Matrix in Form einer Datei, die Kalibrierinformation für GNSS-Antennen enthält, gespeichert und als Korrektur im Auswerteprogramm eingelesen werden. Bei der Wahl der Variante mit variablem Azimutinkrement können die gestapelten Werte nicht einfach in Form einer Matrix abgelegt werden, da

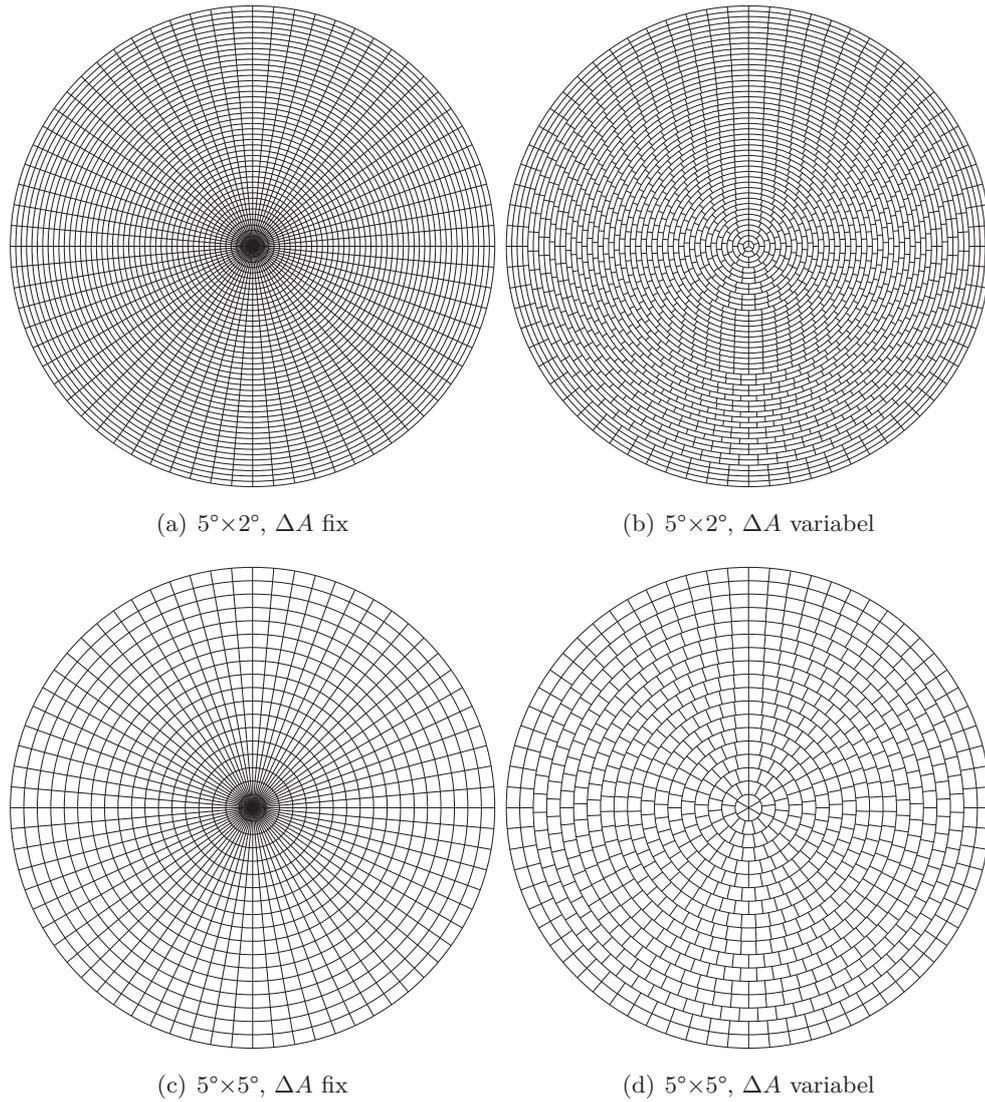


Abb. 8-2: Darstellungen verschiedener Zellgrößen bei festem Azimutinkrement über alle Zenitdistanzbereiche (links) und variablem Azimutinkrement in Abhängigkeit von der Zenitdistanz (rechts) in Form einer mittabstandstreu azimutalen Abbildung der Halbkugel; Zellgröße: $\Delta A_0 \times \Delta z$

Tab. 8-2: Anzahl Zellen für ausgewählte Zenitdistanzstufen bei variablem Azimutinkrement

	$z = 90^\circ$	$z = 80^\circ$	$z = 60^\circ$	$z = 40^\circ$	$z = 20^\circ$	$z = 10^\circ$
$\Delta A_0 = 1^\circ$	360	355	312	231	123	63
$\Delta A_0 = 2^\circ$	180	177	156	116	62	31
$\Delta A_0 = 5^\circ$	72	71	62	46	25	13

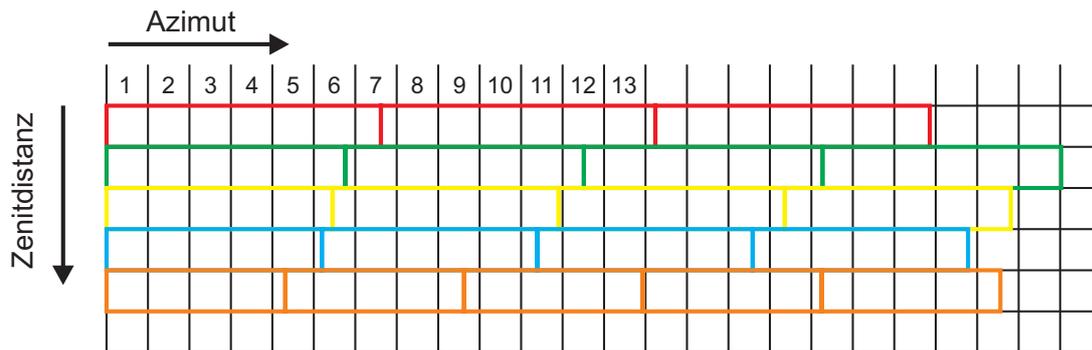


Abb. 8-3: Schematische Darstellung der Abbildung von Zellen mit variablem Azimutinkrement in einer Matrix; die Breite der buntumrandeten Rechtecke steht für das entsprechende Azimutinkrement, die schwarzumrandeten Zellen für die einzelnen Elemente der Matrix

die Anzahl der Spalten in Abhängigkeit von der Zenitdistanz variiert. In Abb. 8-3 ist dargestellt, wie trotz variierender Anzahl von Zellen in Abhängigkeit von der Zenitdistanz eine Darstellung in Matrizenform möglich ist. Die schwarz umrandeten Zellen stellen hierbei die Matrix mit fester Zeilen-/Spaltenanzahl dar, die bunten Rechtecke stehen für die Zellen mit variablem Azimutinkrement (variable Breite des Rechtecks) bei gleichbleibendem Zenitdistanzinkrement (gleiche Höhe des Rechtecks). Mit zunehmender Zenitdistanz nimmt das Azimutinkrement ab und es existieren mehr Zellen (bunte Rechtecke) pro Zenitdistanzstufe. Wird als Schrittweite der Matrix in Azimutrichtung ΔA_0 gewählt, so sind für $z = 90^\circ$ die bunt- und schwarzumrandeten Zellen deckungsgleich. Mit abnehmender Zenitdistanz nimmt das Azimutinkrement größere Werte an, wodurch die Breite der Rechtecke in der schematischen Darstellung zunimmt und dadurch mehrere schwarzumrandete Matrixzellen in einem bunt dargestellten Rechteck enthalten sind. Beispielsweise enthält das rotumrandete Rechteck der ersten Zeile in Abb. 8-3 die Matrixzellen 1 bis 6 komplett und Teile von Zelle 7. Hierdurch kann den ersten sechs Spalten der ersten Matrixzeile der Wert der Residuen im ersten rotumrandeten Rechteck dieser Zeile zugewiesen, der siebten Zelle könnte der Mittelwert der Residuenwerte aus dem ersten und zweiten rotumrandeten Rechteck zugewiesen werden. Ebenso ist eine Gewichtung der zu dieser Zelle beitragenden Teile der beiden Rechtecke denkbar. Andere Möglichkeiten der Abspeicherung der Korrekturinformation sind ebenso denkbar (Schlagwort: „Plakatierung der Kugel“).

8.2 Tests auf Ausreißer und Signifikanz

Im vom Autor umgesetzten Weg werden die Residuen über Azimut und Zenitdistanz einzelnen Zellen zugewiesen und der Mittelwert aller Residuen einer Zelle wird als Korrektur in einem erneuten Prozessierungsdurchlauf angewendet. Hierbei werden die Anzahl der Residuen und mögliche Ausreißer innerhalb einer Zelle nicht berücksichtigt. Fuhrmann u. a. [2010] schlagen zwei Varianten vor, die diesen Punkten Rechnung tragen, im Folgenden kurz erläutert werden und in Abb. 8-4 dargestellt sind. Da beide Varianten unter anderem eine Mindestanzahl an Residuen pro Zelle für die Berechnung eines gestapelten Wertes verwenden, wird von Fuhrmann u. a. [2010] dieser Ansatz in Ergänzung zum im vorangehenden Kapitel beschriebenen Verfahren der Erzeugung annähernd flächengleicher Zellen angewendet. Hierdurch ist gewährleistet, dass auch Zellen im Bereich kleiner Zenitdistanzen eine ausreichende Anzahl von Residuen enthalten, was bei der Verwendung eines festen Azimutinkrements nicht vorausgesetzt werden kann. Bei der in Abb. 8-4 links aufgeführten Variante werden zunächst alle vorhandenen originären Residuen aus dem ersten Prozessierungsdurchlauf den einzelnen Zellen zugewiesen. Die in der Grafik beispielhaft angegebenen Inkremente von $2^\circ \times 1^\circ$ geben die Zellgröße in $\Delta A_0 \times \Delta z$ (ΔA_0 ist das Azimutinkrement für $z = 90^\circ$) wieder, wobei das Zenitdistanzinkrement Δz über die gesamte Antennenhemisphäre konstant ist.

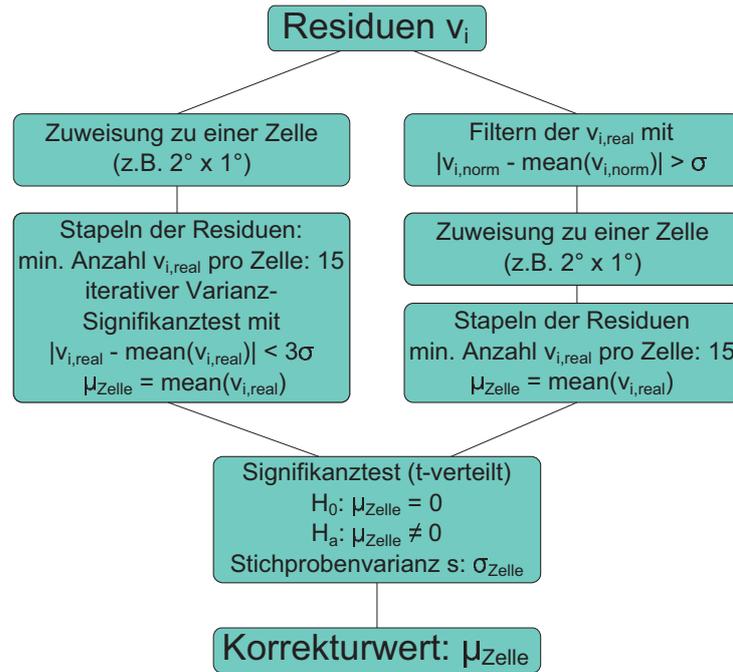


Abb. 8-4: Schematische Darstellung der zwei Varianten des Stackingablaufs mit statistischem Test der Residuen nach [Fuhrmann u. a., 2010, S. 83]; $v_{i,real}$: originäre Residuen, $v_{i,norm}$: normierte Residuen

Anschließend wird geprüft, wie viele Residuen in den Zellen enthalten sind. Nach Fuhrmann u. a. [2010] stellt die Mindestanzahl von 15 Residuen bei einem Stackingzeitraum von 10 d und einer Zellgröße von $2^\circ \times 1^\circ$ einen praktikablen Wert dar. Werden abweichende Zellgrößen oder Stackingzeiträume verwendet, muss eine entsprechende Anpassung der Mindestanzahl erfolgen. Für Zellen, die weniger Residuen als die festgelegte Mindestanzahl enthalten, wird kein gestapelter Wert bestimmt. Für die restlichen Zellen erfolgt ein iterativer Varianz-Signifikanz-Test. Hierzu wird die Standardabweichung aller Residuen einer Zelle (σ_{alle}) sowie die Standardabweichung (σ_{klein}) der Residuen dieser Zelle, deren Betrag der Differenz zum Mittelwert dieser Zelle kleiner als eine festgelegte Schranke (beispielsweise $< 3\sigma_{alle}$) ist, bestimmt. Mit diesen berechneten Standardabweichungen wird ein Varianz-Signifikanz-Test durchgeführt, mit dem getestet wird, ob sich σ_{alle} und σ_{klein} signifikant voneinander unterscheiden (Details zu verschiedenen Testverfahren sind in Fuhrmann u. a. [2010] zusammengestellt). Ist dies nicht der Fall, wird der Korrekturwert aus allen Residuen dieser Zelle berechnet (arithmetisches Mittel); liegt ein signifikanter Unterschied vor, wird das Residuum mit der größten Differenz zum Mittelwert aus dieser Zelle entfernt. Ist die Anzahl der Residuen dieser Zelle nach wie vor größer als die vorgegebene Mindestanzahl, erfolgt ein neuer Iterationsdurchlauf: σ_{alle} sowie σ_{klein} werden mit dem bereinigten Datenmaterial berechnet und in einem erneuten Varianz-Signifikanz-Test geprüft. Diese Iteration wird solange fortgeführt, bis entweder die Mindestanzahl an Residuen dieser Zelle unterschritten wird, so dass für diese Zelle kein Korrekturwert bestimmt wird, oder der Test bestanden wird und somit ein Korrekturwert μ_{Zelle} berechnet werden kann.

Die in Abb. 8-4 rechts dargestellte Variante verfolgt einen anderen Weg. Sie setzt voraus, dass stationsspezifische Effekte, wie beispielsweise Mehrwegeeffekte, die Residuen signifikant beeinflussen. Korrekturwerte für die einzelnen Zellen werden daher nur basierend auf Residuen berechnet, deren Differenz zum Mittelwert der Zelle einen vorab festgelegten Grenzwert (beispielsweise $1\sigma_{alle}$) überschreitet. Bei der Prozessierung von GNSS-Daten mit der BS können verschiedene Arten der Residuen ausgegeben werden (siehe Kap. 4.1). Zur Berechnung der Stackingmaps im Rahmen dieser Arbeit und der oben beschriebenen Variante des Residuentests wurden originäre Residuen verwendet. Diese sind zenitdistanzabhängig, weisen in

Horizontnähe deutlich größere Werte auf als im Zenit und sind somit zur Auswahl der zur Berechnung des Korrekturwertes beitragenden Residuen in der rechten Variante ungeeignet. Alternativ können von der BS auch normierte Residuen ausgegeben werden, wobei zu jedem originären ein korrespondierendes normiertes Residuum existiert. In der rechten Variante von Abb. 8-4 werden die normierten Residuen zur Selektion der entsprechenden originären Residuen verwendet. Um einen Eindruck vom Verhalten originärer und normierter Residuen zu gewinnen, sind diese in Abb. 8-5 beispielhaft für eine Station und einen prozessierten Tag dargestellt. Die Zenitdistanzabhängigkeit der Real-Residuen ist in Abb. 8-5(a)

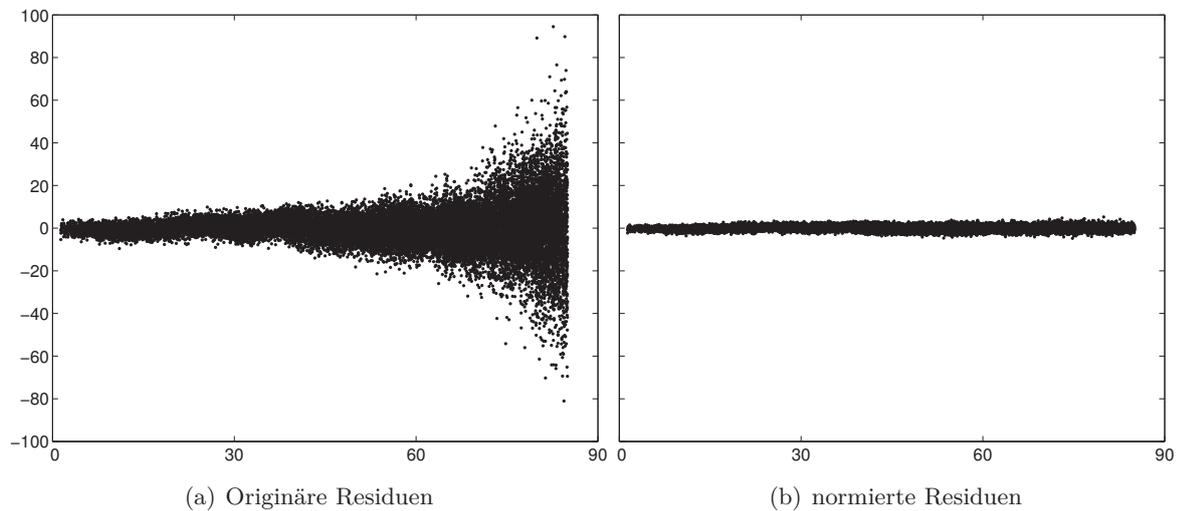


Abb. 8-5: Originäre und normierte Residuen für die Station ZIM2 aus PPP-Prozessierung von DoY 131 2013; Rechtsachse: Zenitdistanz [°], Hochachse: Residuenwert [mm]

deutlich erkennbar. Durch die identische Skalierung beider Darstellungen wird zudem deutlich, dass auch zenitnahe Residuen bei der Überführung in normierte Residuen skaliert werden und dadurch eine geringe Streuung aufweisen. Nach der Selektion der zur Berechnung der Korrekturwerte beitragenden originären Residuen werden diese, wie in der linken Variante, den einzelnen Zellen zugewiesen. Hierbei wird ebenso geprüft, ob die vorgegebene Mindestanzahl an Residuen pro Zelle zur Bestimmung des Korrekturwertes eingehalten wird. Durch die Vorauswahl der zur Korrektur beitragenden Residuen sind per se weniger Residuen vorhanden, die den einzelnen Zellen zugewiesen werden, so dass die Festlegung der Mindestanzahl mit Bedacht vorgenommen werden muss. Für Zellen, die mehr Residuen als die Mindestanzahl enthalten, wird der Korrekturwert μ_{Zelle} berechnet. Nach der Bestimmung dieses Wertes in beiden Varianten wird mittels eines Signifikanztestes geprüft, ob sich der Korrekturwert μ_{Zelle} signifikant von Null unterscheidet. Ist dies nicht der Fall, wird für diese Zelle der Korrekturwert Null (keine Korrektur notwendig) ausgegeben, andernfalls kann μ_{Zelle} als Korrektur an die Beobachtungen angebracht werden. Weiterführende Details zu diesem Verfahren können in [Fuhrmann u. a., 2010, S. 83ff] nachgelesen werden.

8.3 Alternativen zum zellbasierten Stacking

In allen bisher aufgeführten Verfahren des räumlichen Stapelns, wobei räumlich hierbei als Richtung, aus der die Satellitensignale an der Empfängerantenne eintreffen, zu verstehen ist, wurde die Antennenhemisphäre über Azimut- und Zenitdistanzinkremente in Zellen eingeteilt, denen die entsprechenden Residuen zugewiesen wurden. Im einfachsten Fall werden hierzu feste Inkremente ΔA und Δz verwendet, mit dem Nachteil der abnehmenden Zellgröße bei abnehmender Zenitdistanz. Durch das in Kap. 8.1 beschriebene Verfahren kann über die gesamte Antennenhemisphäre eine annähernd gleiche Zellgröße realisiert werden. In diesen Verfahren werden Residuen eindeutig Zellen zugewiesen und der Korrekturwert wird als

Mittelwert dieser Zelle berechnet, wodurch nur Werte für die Zellen berechnet werden können, die Residuen enthalten. Außerdem wird das Verhalten benachbarter Zellen hierbei nicht berücksichtigt. Eine Alternative zu dieser Form des zellbasierten Stapelns ist in Abb. 8-6 dargestellt. Die schwarz dargestellten Gitterlinien

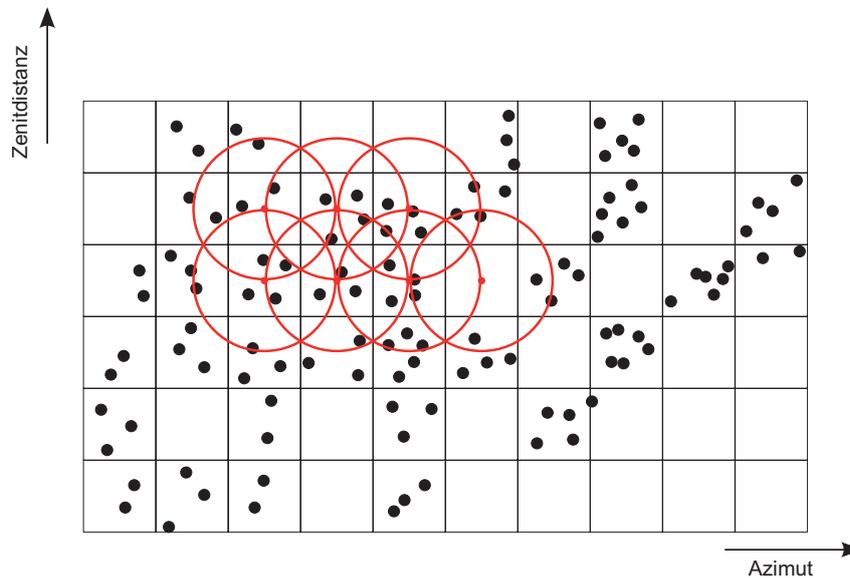


Abb. 8-6: Alternative Festlegung durch Kreise anstelle von Rasterzellen zur Berechnung des gestapelten Wertes

stellen hierbei die Zellränder bei festen Azimut-/Zenitdistanzinkrement und die schwarzen Punkte einzelne Residuen dar. Beim „klassischen“ Stapeln wird der Korrekturwert einer Rasterzelle als Mittelwert aller darin enthaltener Residuen berechnet, gegebenenfalls unter Anwendung statistischer Tests. Der bestimmte Wert wird einem Rasterpunkt (in diesem Fall den Mittelpunkten der Gitterzellen) zugewiesen, wodurch Zellen, die keine Residuen enthalten, keinen Korrekturwert zugewiesen bekommen. Eine Alternative hierzu sind Kreise mit vorgegebenem Radius um jeden Rasterpunkt, wie sie für einige Rasterpunkte (rote Kreise) in der in Abb. 8-6 gezeigten ebenen Darstellung, eingezeichnet sind. Durch die Überlappung der einzelnen Kreise können auch Nachbarschaftsbeziehungen zwischen Residuen berücksichtigt werden, da einzelne Residuen zu mehreren Korrekturwerten beitragen können. Mit diesem Verfahren ist keine Anpassung des Azimutinkrements in Abhängigkeit von der Zenitdistanz notwendig, so dass das Ergebnis einfach in Matrixform abgespeichert und für alle Rasterpunkte ein topozentrischer Suchwinkel verwendet werden kann, wie in Abb. 8-7 dargestellt ist. Bei dieser Darstellung wird davon ausgegangen, dass jedes Residuum mit seinen zugehörigen Azimut- und Zenitdistanzwerten auf eine Halbkugel mit Radius R projiziert wird, die die Antennenhemisphäre repräsentiert. Der Suchradius r um einen Rasterpunkt P mit Azimut A_i und Zenitdistanz z_i kann durch einen topozentrischen Suchwinkel t definiert werden. Die Schnittfigur des Kegels, dessen Spitze im Ursprung der Antennenhemisphäre liegt, dessen Symmetrieachse durch den Ursprung und den Rasterpunkt verläuft und dessen Mantel durch den topozentrischen Suchwinkel t aufgespannt wird, mit der Antennenhemisphäre ist ein Kreis. Alle Residuen der Antennenhemisphäre innerhalb dieses Kegels liegen auf einer Kugelkappe, so dass als Suchraum für die Zuweisung der Residuen eine Kugel um den Rasterpunkt P mit Radius r genutzt werden kann und für den räumlichen Abstand S_{Res} eines Residuums von P gelten muss: $S_{Res} \leq r$.

Da bei diesem Verfahren, im Gegensatz zum Ansatz mit fester Zuweisung von Residuen zu einzelnen Zellen, einzelne Residuen zur Berechnung mehrerer Korrekturwerte beitragen können, ist eine abstandsabhängige Gewichtung sinnvoll. Residuen, die näher am Rasterpunkt liegen, sollen einen größeren Beitrag zum Korrekturwert leisten als Residuen, die weiter davon entfernt sind. Der einem Rasterpunkt P zugeordnete

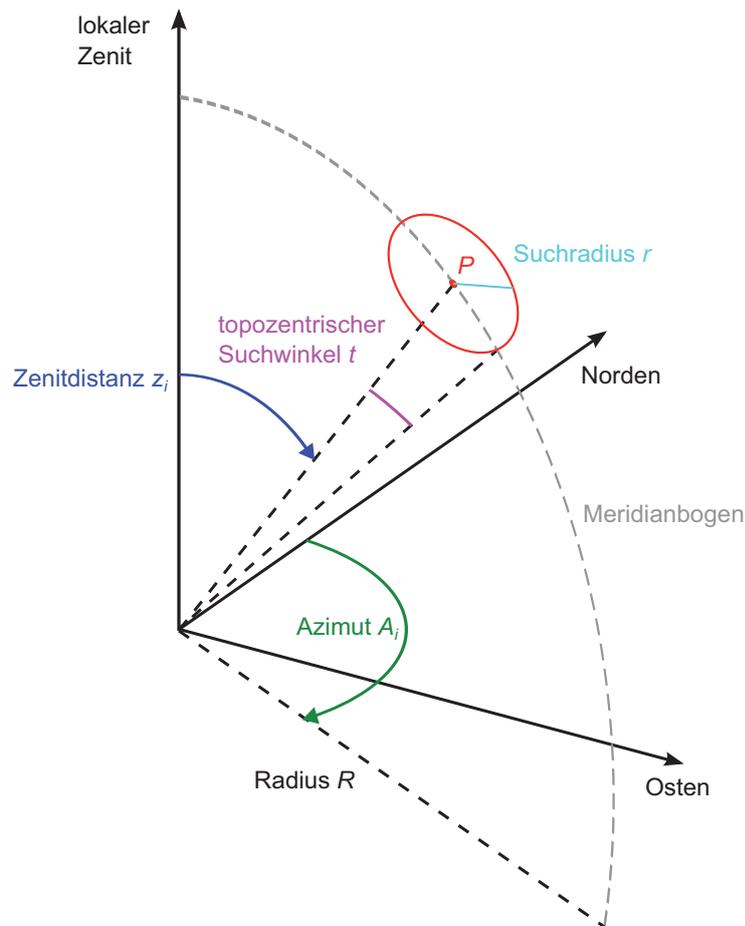


Abb. 8-7: Schematische Darstellung der Definition eines topozentrischen Suchwinkels

Korrekturwert K_P kann durch

$$K_P = \frac{1}{\sum g_R} \sum_{R=1}^n g_R \cdot W_R \quad (8-11)$$

mit

K_P : Korrekturwert für Rasterpunkt P

n : Anzahl Residuen innerhalb Suchradius r

g_R : Individuelles Gewicht jedes Residuums

W_R : Residuenwert

berechnet werden. Zur Gewichtung der einzelnen Residuen sind unzählige Varianten denkbar. Der einfachste Fall stellt eine Gleichgewichtung aller Residuen, ein arithmetisches Mittel, dar. Eine weitere Möglichkeit ist eine lineare Gewichtung mit dem Gewicht eins im Rasterpunkt und linear abnehmendem Gewicht mit zunehmendem Abstand, so dass im Abstand von $\geq r$ das Gewicht zu Null wird. Ebenso denkbar ist eine Gewichtung durch eine Gauß'sche Glockenkurve. Diese drei beschriebenen Varianten sind in Abb. 8-8 aufgeführt, stellen jedoch nur eine kleine Auswahl möglicher Gewichtungsvarianten dar. Beispiele für Stackingmaps mit Zellen, deren Rand auf der Halbkugeloberfläche mittels eines topozentrischen Suchradius festgelegt ist, sind in Abb. 8-9 gegeben. Sie zeigen Stackingmaps der Station 0515, die aus den identischen Daten (Zeitraum: DoY 121 bis 130 2013) mit unterschiedlichen Gewichtungsvarianten bei einem topozentrischen Suchradius von 10° mit einer Rasterweite von $5^\circ \times 5^\circ$ (Azimut \times Elevation) berechnet wurden. Durch die große Wahl des Suchradius werden beinahe für die komplette Antennenhemisphäre

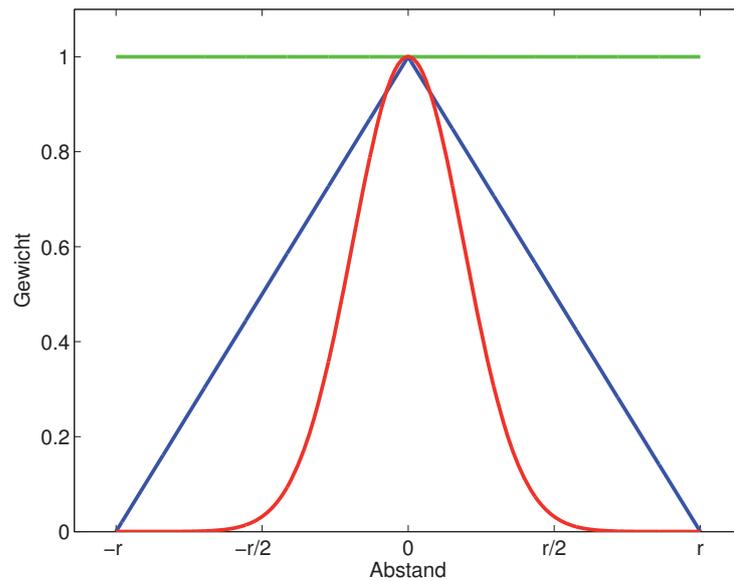


Abb. 8-8: Mögliche Varianten für abstandsabhängige Gewichtung: Gleichgewichtung (grün), lineare Gewichtung (blau), Gauß'sche Glockenkurve (rot)

Korrekturwerte bestimmt (sogenanntes Nordloch und einzelne Zellen in südlicher Richtung bei niedriger Elevation ausgenommen). Die Verwendung des arithmetischen Mittels glättet den Residuenverlauf stark, unter Nutzung einer linearen Gewichtung werden einzelne Strukturen besser sichtbar, bei Anwendung einer Gauß-Kurve wird die Detailschärfe noch weiter verbessert. Zusätzlich zur Gewichtung der einzelnen

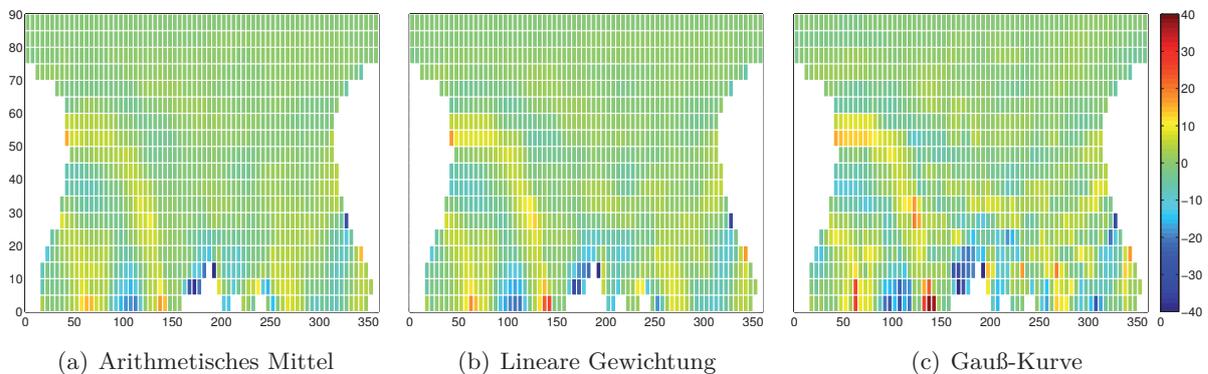


Abb. 8-9: Stackingmaps für Station 0515 im Zeitraum DoY 121 bis 130 2013 mit alternativer Zellfestlegung (topozentrischer Suchradius: 10°); Rasterabstand: $5^\circ \times 5^\circ$ (Azimut \times Elevation); Korrekturwert farblich codiert in [mm]; Rechtsachse: Azimut [$^\circ$], Hochachse: Elevation [$^\circ$]

Residuenwerte in Abhängigkeit des Abstands vom Rasterpunkt ist bei Verwendung des gleitenden Stackings eine zeitabhängige Gewichtung denkbar, bei der Residuen, die zeitlich näher am Einführungstag der Stackingmap, liegen ein größeres Gewicht erhalten.

8.4 Herausforderungen

Die Untersuchungen dieser Arbeit haben gezeigt, dass die getroffenen Annahmen weitestgehend zutreffen, jedoch auch Abweichungen davon auftreten können, die weiteres Forschungspotenzial bieten. Bei der Mittelbildung aller Residuen einer Zelle zur Berechnung eines Korrekturwertes wurde davon ausgegangen,

dass – bei nicht zu groß gewählter Zellgröße – alle Residuen dieser Zelle ein einheitliches Verhalten zeigen, also beispielsweise einen positiven Residuenwert von xx mm annehmen. Im folgenden Unterkapitel wird gezeigt, dass hiervon abweichende Fälle existieren. Eine weitere getroffene Annahme ist die unveränderte Hardwarekonfiguration an den einzelnen Stationen. Defekte, Stationsverlegungen oder das Aufkommen neuer GNSS machen Ausrüstungswechsel auf den Permanentstationen notwendig. Eine Möglichkeit zur Handhabung dieser Wechsel wird im darauffolgenden Unterkapitel vorgestellt.

8.4.1 Individuelles Satellitenverhalten

Im Rahmen dieser Arbeit wurden vor der Berechnung von Korrekturwerten und deren Einführung in die Prozessierung in einer Vielzahl von Analysen Residuen detailliert untersucht. An dieser Stelle werden ausgewählte Ergebnisse mit weiterem Forschungspotenzial aufgeführt, da der primäre Fokus der Arbeit auf die Berechnung und Einführung gestapelter Werte in die Prozessierung sowie die Analyse des Einflusses der gestapelten Werte auf die Ergebnisse gelegt wurde. Viele dieser Voruntersuchungen wurden mit Datenmaterial des Jahres 2010 sowie der vorherigen Version der Bernese GPS Software 5.0 (\Rightarrow BS50, aktuelle Version: 5.2 \Rightarrow BS52) durchgeführt. Mit dem Umstieg auf die aktuellste Version wurde intensiv geprüft, ob beide Versionen annähernd identische Ergebnisse liefern, da in der Prozessierung mit der neuen Version zusätzliche Modelle (beispielsweise die Global Mapping Funktion) verfügbar sind und genutzt wurden. Außerdem wurde der Übergang von CODE-Produkten, die im IGS05 vorlagen, auf Produkte, die im IGS08 vorliegen, durchgeführt, da seit DoY 107 2011 lediglich Produkte im IGS08 veröffentlicht werden⁵. Für den Zeitraum von 1996 bis zum Wechsel auf IGS08 wurde vom CODE eine Reprozessierung durchgeführt, um für diesen Zeitraum konsistente Produkte bereitstellen zu können. Die in dieser Reprozessierung geschätzten Satellitenuhren, sowie die Differential Code Biases waren nicht öffentlich zugänglich, wurden aber von Frau Dr.-Ing. Heike Bock (AIUB) dankenswerterweise für die Prozessierungen dieser Arbeit zur Verfügung gestellt. Bei den Untersuchungen im Rahmen des Umstiegs von BS50 auf BS52 wurde beispielsweise festgestellt, dass in der Genauigkeitsinformation der Headereinträge verschiedener heruntergeladener und zur Prozessierung verwendeter Orbitdateien des CODE fälschlicherweise bei vielen Satelliten eine Null für eine unbekannte Genauigkeit angegeben wurde. Diese Tatsache in Kombination mit der Einstellung „Exclude sat. with accuracy code 0“ im Programm PRETAB der neuen BS52 führte zu einem Ausschluss vieler Satelliten aus der Prozessierung und dadurch zu einer deutlich geringeren Residuenanzahl. Der fehlerhafte Headereintrag wurde vom CODE korrigiert (siehe BSW-Mail Nr. 0319 vom 25.09.2013 und [Dach u. a., 2013, S. 26]), so dass nach dem Herunterladen der verbesserten Dateien und Einführung in die Auswertung in der Prozessierung wieder die korrekte Residuenanzahl ausgegeben wurde. Außerdem wurden verschiedene Auswerteparameter angepasst und sowohl die STA- als auch die Datei mit der Kalibrierinformation der Antennen in das neue Format überführt. Letztendlich weisen die Ergebnisse der alten und neuen Version der BS nur noch minimale Unterschiede auf, so dass davon auszugehen ist, dass die im Folgenden präsentierten Ergebnisse (berechnet mit BS50), in analoger Weise auch mit der aktuellen BS52 erzielt werden.

Detaillierte Analysen des Residuenverlaufs entlang der Satellitenspuren haben gezeigt, dass parallele Verläufe von in Skyplots mit farblicher Codierung der Residuenwerte dargestellten Satellitenspuren über einen oder mehrere Tage ein annähernd gleiches Satellitenverhalten zeigen. Es können jedoch auch Abweichungen hiervon auftreten, wie der in Abb. 8-10 dargestellte Plot eines Ausschnitts der Real-Residuen der Station DOCO für den Zeitraum DoY 001 bis 004 2010 zeigt. Deutlich ist erkennbar, dass die beiden nahezu parallel verlaufenden Spuren der Satelliten 15 und 19 einen ähnlichen Residuenverlauf zeigen. Der

⁵Siehe IGS-Mail Nr. 6354, <http://igscb.jpl.nasa.gov/pipermail/igsmail/2011/007544.html>

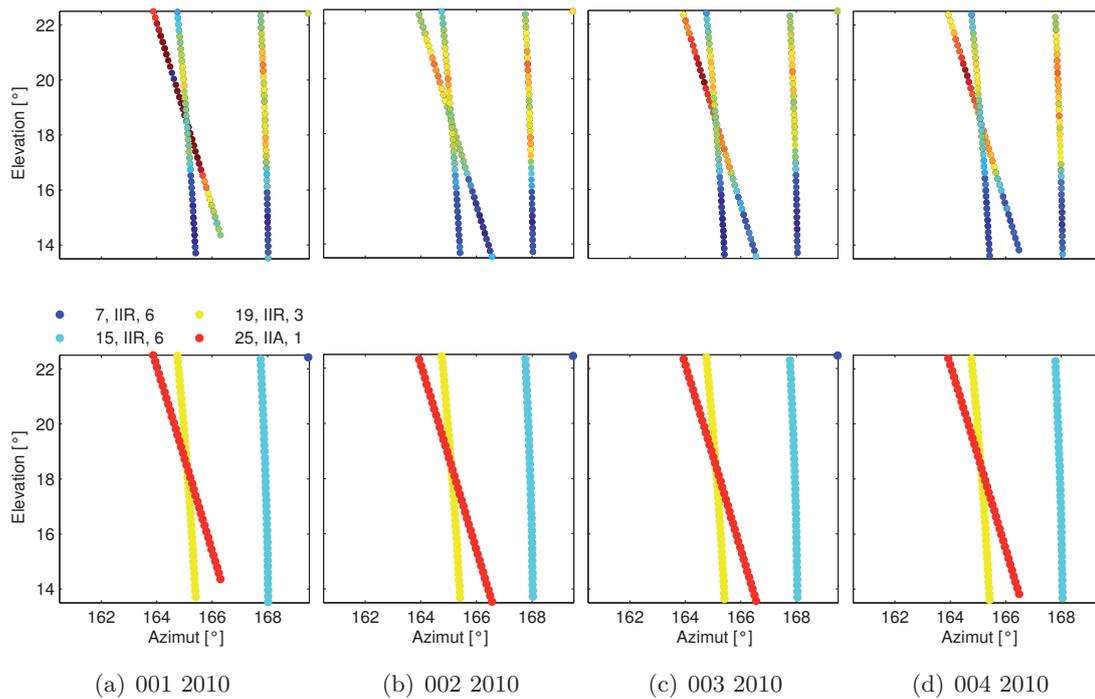


Abb. 8-10: Plots der Real-Residuen der Station DOCO für einen Ausschnitt der Antennenhemisphäre im Zeitraum DoY 001 bis 004 2010; oben: Residuenwert farblich codiert, unten: einzelne Satelliten mit PRN, Baureihe (Block) und Bahnebene

kreuzende Satellit 25 zeigt für DoY 002 2010 einen gut zu den Spuren der Satelliten 15 und 19 korrespondierenden Residuenverlauf, weist jedoch für die DoY 001, 003 und 004 ein sichtbar anderes Verhalten auf. Diese Auffälligkeit tritt auch auf anderen Stationen, wie beispielsweise DILL (siehe Abb. B-7 im Anhang) und mit anderen Satelliten auf. Die Gründe für derartige Unterschiede im Residuenverlauf sind unklar. Die Bestimmung eines Korrekturwertes für einzelne Bereiche wird durch derartige Unterschiede im Residuenverlauf erschwert. Abhilfe könnten Testverfahren wie das in Kap. 8.2 beschriebene Vorgehen schaffen.

Im Rahmen der Voruntersuchungen wurden zur visuellen Untersuchung der Residuenvariation über einen längeren Zeitraum (DoY 001 bis 207 2010) aus den Skyplots der Residuen jedes einzelnen Tages Filmsequenzen erstellt. Hierbei konnte beobachtet werden, dass die geplotteten Real-Residuen für niedrige Elevationen stärkeren Variationen unterworfen sind als beispielsweise Residuen oberhalb einer Elevation von 30° . Durch die Filmsequenzen wurde auch deutlich, dass ein systematisches Verhalten verschiedener Bereiche auf einzelnen Stationen reproduzierbar in den Residuen enthalten ist. Des weiteren hat die Analyse dieser Filmsequenzen gezeigt, dass die Spuren der GPS-Satelliten im Skyplot in der Regel raumstabil sind. Einige Satelliten haben im untersuchten Zeitraum ihre Spur jedoch stark verändert, was auf Bahnmanöver hinweist, die mit den entsprechenden Satelliten durchgeführt wurden. Aufschluss über Modifikationen der Orbits liefert die Datei SAT_2010.CRX, welche vom AIUB zur Verwendung in der BS zum Download bereitgestellt wird und für alle GNSS-Satelliten die Zeiträume enthält, in denen Bahnmanöver durchgeführt und von den Satelliten unbrauchbare Daten ausgesendet wurden. Dieser Datei ist zu entnehmen, dass mit PRN 24 im untersuchten Zeitraum am 13.01. (DoY 013), mit PRN 25 am 09.02. (040), 18.06. (169), 21.06. (172) und mit PRN 26 am 08.02. (039) Bahnmanöver durchgeführt wurden. Für die PRN 24 und 26 sind in den Filmsequenzen starke Änderungen der Bahnspuren erkennbar, die unmittelbar nach den durchgeführten Bahnmanövern beginnen.

Ursache für die ungewöhnlichen Bewegungen der Satelliten 24 und 26 ist die Optimierung der GPS-Konstellation, welche „24+3“ oder „Expandable 24“ genannt wird. Durch die veränderte Geometrie sollen gleichzeitig mehr GPS-Satelliten sichtbar sein. Zusätzlich fliegen einige neue Satelliten als Tandem mit alten Satelliten, um bei etwaigen Ausfällen Geometrie-Änderungen zu vermeiden. Hintergrund für die Umstrukturierung sind Einsätze der US-Streitkräfte in Bergregionen des Irak und in Afghanistan. Zu Beginn wurden drei GPS-Satelliten in neue Bahnen gelenkt. Start war am 13.01.2010 mit Satellit 24, der seine Endposition ca. ein Jahr später einnahm. Die lange Transferzeit in einen neuen Slot ist durch notwendige Sparmaßnahmen des Satellitentreibstoffes begründet. Außerdem werden SVN49 (zu diesem Zeitpunkt als deaktivierter PRN1 im All) und SVN26 verschoben. Die geplanten Zeiträume hierbei sind 21.01.2010 bis Mai 2010 und 08.02.2010 bis Mai 2010 (GPS World [2010], <http://www.insidegnss.com/node/2466>, <http://www.insidegnss.com/node/2650>, Aufruf jeweils: 17.11.2014). In Abb. 8-11 sind Plots der Satellitenspuren der Station DOCO in Form von Skyplots im Abstand von 20 d für den Zeitraum DoY 011 bis 191 2010 zusammengestellt. In dieser Darstellung sind die Spuren der beiden Satelliten

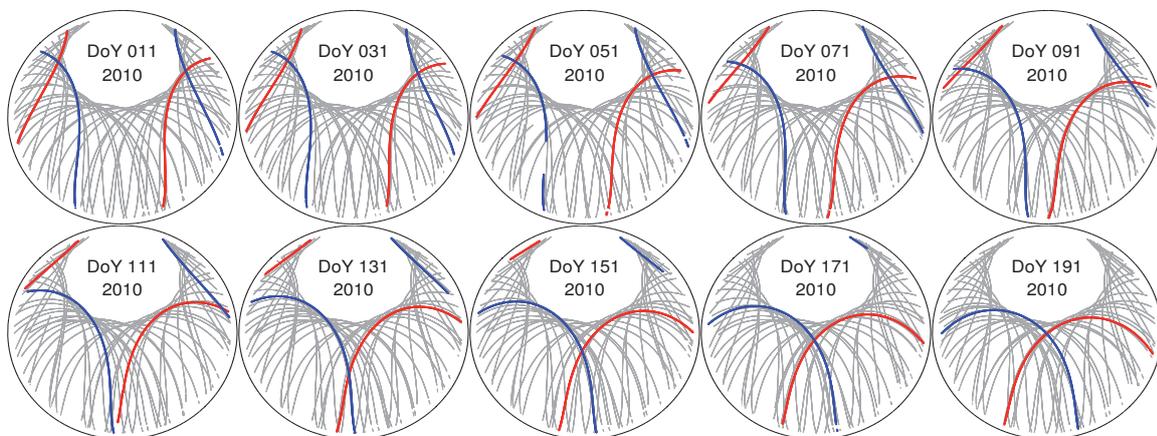


Abb. 8-11: Skyplots der Satellitenspuren der Station DOCO im Zeitraum DoY 011 bis 191 2010; rot: PRN24, blau: PRN26

(PRN24 und PRN26) in rot bzw. blau, die der übrigen Satelliten in grau dargestellt. Die Veränderung ist deutlich erkennbar: die Spuren von PRN24/PRN26 wandern im Uhrzeigersinn/gegen den Uhrzeigersinn. Da die Spuren der übrigen Satelliten im untersuchten Zeitraum im Skyplot nur wenig variieren, tragen sie in der Regel zur Berechnung der Korrekturwerte in den identischen Zellen an jedem Tag bei. Durch die im Laufe der Zeit veränderte Spur von PRN24 und PRN26, werden die Residuen dieser beiden Satelliten mit der Zeit unterschiedlichen Zellen zugeordnet. Zum einen könnte mit Hilfe dieser Satelliten eine Validierung der berechneten Stackingmaps durchgeführt, zum anderen durch eine Art „Scan“ auch flächendeckende Korrekturwerte für Bereiche bestimmt werden, durch die in der übrigen Zeit keine Satellitenspuren verlaufen.

8.4.2 Handhabung von Ausrüstungswechseln

Bei den bisherigen Untersuchungen wurden Zeiträume ausgewählt, in denen keine Ausrüstungswechsel an Stationen auftraten. Da jede Hardware-Komponente einer permanenten GNSS-Station die aufgezeichneten Daten beeinflussen kann, gelten die mit Stacking berechneten Korrekturen nur für die zu dieser Zeit gültige Stationskonfiguration. Eine Hardwareänderung muss daher beim Stapeln von Residuen entsprechend berücksichtigt werden und kann beispielsweise nach Abb. 8-12 gehandhabt werden. Diese Darstellung ist eine Fortführung von Abb. 6-6 und wurde um einen Ausrüstungswechsel sowie das Vorgehen beim anschließenden gleitenden Stacking ergänzt. Hierbei soll an DoY 136 ein Antennenwechsel stattfinden, so

dass keine direkte Weiterführung des Stapel-Prozederes (beispielsweise DoY 127 bis 136 stapeln und an DoY 137 einführen) erfolgen kann, da ansonsten Daten unterschiedlicher Stationskonfiguration gemischt werden. Für den Tag des Antennenwechsels liegen Mischdaten (mit zwei Antennen aufgezeichnet) vor, die in einer regulären GNSS-Prozessierung ausgewertet werden können, beim Stapeln von Residuen jedoch zu Mischeffekten führen können, so dass dieser Tag vom Stacking ausgeschlossen wird. Sollen weiterhin die zehn zurückliegenden Tage gestapelt und am aktuellen Tag eingeführt werden, so ist dies erst wieder ab DoY 147 möglich, wodurch eine Unterbrechung der Zeitreihe verursacht wird. Alternativ kann eine Stackingmap aus den Daten von DoY 137 bis 146 berechnet und an diesen Tagen auch eingeführt werden. Ein kleiner Nachteil dieser Herangehensweise ist, dass dieses Vorgehen im Echtzeitbetrieb (Einführung einer Stackingmap der vergangenen zehn Tage und Einführung am aktuellem Tag) nicht möglich ist.



Abb. 8-12: Handhabung von Ausrüstungswechseln beim gleitenden Stapeln

9 Zusammenfassung und Ausblick

Mit den gestiegenen Genauigkeitsansprüchen an eine hochgenaue Positionsbestimmung mit GNSS im mm-Bereich muss der Berücksichtigung verschiedener Einflussfaktoren große Aufmerksamkeit geschenkt werden. Eine nach wie vor große Rolle spielen hierbei die sogenannten stationsabhängigen Fehler, unter denen eine Vielzahl von an einer GNSS-Station auftretenden Einzeleffekten, wie beispielsweise Restfehler in der Modellierung der Empfängerantenne oder Mehrwegeeffekte, subsumiert werden kann. Das Verfahren des räumlichen Stapelns von Residuen basiert auf der Annahme, dass systematische Einflüsse über die Zeit reproduzierbar in den aus einer GNSS-Prozessierung stammenden Residuen enthalten sind, während zufällige Anteile verschwinden. Als Auswerteverfahren ist dabei die Methode des Precise Point Positioning prädestiniert, da im Vergleich zur differenziellen Auswertung jede GNSS-Station separat prozessiert und analysiert werden kann.

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Verfahren zur Verbesserung stationsabhängiger Fehler bei GNSS entwickelt. Die Ansprüche an dieses Verfahren sind die Möglichkeit der einfachen Implementierung, die problemlose Anwendung auf zukünftige GNSS und das Auskommen ohne zusätzliche Messungen oder Daten. Der letztgenannte Punkt spielt insbesondere bei einer verbesserten Reprozessierung langer GNSS-Zeitreihen eine Rolle. Das entwickelte Verfahren basiert auf der Methode des räumlichen Stapelns von Residuenwerten einer PPP-Auswertung, wobei räumlich in diesem Fall als Raumrichtung (Azimut, Elevation) der an einer GNSS-Station eintreffenden Satellitensignale zu verstehen ist. Der Fokus der Umsetzung lag auf der ersten Realisierung der kompletten Implementierung mit einfacher Berechnung der Korrekturwerte über deren Einführung in eine zweite Prozessierung und der Ergebnisanalyse. Eine spätere Verbesserung einzelner Schritte kann sukzessive erfolgen.

Die Berechnung von Korrekturwerten basiert auf der Einteilung der Antennenhemisphäre in Zellen mit festem Azimut- und Zenitdistanzinkrement. Die einzelnen Residuen eines ersten Auswerteschrittes werden über ihre Raumrichtung (Azimut, Elevation) einzelnen Zellen zugeordnet und der korrespondierende Korrekturwert einer Zelle wird als Mittelwert aller enthaltenen Residuen berechnet. Eine Berücksichtigung der Korrekturen kann durch Addition auf die PZV-Information der jeweiligen Antenne oder als separate Datei im Format der Antenneninformation, die in die Prozessierung eingeführt wird, erfolgen. In dieser Arbeit wurden beide Implementierungen untersucht, wobei die Variante der separaten Datei zu bevorzugen ist, da die originäre Antenneninformation nicht modifiziert werden muss und eine davon abweichende Rasterung möglich ist.

Nach einem ersten, erfolgreichen Testszenario wurden die GPS-Daten ausgewählter Stationen des GURN über einen Zeitraum von 120 d prozessiert, die L_3 -Phasenresiduen gleitend gestapelt und einem erneuten Prozessierungsdurchlauf zugeführt. Durch das gleitende Stapeln (Berechnung der Korrektur aus den vergangenen x Tagen und Einführung an aktuellem Tag) konnte die Veränderung der Stackingmaps über die Zeit analysiert werden. Die konsekutiven Stackingmaps der untersuchten Stationen wiesen dabei eine große Korrelation auf (≥ 0.9), was in der großen identischen Datengrundlage bei Stackingzeiträumen von 10 d/20 d/50 d begründet ist. Bezogen auf die erste Stackingmap des Untersuchungszeitraumes sinkt die Korrelation in Abhängigkeit von der Stationsqualität und -umgebung ab. Bei Stationen, die starke stationsabhängige Effekte bei unverändertem Stationsumfeld aufweisen, was durch reproduzierbare Signaturen der Stackingmaps sichtbar wird, ist der Rückgang der Korrelation geringer als bei Stationen, die vorwiegend zufällige Anteile in den Stackingmaps enthalten. Durch die Variabilität des Umgebungseinflusses ist der Einsatz von gleitendem Stacking daher in jedem Fall sinnvoll. Bei Stationen, deren Umfeld sich

vegetationsbedingt ändert, ist auch ein Rückgang der Korrelation zu verzeichnen. Für die Wahl der Länge des Stackingzeitraums ist daher die Stationsumgebung ausschlaggebend: Bei Stationen, deren Umgebung sich durch den Einfluss von Vegetation ständig ändert, sind kürzere Zeitfenster sinnvoll, bei Stationen mit statischem Umfeld können längere Zeitspannen gewählt werden. Durch die Einführung der gestapelten Information können die Residuen von Stationen mit starken stationsabhängigen Effekten deutlich verbessert werden: die Signaturen verschwinden zu großen Teilen und es verbleiben mehr Beobachtungen in der Auswertung. Der positive Einfluss der Korrektur ist auch in den Stationskoordinaten erkennbar. Stationen, die großen Verbesserungen der Residuen unterliegen, erfahren Koordinatenänderungen von bis zu 2.7 mm in der Höhe (Median aller Werte im Untersuchungszeitraum von 110 d), die Auswirkung auf Stationen ohne große Residuenveränderung ist marginal. Analog hierzu sind die Auswirkungen auf die Troposphärenparameter bei Stationen mit schlechten GNSS-Bedingungen größer als bei unkritischen Stationen, was zu erwarten war.

Zusätzlich wurden Untersuchungen zum Ersatz von Individualkalibrierungen durch Typmittelwerte mit der Verwendung gestapelter Residueninformation durchgeführt. Die Ergebnisse verschiedener Berechnungen zeigen, dass Abweichungen des individuellen Antennenverhaltens von den PZV des Typmittels durch die Einführung gestapelter Residuen ausgeglichen werden können, Offsets zwischen Individualkalibrierungen und Typmittelwerten (jeweils Kombination aus PZO und PZV) jedoch nicht korrigiert werden können. Sollten für Antennen nur rein elevationsabhängige PZV vorliegen, so ist für diese in jedem Fall der Einsatz gestapelter Information sinnvoll. Auch bei der Verwendung individuell kalibrierter Antennen ist der Einsatz von Korrekturen, die aus gestapelten Residuen abgeleitet werden, empfehlenswert, da negative Einflüsse der Stationsumgebung korrigiert werden können.

Mit Hilfe des vorgestellten Verfahrens kann eine signifikante Verbesserung des Datenmaterials von CORS, die starken stationsabhängigen Effekten unterworfen sind, erreicht werden. Bei sehr schlechten Stationen könnte durch ein iteratives Vorgehen (PPP-Prozessierung \Rightarrow Stacking \Rightarrow PPP-Prozessierung mit Einführung Stackingmaps \Rightarrow Stacking \Rightarrow PPP-Prozessierung mit Einführung Stackingmaps) eine weitere Verbesserung erzielt werden. Dieses einfach umsetzbare Verfahren kann – im Gegensatz zu anderen Herangehensweisen – problemlos auf zukünftige GNSS adaptiert werden. Durch Verbesserungen, wie eine Anpassung der Zellgrößen in Abhängigkeit von der Zenitdistanz, eine alternative Zellfestlegung oder statistische Tests der Residuen, kann dieses Verfahren verfeinert und optimiert werden. Prinzipiell bestünde auch die Möglichkeit, die mit Stacking bestimmten Korrekturen direkt in den RINEX-Beobachtungsdateien anzubringen, jedoch sollten aus Sicht des Autors einem Nutzer immer die originären Rohdaten zur Verfügung gestellt werden, um diesem die volle Freiheit bei der Prozessierung der Daten zu überlassen.

Alternativ zu einer Speicherung der Korrekturwerte in Matrizenform ist auch eine Kugelflächenfunktionsentwicklung, bei der die einzelnen Korrekturwerte beziehungsweise die Residuen selbst als Stützstellen dienen, denkbar. Schwierigkeiten bereiten hierbei jedoch eine nicht vollständig durch Residuen abgedeckte Antennenhemisphäre (sogenanntes Nordloch und Bereiche, die nicht von Satelliten durchquert werden) und die in der Regel kleinräumige Ausprägung von Mehrwegeeffekten. Letztere erfordern zur korrekten Repräsentation mittels einer Entwicklung nach Kugelflächenfunktionen einen hohen Entwicklungsgrad. In der Zukunft könnten die aus Residuen einer PPP-Prozessierung berechneten Stackingmaps für die Beurteilung der Stationsqualität und deren Veränderungen über die Zeit, beispielsweise von *SAPOS*[®] oder dem IGS verwendet werden. Sollten einzelne Stationen starke Signaturen in den Residuen aufweisen, könnten die Stackingmaps dieser Stationen von den entsprechenden Institutionen den Nutzern für eine optimierte GNSS-Prozessierung zur Verfügung gestellt werden. Die Verwendung gestapelter Residuen in der Prozessierung globaler Netze (beispielsweise ITRF oder Subnetze) könnte zur Steigerung von Konsistenz,

Genauigkeit und Zuverlässigkeit der daraus abgeleiteten Produkte beitragen. Ebenso ist denkbar, die aus Precise Point Positioning abgeleiteten Stackingmaps nach einer entsprechenden Umrechnung ($L_3 \Rightarrow L_1, L_2$) in einer differenziellen Datenprozessierung als Korrekturwerte einzuführen. Jedoch kann davon ausgegangen werden, dass die Bedeutung der differenziellen Auswertung durch die stetige Verbesserung von PPP abnimmt und in wenigen Jahren möglicherweise Echtzeit-PPP mit der Genauigkeit von D-GNSS möglich ist.

A Anpassungen und Parameter BS

Dieses Kapitel umfasst die detaillierte Beschreibung der Modifikationen der Bernese GNSS Software. Diese sind notwendig, um gestapelte Residueninformation im Format der Antennenkalibrierwerte als separate Information zur Korrektur einzuführen. Zusätzlich wird der Ablauf einer PPP-Prozessierung mit der Bernese GNSS Software 5.2 beschrieben und die gewählten Auswerteparameter zusammengestellt.

A.1 Modifikationen in der Bernese GNSS Software

Zur Prozessierung der GPS-Daten in Kombination mit der Einführung gestapelter Information wurde die Bernese GNSS Software in der Version 5.2 verwendet (<http://www.bernese.unibe.ch>, Stand: 27.09.2014). Diese wissenschaftliche GNSS-Software wurde am Astronomischen Institut der Universität Bern (<http://www.aiub.unibe.ch>, Stand: 27.09.2014) entwickelt. Die Ursprünge gehen hierbei bis auf die 1980er Jahre zurück. Dieses Softwarepaket wird insbesondere bei der Prozessierung hochpräziser Netze verwendet, welche auch eine globale Ausdehnung aufweisen können. Durch die stetige Weiterentwicklung der Software werden aktuelle Modelle und Erweiterungen dem Nutzerkreis zur Verfügung gestellt. Die Bernese GNSS Software ist zwar nicht kostenfrei verfügbar, jedoch wird bei ihr, im Gegensatz zu vielen anderen Auswerteprogrammen im GNSS-Sektor, der Quellcode mitgeliefert. Aktuell umfasst die BS52 knapp 100 Programme mit annähernd 1500 Subroutinen und insgesamt über 43000 Zeilen Quellcode (Quelle: http://www.bernese.unibe.ch/docs/BSW52_newFeatures.pdf, Stand: 14.10.2014). Die Programmierung dieser GNSS-Auswertesoftware wurde in Fortran90 umgesetzt, die grafische Oberfläche wurde mit C++ und der freien Qt-Bibliothek realisiert. Qt ist eine Klassenbibliothek für C++ zur plattformübergreifenden Programmierung grafischer Benutzeroberflächen (<http://qt-project.org>, Stand: 12.11.2014). Die Software kann auf verschiedenen Betriebssystemen verwendet werden (UNIX, LINUX, MAC, Windows), muss auf den drei erstgenannten Systemen jedoch vom Nutzer durch mitgelieferte Skripte compiliert werden, für die Windows-Version wird ein Installationsroutine mitgeliefert. Die Lieferung des Quellcodes verlangt zwar einerseits einen höheren Installationsaufwand, bietet jedoch andererseits die Möglichkeit, die Umsetzung der einzelnen Routinen nachzuvollziehen und eigene Anpassungen vorzunehmen. Vom Autor wurde die BS52 auf einen Server mit zwei Quadcore-Prozessoren (Typ: Intel Xeon E5506 2.13 GHz) und 12 GB RAM unter der 64 bit-Version des Betriebssystems openSUSE 11.1 verwendet. Zur Compilierung wurde der freie Fortran-Compiler G95 (Version 0.90!, Teil von gcc Version 4.0.3) verwendet.

Die Bernese GNSS Software besteht aus vielen einzelnen Programmmodulen, welche alle bei einem Prozessierungsdurchlauf erforderlichen Aufgaben übernehmen. Um eine automatisierte Prozessierung, beispielsweise in der routinemäßigen Datenauswertung oder der Reprozessierung von Daten über einen großen Zeitraum zu ermöglichen, steht die sogenannte „Bernese Processing Engine“ (BPE) zur Verfügung. In ihr können die einzelnen Prozessierungsschritte zu einem kompletten Auswertedurchlauf zusammengestellt werden. Neben der „klassischen“ differenziellen Auswertung bietet die BS52 auch die Möglichkeit, das Verfahren „Precise Point Positioning“ zu verwenden, welches im Rahmen dieser Arbeit genutzt wurde, um jede Station separat zu analysieren. Im Lieferumfang der BS52 sind auch mehrere Prozessierungsbeispiele samt BPE enthalten, mit welchen einerseits die korrekte Compilierung überprüft werden kann (Soll-Ergebnisse werden mitgeliefert), welche andererseits auch an die eigenen Bedürfnisse angepasst werden können. Details zur in dieser Arbeit verwendeten BPE sind in Kap. A.2 ab S. 140 zusammengestellt.

Während für den ersten Test der Einführung der gestapelten Information durch Addition auf die PZV-Information der einzelnen Stationen keine Modifikation der BS notwendig ist, müssen für die Verwendung

einer separaten Stacking-Datei einige Anpassungen im Quellcode und den Eingabepanels, welche die Programmoptionen enthalten, vorgenommen werden. Der wichtigste Prozessierungsschritt, in dem die Berechnung der ausgeglichenen Beobachtungen erfolgt, wird vom Programm GPSEST durchgeführt. Dabei werden eine Vielzahl einzelner Routinen ausgeführt, wobei die Routine PRCEPO eine zentrale Rolle spielt, da in ihr die Verarbeitung der Daten einer Epoche stattfindet. Hierbei werden die PZO und PZV der Satellitensende- und Stationsempfangsantennen separat berücksichtigt. Die PZO der Satelliten werden direkt an die Satellitenposition, die PZO der GNSS-Permanentstationen zusammen mit den Stationsexzentrizitäten an die Koordinaten der Station angebracht. Innerhalb von PRCEPO wird mittels PRANGE und verschiedenen Subroutinen die Pseudoentfernung zwischen einem Empfänger-Satelliten-Paar berechnet und verschiedene Korrekturen, unter anderem die PZV der Satelliten- und Stationsantenne, zur Pseudostrecke addiert. Zur Extraktion der PZV werden hierbei die Subroutinen STA_PCV und SAT_PCV verwendet, welche im Unterprogramm D_PHAECC (Verzeichnis BERN52/INC/FOR) enthalten sind. Diese beiden Routinen verwenden die Routine SEARCH_PCV, welche ebenfalls in D_PHAECC enthalten ist und in der bereits gepuffert eingelesenen Antenneninformation aller Stationen nach der für die aktuell bearbeitete Station gültigen Antenne sucht. Der Routine wird zusätzlich die Raumrichtung, unter der der aktuell bearbeitete Satellit von der Station aus zu dieser Epoche sichtbar ist, in Form von Azimut und Zenitdistanz übergeben. In der für gewöhnlich rasterförmig abgelegten PZV-Information (Azimut, Zenitdistanz) wird der gültige Korrekturwert linear zwischen den nächstgelegenen Stützstellen interpoliert. Ebenso bietet die BS die Möglichkeit, PZV-Information in Kugelfunktionsdarstellung in der Antenneninformationsdatei abzulegen, was in dieser Arbeit jedoch nicht genutzt wurde. Der entsprechende Korrekturwert wird zurückgegeben und in PRANGE an die berechnete Pseudoentfernung angebracht.

Die Berücksichtigung gestapelter Information zur Korrektur der Beobachtungen soll über separate Dateien erfolgen, die im Format der Antenneninformation der Bernese GNSS Software erstellt werden. Hierzu wurden verschiedene Anpassungen und Erweiterungen der BS vorgenommen, die im Folgenden erläutert werden. Basierend auf dem Quellcode des oben erwähnten Unterprogramms D_PHAECC.f90 wurde das zusätzliche Unterprogramm D_STACK.f90 erstellt und dessen Subroutinen umbenannt, um Verwechslungen mit den Subroutinen des ursprüngliches Programms auszuschließen. D_STACK.f90 wird verwendet, um die in separaten Dateien vorliegende, gestapelte Information einzulesen. Die Routine PRANGE.f (Verzeichnis BERN52/LIB/FOR) wurde um das Einlesen der Stackingdatei und die Anbringung dieser Korrektur erweitert. Im Ablauf der Prozessierung erfolgt dies direkt nach der Berücksichtigung der PZV des Antennenmodells. Der Quellcode des Programms GPSEST.f (Verzeichnis BERN52/PGM/FOR) wurde um Befehle zum Einlesen des Namens der Stackingdatei aus der Steuerungs-Datei (Panel) ergänzt. Sollte keine Stackingdatei im entsprechenden Panel-Eintrag angegeben sein, wird eine Fehlermeldung ausgegeben und die Prozessierung fortgesetzt. Hierzu wurde die Datei der Programmoptionen (Panel) für GPSEST um einen Eintrag im Bereich der Variablenfestlegung bei den allgemeinen Eingabedateien (Abschnitt GPSEST 1.4: General Files), wie im folgenden Quellcode-Ausschnitt dargestellt, ergänzt. Die Zahlen in der ersten Spalte sind Zeilennummern, die im originären Quellcode nicht enthalten sind.

```
1 ! Stacked residuals
2 ! _____
3 STACKRES 1  "${STACK}.${PCV}"
4   ## widget = selwin; path = PTH_GEN; maxfiles = 1; emptyallowed = true
5
6 DESCR_STACKRES 1  "Stacked residuals"
```

Die mit ! beginnenden Zeilen enthalten Kommentare. Mittels der in Zeile 3 stehenden Zuweisung wird der Variablen STACKRES der Wert $\$(STACK).\(PCV) zugewiesen, wobei $\$(STACK)$ und $\$(PCV)$ in diesem Fall weitere Variablen sind, die in der PCF-Datei, welche den Ablauf der BPE festlegt, definiert sind;

Details hierzu folgen. Über die Variable STACKRES wird in D_STACK der Name der Stacking-Datei abgefragt und diese gegebenenfalls eingelesen. Durch die Option widget = selwin; wird beim Mausklick in das Feld, welches den einzulesenden Dateinamen enthält, ein Auswahlfenster (engl.: select window) geöffnet, in welchem die gewünschte Datei ausgewählt werden kann, alternativ kann in diesem Feld per Tastatureingabe beispielsweise der Variablenname \$(STACK).\$(PCV) eingegeben werden. path = PTH_GEN; legt den Pfad fest, in dem die Datei der Stackinginformation abgelegt sein muss, in diesem Fall das GEN-Verzeichnis, welches unter anderem auch die Datei der Kalibrierinformation enthält. Mit maxfiles = 1; wird festgelegt, dass nur eine Stacking-Datei angegeben werden darf, die gestackte Information für alle zu prozessierenden Dateien müssen daher in einer Datei abgelegt sein. Liegt die Information in mehreren Einzeldateien vor, müssen diese entweder zu einer Datei zusammengeführt werden oder es muss an dieser Stelle eine größere Zahl eingesetzt werden. Die Option emptyallowed = true gibt an, dass diese Datei optional angegeben werden kann, d.h. die Prozessierung kann auch ohne diese Datei durchgeführt werden.

Ergänzend zur Einführung der Variablen STACKRES muss die Paneloberfläche um das oben erwähnte Eingabefeld für den Namen der Stackingdatei ergänzt werden. Dies erfolgt am Ende der Panel-Datei durch die mit # Stacked residuals beginnende Zeile im folgenden Code-Ausschnitt (Zeile 18).

```

1 # BEGIN_PANEL SHOWGEN = 1 #####
2 # GPSEST 1.4: General Files #
3 # # #
4 # GENERAL INPUT FILES #
5 # General constants > %%%%%%%%%% < # CONST
6 # Geodetic datum > %%%%%%%%%% < # DATUM
7 # Phase center variations > %%%%%%%%%% < # PHASECC
8 # Receiver information > %%%%%%%%%% < # RECEIVR
9 # Satellite information > %%%%%%%%%% < # SATELL
10 # Satellite problems > %%%%%%%%%% < # SATCRUX
11 # Earth potential coefficients > %%%%%%%%%% < # POTCOE
12 # Subdaily pole model > %%%%%%%%%% < # SUBMOD
13 # Nutation model > %%%%%%%%%% < # NUTMOD
14 # SINEX header file > %%%%%%%%%% < # SINEXIN
15 # IONEX control file > %%%%%%%%%% < # IONEXCF
16 # GPS-UTC file > %%%%%%%%%% < # GPSUTC
17 # Frequency information > %%%%%%%%%% < # FRQINFO
18 # Stacked residuals > %%%%%%%%%% < # STACKRES
19 # # #
20 # MENU SETTINGS #
21 # Selected campaign > %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% <# CAMPAIGN
22 # Selected session Year> %%% < Session> %%% < # YR4_INFO ...
23 # Session table > %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% <# SESSION_...
24 # # #
25 # TEMPORARY FILES #
26 # Scratch files > %%%%%%%%%% < > %%%%%%%%%% < > %%%%%%%%%% < # AUXFIL ...
27 # END_PANEL #####

```

Im obigen Text wurde bereits auf Möglichkeit hingewiesen, am Ende der PCF-Datei eigene Variablen deklarieren zu können. Hierdurch bietet sich die Möglichkeit, in den Panels der einzelnen Programme diese Variablen zu verwenden und diesen durch Modifikation des entsprechenden Eintrags in der PCF-Datei einen neuen Wert zuzuweisen, ohne dass sämtliche Panel-Einträge modifiziert werden müssen. Nachfolgend ist ein Ausschnitt der für die Prozessierung genutzten PCF-Datei dargestellt.

1	VARIABLE DESCRIPTION	DEFAULT
2	8***** 40*****	30*****
3	V_PCV Absolute/relative PCV model	I08
4	V_PCVINF PCV information file	PCV_st01
5	V_STACK Stacking information file	STACK\$YD-(10)-\$YD-1

In der mit VARIABLE überschriebenen Spalte wird der gewünschte Variablenname, beginnend mit V_ festgelegt, in der Spalte DESCRIPTION kann eine Beschreibung der Variablen angegeben und unter DEFAULT der Variablen der gewünschte Wert zugewiesen werden. Im dargestellten Ausschnitt wird durch V_PCV die Endung der Datei definiert (hier: I08), welche die Kalibrierwerte sowohl der Satelliten- als

auch der Empfängerantennen enthält. In den einzelnen Programmpaneln kann dann mittels \$(PCV) auf diese Variable zugegriffen werden. Mittels V_PCVINF wird der Dateiname der Kalibrierdatei festgelegt (hier: PCV_st01). Der neu hinzugefügten Variable V_STACK wird der Wert STACK\$YD-(10)-\$YD-1 zugewiesen, so dass im Panel von GPSEST mittels \$(STACK).\$(PCV) auf den Wert dieser Variablen und somit die entsprechende Datei, welche in diesem Fall die gestapelte Information enthält, zugegriffen werden kann. Bei der Definition des Variablenwertes von V_STACK ist eine weitere Variable enthalten, die standardmäßig von der Bernese GNSS Software zur Verfügung gestellt wird: \$YD. Mittels \$YD+n können Jahr und DoY im Format JJDDD erzeugt werden. \$YD+0 steht hierbei für den aktuell von der BS prozessierten Tag, es sind jedoch auch Werte für n ungleich Null möglich. Negative Werte liegen chronologisch vor, positive Werte nach dem aktuell prozessierten Tag. Sollen Werte für n verwendet werden, die betragsmäßig ≥ 10 sind, muss die Zahl (ohne das Vorzeichen) in runde Klammern gesetzt werden. Wird beispielsweise DoY 131 2013 prozessiert, erzeugt \$YD+0 den String 13131, \$YD-(10) steht in diesem Fall für DoY 121 2013 (String: 13121) und \$YD-1 für DoY 130 (String: 13130). In dieser Arbeit wurden die im Stackingzeitraum DoY 121 bis 130 2013 gestapelten Daten in einer Datei mit dem Namen STACK13121-13130.I08 abgelegt und konnten durch die dargestellte Belegung des Variablenwertes bei der Prozessierung von DoY 131 einfach eingelesen werden. Durch diese Vorgehensweise können Dateinamen bei der Prozessierung größerer Zeiträume automatisch an den aktuell prozessierten DoY angepasst werden.

A.2 Prozessierungsparameter in der BS52

Wie bereits oben erwähnt, sind im Lieferumfang der BS52 mehrere Beispiel-BPEs enthalten. Im Fall dieser Arbeit wurde das Beispiel PPP_BAS verwendet und entsprechend modifiziert. Im Folgenden werden die einzelnen Prozessierungsabschnitte aufgeführt und erläutert. In Tab. A-1 sind die einzelnen Schritte des Prozessierungsdurchlaufes der in dieser Arbeit verwendeten PPP-Prozessierung der Bernese GNSS Software aufgeführt. Der Ablauf unterscheidet sich an verschiedenen Stellen von der mit der BS gelieferten Beispiel-BPE PPP_BAS. Beispielsweise wurden in der ursprünglichen BPE die RINEX-Beobachtungsdaten mit dem Modul RNXSMT vorverarbeitet, wogegen in dieser Arbeit stattdessen das Programm MAUPRP verwendet wurde. Der Grund hierfür ist eine Untersuchung, die im Rahmen der Diplomarbeit von T. Fuhrmann (siehe [Fuhrmann u. a., 2010, S. 52ff]) durchgeführt wurde. Das Programm MAUPRP (Manual and AUTomatic PReProcessing) kann für die Detektion von Ausreißern im eingehenden Datenmaterial (Phasenbeobachtungen) verwendet werden. Nach [Dach u. a., 2007, S. 116f] können von MAUPRP folgende Aufgaben durchgeführt werden:

- Markierung von Beobachtungen zum Ausschluss von der Präprozessierung und Datenanalyse nach folgenden Kriterien:
 - Beobachtungen niedriger Elevationen
 - Epochen, die keine paarweisen Beobachtungen aufweisen (lediglich L_1 oder L_2)
 - Kurze Beobachtungsintervalle
- Nichtparametrisierte Datenprüfung zur Detektion großer Ausreißer
- Berechnung einer epochenweisen Lösung zur Cycle-Slip-Detektion
- Überprüfen aller Beobachtungen und Auffinden der Zeitintervalle, die von Cycle-Slips betroffen sind
- Falls möglich: Beheben des Cycle-Slips
- Im Falle einer Prozessierung undifferenzierter Phasenbeobachtungen: Untersuchung auf Uhrfehler

[Fuhrmann u. a., 2010, S. 52ff] konnten nachweisen, dass durch das Streichen von RNXSMT und den Einsatz von MAUPRP im Programm CODSPPP realistische Werte für die Empfängeruhrfehler geschätzt werden und bei schlechten Stationen signifikant mehr Beobachtungen im Datenmaterial verbleiben. Daher wurde in dieser Arbeit die gleiche Vorgehensweise realisiert.

Tab. A-1: Ablaufübersicht der wichtigsten Schritte der PPP-Prozessierung in der BS52 im Rahmen dieser Arbeit (angelehnt und erweitert nach Fuhrmann u. a. [2010])

Panel	Aufgabe
	Kopieren, Entpacken, Formatieren
GS03_COP	Kopieren und Entpacken der GNSS-Beobachtungsdateien, Orbits, Satellitenuhrdaten, Erdrotationsparameter (ERP), Differential Code Biases, Ionosphäreninformation, Stationsinformationsdatei, Datei der Näherungskoodionaten und Datei der ozeanischen Auflasteffekte ins Kampagnenverzeichnis
	Aufbereitung von Pol-, Orbit-, Satellitenuhrdaten
POLUPDH	Extrahierung der Polinformation aus ERP-Dateien
PRETAB	Konvertierung der Orbits in Bernese-internes Format
ORBGENH	Integration der Bewegungsgleichungen mithilfe der in PRETAB erzeugten Koordinaten, Generierung einer Standard-Bernese-Orbit-Datei
RNXCLK	Extrahieren der Satellitenuhrinformation aus kombinierter RINEX-Uhrdatei
	Vorverarbeitung, Konvertierung und Synchronisation von Beobachtungsdaten
RNXGRA	Erstellen eines Überblicks der beobachteten Satelliten, stationsweise Pseudografiken, Satellitenanzahl
RXOBV3	Konvertierung der RINEX-Beobachtungsdateien ins Bernese-interne Format
CODSPPP	Codeprozessierung: Synchronisation der Empfängeruhr mit GPS-Zeit, Bestimmung von Empfängeruhrkorrektur und Näherungskoodionaten, Ausreißerdetektion
MAUPRP	Präprozessierung der Phasenbeobachtungen
	Berechnung der PPP-Lösung
PPPEDT	Schleife aus: GPSEST, RESRMS, SATMRK mit finalem Durchlauf von GPSEST, ADDNEQ2
PPPRES	nur GPSEST, Erneuter Durchlauf zur Speicherung der Real-Residuen
RESFMT	Konvertierung der Residuen vom Binär- ins ASCII-Format
CRDMERGE	Kombination der einzelnen Koordinatendateien
ADDNEQ2	Kombination der einzelnen Normalgleichungsdateien
ADDNEQ2	Erzeugen einer kombinierten SINEX-Datei
	Generierung der Zusammenfassung, Umkopieren und Löschen von Dateien
GS03_SUM	Prozessierungszusammenfassung erstellen
GS03_SAV	Ergebnisdateien in Archivverzeichnis speichern
GS03_DEL	Inhalte der Unterverzeichnisse in Kampagnenverzeichnis löschen
BPE_CLN	Log-Dateien löschen

Kopieren, Entpacken, Formatieren:

Im Laufe dieses Auswerteschrittes werden alle zur Prozessierung notwendigen Daten in die Unterverzeichnisse des sogenannten Kampagnenverzeichnisses der BS kopiert. Im Detail sind dies die RINEX-Beobachtungsdaten der Stationen, die Orbitdatei, die Datei der Erdrotationsparameter, die Dateien der Satellitenuhrparameter, Differential Code Biases und die Ionosphäredatei. Diese Dateien sind aus Platzgründen in komprimierter Form gespeichert und müssen vor der Nutzung entpackt werden. Zusätzlich werden die Stationsinformationsdatei, in welcher hinterlegt ist, wann auf welcher Station welche Ausrüstung verwendet wurde, die Datei der Näherungskordinaten und die Datei, welche die ozeanischen Auflasteffekte für die einzelnen Stationen enthält, in das entsprechende Verzeichnis kopiert. Falls gestackte Informationen als Korrekturen in die Prozessierung eingeführt werden sollen, wird die entsprechende Datei an dieser Stelle ins Verzeichnis BERN52/GPS/GEN kopiert.

Aufbereitung von Pol-, Orbit-, Satellitenuhrdaten:

Die von externen Quellen stammenden Produkte (siehe Kap. 5.2 ab S. 58) werden in diesem Schritt zur Nutzung in der BS aufbereitet. Die Bahndaten der Satelliten werden mittels PRETAB in ein Bernese-internes Format gewandelt, wobei eine Transformation vom erdfesten Referenzrahmen in den inertialen Rahmen erfolgt, zudem werden die Orbits um die ozeanischen und atmosphärischen Auflasteffekte korrigiert. ORBGEN berechnet aus diesen vorverarbeiteten Orbits mittels numerischer Integration der Bewegungsgleichungen sogenannte Standard-Orbits, welche von allen weiteren Programmen der BS verwendet werden. Mittels RNXCLK wird die vorliegende Uhrinformation vom RINEX-Uhrformat in ein Bernese-internes Format gewandelt.

Vorverarbeitung, Konvertierung und Synchronisation von Beobachtungsdaten:

Mittels RNXGRA wird aus den Inhalten der RINEX-Beobachtungsdateien der einzelnen Stationen ein Überblick der aufgezeichneten Daten erstellt. Dies umfasst auch die Erzeugung von Pseudografiken, welche in Form von ASCII-Dateien abgelegt werden. RXOBV3 wandelt die RINEX-Beobachtungsdateien (Code- und Phasenbeobachtungen) anschließend in ein Bernese-internes Format. Im Rahmen der weiteren Prozessierung werden gute Näherungswerte für die Korrekturen der Empfängeruhren in der Größenordnung von $1\ \mu\text{s}$ benötigt. Diese Genauigkeit wird bei der Synchronisation der Empfängeruhren mit der GPS-Zeit mittels Codebeobachtungen im Unterprogramm CODSPS problemlos erreicht. Die Bestimmung der endgültigen Uhrkorrekturen erfolgt im Laufe der später durchgeführten Parameterschätzung mittels GPSEST. Eine essentielle Aufgabe in der Vorverarbeitung der Code- und Phasendaten wird von MAUPRP durchgeführt, die Detektion von Ausreißern und das Aufspüren und wenn möglich Beheben von Cycle-Slips.

Berechnung der PPP-Lösung:

Die Berechnung der PPP-Lösung erfolgt iterativ in einer Schleife, in der die Schranken zur Detektion großer Code- und Phasenresiduen stufenweise verringert werden. Diese Schleife wird durch das Skript PPEDET_P definiert, in welchem die Schranken festgelegt sind. Sowohl für Code- als auch Phasenbeobachtungen wurden die Residuengrenzen der aufeinanderfolgenden Schleifendurchläufe auf 600 m, 60 m, 6 m, 0.6 m, 0.06 m, 0.006 m festgelegt (Standardeinstellung der Beispiel-BPE und Standardwerte für die Prozessierung von undifferenzierten Beobachtungen). Zur Ausreißersuche mit RESRMS werden normierte Phasenresiduen (Einweg- L_1 -Phasenresiduen) aus GPSEST verwendet. Nach [Dach u. a., 2007, S. 145] entspricht beispielsweise ein doppeldifferenziertes L_3 -Phasenresiduum von 36 mm einem normierten Residuum von 6 mm, vorausgesetzt, es wurde keine elevations- oder stationsabhängige Gewichtung vorgenommen. Der Schleifendurchlauf beginnt mit dem Setzen der Schranken für Code- (Kennwort BIGRES2 im Panel von RESRMS) und Phasenbeobachtungen (Kennwort BIGRES im Panel von RESRMS). Anschließend werden mit GPSEST die relevanten Parameter geschätzt und die Residuen gespeichert. Im

daraufliegenden Durchlauf von RESRMS werden Beobachtungen, deren Residuen die festgelegten Grenzen überschreiten, als Ausreißer detektiert und in einer separaten Datei zur späteren Weiterverarbeitung vermerkt. Um die Residuen der Code-Beobachtungen auf ein mit den Phasenresiduen vergleichbares Niveau zu bringen werden diese durch den Faktor 100 geteilt (Information aus Kontext-Hilfe der BS52). Dieser Faktor wird aus dem Eintrag WEIGHT FOR CODE OBSERVATIONS der Datei CONST. im GEN-Verzeichnis der BS52 abgeleitet, in der in der vom Autor genutzten Version der Software der Wert 1.D-4 (=0.0001) eingetragen ist. Falls RESMRS Ausreißer detektiert hat, werden diese im nun folgenden Durchlauf von SATMRK in der Datei der Beobachtungen gekennzeichnet und von der weiteren Verwendung ausgeschlossen. Anschließend beginnt der Schleifendurchlauf erneut. Falls im letzten Schleifendurchlauf weitere Ausreißer detektiert und durch SATMRK in den Beobachtungsdateien markiert wurden, erfolgt ein weiterer Durchlauf von GPSEST. Ansonsten werden mit ADDNEQ2 direkt die Ergebnisse in einer SINEX-Datei zusammengestellt. SINEX steht für Solution (Software/technique) INdependent EXchange Format und definiert ein standardisiertes Austauschformat, welches von Blewitt u. a. [1994] vorgeschlagen und anschließend von der SINEX-Arbeitsgruppe des IGS weiterentwickelt wurde. Seit Mitte 1995 werden die Wochenlösungen der IGS-Analysezentren in diesem Format zur Verfügung gestellt. Durch den modularen Aufbau von SINEX kann dieses Format nicht nur für GPS, sondern auch für andere Techniken genutzt werden. Durch die Zusammenarbeit von IGS, ILRS (International Laser Ranging Service, <http://ilrs.gsfc.nasa.gov>, Stand: 12.11.2014), IVS (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry, <http://ivscc.gsfc.nasa.gov>, Stand: 12.11.2014) und Verantwortlichen des ITRF (International Terrestrial Reference Frame, <http://itrf.ensg.ign.fr>, Stand: 12.11.2014) wurde die SINEX-Version 2.00 definiert, die den Ansprüchen aller Techniken gerecht wird. In der derzeit aktuellsten Version 2.02 wurden auch die Anforderungen für Galileo berücksichtigt. Details zur aktuellen und früheren SINEX-Versionen sind auf der Internetseite <http://www.iers.org/IERS/EN/Organization/AnalysisCoordinator/SinexFormat/sinex.html> (Stand: 12.11.2014) zusammengestellt.

In der iterativen Berechnung der geschätzten Parameter werden normierte Residuen gespeichert. Für die Erzeugung gestapelter Korrekturen werden jedoch Real-Residuen benötigt. Daher erfolgt ein erneuter GPSEST-Durchlauf, in dem das zuvor bereinigte Datenmaterial verwendet wird und die Real-Residuen ausgegeben werden. Standardmäßig werden die Residuen von der BS im Binärformat gespeichert, zur Weiterverarbeitung werden sie mit RESFMT ins ASCII-Format gewandelt. CRDMERGE kombiniert die für jede Station separat erstellte Koordinatendatei zu einer Epochendatei, welche die Koordinaten aller Stationen enthält. Ebenso fasst ADDNEQ2 die Ergebnisse der einzelnen Stationen zu einer Gesamtlösung zusammen und generiert hierbei Dateien der Normalgleichungsinformation und geschätzten Troposphärenparameter. In einem weiteren Durchlauf von ADDNEQ2 werden die Ergebnisse nochmals im SINEX-Format mit reduziertem Inhalt (keine Troposphärenparameter) zusammengestellt.

Generierung der Zusammenfassung, Umkopieren und Löschen von Dateien:

Im letzten Abschnitt der Prozessierung werden aus den Ausgabedateien der einzelnen Unterprogramme die gewünschten Informationen extrahiert und in einer Protokolldatei abgelegt. Des Weiteren werden die später benötigten Dateien (beispielsweise Dateien der Koordinaten und Residuen) in andere Verzeichnisse verschoben und alle nicht mehr benötigten Dateien in den Unterordnern des Kampagnenverzeichnisses gelöscht. Dadurch wird gewährleistet, dass für die Prozessierung des nächsten Zeitraumes lediglich die hierfür benötigten Daten zur Verfügung stehen. Ebenso wird, falls eine Datei mit Stacking-Information für den Auswertedurchlauf verwendet wurde, diese in diesem finalen Schritt wieder aus dem GEN-Verzeichnis gelöscht. Die Parametereinstellungen der einzelnen Prozessierungsschritte wurden unverändert aus der Beispiel-BPE übernommen. In Tab. A-2 sind wichtige Prozessierungsparameter der in dieser Arbeit eingesetzten BPE zusammengestellt.

Tab. A-2: Wichtige Prozessierungsparameter der PPP-Auswertung

Geodätisches Datum	IGb08
GPS-Beobachtungen	Undifferenzierte Phasenbeobachtungen (L_3) mit 30 s Auflösung
Gewichtungsmodell	$\cos^2(z)$
Minimale Elevation	3°
ERP/Satellitenuhren/Orbits	finale CODE-Produkte
A priori-Troposphärenmodell und Abbildungsfunktion	GMF (trocken, feucht, Böhm u. a. [2006a])
Zeitliche Auflösung ZLV	1 h
Gradientenmodell	CHENHER (Chen u. Herring [1997])
Zeitliche Auflösung horizontale Gradienten	24 h
Antennenmodell Satelliten	Absolute IGS-Werte (Rebischung u. a. [2012] und IGS-Mail Nr. 6355 ¹)
Antennenmodell Empfangsantennen	Individuelle Absolutkalibrierungen, sowie absolute IGS-Typmittelwerte (Rebischung u. a. [2012])

¹ Siehe <http://igsbc.jpl.nasa.gov/pipermail/igsmail/2011/006347.html>, Stand: 12.11.2014

Zum geodätischen Datum sind ergänzende Anmerkungen notwendig. Während bei einer differenziellen Auswertung die Lagerung des Netzes durch datumsgebende Stationen erfolgt, deren Koordinaten in einem bestimmten Referenzrahmen vorgegeben sind und bei der Auswertung weitgehend fixiert werden, definieren bei einer PPP-Auswertung die Orbits der Satelliten das Datum der Stationskoordinaten. Die in dieser Arbeit verwendeten präzisen Orbits des CODE liegen im IGb08 vor, welches eine leicht modifizierte Version des IGS08 darstellt. Das IGS08 umfasste die Stationen des globalen IGS-Netzes, die in der Berechnung des ITRF2008 verwendet wurden. Durch den Wegfall vieler Stationen des IGS08 durch Stilllegung oder das Auftreten von Diskontinuitäten sank die Anzahl der nutzbaren Stationen des grundlegenden IGS-Netzes auf ca. 50. Durch die Bestimmung neuer Koordinaten für mehr als 30 Stationen des IGS08 und Hinzunahme von drei neuen Stationen, welche sich in unmittelbarer Nähe stillgelegter Stationen befinden, konnte die Anzahl der Stationen des Kernnetzes wieder erhöht werden. Mit Beginn der GPS-Woche 1709 werden alle IGS-Produkte nur noch im IGb08 zur Verfügung gestellt, um die Stabilität des Referenzrahmens zu gewährleisten. Details hierzu sind in der IGS-Mail Nr. 6663 (<http://igsbc.jpl.nasa.gov/pipermail/igsmail/2012/007853.html>, Stand: 12.11.2014) aufgeführt.

Wie bereits in Kap. 2.4 erwähnt, müssen im Rahmen einer hochpräzisen GNSS-Auswertung auch die durch andere Planeten, die Sonne und den Mond verursachten gravitativen Effekte Berücksichtigung finden. Bei der Auswertung mit der BS52 wurden hierzu die frei verfügbaren Ephemeriden des Typs DE405 des JPL für verschiedene Planeten und den Mond eingeführt. Sie enthalten sowohl Nutationsterme als auch Taumelbewegungen (engl.: libration) und sind auf den internationalen zälestischen Referenzrahmen (engl.: International Celestial Reference Frame, ICRF) bezogen. Weiterführende Details hierzu sind unter http://ssd.jpl.nasa.gov/?planet_eph_export (Stand: 17.11.2014) aufgeführt.

B Anhang

B.1 GURN: GNSS Upper Rhine Graben Network

Tab. B-1: Stationsübersicht des GURN mit Betreiber, Zeitraum, für den Daten vorhanden sind (Angabe in DoY und Jahr), und Stationsposition in geographischen Koordinaten mit ellipsoidischer Höhe, Stichtag: 31.12.2013

Station	Standort	Betreiber	Daten vorhanden		Breite [°]	Länge [°]	ell. H. [m]
			seit	bis			
0384	Stuttgart	SAP ^{OS} [®] BW	001 2002		48.7795	9.1709	341
0386	Heilbronn	SAP ^{OS} [®] BW	001 2002		49.1385	9.2183	235
0387	Heidelberg	SAP ^{OS} [®] BW	001 2002		49.3889	8.6753	169
0388	Iffezheim	SAP ^{OS} [®] BW	121 2002		48.8301	8.1126	185
0389	Schwäbisch Hall	SAP ^{OS} [®] BW	001 2002		49.1064	9.7176	433
0390	Freiburg	SAP ^{OS} [®] BW	001 2002		47.9990	7.8444	364
0391	Geislingen	SAP ^{OS} [®] BW	001 2002		48.5857	9.8024	736
0392	Tauberbischofs- heim	SAP ^{OS} [®] BW	001 2002		49.6243	9.6708	247
0393	Offenburg	SAP ^{OS} [®] BW	001 2002	312 2010	48.4730	7.9510	233
0394	Tübingen	SAP ^{OS} [®] BW	001 2002	118 2006	48.5177	9.0559	386
0395	Ravensburg	SAP ^{OS} [®] BW	046 2002		47.7931	9.6242	504
0396	Biberach	SAP ^{OS} [®] BW	079 2002		48.1001	9.7932	599
0397	Sigmaringen	SAP ^{OS} [®] BW	071 2002		48.0836	9.2239	645
0398	Freudenstadt	SAP ^{OS} [®] BW	336 2002		48.4645	8.4158	784
0399	Villingen-Schwen- ningen	SAP ^{OS} [®] BW	335 2002	024 2008	48.0669	8.4648	793
0400	Tübingen2	SAP ^{OS} [®] BW	117 2006		48.5195	9.0784	382
0401	Freiburg2	SAP ^{OS} [®] BW	291 2006		48.0132	7.8340	320
0402	Villingen-Schwen- ningen2	SAP ^{OS} [®] BW	024 2008		48.0731	8.5276	791
0403	Karlsruhe	SAP ^{OS} [®] BW	307 2010		49.0049	8.3861	184
0404	Offenburg2	SAP ^{OS} [®] BW	313 2010		48.4762	7.9432	224
0405	Mannheim	SAP ^{OS} [®] RP	310 2013		49.5651	8.4250	141
0512	Koblenz	SAP ^{OS} [®] RP	001 2004		50.3583	7.5697	184
0513	Mayen	SAP ^{OS} [®] RP	001 2004		50.3293	7.2431	336
0514	Simmern	SAP ^{OS} [®] RP	001 2004		49.9845	7.5250	419
0515	Wissen	SAP ^{OS} [®] RP	001 2004		50.7809	7.7426	220
0516	Alzey	SAP ^{OS} [®] RP	001 2004	186 2005	50.4317	7.8305	342
0517	Montabaur	SAP ^{OS} [®] RP	001 2004	117 2005	49.7432	8.1091	253
0518	Bingen	SAP ^{OS} [®] RP	001 2004	065 2011	49.9682	7.8769	263
0519	Daun	SAP ^{OS} [®] RP	001 2004		50.1999	6.8212	511
0520	Ludwigshafen	SAP ^{OS} [®] RP	001 2004	337 2013	49.4687	8.4506	158
0521	Landau	SAP ^{OS} [®] RP	001 2004		49.1998	8.1094	208

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tab. B-1 – Fortsetzung

Station	Standort	Betreiber	Daten vorhanden		Breite [°]	Länge [°]	ell. H. [m]		
			seit	bis					
0522	Pirmasens	SAP ^{OS} ®RP	001	2004	49.2021	7.6025	448		
0523	Kaiserslautern	SAP ^{OS} ®RP	001	2004	49.4441	7.7740	307		
0524	Trier	SAP ^{OS} ®RP	001	2004	49.7569	6.6474	205		
0525	Bernkastel	SAP ^{OS} ®RP	001	2004	49.9161	7.0665	184		
0526	Prüm	SAP ^{OS} ®RP	001	2004	50.2101	6.4275	498		
0527	Birkenfeld	SAP ^{OS} ®RP	001	2004	49.6475	7.1658	442		
0528	Meisenheim	SAP ^{OS} ®RP	001	2004	49.7049	7.6653	231		
0529	Alzey2	SAP ^{OS} ®RP	124	2005	49.7474	8.1187	234		
0530	Montabaur2	SAP ^{OS} ®RP	186	2005	50.4316	7.8306	329		
0531	Rodershausen	SAP ^{OS} ®RP	106	2006	49.9921	6.1949	559		
0532	Bingen2	SAP ^{OS} ®RP	285	2010	49.9516	7.9252	154		
AUB2	Aubure		031	2009	48.1975	7.2213	861		
AUBU	Aubure	EOST	186	2008	48.2168	7.1966	1153		
BALG	Balgau	SAT-INFO	104	2009	192	2012	47.9306	7.5407	264
BFO1	Black-Forest- Observatory	GIK	314	2006	48.3305	8.3250	695		
BIWI	Biwisheim		193	2007	48.7088	7.6582	238		
BLFT	Belfort- Danjoutin	EXAGONE	134	2007	47.6259	6.8585	416		
BOU2	Bourrignon2	swisstopo	196	2009	47.3941	7.2304	942		
BOUR	Bourrignon	swisstopo	196	2009	47.3941	7.2306	940		
BREI	Breitenberg	DGFI	280	2005	355	2013	48.1409	11.5779	576
BSCN	Besançon	IGN	002	2002	47.2469	5.9894	359		
BUAN	Bure-Andra	EOST	317	2007	340	2013	48.4862	5.3536	417
CHRM	Charmes	EXAGONE	304	2007	48.3718	6.2812	339		
DILL	Dillingen	BKG	341	2004	49.3716	6.6997	228		
DOCO	Doncourt les Con- flans	EXAGONE	234	2007	49.1402	5.9345	296		
DRUS	Drusenheim	EXAGONE	133	2007	48.7674	7.9507	185		
ENTZ	Entzheim	IGN	337	2004	48.5494	7.6399	203		
EOST	EOST	EOST	102	2007	48.5798	7.7625	213		
ERCK	Erckartswiller	EOST	077	2009	48.8730	7.3642	291		
ETH2	ETH Zürich2	swisstopo	196	2009	47.4072	8.5106	595		
ETHZ	ETH Zürich	swisstopo	196	2009	47.4071	8.5105	594		
FAHR	Fahrenberg	DGFI	280	2005	47.6068	11.3150	1675		
FHBB	FHNW MuttENZ	swisstopo	196	2009	47.5339	7.6386	378		
FRAC	Frahier-et- Chatebier		193	2007	47.6597	6.7456	425		
FRIC	Frick	swisstopo	196	2009	47.5274	8.1119	726		

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tab. B-1 – Fortsetzung

Station	Standort	Betreiber	Daten vorhanden		Breite [°]	Länge [°]	ell. H. [m]
			seit	bis			
FRI2	Frick2	swisstopo	196 2009	299 2011	47.5274	8.1116	724
FRI3	Frick3	swisstopo			47.5274	8.1116	727
FRTT	Frette	EXAGONE	226 2008		47.6803	5.5663	373
HGRA	Hochgrat	DGFI	280 2005		47.4926	10.0726	1764
HRIE	Hochries	DGFI	280 2005		47.7475	12.2493	1615
HUEG	Hügelheim	BKG	001 2002		47.8339	7.5962	278
HUTT	Huttwil	swisstopo	196 2009		47.1411	7.8349	779
KARL	Karlsruhe	BKG	001 2002	234 2012	49.0112	8.4113	183
KREU	Kreuzlingen	swisstopo	329 2011		47.6413	9.1600	530
LRTZ	Nancy	LHL	309 2007		48.6905	6.1915	262
LUCE	Lucelle	EOST	304 2007		47.4383	7.2682	742
MAKS	Markstein	EOST	129 2007		47.9230	7.0315	1237
METZ	Metz	Stadt Metz	044 2004	222 2011	49.1036	6.1979	316
MIRE	Mirecourt	SAT-INFO	104 2009		48.2949	6.1213	351
MNBL	Montbéliard	SAT-INFO	105 2009		47.4958	6.8061	413
MOUS	Moussey		193 2007		48.6752	6.7838	298
PRNY	Pontarlier	EXAGONE	304 2007		46.9049	6.3383	883
RIXH	Rixheim	EOST	052 2012		47.7333	7.3780	376
SARL	Sarralbe	EXAGONE	234 2007		49.0025	7.0313	275
SCHA	Schaffhausen	swisstopo	196 2009		47.7376	8.6558	638
SEUR	Seurre	EXAGONE	260 2006		46.9943	5.1515	245
STGA	St. Gallen	swisstopo	196 2009		47.4418	9.3459	754
STJ9	Strasbourg	EOST	001 2002		48.6217	7.6838	237
TANZ	Selestat	EXAGONE	081 2007		48.2549	7.4626	233
VAUD	Vaudrey	SAT-INFO	051 2008		46.9812	5.6269	272
VSOL	Vesoul	SAT-INFO	105 2009		47.6894	6.0666	322
WART	Wartsteinkopf	DGFI	280 2005		47.6512	12.8075	1747
WLBH	Welschbruch	EOST	001 2002		48.4152	7.3513	819
ZIM2	Zimmerwald2	swisstopo	326 2007		46.8771	7.4650	956
ZIMM	Zimmerwald	swisstopo	001 2002		46.8771	7.4653	956

Tab. B-2: Übersicht der Stationsbetreiber, die Daten für GURN bereitstellen, Stand www-Links: 05.11.2014

Betreiber		Homepage
SAPoS®BW	SAPoS®Baden-Württemberg	http://www.sapos-bw.de
SAPoS®RP	SAPoS®Rheinland-Pfalz	http://www.lvermgeo.rlp.de/index.php?id=sapos
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie	http://www.bkg.bund.de
DGFI	Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut	http://www.dgfi.badw.de
EOST	Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre	http://www.eost.unistra.fr
EXAGONE		http://www.reseau-teria.com
GIK	Geodätisches Institut Karlsruhe, KIT	http://www.gik.kit.edu
IGN	Institut Nationale de l'Information Géographique et Forestière	http://www.ign.fr
LHL	Lycée Henri Loritz	http://www.loritz.fr
SAT-INFO		http://www.sat-info.fr
swisstopo	Bundesamt für Landestopografie swisstopo	http://www.swisstopo.ch

B.2 Einfaches Stacking über einen längeren Zeitraum

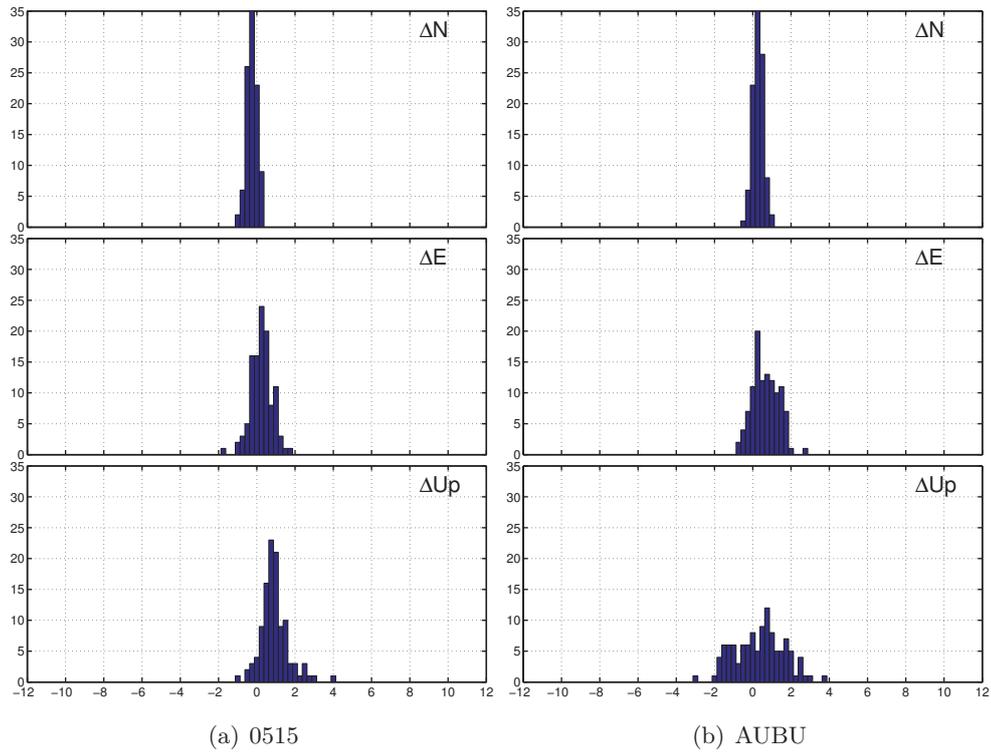


Abb. B-1: Histogramme der Differenz der Koordinatenzeitreihen ohne minus mit Einführung gestackter Information im Zeitraum DoY 131-240 2013 in topozentrischem Koordinatensystem; Rechtsachse: Differenz [mm], Hochachse [Anzahl], Balkenbreite 0.25 mm

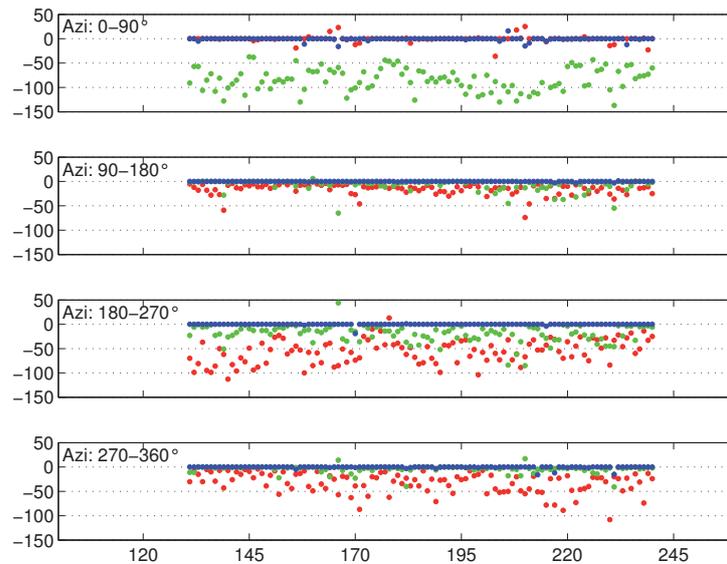


Abb. B-2: Station 0515: Differenz der Residuenanzahl ohne minus mit Einführung gestackter Information im Zeitraum DoY 131-240 2013; Unterteilung in Azimutbereiche (Zeilen der Grafik) und Elevationsbereiche (farbliche Codierung) mit 0°-30° (rot), 30°-60° (grün), 60°-90° (blau)

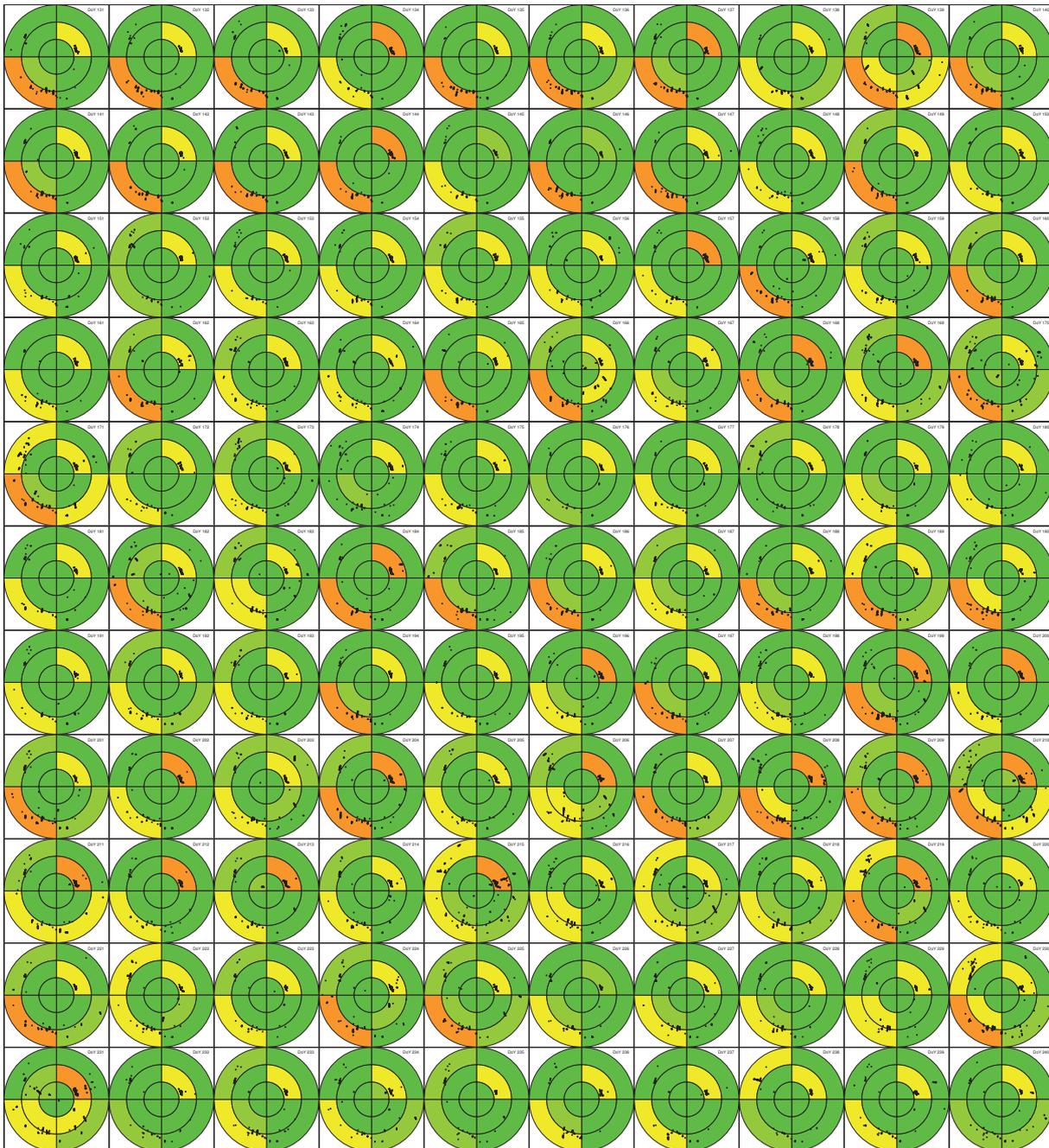


Abb. B-3: Station 0515: nach Sektoren unterteilte Zunahme der Residuenanzahl nach Einführung gestackter Information gegenüber roher Prozessierung im Zeitraum DoY 131 bis 240 2013; grün/hellgrün/gelb/orange/rot: Zunahme um 0–1%/1–2%/2–5%/5–10%/>10%; azimuthale Aufteilung: 0°–90°, 90°–180°, 180°–270° und 270°–360°; Elevationsstufen: 0°–30°, 30°–60° und 60°–90°; schwarze Punkte: durch Stacking in die Auswertung hinzugekommene Residuen

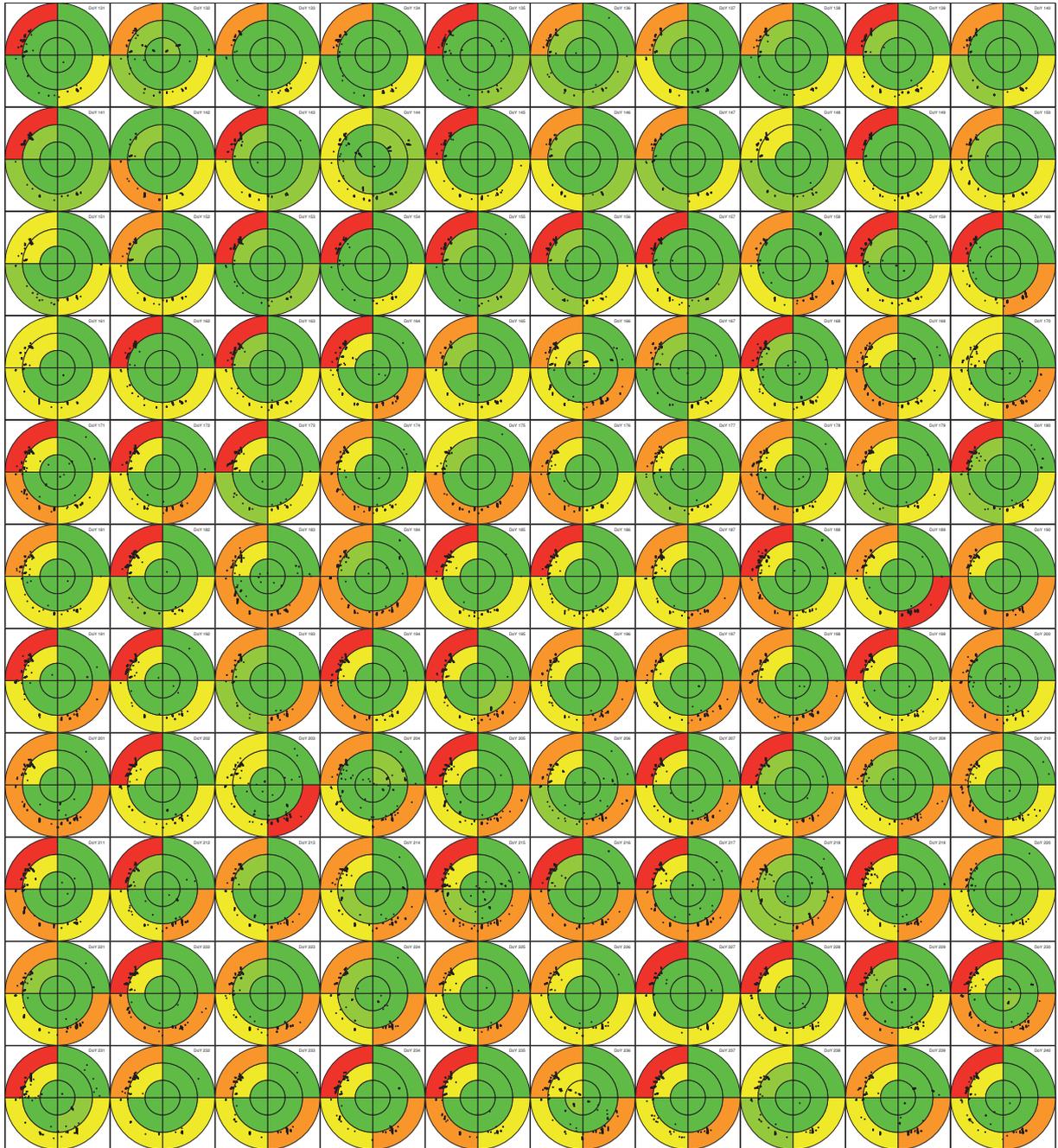


Abb. B-4: Station AUBU: nach Sektoren unterteilte Zunahme der Residuenanzahl nach Einführung gestackter Information gegenüber roher Prozessierung im Zeitraum DoY 131 bis 240 2013; grün/hellgrün/gelb/orange/rot: Zunahme um 0–1 %/1–2 %/2–5 %/5–10 %/>10 %; azimuthale Aufteilung: 0°–90°, 90°–180°, 180°–270° und 270°–360°; Elevationsstufen: 0°–30°, 30°–60° und 60°–90°; schwarze Punkte: durch Stacking in die Auswertung hinzugekommene Residuen

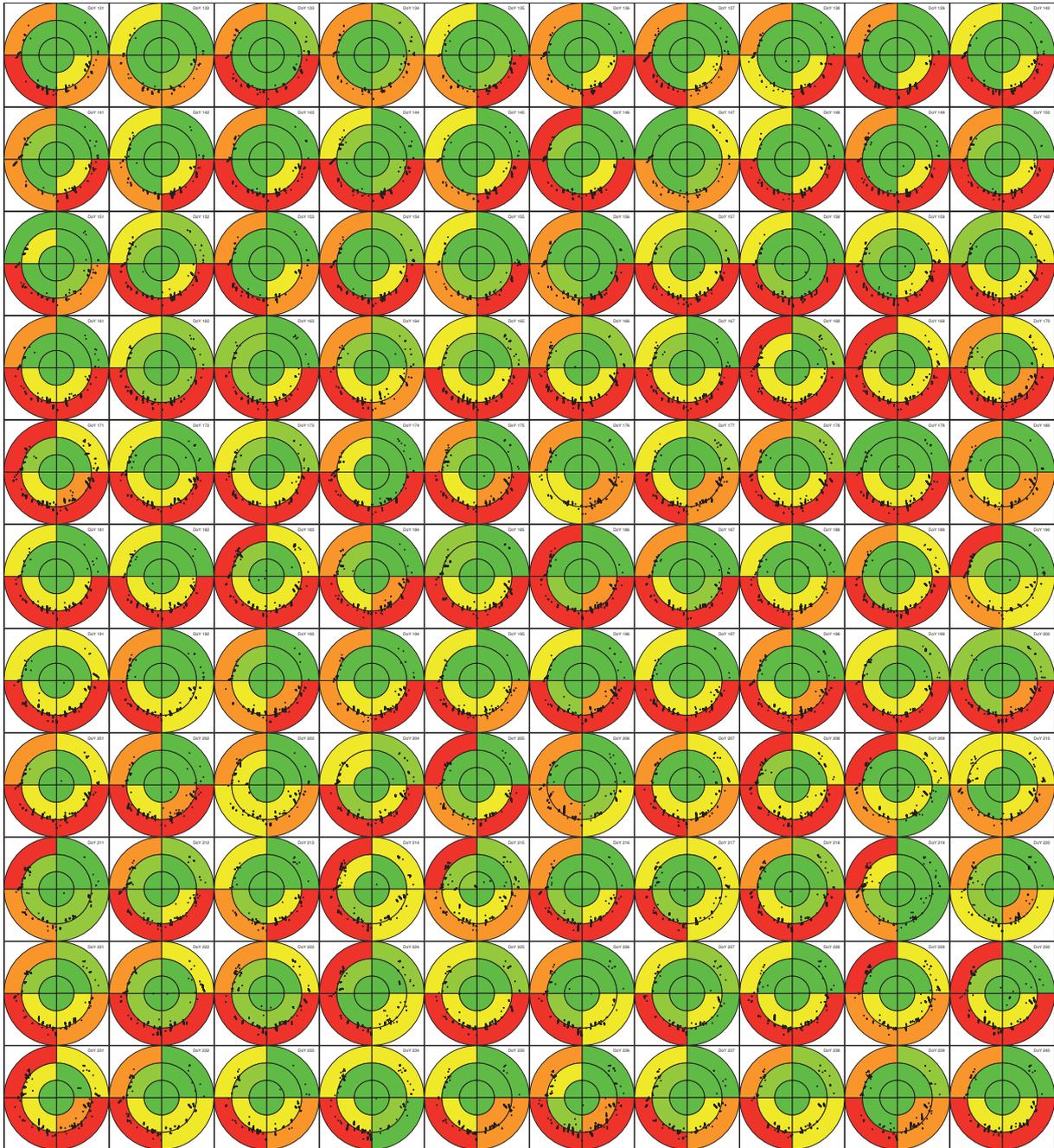


Abb. B-5: Station WLBH: nach Sektoren unterteilte Zunahme der Residuenanzahl nach Einführung gestackter Information gegenüber roher Prozessierung im Zeitraum DoY 131 bis 240 2013; grün/hellgrün/gelb/orange/rot: Zunahme um 0–1%/1–2%/2–5%/5–10%/>10%; azimuthale Aufteilung: 0°–90°, 90°–180°, 180°–270° und 270°–360°; Elevationsstufen: 0°–30°, 30°–60° und 60°–90°; schwarze Punkte: durch Stacking in die Auswertung hinzugekommene Residuen

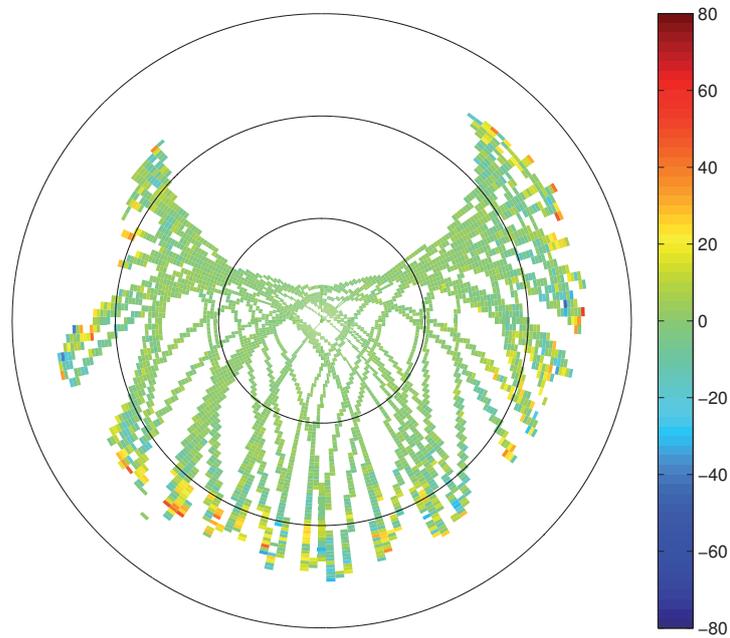


Abb. B-6: Stackingmap der Station WLBH für Zeitraum DoY 121 bis 130 2013; farbliche Skalierung: Wert des gestackten L_3 -Residuums in [mm]; konzentrische Kreise (von aussen nach innen): Elevationen 0° , 30° , 60°

B.3 Erweiterungen

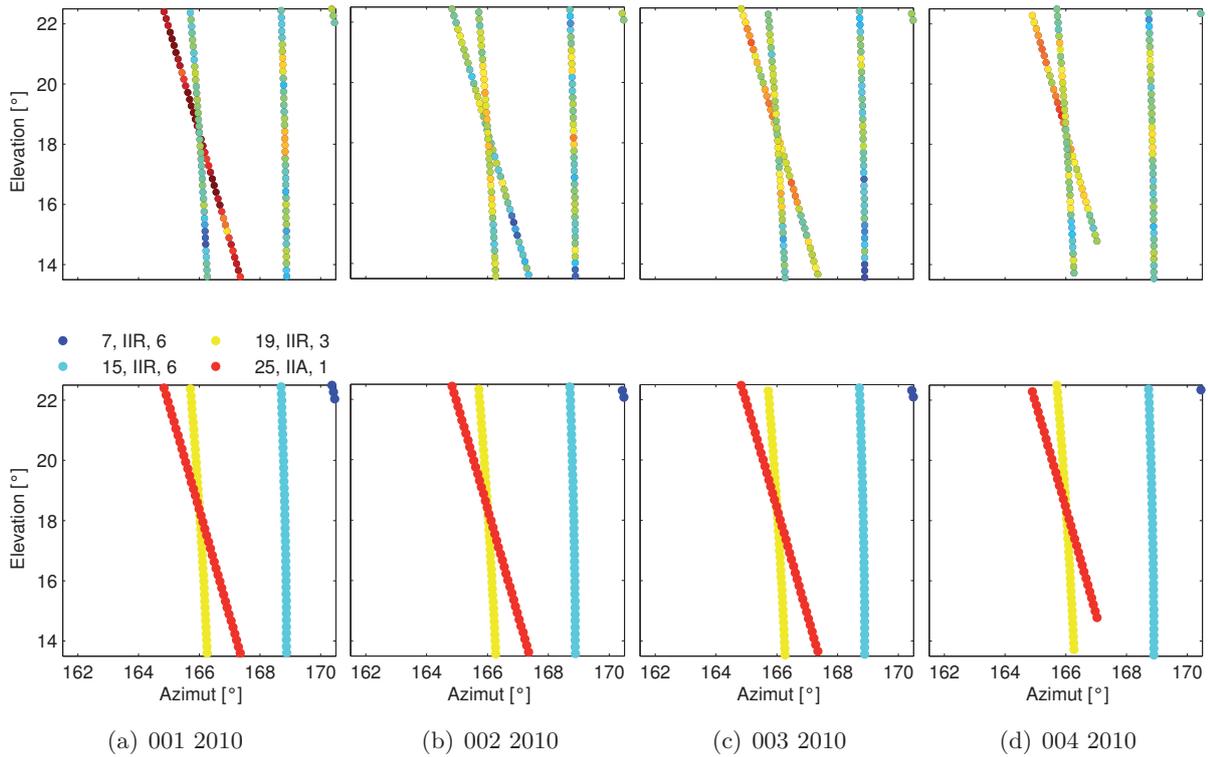


Abb. B-7: Plots der Rohresiduen der Station DILL für einen Ausschnitt der Antennenhemisphäre im Zeitraum DoY 001 bis 010 2010; oben: Residuenwert farblich codiert, unten: einzelne Satelliten mit PRN, Baureihe (Block) und Bahnenebene

Literatur

- [Al-Haifi 1996] AL-HAIFI, Y. M. H.: *Short range GPS single epoch ambiguity resolution.*, University of Newcastle upon Tyne, Diss., 1996
- [Alber u. a. 2000] ALBER, C. ; WARE, R. ; ROCKEN, C. ; BRAUN, J.: Obtaining single path phase delays from GPS double differences. In: *Geophysical Research Letters* 27 (2000), Nr. 17, S. 2661–2664. <http://dx.doi.org/10.1029/2000GL011525>. – DOI 10.1029/2000GL011525. – ISSN 1944–8007
- [Alshawaf 2013] ALSHAWAF, F.: *Constructing water vapor maps by fusing InSAR, GNSS and WRF data*, Diss., 2013. <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000038846>. – Karlsruhe, KIT, Diss., 2013
- [Alshawaf u. a. 2013] ALSHAWAF, F. ; FUHRMANN, T. ; HECK, B. ; HINZ, S. ; KNÖPFLER, A. ; LUO, X. ; MAYER, M. ; SCHENK, A. ; THIELE, A. ; WESTERHAUS, M.: Integration of InSAR and GNSS Observations for the Determination of Atmospheric Water Vapour. Version: 2013. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-32714-8_10. In: KRISP, J. M. (Hrsg.) ; MENG, L. (Hrsg.) ; PAIL, R. (Hrsg.) ; STILLA, U. (Hrsg.): *Earth Observation of Global Changes (EOGC)*. Springer Berlin Heidelberg, 2013 (Lecture Notes in Geoinformation and Cartography). – DOI 10.1007/978-3-642-32714-8_10. – ISBN 978-3-642-32713-1, 147–162
- [Altamimi u. a. 2012] ALTAMIMI, Z. ; MÉTIVIER, L. ; COLLILIEUX, X.: ITRF2008 plate motion model. In: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 117 (2012), Nr. B7. <http://dx.doi.org/10.1029/2011JB008930>. – DOI 10.1029/2011JB008930. – ISSN 2156–2202
- [Axelrad u. a. 1996] AXELRAD, P. ; COMP, C. J. ; MACDORAN, P. F.: SNR-Based Multipath Error Correction for GPS Differential Phase. In: *IEEE Transactions on Aerospace and electronic Systems* 32 (1996), Nr. 2, S. 650–660
- [Bar-Sever 1996] BAR-SEVER, Y. E.: A new model for GPS yaw attitude. In: *Journal of Geodesy* 70 (1996), Nr. 11, S. 714–723. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00867149>. – DOI 10.1007/BF00867149. – ISSN 0949–7714
- [Bauer 1997] BAUER, M.: *Vermessung und Ortung mit Satelliten : NAVSTAR-GPS und andere satellitengestützte Navigationssysteme; eine Einführung für die Praxis*. 4. völlig überarbeitete und erweiterte Auflage. Heidelberg : Wichmann, 1997 <http://media.obvsg.at/AC01963981-1001>. – ISBN 3–87907–309–0
- [Behrmann u. a. 2003] BEHRMANN, J. H. ; HERMANN, O. ; HORSTMANN, M. ; TANNER, D. C. ; BERTRAND, G.: Anatomy and kinematics of oblique continental rifting revealed: A three-dimensional case study of the southeast Upper Rhine graben (Germany). In: *AAPG Bulletin* 87 (2003), Nr. 7, 1105–1121. <http://dx.doi.org/10.1306/02180300153>. – DOI 10.1306/02180300153
- [Beutler u. a. 2000] BEUTLER, G. ; BROCKMANN, E. ; DACH, R. ; FRIDEZ, P. ; GURTNER, W. ; HUGENTOBLE, U. ; JOHNSON, J. ; MERVART, L. ; ROTHACHER, M. ; SCHAER, S. ; SPRINGER, T. ; WEBER, R.: *Bernese GPS Software Version 4.2*. Sidlerstrasse 5, CH-3012 Bern: Astronomical Institute, University of Berne, 2000
- [Bevis u. a. 1992] BEVIS, M. ; BUSINGER, S. ; HERRING, T. A. ; ROCKEN, C. ; ANTHES, R. A. ; WARE, R. H.: GPS meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 97 (1992), Nr. D14, 15787–15801. <http://dx.doi.org/10.1029/92JD01517>. – DOI 10.1029/92JD01517. – ISSN 2156–2202

- [Beyerle u. Hocke 2001] BEYERLE, G. ; HOCKE, K.: Observation and simulation of direct and reflected GPS signals in Radio Occultation Experiments. In: *Geophysical Research Letters* 28 (2001), Nr. 9, 1895–1898. <http://dx.doi.org/10.1029/2000GL012530>. – DOI 10.1029/2000GL012530. – ISSN 1944–8007
- [Bilich u. Larson 2007] BILICH, A. ; LARSON, K. M.: Mapping the GPS multipath environment using the signal-to-noise ratio (SNR). In: *Radio Science* 42 (2007), Nr. 6. <http://dx.doi.org/10.1029/2007RS003652>. – DOI 10.1029/2007RS003652. – ISSN 1944–799X
- [Bilich u. Mader 2010] BILICH, A. ; MADER, G. L.: GNSS Absolute Antenna Calibration at the National Geodetic Survey. In: *Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2010)*, 2010, S. 1369–1377
- [Blewitt u. a. 1994] BLEWITT, G. ; BOCK, Y. ; KOUBA, J.: Constraining the IGS Polyhedron by Distributed Processing. In: *Workshop proceedings: Densification of ITRF through Regional GPS Networks*. held at JPL, 30.11.–02.12. 1994, S. 21–37
- [Bock 1991] BOCK, Y.: Continuous monitoring of crustal deformation. In: *GPS World* 2 (1991), Nr. 6, S. 40–47
- [Böhm u. a. 2006a] BÖHM, J. ; NIELL, A. ; TREGONING, P. ; SCHUH, H.: Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data. In: *Geophysical Research Letters* 33 (2006), Nr. 7. <http://dx.doi.org/10.1029/2005GL025546>. – DOI 10.1029/2005GL025546. – ISSN 1944–8007
- [Böhm u. Schuh 2003] BÖHM, J. ; SCHUH, H.: Vienna Mapping Functions. In: *Proceedings of the 16th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry*, 2003, 131–143
- [Böhm u. a. 2006b] BÖHM, J. ; WERL, B. ; SCHUH, H.: Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range weather Forecasts operational analysis data. In: *Journal of Geophysical Research* 111 (2006)
- [Braasch 1996] BRAASCH, M. S.: Multipath Effects. Version: 1996. <http://dx.doi.org/10.2514/5.9781600866388.0547.0568>. In: SPILKER, J. J. (Hrsg.) ; AXELRAD, P. (Hrsg.) ; PARKINSON, B. W. (Hrsg.) ; ENGE, P. (Hrsg.): *Global Positioning System: Theory and Applications, Volume I*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996. – DOI 10.2514/5.9781600866388.0547.0568, Kapitel 14, S. 547–568
- [Braun u. a. 2003] BRAUN, J. ; ROCKEN, C. ; LILJEGREN, J.: Comparisons of Line-of-Sight Water Vapor Observations Using the Global Positioning System and a Pointing Microwave Radiometer. In: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 20 (2003), Mai, Nr. 5, 606–612. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0426\(2003\)20<606:COLOSW>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0426(2003)20<606:COLOSW>2.0.CO;2). – DOI 10.1175/1520-0426(2003)20<606:COLOSW>2.0.CO;2. – ISSN 0739–0572
- [Chao u. Schmitt 1991] CHAO, C. C. ; SCHMITT, D. L.: Eliminating GPS stationkeeping maneuvers by changing the orbit altitude. In: *Journal of the Astronautical Sciences* 39 (1991), Nr. 2, S. 141–153
- [Chen u. Herring 1997] CHEN, G. ; HERRING, T. A.: Effects of atmospheric azimuthal asymmetry on the analysis of space geodetic data. In: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 102 (1997), Nr. B9, 20489–20502. <http://dx.doi.org/10.1029/97JB01739>. – DOI 10.1029/97JB01739. – ISSN 2156–2202
- [Choi u. a. 2004] CHOI, K. ; BILICH, A. ; LARSON, K. M. ; AXELRAD, P.: Modified sidereal filtering: Implications for high-rate GPS positioning. In: *Geophysical Research Letters* 31 (2004), Nr. 22. <http://dx.doi.org/10.1029/2004GL021621>. – DOI 10.1029/2004GL021621. – ISSN 1944–8007

- [Cloetingh u. a. 2007] CLOETINGH, S. A. P. L. ; ZIEGLER, P. A. ; BOGAARD, P. J. F. ; ANDRIESEN, P. A. M. ; ARTEMIEVA, I. M. ; BADA, G. ; VAN BALEN, R. T. ; BEEKMAN, F. ; BEN-AVRAHAM, Z. ; BRUN, J.-P. ; BUNGE, H. P. ; BUROV, E.B. ; CARBONELL, R. ; FACENNA, C. ; FRIEDRICH, A. ; GALLART, J. ; GREEN, A. G. ; HEIDBACH, O. ; JONES, A. G. ; MATENCO, L. ; MOSAR, J. ; ONCKEN, O. ; PASCAL, C. ; PETERS, G. ; SLIAUPA, S. ; SOESOO, A. ; SPAKMAN, W. ; STEPHENSON, R. A. ; THYBO, H. ; TORSVIK, T. ; DE VICENTE, G. ; WENZEL, F. ; WORTEL, M. J. R.: TOPO-EUROPE: The geoscience of coupled deep Earth-surface processes. In: *Global and Planetary Change* 58 (2007), 1–118. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.02.008>. – DOI 10.1016/j.gloplacha.2007.02.008. – ISSN 0921–8181
- [Comp u. Axelrad 1998] COMP, C. J. ; AXELRAD, P.: Adaptive SNR-based carrier phase multipath mitigation technique. In: *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on* 34 (1998), Januar, Nr. 1, S. 264–276. <http://dx.doi.org/10.1109/7.640284>. – DOI 10.1109/7.640284. – ISSN 0018–9251
- [Corbett 1994] CORBETT, S. J.: *GPS single epoch ambiguity resolution for airborne positioning and orientation.*, University of Newcastle upon Tyne, Diss., 1994
- [Dach u. a. 2007] DACH, R. ; HUGENTOBLER, U. ; FRIDEZ, P. ; MEINDL, M.: *Bernese GPS Software Version 5.0*. Sidlerstrasse 5, CH-3012 Berne: Astronomical Institute, University of Berne, January 2007
- [Dach u. a. 2013] DACH, R. ; SCHAER, S. ; LUTZ, S. ; BAUMANN, C. ; BOCK, H. ; ORLIAC, E. ; PRANGE, L. ; THALLER, D. ; MERVART, L. ; JÄGGI, A. ; BEUTLER, G. ; BROCKMANN, E. ; INEICHEN, D. ; WIGET, A. ; WEBER, G. ; HABRICH, H. ; SÖHNE, W. ; IHDE, J. ; STEIGENBERGER, P. ; HUGENTOBLER, U.: Center for Orbit Determination in Europe (CODE) / Jet Propulsion Laboratory. 2013. – IGS Technical Report 2013
- [Demoulin u. a. 1998] DEMOULIN, A. ; LAUNOY, T. ; ZIPPELT, K.: Recent crustal movements in the southern Black Forest (western Germany). In: *Geologische Rundschau* 87 (1998), Nr. 1, 43–52. <http://dx.doi.org/10.1007/s005310050188>. – DOI 10.1007/s005310050188. – ISSN 0016–7835
- [Dieminger 1968] DIEMINGER, W.: Hohe Atmosphäre der Erde. In: MURAWSKI, H. (Hrsg.): *Vom Erdkern bis zur Magnetosphäre*. Frankfurt a. M. : Umschau Verlag, 1968 (Umschau in Wissenschaft und Technik), S. 289–306
- [Dilßner u. a. 2005] DILSSNER, F. ; SEEBER, G. ; SCHMITZ, M. ; WÜBBENA, G. ; TOSO, G. ; MAEUSLI, D.: *Characterization of GOCE GPS Antennas*. Präsentation auf Geodätischer Woche 2005 in Düsseldorf. http://www.geopp.com/pdf/gw2005_p.pdf. Version: Oktober 2005
- [Dragert u. a. 2000] DRAGERT, H. ; JAMES, T. S. ; LAMBERT, A.: Ocean loading corrections for continuous GPS: A case study at the Canadian coastal site Holberg. In: *Geophysical Research Letters* 27 (2000), Nr. 14, 2045–2048. <http://dx.doi.org/10.1029/2000GL011536>. – DOI 10.1029/2000GL011536. – ISSN 1944–8007
- [Elgered u. a. 1991] ELGERED, G. ; DAVIS, J. L. ; HERRING, T. A. ; SHAPIRO, I. I.: Geodesy by Radio Interferometry: Water Vapor Radiometry for Estimation of the Wet Delay. In: *Journal of Geophysical Research - Solid Earth* 96 (1991), S. 6541–6555. – ISSN 0148–0227
- [Estey u. Meertens 1999] ESTEY, L. H. ; MEERTENS, C. M.: TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLONASS Data. In: *GPS Solutions* 3 (1999), Nr. 1, 42–49. <http://dx.doi.org/10.1007/PL00012778>. – DOI 10.1007/PL00012778. – ISSN 1080–5370
- [Faulhaber 2007] FAULHABER, U.: Geodätischer Raumbezug und Festpunktfeld in Baden-Württemberg. In: *DVV Baden-Württemberg Mitteilungen* 2 (2007), Oktober, S. 63–103

- [Fuhrmann u. a. 2010] FUHRMANN, T. ; KNÖPFLER, A. ; LUO, X. ; MAYER, M. ; HECK, B.: Zur GNSS-basierten Bestimmung des atmosphärischen Wasserdampfgehalts mittels Precise Point Positioning. Version: 2010. <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000019249>. Karlsruhe : KIT Scientific Publishing, 2010. (KIT scientific reports ; Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik ; 2010,2). – Forschungsbericht. – ISBN 978-3-86644-539-0
- [Fuhrmann u. a. 2014a] FUHRMANN, T. ; LUO, X. ; KNÖPFLER, A. ; MAYER, M.: Generating statistically robust multipath stacking maps using congruent cells. In: *GPS Solutions* (2014), 1–10. <http://dx.doi.org/10.1007/s10291-014-0367-7>. – DOI 10.1007/s10291-014-0367-7. – ISSN 1080-5370
- [Fuhrmann u. a. 2014b] FUHRMANN, T. ; WESTERHAUS, M. ; ZIPPELT, K. ; HECK, B.: Vertical displacement rates in the Upper Rhine Graben area derived from precise leveling. In: *Journal of Geodesy* 88 (2014), Nr. 8, 773–787. <http://dx.doi.org/10.1007/s00190-014-0721-0>. – DOI 10.1007/s00190-014-0721-0. – ISSN 0949-7714
- [Ge u. a. 2008] GE, M. ; GENDT, G. ; ROTHACHER, M. ; SHI, C. ; LIU, J.: Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations. In: *Journal of Geodesy* 82 (2008), Nr. 7, 401–401. <http://dx.doi.org/10.1007/s00190-007-0208-3>. – DOI 10.1007/s00190-007-0208-3. – ISSN 0949-7714
- [Georgiadou u. Kleusberg 1988] GEORGIADOU, Y. ; KLEUSBERG, A.: On carrier signal multipath effects in relative GPS positioning. In: *Manuscripta geodaetica* 13 (1988), Nr. 3, S. 172–179
- [GPS World 2010] GPS WORLD: New Math for GPS: the Geometry of 27. In: *GPS World* 21 (2010), Februar, Nr. 2. <http://editiondigital.net/publication/?i=124370>
- [Hatanaka 2008] HATANAKA, Y.: A Compression Format and Tools for GNSS Observation Data. In: *Bulletin of the Geographical Survey Institute* 55 (2008), 21–30. <http://www.gsi.go.jp/ENGLISH/Bulletin55.html>
- [Hatanaka u. a. 2001a] HATANAKA, Y. ; SAWADA, M. ; HORITA, A. ; KUSAKA, M.: Calibration of antenna-radome and monument-multipath effect of GEONET - Part 1: Measurement of phase characteristics. In: *Earth Planets Space* 53 (2001), 13–21. <http://www.terrapub.co.jp/journals/EPS/abstract/5301/53010013.html>
- [Hatanaka u. a. 2001b] HATANAKA, Y. ; SAWADA, M. ; HORITA, A. ; KUSAKA, M. ; JOHNSON, J. M. ; ROCKEN, C.: Calibration of antenna-radome and monument-multipath effect of GEONET - Part 2: Evaluation of the phase map by GEONET data. In: *Earth Planets Space* 53 (2001), 23–30. <http://www.terrapub.co.jp/journals/EPS/abstract/5301/53010023.html>
- [Heck 2003] HECK, B.: *Rechenverfahren und Auswertemodelle der Landesvermessung : klassische und moderne Methoden*. 3., neu bearb. und erw. Aufl. Heidelberg : Wichmann, 2003. – ISBN 3-87907-347-3
- [Herring u. a. 2010] HERRING, T. A. ; KING, R. W. ; MCCLUSKY, S. C.: *Documentation for the GAMIT GPS analysis software*, 2010
- [Heßelbarth 2009] HESSELBARTH, A.: GNSS-Auswertung mittels Precise Point Positioning (PPP). In: *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV)* 5 (2009), 278–286. http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_forst_geo_und_hydrowissenschaften/fachrichtung_geowissenschaften/gi/gg/veroeffentlichungen/hesselbarth_zfv_5-2009.pdf
- [Heßelbarth u. Wanninger 2013] HESSELBARTH, A. ; WANNINGER, L.: GNSS-Berechnungsdienste. In: *GNSS 2013 – Schneller. Genauer. Effizienter, Beiträge zum 124. DVW-Seminar am 14. und 15. März*

- 2013 in Karlsruhe. DVW e.V. – Gesellschaft für Geodäsie Geoinformation und Landmanagement, 2013, S. 93–112
- [Hofmann-Wellenhof u. a. 2008] HOFMANN-WELLENHOF, B. ; LICHTENEGGER, H. ; WASLE, E.: *GNSS - Global Navigation Satellite Systems : GPS, GLONASS, Galileo and more*. Wien [u.a.] : Springer, 2008. – ISBN 978-3-211-73012-6
- [Hopfield 1969] HOPFIELD, H. S.: Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. In: *Journal of Geophysical Research* 74 (1969), Nr. 18, 4487–4499. <http://dx.doi.org/10.1029/JC074i018p04487>. – DOI 10.1029/JC074i018p04487. – ISSN 2156-2202
- [Hopfield 1971] HOPFIELD, H. S.: Tropospheric Effect on Electromagnetically Measured Range: Prediction from Surface Weather Data. In: *Radio Science* 6 (1971), Nr. 3, 357–367. <http://dx.doi.org/10.1029/RS006i003p00357>. – DOI 10.1029/RS006i003p00357. – ISSN 1944-799X
- [Huisman u. a. 2009] HUISMAN, L. ; VAN DER MAREL, H. ; TEUNISSEN, P. J. G.: CORS local-site finger-printing using undifferenced least squares GNSS phase residual. In: HENSHAW, K. (Hrsg.) ; International Global Navigation Satellite Systems Society, IGSS Symposium (Veranst.): *IGSS Society 2009 Symposium Proceedings* International Global Navigation Satellite Systems Society, IGSS Symposium, Coordinates, 01.–12. Dezember 2009, 1–12
- [Hurst u. Bar-Sever 1998] HURST, K. J. ; BAR-SEVER, Y.: In-situ GPS antenna phase center calibration. In: *Proceedings of the Workshop "GPS/MET Japan has come!", 1998*, 55–63
- [Illies u. Greiner 1978] ILLIES, J. H. ; GREINER, G.: Rhinegraben and the Alpine system. In: *Geological Society of America Bulletin* 89 (1978), Nr. 5, 770–782. [http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606\(1978\)89<770:RATAS>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606(1978)89<770:RATAS>2.0.CO;2). – DOI 10.1130/0016-7606(1978)89<770:RATAS>2.0.CO;2
- [IS-GPS-200 2014] IS-GPS-200: *Interface Specification IS-GPS-200, Revision H*. <http://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200H.pdf>. Version: 2014
- [Iwabuchi u. a. 2011] IWABUCHI, T. ; ROCKEN, C. ; WADA, A. ; KANZAK, M.: True Real-Time Slant Tropospheric Delay Monitoring System with Site Dependent Multipath Filtering. In: *Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2011)*, 2011, S. 579–587
- [Iwabuchi u. a. 2004] IWABUCHI, T. ; SHOJI, Y. ; SHIMADA, S. ; NAKAMURA, H.: Tsukuba GPS Dense Net Campaign Observations: Comparison of the Stacking Maps of Post-fit Phase Residuals Estimated from Three Software Packages. In: *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II* 82 (2004), Nr. 1B, 315–330. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jmsj/82/1B/82_1B_315/_article
- [King u. Watson 2010] KING, M. A. ; WATSON, C. S.: Long GPS coordinate time series: Multipath and geometry effects. In: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 115 (2010), Nr. B4. <http://dx.doi.org/10.1029/2009JB006543>. – DOI 10.1029/2009JB006543. – ISSN 2156-2202
- [King u. Bock 1997] KING, R. W. ; BOCK, Y.: *Documentation for the GAMIT GPS analysis software, release 9.66*. 77 Massachusetts Avenue, Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1997
- [Kouba 2003] KOUBA, J.: Measuring Seismic Waves Induced by Large Earthquakes with GPS. In: *Studia Geophysica et Geodaetica* 47 (2003), 741–755. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1026390618355>. – DOI 10.1023/A:1026390618355. – ISSN 0039-3169
- [Kouba 2009] KOUBA, J.: *A guide to using International GNSS Service (IGS) Products*. online. <http://igs.org/igs/scb/resource/pubs/UsingIGSProductsVer21.pdf>. Version: Mai 2009

- [Kouba u. Héroux 2001] KOUBA, J. ; HÉROUX, P.: Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products. In: *GPS Solutions* 5 (2001), Nr. 2, 12–28. <http://dx.doi.org/10.1007/PL00012883>. – DOI 10.1007/PL00012883. – ISSN 1080–5370
- [Kuntz 1990] KUNTZ, E.: *Kartennetzentwurfslehre: Grundlagen und Anwendungen*. 2. Aufl. Karlsruhe : Wichmann, 1990. – ISBN 3–87907–186–1
- [Larson u. a. 2001] LARSON, K. M. ; CERVELLI, P. ; LISOWSKI, M. ; MIKLIUS, A. ; SEGALL, P. ; OWEN, S.: Volcano monitoring using the Global Positioning System: Filtering strategies. In: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 106 (2001), Nr. B9, 19453–19464. <http://dx.doi.org/10.1029/2001JB000305>. – DOI 10.1029/2001JB000305. – ISSN 2156–2202
- [Lau 2012] LAU, L: Comparison of measurement and position domain multipath filtering techniques with the repeatable GPS orbits for static antennas. In: *Survey Review* 44 (2012), Nr. 324, S. 9–16. <http://dx.doi.org/doi:10.1179/1752270611Y.0000000003>. – DOI doi:10.1179/1752270611Y.0000000003
- [Laurichesse u. a. 2009] LAURICHESSE, D. ; MERCIER, F. ; BERTHIAS, J. P. ; BROCA, P. ; CERRI, L.: Integer Ambiguity Resolution on Undifferenced GPS Phase Measurements and Its Application to PPP and Satellite Precise Orbit Determination. In: *NAVIGATION, Journal of the Institute of Navigation* 65 (2009), Nr. 2, S. 135–149
- [Lidberg u. a. 2009] LIDBERG, M. ; EKSRÖM, C. ; JOHANSSON, J. M.: Site-Dependent Effects in High-Accuracy Applications of GNSS. In: *Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie* 42 (2009), 132–138. http://ftp.epncb.oma.be/_documentation/papers/eurefsymposium2007/site_dependent_effects_in_high_accuracy_applications_of_gnss.pdf
- [Löfgren u. Haas 2014] LÖFGREN, J. S. ; HAAS, R.: Sea level measurements using multi-frequency GPS and GLONASS observations. In: *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* 2014 (2014). <http://dx.doi.org/10.1186/1687-6180-2014-50>. – DOI 10.1186/1687-6180-2014-50. – ISSN 1687–6172
- [Luo 2013] LUO, X.: *GPS stochastic modelling: signal quality measures and ARMA processes*. Berlin : Springer, 2013 (Springer Theses: recognizing outstanding Ph.D. research). – ISBN 978–3–642–34835–8. – Zugl.: Karlsruhe, KIT, Diss., 2012
- [Luo u. a. 2008] LUO, X. ; MAYER, M. ; HECK, B.: Extended neutrospheric modelling for the GNSS-based determination of high-resolution atmospheric water vapour fields. In: *Boletim de Ciências Geodésicas* 14 (2008), Nr. 2, S. 149–170
- [Luo u. a. 2009] LUO, X. ; MAYER, M. ; HECK, B.: Improving the Stochastic Model of GNSS Observations by Means of SNR-based Weighting. Version: 2009. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-85426-5_83. In: SIDERIS, M. G. (Hrsg.): *Observing our Changing Earth* Bd. 133. Springer Berlin Heidelberg, 2009. – DOI 10.1007/978-3-540-85426-5_83. – ISBN 978–3–540–85425–8, 725–734
- [Mader 1999] MADER, G. L.: GPS Antenna Calibration at the National Geodetic Survey. In: *GPS Solutions* 3 (1999), Nr. 1, 50–58. <http://dx.doi.org/10.1007/PL00012780>. – DOI 10.1007/PL00012780. – ISSN 1080–5370
- [Mayer 2006] MAYER, M.: *Modellbildung für die Auswertung von GPS-Messungen im Bereich der Antarktischen Halbinsel*. München, Diss., 2006. – Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2005
- [Meindl u. a. 2004] MEINDL, M. ; SCHAER, S. ; HUGENTOBLER, U. ; BEUTLER, G.: Tropospheric Gradient Estimation at CODE: Results from Global Solutions. In: *Journal of the Meteorological Society of*

- Japan. Ser. II* 82 (2004), Nr. 1B, S. 331–338. <http://dx.doi.org/10.2151/jmsj.2004.331>. – DOI 10.2151/jmsj.2004.331
- [Melbourne 1985] MELBOURNE, W. G.: The case for ranging in GPS based geodetic systems. In: *Proceedings of the First International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System* Bd. 1. Rockville, MD, 15.-19. April 1985, S. 373–386
- [Miyazaki u. a. 1998] MIYAZAKI, S. ; HATANAKA, Y. ; SAGIYA, T. ; TADA, T.: The Nationwide GPS Array as an Earth Observation System. In: *Bulletin of the Geographical Survey Institute of Japan* 44 (1998), S. 11–22
- [Moore u. a. 2014] MOORE, M. ; WATSON, C. ; KING, M. ; MCCLUSKY, S. ; TREGONING, P.: Empirical modelling of site-specific errors in continuous GPS data. In: *Journal of Geodesy* 88 (2014), Nr. 9, 887–900. <http://dx.doi.org/10.1007/s00190-014-0729-5>. – DOI 10.1007/s00190-014-0729-5. – ISSN 0949-7714
- [Niell 1997] NIELL, A.: *Elevation cut-off test using orbits with different minimum elevations*. 1997. – Haystack memo, 06.06.1997
- [Nocquet u. Calais 2003] NOCQUET, J.-M. ; CALAIS, E.: Crustal velocity field of western Europe from permanent GPS array solutions, 1996–2001. In: *Geophysical Journal International* 154 (2003), Nr. 1, 72–88. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01935.x>. – DOI 10.1046/j.1365-246X.2003.01935.x. – ISSN 1365-246X
- [Petit u. Luzum 2010] PETIT, G. ; LUZUM, B.: IERS Conventions - (2010) / International Earth Rotation and Reference Systems Service. Version: 2010. http://www.iers.org/nm_11216/IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/tn36.html. Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, 2010. – IERS Technical Note Nr. 36. – ISBN 978-3-898-88989-6
- [Ragheb u. a. 2007] RAGHEB, A. E. ; CLARKE, P. J. ; EDWARDS, S. J.: GPS sidereal filtering: coordinate and carrier-phase-level strategies. In: *Journal of Geodesy* 81 (2007), 325–335. <http://dx.doi.org/10.1007/s00190-006-0113-1>. – DOI 10.1007/s00190-006-0113-1. – ISSN 0949-7714
- [Rebischung u. a. 2012] REBISCHUNG, P. ; GRIFFITHS, J. ; RAY, J. ; SCHMID, R. ; COLLILIEUX, X. ; GARAYT, B.: IGS08: the IGS realization of ITRF2008. In: *GPS Solutions* 16 (2012), Nr. 4, 483–494. <http://dx.doi.org/10.1007/s10291-011-0248-2>. – DOI 10.1007/s10291-011-0248-2. – ISSN 1080-5370
- [RINEX Working Group (IGS) u. RTCM-SC104 2013] RINEX WORKING GROUP (IGS) ; RTCM-SC104: *RINEX - The Receiver Independent Exchange Format, Version 3.02*. <http://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/data/format/rinex302.pdf>. Version: April 2013
- [Rizos u. a. 2012] RIZOS, C. ; JANSSEN, V. ; ROBERTS, C. ; GRINTER, T.: PPP versus DGNSS. In: *Geomatics World* 6 (2012), September/Okttober, 18–20. <http://ecite.utas.edu.au/80297>
- [Roberts 2004] ROBERTS, M. J.: *Signals and Systems: Analysis Using Transform Methods and MATLAB*. McGraw-Hill, 2004. – ISBN 978-0-07-249942-1
- [Rost 2011] ROST, C.: *Phasenmehrwegereduzierung basierend auf Signalqualitätsmessungen geodätischer GNSS-Empfänger*, Fakultät für Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften, Technische Universität Dresden, Diss., 2011. <http://dgk.badw.de/fileadmin/docs/c-665.pdf>

- [Rost u. Wanninger 2009] ROST, C. ; WANNINGER, L.: Carrier phase multipath mitigation based on GNSS signal quality measurements. In: *Journal of Applied Geodesy* 3 (2009), Jan, Nr. 2. <http://dx.doi.org/10.1515/JAG.2009.009>
- [Rothacher 1992] ROTHACHER, M.: *Orbits of satellite systems in space geodesy*. Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, No. 46, Schweizerische Geodätische Kommission, Zürich. <http://www.sgc.ethz.ch/sgc-volumes/sgk-46.pdf>. Version: 1992
- [Rothacher 2002] ROTHACHER, M.: Estimation of Station Heights with GPS. Version: 2002. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-04683-8_17. In: DREWES, H. (Hrsg.) ; DODSON, A. H. (Hrsg.) ; FORTES, L. P. S. (Hrsg.) ; SÁNCHEZ, L. (Hrsg.) ; SANDOVAL, P. (Hrsg.): *Vertical Reference Systems* Bd. 124. Springer Berlin Heidelberg, 2002. – DOI 10.1007/978-3-662-04683-8_17. – ISBN 978-3-642-07701-2, 81–90
- [Rothacher u. a. 1995] ROTHACHER, M. ; SCHAER, S. ; MERVART, L. ; BEUTLER, G.: Determination of antenna phase center variations using GPS data. In: GENDT, G. (Hrsg.) ; DICK, G. (Hrsg.): *IGS Special Topics and New Directions*, 1995, S. 205–220
- [Rózsa u. a. 2005a] RÓZSA, S. ; HECK, B. ; MAYER, M. ; SEITZ, K. ; WESTERHAUS, M. ; ZIPPELT, K.: Determination of displacements in the upper Rhine graben Area from GPS and leveling data. In: *International Journal of Earth Sciences* 94 (2005), Nr. 4, 538–549. <http://dx.doi.org/10.1007/s00531-005-0478-z>. – DOI 10.1007/s00531-005-0478-z. – ISSN 1437-3254
- [Rózsa u. a. 2005b] RÓZSA, S. ; MAYER, M. ; WESTERHAUS, M. ; SEITZ, K. ; HECK, B.: Towards the determination of displacements in the Upper Rhine Graben area using GPS measurements and precise antenna modelling. In: *Quaternary Science Reviews* 24 (2005), Nr. 3-4, 425–438. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2004.07.007>. – DOI 10.1016/j.quascirev.2004.07.007. – ISSN 0277-3791. – Neotectonics and Quaternary fault-reactivation in Europe's intraplate lithosphere
- [Saastamoinen 1972] SAASTAMOINEN, J.: Contributions to the theory of atmospheric refraction. In: *Bulletin géodésique* 105 (1972), Nr. 1, 279–298. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02521844>. – DOI 10.1007/BF02521844. – ISSN 0007-4632
- [Santerre 1991] SANTERRE, R.: Impact of GPS satellite sky distribution. In: *manuscripta geodaetica* 16 (1991), Nr. 1, 28–53. http://www.sgc.ulaval.ca/GPS-RS/pdf/Manuscripta_19.pdf
- [Scargle 1982] SCARGLE, J. D.: Studies in astronomical time series analysis. II - Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. In: *The Astrophysical Journal* 263 (1982), Dec, 835–853. <http://dx.doi.org/10.1086/160554>. – ISSN 1538-4357
- [Schmid u. a. 2007] SCHMID, R. ; STEIGENBERGER, P. ; GENDT, G. ; GE, M. ; ROTHACHER, M.: Generation of a consistent absolute phase-center correction model for GPS receiver and satellite antennas. In: *Journal of Geodesy* 81 (2007), Nr. 12, 781–798. <http://dx.doi.org/10.1007/s00190-007-0148-y>. – DOI 10.1007/s00190-007-0148-y. – ISSN 0949-7714
- [Schumacher 2002] SCHUMACHER, M. E.: Upper Rhine Graben: Role of preexisting structures during rift evolution. In: *Tectonics* 21 (2002), Nr. 1, 6-1–6-17. <http://dx.doi.org/10.1029/2001TC900022>. – DOI 10.1029/2001TC900022. – ISSN 1944-9194
- [Seeber 2003] SEEBER, G.: *Satellite Geodesy*. 2. compl. rev. and extend. ed. Berlin : de Gruyter, 2003. – ISBN 978-3-11-020008-9

- [Seeber u. a. 1998] SEEBER, G. ; MENGE, F. ; VÖLKSEN, C. ; WÜBBENA, G. ; SCHMITZ, M.: Precise GPS positioning improvements by reducing antenna and site dependent effects. In: *Advances in positioning and reference frames: IAG symposium* Bd. 118, 1998, S. 237–244
- [Semmling u. a. 2013] SEMMLING, A. M. ; WICKERT, J. ; SCHÖN, S. ; STOSIUS, R. ; MARKGRAF, M. ; GERBER, T. ; GE, M. ; BEYERLE, G.: A zeppelin experiment to study airborne altimetry using specular Global Navigation Satellite System reflections. In: *Radio Science* 48 (2013), Nr. 4, 427–440. <http://dx.doi.org/10.1002/rds.20049>. – DOI 10.1002/rds.20049. – ISSN 1944–799X
- [Shoji u. a. 2004] SHOJI, Y. ; HOJI, Y. ; NAKAMURA, H. ; IWABUCHI, T. ; AONASHI, K. ; SEKO, H. ; MISHIMA, K. ; ITAGAKI, A. ; ICHIKAWA, R. ; OHTANI, R.: Tsukuba GPS Dense Net Campaign Observation: Improvement in GPS Analysis of Slant Path Delay by Stacking One-way Postfit Phase Residuals. In: *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II* 82 (2004), Nr. 1B, 301–314. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jmsj/82/1B/82_1B_301/_article
- [Tesauro u. a. 2005] TESAURO, M. ; HOLLENSTEIN, C. ; EGLI, R. ; GEIGER, A. ; KAHLE, H.-G.: Continuous GPS and broad-scale deformation across the Rhine Graben and the Alps. In: *International Journal of Earth Sciences* 94 (2005), 525–537. <http://dx.doi.org/10.1007/s00531-004-0453-0>. – DOI 10.1007/s00531-004-0453-0. – ISSN 1437–3254
- [van der Marel u. Gündlich 2003] VAN DER MAREL, H. ; GÜNDLICH, B.: Development of Models for Use of Slant Delays, Slant Delay Retrieval and Multipath Mapping Software / Delft University of Technology, Department of Earth Observation and Space Systems (DEOS). Version: 2003, updated: March 2006. http://web.dmi.dk/pub/tough/deliverables/tough_d33_tud.pdf. Kluyverweg 1, 2629 HS Delft, The Netherlands, 2003, updated: March 2006. – Report for WP6100. TOUGH Deliverable D33
- [Wahr 1981] WAHR, J. M.: The forced nutations of an elliptical, rotating, elastic and oceanless earth. In: *Geophysical Journal International* 64 (1981), Nr. 3, 705–727. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.1981.tb02691.x>. – DOI 10.1111/j.1365-246X.1981.tb02691.x
- [Wanninger 2000] WANNINGER, L.: *Präzise Positionierung in regionalen GPS-Referenzstationsnetzen*. Deutsche Geodätische Kommission, Nr. C508, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München, 2000. – Habilitationsschrift
- [Wanninger 2002] WANNINGER, L.: Möglichkeiten und Grenzen der relativen GPS-Antennenkalibrierung. In: *Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV)* 127 (2002), S. 51–58
- [Wanninger u. May 2000] WANNINGER, L. ; MAY, M.: Carrier Phase Multipath Calibration of GPS Reference Stations. In: *Proceedings of ION GPS 2000*, 2000, S. 132–144
- [Wdowinski u. a. 1997] WDOWINSKI, S. ; BOCK, Y. ; ZHANG, J. ; FANG, P. ; GENRICH, J.: Southern California permanent GPS geodetic array: Spatial filtering of daily positions for estimating coseismic and postseismic displacements induced by the 1992 Landers earthquake. In: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 102 (1997), Nr. B8, 18057–18070. <http://dx.doi.org/10.1029/97JB01378>. – DOI 10.1029/97JB01378. – ISSN 2156–2202
- [Wildt 2006] WILDT, S.: *Mehrwegeausbreitung bei GNSS-gestützter Positionsbestimmung*, TU Dresden, Diss., 2006. <http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/655/1184854117028-3289.pdf>
- [Wilhelm u. a. 1997] WILHELM, H. (Hrsg.) ; ZÜRN, W. (Hrsg.) ; WENZEL, H.-G. (Hrsg.): *Lecture notes in earth sciences*. Bd. 66: *Tidal phenomena*. Springer, 1997. – ISBN 978–3–540–62833–0

- [Wu u. a. 1993] WU, J. T. ; WU, S. C. ; HAJJ, G. A. ; BERTIGER, W. I. ; LICHTEN, S. M.: Effects of antenna orientation on GPS carrier phase. In: *Manuscripta Geodaetica* 18 (1993), S. 91–98
- [Wübbena 1985] WÜBBENA, G.: Software Developments for Geodetic Positioning with GPS Using TI 4100 Code and Carrier Measurements. In: *Proceedings of the First International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System* Bd. 1. Rockville, MD, 15.-19. April 1985, S. 403–412
- [Wübbena u. a. 1996] WÜBBENA, G. ; MENGE, F. ; SCHMITZ, M. ; SEEBER, G. ; VÖLKSEN, C.: A new approach for field calibration of absolute antenna phase center variations. In: *Proceedings of the 9th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1996)*. Kansas City, September 1996, 1205–1214
- [Wübbena u. a. 2006] WÜBBENA, G. ; SCHMITZ, M. ; BOETTCHER, G.: *Near-field effects on GNSS sites: Analysis using absolute robot calibrations and procedures to determine corrections*. In: Proceeding of the IGS Workshop – Perspectives and Visions for 2010 and beyond, May 8-12, 2006, ESOC, Darmstadt, Germany. http://www.geopp.com/pdf/gppigs06_nf_f.pdf. Version: 2006
- [Wübbena u. a. 2001] WÜBBENA, G. ; SCHMITZ, M. ; MENGE, F. ; BÖDER, V. ; SEEBER, G.: Automated Absolute Field Calibration of GPS Antennas in Real-Time. In: *Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2000)*. Salt Lake City, September 2001, 2512–2522
- [Zeimetz 2011] ZEIMETZ, P.: *Zur Entwicklung und Bewertung der absoluten GNSS-Antennenkalibrierung im HF-Labor*. Bonn, Universität Bonn, Diss., 2011. <http://hss.ulb.uni-bonn.de/2010/2212/2212.htm>
- [Ziegler 1992] ZIEGLER, P. A.: European Cenozoic rift system. In: *Tectonophysics* 208 (1992), Nr. 1–3, 91–111. [http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90338-7](http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(92)90338-7). – DOI 10.1016/0040-1951(92)90338-7. – ISSN 0040-1951. – Geodynamics of rifting, volume 1 Case history studies on rifts: Europe and Asia
- [Zippelt u. Mälzer 1981] ZIPPELT, K. ; MÄLZER, H.: Recent height changes in the central segment of the rhinegraben and its adjacent shoulders. In: *Tectonophysics* 73 (1981), Nr. 1–3, 119–123. [http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951\(81\)90179-7](http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(81)90179-7). – DOI 10.1016/0040-1951(81)90179-7. – ISSN 0040-1951. – Mechanism of graben formation
- [Zumberge u. a. 1997a] ZUMBERGE, J. F. ; HEFLIN, M. B. ; JEFFERSON, D. C. ; WATKINS, M. M. ; WEBB, F. H.: Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. In: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 102 (1997), Nr. B3, S. 5005–5017. <http://dx.doi.org/10.1029/96JB03860>. – DOI 10.1029/96JB03860. – ISSN 2156-2202
- [Zumberge u. a. 1997b] ZUMBERGE, J. F. ; WATKINS, M. M. ; WEBB, F. H.: Characteristics and Applications of Precise GPS Clock Solutions Every 30 Seconds. In: *Navigation* 44 (1997), Nr. 4, S. 449–456. <http://dx.doi.org/10.1002/j.2161-4296.1997.tb02360.x>. – DOI 10.1002/j.2161-4296.1997.tb02360.x. – ISSN 2161-4296

Dank

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Bernhard Heck bedanke ich mich herzlich für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit, die mir gewährten Freiheiten sowie Ermunterung zur Vollendung der Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Matthias Becker danke ich für die Übernahme des Korreferats, die hilfreichen Anmerkungen und Ergänzungen.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h. Günter Schmitt bedanke ich mich für die mir gebotene Möglichkeit, nach dem Studium im Sonderforschungsbereich 461 (Starkbeben: Von geowissenschaftlichen Grundlagen zu Ingenieurmaßnahmen) erste Schritte als wissenschaftlicher Mitarbeiter zu gehen.

Allen Kolleginnen und Kollegen des Geodätischen Instituts, insbesondere den Angehörigen des PSG-Lehrstuhls danke ich für die vielen interessanten fachlichen und überfachlichen Diskussionen. Mein besonderer Dank gilt Michael Mayer, der mir als „Ko-Betreuer“ sehr viel Input gegeben und mich immer wieder zum Fertigstellen der Arbeit angetrieben hat. Während meiner Zeit als Studierender und später als wissenschaftlicher Mitarbeiter am GIK durfte ich neben einem großen Zuwachs an Fachwissen auch viel Erfahrung auf anderen Sektoren sammeln: sei es bei verschiedensten GNSS-Messkampagnen, durch (inter)nationale Kooperationen und Aufenthalte oder durch die Mitwirkung an Lehr- und Fortbildungsveranstaltungen.

Ohne die Verfügbarkeit von GNSS-Daten wäre diese Realdaten-basierte Arbeit nicht möglich gewesen. Deshalb bedanke ich mich an dieser Stelle ganz herzlich für die Bereitstellung von Daten und schnelle unbürokratische Hilfe bei den *SAPOS*[®]-Abteilungen des Landesamts für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg sowie des Landesamtes für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz. Die Daten der französischen Stationen werden dankenswerterweise von den Kollegen (Frédéric Masson, Patrice Ulrich) am Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre (EOST) an der Université de Strasbourg gesammelt. Mein Dank gilt auch dem Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, welches die frei verfügbaren Daten verschiedenster GNSS-Permanentstationen (GREF, EPN, IGS) zum Download bereitstellt.

Allen Korrekturleserinnen und -lesern danke ich für die investierte Zeit sowie die hilfreichen Kommentare und Anmerkungen.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir bei meinem beruflichen und persönlichen Werdegang jederzeit zur Seite gestanden und Rückhalt geboten haben. Zuletzt danke ich meiner Frau und unseren Kindern von ganzem Herzen!