

DIPLOMARBEIT

Regressionskoeffizienten für atmosphärische Auflasteffekte aus der VLBI

Ausgeführt am

Department für Geodäsie und Geoinformation
Forschungsgruppe Höhere Geodäsie
der Technischen Universität Wien

unter der Anleitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Böhm
und

Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hana Krásná

durch

Bernd Moser, Bsc.

Matr.Nr.: 0625569

Monspergstraße 20/3, 8850 Murau

E-mail: bernd.moser@gmx.at

Wien, im Oktober 2014

KURZFASSUNG

In dieser Arbeit wird die Atmosphärenkorrektur anhand a priori bestimmter Regressionskoeffizienten aus atmosphärischen Auflasteffekten näher betrachtet. Der Luftdruck in der Atmosphäre wirkt auf die Erdoberfläche in Form von Auflast. Variiert der Luftdruck, wirkt sich dies auf die Erdkruste in Form von Deformationen aus. Die durch die Auflasteffekte hervorgerufenen Deformationen können bis zu 3 cm in radialer Richtung betragen. Der Zusammenhang von Luftdruck und den atmosphärischen Auflasteffekten kann durch Regressionskoeffizienten ausgedrückt werden.

Aufgrund des Einflusses der Auflasteffekte auf die Erdkruste wird in der Arbeit unter anderem untersucht, ob eine Atmosphärenkorrektur anhand von a priori bestimmten Regressionskoeffizienten in einer globalen VLBI - Lösung Verbesserungen in den Ergebnissen liefert. Des Weiteren beschäftigt sich diese Arbeit mit der Untersuchung der saisonalen Variation von Luftdruck und Auflasteffekten und damit verbunden der Regressionskoeffizienten. Für viele VLBI - Stationen wird dabei die saisonale Variation der Regressionskoeffizienten sehr deutlich sichtbar. Stationen mit stabiler Drucklage weisen erwartungsgemäß geringe Variationen auf. Der Einfluss der saisonalen Auflasteffekte auf den Schwerpunkt des VLBI - Stationsnetzwerkes wird ebenso untersucht.

Die Ergebnisse der globalen Lösungen werden anhand von Stationskoordinaten und Basislinienwiederholbarkeiten betrachtet. Die Lösung mit Atmosphärenkorrektur anhand von a priori Regressionskoeffizienten und die Lösung mit einer Atmosphärenkorrektur anhand von Korrekturen des NASA Goddard Space Flight Center (GSFC) und intern geschätzten Regressionskoeffizienten werden verglichen mit einer Lösung mit intern geschätzten Regressionskoeffizienten ohne GSFC - Atmosphärenkorrektur. Die Untersuchung der Basislinienwiederholbarkeiten zeigt, dass eine Atmosphärenkorrektur anhand von a priori Regressionskoeffizienten nicht für alle Stationen Verbesserungen gegenüber den anderen Lösungen mit sich bringt. Es zeigt sich, dass eine globale Lösung mit GSFC - Atmosphärenkorrektur für den Großteil der Basislinien kleinere Wiederholbarkeiten als eine Lösung ohne GSFC - Atmosphärenkorrektur liefert. Ebenso kann festgehalten werden, dass eine globale Lösung mit Atmosphärenkorrektur aus a priori geschätzten Regressionskoeffizienten hinsichtlich der Wiederholbarkeiten auch bessere Ergebnisse liefert als die Lösung ohne Atmosphärenkorrektur.

ABSTRACT

In this thesis, the focus is on regression coefficients induced by atmospheric pressure loading. The atmospheric pressure affects the surface of the earth by loadings. Variations of the atmospheric pressure cause deformations of the earth's crust. The magnitude of these deformations can be up to 3 cm in radial direction. Atmospheric pressure and atmospheric pressure loadings can be combined via regression coefficients.

Due to the effect of atmospheric pressure loadings on the earth's crust, this thesis analyses the effect of an atmospheric correction by a priori calculated regression coefficients in a global solution of the VLBI network. Furthermore this thesis surveys the seasonal variation of atmospheric pressure and loading effects and thus regression coefficients. A lot of VLBI station's regressions coefficients clearly show seasonal variations. Little variation can be found at stations with a very stable pressure field throughout the year. The analysis of the effect of these seasonal loading deformations on the center of the VLBI station network is also part of this thesis.

The results of the global solution are analysed on the basis of station coordinates and baseline repeatabilities. The global solution with atmospheric corrections by a priori regression coefficients and the solution with internally estimated regression coefficients and atmospheric corrections from the NASA Goddard Space Flight Center (GSFC) are compared to the solution with atmospheric correction by internally estimated regression coefficients and no GSFC - atmospheric correction. Analysis of the baseline repeatabilities show, that the solution with atmospheric corrections by a priori regression coefficients does not necessarily bring improvements for all stations compared the other solutions. It shows that a global solution with GSFC - corrections yields smaller repeatabilities for the majority of the baselines compared to a solution with no atmospheric corrections. In terms of repeatabilities, it can be equally said that a global solution with atmospheric corrections by a priori regression coefficients brings better results than a solution with no atmospheric correction.

DANKSAGUNG

Mit der Fertigstellung einer Diplomarbeit geht neben dem Studium auch ein wichtiger Lebensabschnitt zu Ende. Die Monate während der Erstellung dieser Arbeit waren sehr lehrreich und werden, wie das gesamte Studium, wegweisend für das weitere Berufsleben sein. Aus diesem Grund möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich in dieser Zeit unterstützt haben.

Besonderer Dank gilt dabei den Betreuern meiner Diplomarbeit, Herrn Prof. Johannes Böhm und Hana Krasna, die mir jederzeit äußerst geduldig mit Rat und Tat zur Seite standen.

Weiters bedanke ich mich bei meinen Freunden, Kollegen und ganz besonders meiner Familie für die moralische Unterstützung während des gesamten Studiums und für das Vertrauen in die Fertigstellung dieser Arbeit.

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt bzw. die wörtlich oder sinngemäß entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Die vorliegende Masterarbeit ist mit dem elektronisch übermittelten Textdokument identisch.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 2 |
| 2 | Physikalische Grundlagen | 4 |
| 2.1 | Atmosphäre | 4 |
| 2.1.1 | Zusammensetzung | 4 |
| 2.1.2 | Wasserdampfdruck - Luftdruck | 5 |
| 2.2 | Druck | 6 |
| 2.3 | Auflasteffekte - Atmospheric Pressure Loading | 7 |
| 2.3.1 | Druckvariationen an der Oberfläche | 7 |
| 2.3.2 | Einfluss auf weltraumgeodätische Messungen | 9 |
| 2.3.3 | Atmosphärische Gezeiten | 9 |
| 2.3.3.1 | Zeitliche Variation des Luftdrucks | 9 |
| 2.3.3.2 | Tidal- und Non-Tidal Auflasteffekte | 11 |
| 3 | Daten | 12 |
| 3.1 | Druckdaten | 12 |
| 3.1.1 | Lokale Druckdaten - VMF1 | 13 |
| 3.1.2 | Referenzdruck - GPT2 | 14 |
| 3.2 | APL - Daten | 14 |
| 3.3 | ECMWF, GSFC | 15 |
| 4 | VLBI - Very Long Baseline Interferometry | 17 |
| 4.1 | Interferometrie auf langen Basislinien | 17 |
| 4.2 | Prinzip | 18 |
| 4.3 | Anwendungen und Produkte | 21 |
| 4.3.1 | Referenzrahmen | 22 |
| 4.3.1.1 | Terrestrischer Referenzrahmen | 22 |
| 4.3.1.2 | Himmelsfester Referenzrahmen | 23 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.3.2 | Erdorientierungsparameter | 23 |
| 4.4 | IVS, GGOS und die Zukunft der VLBI | 24 |
| 4.4.1 | International VLBI System for Geodesy & Astrometry | 24 |
| 4.4.2 | Global Geodetic Observing System | 26 |
| 4.4.3 | Die Zukunft der VLBI | 27 |
| 5 | Berechnung der Regressionskoeffizienten | 28 |
| 5.1 | Regression | 30 |
| 5.2 | Fester Referenzdruck für jede Station | 31 |
| 5.2.1 | Saisonale Variation | 33 |
| 5.2.2 | Auswirkung auf das Geozentrum | 39 |
| 5.3 | Variabler Referenzdruck | 43 |
| 6 | Globale Lösungen in VieVS | 45 |
| 6.1 | Vorkehrungen und Output | 47 |
| 6.2 | Ohne Standard - Atmosphärenkorrektur mit intern geschätzten Regressionskoeffizienten | 49 |
| 6.3 | Standard - Atmosphärenkorrektur mit intern geschätzten Regressionskoeffizienten | 50 |
| 6.4 | Mit externen Regressionskoeffizienten | 50 |
| 6.5 | Ergebnisse | 51 |
| 6.5.1 | Regressionskoeffizienten | 51 |
| 6.5.2 | Korrekturen der Stationskoordinaten | 53 |
| 6.5.3 | Vergleich der Basislinienlängenwiederholbarkeiten | 59 |
| 7 | Diskussion der Ergebnisse | 63 |
| 8 | Schlussfolgerung und Ausblick | 65 |
| | Literaturverzeichnis | 67 |

Kapitel 1

Einleitung

Variationen des Luftdrucks wirken sich auf die Erdkruste in Form von Deformationen aus. Diese Deformationen können eine Größenordnung von bis zu 3 cm erreichen. Aus diesem Grund müssen Missionen der Weltraumgeodäsie diese Effekte beachten.

Der Zusammenhang zwischen Luftdruck und atmosphärischen Auflasteffekten kann durch Regressionkoeffizienten hergestellt werden. Der atmosphärische Druck an der Oberfläche wird von vielen Einflüssen bestimmt. Dazu zählen Sonneneinstrahlung, Druckveränderungen durch Verschiebung von Luftmassen und der Einfluss der Jahreszeiten. Dieser Einfluss ist in den Zeitreihen des Luftdrucks gut erkennbar. Die Variationen des Luftdrucks werden laut Klose (2008) durch Schwankungen der Temperatur und der allgemeinen Wetterlage beeinflusst. Die dadurch entstandenen Auflasteffekte werden anhand der Veränderungen der Stationskoordinaten von VLBI, GNSS und SLR - Stationen sichtbar, siehe Bock und Scherneck (2005) und Dach et al. (2010).

Aufgrund dieser Deformationen durch Auflasteffekte kommt es zu Massenverschiebungen auf der Erde, was wiederum eine Variation des Geozentrums zur Folge hat. Als Geozentrum wird im Folgenden der Schwerpunkt des VLBI - Stationsnetzwerks verstanden.

Ziel dieser Arbeit ist es, die saisonalen Variationen der Regressionskoeffizienten zu bestimmen (siehe Kap. 5.2.1), und dazu den Einfluss dieser Veränderungen auf das Geozentrum zu untersuchen (Kap. 5.2.2). Des Weiteren sollten die Auswirkungen einer Einbindung von a priori bestimmten Regressionskoeffizienten in eine globale Lösung betrachtet werden (Kap. 6). Die Auswirkungen werden anhand von Vergleichen der Stationskoordinaten bzw. Basislinienlängenwiederholbarkeiten mit anderen Lösungen untersucht. Dabei wird zusätzlich jeweils eine Lösung mit und ohne angebrachter Atmosphärenkorrektur

mit intern geschätzten Regressionskoeffizienten bestimmt, deren Ergebnisse mit der globalen Lösung mit der Korrektur anhand von Regressionskoeffizienten verglichen wird, siehe Kap. 6.5. Die globalen Lösungen werden mit Hilfe der Vienna VLBI Software (VieVS) bestimmt.

Um diese Ziele zu erreichen, müssen zuerst die vorhandenen Daten zu Luftdruck und Auflast der Stationen importiert werden. Im Anschluss daran werden zunächst stationsweise Regressionskoeffizienten bestimmt. Um die saisonale Variation der Regressionskoeffizienten untersuchen zu können, werden weiters monatliche Werte der Koeffizienten berechnet. Dazu werden Druck- und Auflastdaten jeder Station monatsweise gestapelt, sodass für jede Station zwölf Regressionskoeffizienten vorliegen. Weiters wird aus den gestapelten Werten eine Variation des Geozentrums berechnet. In einem letzten Schritt werden die Ergebnisse der globalen Lösungen dazu verwendet, die Wiederholbarkeiten der Basislinienlängen zu bestimmen.

Kapitel 2

Physikalische Grundlagen

2.1 Atmosphäre

Laut Klose (2008) ist die Atmosphäre der Erde eine Dampf- und Gashülle. Sie existiert, da zwischen der Gravitation und den Eigenbewegungen der Moleküle und Atome in der Lufthülle ein Gleichgewicht besteht. Aufgrund ihrer thermisch bedingten Bewegung würden sich die Gase ansonsten in den Weltraum verflüchtigen. Die Luftdichte und somit der Luftdruck nehmen mit zunehmender Höhe exponentiell ab. Oberhalb von 500 km Höhe beginnt die Exosphäre, der materiereiche Weltraum. Hier sind nur wenige Wasserstoffatome vorhanden, es herrschen je nach Sonnenaktivität Temperaturen von 1500 K bis 2000 K. Die Erdatmosphäre wird von dieser Sonnenaktivität auch beeinflusst: In Abhängigkeit von Tages- und Jahreszeit pulsiert dadurch die Atmosphäre.

2.1.1 Zusammensetzung

Nach Klose (ebd.) ist die Atmosphäre eine dünne Hülle aus Gasen und Partikeln. Bis zu einer Höhe von ca. 100 km behält sie ihre Zusammensetzung bei, wobei fast die gesamte Masse in einer Schicht konzentriert ist, die nur 0,25% des Erddurchmessers entspricht. Die Hauptbestandteile dieser Schicht sind Stickstoff (78%), Sauerstoff (21%), Argon (0,9%) und Kohlendioxid (0,04%). Die Prozentangaben beziehen sich hierbei auf die trockene Luft. Diese Schicht wird Homosphäre genannt, in ihr befinden sich 99,999% der irdischen Luft.

Wie in Abb. 2.1 ersichtlich, schließt an die Homosphäre die Heterosphäre an. Aufgrund

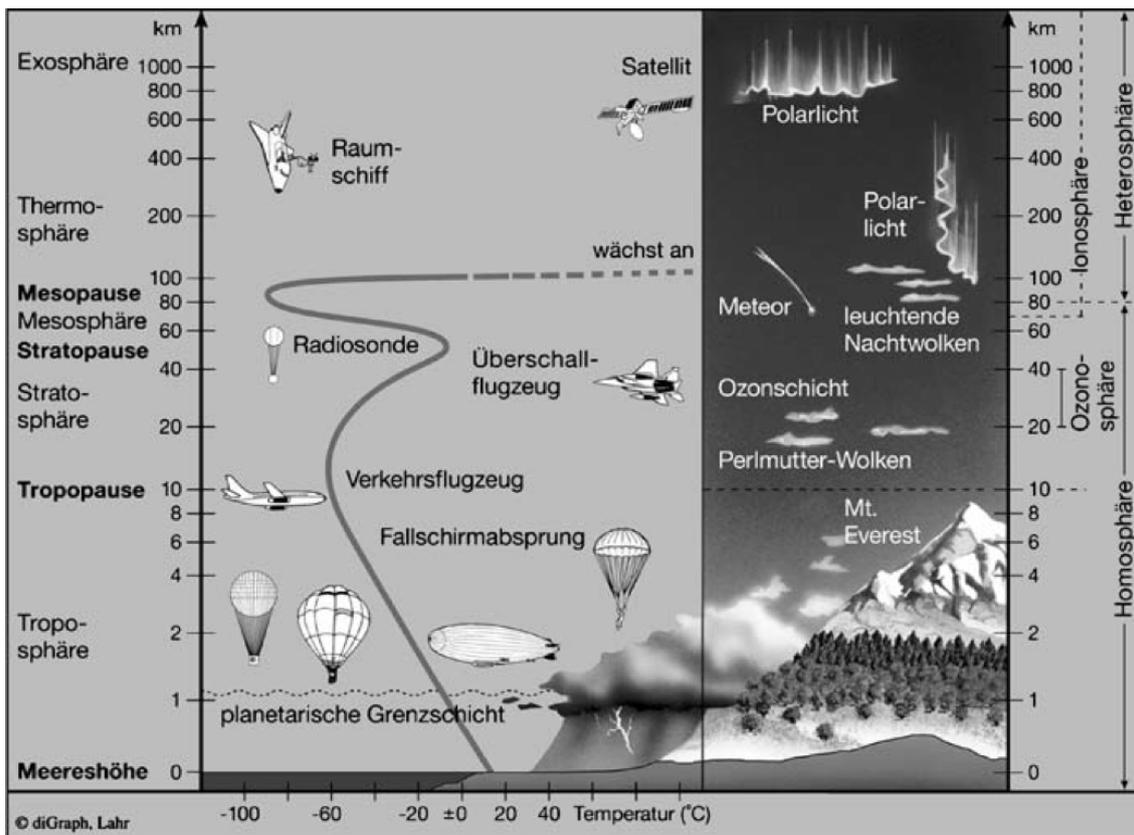


Abbildung 2.1: Aufbau der Atmosphäre, [Klose, 2008]

der unterschiedlichen Massen der Gase werden diese hier entmischt. In den Schichten oberhalb der Homosphäre sind nur mehr leichte Gase wie Helium und Wasserstoff vorhanden. Ab einer Höhe von 150 km dominiert der atomare Sauerstoff, also freie, einzelne Sauerstoffatome. In 400 km Höhe macht der atomare Sauerstoff 94% des gesamten Gasgemisches aus.

2.1.2 Wasserdampfdruck - Luftdruck

Die Atmosphäre enthält wechselnde Anteile von Wasser (1 - 4 Volumenprozent) in allen Aggregatzuständen [...] [Klose, 2008]. Die wechselnden Anteile des Wassers sind temperaturabhängig, somit findet aufgrund der Temperaturabnahme mit der Höhe eine rasche Verringerung des Wasserdampfgehaltes statt. 90 - 95% des Wasserdampfes treten unterhalb von 5 km Höhe auf. Mit zunehmender Höhe nimmt die Luftdichte und damit der Luftdruck exponentiell ab, es wirkt daher die Gewichtskraft einer anderen Luftmasse. Das Prinzip des Schweredruckes bleibt also aufrecht. Laut Böhm et al. (2013) ergibt die Summe der trockenen und feuchten Bestandteile der Luft p_d und des Wasserdampfdrucks

e den Luftdruck p :

$$p = pd + e. \quad (2.1)$$

Böhm et al. (2013) bestimmt den gesättigten Wasserdampfdruck e über die Gleichung von Magnus-Tetens:

$$e = 6.105 \cdot e^{\frac{17.1-t}{235+t}}. \quad (2.2)$$

t stellt dabei die Temperatur in Grad Celsius [$^{\circ}\text{C}$] dar.

Diese Variationen des Luftdrucks wirken sich in Form von horizontalen und radialen Deformationen auf die Erdkruste aus.

2.2 Druck

Nach Harten (2007) ist der Druck p wie folgt definiert:

$$\text{Druck} = \frac{\text{Kraft } F}{\text{Fläche } A}. \quad (2.3)$$

Die Kraft steht senkrecht auf die Fläche, A und F haben die gleiche Richtung. Der Druck p ist ein Skalar mit der Einheit Pascal = 1 Pa = 1 N/m² [ebd.]. In der Meteorologie und anderen verwandten Disziplinen wird die Einheit Hektopascal [hPa] verwendet. Nach Böhm et al. (2013) beträgt der mittlere Luftdruck auf Meereshöhe ungefähr 1013.25 hPa.

Der Druck in einem ruhenden Fluid, der hydrostatische Druck, ist grundsätzlich allseitig gleich, solange Gewichtskräfte vernachlässigt werden. Als Fluid werden hierbei Flüssigkeiten und Gase verstanden, da physikalische Gesetze für beide gleich gelten.

Schweredruck ist jener Druck, den ein Fluid durch seine Gewichtskraft erzeugt. In Flüssigkeiten wie in Gasen steigt der Druck mit der Tiefe und nimmt mit der Höhe ab.

$$p(h) = \rho \cdot g \cdot h. \quad (2.4)$$

ρ entspricht der Dichte des Mediums, g ist die Schwerkraft und h ist die Höhe des Flüssigkeitsspiegels bzw. die Höhe des Punktes im Medium.

2.3 Auflasteffekte - Atmospheric Pressure Loading

Veränderungen des atmosphärischen Drucks wirken auf die Erdkruste in Form von Auflasteffekten. Diese horizontalen und vertikalen Verschiebungen können bis zu 3 cm betragen. Aufgrund dieser Größenordnung müssen atmosphärische Auflasteffekte bei Berechnungen in der Weltraumgeodäsie berücksichtigt werden.

2.3.1 Druckvariationen an der Oberfläche

Laut Böhm et al. (2013) entstehen Zonen hohen und niedrigen Luftdrucks durch unterschiedliche Erwärmung in hohen- und niedrigen Breitengraden. Dies führt zu Bewegungen in der Atmosphäre, der sogenannten atmosphärischen Zirkulation. Hierzu gehören Jet Streams, aus denen barokline Wellen wie Zyklone und Antizyklone entstehen. Nach Klose (2008) besitzen in baroklinen Zonen die Temperaturflächen eine Neigung gegen die Druckflächen, somit kann sich eine thermische Zirkulation entwickeln. Zyklone und Antizyklone repräsentieren Druckanomalien, also Abweichungen von hohem und niedrigem Luftdruck vom mittleren Druck. Ihre Ausdehnung reicht von mehreren hundert bis zu mehreren tausend Kilometern. Die komplexen Wechselwirkungen zwischen der Erde und ihrer Atmosphäre mit den Druckvariationen rufen geodynamische Effekte hervor, auf ihre Auswirkungen und ihren Einfluss wird in Unterabschnitt 2.3.2 näher eingegangen.

Anhand Abb. 2.2 wird ersichtlich, wie sich Druckanomalien an der Oberfläche auf die Erdkruste auswirken: Im Gebiet von Sibirien ist eine positive Druckanomalie von bis zu 30 hPa zu erkennen. Diese wirkt sich in Deformationen der Erdkruste in diesem Gebiet von bis zu 10 mm aus. Der umgekehrte Fall tritt hier über Europa ein: Eine negative Druckanomalie äußert sich in einer Hebung des Gebietes.

Die Größenordnung der Auflasteffekte ist nicht überall gleich, sie hängt hauptsächlich

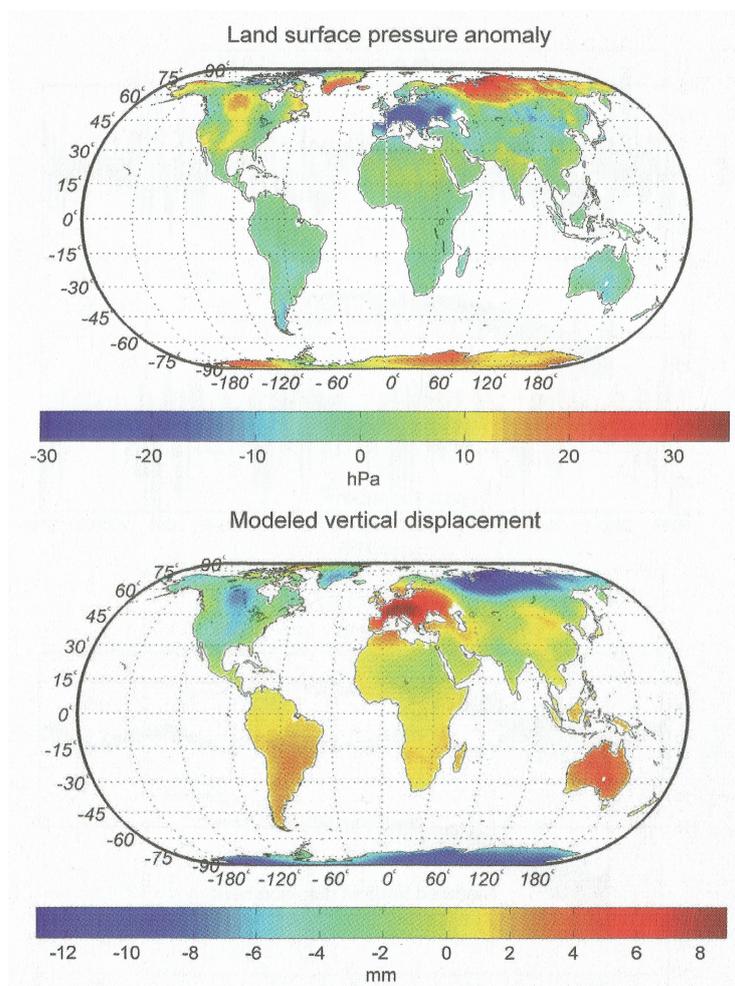


Abbildung 2.2: Räumliche Variationen von Druckanomalien und modellierten vertikalen Verschiebungen; 1. Jänner 2010, 00:00 Uhr, [Wijaya et al., 2013]

von der geographischen Breite und der Nähe zu den Ozeanen ab. In Küstennähe tritt der sogenannte *inverse Barometereffekt (IB)* ein. Es findet ein Ausgleich der Luftdruckschwankungen durch den Meeresspiegel statt: Sinkt der Luftdruck, hebt sich der Meeresspiegel. Dieser Effekt hat ungefähr eine Größenordnung von -10 mm/hPa . Laut Dach et al. (2010) sind vertikale Deformationen für Stationen in Küstennähe daher kleiner als im Landesinneren. Für horizontale Deformationen gilt, dass die größten Werte an der Küste auftreten. Horizontale Deformationen sind im Allgemeinen eine Größenordnung kleiner als die vertikalen Deformationen.

2.3.2 Einfluss auf weltraumgeodätische Messungen

Auflasteffekte und ihr Einfluss auf die Erdkruste sind in Veränderungen der Stationskoordinaten sichtbar. Messbar ist dies durch Basislinienbeobachtungen mit Hilfe der VLBI, wie vanDam und Herring (1994) und Petrov und Boy (2004) zeigen, sind die Auswirkungen der atmosphärischen Auflast auch mittels GNSS und SLR erkennbar. Die Deformationen der Erdkruste haben weiters Einfluss auf die Gravimetrie, einerseits direkt durch den gravitativen Effekt und andererseits indirekt durch den Deformationseffekt, siehe Torge (1989). Diese Einflüsse auf das Gravitationsfeld der Erde wirken sich auf alle weltraumgeodätischen Messverfahren aus. Folgt man Karbon et al. (2011), sind besonders Satellitenmissionen wie GRACE und GOCE, deren Aufgabe die Erkundung des Erdschwerefelds ist, von diesen Effekten betroffen. Die Auflast der Atmosphäre hat einen signifikanten Einfluss auf die Schwerkraftvariation und muss somit auch bei diesen Messverfahren berücksichtigt werden.

2.3.3 Atmosphärische Gezeiten

Nach Torge (1989) können atmosphärische Gezeiten als großflächige atmosphärische Wellen verstanden werden. Ihre Dimension entspricht dem Erdumfang. Sie werden durch unterschiedliche äußere Faktoren hervorgerufen, hauptsächlich durch die Erwärmung aufgrund der Sonneneinstrahlung. Auch die Gezeiten durch die Gravitation von Sonne und Mond haben Einfluss auf die atmosphärischen Gezeiten. Kurzzeitige und a-periodische Variationen, sowie atmosphärische Gezeiten aufgrund der Sonneneinstrahlung haben eine Größenordnung von < 1 hPa. Die Amplituden der halbtäglichen Sonnengezeit erreichen nur in Ausnahmefällen mehr als 0.1 hPa.

Aufgrund dieser Abhängigkeit von thermalen Einflüssen werden die Gezeiten der Atmosphäre auch thermische Gezeiten genannt. Laut Böhm et al. (2013) äußern diese sich durch Variationen der atmosphärischen Parameter wie Luftdruck, Windgeschwindigkeit und Temperatur. Diese Variationen haben Perioden von wenigen Stunden bis hin zu Jahren.

2.3.3.1 Zeitliche Variation des Luftdrucks

Für diese Arbeit ist die Variation des Luftdrucks von großer Wichtigkeit. Laut Klose (2008) tritt neben der unregelmäßigen Schwankung durch das Wetter bei ungestörter

Wetterlage täglich eine Doppelwelle des Luftdrucks auf. Dies lässt auf den Tagesgang der Temperatur in Verbindung mit einer Resonanzschwingung der Atmosphäre schließen. Der Temperatureinfluss zeigt sich auch in der saisonalen Variation des Luftdrucks. In Gebieten mit guten Druckvariationen über das Jahr hinweg werden bei Beobachtungen über mehrere Jahre eindeutig jährliche Wiederholungen wie Jahreszeiten sichtbar.

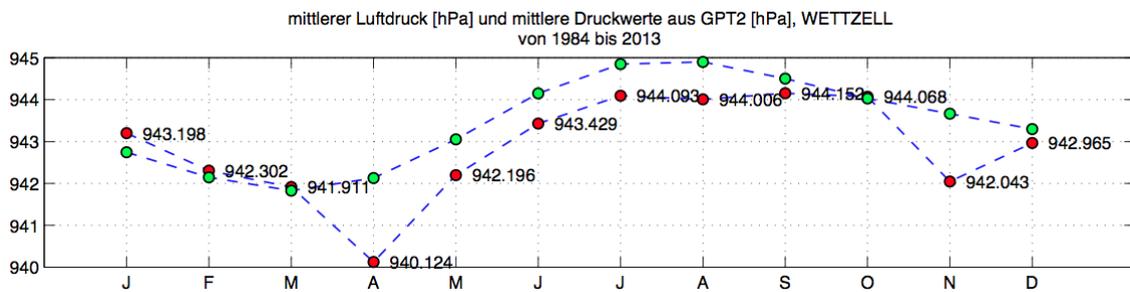


Abbildung 2.3: Jährliche Variation des mittleren monatlichen Luftdrucks (rot) und mittlere monatliche Druckwerte aus der GPT2 - Funktion (grün) an der Station WETTZELL, Deutschland

Abb. 2.3 zeigt ein Beispiel für Druckvariation im Laufe des Jahres. Die mittleren Monatswerte des Luftdrucks reichen von 940.124 hPa (April) bis 944.153 hPa (September). Schematisch werden dazu in grün die mittleren monatlichen Druckwerte aus der GPT2 - Funktion dargestellt. Ein Beispiel für geringe Variation der Luftdrucks ist die VLBI - Station Kokee auf Hawaii, siehe Abb. 2.4. Hier herrscht ganzjährig stabile Drucklage, die mittleren monatlichen Werte des Luftdrucks schwanken hier nur um maximal 2.5 hPa. Wie Berechnungen im Zuge dieser Arbeit werden, haben geringe Luftdruckunterschiede signifikante Auswirkungen auf die Bestimmung der Regressionskoeffizienten.

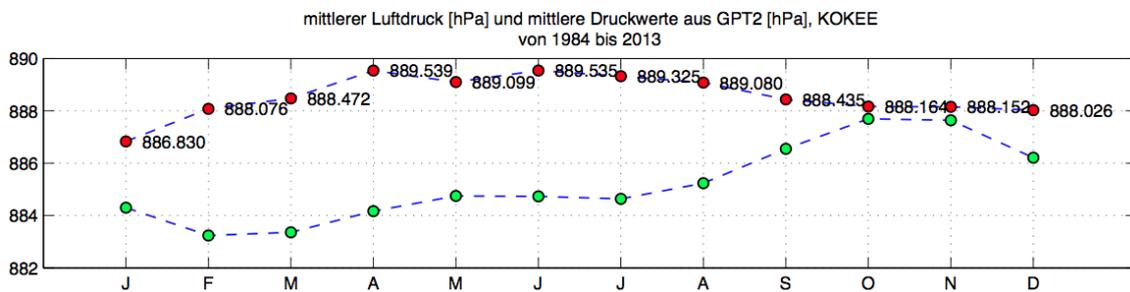


Abbildung 2.4: Jährliche Variation des mittleren monatlichen Luftdrucks (rot) und mittlere monatliche Druckwerte aus der GPT2 - Funktion (grün) an der Station KOKEE, Hawaii

2.3.3.2 Tidal- und Non-Tidal Auflasteffekte

Grundsätzlich werden Auflasteffekte in Effekte **mit**- und in Effekte **ohne** atmosphärischen Gezeiteneinfluss unterteilt. Diese Verschiebungen werden in diverser Literatur als *Tidal Loading Displacements* bzw. *Non-Tidal Loading Displacements* bezeichnet, z.B. in: [Böhm und Schuh, 2013]. Auflasteffekte mit atmosphärischen Gezeiteneinfluss werden durch die tägliche Erwärmung der Atmosphäre ausgelöst. Veränderungen des Luftdrucks aufgrund der Verschiebung von Luftmassen sind der Auslöser für Auflasteffekte ohne atmosphärischen Gezeiteneinfluss. Druckdaten des ECMWF beinhalten Signale mit täglichen ($S_1(p)$) bzw. halbtäglichen atmosphärischen Gezeitenwellen ($S_2(p)$). Die Auflösung der Daten dieser numerischen Wettermodelle beträgt 6 Stunden. Die $S_2(p)$ Gezeit kann nicht korrekt modelliert werden, da ihre Frequenz exakt der Nyquist - Frequenz entspricht. Ergänzend sei erwähnt, dass Ponte und Ray (2002) eine Vorgehensweise empfehlen, um tägliche- und halbtägliche atmosphärische Gezeiten mit Hilfe eines harmonischen Modells zu eliminieren.

Kapitel 3

Daten

Die Berechnungen für diese Arbeit wurden mit Daten durchgeführt, die eine Zeitspanne von 30 Jahren, von 1984.1 bis 2014.0 umfassen. Die Variablen in Gleichung 5.1 zeigen, welche Daten für die Berechnung von Regressionskoeffizienten benötigt werden. Es sind einerseits Druckdaten wie Referenzdruck und lokaler Druck an jeder Station und Daten, welche die atmosphärische Auflast beschreiben.

Um die Berechnungen zur Bestimmung von Regressionskoeffizienten korrekt durchführen zu können, ist es unumgänglich, aktuelle Daten von den offiziellen Quellen zu verwenden. Die IAG hat für alle Abteilungen der Weltraumgeodäsie eigene Services eingerichtet. Diese stellen den Vertrieb der Daten aus erster Hand für alle Interessenten sicher und garantieren die Korrektheit der gelieferten Daten. In den folgenden Unterkapiteln wird ein kurzer Überblick über die Herkunft der verwendeten Daten gegeben.

3.1 Druckdaten

Als Druckdaten werden lokale Druckwerte der VLBI - Stationen und Referenzdruckwerte für deren Koordinaten verwendet. Die Druckdaten sind jeweils im Datensatz der VMF1, der Vienna Mapping Function 1, abgelegt. Der Referenzdruck wird mit Hilfe des GPT2 - Modells für die gleichen Zeitpunkte und Orte der VMF1 - Daten erstellt, siehe Lagler et al. (2013). Nachfolgend wird näher auf die Herkunft der Druckdaten eingegangen.

3.1.1 Lokale Druckdaten - VMF1

Die lokalen Druckdaten der Stationen sind den Datensätzen der VMF1 entnommen. Basierend auf dem numerischen Wettermodell des ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), siehe Kap. 3.3, werden laut Böhm et al. (2006) lokale Druckdaten und Atmosphären - Delays für alle VLBI-, GPS-, und DORIS - Stationen interpoliert.

VMF1 stellt eine Weiterentwicklung der Vienna Mapping Function (VMF) dar. Die b und c Koeffizienten für die Hydrostatic Mapping Function wurden neu bestimmt, der c - Koeffizient ist nun abhängig vom gewählten Tag (Day of the Year).

In der Entwicklung der VMF1 wurde das Hauptaugenmerk auf die Verbesserung der Wiederholgenauigkeit von VLBI - Basislinien gelegt. Die Druckdaten sind aber nicht nur für die erwähnten Stationen erhältlich, sie werden auch über ein globales Grid (2.5 x 2.0 Grad) berechnet. Die Datensätze beinhalten jeweils 24 - Stunden Blöcke der Stationen. Pro Tag und Station entstehen vier Datensätze im Abstand von sechs Stunden.

| 2014001.vmf1_r | | | | | | | | | | |
|----------------|----------|------------|------------|--------|--------|-------|---------|-------|------|-------|
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | T |
| 377 WESTFORD | 56658.00 | 0.00120113 | 0.00049225 | 2.2867 | 0.0240 | 258.9 | 1004.14 | -4.96 | 2.45 | 115.6 |
| 378 WESTFORD | 56658.25 | 0.00119952 | 0.00054717 | 2.2969 | 0.0168 | 255.3 | 1007.79 | -7.11 | 1.77 | 115.6 |
| 379 WESTFORD | 56658.50 | 0.00120189 | 0.00055610 | 2.3048 | 0.0174 | 255.2 | 1011.73 | -7.27 | 1.72 | 115.6 |
| 380 WESTFORD | 56658.75 | 0.00120463 | 0.00064294 | 2.3059 | 0.0273 | 255.0 | 1011.96 | -4.61 | 1.67 | 115.6 |
| 381 WETTZELE | 56658.00 | 0.00121166 | 0.00052933 | 2.1488 | 0.0366 | 267.2 | 942.36 | 0.59 | 4.65 | 622.6 |
| 382 WETTZELE | 56658.25 | 0.00120910 | 0.00052991 | 2.1486 | 0.0391 | 266.4 | 942.44 | -0.84 | 4.10 | 622.6 |
| 383 WETTZELE | 56658.50 | 0.00120674 | 0.00049218 | 2.1484 | 0.0651 | 267.6 | 943.15 | -0.48 | 5.60 | 622.6 |
| 384 WETTZELE | 56658.75 | 0.00121105 | 0.00053903 | 2.1441 | 0.0657 | 267.2 | 941.34 | 2.27 | 6.34 | 622.6 |
| 385 WSTRBOR7 | 56658.00 | 0.00121844 | 0.00058533 | 2.2844 | 0.1048 | 268.2 | 1002.96 | 5.92 | 6.32 | 29.8 |
| 386 WSTRBOR7 | 56658.25 | 0.00121381 | 0.00046404 | 2.2839 | 0.0551 | 272.0 | 1003.20 | 5.82 | 8.52 | 29.8 |
| 387 WSTRBOR7 | 56658.50 | 0.00121792 | 0.00051186 | 2.2797 | 0.0689 | 270.6 | 1002.40 | 6.78 | 8.15 | 29.8 |
| 388 WSTRBOR7 | 56658.75 | 0.00122203 | 0.00059481 | 2.2685 | 0.1103 | 268.9 | 997.28 | 7.15 | 7.11 | 29.8 |
| 389 WSTRBORK | 56658.00 | 0.00121843 | 0.00058531 | 2.2843 | 0.1048 | 268.2 | 1002.92 | 5.92 | 6.32 | 30.1 |
| 390 WSTRBORK | 56658.25 | 0.00121380 | 0.00046403 | 2.2838 | 0.0551 | 272.0 | 1003.17 | 5.81 | 8.52 | 30.1 |
| 391 WSTRBORK | 56658.50 | 0.00121791 | 0.00051185 | 2.2796 | 0.0689 | 270.6 | 1002.36 | 6.78 | 8.15 | 30.1 |
| 392 WSTRBORK | 56658.75 | 0.00122202 | 0.00059479 | 2.2684 | 0.1103 | 268.9 | 997.24 | 7.14 | 7.11 | 30.1 |

Abbildung 3.1: Ausschnitt eines .vmf1 - Files der TU Wien, siehe: <http://ggosatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY/SITE/VLBI/>, [http://ggosatm.hg.tuwien.ac.at, 2014a]

Jede Zeile dieser Zeitreihen enthält folgende Informationen, siehe Abb. 3.1:

- Spalte 1 : Stationsname (8 Zeichen)
- Spalte 2 : Zeit (MJD - Modifiziertes Julianisches Datum)
- Spalte 3 : Hydrostatischer Koeffizient 'ah'
- Spalte 4 : Feuchte - Koeffizient 'aw'
- Spalte 5 : hydrostatic zenith delay [m]
- Spalte 6 : wet zenith delay [m]

- Spalte 7 : mittlere Temperatur [K]
- Spalte 8 : Druck an der Station [hPa]
- Spalte 9 : Temperatur an der Station [C°]
- Spalte 10 : Wasserdampfdruck an der Station [hPa]
- Spalte 11 : geschätzte orthometrische Höhe [m]

3.1.2 Referenzdruck - GPT2

Der Referenzdruck für die Berechnung der Regressionskoeffizienten wird über die GPT2 - Funktion, entwickelt an der TU Wien, bereitgestellt. Das GPT2 - Modell kombiniert laut Lagler et al. (2013) die beiden Modelle GPT (Global Pressure and Temperature) und GMF (Global Mapping Function). Beide arbeiten mit Langzeitmittelwerten von Oberflächenwerten aus numerischen Wettermodellen. Schwachstellen dieser Modelle sind vor allem die limitierte räumliche und zeitliche Flexibilität. Diese Probleme wurden mit der Einführung des GPT2 - Modells beseitigt. GPT2 erreicht im Vergleich zu GPT und GMF eine Reduktion der jährlichen und halbjährlichen Amplitudendifferenzen in den Stationshöhen von 40%.

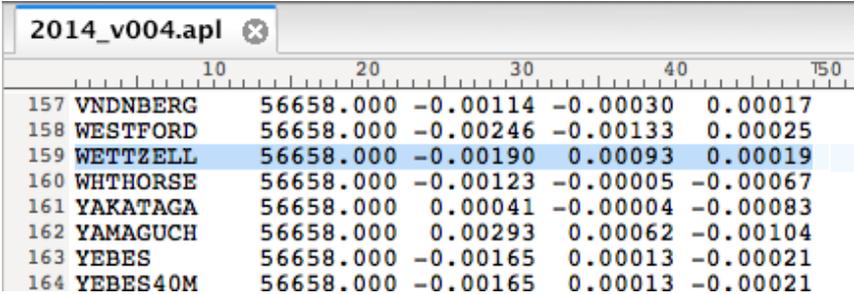
Verwendung findet das GPT2 - Modell bei der Bestimmung von tropospheric slant delays in den Auswertungen von GNSS, DORIS und VLBI. Mit dem GPT2 - Modell ist es möglich, für jeden beliebigen Ort und Zeitpunkt Werte für Druck, Temperatur, Wasserdampfdruck, Mapping Function Koeffizienten und Gradienten zu interpolieren. Die Berechnungen beruhen auf einem 5° - Grid an Mittelwerten. Als Input werden hierbei der gewünschte Zeitpunkt (*doy* - Day of the Year) und die Koordinaten des Punktes (*geographische Breite und Länge, ellipsoidische Höhe*) benötigt. Weiters kann definiert werden, ob für diesen Punkt nur ein Wert über den gesamten Zeitraum (*no time - variation*), oder für jeden gewünschten Zeitpunkt ein eigener Wert berechnet werden soll (*with time - variation*).

3.2 APL - Daten

Die Auswirkung der atmosphärischen Auflast auf die Erdkruste wird in Form von vertikalen und horizontalen Verschiebungen dargestellt und geliefert. Laut Petrov (2012) beziehen sich die Datensätze mit den 3-D Verschiebungen auf den Massenmittelpunkt der Erde und verfügen über eine Auflösung von 6 Stunden. Sie werden täglich für insgesamt

824 Standorte an VLBI, SLR, GPS und DORIS - Stationen innerhalb von 24 Stunden berechnet und online zur Verfügung gestellt. Für die Berechnungen dieser Arbeit werden nur die Daten bezüglich der VLBI - Stationen herangezogen, insgesamt stehen hier Daten für 183 Stationen zur Verfügung.

Die hier verwendeten 'Vienna - APL' sind Non-Tidal Daten. Die täglichen und halbtäglichen Signale S1 und S2 wurden bereits entfernt, siehe Kap. 2.3.3. In den Datensätzen von ECMWF sind diese Signale noch vorhanden. Weiters wurde die inverse Barometer - Annahme berücksichtigt und implementiert.



| | Station Name | Time (MJD) | radiale Verschiebung [m] | Verschiebung Richtung Osten [m] | Verschiebung Richtung Norden [m] |
|-----|--------------|------------|--------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| 157 | VNDNBERG | 56658.000 | -0.00114 | -0.00030 | 0.00017 |
| 158 | WESTFORD | 56658.000 | -0.00246 | -0.00133 | 0.00025 |
| 159 | WETTZELL | 56658.000 | -0.00190 | 0.00093 | 0.00019 |
| 160 | WHTHORSE | 56658.000 | -0.00123 | -0.00005 | -0.00067 |
| 161 | YAKATAGA | 56658.000 | 0.00041 | -0.00004 | -0.00083 |
| 162 | YAMAGUCH | 56658.000 | 0.00293 | 0.00062 | -0.00104 |
| 163 | YEBES | 56658.000 | -0.00165 | 0.00013 | -0.00021 |
| 164 | YEBES40M | 56658.000 | -0.00165 | 0.00013 | -0.00021 |

Abbildung 3.2: Ausschnitt eines .apl - Files der TU Wien, siehe <http://ggosatm.hg.tuwien.ac.at/LOADING/VERSION4/VLBI/>, <http://ggosatm.hg.tuwien.ac.at>, 2014b]

Die einzelnen Spalten in Abb. 3.2 haben folgende Bedeutung:

- Spalte 1 : Stationsname (8 Zeichen)
- Spalte 2 : Zeit (MJD)
- Spalte 3 : radiale Verschiebung [m]
- Spalte 4 : Verschiebung Richtung Osten [m]
- Spalte 5 : Verschiebung Richtung Norden [m]

3.3 ECMWF, GSFC

Das ECMWF ist das Europäische Zentrum für mittelfristige Wettervorhersagen (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). Das rund um die Uhr betriebene Forschungsinstitut sieht seine Kernaufgaben unter anderem wie folgt:

- Numerische Wetterprognosen, Beobachtung des Systems Erde
- Wissenschaftliche und technische Forschung

- Überwachung der Atmosphärenzusammensetzung
- Analyse der Luftqualität
- Klimabeobachtung
- Hydrologische Vorhersagen

Das ECMWF ist eine unabhängige internationale Organisation mit derzeit 34 Mitgliedsstaaten, siehe ECMWF (2012). Der österreichische Vertreter ist die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, kurz ZAMG (www.zamg.ac.at). Gegründet wurde die ECMWF im Jahr 1975 und hat ihren Sitz in Reading, Großbritannien.

Die Berechnungen der mittelfristigen, globalen Wetterprognosen basieren auf physikalischen Modellen und werden zwei Mal täglich durchgeführt und den nationalen Meteorologieanstalten der Mitgliedsstaaten zur Verfügung gestellt.

Das **Goddard Space Flight Center** (GSFC) ist laut NASA (2014) ein wissenschaftliches Labor der NASA für Forschung und Betrieb unbemannter Raumfahrt. Viele NASA Missionen zum Zwecke der Erdbeobachtung, Astronomie und Weltraumphysik werden vom GSFC geleitet. Es wurde 1959 gegründet und hat seinen Hauptsitz in Greenbelt, Maryland, USA.

Eine Forschungsgruppe des GSFC beschäftigt sich mit der VLBI. Sie hat unter anderem die Aufgabe, anhand der gesammelten Daten die atmosphärischen Auflasteffekte zu berechnen. Die Ergebnisse werden in Form von 3D - Verschiebungen als Zeitreihen für viele Stationen der Weltraumgeodäsie veröffentlicht, siehe Petrov (2012).

Kapitel 4

VLBI - Very Long Baseline Interferometry

Die Ausführungen dieses Kapitels halten sich, wenn nicht anders angegeben an Schuh und Behrend (2012). Die VLBI ist seit den 1970er Jahren eine der führenden weltraumgeodätischen Methoden zur präzisen Koordinatenbestimmung auf der Erde, Überwachung von Variablen wie Erdrotation- und Orientierung mit höchster Präzision und der Bestimmung vieler weiterer erdbezogenen Parameter. Durch die Bestimmung hochpräziser Koordinaten von extragalaktischen Radioquellen entsteht auch eine wichtige Verbindung zur Astronomie. Der Internationale VLBI Service für Geodäsie und Astrometrie (IVS) hat es sich zum Ziel gesetzt, auf der Erde in Zukunft Genauigkeiten von 1 mm in der Position bzw. von 0.1 mm/Jahr in der Geschwindigkeit zu erreichen. Beobachtungen sollen 24 Stunden täglich erfolgen und die Daten sollen beinahe in Echtzeit verfügbar sein.

4.1 Interferometrie auf langen Basislinien

Die Anfänge der VLBI reichen zurück bis Mitte der 1960er Jahre. Ursprünglich konzipiert als Hilfsmittel für die Radioastronomie, wurden bereits früh Aufgaben für Geodäsie, Astronomie und Uhrensynchronisation durchgeführt. Genauigkeiten von 2-5 m wurden erreicht, die Position von Radioquellen konnte auf 1'' genau bestimmt werden.

Experimente mit dem Mark I System zeigten einen Fehler der Basislinienlänge von ca. 70 mm, die Genauigkeit lag im Bereich von mehreren Dezimetern. Ergebnisse zum Ende

des Jahrhunderts zeigen einen formalen Fehler von unter 1 mm für die besten Basislinien bei Genauigkeiten von 5-10 mm, was die außerordentliche Weiterentwicklung des VLBI Systems unterstreicht. Neben der Technologie wurde auch die Organisation ständig verbessert.

Der reibungslose Ablauf aller Aufgaben wurde durch die Einführung des Internationalen VLBI Service für Geodäsie und Astrometrie (IVS) und des Globalen Geodätischen Beobachtungs - Systems (GGOS) sichergestellt. Das IVS koordiniert die wissenschaftlichen operativen Tätigkeiten der VLBI. Vor Einführung des IVS wurden die meisten dieser Aufgaben durch nationale oder bilaterale Abkommen organisiert.

4.2 Prinzip

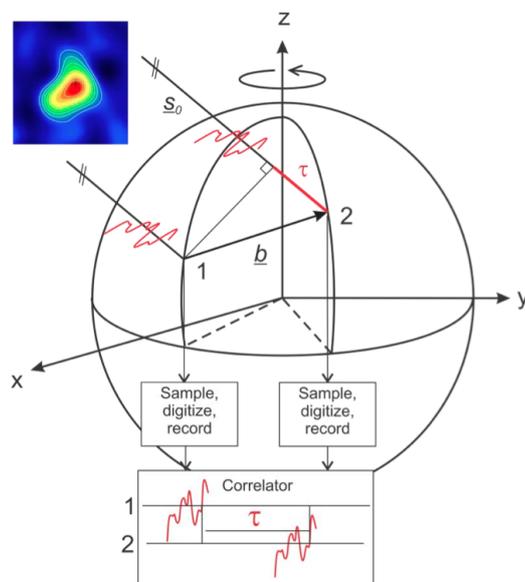


Abbildung 4.1: Grundprinzip der VLBI. [Schuh und Böhm, 2013]

Präzise Messungen zu extragalaktischen Radioquellen (Quasaren) in zwei oder mehreren Radioteleskopen stellen die Hauptbeobachtung der VLBI dar. Aus diesen Messungen wird die Laufzeitverzögerung des Signals an den Stationen bestimmt. Als Basislini-
länge wird der Abstand b der Stationen zueinander verstanden. Die Laufzeitdifferenz τ kann bestimmt werden, da von einer ebenen Wellenfront ausgegangen wird. Diese bewegt sich ausgehend von einer Radioquelle entlang des Einheitsvektors s_0 entspricht dabei dem Einheitsvektor Richtung Teleskop. Die Teleskope der gewählten Basislinien sind alle auf diese Radioquelle ausgerichtet und um den Vektor b voneinander entfernt.

So trifft die Wellenfront zu unterschiedlichen Zeiten bei den Teleskopen ein. Die Laufzeitdifferenz (geometric delay) kann nun über folgende Beziehung bestimmt werden: [Schuh und Böhm, 2013]

$$\tau_g = -\frac{\mathbf{b} \cdot \mathbf{s}_0}{c} = t_2 - t_1. \quad (4.1)$$

Das Skalarprodukt aus \mathbf{b} und \mathbf{s}_0 , dividiert durch die Lichtgeschwindigkeit c ergibt die Laufzeitdifferenz τ_g . Um eine Überbestimmung des Basislinien - Vektors und der Koordinaten der beobachteten Radioquellen zu erzielen, wird die geometrische Verzögerung τ_g für mehrere Radioquellen durch aufeinanderfolgende Beobachtungen in sehr kurzen Abständen wiederholt bestimmt. Das Grundprinzip der VLBI stellt die Bestimmung der Laufzeitdifferenz des Signals einer extragalaktischen Radioquelle (Quasar) dar, welches in zwei oder mehreren Radioteleskopen empfangen wird.

Die abgetastete Quasar - Strahlung wird gemeinsam mit hochgenauen Zeitinformationen der Stationen digital aufgezeichnet und an eine VLBI Korrelator - Einrichtung weitergeleitet. Hier wird eine Kreuzkorrelation durchgeführt, um die Zeitverzögerung der Datensätze zu bestimmen. Dazu müssen die Daten über den Integrationszeitraum um den Einfluss der Erdrotation korrigiert werden: In der Zeit, in der die Wellenfront die Basislinie b zurücklegt, hat sich die Erde bereits wieder um einen kleinen Betrag bewegt. Die relative Verzögerung ergibt den Wert τ , hier zeigt die Kreuzkorrelationsfunktion ihr Maximum. Die Präzision, mit der die Signalverzögerung berechnet werden kann, ist durch σ_t gegeben:

$$\sigma_\tau = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{SNR \cdot B_{eff}}. \quad (4.2)$$

SNR ist hierbei das Signal - to - Noise - Ratio, das Signal - Rausch - Verhalten, B_{eff} beschreibt die effektive Bandbreite der aufgezeichneten VLBI Signale.

Die im Korrelator gemessene VLBI Signalverzögerung τ wird hauptsächlich von der geometrischen Verzögerung τ_g beeinflusst. Diese ist aber nicht der einzige Einfluss der beachtet werden muss. Weitere Korrekturterme müssen der geometrischen Verzögerung

beigefügt werden und ergeben die fundamentale Beobachtungsgleichung der VLBI: [Schuh und Böhm, 2013]

$$\tau = \tau_g + \tau_{ab} + \tau_{clk} + \tau_{inst} + \tau_{trop} + \tau_{iono} + \tau_{rel}. \quad (4.3)$$

Wobei die einzelnen Terme folgende Einflüsse berücksichtigen:

- τ_g die Laufzeitdifferenz;
- τ_{ab} die tägliche Aberration;
- τ_{clk} die Signalverzögerung aufgrund von schlecht synchronisierten Referenzuhren in den Observatorien;
- τ_{inst} die Signalverzögerung aufgrund der Fortpflanzung durch Kabelläufe und anderen Instrumentarien;
- τ_{trop} die Laufzeitverzögerung aufgrund der Troposphäre (nicht - ionisierter Teil der Atmosphäre);
- τ_{iono} die Laufzeitverzögerung aufgrund der Ionosphäre (ionisierter Teil der Atmosphäre);
- τ_{rel} die relativistischen Effekte

Mit Ausnahme der relativistischen Effekte sind alle Terme kleine Störungen, welche die geometrische Verzögerung mit Fehlern behaften. Der Einfluss alle dieser Effekte muss berücksichtigt werden und durch geeignete Methoden eliminiert werden:

- Berechnung durch bekannte physikalische Gesetze (τ_{ab} , τ_{rel})
- Kalibrierung (τ_{inst})
- Kleinste - Quadrate - Schätzung durch Modellierung, unter Berücksichtigung von lokalen Daten (τ_{clk} , τ_{trop})
- Eliminierung durch Zwei - Frequenz - Beobachtungen (τ_{iono})

Die Beobachtung τ wird auch *Gruppenverzögerung (Group Delay)* genannt. Diese Gruppenverzögerung $\tau_{gd} = \tau$ kann auch als

$$\tau_{gd} = \frac{\delta\phi}{\delta\omega} \quad (4.4)$$

geschrieben werden mit $\omega = 2\pi\nu$ und Φ als Phase. Nach Schuh und Behrend (2012) ist die

Gruppenverzögerung die Steigung der Phase bezüglich der Frequenz. Eine sehr präzise Beobachtung ist die Phasenverzögerung, die wie folgt definiert ist:

$$\tau_{pd} = \frac{\phi}{\omega}. \quad (4.5)$$

Um die Phase interpretieren zu können, muss die Anzahl der unbekannt Phasendurchgängen bestimmt werden, Schuh und Behrend (2012). Man spricht hier vom Problem der Mehrdeutigkeiten, auch Ambiguities genannt.

Die Geometrie des System setzt sich zusammen aus:

- Antennenpositionen,
- Positionen der Radioquellen,
- Laufzeitverzögerungen.

Ist diese Geometrie nicht genauer als eine Wellenlänge bekannt, kann zu Fehlern bei der Zählung der Wellendurchgänge kommen. Sind genügend Messungen der Phasenverzögerung vorhanden, kann das korrekte Ergebnisse durch Lösung mehrerer Ambiguity Sets erzielt werden. Mit wachsender Wellenlänge wird dieser Prozess aber immer schwieriger, da jede Messung eine unterschiedliche Ambiguity aufweisen kann.

4.3 Anwendungen und Produkte

Die VLBI bietet eine Vielzahl von Produkten. Diese stehen in regelmäßigen Abständen öffentlich zur Verfügung.

Tab. 4.1 zeigt die wichtigsten Produkte des IVS, unter dessen Schirm die VLBI betrieben wird. Dazu entstehen noch eine Vielzahl von Nebenprodukten auf welche hier nicht näher eingegangen wird. Im Anschluss widmet sich dieses Kapitel den Hauptprodukten der VLBI.

Tabelle 4.1: Zusammenfassung der Hauptprodukte des IVS. [Schuh und Böhm, 2013]

| Produkte | Spezifikation | Status 2010 |
|------------------------|----------------------|----------------------|
| Polbewegung x_p, y_p | Genauigkeit | 50-80 μs |
| | Produktverfügbarkeit | 8 -10 Tage |
| | Auflösung | 1 Tag |
| | Auflösungsfrequenz | ~ 3 Tage/Woche |
| UT1 - UTC | Genauigkeit | 3-5 μs |
| | Produktverfügbarkeit | 8 -10 Tage |
| | Auflösung | 1 Tag |
| | Auflösungsfrequenz | ~ 3 Tage/Woche |
| UT1 - UTC (Intensives) | Genauigkeit | 15-20 μs |
| | Produktverfügbarkeit | 1 Tag |
| | Auflösung | 1 Tag |
| | Auflösungsfrequenz | 7 Tage/Woche |
| Himmelpol dX & dY | Genauigkeit | 50 μs |
| | Produktverfügbarkeit | 8 -10 Tage |
| | Auflösung | 1 Tag |
| | Auflösungsfrequenz | ~ 3 Tage/Woche |
| TRF (x,y,z) | Genauigkeit | 5mm |
| CRF (α, δ) | Genauigkeit | 40-250 μs |
| | Auflösungsfrequenz | 1 Jahr |
| | Produktverfügbarkeit | 3 Monate |

4.3.1 Referenzrahmen

In der Geodäsie wird per Konvention zwischen Referenzrahmen und Referenzsystemen unterschieden. Ein Referenzsystem ist die Definition eines Koordinatensystems und setzt sich aus Informationen wie Ursprung, Orientierung und Lage der Koordinatenachsen, sowie den dazugehörigen mathematischen und physikalischen Modellen zusammen. Ein Referenzrahmen ist die Realisierung eines Referenzsystems. Die Realisierung erfolgt durch Beobachtungen und besteht aus Kontrollpunkten auf der Erde oder am Himmel. Ein Referenzrahmen ist durch einen Katalog aus Positionen und Bewegungen zu einer bestimmten Epoche beschrieben.

4.3.1.1 Terrestrischer Referenzrahmen

Die VLBI trägt bei der Erstellung des Internationalen Terrestrischen Referenzrahmens (ITRF) eine entscheidende Rolle. Neben Zeitserien von DORIS-, GPS-, und SLR-Daten

werden auch VLBI-Daten zur Realisierung des Internationalen Referenzsystems (ITRS) verwendet. Ergebnisse der VLBI sind vor allem für die Bestimmung des Maßstabs des ITRF von großer Bedeutung: Hochpräzise Delay-Messungen können sehr einfach durch Anbringen der Lichtgeschwindigkeit in metrische Werte umgewandelt werden. Für die letzte Realisierung, das ITRF2008, wurden Daten von insgesamt 934 Stationen verwendet. Dazu zählen Stationen aller Missionen der Weltraumgeodäsie.

Ein Großteil dieser Stationen befindet sich auf der nördlichen Halbkugel.

Laut [Schuh und Böhm, 2013] wird die Genauigkeit des Ursprungs und des Maßstabs mit cm - Genauigkeit geschätzt.

4.3.1.2 Himmelfester Referenzrahmen

Himmelfeste Referenzrahmen werden durch extragalaktische Objekte definiert. Das Konzept ist einfach: Das Universum als Ganzes ist nicht in Rotation, also können auch weit entfernte Objekte keine Rotationsbewegung haben. In VLBI - Sessions werden die relativen Positionen von beobachteten Radioquellen bestimmt. Täglich werden unterschiedliche Radioquellen beobachtet. Über idente Quellen werden die Datensätze miteinander verbunden. Der Internationale Himmelfeste Referenzrahmen (ICRF) ist ein Katalog mit den Positionen von extragalaktischen Radioquellen. Diese Radioquellen definieren die Orientierung der Achsen des Internationalen Himmelfesten Referenzsystems (ICRS), dessen Ursprung im Baryzentrum des Sonnensystems liegt. Die Orientierung der Achsen verfügt über eine Genauigkeit von 0.02 mas. [Schuh und Behrend, 2012]

Seit 2010 ist die zweite Generation des ICRF in Verwendung, der ICRF2. Er beinhaltet Positionen von 3414 extragalaktischen Radioquellen.

4.3.2 Erdorientierungsparameter

Der Übergang vom Himmelssystem zum terrestrischen System bedarf einiger Rotationen. Diese Rotationen sind allgemein als Erdorientierungsparameter bekannt.

Zu den Erdorientierungsparametern zählen:

- Präzession und Nutation
- Erdrotation
- Polbewegung

Die VLBI ist dabei die einzige Methode, die alle Erdorientierungsparameter beobachten kann. Weiters kann mit Hilfe der VLBI die Universal Time UT1 über einen Zeitraum von 24 Stunden mit einer Genauigkeit von 6-7 μ s geschätzt werden. UT1 wird über die Beobachtung des Drehwinkels der Erde gewonnen. Systeme zur Satellitenbeobachtung wie GNSS haben das Problem, dass die Erdrotation nicht von einer Rotation der Knoten der Satellitenorbits zu unterscheiden ist [Schuh et al., 2009] Durch die Beobachtung von extragalaktischen Objekten umgeht die VLBI dieses Problem.

4.4 IVS, GGOS und die Zukunft der VLBI

Im Gegensatz zu den 1990er Jahren, wo die meisten geodätischen Tätigkeiten unter lokalen und regionalen Rahmenbedingungen stattfanden, ist die Geodäsie nun in globalen Strukturen organisiert. Durch Initiative der Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG) wurden zahlreichen fachspezifische Services eingeführt. Dazu zählt auch der Internationale VLBI Service für Geodäsie und Astrometrie (IVS), er koordiniert und integriert weltweit die Aktivitäten der fachspezifischen Services.

4.4.1 International VLBI System for Geodesy & Astrometry

Der IVS ist ein Zusammenwirken internationaler Organisationen, die VLBI Komponenten unterstützen oder betreiben. Seit dem 1. März 1999 ist der IVS Teil der IAG. Die Aufgabenstellung des IVS sind wie folgt definiert: [IVS, 2011]

1. Förderung und Realisierung von VLBI Programmen durch enge Zusammenarbeit der teilnehmenden Organisationen
2. Förderung von Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten
3. Verbesserung der Ausbildung und Schulung von VLBI - Anwendern durch Workshops, Berichte u.ä.
4. Unterstützung bei der Integration neuer VLBI - Komponenten
5. Interaktion mit den Anwendern von VLBI - Produkten

Um diese Aufgaben erfüllen zu können, kommen auf das IVS viele Pflichten zu:

- Koordination der VLBI - Beobachtungsprogramme

- Leistungsstandards für VLBI - Stationen festlegen
- Konventionen über Datenformate -und Produkte
- Vorschläge zur Weiterentwicklung der VLBI - Auswertesoftware
- Standards für die Dokumentation der VLBI - Auswertung
- Einrichtung geeigneter Produktübermittlung, um Qualität und Pünktlichkeit sicherzustellen

Der gesamte VLBI - Datensatz ist in IVS Data Centers archiviert und ist für Forschungszwecke allgemein verfügbar. Die Datensätze enthalten alle Daten seit 1979.



Abbildung 4.2: die globale Verteilung der IVS Komponenten. [Schuh und Behrend, 2012]

Zur Sicherstellung der täglichen Koordination dieser Tätigkeiten, ist das IVS in 80 permanente Komponenten in 20 Ländern aufgeteilt. Diese werden von weiteren ca. 40 Einrichtungen unterstützt, siehe Abb. 4.2:

- 30 Network Stations: Aufzeichnung der VLBI Daten

- 3 Operation Center: Koordination der Tätigkeiten der Network Stations
- 6 Correlators: Verarbeitung der gesammelten Daten, Weitergabe der Daten an Analysis Centers
- 6 Data Center: Vertrieb der Produkte an die User, Bereitstellung von Speicherplatz und Archivierung
- 26 Analysis Center: Auswertung der Daten, Ergebnisse und Produkte erstellen
- 7 Technology Development Centers: Entwicklung neuer VLBI Technologie
- 1 Coordinating Center: Koordination der täglichen und langfristigen Tätigkeiten

4.4.2 Global Geodetic Observing System

Durch die weitreichenden Aufgaben und Herausforderungen der Geodäsie steigt die Anzahl der fachspezifischen Services ständig. Dies verlangt ein Bindeglied zwischen der IAG und den internationalen Erdbeobachtungs- und Forschungseinrichtungen. Aus diesem Grund führte die IAG 2003 das Global Geodetic Observing System, kurz GGOS, ein. Seit 2007 fungiert GGOS als das ständige Beobachtungssystem der IAG und stellt die nötige geodätische Infrastruktur für das Monitoring der Erde und der Global Change Forschung zur Verfügung.

GGOS ist zuständig für die Bereitstellung der drei grundlegenden geodätischen Beobachtungen und deren Variationen:

- die Form der Erde,
- das Gravitationsfeld der Erde,
- und die Rotation der Erde.

Dies bildet die Basis zur Erstellung von Referenzrahmen und verlangt nach einer engen Zusammenarbeit der zuständigen Services. GGOS bietet dazu die Rahmenbedingungen, die Beschaffung, Transfer und Prozessierung beinhalten.

Für die Zukunft verfolgt GGOS das Ziel, Hauptquelle für alle globalen geodätischen Informationen zu werden. Genauigkeit und Konsistenz der Daten wird stetig verbessert werden. [GGOS, 2014]

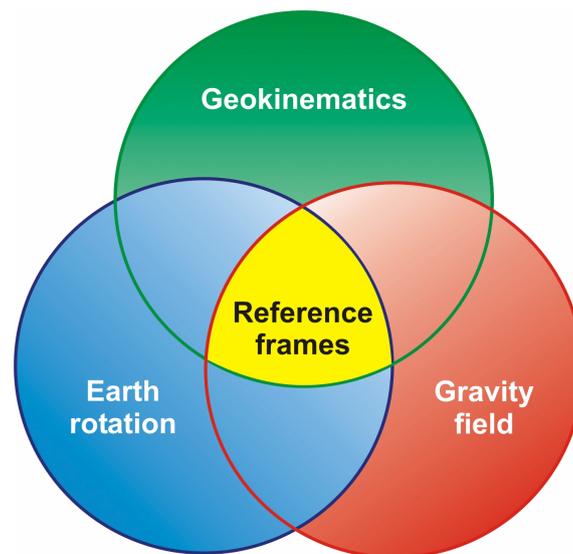


Abbildung 4.3: Die drei Säulen der Geodäsie bieten die Basis für Referenzrahmen. [www.iag-ggos.org, 2014]

4.4.3 Die Zukunft der VLBI

Bereits von Beginn an strebte die Weltraumgeodäsie nach besserer Genauigkeit, Kontinuität und rechtzeitiger Bereitstellung der geodätischen Daten. Heutzutage wird es immer wichtiger, das Verständnis über das System Erde zu erweitern. Bewohnern von Küstengebieten kann geholfen werden, indem klimabedingte Veränderungen der Meereshöhe besser verstanden werden und Vorhersagen getroffen werden können. Um Aufgaben wie diese zu bewältigen, sind sehr genaue Referenzrahmen notwendig. [Schuh und Behrend, 2012]

Das derzeitige VLBI - System ist durch die wachsenden Anforderungen an seinem Limit angelangt. Es wurden bereits die drei großen Anforderungen für die nächste VLBI - Generation festgelegt:

1. Genauigkeiten von 1 mm in der Position und 1 mm/Jahr in der Geschwindigkeit,
2. kontinuierliche Messung von Stationskoordinaten und Erdorientierungsparametern,
3. Bereitstellung von Erstprodukten in weniger als 24 h.

In Anbetracht der technologischen Entwicklungen erscheint die Realisierung dieser Ziele machbar: Datenübertragungsraten werden ständig erhöht, Antennen sind schneller und billiger und auch die digitale Signalprozessierung wurde verbessert. Eine Arbeitsgruppe des IVS beschäftigt sich mit der Entwicklung der nächsten VLBI - Generation, VLBI2010.

Kapitel 5

Berechnung der Regressionskoeffizienten

Um Regressionskoeffizienten berechnen zu können, müssen für die jeweiligen Stationen vollständige Datensätze vorhanden sein. Welche Daten dafür zur Verfügung stehen müssen, geht aus der Beziehung für die Bestimmung der radialen Auflastdeformation hervor, [Böhm und Schuh, 2013]:

$$dr = c \cdot (p - p_0). \quad (5.1)$$

dr entspricht der radialen Deformation, c dem Regressionskoeffizienten, die Terme p und p_0 stehen für den lokalen bzw. Referenzdruck an der Station. Die radiale Deformation und der lokale Druck gehen aus den Datensätzen hervor, der Referenzdruck p_0 wird mit Hilfe der GPT2 - Funktion [3.1.2] berechnet, einzig der Regressionskoeffizient c ist eine Unbekannte.

Vor den eigentlichen Berechnungen zu dessen Bestimmung müssen also die Datensätze aller Stationen hinsichtlich ihrer Vollständigkeit untersucht werden. Es können nur Koeffizienten für Zeitpunkte erstellt werden, zu denen dr und p in den Datensätzen vorhanden sind.

Für viele Stationen stehen keine Auflastdaten zur Verfügung. Diese Stationen können somit nicht bei der Berechnung der Regressionskoeffizienten berücksichtigt werden. Einige Stationen weisen nur einen relativ kurzen Zeitraum auf, in dem sowohl Druck- als auch Deformationsdaten vorhanden sind. Unabhängig davon werden für diese Stationen den-

noch Regressionskoeffizienten berechnet, Ausreißer in den Daten sind jedoch schwerer zu erkennen.

Insgesamt wurden in den VLBI - und APL - Datensätzen ('Vienna - APL') **72 Stationen** gefunden, die sich dementsprechend überlappen. Ihre globale Verteilung ist in Abb. 5.1 ersichtlich.

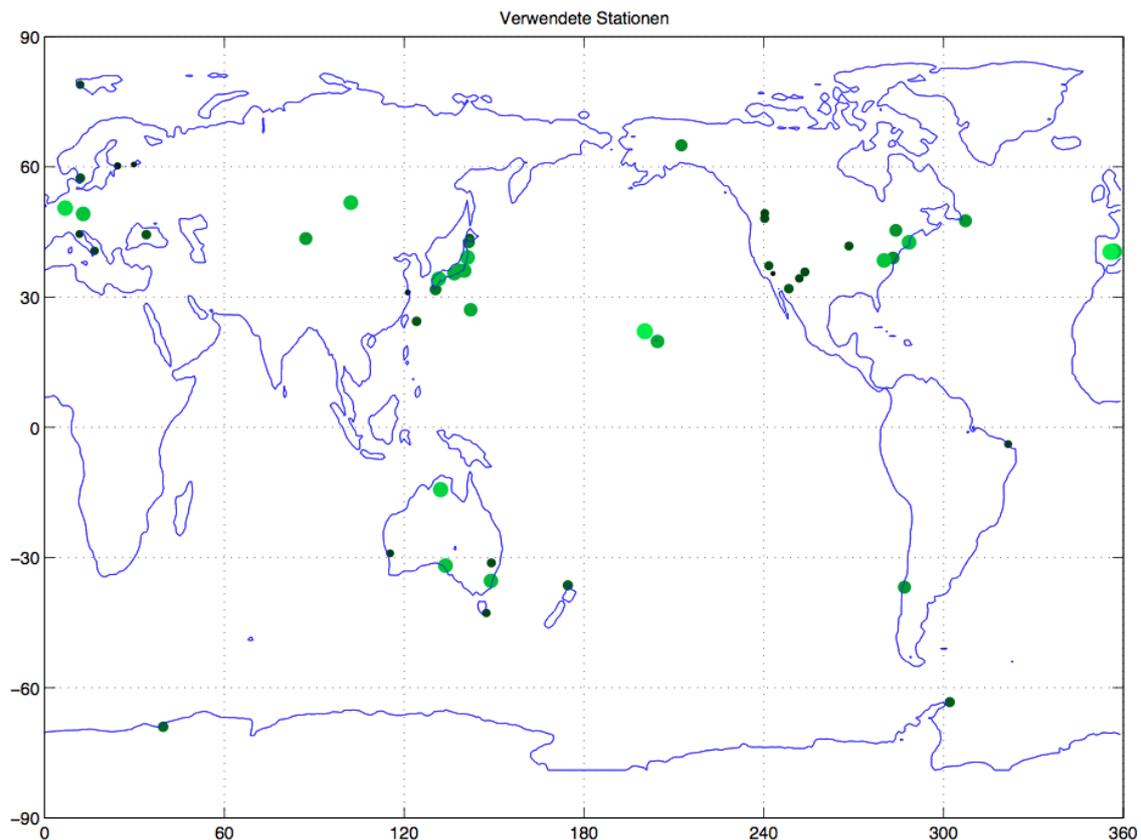


Abbildung 5.1: Verwendete Stationen zur Berechnung der Regressionskoeffizienten. Die Anzahl der Beobachtungen über 30 Jahre wird durch den Durchmesser bzw. der Farbe der Kreise dargestellt

Abb. 5.1 zeigt deutlich, dass sich ein Großteil der Stationen auf der nördlichen Halbkugel befinden. Die meisten davon wiederum in Europa und Japan. Es kann erwartet werden, dass diese ungleichmäßige Verteilung der Stationen in den Ergebnissen der Variation des Geozentrums sichtbar wird. Dies wird in Kap. 5.2.2 näher erklärt.

5.1 Regression

Die Ausführungen in diesem Unterkapitel beziehen sich auf Niemeier (2008). In vielen Bereichen der Technik werden Messreihen gewonnen, so auch in der Geodäsie. Um darin Zusammenhänge abzuschätzen, wurde die *Regressionsrechnung* entwickelt. Zur Bestimmung von Regressionskoeffizienten in der Geodäsie wird die lineare Regression verwendet.

Für die Zufallsvariable X gibt es n Stützstellen x_i . Dazu existiert jeweils eine Realisierung y_i einer Zufallsvariable Y . Besteht zwischen den Zufallsvariablen X und Y ein linearer Zusammenhang, entspricht das lineare Regressionsmodell einer Geradengleichung. Für die Realisierungen x_i und y_i lautet die Grundform der Geradengleichung

$$Y_i = b_0 + b_1 \cdot X_i. \quad (5.2)$$

Sind nur zwei Stützstellen vorhanden, ist die Aufgabe eindeutig zu lösen. Bei mehreren Stützstellen mit dazugehörigen Messwerten müssen die Parameter \mathbf{b} nach der Methode der kleinsten Quadrate geschätzt werden, d. h. die Quadratsumme der Residuen soll minimiert werden:

$$\Omega = \hat{\varepsilon}^T \hat{\varepsilon} \rightarrow \min. \quad (5.3)$$

$\hat{\varepsilon}$ entspricht dabei

$$\hat{\varepsilon} = -X \cdot \hat{\mathbf{b}} + y. \quad (5.4)$$

In Gleichung 5.2 entspricht b_0 dem Abstand auf der Y - Achse, b_1 der Steigung der Geraden.

Für die Bestimmung der Regressionskoeffizienten ist vor allem der Wert b_1 von Interesse. Die Steigung der Regressionsgerade entspricht dem gesuchten Regressionskoeffizienten.

5.2 Fester Referenzdruck für jede Station

Für beinahe alle im Zuge dieser Arbeit berechneten Reihen an Regressionskoeffizienten wurde der Referenzdruck *ohne* zeitliche Variation gewählt. Jede Station erhält *einen* fixen Wert als Referenzdruck. Dieser entstammt der in Kap. 3.1.2 erwähnten GPT2 - Funktion. Bei der Berechnung des Referenzdrucks wurde dazu bei der Ausführung der Funktion die Option 'no time variation' gewählt, der errechnete Wert des Referenzdrucks ist somit für alle Zeitpunkte gleich.

Für die Regression wird von den ausgewählten Stationen jeweils der komplette Satz an Datenpaaren zur Berechnung herangezogen.

Die Variation der Werte in den Datensätzen ist in Abb. 5.2 und Abb. 5.3 für Station WETTZELL ersichtlich: Abb. 5.2 zeigt den Verlauf des Luftdrucks für den Zeitraum Jänner 2011 bis Jänner 2014. Analog dazu wird in Abb. 5.3 der Verlauf der atmosphärischen Auflast für denselben Zeitraum dargestellt. Die Abhängigkeit zwischen den beiden Datensätzen ist sehr gut erkennbar. Besonders auffällig sind beispielsweise Bereiche des Rauschens der Werten beider Datensätze in den Zeiträumen Jänner 2012 und 2013.

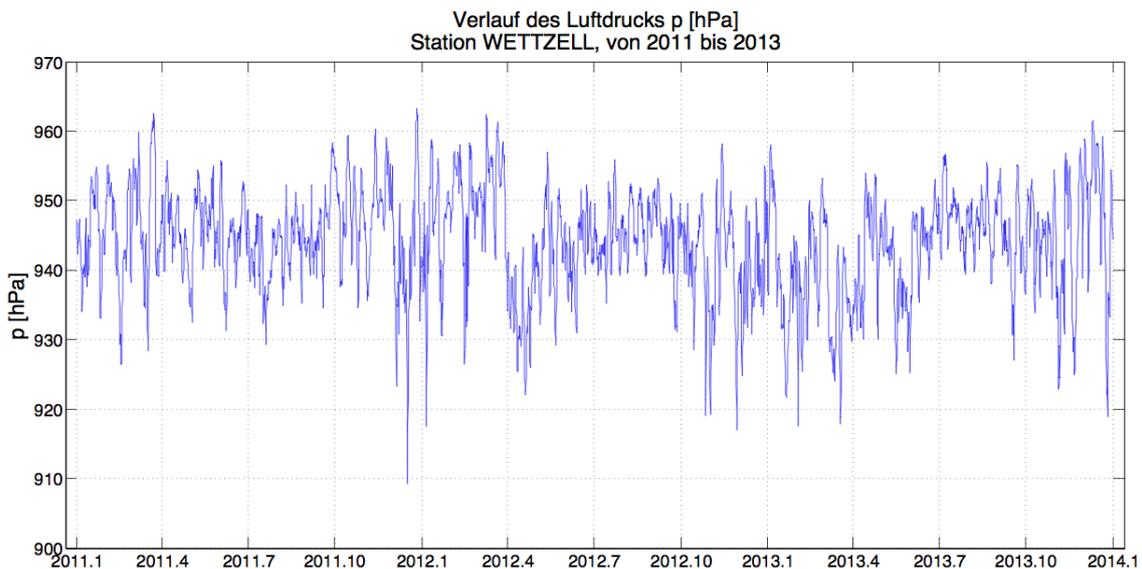


Abbildung 5.2: Zeitreihe des Luftdrucks über drei Jahre an der Station WETTZELL, 2011.1 bis 2014.1

Laut Dach et al. (2010) treten in Regionen mit großen Auflasteffekten Regressionskoeffizienten im Bereich zwischen -0.3 und -0.6 mm/hPa auf. Höhere Werte mit bis zu -1.0 mm/hPa kommen in der Himalaya - Region in Zentralasien vor. Abb. 5.4 gibt Einsicht in die globale Verteilung von Regressionskoeffizienten. Es ist gut erkennbar, dass die

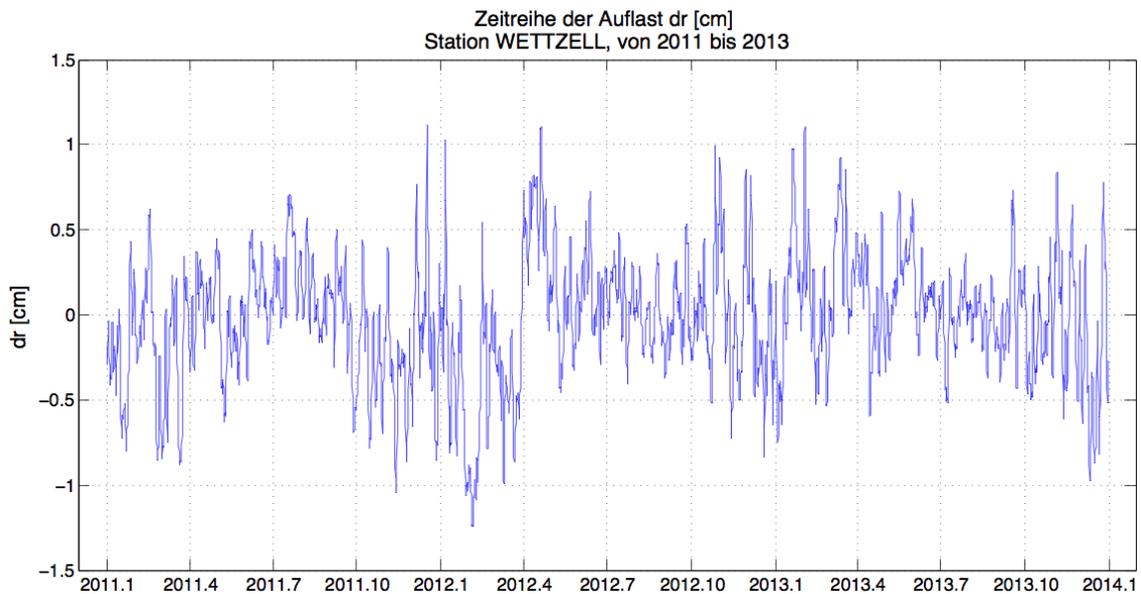


Abbildung 5.3: Zeitreihe der Vienna - APL Auflasteffekte über drei Jahre an der Station WETTZELL, 2011.1 bis 2014.1

Regressionskoeffizienten analog zum Luftdruck eine sehr großflächige Verteilung aufweisen. Aus diesem Grund kann für benachbarte Stationen davon ausgegangen werden, dass ihre Regressionskoeffizienten ähnliche Werte aufweisen. Abb. 5.5 und Abb. 5.6 zeigen graphisch das Ergebnis der Berechnungen von Regressionskoeffizienten von Petrov und Boy (2004). Die Station Wetzell, Abb. 5.5, liegt im Südosten von Deutschland und zeigt ein optimales Beispiel zur Bestimmung von Regressionskoeffizienten: Der Luftdruck zeigt mit ca. 50 hPa über den gesamten Zeitraum eine hohe Schwankung auf. Die Deformation an der Station durch Auflast ist mit ca. 30 mm ebenso sehr ausgeprägt. Aus diesen Datenmengen ergibt sich mit Hilfe der Regressionsrechnung über den gesamten Zeitraum ein Stationswert von ca. 0.34 mm/hPa. Dazu wurden die gesammelten Druck- und Deformationsdaten ab 1984 verwendet. Vergleicht man diesen Wert mit den Werten aus Abb. 5.4, können die erhaltenen Ergebnisse als plausibel eingestuft werden.

Die Vorgehensweise zur Regressionsberechnung gestaltet sich für alle Stationen gleich, so auch für die Station Kokee Park. Diese Station befindet sich auf der Pazifikinsel Kauai, Hawaii. Der Luftdruck weist mit Werten zwischen 880 hPa und 895 hPa über den gesamten Zeitraum sehr geringe Schwankungen auf. Diese geringe Variation ist durch die ganzjährig stabile Wetterlage in diesem Gebiet zu erklären. Daraus resultieren auch nur geringe Auflastdeformationen von maximal 4 mm. Die geringen Schwankungen der Auflast bedeuten für die Berechnung der Regression eine sehr flache Regressionsgerade und somit einen niedrigen Wert von nur 0.023 mm/hPa für den Regressionskoeffizienten,

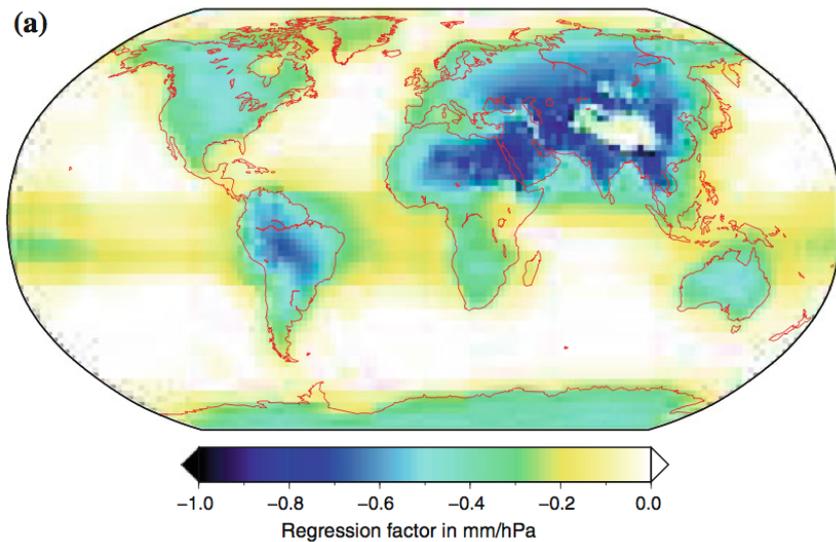


Abbildung 5.4: Regressionskoeffizienten über 15 Jahre, [Dach et al., 2010]

siehe Abb. 5.6.

5.2.1 Saisonale Variation

Die großen Schwankungen des Luftdrucks und der Deformationen an vielen Stationen lassen darauf schließen, dass die Jahreszeiten an diesen Orten Einfluss auf diese Werte haben. Es kann erwartet werden, dass sich die saisonalen Variationen in den Messwerten entsprechend der Jahreszeiten jährlich für jedes Monat wiederholen. Die Ausprägung der Jahreszeiten ist stark vom Winkel der Sonneneinstrahlung abhängig. Signifikante Auswirkungen von saisonalen Variationen werden aus diesem Grund nur in Breitengraden mit ausgeprägten Jahreszeiten erwartet. Im Zuge dieser Arbeit wurden für Vergleichszwecke die saisonalen Variationen für alle Stationen bestimmt.

Das jährliche Signal wird im Anschluss für folgende Stationen näher betrachtet, siehe auch Abb. 5.7:

- Algonquin Park, Ontario, Kanada
- Hartebeesthoek, Südafrika
- Westford, Massachusetts, USA
- Wetzell, Bayern, Deutschland
- Katherine, Northern Territory, Australien

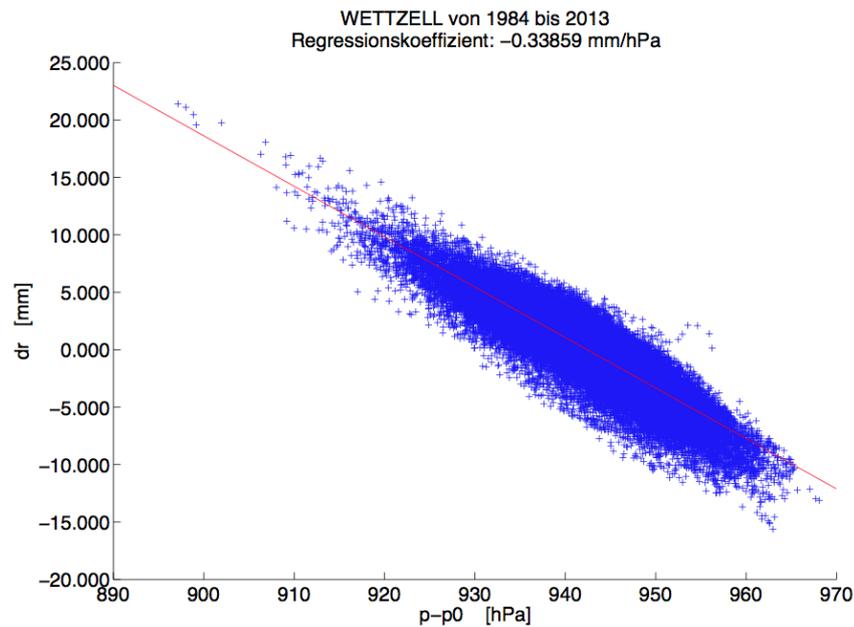


Abbildung 5.5: Bestimmung des Regressionskoeffizienten durch eine Regressionsgerade am Beispiel der Station WETTZELL, Deutschland

Betrachtet man die Lage der hier diskutierten Stationen in Abb. 5.7, erkennt man, dass die Station Hartebeesthoek vergleichsweise nahe dem Äquator liegt. Dies könnte sich wie bereits erwähnt auf die saisonalen Variationen in Luftdruck und atmosphärischer Auflast auswirken. An Stationen in diesen Breitengraden werden geringere saisonale Schwankungen in den Messwerten erwartet.

Für die Bestimmung der saisonalen Variation wurden pro Station und Monat die Werte des lokalen Luftdrucks und der atmosphärischen Auflast zusammengefasst und gemittelt. Es ist zu beachten, dass es sich daher in den folgenden Abbildungen um gemittelte monatliche Werte für Luftdruck und Auflast handelt. Zur Bestimmung der monatlichen Regressionskoeffizienten wurden die monatlichen Werte stationsweise gestapelt. Pro Station wurden anhand dieser gestapelten Werte monatlich *ein* Regressionskoeffizient berechnet.

Betrachtet man den Verlauf des mittleren monatlichen Luftdrucks an der Station Wettzell in Abb. 5.8, dann fällt auf, dass ein klares Minimum im Monat April auftritt, nachdem die Werte über die vorhergehenden Monate bereits kontinuierlich gefallen sind. In den Sommermonaten zeigt sich ein sehr gleichmäßiger Verlauf des mittleren Luftdrucks. Interessant zu beobachten ist auch der Einfluss des Luftdrucks auf die Auflastdeformation an dieser Station: Die Deformation durch atmosphärische Auflast nimmt ab den Sommermonaten zu, selbst wenn der mittlere Luftdruck in dieser Zeit nur sehr kleine Variationen aufweist, siehe Abb. 5.9. Erst im November nimmt die Auflast wieder ab, was mit ei-

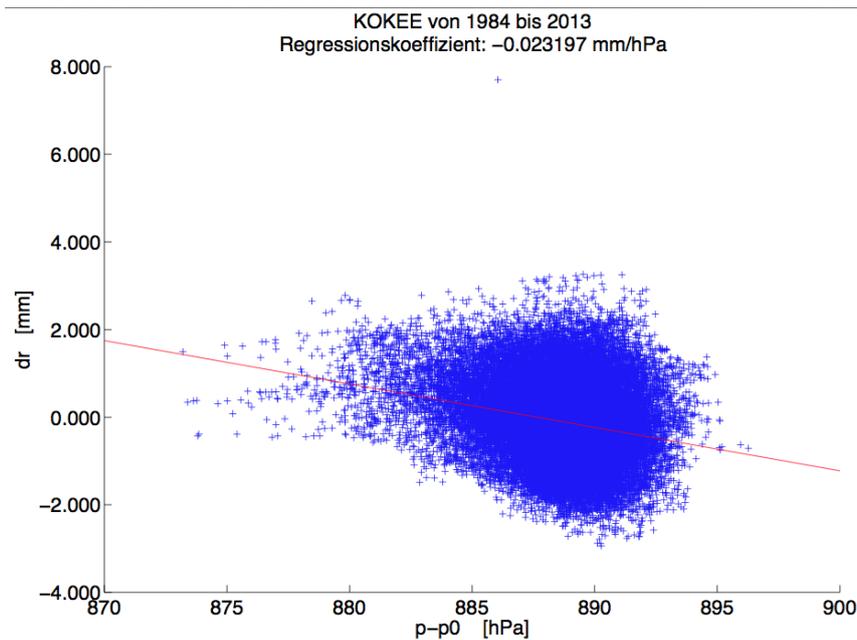


Abbildung 5.6: Bestimmung des Regressionskoeffizienten durch eine Regressionsgerade am Beispiel der Station KOKEE, Hawaii

nem niedrigerem Luftdruck im Vergleich zum Vormonat einhergeht. Exakt das gleiche Szenario ist für den Monat April zu erkennen.

Ein Blick auf Abb. 5.10 zeigt, dass der Regressionskoeffizient eine sehr eindeutige saisonale Schwankung aufweist. Die größten Werte treten in den Sommermonaten auf, wobei die Wintermonate die kleinsten Werte aller Monate aufweisen. Die Differenz zwischen Minimum und Maximum beträgt hier beinahe 0.3 mm/hPa.

Um das Ausmaß der saisonalen Variation der Regressionskoeffizienten zu verdeutlichen, wird ein direkter Vergleich der monatlichen Werte mit dem Stationswert durchgeführt. Am Beispiel der Station WETTZELL ist ersichtlich, dass die monatlichen Regressionskoeffizienten um bis zu 0.15 mm/hPa vom Stationswert abweichen. Aufgrund der stark ausgeprägten Jahreszeiten in diesem Gebiet sind die Abweichungen in den Sommer- und Wintermonaten ungefähr gleich groß.

Die Zusammenhänge von Luftdruck, Auflast und Regressionskoeffizient sind anhand der Station *Hartebeesthoek* sehr gut zu beobachten. Die Schwankungen des Luftdrucks sind zwar gering, trotzdem verlaufen Steigung und Gefälle sehr kontinuierlich, ein Maximum kommt in den gemittelten Werten jeweils nur einmal pro Jahr vor, siehe Abb. 5.11.

Der Luftdruck erreicht im Juli sein Maximum mit ca. 868.8 hPa, sein Minimum tritt im Jänner mit ca. 862.1 hPa auf. Obwohl der Luftdruck über das Jahr nur gering variiert,

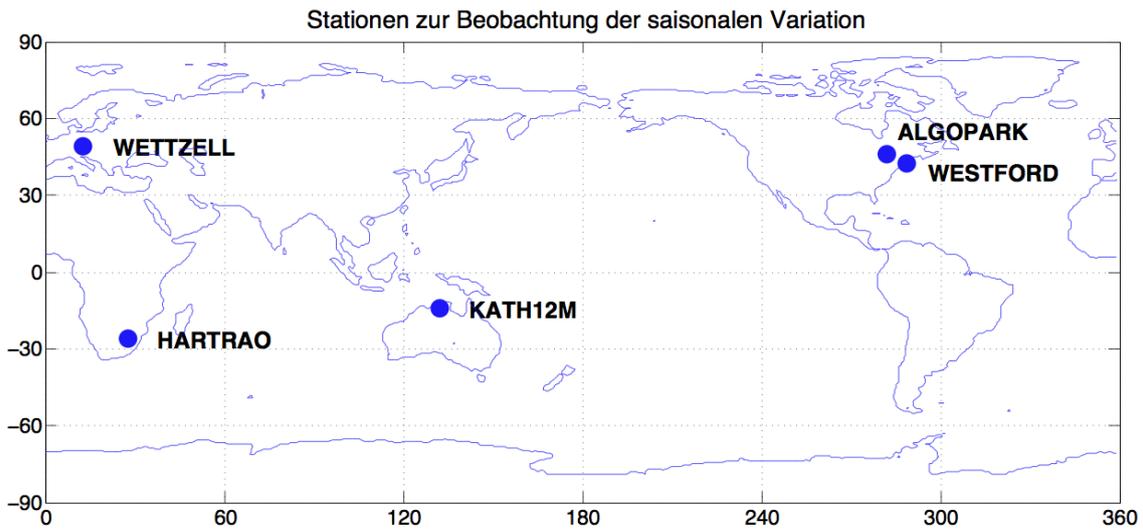


Abbildung 5.7: Verwendete Stationen zur näheren Betrachtung der monatlichen Regressionskoeffizienten.

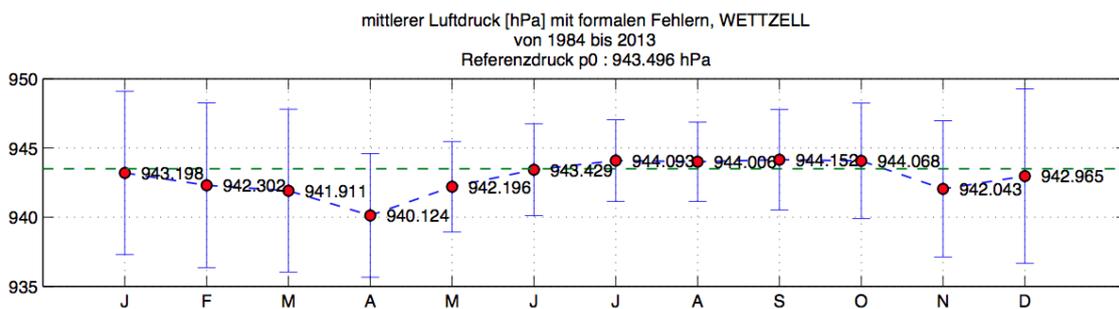


Abbildung 5.8: Jährliche Variation des mittleren Luftdrucks an der Station WETTZELL.

fällt die mittlere atmosphärische Auflast vergleichsweise groß aus, siehe Abb. 5.11 und Abb. 5.12.

Die Auflast verhält sich direkt proportional zum Luftdruck. Der größte Wert tritt im Juli auf, wo auch der Luftdruck den größten Wert aufweist. Das Minimum der atmosphärischen Auflast wird an dieser Station im Jänner erreicht. Die Regressionskoeffizienten der einzelnen Monate verhalten sich hier indirekt proportional zum Luftdruck. Im Juli weist der Regressionskoeffizient sein Jahresminimum auf. Die größten Werte erreichen die Regressionskoeffizienten erwartungsgemäß in den Wintermonaten von Dezember bis Februar. Ein graphischer Überblick über den saisonalen Verlauf der Regressionskoeffizienten gibt Abb. 5.13.

Ein interessantes Detail am Rande ist bei den Stationen ALGONQUIN PARK und WESTFORD zu betrachten: Aufgrund ihrer geographischen Nähe, ersichtlich in Abb. 5.7, ist

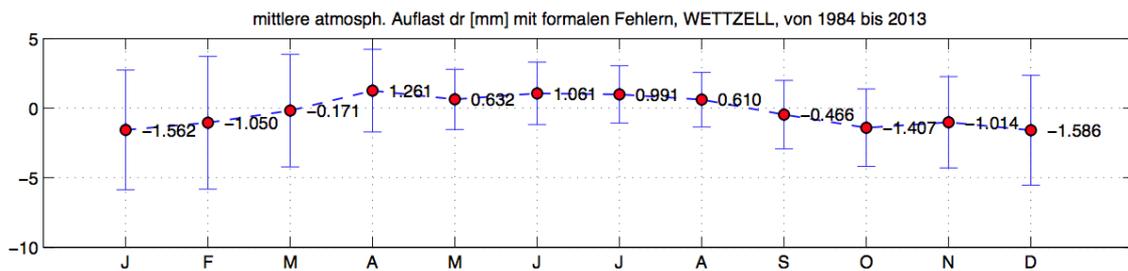


Abbildung 5.9: Jährliche Variation der mittleren atmosphärischen Auflast an der Station WETTZELL.

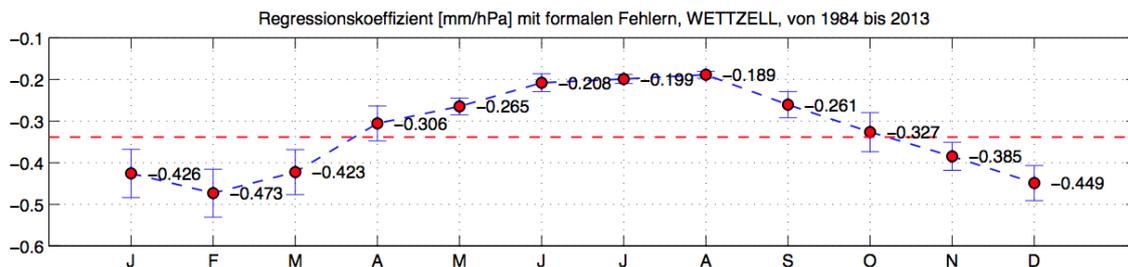


Abbildung 5.10: Jährliche Variation des mittleren Regressionskoeffizienten an der Station WETTZELL.

davon auszugehen, dass der Luftdruck und somit auch die atmosphärische Auflast einen ähnlichen Verlauf aufweisen. Dies ist in Abb. 5.14 und Abb. 5.15 sehr gut zu erkennen: Die Regressionskoeffizienten der beiden Stationen verfügen ebenso über einen äußerst ähnlichen Verlauf.

Die bisher in diesem Abschnitt betrachteten Stationen verfügen über gut ausgeprägte saisonale Variationen in den Regressionskoeffizienten. Abb. 5.16 zeigt die Station KATH12M im Norden von Australien. Diese Station stellt ein Beispiel für einen unregelmäßigen Verlauf der Regressionskoeffizienten über das Jahr dar.

Auffällig ist auch, dass der Referenzdruck aus der GPT2 - Funktion sehr stark von den monatlichen Mittelwerten des Luftdrucks abweicht, siehe Abb. 5.17.

Ein interessantes Detail stellen die formalen Fehler der beobachteten und berechneten Größen dar: Bei allen Stationen weisen die formalen Fehler sowohl für die mittleren Regressionskoeffizienten, als auch für die mittlere Auflast und den Luftdruck in den Sommermonaten die geringsten Werte auf. Wie in den vorhergehenden Abbildungen ersichtlich, steigen die Werte der formalen Fehler in den Wintermonaten um ein Vielfaches. Dies dürfte auf größere Schwankungen der Drucklage in diesem Zeitraum zurückzuführen sein.

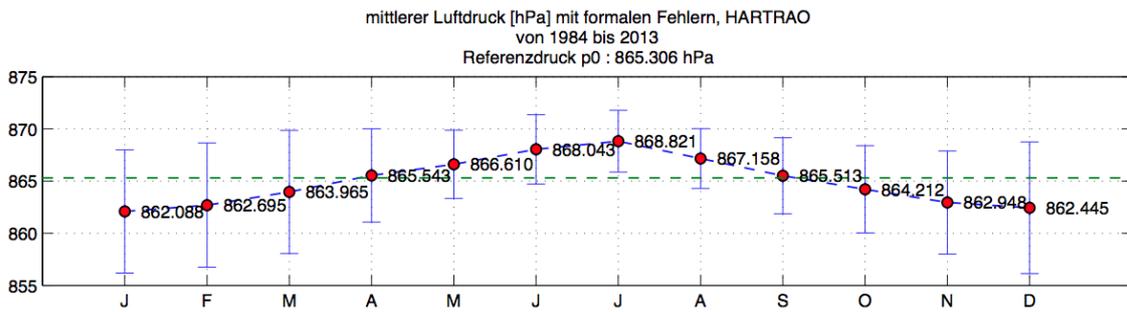


Abbildung 5.11: Jährliche Variation des mittleren Luftdrucks an der Station HARTEBEESTHOEK.

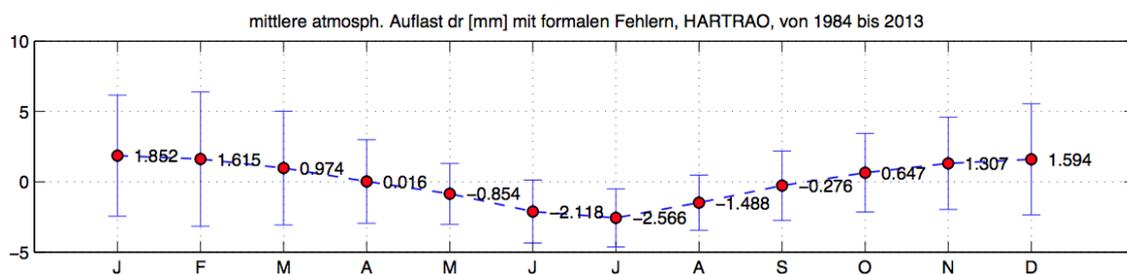


Abbildung 5.12: Jährliche Variation der mittleren atmosphärischen Auflast an der Station HARTEBEESTHOEK.

Es ist zu beachten, dass zur Berechnung der saisonalen Variation in diesem Unterkapitel jeweils ein fester Referenzdruck verwendet wurde. Nun muss noch untersucht werden, wie sich die saisonale Variation der Regressionskoeffizienten verhält, wenn für jeden in den Datensätzen vorhandenen Zeitpunkt ein variabler Referenzdruck verwendet wird. Dazugehörige Untersuchungen werden in Abschnitt 5.3 näher erläutert.

Die saisonale Variation der Auflast wird aber nicht nur durch Schwankungen des Luftdrucks ausgelöst. Zusätzlich zum Luftdruck kommen noch weitere Einflüsse wie Hydrologie und die horizontale Ausbreitung der Auflast in der Umgebung der

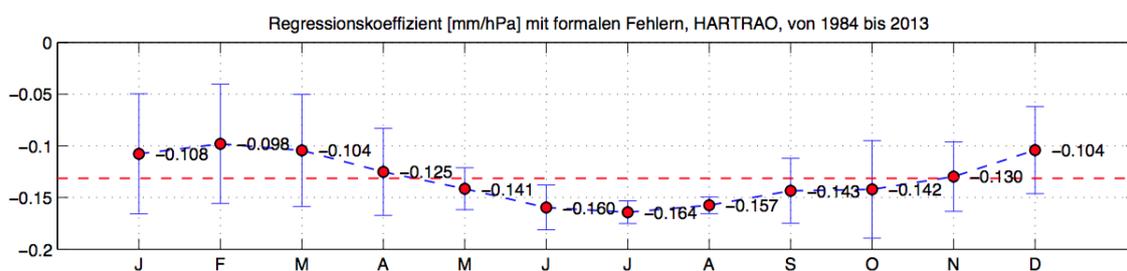


Abbildung 5.13: Jährliche Variation des mittleren Regressionskoeffizienten an der Station HARTEBEESTHOEK.

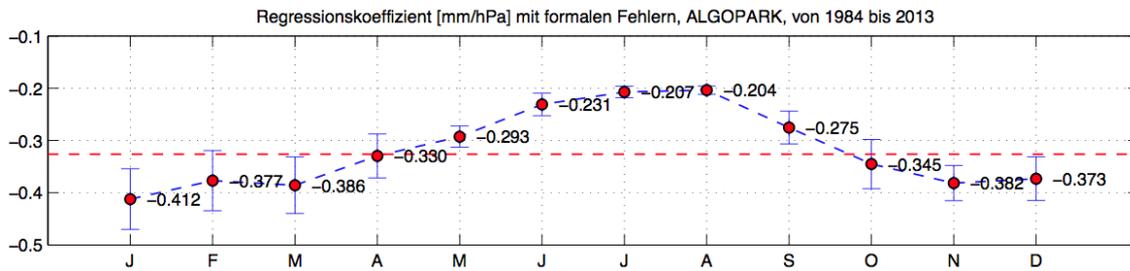


Abbildung 5.14: Jährliche Variation der mittleren Regressionskoeffizienten an der Station ALGONQUIN PARK.

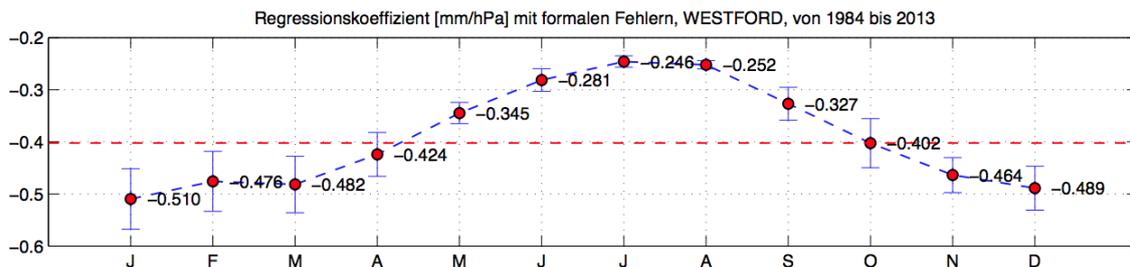


Abbildung 5.15: Jährliche Variation der mittleren Regressionskoeffizienten an der Station WESTFORD. Der zur Station ALGONQUIN PARK sehr ähnliche Verlauf der Regressionskoeffizienten aufgrund der geographischen Nähe ist klar zu erkennen.

Station. Wie bereits in Kap. 2.3.1 erwähnt, können Druckanomalien unterschiedliche Größenordnungen annehmen. Haben diese eine geringe Ausdehnung von nur wenigen hundert Kilometern, ist anzunehmen, dass die atmosphärische Auflast geringere Deformationen hervorbringt als bei Gebieten mit Druckanomalien, deren Ausdehnung mehrere tausend Kilometer beträgt. Ist eine Station von einem Druckgebiet solchen Ausmaßes umgeben, kann angenommen werden, dass größere Auflasteffekte am Ort der Station eintreten.

5.2.2 Auswirkung auf das Geozentrum

Als Geozentrum wird hier der Schwerpunkt des Stationsnetzwerkes verstanden. Die atmosphärische Auflast verursacht Deformationen der Erdkruste und somit Verschiebungen der VLBI - Stationskoordinaten. Diese Verschiebungen der Stationskoordinaten wirken sich auf die Geometrie des beobachteten VLBI - Netzwerkes aus. Wie die Auflasteffekte auf der Erdkruste weist auch der Schwerpunkt des Stationsnetzwerkes eine saisonale Variation auf. In den folgenden Ausführungen wird die saisonale Variation des Schwer-

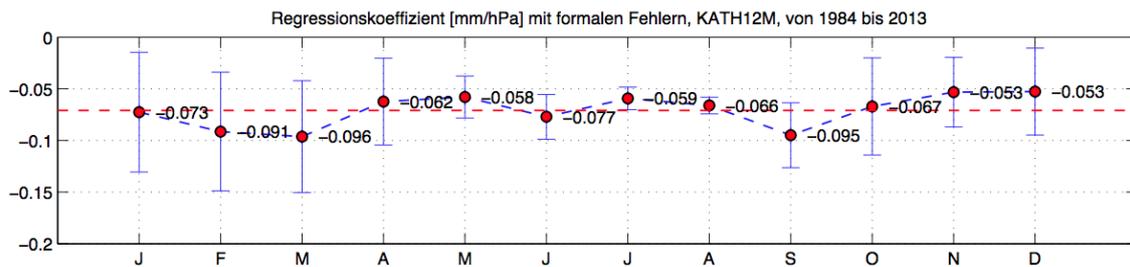


Abbildung 5.16: Jährliche Variation der mittleren Regressionskoeffizienten an der Station KATH12M. Verglichen mit den bereits betrachteten Stationen treten hier sehr unregelmäßige Variationen der Regressionskoeffizienten auf.

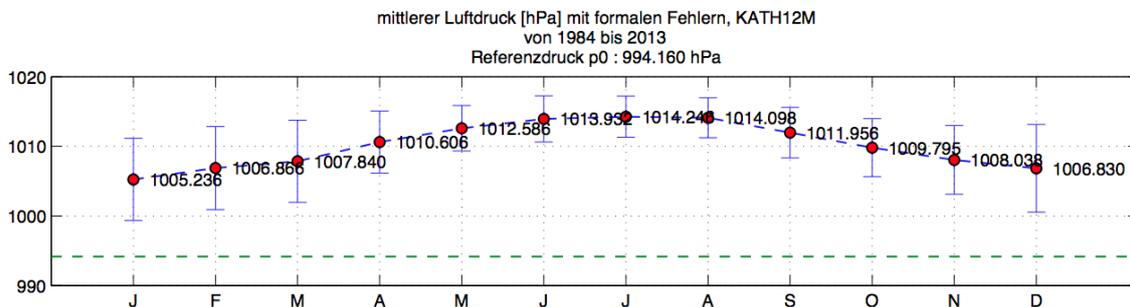


Abbildung 5.17: Jährliche Variation des mittleren Luftdrucks an der Station KATH12M. Zu beachten ist die Abweichung der Werte des Referenzdrucks (GPT2) und den monatlichen Werten des Luftdrucks an dieser Station.

punktes des VLBI - Stationsnetzwerkes als *Geozentrumsvariation* bezeichnet.

Um die monatliche Geozentrumsvariation aufgrund der atmosphärischen Auflast an den VLBI - Stationen zu bestimmen, wurde folgende Vorgehensweise gewählt:

1. APL - Korrekturen an Stationskoordinaten anbringen
2. die mittleren Koordinaten jedes Monats berechnen

Die Ergebnisse einer globalen Lösung des VLBI - Netzwerkes ohne Anbringung von Korrekturen werden als Stationskoordinaten verwendet. Die Mittelbildung aus den X, Y, Z - Koordinaten jedes Monats ergibt das koordinative Geozentrum. In einem ersten Schritt wurden die Berechnungen für alle 70 Stationen durchgeführt. Für einige Stationen stehen nur Daten über einen geringen Zeitraum zur Verfügung. Aus diesem Grund wurde für jede Station bestimmt, zu welchem Prozentsatz Daten in der untersuchten Zeitspanne von 30 Jahren gesammelt wurden. In Abb. 5.18 sind die Verschiebungen des Geozentrums ersichtlich, wenn alle Stationen in die Berechnung einfließen. Die Bedingung hinsichtlich des beobachteten Zeitraums der Stationen lautet in diesem Fall 0%, also alle Stationen die

über Daten verfügen fließen in die Berechnung ein.

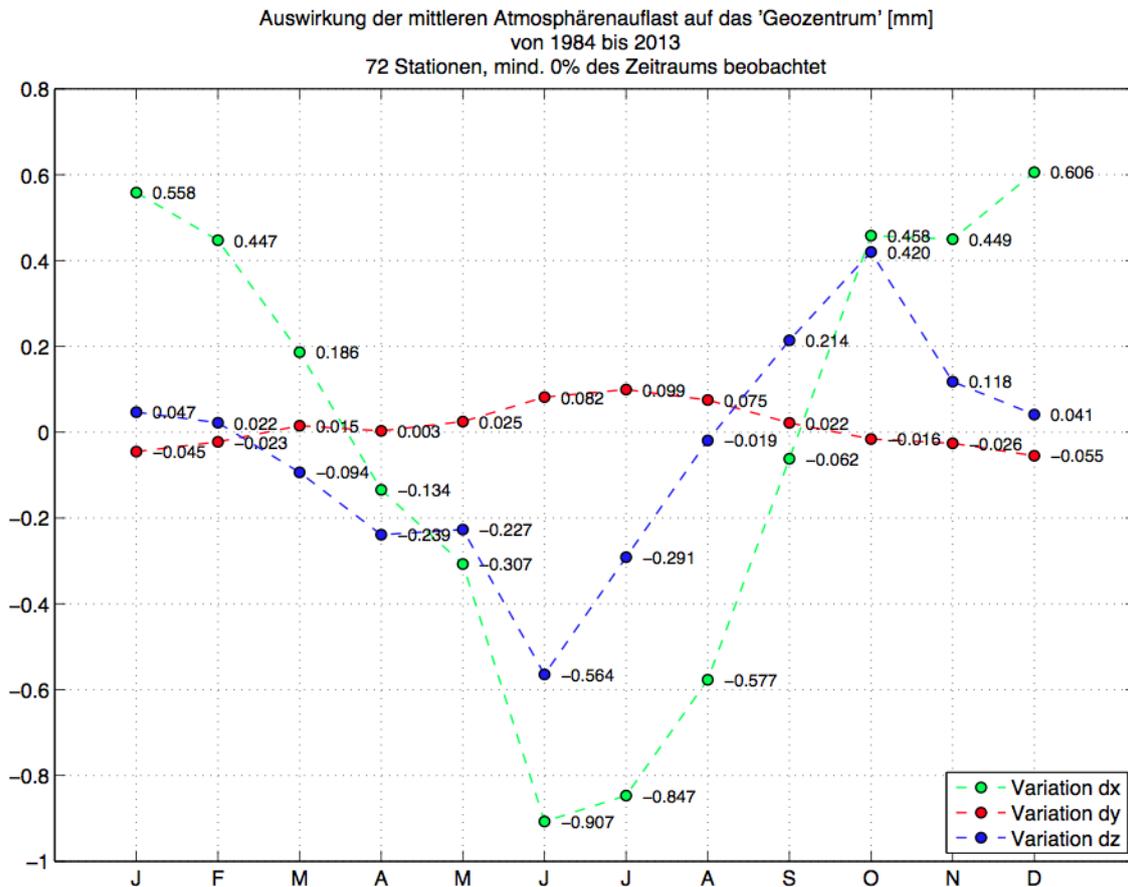


Abbildung 5.18: Variation des Geozentrum anhand der gemessenen Deformationen an allen VLBI - Stationen.

Abb. 5.19 zeigt die Ergebnisse bei Verwendung von Stationen, die über 100% des Zeitraums Beobachtungen lieferten. Der Grund für die großen Unterschiede in den Ergebnissen liegt in der sich verändernden Geometrie, wenn wie in diesem Fall nur sehr wenige Stationen zur Berechnung herangezogen werden. Tritt dies ein, ist die globale Verteilung der teilnehmenden Stationen weniger gleichmäßig als zuvor.

Betrachtet man nun die Unterschiede zwischen diesen Grafiken, wird ersichtlich, welchen Einfluss die sich verändernde Geometrie auf die Ergebnisse hat. Bei Verwendung aller Stationen zur Berechnung des Geozentrums (Abb. 5.18) fällt auf, dass die Y - Achse nur sehr geringe saisonale Variationen aufweist: Die Werte schwanken nur um 0.15 mm. Verglichen mit den Ergebnissen aus den Berechnungen mit Stationen, die zu 100% des Zeitraums Werte liefern (Abb. 5.19), ist die Schwankung um ein Vielfaches geringer. Die saisonale Variation beträgt hier 0.77 mm. Unterschiede in den Ergebnissen treten auch an der X - Achse auf. Wie in Abb. 5.18 ersichtlich, schwanken die Werte um maximal

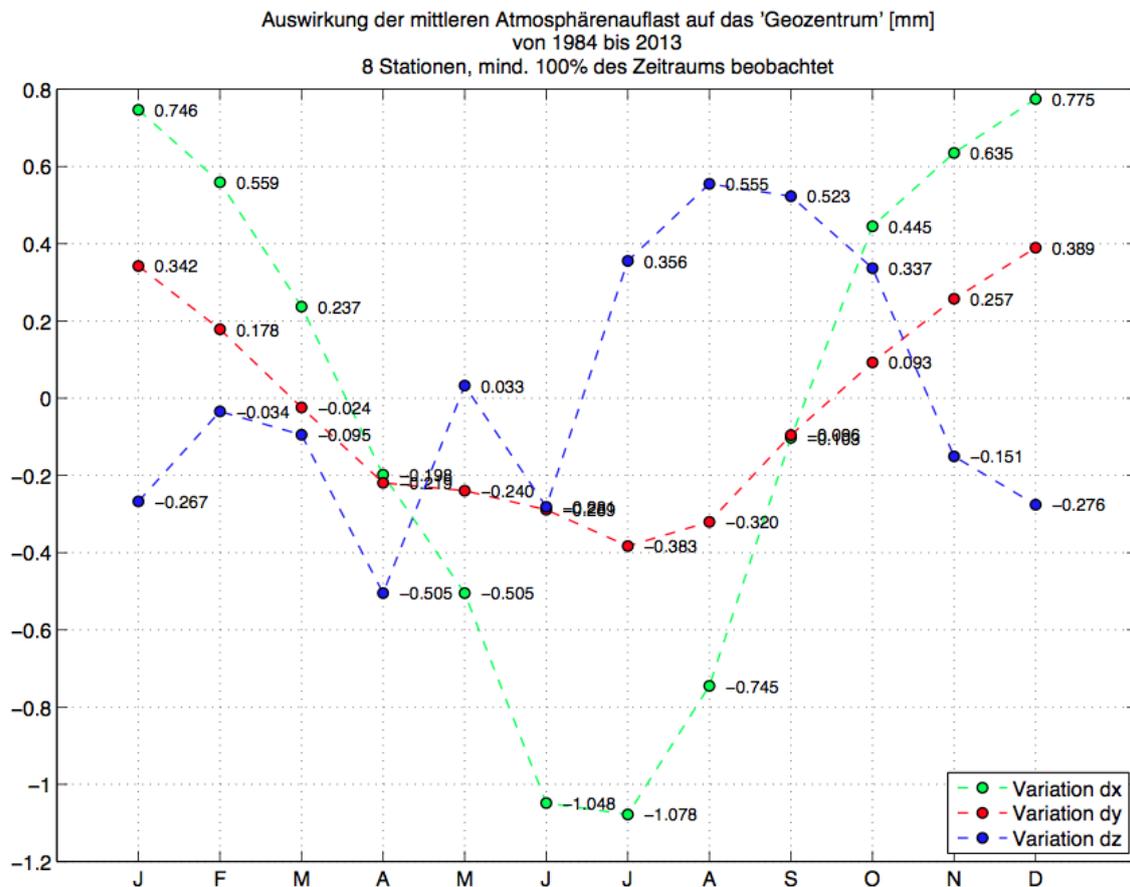


Abbildung 5.19: Variation des Geozentrum anhand der gemessenen Deformationen an VLBI - Stationen mit 100% Beobachtungsrate.

1.51 mm. Verglichen mit 1.85 mm, wenn nur acht Stationen zur Berechnung herangezogen werden, fallen die Unterschiede aber weniger groß aus. In den Variationen an der Z - Achse treten recht signifikante Differenzen auf: Betrachtet man Abb. 5.19, ist eindeutig ersichtlich, dass die Variation bis zum Monat Juli beinahe stetig immer größere Negativwerte annimmt. Von Juli bis Oktober ist eine lineare Steigung in den positiven Wertebereich zu erkennen. Bis zum Jahresende bewegen sich die Werte wieder Richtung Null. In Abb. 5.18 wiederum ist ein anderer Verlauf der Geozentrumsvariation an der Z - Achse ersichtlich: Bis zum Monat Juli springen die Werte um bis zu 0.53 mm. Von Juli bis August steigen die Werte um 0.84 mm um bis Jahresende wieder auf ca. - 0.28 mm zu fallen.

Es kann somit davon ausgegangen werden, dass aufgrund der angesprochenen Veränderung der Geometrie der teilnehmenden Stationen vor allem Verschiebungen in Y - und Z - Richtung auftreten.

Dach et al. (2010) haben den Einfluss der Atmosphärenauflast auf das Geozentrum anhand von GNSS - Satellitenorbits untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass im Mittel Unterschiede in den Satellitenpositionen von 3 - 4 mm RMS auftreten, je nachdem ob APL - Korrekturen angebracht wurden oder nicht. Zumindest ein Teil dieser Differenzen kann durch die täglich berechnete Translation zwischen den Sätzen an Satellitenpositionen erklärt werden (1 mm in Y - und 4 mm in Z - Richtung). Bei der Berechnung der Stationskoordinaten erhalten Dach et al. (ebd.) Verschiebungen zwischen 4 und 6 mm ohne Auflastkorrektur. Werden die Beobachtungen jedoch hinsichtlich der atmosphärischen Auflast korrigiert, verringern sich die Verschiebungen auf 1 bis 2 mm. Diese Ergebnisse unterscheiden sich von den hier erhaltenen Ergebnissen doch klar. Grund dafür dürfte sein, dass Dach et al. (ebd.) die Variationen anhand von Satellitenpositionen untersucht hat. Die Satellitenorbits werden aufgrund der Gravitation von Massenveränderungen auf der Erde beeinflusst. Dies resultiert in den oben erwähnten Koordinatenunterschiede in den Satellitenpositionen. Diese Verschiebung in den Satellitenpositionen ergibt bei Beobachtungen ohne Auflastkorrektur ein stärkeres Rauschen bei der Berechnung des Geozentrums.

5.3 Variabler Referenzdruck

Die Berechnungen für diese Arbeit werden, wie in Kap. 5.2 bereits erwähnt, hauptsächlich mit einem festen Referenzdruck pro Station durchgeführt. Aufgrund der Ergebnisse in Kap. 5.2.1, wo ein fester Referenzdruck pro Station verwendet wurde, muss nun auch eine Lösung mit variablen Referenzdruck diskutiert werden. Damit wird untersucht, ob sich die Verwendung eines variablen Referenzdrucks zur Berechnung der monatlichen Regressionskoeffizienten als sinnvoll erweist.

Zur Bestimmung des Referenzdrucks wird wieder die GPT2 - Funktion verwendet. Um für eine Station nun einen variablen Referenzdruck zu erstellen, wird die Option '*with time variation*' gewählt. Es wurden für den gesamten Zeitraum im Abstand von sechs Stunden Referenzdruckdaten erstellt. Daraus wurden über die bekannte Beziehung aus Gleichung 5.1 für jeden dieser Zeitpunkte Regressionskoeffizienten erstellt. Diese weichen teilweise stark von den bereits berechneten Koeffizienten mit festem Referenzdruck ab. Die Abweichung ist bei näherer Betrachtung von Gleichung 5.1 zu erklären: Sind lokaler Druck und der variable Referenzdruck zu einem Zeitpunkt beinahe gleich groß, kommt es zu einem sehr großen Wert bei diesem Regressionskoeffizienten. Aus diesem Grund wurde eine Schranke von 2.5 mm/hPa eingeführt. Alle Werte die diese Schranke überschreiten, werden nicht in die Berechnung des monatlichen Mittels miteinbezogen.

Das Ergebnis ist in Abb. 5.20 dargestellt.

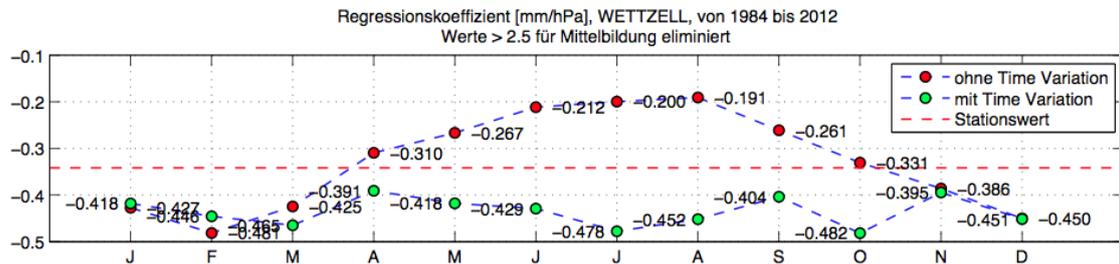


Abbildung 5.20: Vergleich von monatlichen Regressionskoeffizienten mit festem und variablen Referenzdruck bei einer Werteschränke von 2,5 mm/hPa.

Auffallend ist, dass die Werte über alle Monate sehr ähnlich sind und konstant verlaufen. Eine saisonale Variation tritt nicht mehr auf. Wird die Schranke höher gesetzt, entfernen sich die monatlichen Werte vom Stationswert. Bei einer niedrigeren Schranke nähern sich die monatlichen Regressionskoeffizienten dem Stationswert an und zeigen sich noch mehr geglättet, siehe Abb. 5.21.

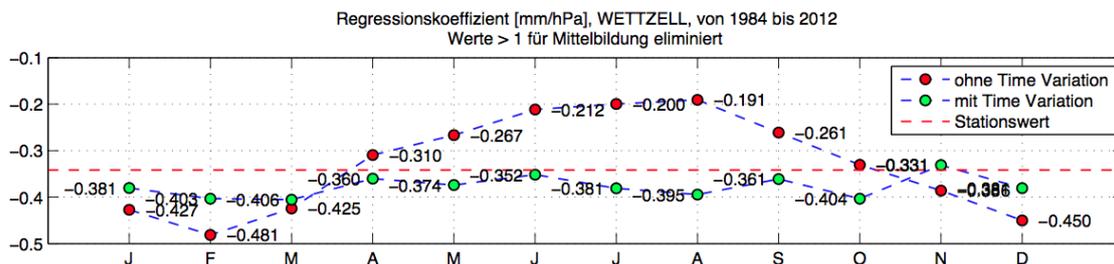


Abbildung 5.21: Vergleich von monatlichen Regressionskoeffizienten mit festem und variablen Referenzdruck bei einer Werteschränke von 1 mm/hPa.

Das Verhalten der Regressionskoeffizienten bei variablen Referenzdruck wurde nur für die Station Wetzell durchgeführt. Es kann aufgrund der erhaltenen Ergebnisse davon ausgegangen werden, dass bei Verwendung eines variablen Referenzdrucks die saisonale Variation der Regressionskoeffizienten auch für andere Stationen nicht mehr auftritt. Alle übrigen diese Arbeit betreffenden Berechnungen wurden mit einem festen Referenzdruck pro Station durchgeführt.

Kapitel 6

Globale Lösungen in VieVS

Die Vienna VLBI Software (VieVS) ist eine Auswertesoftware für VLBI Anwendungen. Die Software wurde von der Forschungsgruppe Höhere Geodäsie des Departments für Geodäsie und Geoinformation der Technischen Universität Wien entwickelt. Sie basiert auf der Programmiersprache MATLAB® und erfüllt alle gegenwärtigen Anforderungen der VLBI. VieVS ist mit den aktuellsten, per IERS Konventionen (International Earth Rotation and Reference Systems Service) empfohlenen Modellen ausgestattet, siehe Böhm et al., 2012. Die ständige Weiterentwicklung der Software wird von Mitarbeitern der Forschungsgruppe sowie von Projektmitarbeitern und Studenten im Zuge von Abschlussarbeiten durchgeführt. Nähere Informationen zu VieVS können unter <http://vievs.geo.tuwien.ac.at/>, 2014 abgerufen werden.

VieVS ist in mehrere Module aufgeteilt. Abb. 6.1 gibt Einblick in die unterschiedlichen Aufgaben und Funktionen der einzelnen Module. Die Erläuterungen zu den einzelnen Module halten sich an Böhm et al. (2010).

- Vie_SETUP erstellt eine Liste der zu prozessierenden Sessions und Parameterfiles. Diese Parameterfiles definieren, welche VieVS - Module für die Prozessierung durchlaufen werden müssen. Weiters sind darin Informationen über die verwendeten Modelle für Vie_MOD und den Optionen und der Parametrisierung für Vie_LSM enthalten. Für jede Session wird ein Parameterfile erstellt.
- Vie_INIT ist für die Initialisierung zuständig und erstellt Listen der Stationen der Session, der beobachteten Radioquellen und der durchgeführten Beobachtungen. Die Stationskoordinaten werden hierfür aus einem TRF Katalog entnommen,

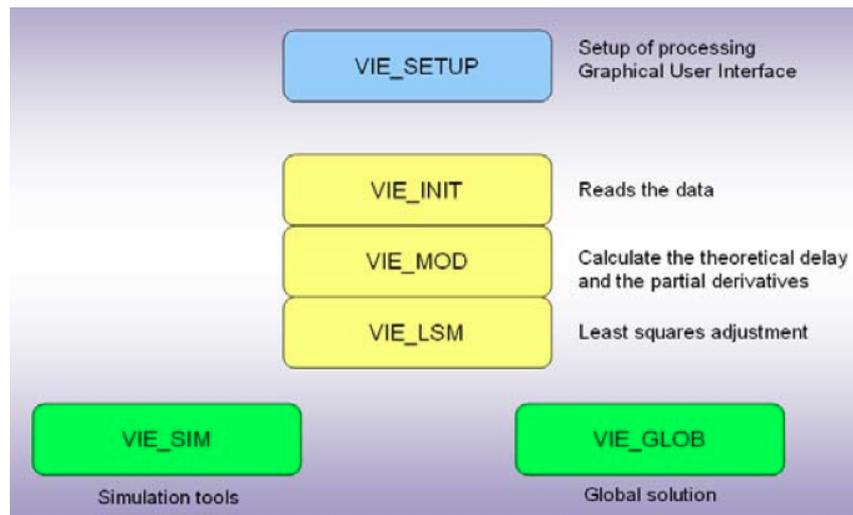


Abbildung 6.1: Übersicht über die Module der Vienna VLBI Software VieVS, [Böhm et al., 2010]

die Koordinaten der Radioquellen aus einem CRF Katalog. Die durchgeführten Beobachtungen sind in einem NGS - File abgelegt. Es enthält die beobachteten Verzögerungen und Verzögerungsraten, die Verzögerung durch die Ionosphäre, sowie zusätzliche Messungen wie Temperatur, Druck und Informationen über die Qualität der Beobachtungen.

- Vie_MOD ist für die Modellierung verantwortlich und berechnet die theoretischen Verzögerungen der Modelle sowie partielle Ableitungen für die in Vie_LSM geschätzten Parameter.
- Mit dem Modul Vie_LSM werden Parameter mit Hilfe der Least Squares Methode geschätzt.

Zu diesen Parametern zählen:

- Offsets der Uhrenparameter und Erdorientierungsparameter [cm bzw. ms]
- Offsets der Stationskoordinaten und Koordinaten der Radioquellen [cm bzw. mas]
- Offset des Zenith Wet Delay [cm]

Alle Parameter können als 'continuous piecewise linear offsets (CPWLO)', also kontinuierliche abschnittsweise lineare Offsets, in täglicher und sub - täglicher Auflösung geschätzt werden. Weiters können auch absolute und relative Pseudo - Beobachtungen eingeführt werden. Relative Pseudo - Beobachtungen werden verwendet, um Lücken zu füllen wo für die Parameterschätzung keine Beobachtung

vorliegt. Außerdem werden dadurch zusätzliche Beobachtungen geliefert, damit die Normalgleichungsmatrix regulär bleibt. Absolute Pseudo - Beobachtungen werden dann verwendet, wenn für einen Parameter bereits ein a priori Wert bekannt ist. Für das Modul Vie_GLOB bereitet Vie_LSM die datumsfreien Normalgleichungen vor.

- Das Modul Vie_GLOB ist darauf konzipiert, ein globales Least Squares Adjustment durchzuführen. Damit können folgende Parameter bestimmt werden:
 - Koordinaten der Radioquellen (CRF)
 - Stationskoordinaten und - geschwindigkeiten (TRF)
 - Erdorientierungsparameter wie x_p , y_p , $dUT1$, dX , dY
 - Love und Shida Zahlen

In der globalen Lösung werden Referenzrahmen und globale Parameter berechnet. Durchgeführt wird eine globale Lösung im Modul Vie_GLOB, entwickelt von Hana Krásná. Mit diesem Modul können Parameter geschätzt werden, die aus einer gemeinsamen Ausgleichung mehrerer VLBI Sessions entstammen. Als Input - Daten für die globale Lösung dienen datumsfreie Normalgleichungen, die mit dem Modul Vie_LSM erstellt wurden. Da diese Normalgleichungen datumsfrei sind, muss noch ein geodätisches Datum definiert werden. Dies geschieht durch die manuelle Auswahl von Stationen, welche besonders gut für die Datumsbestimmung einer Session geeignet sind. Die globale Lösung wird hauptsächlich verwendet, um terrestrische Referenzrahmen im Sinne von Positionen und Geschwindigkeiten von Stationen zu bestimmen. Weiters werden himmelsfeste Referenzrahmen in Form von Koordinaten der Radioquellen bestimmt.

6.1 Vorkehrungen und Output

Bevor die globale Lösung berechnet werden kann, muss eine Reihe an Vorkehrungen getroffen werden. Dies umfasst vor allem die Vorbereitung und Auswahl an Input - Daten. Für die in dieser Arbeit angestrebten Lösungen wird als terrestrischer Referenzrahmen das vordefinierte VTRF2008 verwendet. Den himmelsfesten Referenzrahmen stellt in VieVS der ICRF2 dar. Weiters muss definiert werden, welche Stationen für die 6 - Parameter NNT/NNR - Bedingung zur Berechnung des Datums herangezogen werden. Abb. 6.2 gibt Aufschluss über die Datumsstationen der globalen Lösung und deren Verteilung. Die Ergebnisse dieser Stationen werden für die weiteren Untersuchungen in dieser Arbeit

herangezogen.

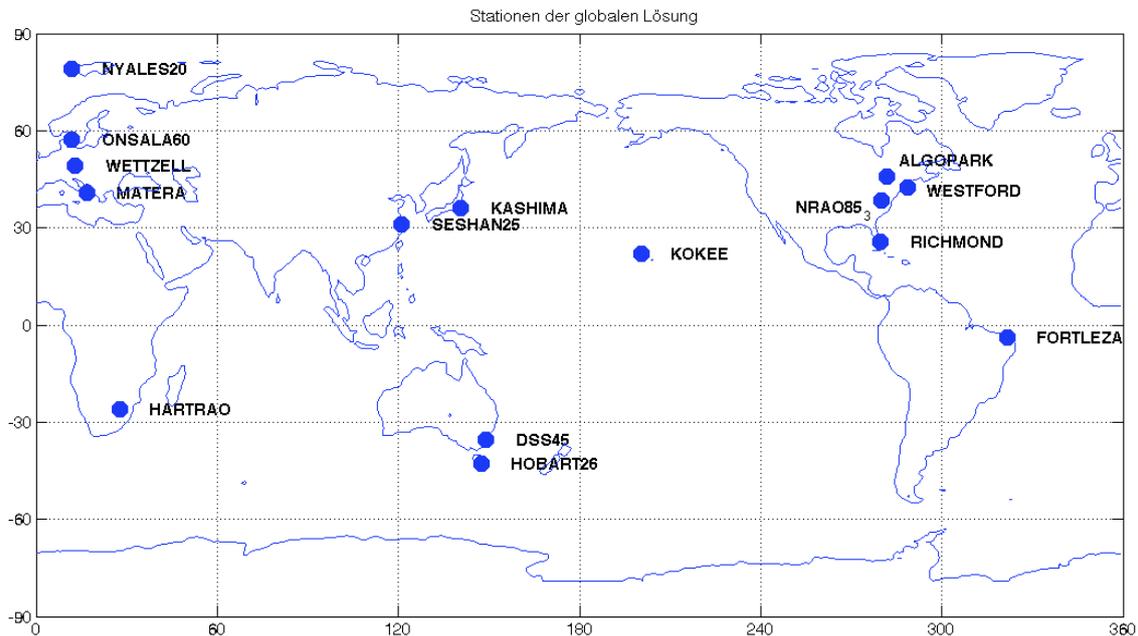


Abbildung 6.2: Datumsstationen der globalen Lösung

Die Stationen wurden aufgrund ihrer beobachteten Sessions und ihrer globalen Verteilung gewählt: Die ausgewählten Stationen lieferten innerhalb des relevanten Zeitraums in vielen Sessions Beobachtungen. Dadurch können die Stationskoordinaten sehr gut bestimmt werden, was für Berechnung des Datums ausschlaggebend ist. Außerdem bilden die Stationen global gesehen eine sehr gute Geometrie. Die Verteilung in Ost/West - Richtung ist sehr gleichmäßig, wobei sich aber ein Großteil der Stationen auf der nördlichen Hemisphäre befinden. Das Problem der ungleichmäßigen Verteilung zwischen nördlicher und südlicher Hemisphäre ist ein bekanntes Problem in der Weltraumgeodäsie, worauf unter anderem auch Dach et al., 2010 hinweist.

Über die Benutzeroberfläche von VieVS werden Stationskoordinaten- und geschwindigkeiten, sowie die Koordinaten der Quellen als die zu definierenden Parameter ausgewählt. Stationen, die nur in wenigen Sessions beobachtet haben, werden sessionweise reduziert. Eine Auflistung dieser Stationen ist in einem *.txt - File abgelegt und kann in VieVS ausgewählt werden.

6.2 Ohne Standard - Atmosphärenkorrektur mit intern geschätzten Regressionskoeffizienten

Die erste globale Lösung wird ohne die Anbringung von GSFC - Atmosphärenkorrekturen erstellt. Jedoch wird diese Lösung mit intern geschätzten Regressionskoeffizienten aus der globalen Lösung korrigiert. Der Einfluss von atmosphärischen Gezeiten wird bei der Berechnung der globalen Lösung nicht berücksichtigt. Die Lösung beschränkt sich somit auf die Anbringung folgender Korrekturen:

- Gezeiten der festen Erde - 'solid earth tides'
- Auflast durch die Gezeiten der Ozeane - 'tidal ocean loading'
- Deformation aufgrund der Poltide - 'pole tide'
- Deformation aufgrund der ozeanischen Poltide - 'ocean pole tide'
- Antennenverformung aufgrund der Temperatur - 'thermal antenna deformation'
- intern geschätzte Regressionskoeffizienten aus globaler Lösung

Die atmosphärischen Korrekturen beschränken sich also auf eine Korrektur durch intern geschätzte Regressionskoeffizienten. Mit den Ergebnissen dieser Lösung können gute Vergleiche zum Einfluss der unterschiedlichen Atmosphärenkorrekturen auf die Stationskoordinaten aufgestellt werden.

In VieVS wird dazu im Menüpunkt *Station Models* folgende Auswahl getroffen:

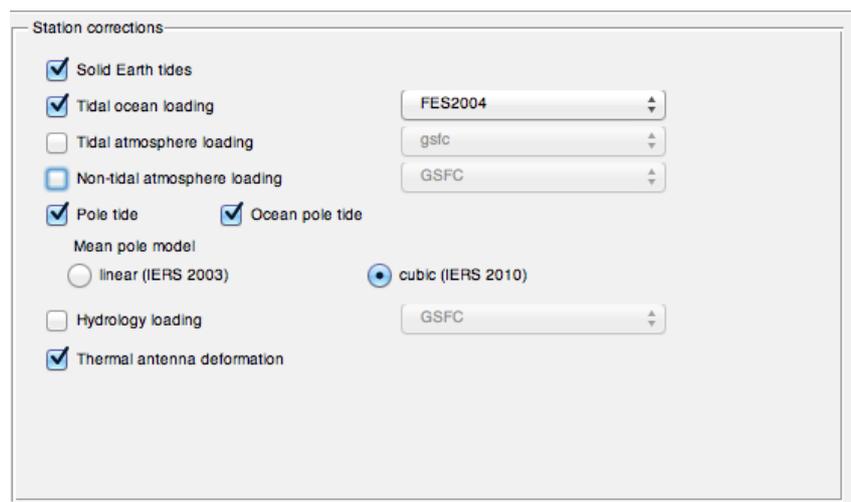


Abbildung 6.3: Globale Lösung 1: Ohne Standard - Atmosphärenkorrektur mit intern geschätzten Regressionskoeffizienten - Menüauswahl in VieVS 2.2

6.3 Standard - Atmosphärenkorrektur mit intern geschätzten Regressionskoeffizienten

Die zweite globale Lösung wird mit der zusätzlichen Anbringung von Standardatmosphärenkorrekturen durchgeführt. Neben einer Korrektur durch intern geschätzte Regressionskoeffizienten werden hierzu die Korrekturen für *tidal atmosphere loadings* und *non-tidal atmosphere loadings* an die Stationskoordinaten angebracht. Diese Effekte beschreiben den Einfluss der Atmosphäre durch Auflasteffekte mit atmosphärischen Gezeiten einfluss bzw. ohne atmosphärischen Gezeiteneinfluss. Die Daten beinhalten Gezeiten der Atmosphäre in Form von täglichen und halbtäglichen atmosphärischen Gezeitenwellen. Eine nähere Erklärung dazu findet sich in Kap. 2.3.3. Abb. 6.4 zeigt die Auswahl der anzubringenden Korrekturen im Menü von VieVS. Als Korrekturen werden die vom Goddard Space Flight Center GSFC bereitgestellten Korrektur - Daten verwendet, siehe Kap. 3.3. Es wird erwartet, dass die Lösung mit Standardatmosphärenkorrekturen für einen Großteil der Stationen bessere Ergebnisse hinsichtlich der Korrekturen an den Stationskoordinaten liefert als die Lösung aus Kap. 6.2.

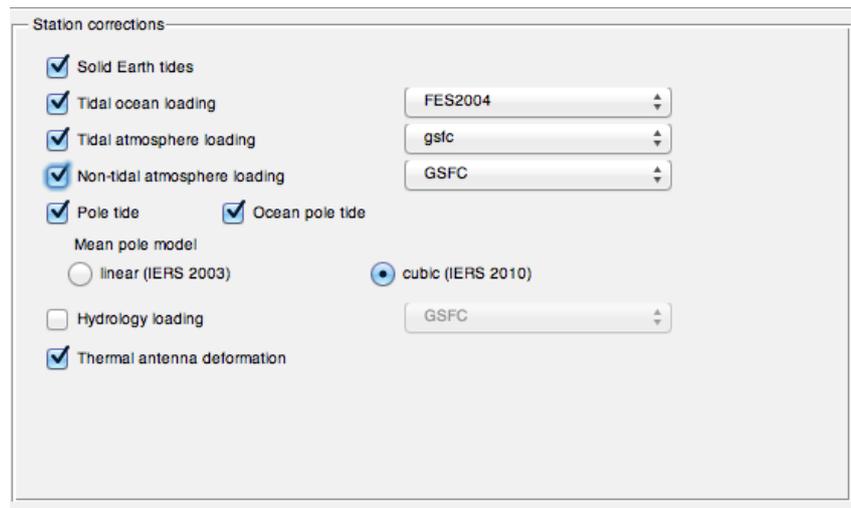


Abbildung 6.4: Globale Lösung 2: Standard - Atmosphärenkorrektur mit intern geschätzten Regressionskoeffizienten - Menüauswahl in VieVS 2.2

6.4 Mit externen Regressionskoeffizienten

Zur Erstellung der dritten globalen Lösung muss das Superstations - File dahingehend modifiziert werden, indem die in Kap. 5.2 berechneten a priori - Werte für die Stati-

onskoeffizienten der Stationen eingefügt werden. Durch diese Erweiterung kann VieVS nun diese außerhalb der globalen Lösung erstellten Regressionskoeffizienten in die Berechnung der Stationskoordinaten und der Korrekturwerte einbinden. Die in der zweiten Lösung angebrachte atmosphärische Gezeitenkorrektur wird für diese Lösung nicht verwendet, die Korrektur bezüglich des Einflusses der Atmosphäre bezieht sich hier nur auf die a priori bestimmten Regressionskoeffizienten.

6.5 Ergebnisse

Nach der Berechnung der globalen Lösung können die erhaltenen Ergebnisse untersucht werden. Die Ergebnisse der globalen Lösung werden in Form von *.txt - und *.mat - Files ausgegeben und beinhalten folgende Daten:

- Liste der ausgewerteten Sessions
- zur Definition des Datums verwendete Stationen
- verwendete Radioquellen
- Korrektur der Stationskoordinaten + formale Fehler
- Korrektur der Stationsgeschwindigkeiten + formaler Fehler
- Korrektur der Koordinaten der Radioquellen + formale Fehler
- geschätzte Regressionskoeffizienten + formale Fehler

Die Untersuchung der Ergebnisse bezieht sich in dieser Arbeit auf die Korrekturen der Stationskoordinaten und der in der Ausgleichung geschätzten Regressionskoeffizienten.

6.5.1 Regressionskoeffizienten

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit den in den globalen Lösungen geschätzten Regressionskoeffizienten. In Abb. 6.5 werden die einzelnen Lösungen für die Regressionskoeffizienten dargestellt. Die Grafik enthält einerseits die in Kap. 5 bestimmten Werte der Regressionskoeffizienten jeder Station, diese sind durch die blauen Balken dargestellt. Diese a priori - Regressionskoeffizienten dienen als Vergleichswerte für die in den globalen Lösungen mitgeschätzten Koeffizienten, gleichzeitig aber auch als Korrektur für die dritte, mit Regressionskoeffizienten korrigierte globale Lösung, siehe Kap. 6.4. Die Ergebnisse dieser Lösung ist in den roten Balken ersichtlich. Aus der globalen Lösung ohne GSFC - Atmosphärenkorrektur geschätzte Regressionskoeffizienten werden durch

die grünen Balken dargestellt. Zusätzlich zu den Werten der Koeffizienten werden auch ihre in der globalen Lösung bestimmten formalen Fehler geplottet.

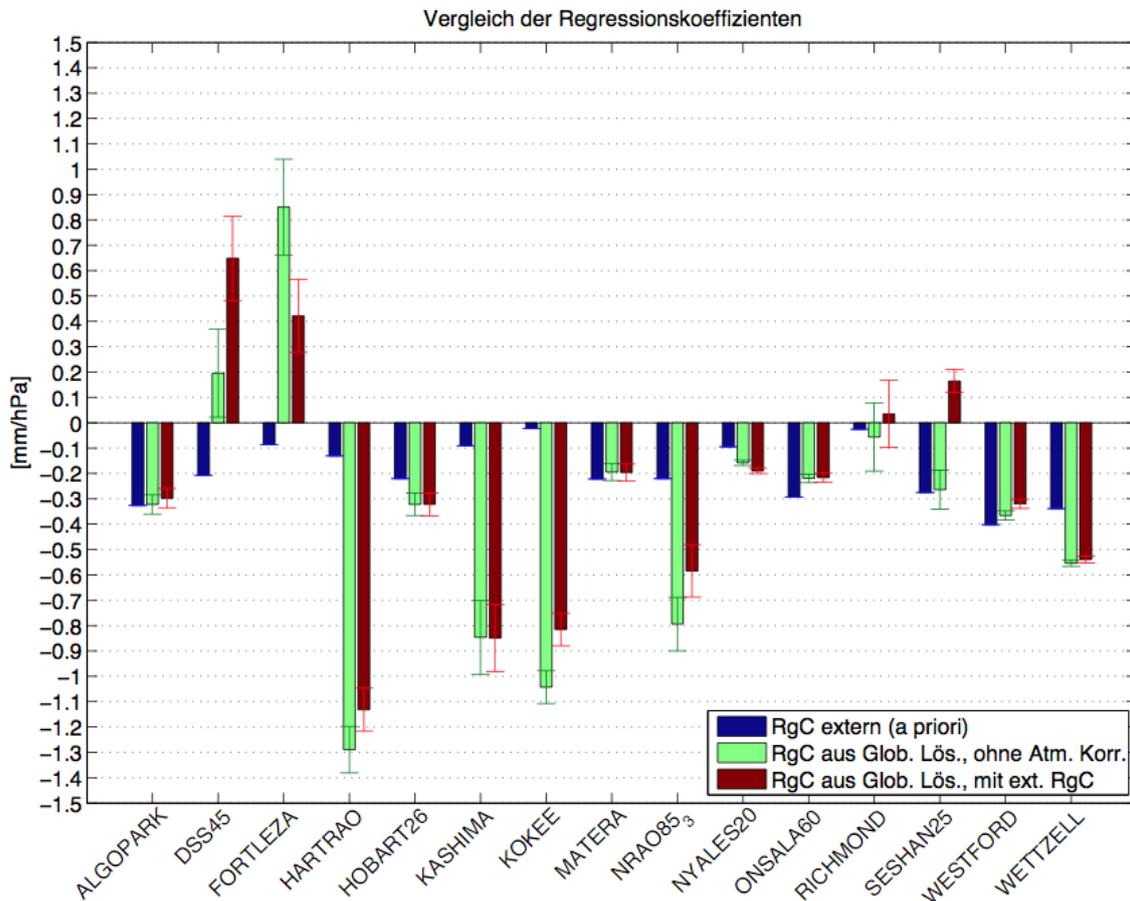


Abbildung 6.5: In globaler Lösung geschätzte Regressionskoeffizienten und ihre formalen Fehler

Es wird erwartet, dass die Werte der in der globalen Lösung geschätzten Regressionskoeffizienten der einzelnen Stationen ähnliche Werte wie die a priori bestimmten Werte annehmen. Offensichtlich ist dies aber nur für wenige Stationen der Fall. Bei vielen der hier betrachteten Stationen weisen die geschätzten Regressionskoeffizienten um ein Vielfaches höhere Werte als die a priori - Regressionskoeffizienten auf. Geographisch befinden sich von den Stationen DSS45, FORTLEZA, HARTRAO, KASHIMA, KOKEE und NRAO85_3 nur die Stationen HARTRAO und NRAO85_3 im Landesinneren. Die restlichen Stationen liegen direkt an der Küste. Welchen Einfluss dies auf die erhaltenen Werte hat wird in Kap. 7 diskutiert. Folgende Aussagen beziehen sich auf die restlichen beobachteten Stationen. Für diese Stationen werden gute Ergebnisse für die geschätzten Regressionskoeffizienten erhalten. Die Differenz zu den a priori - Werten liegt meist unter 0.1 mm/hPa. An der Station WETTZELL liefert die globale Lösung bei einem a priori

- Wert von 0.34 mm/hPa jedoch um ca. 0.2 mm/hPa größere Werte für die Koeffizienten. Interessant verhalten sich die Regressionskoeffizienten aus der globalen Lösung für die Station SESHAN25: Die a priori - Werte stimmen mit der globalen Lösung ohne Atmosphärenkorrektur sehr gut überein, jedoch weicht der aus der mit den a priori - Koeffizienten korrigierten globalen Lösung erhaltene Wert um ca. 0.4 mm/hPa von diesen Werten ab und weist ein anderes Vorzeichen auf. Grundsätzlich kann gesagt werden, dass bei der Schätzung der Regressionskoeffizienten aus der globalen Lösung keine signifikanten Unterschiede zwischen einer angebrachten Korrektur mit intern geschätzten Regressionskoeffizienten oder mit a priori bestimmten Regressionskoeffizienten erkennbar sind. Beide Lösungen liefern, mit Ausnahme von SESHAN25, gute und sehr ähnliche Ergebnisse. Für die Stationen MATERA, RICHMOND und WETTZELL liefert die Lösung mit a priori - Koeffizienten bessere Werte für die geschätzten Regressionskoeffizienten, bei den Stationen ALGOPARK, HOBART26, NYALES20, ONSALA60 und WESTFORD liefert jeweils die Lösung mit intern geschätzten Regressionskoeffizienten ohne Standard - Atmosphärenkorrektur jene Werte, die näher an der a priori - Lösung liegen.

6.5.2 Korrekturen der Stationskoordinaten

Die Ergebnisse der Korrekturen der Stationskoordinaten werden in Abb. 6.7, Abb. 6.9 und Abb. 6.6 dargestellt. Die Untersuchungen sollen wiederum Aufschluss darüber geben, welche Auswirkung die Anbringung von atmosphärischen Korrekturen in der globalen Lösung auf die Stationskoordinaten hat. Besonderes Augenmerk liegt auch hier bei der Lösung mit der Atmosphärenkorrektur aufgrund von a priori bestimmten Regressionskoeffizienten. Diese Korrekturwerte sind in den folgenden Grafiken rot dargestellt. Die blauen Balken zeigen die Korrekturwerte aus der Lösung mit intern geschätzten Regressionskoeffizienten ohne GSFC - Atmosphärenkorrektur, die grünen Balken jene aus der Lösung mit internen Regressionskoeffizienten und der Atmosphärenkorrektur aufgrund der Daten des GSFC.

Bei der Betrachtung der erhaltenen Korrekturwerte wird zuerst die Komponente dz betrachtet, dargestellt in Abb. 6.6. Für den Großteil der Stationen weist die globale Lösung mit intern geschätzten Regressionskoeffizienten ohne Atmosphärenkorrektur die kleinsten Korrekturwerte auf. Einzig bei den Stationen HOBART26, KASHIMA und SESHAN25 zeigt diese Lösung die größten Abweichungen im Vergleich zu den beiden anderen Lösungen, mit angebrachten Atmosphärenkorrekturen. Die Stationen KASHIMA und SESHAN25 liegen geographisch vergleichsweise knapp beisammen. Dies ist

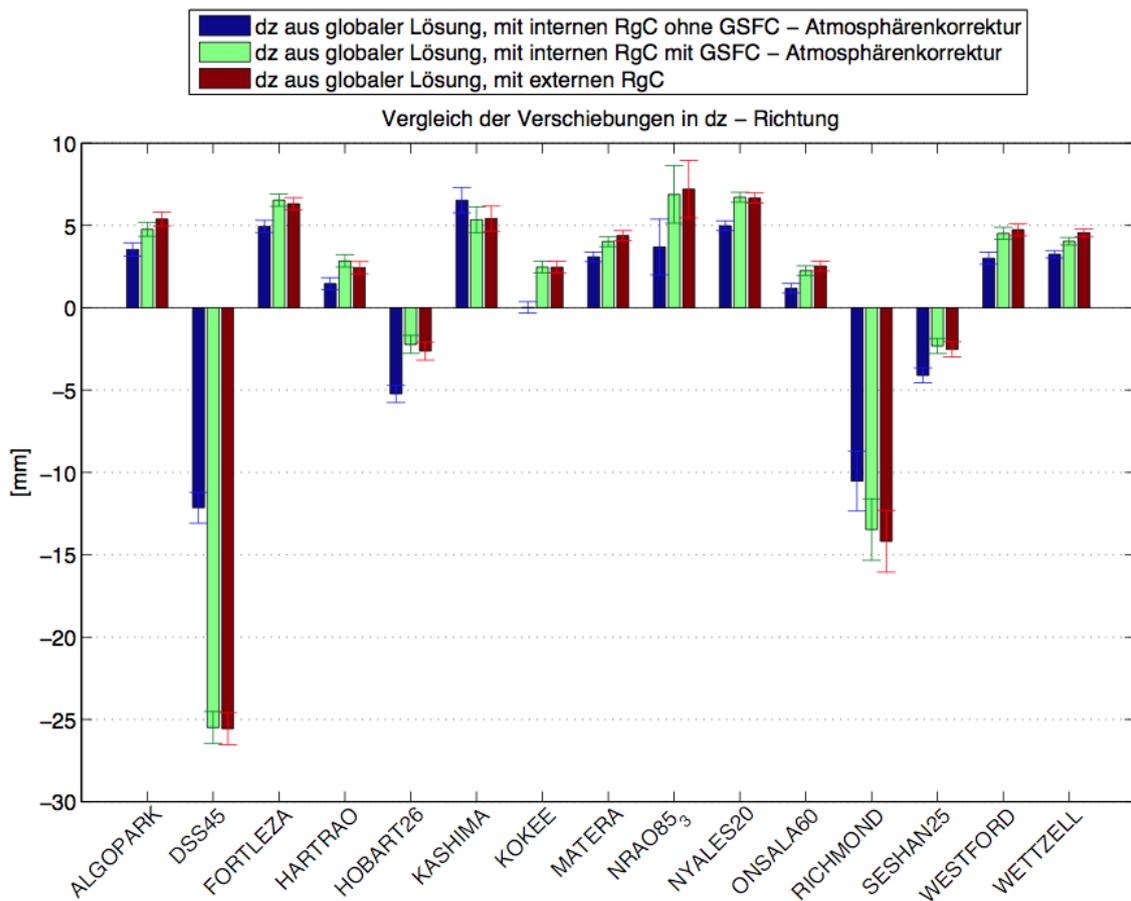


Abbildung 6.6: Korrektur der Stationskoordinaten in z - Richtung, aus globaler Lösung in VieVS

möglicherweise ein Grund für das ähnliche Verhalten der Korrekturwerte in z - Richtung. Behält man weiter die Lösung mit intern geschätzten Regressionskoeffizienten ohne GSFC - Atmosphärenkorrekturen im Auge, fällt auf, dass an der Station KOKEE die Korrektur in z - Richtung quasi den Wert null beträgt. Die Lösungen mit a priori bestimmten Regressionskoeffizienten bzw. intern geschätzten Regressionskoeffizienten und GSFC - Atmosphärenkorrektur weisen mit jeweils ca. + 2.5 mm sehr ähnliche Werte auf, liegen jedoch um ein Vielfaches über der ersten Lösung. KOKEE liegt in einem Gebiet mit stabiler Drucklage über das gesamte Jahr. Dieser geringe Einfluss der Atmosphäre auf die Erdkruste bzw. den Stationskoordinaten dürfte der Grund dafür sein, dass für diese beiden Lösungen um so viel größere Werte erhalten werden. Aufgrund der erwarteten kleinen Korrekturwerte in z - Richtung für die Station KOKEE ist davon auszugehen, dass die erste Lösung in diesem Fall das vermutlich beste Ergebnis liefert. Eine weitere Station, die für die Lösung ohne Atmosphärenkorrektur sehr viel kleinere Korrekturwerte in z - Richtung erhält, ist DSS45 an der Ostküste von Australien. Die Korrekturwerte betragen

für die erste Lösung - 12,1 mm. Im Vergleich dazu sind die Korrekturwerte für die beiden anderen Lösungen mit - 25.5 mm bzw. - 25.6 mm mehr als doppelt so groß. Die Differenz dieser Lösungen ist wiederum sehr gering, was auf ein ähnliches Verhalten wie bei der Station KOKEE schließen lässt.

Für die restlichen Stationen zeigt sich klar folgendes Bild: Die aus der ersten Lösung erhaltenen Korrekturen weisen die kleinsten Werte aller Lösungen auf. An der Station WETTZELL werden beispielsweise folgende Werte als z - Korrektur erhalten:

| | | |
|-----------------|-----------------------|-------------------------------|
| ohne Atm. Korr. | mit Atm. Korr. (GSFC) | mit Atm. Korr. (a priori RgC) |
| + 3.3 mm | + 4.0 mm | + 4.6 mm |

Wie an der Station WETTZELL verhalten sich die Korrekturwerte auch den meisten anderen Stationen. Die Lösung mit a priori Regressionskoeffizienten als Korrektur weist größere Korrekturwerte auf als die Lösung mit der GSFC - Atmosphärenkorrektur. Deren Werte sind wiederum größer als die der ersten Lösung ohne GSFC - Atmosphärenkorrektur. Einzig für die Stationen FORTLEZA, HARTRAO und NYALES20 zeigt die dritte Lösung kleinere Werte als die zweite Lösung. Die Station KOKEE wurde hier aufgrund der vorangegangenen Begründung nicht berücksichtigt.

Allgemein kann für die Korrekturwerte in z - Richtung gesagt werden, dass eine Lösung mit intern geschätzten Regressionskoeffizienten **ohne** Atmosphärenkorrektur die Ergebnisse mit den kleinsten Korrekturwerten erzielt. Die globale Lösung mit der Korrektur anhand externer Regressionskoeffizienten erzielt ähnliche Korrekturwerte wie die Lösung mit intern geschätzten Regressionskoeffizienten und GSFC - Atmosphärenkorrektur. Mit Ausnahme der drei zuvor erwähnten Stationen liefert sie dennoch die Ergebnisse mit den größten Korrekturwerten in z - Richtung. Die Unterschiede dieser beiden Lösungen erweist sich trotzdem als sehr gering, sie liegen durchschnittlich bei ± 0.3 mm, jedoch maximal bei ± 0.7 mm.

Weiters werden Korrekturen in x - und y - Richtung erhalten, diese Korrekturen werden durch die Komponenten dx und dy ausgedrückt. Der Einfluss der unterschiedlichen Atmosphärenkorrekturen auf diese Komponenten wird im Anschluss untersucht. Die farbliche Darstellung der Ergebnisse der einzelnen Lösungen ist identisch mit den zuvor diskutierten Ergebnissen.

Betrachtet man die Korrekturen in x - Richtung in Abb. 6.7, fällt auf, dass die Werte aus

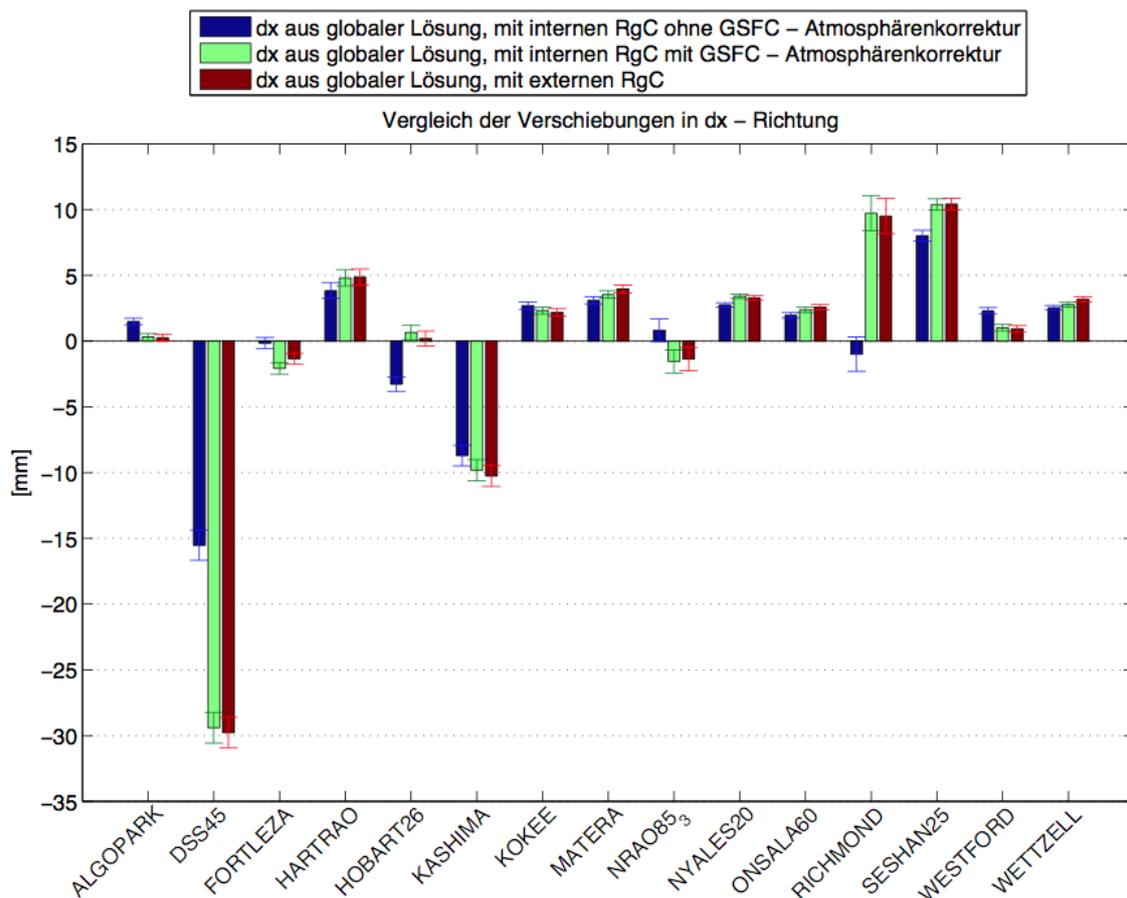


Abbildung 6.7: Korrektur der Stationskoordinaten in x - Richtung, aus globaler Lösung in VieVS

der globalen Lösung mit intern geschätzten Regressionskoeffizienten ohne GSFC - Atmosphärenkorrektur zum größten Teil wieder die kleinsten Werte aufweisen. Dabei sticht jedoch ins Auge, dass diese Korrekturen für die Stationen HOBART26, NRAO86 und RICHMOND anderes Vorzeichen als die der übrigen Lösungen besitzen. An der Station NRAO86 ist die Differenz dennoch recht gering, sie beträgt hier maximal 2.4 mm. Im Vergleich dazu beträgt die Differenz an der Station RICHMOND von beinahe 11 mm. An den Stationen KOKEE, ALGOPARK und WESTFORD ergibt sich für die erste Lösung der jeweils größte Wert für die Koordinatenkorrektur. Bei der Station KOKEE sind die Differenzen zu den Ergebnissen der anderen globalen Lösungen am kleinsten. Anders gestaltet sich das bei HOBART26, wo die Korrektur aus der ersten Lösung mit - 3.3 mm um ein Vielfaches größer ist als die der anderen globalen Lösungen mit + 0.7 mm bzw. + 0.2 mm. Die Station WETTZELL hat folgende Korrekturwerte in x- Richtung:

Die Korrekturen aus den globalen Lösungen für die Station WETTZELL werden beispiel-

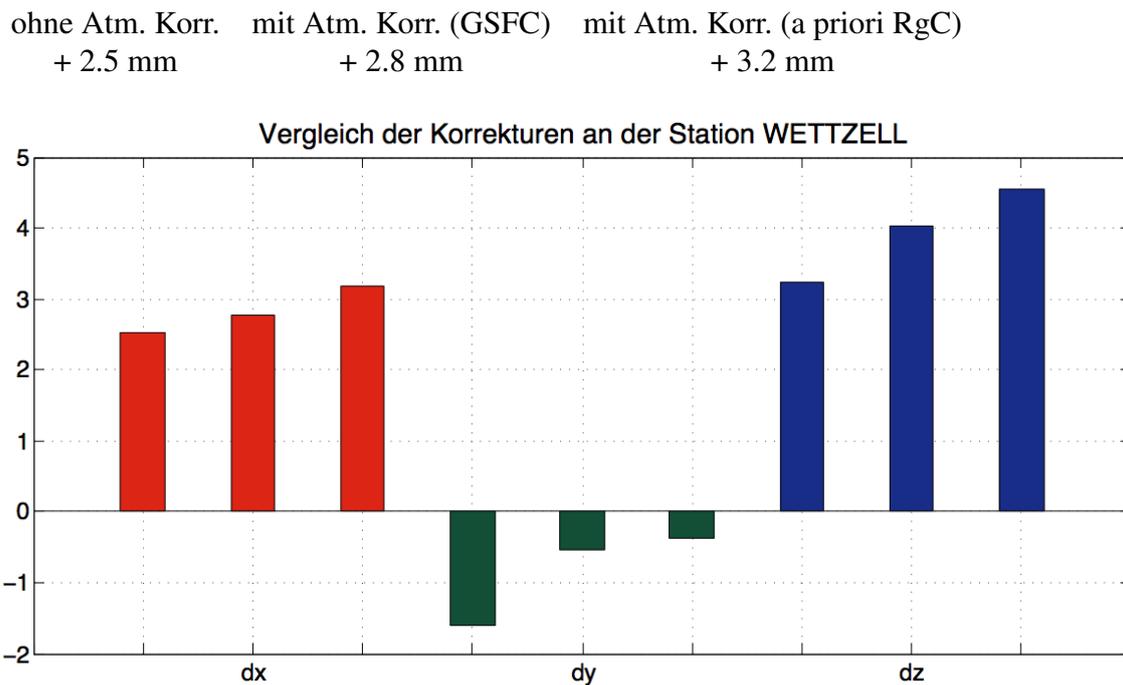


Abbildung 6.8: Korrekturen der Stationskoordinaten für die Station WETTZELL, aus globaler Lösung in VieVS

haft in Abb. 6.8 dargestellt.

Ähnlich zeigen sich die Unterschiede zwischen den globalen Lösungen für die restlichen Stationen. Wie bei den zuvor diskutierten Korrekturwerten in z -Richtung liefert die globale Lösung mit intern geschätzten Regressionskoeffizienten ohne GSFC - Atmosphärenkorrektur für die meisten Stationen die kleinsten Werte hinsichtlich der Korrekturen in x -Richtung. Die Differenzen zu den anderen Lösungen sind auch hier mit durchschnittlich 2.8 mm recht gering. Große Ausnahme dabei ist die Station DSS45. Wie bereits bei den Korrekturen in z -Richtung weisen die Korrekturen der Lösungen mit GSFC - Atmosphärenkorrektur mit -15.5 mm beinahe doppelt so große Werte auf die die Lösungen ohne GSFC - Atmosphärenkorrektur mit -29.4 mm und -29.8 mm. Die erhaltenen Korrekturwerte aus den globalen Lösungen mit intern geschätzten Regressionskoeffizienten und GSFC - Atmosphärenkorrektur und den Korrekturen anhand von a priori Regressionskoeffizienten sind wie bei der z -Komponente sehr ähnlich. Die mittleren absoluten Korrekturen in x -Richtung haben bei diesen beiden Lösungen sehr ähnliche Beträge, ihre Abweichung zueinander beträgt im Mittel nur 0.3 mm.

Im Anschluss an die Untersuchung der Korrekturen in x -Richtung werden nun die Korrekturen an die Stationskoordinaten in y -Richtung betrachtet, siehe Abb. 6.9. Anders als bei den vorigen Ergebnissen fällt auf, dass die Korrektur aus der globalen Lösung mit

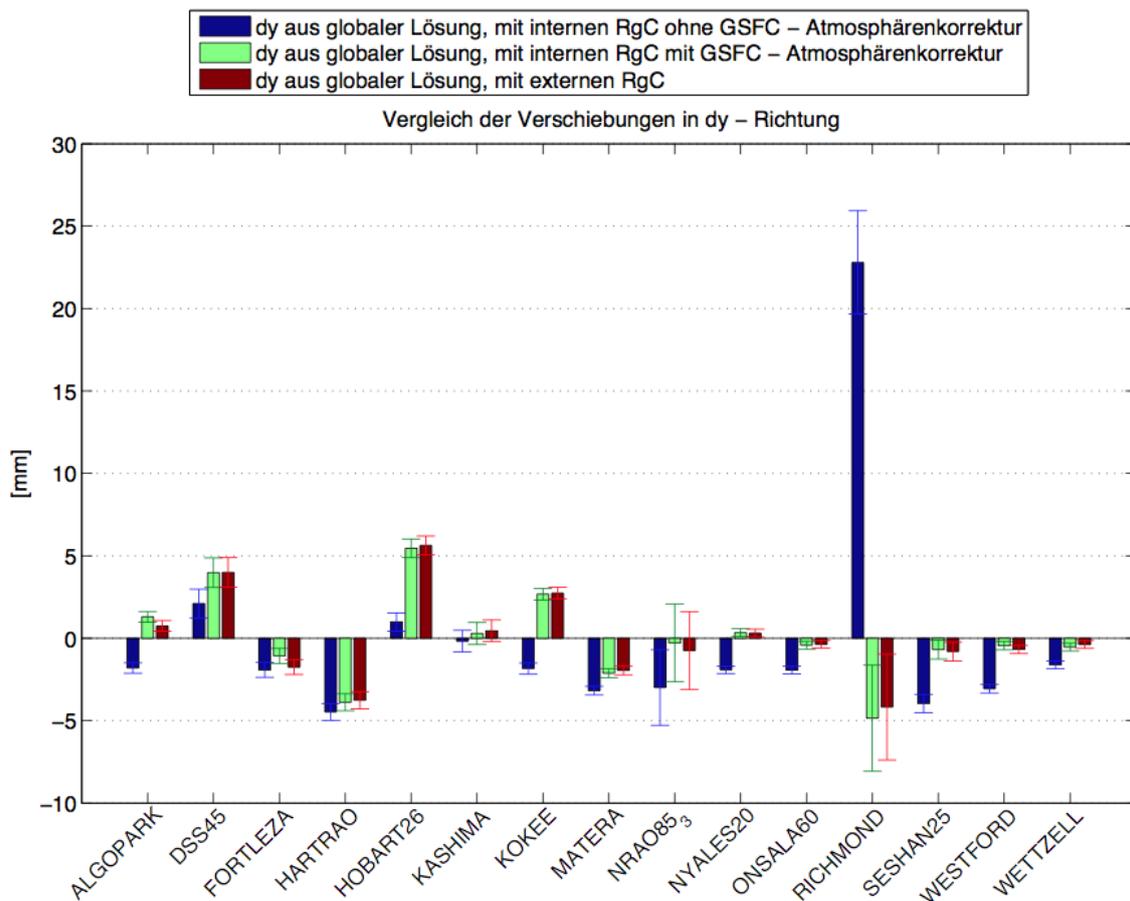


Abbildung 6.9: Korrektur der Stationskoordinaten in y - Richtung, aus globaler Lösung in VieVS

intern geschätzten Regressionskoeffizienten ohne Atmosphärenkorrektur für den Großteil der Stationen die größten Werte aufweisen, anders als bei den Korrekturen in x - bzw. z - Richtung. Besonders an der Station RICHMOND sticht der große Korrekturwert von + 22.8 mm ins Auge. Die zweite und dritte Lösung weisen hier Werte von - 13.5 mm bzw. - 14.2 mm auf, wobei bei den formalen Fehlern ungewöhnlich große Werte vorkommen. Bei vielen Stationen betragen die Korrekturen aus der Lösung ohne GSFC - Atmosphärenkorrektur ein Vielfaches der Werte der beiden anderen Lösungen. Einzig an den Stationen HOBART26, KASHIMA und DSS45 treten für die Lösung die kleinsten Werte aller Lösungen für die Korrektur in y - Richtung auf. Die Korrekturwerte der Lösungen mit GSFC - Atmosphärenkorrektur erweisen sich wieder als sehr ähnlich, wobei die globale Lösung mit Korrektur aus a priori Regressionskoeffizienten die kleinsten Werte für die Korrektur der Stationskoordinaten in y - Richtung ergibt.

6.5.3 Vergleich der Basislinienlängenwiederholbarkeiten

Eine Möglichkeit, den globalen Einfluss eines Modells zur Korrektur von Stationskoordinaten in einer globalen Lösung zu untersuchen, ist die Wiederholbarkeit der Basislinienlängen. Basislinien ergeben sich aus den Stationskoordinaten zweier Stationen.

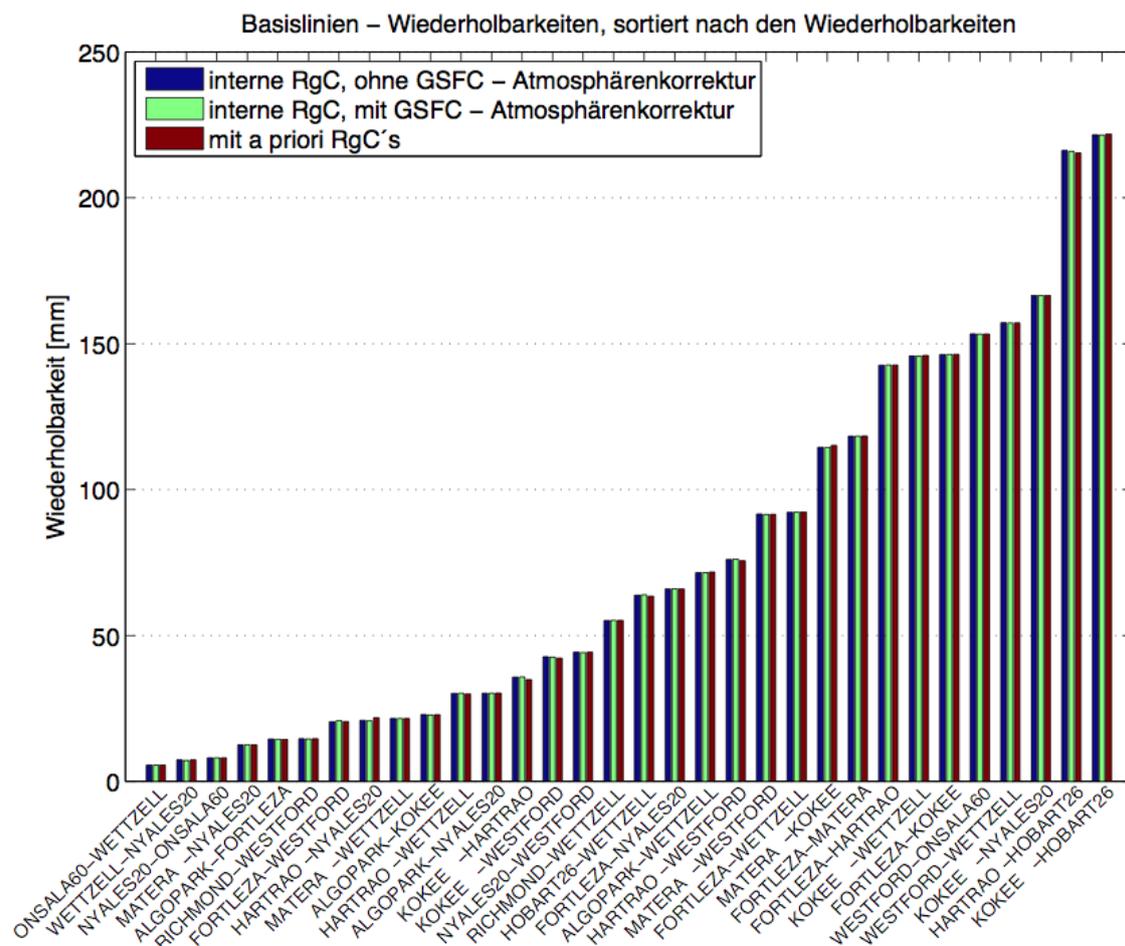


Abbildung 6.10: Basislinienlängenwiederholbarkeiten aus Basislinien mit mehr als 200 Sessions, geordnet nach der Wiederholbarkeit.

Die einzelnen Basislinien werden für jede Session zwischen den darin enthaltenen Stationen gebildet. Unter der Wiederholbarkeit dieser Basislinienlängen wird per Konvention die Standardabweichung der Basislinienlängen verstanden.

Um korrigierte Koordinaten jeder Station zu erhalten, werden den a priori - Koordinaten jeder Station Korrekturvektoren addiert. Diese Korrekturvektoren werden in der globalen Lösung geschätzt. Aus diesen Sätzen an Stationskoordinaten werden Basislinienlängen und weiters deren Wiederholbarkeiten berechnet. Eine Darstellung der hier untersuchten

Basislinienlängen ist in Abb. 6.10 ersichtlich. Dargestellt werden jene Basislinien, die in mehr als 200 VLBI - Sessions beobachtet wurden. Die Basislinien sind aufsteigend nach ihren Wiederholbarkeiten geordnet.

Um den Einfluss der unterschiedlichen Korrekturen auf die Basislinienlängen aussagekräftig darzustellen, werden Differenzen der Wiederholbarkeiten der einzelnen Lösungen gebildet und nach der Differenz der Wiederholbarkeiten der zweiten und ersten Lösung geordnet, siehe Abb. 6.11.

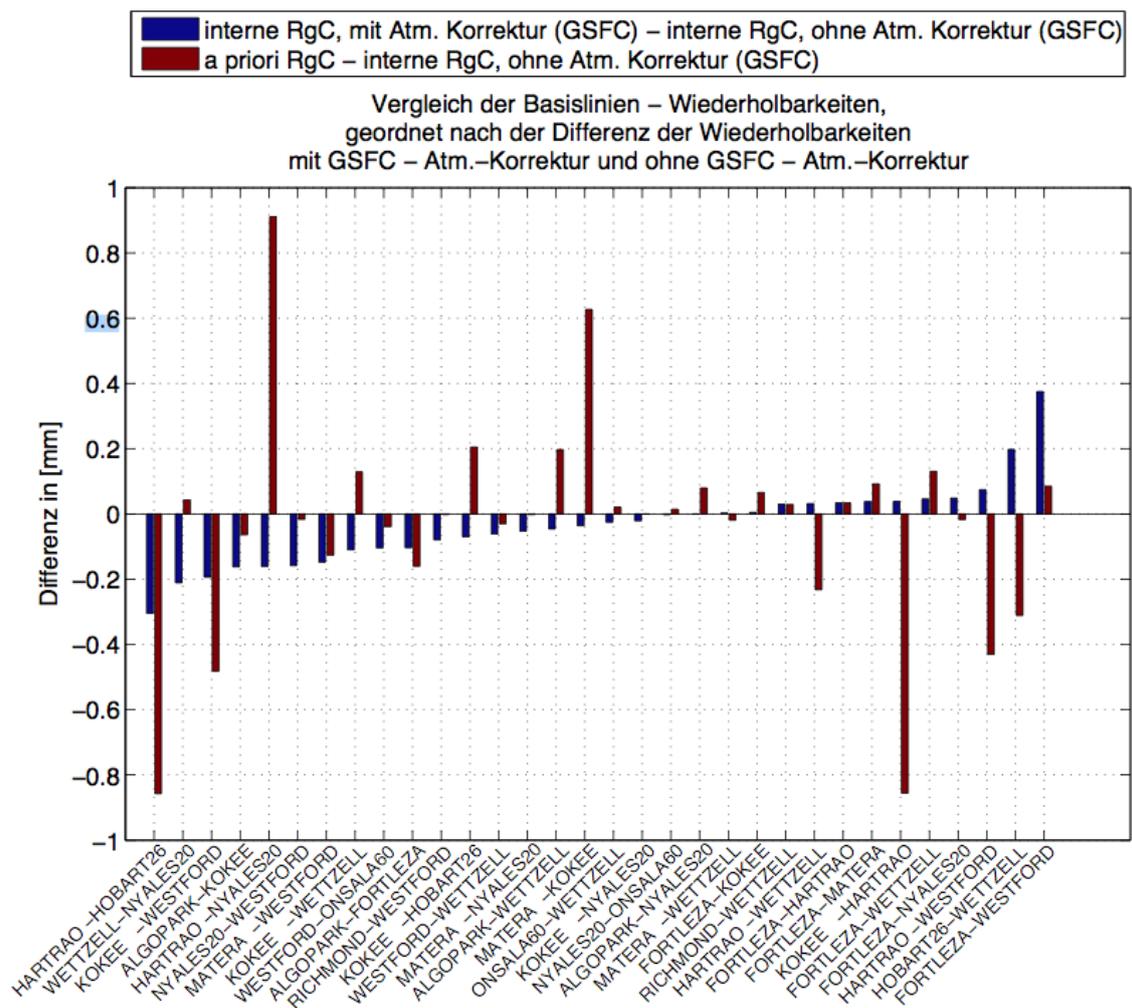


Abbildung 6.11: Differenzen der Basislinienlängenwiederholbarkeiten, geordnet nach der Differenz der Wiederholbarkeiten der Lösung mit intern geschätzten Regressionskoeffizienten und GSFC - Atmosphärenkorrektur und der Wiederholbarkeiten der Lösung mit intern geschätzten Regressionskoeffizienten ohne GSFC - Atmosphärenkorrektur.

Für die Wiederholbarkeiten der Basislinienlängen mit intern geschätzten Regressionskoeffizienten und GSFC - Atmosphärenkorrektur und der Basislinienlängen mit Korrektur durch externe Regressionskoeffizienten wurde jeweils die Differenz zu den Wie-

derholbarkeiten mit intern geschätzten Regressionskoeffizienten ohne GSFC - Atmosphärenkorrektur ermittelt. In Abb. 6.11 werden diese Differenzen durch blaue bzw. rote Balken dargestellt. Um die Grafik mit den dargestellten Differenzen besser zu verstehen folgt nun eine kurze Erklärung: Große, positive Werte in den Differenzen der Wiederholbarkeiten zeugen von einer besseren Wiederholbarkeit der Lösungen ohne GSFC - Atmosphärenkorrekturen. Ergeben sich aus diesen Differenzen negative Werte, weist die Lösung mit der jeweiligen Atmosphärenkorrektur die kleineren Wiederholbarkeiten auf. Nun gilt es zu untersuchen, welche der Atmosphärenkorrekturen die Lösungen mit den kleinsten Wiederholbarkeiten liefern. Die Wiederholbarkeiten entsprechen den Standardabweichungen der Basislinienlängen, die Werte der Differenzen bewegen sich im Sub - mm Bereich.

Bei Betrachtung von Abb. 6.11 fällt auf, dass die Lösungen mit a priori Regressionskoeffizienten teilweise sehr große Differenzen zu den Lösungen ohne GSFC - Atmosphärenkorrektur aufweisen. Dies deutet darauf hin, dass eine globale Lösung mit Korrektur durch a priori bestimmten Regressionskoeffizienten nicht für alle Stationen gute Ergebnisse liefert. Nur bei wenigen Basislinien ergeben sich bessere Wiederholbarkeiten als mit der globalen Lösungen mit GSFC - Korrektur. Zu diesen Basislinien zählen

- HARTRAO - HOBART26,
- KOKEE - WESTFORD,
- ALGOPARK - FORTLEZA,
- MATERA - WETTZELL,
- HARTRAO - WETTZELL,
- KOKEE - HARTRAO,
- HARTRAO - WESTFORD,
- HOBART26 - WETTZELL.

Diese Basislinien weisen für die Lösungen mit Atmosphärenkorrektur durch a priori - Regressionskoeffizienten die kleineren Wiederholbarkeiten auf. Die Stationen dieser Basislinien liegen sowohl in der nördlichen als auch in südlichen Hemisphäre und sind in Küstengebieten wie auch im Landesinneren zu finden.

Die Grafik zeigt weiters, dass die globale Lösung mit intern geschätzten Regressionskoeffizienten und GSFC - Korrekturen für den Großteil der Basislinien die kleinsten Wiederholbarkeiten aufweisen. Bei den Basislinien

- WETTZELL - NYALES20,

- ALGOPARK - KOKEE,
- HARTRAO - NYALES20,
- NYALES20 - WESTFORD,
- MATERA - WESTFORD,
- KOKEE - WETTZELL,
- WESTFORD - ONSALA60,
- RICHMOND - WESTFORD,
- KOKEE - HOBART26,
- WESTFORD - WETTZELL,
- MATERA - NYALES20,
- ALGOPARK - WETTZELL,
- MATERA - KOKEE,
- ONSALA60 - WETTZELL,
- KOKEE - NYALES20,
- NYALES20 - ONSALA60,
- ALGOPARK - NYALES20.

erweist sich diese Lösung hinsichtlich der Wiederholbarkeiten als jene mit den kleinsten Werten. Diese Lösung liefert somit für 17 der 32 Basislinien die Ergebnisse mit den kleinsten Wiederholbarkeiten.

Für sechs der beobachteten Basislinien tritt für die Wiederholbarkeiten der Fall ein, dass mit der Lösung mit intern geschätzten Regressionskoeffizienten ohne GSFC - Korrektur die kleinsten Werte erzielt werden. Dies tritt für folgende Basislinien ein:

- FORTLEZA - KOKEE,
- RICHMOND - WETTZELL,,
- FORTLEZA - HARTRAO
- FORTLEZA - MATERA,
- FORTLEZA - WETTZELL,
- FORTLEZA - WESTFORD

Auffällig ist, dass die Station FORTLEZA sehr stark vertreten ist. An dieser Station ist davon auszugehen, dass durch die Anbringung von Atmosphärenkorrekturen in Form von GSFC - Korrekturen und a priori bestimmten Regressionskoeffizienten eine Überkorrektur vorgenommen wurde.

Kapitel 7

Diskussion der Ergebnisse

Nachdem die Ergebnisse der globalen Lösung in Kap. 6 vorgestellt wurden, widmet sich dieser Teil der Arbeit der Diskussion dieser Ergebnisse. Zunächst wird anhand von Basislinienlängenwiederholbarkeiten evaluiert, welchen Einfluss unterschiedliche Atmosphärenkorrekturen auf die Koordinaten der Stationen und der Wiederholbarkeit ihrer Basislinienlänge haben.

Die Untersuchung der Wiederholbarkeiten der Basislinienlängen in Kap. 6.5.3 führt zu dem Schluss, dass durch Atmosphärenkorrektur mit a priori bestimmten Regressionskoeffizienten für die ausgewählten Basislinien zwar Verbesserungen erzielt werden können, jedoch können diese nur bei acht der 32 Basislinien erzielt werden. Eine Korrektur aufgrund von Regressionskoeffizienten kann also Auflasteffekte nur bedingt modellieren.

Betrachtet man die Wiederholbarkeiten der Basislinien mit Atmosphärenkorrektur aufgrund von Daten des GSFC und intern geschätzten Regressionskoeffizienten, werden bessere Ergebnisse erzielt als bei einer Korrektur mit a priori Regressionskoeffizienten. Mit der GSFC - Atmosphärenkorrektur werden für 17 der 32 beobachteten Basislinien kleinere Werte für die Wiederholbarkeiten erzielt.

Für sechs Basislinien werden die kleinsten Werte für die Wiederholbarkeiten durch eine Lösung ohne GSFC - Atmosphärenkorrektur mit intern geschätzten Regressionskoeffizienten erzielt. Es ist davon auszugehen, dass diese Lösungen gegenüber Lösungen mit GSFC - Atmosphärenkorrekturen nur an wenigen Stationen Vorteile aufweisen. Die Korrekturmodelle mit a priori - Regressionskoeffizienten bzw. mit GSFC - Daten und intern geschätzten Regressionskoeffizienten liefern für eine größere Anzahl von Basislinien die besseren Ergebnisse bei den Wiederholbarkeiten von Basislinienlängen, wobei die

Lösung mit GSFC - Korrektur für den Großteil der untersuchten Basislinien die kleinsten Wiederholbarkeiten aufweist.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zu den Basislinienlängenwiederholbarkeiten lassen darauf schließen, dass die Auflasteffekte an den Stationen nicht nur durch atmosphärische Einflüsse ausgelöst werden, sondern auch andere Parameter wie z. B. die Hydrologie in Betracht gezogen werden müssen.

Nach der Diskussion der Ergebnisse zu den Wiederholbarkeiten der Basislinienlängen werden nun die Korrekturen der Stationskoordinaten aus Kap. 6.5.2 untersucht. Dabei fiel an der Station KOKEE auf, dass die Lösung mit intern geschätzten Regressionskoeffizienten ohne GSFC - Atmosphärenkorrektur um ein Vielfaches kleinere Werte in z - Richtung liefert, als die Lösungen mit a priori Regressionskoeffizienten bzw. mit GSFC - Atmosphärenkorrektur und intern geschätzten Regressionskoeffizienten. Wie bereits erwähnt, liegt KOKEE in einem Gebiet mit wenig Druckvariation. Das könnte ein Grund für dieses Ergebnis sein, da diese Atmosphärenkorrekturen die jeweilige Lösung offensichtlich 'überkorrigieren'. Gleiches gilt für die Station DSS45, wo diese beiden Lösungen doppelt so große Korrekturwerte für die z - Koordinaten liefert als die Lösung ohne GSFC - Atmosphärenkorrektur. Ein Beispiel für eine Station, wo das Anbringen solcher Atmosphärenkorrekturen sinnvoll erscheint, ist die Station WETTZELL. Die Korrekturen der einzelnen Lösungen haben in z - Richtung in etwa die selbe Größenordnung, wobei die Atmosphärenkorrektur mit a priori Regressionskoeffizienten die Lösung mit den größten Korrekturwerten liefert.

Die Korrekturen in x - Richtung weisen ein ähnliches Verhalten auf wie die Korrekturen in z - Richtung. Die Lösung ohne GSFC - Atmosphärenkorrektur liefert die kleinsten Korrekturwerte der drei globalen Lösungen. Anders gibt sich das Verhalten der Korrekturwerte aus den globalen Lösungen für die y - Komponente. Hier treten für diese Lösung bei einem Großteil der Stationen die größten Korrekturwerte auf. Für viele Stationen betragen sie ein Vielfaches der Werte aus den Lösungen mit Atmosphärenkorrekturen aufgrund von a priori Regressionskoeffizienten und jenen aufgrund von intern geschätzten Regressionskoeffizienten mit GSFC - Atmosphärenkorrektur. Dies zeigt möglicherweise auch, dass der in VieVS verwendete a priori - Katalog VTRF2008 nicht ausreichend gute Werte für die Stationskoordinaten liefert.

Kapitel 8

Schlussfolgerung und Ausblick

Um zu evaluieren, ob Atmosphärenkorrekturen mit a priori bestimmten Regressionskoeffizienten Verbesserungen in den VLBI - Stationskoordinaten liefern, wurden drei globale VLBI Lösungen erstellt:

- ohne GSFC - Atmosphärenkorrektur mit intern geschätzten Regressionskoeffizienten,
- mit Atmosphärenkorrektur aufgrund von GSFC - Daten und intern geschätzten Regressionskoeffizienten,
- mit Atmosphärenkorrektur aufgrund von a priori bestimmten Regressionskoeffizienten.

Die Ergebnisse dieser globalen Lösungen wurden anhand von Korrekturen an den Stationskoordinaten und den Wiederholbarkeiten der Basislinienlänge untersucht. Bei den Korrekturen der Stationskoordinaten liegen die Ergebnisse der beiden Lösungen mit Atmosphärenkorrektur für die meisten Stationen eng beisammen, doch weist die Lösung mit intern geschätzten Regressionskoeffizienten ohne GSFC - Atmosphärenkorrektur größtenteils die geringeren Korrekturwerte auf. Für viele Stationen ist daher von einer 'Überkorrektur' der Stationskoordinaten auszugehen, da vor allem die Korrekturen in z - Richtung mit Atmosphärenkorrektur sehr hohe Werte an Stationen annehmen, an denen die Auflast nur in geringem Maße von der Atmosphäre beeinflusst wird. Hier liegt der Grund möglicherweise im Einfluss anderer Parameter, z. B. der Hydrologie.

In der Diskussion der Ergebnisse der Basislinienlängenwiederholbarkeiten kam man zum Schluss, dass die Lösung mit GSFC - Atmosphärenkorrekturen und intern geschätzten Regressionskoeffizienten für die größte Anzahl an Stationen die besten Ergebnisse liefert.

Für 17 der 32 beobachteten Basislinien lieferten die Lösungen mit diesen Korrekturen die kleinsten Werte. Die Lösung mit Atmosphärenkorrektur anhand von a priori geschätzten Regressionskoeffizienten liefert ebenso für einige Basislinien bessere Ergebnisse als eine globale Lösung ohne GSFC - Atmosphärenkorrektur. Es wird jedoch der Eindruck verstärkt, dass eine Atmosphärenkorrektur mit a priori bestimmten Regressionskoeffizienten die Auflasteffekte an den VLBI - Stationen nicht ausreichend modellieren kann. Für die Zukunft bleibt zu untersuchen, ob die Stationskoordinaten mit einer zusätzlichen Korrektur aufgrund von Hydrologie - Daten bessere Wiederholbarkeiten liefern. Das GSFC liefert bereits monatliche Hydrologie - Daten, welche in zukünftigen Arbeiten verwendet werden können.

Literatur

- Bock, D. und R. Noomen H.-G. Scherneck (2005). "Atmospheric pressure loading displacement of SLR stations". In: *Journal of Geodynamics* 39.3, S. 247–266.
- Böhm, J., S. Böhm, T. Nilsson, L. Plank, H. Spicakova, K. Teke und H. Schuh (2012). "The New Vienna VLBI Software VieVS". In: *Geodesy for Planet Earth* 136, S. 1007–1011.
- Böhm, J., T. Nilsson, L. Plank, H. Spicakova, K. Teke und A. Pany (2010). *Vienna VLBI Software, Version 1c*. Technische Universität Wien.
- Böhm, J., D. Salstein, M. M. Alizadeh und D. D. Wijaya (2013). "Geodetic and Atmospheric Background". In: *Atmospheric Effects in Space Geodesy*.
- Böhm, J. und H. Schuh (2013). *Atmospheric Effects in Space Geodesy*. Springer.
- Böhm, J., B. Werl und H. Schuh (2006). "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.
- Dach, R., J. Böhm, S. Lutz, P. Steigenberger und G. Beutler (2010). "Evaluation of the impact of atmospheric pressure loading modeling on GNSS data analysis". In: *Journal of Geodynamics* 85.2, S. 75–91.
- ECMWF (2012). "European co-operation at its best". In: *ECMWF Corporate Brochure*.
- GGOS (2014). *The Goals and Tasks of GGOS*. (Besucht am 31. 07. 2014).
- Harten, Ulrich (2007). *Physik: Einführung für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Bd. 3., bearb. und erw. Auflage. Springer.
- <http://ggosatm.hg.tuwien.ac.at> (2014a). *Vienna Mapping Functions 1 VMF1*. URL: <http://ggosatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY/SITE/VLBI/> (besucht am 07. 08. 2014).
- (2014b). *Vienna-APL "Non-tidal" Data Description*. URL: <http://ggosatm.hg.tuwien.ac.at/LOADING/VERSION4/VLBI/> (besucht am 07. 08. 2014).
- <http://vievs.geo.tuwien.ac.at/> (2014). *Vienna VLBI Software (VieVS)*. (Besucht am 05. 09. 2014).

- IVS (2011). *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry - Terms of Reference*. URL: <http://ivscc.gsfc.nasa.gov/about/org/documents/tor110705.html> (besucht am 05. 07. 2011).
- Karbon, M., D. Wijaya, M. Schindelegger, J. Böhm und H. Schuh (2011). "Atmospheric effects on the Earth gravity field by TU Vienna". In: *Vermessung und Geoinformation* 2, S. 122–130.
- Klose, B. (2008). *Meteorologie: Eine interdisziplinäre Einführung in die Physik der Atmosphäre*. Springer.
- Lagler, K. et al. (2013). "GPT2: Empirical slant delay model for radio space geodetic techniques". In: *Geophysical Research Letters* 40, S. 1069–1073.
- NASA (2014). *Goddard Space Flight Center*. URL: <http://www.nasa.gov/centers/goddard/home/> (besucht am 29. 08. 2014).
- Niemeier, W. (2008). *Ausgleichsrechnung*. Bd. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Walter de Gruyter.
- Petrov, L. (2012). *Atmospheric Pressure Loading Service*. URL: <http://gemini.gsfc.nasa.gov/aplo/> (besucht am 17. 07. 2012).
- Petrov, L. und J.-P. Boy (2004). "Study of the atmospheric pressure loading signal in very long baseline interferometry observations". In: *Journal of Geophysical Research* 109.
- Ponte, R.M. und R.D. Ray (2002). "Atmospheric pressure loading corrections in geodesy and oceanography: A strategy for handling air tides." In: *Geophysical Research Letters* 29.24.
- Schuh, H. und D. Behrend (2012). "VLBI: A fascinating technique for geodesy and astrometry". In: *Journal of Geodynamics* 61, S. 68–80.
- Schuh, H. und J. Böhm (2013). "Very Long Baseline Interferometry for Geodesy and Astrometry". In: *Sciences of Geodesy II, Innovations and Future development*, S. 339–376.
- Schuh, H., J. Böhm, S. Englich und A. Nothnagel (2009). "Determination of UT1 by VLBI". In: *Highlights of Astronomy* 15.
- Torge, W. (1989). *Gravimetry*. de Gruyter.
- vanDam, T. M. und T. A. Herring (1994). "Detection of atmospheric pressure loading using very long baseline interferometry measurements". In: *Journal of Geophysical Research* 99.B3, S. 4505–4517.
- Wijaya, D. D., J. Böhm, M. Karbon, H. Krásná und H. Schuh (2013). "Atmospheric Pressure Loading". In: *Atmospheric Effects in Space Geodesy*.
- www.iag-ggos.org (2014). *The Three Pillars*. (Besucht am 31. 07. 2014).