

Unterschrift des Betreuers



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN**  
Vienna University of Technology

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

# Untersuchung von geophysikalischen Auflasteffekten mit der VLBI

Ausgeführt am

Department für Geodäsie und Geoinformation  
Forschungsgruppe Höhere Geodäsie

der Technischen Universität Wien

unter der Anleitung von

Johannes Böhm, Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.  
Hana Krásná, Projektass.(FWF) Dipl.-Ing. Dr.techn.

durch

Roman Dittrich, BSc  
MatrNr.: 0825149  
Römergasse 11  
1160 Wien - Austria



## Abstract

The Master's thesis analyses geophysical loading effects using Very Long Baseline Interferometry (VLBI). Geophysical loading effects are mass redistributions of the ocean, the atmosphere and the hydrology. These effects influence the coordinates of the measuring stations. The main focus is on the station altitude. Various factors such as latitude (atmospheric loading), wetlands (hydrology loading), huge lakes (ocean loading) and distance to the sea (ocean loading), have an impact on the measuring stations. For this analysis, data from 2000 to 2012 was examined.

Observations from 118 different stations were evaluated with Vienna VLBI Software (VieVS) and Matlab. Not all of these stations offered useful data for the analysis. Continuous measurements of at least three years are a requirement for reasonable calculations.

The variations of the coordinates are plotted with or without geophysical correction models. These figures are compared to one another to show the different influences of the geophysical loading effects. The influence of the geophysical loading effects is examined by means of the standard deviation, an annual and a semiannual oscillation.

The ocean loading correction models improve the deviation of the height time series. The improvement depends on the location of the stations. If the station is located next to the sea or a huge lake, the improvement would be greater than at stations far away from the sea or a huge lake.

Moreover, the height of the tide influences the geophysical loading effects. If the tide is higher, the improvement of the deviation would increase. FORTLEZA is located directly at the sea, where the tidal range is 90 cm. At this station the improvement of the deviation is 0.27 cm. In comparison ONSALA60, as well located directly at the sea, but in this region the tidal range reaches only a maximum of 10 cm. Therefore ONSALA60 shows no improvement of the deviation.

The atmosphere loading correction models improve the deviation of the height time series. The stations with the largest improvements of the deviation are in the mid-latitude ( $40^{\circ}$  -  $60^{\circ}$  N). In this region, the variations in the atmosphere loading register very high results. The difference of the deviation at the station NYALES20 ( $78^{\circ}$  N) is 0.010 cm. The average of the differences of the deviation from ten stations in the mid-latitude is 0.036 cm.

The hydrology loading correction models improve the amplitudes of the annual and semiannual oscillations. Eurasia and North America are regions with high hydrology variations. At most of the stations the hydrology loading corrections models improve both amplitudes. ALGOPARK is located in a lake district of Canada, where the hydrology variations could show very high data. With the hydrology loading correction model the amplitudes of the oscillation nearly decrease to zero at the station ALGOPARK.

Geophysical correction models generally improve the deviation of both, the corrections of the coordinates and the amplitudes of the annual/semiannual oscillations. As a result, the geophysical correction models are highly important and should be used for all observations and calculations.

## Kurzfassung

Die Aufgabe dieser Masterarbeit ist die Untersuchung von geophysikalischen Auflasteffekten mittels Very Long Baseline Interferometry (VLBI). Als geophysikalische Auflasteffekte werden die ozeanischen, atmosphärischen und hydrologischen Massenumverteilungen bezeichnet. Diese haben einen Einfluss auf die Variation der Stationskoordinaten. Hauptsächlich werden geophysikalische Auflasteffekte in den Höhenkoordinaten der Stationen sichtbar. Die Einflüsse an den Stationen können recht unterschiedlich sein, je nach dem in welchem Breitengrad (atmosphärischer Auflasteffekt) und in welcher Entfernung zum Meer (ozeanischer Auflasteffekt), zu großen Seen (ozeanischer Auflasteffekt) und zu Gebieten mit großer variabler Wasserspeicherung von Bodenwasser, Grundwasser, Schnee und Eis, sowie von Flüssen, Seen und Feuchtgebieten (hydrologischer Auflasteffekt) die VLBI Stationen stehen.

Für diese Untersuchung werden VLBI Beobachtungen aus den Jahren 2000 bis 2012 von 118 Stationen herangezogen und mit VieVS und Matlab untersucht. Aus diesen Stationen werden all jene ausgewählt, die mindestens drei Jahre kontinuierlich gemessen haben. Für die 20 ausgewählten Stationen werden die Koordinatenzuschläge mit und ohne geophysikalischen Korrekturmodellen geplottet und verglichen. Durch die Schätzung einer jährlichen und halbjährlichen Schwingung, sowie der Standardabweichung, werden Aussagen über den Einfluss der geophysikalischen Auflasteffekte getroffen. Das Ergebnis ist, je nach Standort der VLBI Station, der unterschiedliche Einfluss der geophysikalischen Auflasteffekte in der Höhenkomponente der Stationskoordinaten.

Die Anbringung von ozeanischen Korrekturmodellen liefert eine Verbesserung in der Standardabweichung der Koordinatenzuschläge der Höhenkoordinate der VLBI Stationen. Beim Vergleich mit der Lage der Station und den Differenzen der Standardabweichungen zeigt sich, dass die Stationen an der Küste und an großen Seen höhere Verbesserungen in der Standardabweichung aufweisen. Neben der Entfernung zur Küste und zu großen Seen ist auch die Höhe der Gezeitenwellen ausschlaggebend. Je größer die Gezeitenwelle an der jeweiligen Küste ist, desto größer ist auch die Verbesserung in der Standardabweichung. Die VLBI Station FORTLEZA liegt direkt an der Küste mit einem Gezeitenhub von bis zu 90 cm. An dieser Station wird die Standardabweichung bei Anbringung der ozeanischen Korrektur um 0.27 cm verbessert. ONSALA60 liegt ebenfalls direkt an der Küste, an der jedoch der Gezeitenhub maximal 10 cm beträgt, daher zeigt sich bei Anbringung der ozeanischen Korrektur an dieser VLBI Station keine Verbesserung in der Standardabweichung.

Die Anbringung von atmosphärischen Korrekturmodellen liefert ebenfalls eine Verbesserung in der Standardabweichung der Koordinatenzuschläge der Höhenkoordinate der VLBI Stationen. Die Stationen mit den größten Verbesserungen in der Standardabweichung liegen alle in den mittleren Breiten ( $40^\circ - 60^\circ$  N). Das ist jener Breitengrad in dem die atmosphärischen Variationen am größten sind. Zwischen  $40^\circ - 60^\circ$  N ist die Differenz der Standardabweichung um eine Größenordnung größer als an den Stationen die südlicher oder nördlicher liegen. NYALES20 ist mit einer Breite von  $78^\circ$  N die nördlichste VLBI Station und weist, bei Anbringung der atmosphärischen Korrektur, eine Differenz in der Standardabweichung von 0.010 cm auf. Dieser Wert ist ein Drittel des Mittelwertes (0.036 cm) der zehn Stationen im Breitengrad  $40^\circ - 60^\circ$  N.

Die Anbringung von hydrologischen Korrekturmodellen bringt eine Verbesserung der Amplituden von der jährlichen und halbjährlichen Schwingung. In den hydrologisch aktivsten Gegenden (Amazonasgebiet, nördlich und südlich des Äquators in Afrika und Südostasien) stehen keine VLBI Stationen. Eurasien und Nordamerika zählen auch zu hydrologisch variablen Erdteilen und zu den Erdteilen mit den meisten VLBI Teleskopen. In den meisten Fällen verbessert die Anbringung der hydrologischen Korrektur die Amplituden der Schwingung und die Standardabweichung der Koordinatenzuschläge. ALGOPARK zeigt die größte Verbesserung in der jährlichen Amplitude. Die jährliche Schwingung wird fast vollständig geglättet. Der

Grund dafür ist wahrscheinlich, dass ALGOPARK in Kanada in einer Seenplatte steht und dort die hydrologischen Variationen groß sein können.

Allgemein lässt sich sagen, dass sich geophysikalische Auflasteffekte unterschiedlich stark auf die Höhenkoordinate der verschiedenen VLBI Stationen auswirken. Geophysikalischen Korrekturmodelle führen im allgemeinen zu Verbesserungen der Standardabweichung der Koordinatenzuschläge der Höhenkoordinate und der Amplituden der jährlichen und halbjährlichen Schwingung und sie sind daher bei allen Beobachtungen und Berechnungen anzubringen.

## Danksagung

Ich möchte mich bei allen Personen, die mich bei dieser Masterarbeit unterstützt haben, ganz herzlich bedanken.

Ganz besonderen Dank richte ich an Johannes Böhm, Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn., und Hana Krásná, Projektass.(FWF) Dipl.-Ing. Dr.techn., für die exzellente Unterstützung und Betreuung dieser Arbeit.

Weiters bedanke ich mich sehr bei Corinna Harmening, Projektass.(FWF) MSc, für die wertvolle Beratung bei schwierigen Programmierungsaufgaben.

Natürlich bedanke ich mich auch bei meiner Familie, die mir das Studium erst ermöglicht hat, und bei meinen Freunden, die mich oft auf andere Gedanken gebracht haben.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abstract</b>	<b>III</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>IV</b>
<b>Danksagung</b>	<b>VI</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>XIII</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XIV</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>XV</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1 Very Long Baseline Interferometry - VLBI . . . . .	3
2.2 VLBI Prinzip . . . . .	3
2.3 Vienna VLBI Software . . . . .	5
2.4 Internationaler VLBI Service für Geodäsie und Astrometrie . . . . .	7
2.5 VLBI2010 . . . . .	7
<b>3 Stationsverschiebungen</b>	<b>10</b>
3.1 Gezeiten der festen Erde . . . . .	10
3.2 Ozeanische Auflasteffekte . . . . .	11
3.3 Atmosphärische Auflasteffekte . . . . .	11
3.4 Pole tide loading . . . . .	13
3.5 Ocean Pole tide loading . . . . .	14
3.6 Hydrologische Auflasteffekte . . . . .	15
<b>4 Auswertung</b>	<b>21</b>
4.1 Ziel . . . . .	21
4.2 Auswahl der Sessions . . . . .	21
4.3 Auswahl der Stationen . . . . .	21
4.4 Berechnung . . . . .	21
<b>5 Ergebnisse</b>	<b>25</b>
5.1 ALGOPARK . . . . .	27
5.2 BADARY . . . . .	29
5.3 FORTLEZA . . . . .	31
5.4 FORTORDS . . . . .	33
5.5 GILCREEK . . . . .	34
5.6 HARTRAO und HART15M . . . . .	37
5.7 HOBART12 und HOBART26 . . . . .	38
5.8 KOKEE PARK . . . . .	40
5.9 MATERA . . . . .	42
5.10 MEDICINA . . . . .	43
5.11 NYALES20 . . . . .	45
5.12 ONSALA60 . . . . .	48
5.13 SVETLOE . . . . .	49
5.14 TIGOCONC . . . . .	51
5.15 TSUKUB32 . . . . .	54

5.16 WESTFORD . . . . .	55
5.17 WETTZELL . . . . .	56
5.18 ZELENCHK . . . . .	58
<b>6 Diskussion und Zusammenfassung</b>	<b>62</b>
6.1 Diskussion . . . . .	62
6.1.1 Anbringung von ozeanischen Korrekturmodellen . . . . .	62
6.1.2 Anbringung von atmosphärischen Korrekturmodellen . . . . .	63
6.1.3 Anbringung von hydrologischen Korrekturmodellen . . . . .	65
6.2 Ausblick . . . . .	68
6.3 Zusammenfassung . . . . .	69
<b>Literatur</b>	<b>70</b>
<b>Anhang I</b>	<b>76</b>
<b>Anhang II</b>	<b>87</b>
<b>Anhang III</b>	<b>89</b>

# Abbildungsverzeichnis

1	Prinzip des gesamten VLBI-Ablaufs: Die an zwei Stationen empfangenen Radiowellen werden mit Wasserstoff-Masern aufgezeichnet und auf Festplatten gespeichert und an das Korrelationzentrum geschickt oder mit einer direkten Datenverbindung digital gesendet. Im Korrelationzentrum wird die Laufzeitverzögerung bestimmt um damit die Distanz und Position der VLBI Stationen zu berechnen. (Quelle: Geospatial Information Authority of Japan [2005]) . . . . .	4
2	Grundprinzip der VLBI-Messung. Die Projektion der Basislinie auf den Richtungsvektor zur Quelle berechnet man sich durch die Multiplikation der Ausbreitungsgeschwindigkeit (entspricht der Lichtgeschwindigkeit) und der Zeitdifferenz. (Quelle: Joeckel u. Stober [2008]) . . . . .	5
3	Interne Struktur von VieVS. Unter Vie_SETUP wird die graphische Benutzeroberfläche verstanden. Im Modul Vie_INIT werden die Eingangsdaten gelesen, im Modul Vie_MOD wird die theoretische Laufzeitverzögerung berechnet, im Modul Vie_LSM wird die Ausgleichung durchgeführt. Das Modul Vie_SIM erlaubt eine Simulation von VLBI Beobachtungen, das Modul Vie_SCHED die Erstellung eines Beobachtungszeitplanes und das Modul Vie_GLOB die Schätzung von globalen Parametern. (Quelle: Spicakova u. a. [2009]) . . . . .	6
4	Auf dieser Karte werden alle VLBI Standorte, die der IVS koordiniert, abgebildet. Schwarze Teleskope sind die IVS Standorte, blaue Teleskope sind Standorte von anderen Organisationen, die mit dem IVS kooperieren, und rote Teleskope sind geplante IVS Standorte. (Quelle: International VLBI Service for Geodesy and Astrometry [2013]) . . .	8
5	IVS Produkte und deren Genauigkeiten. (Quelle: Schlüter [2000], Schuh u. Böhm [2013]) . . . . .	9
6	Stationsverschiebungen in Zentimetern in vertikaler Richtung aufgrund von Erdkrustendeformationen hervorgerufen durch die Gezeiten der festen Erde, ozeanischen, atmosphärische und hydrologische Auflasteffekte, sowie der Poltide und der ozeanischen Poltide. (Quelle: Hana Krásná [2013]) . . . . .	10
7	Die Stationsverschiebungen in Zentimeter durch die Gezeiten der festen Erde an der Station Wettzell von 01.08.2008 bis 31.08.2008. Die blaue Linie zeigt die Verschiebung in der vertikaler Richtung, die von +20 cm bis -20 cm reicht. Die horizontalen Verschiebungen (Nordrichtung in grün, Ostrichtung in rot) sind um vieles geringer. (Quelle: Hana Krásná [2013]) . . . . .	11
8	Der Vergleich von fünf verschiedenen Modellen (FES2004, AG06, EOT08a, GOT00 und TPX07.2) für die Korrektur von ozeanischen Auflasteffekten an den Stationen Kokee (oberer Grafik) und Wettzell (untere Grafik) innerhalb einer 24-stündigen Session am 12.09.2005. Die Verschiebungen in vertikaler Richtung (dR) sind um das zehnfache größer als in horizontaler Richtung (Nordrichtung dN und Ostrichtung dE). (Quelle: Hana Krásná [2013]) . . . . .	12

- 9 Die Darstellung der Gezeitenwelle M2 mit einem Tidenhub von 0 cm, in blau geplottet, bis 130 cm oder mehr, in dunkelrot dargestellt, erstellt vom GSFC der NASA.  
(Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Gezeiten#mediaviewer/File:M2\\_tidal\\_constituent.jpg](http://de.wikipedia.org/wiki/Gezeiten#mediaviewer/File:M2_tidal_constituent.jpg)) . . . . . 13
- 10 Die Standardabweichungen der Stationshöhen von verschiedenen atmosphärischen Auflastmodellen (TU Wien (blau), GSFC (grün), VANDAM (pink)). Aufgelistet sind nur Station, die an mindestens 50 Sessions im Zeitraum von 1990 - 2010 beteiligt waren und diese sind nach der Breite sortiert. Negative Werte sind in diesem Fall Verbesserungen und die größten sind in den mittleren Breitengraden (40° - 60° N) zu finden.  
(Quelle: Hana Krásná [2013]) . . . . . 14
- 11 Die Polbewegung zwischen 1962 und 2010 zeigt einen Drift der Erdrotationsachse in Richtung 78° W, mit einer jährlichen Verschiebung von 10 cm. Der Beginn der Aufzeichnung ist mit der Farbe Magenta gekennzeichnet und ab dem Jahr 2000 wird der Drift in rot bis dunkelrot dargestellt.  
(Quelle: Schindelegger [2014]) . . . . . 15
- 12 Das lineare und kubische Modell des mittleren Pols der Erdrotationsachse zum Vergleich: In der oberen Grafik werden beide Modelle in x-Richtung und in der unteren Grafik in y-Richtung über den Zeitraum von 1980 bis 2011 geplottet. In rot ist das lineare Modell und in blau das kubische Modell dargestellt. Ab dem Jahr 2000 kommt es, aufgrund der beschleunigten Abschmelzung der Polkappen, zu starken Abweichungen der beiden Modelle.  
(Quelle: Hana Krásná [2013]) . . . . . 16
- 13 Obere Grafik: Der Einfluss der ozeanischen Poltide auf die vertikale Verschiebung der Station Kokee Park (blau) und Wettzell (rot). Jeweils in dunkler Farbe ist die lineare Lösung dargestellt und in heller Farbe die kubische Lösung. Bis zum Jahr 2005 ist kein Unterschied zwischen den zwei Lösungen zu sehen. Ab dem Jahr 2005 kommt es vor allem bei der Station Kokee Park zu sichtbaren Differenzen. Untere Grafik: Die Koordinaten des momentanen Pols der Rotationsachse (x-Koordinate in grün und y-Koordinate und violett).  
(Quelle: Hana Krásná [2013]) . . . . . 17
- 14 Vertikale Stationsverschiebungen in mm (Zelenchukskaya in blau, Kokee Park in rot) aufgrund von hydrologischen Auflasteffekten im Zeitraum von 1984 bis 2011. Zelenchukskaya weist Verschiebungen von bis zu 2 cm auf, Kokee Park hingegen von nur ein paar Millimetern.  
(Quelle: Hana Krásná [2013]) . . . . . 18
- 15 Der vertikale hydrologische Auflasteffekt im Fourierspektrum der Stationen Zelenchukskaya (blau) und Kokee Park (rot). Die Station Zelenchukskaya zeichnet zehn mal höhere Amplituden auf als die Station Kokee Park.  
(Quelle: Hana Krásná [2013]) . . . . . 18
- 16 Differenzen der Standardabweichungen (mit minus ohne Korrektur der hydrologischen Auflasteffekte) der Zeitserien in vertikaler Richtung von allen Stationen die von 1984 bis 2011 an mindestens 50 Sessions beteiligt waren. Negative Werte stehen für eine Verbesserung der Standardabweichung.  
(Quelle: Hana Krásná [2013]) . . . . . 19

17	Differenzen der Standardabweichungen (mit minus ohne Korrektur der hydrologischen Auflasteffekte) der Basislinienlänge, dargestellt in km-Länge. Es erscheinen nur Basislinien die in mehr als 200 VLBI Sessions beobachtet wurden. Es übersteigen nur drei Basislinien (TIGO - Hartebeesthoek (8431 km), Tsukuba - Wettzell (8445 km) und TIGO - Gilmore Creek (10837 km)) die Standardabweichung von 0.5 mm. Sieht man diese drei Basislinien als Ausreißer ergibt sich ein mittlere Wert für die Basislinienwiederholbarkeit von -0.01 mm. (Quelle: Hana Krásná [2013]) . . . . .	19
18	Mittlere monatliche Variabilität der kontinentalen Wasserspeicherung. Gelbe Regionen sind hydrologisch sehr stabile Regionen, blaue Regionen hingegen weisen eine sehr hohe Variabilität der Wasserspeicherung auf. Die meisten Teleskope stehen in den grünen Regionen, die ebenfalls hydrologisch variabel sind. (Quelle: Güntner u. a. [2012] . . . . .	20
19	VieVs Benutzeroberfläche: Einlesen der Sessions (links), TRF und CRF Einstellungen (rechts) . . . . .	23
20	Stationskorrekturen: Solid Earth tides, Pole tide, Ocean pole tide und Thermal antenna deformation sind bei jeder Berechnung eingestellt. Alle anderen Korrekturen werden in allen möglichen Kombinationen durchgerechnet. Für die Auflasteffekte werden die voreingestellten Modelle verwendet. . . . .	24
21	Die Station Wettzell mit sämtlichen geophysikalischen Korrekturmodellen . . .	24
22	Die weltweite Verteilung der ausgewählten VLBI Stationen: HART15M und HARTRAO sind gemeinsam unter dem Namen HARTRAO geplottet und HOBART12 und HOBART26 gemeinsam unter dem Namen HOBART. . . . .	26
23	Die Zeitserien der Station ALGOPARK ohne geophysikalischen Korrekturmodellen . . . . .	27
24	Die Zeitserien der Station ALGOPARK mit atmosphärischem Korrekturmodell	28
25	Die Zeitserien der Station ALGOPARK mit ozeanischen, atmosphärischen und hydrologischen Korrekturmodellen . . . . .	28
26	Die Plots zeigen alle möglichen Kombinationen der Korrekturmodelle von den Auflastmodellen (Balken 1 bis Balken 16) für die Station ALGOPARK. Rot: Standardabweichung. Blau: jährliche Amplitude. Grün: halbjährliche Amplitude. . . . .	29
27	Die Zeitserien der Station BADARY ohne geophysikalischen Korrekturmodellen	30
28	Die Zeitserien der Station BADARY mit atmosphärischem Korrekturmodell . .	30
29	Die Zeitserien der Station FORTLEZA ohne geophysikalischen Korrekturmodellen . . . . .	31
30	Die Zeitserien der Station FORTLEZA mit ozeanischem Korrekturmodell . . .	32
31	Die Zeitserien der Station FORTLEZA mit ozeanischen, atmosphärischen und hydrologischen Korrekturmodellen . . . . .	32
32	Die Plots zeigen alle möglichen Kombinationen der Korrekturmodelle von den Auflastmodellen (Balken 1 bis Balken 16) für die Station FORTLEZA. Rot: Standardabweichung. Blau: jährliche Amplitude. Grün: halbjährliche Amplitude. . . . .	33
33	Die Zeitserien der Station FORTORDS ohne geophysikalischen Korrekturmodellen . . . . .	34
34	Die Zeitserien der Station FORTORDS mit ozeanischem Korrekturmodell . . .	34
35	Die Zeitserien der Station GILCREEK ohne geophysikalischen Korrekturmodellen . . . . .	35
36	Die Zeitserien der Station GILCREEK mit atmosphärischem Korrekturmodell	35
37	Die Zeitserien der Station GILCREEK mit ozeanischen und atmosphärischen Korrekturmodellen . . . . .	36

38	Die Plots zeigen alle möglichen Kombinationen der Korrekturmodelle von den Auflastmodellen (Balken 1 bis Balken 16) für die Station GILCREEK. Rot: Standardabweichung. Blau: jährliche Amplitude. Grün: halbjährliche Amplitude. . . . .	36
39	Die Zeitserien der Station HARTRAO ohne geophysikalischen Korrekturmodellen	37
40	Die Zeitserien der Station HARTRAO mit ozeanischem Korrekturmodell . . .	38
41	Die Zeitserien der Station HARTRAO mit ozeanischen und atmosphärischen Korrekturmodellen . . . . .	38
42	Die Plots zeigen alle möglichen Kombinationen der Korrekturmodelle von den Auflastmodellen (Balken 1 bis Balken 16) für die Station HARTRAO / HART15M. Rot: Standardabweichung. Blau: jährliche Amplitude. Grün: halbjährliche Amplitude. . . . .	39
43	Die Zeitserien der Station KOKEE PARK ohne geophysikalischen Korrekturmodellen . . . . .	40
44	Die Zeitserien der Station KOKEE PARK mit ozeanischem Korrekturmodell .	41
45	Die Zeitserien der Station KOKEE PARK mit ozeanischen, atmosphärischen und hydrologischen Korrekturmodellen . . . . .	41
46	Die Plots zeigen alle möglichen Kombinationen der Korrekturmodelle von den Auflastmodellen (Balken 1 bis Balken 16) für die Station KOKEE PARK. Rot: Standardabweichung. Blau: jährliche Amplitude. Grün: halbjährliche Amplitude. . . . .	42
47	Die Zeitserien der Station MATERA ohne geophysikalischen Korrekturmodellen	43
48	Die Zeitserien der Station MATERA mit ozeanischen, atmosphärischen und hydrologischen Korrekturmodellen . . . . .	43
49	Die Zeitserien der Station MEDICINA ohne geophysikalischen Korrekturmodellen	44
50	Die Zeitserien der Station MEDICINA mit ozeanischem Korrekturmodell . . .	45
51	Die Zeitserien der Station MEDICINA mit ozeanischen und atmosphärischen Korrekturmodellen . . . . .	45
52	Die Plots zeigen alle möglichen Kombinationen der Korrekturmodelle von den Auflastmodellen (Balken 1 bis Balken 16) für die Station MEDICINA. Rot: Standardabweichung. Blau: jährliche Amplitude. Grün: halbjährliche Amplitude. . . . .	46
53	Die Zeitserien der Station NYALES20 ohne geophysikalischen Korrekturmodellen	46
54	Die Zeitserien der Station NYALES20 mit ozeanischem Korrekturmodell . . .	47
55	Die Zeitserien der Station NYALES20 mit ozeanischen, atmosphärischen und hydrologischen Korrekturmodellen . . . . .	47
56	Die Plots zeigen alle möglichen Kombinationen der Korrekturmodelle von den Auflastmodellen (Balken 1 bis Balken 16) für die Station NYALES20. Rot: Standardabweichung. Blau: jährliche Amplitude. Grün: halbjährliche Amplitude. . . . .	48
57	Die Zeitserien der Station ONSALA60 ohne geophysikalischen Korrekturmodellen	49
58	Die Zeitserien der Station ONSALA60 mit atmosphärischem Korrekturmodell	49
59	Die Zeitserien der Station SVETLOE ohne geophysikalischen Korrekturmodellen	50
60	Die Zeitserien der Station SVETLOE mit atmosphärischem Korrekturmodell .	51
61	Die Zeitserien der Station SVETLOE mit ozeanischen und atmosphärischen Korrekturmodellen . . . . .	51
62	Die Plots zeigen alle möglichen Kombinationen der Korrekturmodelle von den Auflastmodellen (Balken 1 bis Balken 16) für die Station SVETLOE. Rot: Standardabweichung. Blau: jährliche Amplitude. Grün: halbjährliche Amplitude. .	52
63	Die Zeitserien der Station TIGOCONC ohne geophysikalischen Korrekturmodellen . . . . .	52

64	Die Zeitserien der Station TIGOCONC mit atmosphärischen und hydrologischen Korrekturmodellen . . . . .	53
65	Die Plots zeigen alle möglichen Kombinationen der Korrekturmodelle von den Auflastmodellen (Balken 1 bis Balken 16) für die Station TIGOCONC. Rot: Standardabweichung. Blau: jährliche Amplitude. Grün: halbjährliche Amplitude. . . . .	53
66	Die Zeitserien der Station TSUKUB32 ohne geophysikalischen Korrekturmodellen	54
67	Die Zeitserien der Station TSUKUB32 mit atmosphärischen und hydrologischen Korrekturmodellen . . . . .	55
68	Die Zeitserien der Station WESTFORD ohne geophysikalischen Korrekturmodellen . . . . .	56
69	Die Zeitserien der Station WESTFORD mit ozeanischem Korrekturmodell . .	56
70	Die Zeitserien der Station WESTFORD mit ozeanischen, atmosphärischen und hydrologischen Korrekturmodellen . . . . .	57
71	Die Zeitserien der Station WETTZELL ohne geophysikalischen Korrekturmodellen . . . . .	58
72	Die Zeitserien der Station WETTZELL mit atmosphärischem Korrekturmodell	58
73	Die Zeitserien der Station WETTZELL mit ozeanischen, atmosphärischen und hydrologischen Korrekturmodellen . . . . .	59
74	Die Plots zeigen alle möglichen Kombinationen der Korrekturmodelle von den Auflastmodellen (Balken 1 bis Balken 16) für die Station WETTZELL. Rot: Standardabweichung. Blau: jährliche Amplitude. Grün: halbjährliche Amplitude. . . . .	60
75	Die Zeitserien der Station ZELENCHK ohne geophysikalischen Korrekturmodellen . . . . .	60
76	Die Zeitserien der Station ZELENCHK mit atmosphärischem Korrekturmodell	61
77	Die Plots zeigen alle möglichen Kombinationen der Korrekturmodelle von den Auflastmodellen (Balken 1 bis Balken 16) für die Station ZELENCHK. Rot: Standardabweichung. Blau: jährliche Amplitude. Grün: halbjährliche Amplitude. . . . .	61
78	Die Differenzen der Standardabweichung: ohne minus mit ozeanischem Korrekturmodell. Positive Werte stehen für eine Verbesserung in der Standardabweichung. Die Differenzen sind in Zentimeter angegeben und die Stationen nach dem Alphabet geordnet. . . . .	64
79	Die Differenzen der Standardabweichung: ohne minus mit atmosphärischem Korrekturmodell. Positive Werte stehen für eine Verbesserung in der Standardabweichung. Die Differenzen sind in Zentimeter angegeben und die Stationen nach der geografischen Breite sortiert. . . . .	66
80	Die Differenzen der Standardabweichung und Amplituden: ohne minus mit hydrologischem Korrekturmodell. Positive Werte stehen für eine Verbesserung. Die Differenzen (Standardabweichung in blau, jährliche Amplitude in grün, halbjährliche Amplitude in rot) sind in Zentimeter angegeben und die Stationen nach dem Alphabet geordnet. . . . .	67

## Tabellenverzeichnis

1	Ziele des VGOS (früher VLBI2010): eine Gegenüberstellung von aktuellen und zukünftigen (VGOS) Anforderungen in der VLBI. (Quelle: Wresnik [2009]) . . . . .	9
2	Auswahl der Stationen: Von den 118 verfügbaren VLBI Stationen werden nur jene Stationen ausgewählt und unterstrichen, die mindestens drei Jahre kontinuierlich gemessen haben. . . . .	22
3	Die Lage und Adresse der Station ALGOPARK . . . . .	27
4	Die Lage und Adresse der Station BADARY . . . . .	29
5	Die Lage und Adresse der Station FORTLEZA . . . . .	31
6	Die Lage und Adresse der Station FORTORDS . . . . .	33
7	Die Lage und Adresse der Station GILCREEK . . . . .	34
8	Die Lage und Adresse der Station HARTRAO . . . . .	37
9	Die Lage und Adresse der Stationen HOBART12 und HOBART26 . . . . .	38
10	Die Lage und Adresse der Station KOKEE PARK . . . . .	40
11	Die Lage und Adresse der Station MATERA . . . . .	42
12	Die Lage und Adresse der Station MEDICINA . . . . .	44
13	Die Lage und Adresse der Station NYALES20 . . . . .	45
14	Die Lage und Adresse der Station ONSALA60 . . . . .	48
15	Die Lage und Adresse der Station SVETLOE . . . . .	50
16	Die Lage und Adresse der Station TIGOCONC . . . . .	51
17	Die Lage und Adresse der Station TSUKUB32 . . . . .	54
18	Die Lage und Adresse der Station WESTFORD . . . . .	55
19	Die Lage und Adresse der Station WETTZELL . . . . .	57
20	Die Lage und Adresse der Station ZELENCHK . . . . .	59
21	Differenzen der Standardabweichung: ohne minus mit ozeanischer Korrektur. Positive Werte stehen für eine Verbesserung in der Standardabweichung. Die Stationen sind alphabetisch angeordnet. . . . .	63
22	Differenz der Standardabweichung: ohne minus mit atmosphärischer Korrektur. Positive Werte stehen für eine Verbesserung der Standardabweichung. Die Stationen sind nach dem Breitengrad (von Süd nach Nord) geordnet. Die größten Verbesserungen sind bei jenen Stationen zu finden, die sich in den mittleren nördlichen Breitengraden befinden. . . . .	65
23	Differenzen der Standardabweichung und Amplituden: ohne minus mit hydrologischer Korrektur. Positive Werte stehen für eine Verbesserung der Standardabweichung und Amplituden. In der vierten Spalte ist die Standardabweichung der Amplituden notiert. . . . .	68

## Abkürzungsverzeichnis

### Allgemeine Abkürzungen:

<b>AEB</b>	Agência Espacial Brasileira
<b>BSc</b>	Bachelor of Science
<b>cm</b>	Zentimeter
<b>CNES</b>	Centre National d'Etudes Spatiales
<b>Gb</b>	Gigabit
<b>GB</b>	Gigabyte
<b>GHz</b>	Gigahertz
<b>GSFC</b>	Goddard Space Flight Center
<b>GSI</b>	Geospatial Information Authority of Japan
<b>IAG</b>	International Association of Geodesy
<b>IERS</b>	International Earth Rotation and Reference Systems Service
<b>IVS</b>	International VLBI Service for Geodesy and Astrometrie
<b>km</b>	Kilometer
<b>m</b>	Meter
<b>Mb</b>	Megabit
<b>min</b>	Minute
<b>mm</b>	Millimeter
<b>MatrNr.</b>	Matrikelnummer
<b>MIT</b>	Massachusetts Institute of Technology
<b>NASA</b>	National Aeronautics and Space Administration
<b>N</b>	Norden
<b>O</b>	Osten
<b>S</b>	Süden
<b>s</b>	Sekunde
<b>TU</b>	Technische Universität
<b>W</b>	Westen

### Technische Abkürzungen:

<b>CRF</b>	Celestial Reference Frame
<b>ECMWF</b>	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
<b>GLDAS</b>	Global Land Data Assimilation System
<b>GST</b>	Greenwich Sternzeit
<b>NCEP</b>	National Center for Environment Prediction
<b>NGS</b>	National Geodetic Survey
<b>SEFD</b>	System Equivalent Flux Densities
<b>TIGO</b>	Transportables, Integriertes, Geodätisches Observatorium
<b>TRF</b>	Terrestrial Reference Frame
<b>UT1</b>	Universal Time No. 1
<b>VGOS</b>	VLBI Global Observing System
<b>VLBI</b>	Very Long Baseline Interferometry
<b>VieVS</b>	Vienna VLBI Software

# 1 Einleitung

Die geodätische VLBI (Very Long Baseline Interferometry) spielt eine große Rolle bei der Beschaffung von geodätischen Daten höchster Präzession. In den Anfängen der VLBI in den 1970er Jahren lag die Genauigkeit im Bereich von einem Meter. Heutzutage ist eine Genauigkeit von 5 mm möglich und das Ziel in den nächsten Jahren ist eine Verbesserung auf 1 mm, sowie auf eine Stationsgeschwindigkeit von 0.1 mm pro Jahr. Durch diese guten Genauigkeiten ist es möglich relativ kleine Veränderungen der Stationskoordinaten festzustellen. (Caroline Schönberger [2013])

Das Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung von geophysikalischen Auflasteffekten. Diese befinden sich im Zentimeterbereich oder darunter. Es sollen jährliche und halbjährliche Signale, verursacht durch Atmosphäre, Hydrologie und Ozean, in den mehrjährigen Zeitreihen von verschiedenen Stationen beobachtet und verglichen werden.

Im zweiten Kapitel werden die Grundlagen von der VLBI, dem Prinzip der VLBI, der Vienna VLBI Software, dem Internationalen VLBI Service für Geodäsie und Astronomie sowie der VLBI2010 diskutiert. Unter VLBI versteht man die Beobachtung von Quasaren (extragalaktische Radioquellen), die sich mehrere Milliarden Lichtjahre von der Erde befinden, mit mindestens zwei VLBI Stationen zur gleichen Zeit. Die VLBI Teleskope empfangen die Radioquellen und durch die lange Basislinie von zwei Teleskopen wird eine Zeitdifferenz mit höchstpräzisen Atomuhren gemessen. Die Projektion der Basislinie auf den Richtungsvektor zur Quelle wird durch die Multiplikation der Ausbreitungsgeschwindigkeit (Lichtgeschwindigkeit) mit der Zeitdifferenz berechnet. Mit der an der Technischen Universität entwickelten Vienna VLBI Software (VieVS) werden die Beobachtungsdaten eingelesen, die theoretische Laufzeitverzögerung berechnet und eine Ausgleichung durchgeführt. Zusätzlich können Simulationen und Beobachtungszeitpläne erstellt, sowie TRF und CRF bestimmt werden.

Der Internationale VLBI Service für Geodäsie und Astrometrie (IVS) ist ein offizieller Service der Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG) und unterstützt geodätische und astrometrische Arbeiten an TRF, CRF und Erdorientierungsparametern (Schlüter [2000]). Die VLBI2010, mittlerweile VLBI Global Observing System (VGOS) genannt, steht für eine neue Generation von VLBI Systemen, die neue Kriterien für die Zukunft der IVS Produkte definieren.

Das dritte Kapitel bringt einen Überblick über die Stationsverschiebungen, die durch die Gezeiten der festen Erde, den ozeanischen, atmosphärischen und hydrologischen Auflasteffekten, sowie der Poltide und der ozeanischen Poltide verursacht werden. Die größten vertikalen Stationsverschiebungen (bis zu 40 cm) werden von den Gezeiten der festen Erde verursacht. Ozeanische Auflasteffekte können Verschiebungen der VLBI Stationen in vertikaler Richtung von bis 10 cm bewirken. Deutlich kleiner sind die Einflüsse der atmosphärischen und hydrologischen Auflasteffekte, die jeweils bei 2-3 cm liegen. Die Poltide wirkt sich mit mehreren Zentimetern Verschiebung in vertikaler Richtung aus. Bei der ozeanischen Poltide treten noch Verschiebungen in vertikaler Richtung von 2 mm auf.

Die Auswertung, Berechnung und Ausgabe, die mit VieVS und Matlab erfolgt, wird im vierten Kapitel beschrieben. Durch die Auswertung der VLBI Sessions des IVS von insgesamt 118 VLBI Stationen über einen Zeitraum von 13 Jahren soll der jährliche/halbjährliche Einfluss von ozeanischen, atmosphärischen und hydrologischen Auflasteffekten auf die Stationskoordinaten untersucht werden. Zusätzliche Berechnungen und die gesamte Ausgabe werden in einem von mir selbst erstellten Matlab-File, das im Anhang zu finden ist, durchgeführt.

Im fünften Kapitel wird der geophysikalische Einfluss auf die Stationskoordinaten von allen

ausgewählten VLBI Stationen präsentiert und untersucht. Hauptaugenmerk liegt dabei bei der Variation der Stationshöhe, weil der geophysikalische Einfluss auf horizontale Stationsverschiebungen um das zehnfache geringer ist. Dieser Einfluss zeigt sich in Verbesserungen der Standardabweichungen (bei Anbringung von ozeanischen und atmosphärischen Korrekturmodellen) und in Verbesserungen der Amplituden der geschätzten jährlichen und halbjährlichen Schwingungen (bei Anbringung von hydrologischen Korrekturmodellen) in den Zeitserien der Koordinatenzuschläge.

Das abschließende sechste Kapitel ist der Diskussion der Ergebnisse, einem kurzen Ausblick und der Zusammenfassung gewidmet.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Very Long Baseline Interferometry - VLBI

Unter VLBI versteht man die Beobachtung von Quasaren mit sehr langen Basislinien zwischen den VLBI-Stationen. Die direkte Verbindung von zwei Stationen wird als Basislinie bezeichnet. Mit dieser Technik werden Zeitdifferenzen von mindestens zwei VLBI-Stationen, die die gleiche Radioquelle zur gleichen Zeit beobachten, höchstgenau gemessen. Diese extragalaktischen Radioquellen, genannt Quasare, befinden sich mehrere Milliarden Lichtjahre von der Erde entfernt und erscheinen uns aufgrund der großen Distanz als fixe Punkte am Himmel. Die von Quasaren ausgesendeten Radioquellen werden mit VLBI-Teleskopen beobachtet und so die Abstände zwischen den VLBI-Stationen gemessen. Durch diese Technik werden mehrere 1000 km lange Basislinien auf ein paar Millimeter genau bestimmt. Bei wiederholten Messungen können Bewegungen und Richtungen der Messstationen detektiert werden. Die veränderlichen Koordinaten der VLBI-Stationen liefern Rückschlüsse auf die Plattentektonik, sowie auf geophysikalische Auflasteffekte. (Roman Dittrich [2012])

Die Very Long Baseline Interferometry (VLBI) ist ein geodätisches Weltraumverfahren, das eine wichtige Rolle in der Geodäsie spielt, denn es gestattet die Bestimmung und Aufrechterhaltung des quasi inertialen himmelfesten Referenzrahmens (CRF - Celestial Reference Frame). Dieser wird realisiert durch die Positionen von Quasaren. Zusätzlich gestattet die VLBI eine direkte Verknüpfung zwischen himmelfesten und erdfesten Referenzrahmen (TRF - Terrestrial Reference Frame). Der TRF wird durch erdfeste Stationen realisiert. (Hana Krásná [2013])

In dieser Arbeit werden die Variationen in den Stationskoordinaten aufgrund von geophysikalischen Auflasteffekten, verursacht durch Atmosphäre, Hydrologie und Ozeane, mit der VLBI untersucht.

### 2.2 VLBI Prinzip

Da die Quasare mehrere Milliarden Lichtjahre von der Erde entfernt sind erscheinen die ausgesendeten Radiowellen auf der Erde parallel. Die großen Teleskope der VLBI-Stationen empfangen die Radiowellen und durch die Entfernung von mehreren 1000 Kilometern zwischen den VLBI-Stationen ergibt sich eine Zeitdifferenz in den Ankunftszeiten der Signale. An jeder Messstation sind hochpräzise Atomuhren installiert, die diese Zeitdifferenzen mit einer Genauigkeit von einer 10-milliardstel Sekunde messen (Geospatial Information Authority of Japan [2005]). Zur Zeit sind Wasserstoff-Maser, die in 100 Millionen Jahren nur eine Sekunde verlieren, die genauesten (Geospatial Information Authority of Japan [2005]). Die Projektion der Basislinie auf den Richtungsvektor zur Quelle zwischen den VLBI-Stationen berechnet man sich durch die Multiplikation der Ausbreitungsgeschwindigkeit und der Zeitdifferenz. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Radiowelle im Weltraum entspricht der Lichtgeschwindigkeit von 299792458 Metern in der Sekunde. Durch wiederholte Messungen zu mindestens drei Quasaren in möglichst unterschiedliche Richtungen erhält man die dreidimensionale relative Position der VLBI-Station. Durch weltweite Zusammenarbeit und einem weltweiten Vermessungsnetz werden die Koordinaten der VLBI-Station, die Rotation der Erde, die Nutation/Präzession und die Polbewegung berechnet. In Abbildung 1 wird das Prinzip des gesamten VLBI Ablaufs dargestellt.

Das ankommende Signal an zwei VLBI-Stationen unterscheidet sich nur durch eine Laufzeitverzögerung  $\tau$ . Um eine Beziehung zur Laufzeitverzögerung zu erhalten werden die Basislinie ( $\mathbf{b}$ ), dies ist die Verbindungslinie zweier Stationen, und der Richtungsvektor ( $\mathbf{k}$ ) zur Radioquelle definiert. Wesentlich für die Berechnung ist das rechtwinkelige Dreieck. Es besteht aus der Basislinie ( $\mathbf{b}$ ), dem Richtungsvektor ( $\mathbf{k}$ ) und der Normalen auf den Richtungsvektor in

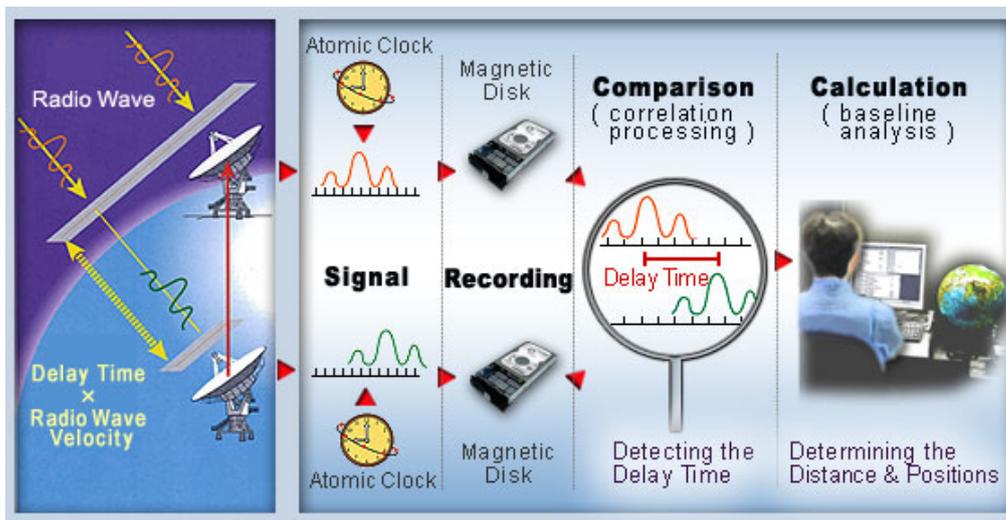


Abbildung 1: Prinzip des gesamten VLBI-Ablaufes: Die an zwei Stationen empfangenen Radiowellen werden mit Wasserstoff-Masern aufgezeichnet und auf Festplatten gespeichert und an das Korrelationzentrum geschickt oder mit einer direkten Datenverbindung digital gesendet. Im Korrelationzentrum wird die Laufzeitverzögerung bestimmt um damit die Distanz und Position der VLBI Stationen zu berechnen.

(Quelle: Geospatial Information Authority of Japan [2005])

Richtung der ersten VLBI-Station (siehe Abbildung 2). Nach Schuh [2000] kann man  $\tau$  über das Skalarprodukt von  $\mathbf{b}$  und  $\mathbf{k}$  definieren.

Die Gleichung (2.1) beschreibt die Laufzeitverzögerung.

$$\tau = -\frac{\mathbf{b}' \cdot \mathbf{k}(t)}{c} \quad (2.1)$$

mit  $\mathbf{b}'$  = Basislinie,  $\mathbf{k}$  = Richtungsvektor, und  $c$  = Lichtgeschwindigkeit.

Die Gleichung (2.2) beschreibt das Skalarprodukt von Basislinie ( $\mathbf{b}$ ) und Richtungswinkel ( $\mathbf{k}$ ).

$$\mathbf{b}' \cdot \mathbf{k}(t) = b_x \cos \delta \cos h(t) + b_y \cos \delta \sin h(t) + b_z \sin \delta \quad (2.2)$$

mit  $b_x, b_y, b_z$  = Komponenten der Basislinie,  $\delta$  = Deklination,  $h(t)$  = Greenwich Stundenwinkel und  $c$  = Lichtgeschwindigkeit im Vakuum.

Die Gleichung (2.3) beschreibt den Greenwich Stundenwinkel.

Da die Basislinie ( $\mathbf{b}$ ) in einem erdfesten Koordinatensystem und der Richtungsvektor ( $\mathbf{k}$ ) in einem himmelfesten Koordinatensystem definiert sind, benötigt man laut Schuh [2000] Transformationen mit Drehmatrizen um beide Vektoren in ein und dem selben Koordinatensystem zu erhalten. Aus den Erdorientierungsparametern Polbewegung, Erdrotation, Nutation und Präzession lassen sich die Drehmatrizen bestimmen.

Die Gleichung (2.4) beschreibt die Transformation mit Drehmatrizen in ein anderes Koordinatensystem.

Die Basislinien zwischen den VLBI-Stationen sind mehrere 1000 km lang und die erzeugten Datenmengen bewegen sich im Bereich von 1-2 Terabyte pro Tag an der Fundamentalstation

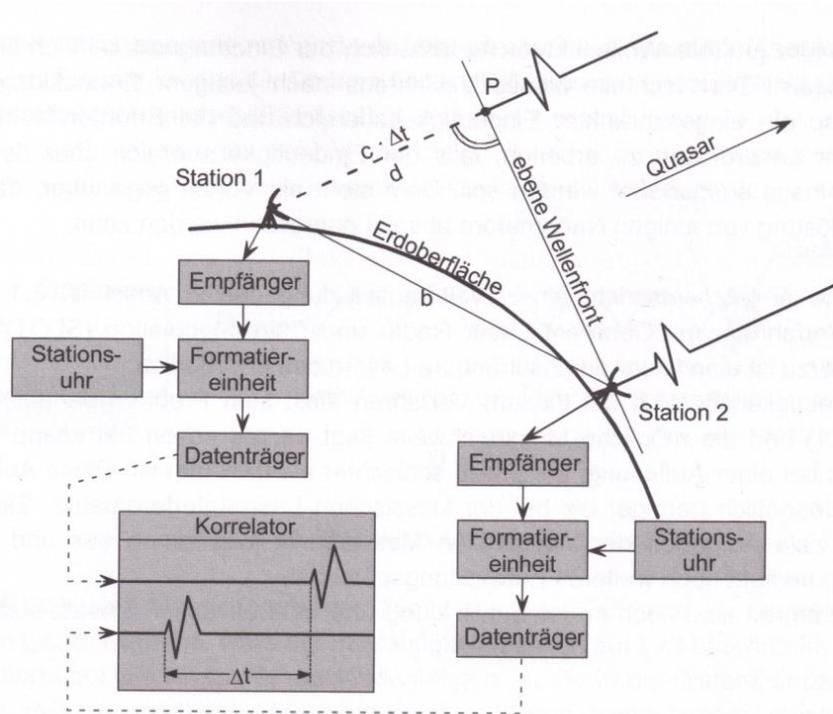


Abbildung 2: Grundprinzip der VLBI-Messung. Die Projektion der Basislinie auf den Richtungsvektor zur Quelle berechnet man sich durch die Multiplikation der Ausbreitungsgeschwindigkeit (entspricht der Lichtgeschwindigkeit) und der Zeitdifferenz. (Quelle: Joeckel u. Stober [2008])

$$h(t) = GST - \alpha \quad (2.3)$$

mit  $GST$  = Greenwich Sternzeit und  $\alpha$  = Rektaszension

Wetzell (Schlüter u. a. [2007]). Aus diesem Grund werden nach wie vor die Beobachtungen auf Speicherplatten gespeichert und in den Korrelationszentren zusammengeführt und die Berechnung durchgeführt. Das Ziel ist natürlich eine direkte Datenverbindung zwischen den Messstationen und Korrelationszentren aufzubauen und so die zeitliche Verzögerung der VLBI-Ergebnisse zu minimieren. In diesem Bereich hat auch das geodätische Observatorium Wetzell eine Vorreiterrolle, denn seit 2004 verfügt es über einen Glasfaser-Internetanschluss mit dem es möglich ist die enormen Datenmengen in die Korrelationszentren in bis zu 8 Stunden zu übertragen. Das ist ein großer Schritt in Richtung der echtzeitnahen Korrelation und Auswertung von VLBI-Daten.

## 2.3 Vienna VLBI Software

Die Vienna VLBI Software (VieVS) wurde 2008 am Institut der Geodäsie und Geophysik an der TU Wien entwickelt (Böhm u. a. [2012], Böhm u. a. [2009]) und seit dem weitergeführt und verbessert. Es ist eine Analysesoftware für VLBI Beobachtungsdaten, die in Matlab umgesetzt ist. Die Softwarebenutzung erfolgt über eine grafische Benutzeroberfläche, in der verschiedene Optionen ausgewählt und eingestellt werden können. Die Basis dieser Software beinhaltet drei separate Module: Vie\_INIT (Nilsson u. a. [2011]), Vie\_MOD (Plank u. a. [2013]) und Vie\_LSM (Teke u. a. [2009]). Im Modul Vie\_INIT werden die Eingangsdaten gelesen, wie zum Beispiel die Stationskoordinaten und -geschwindigkeiten vom TRF-Katalog, die Koordinaten der Quasare vom CRF-Katalog und die beobachteten Zeitverzögerungen aus den NGS

$$\tau = -\frac{1}{c} \mathbf{b}' \cdot \mathbf{W} \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{N} \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{k} \quad (2.4)$$

mit  $\mathbf{W}$  = Matrix für die Polbewegung,  $\mathbf{S}$  = Matrix für die Erdrotation,  $\mathbf{N}$  = Matrix für die Nutation,  $\mathbf{P}$  = Matrix für die Präzession und  $c$  = Lichtgeschwindigkeit im Vakuum.

Dateien. Zu diesem Zeitpunkt können Ausreißer entfernt werden, sowie auch unerwünschte Stationen, Quellen oder Basislinien entfernt werden. Im Modul Vie\_MOD wird die theoretische Zeitverzögerung berechnet und partielle Ableitungen der Verzögerung in Bezug auf ausgewählte Parameter gebildet. Die Modellbildung erfolgt nach den Vorstellungen des IERS Conventions 2010 (Petit u. Luzum [2010]). Im Modul Vie\_LSM werden die Beobachtungen und die geschätzten Parameter mit der klassischen Gauss-Markov Methode der kleinsten Quadrate bestimmt (Least Squares Method).

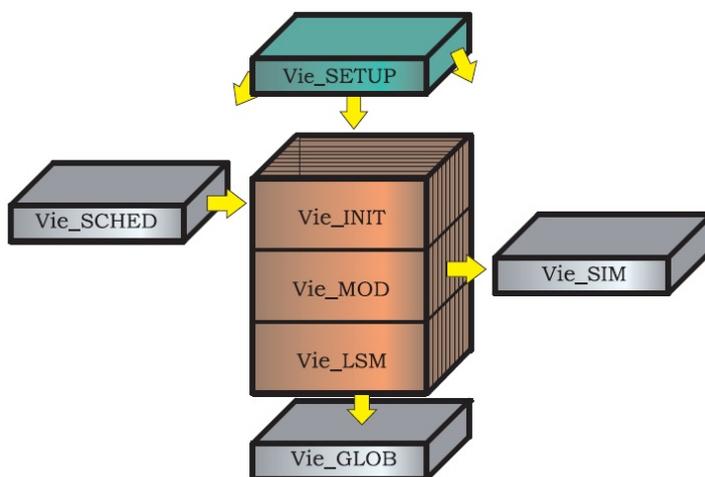


Abbildung 3: Interne Struktur von VieVS. Unter Vie\_SETUP wird die graphische Benutzeroberfläche verstanden. Im Modul Vie\_INIT werden die Eingangsdaten gelesen, im Modul Vie\_MOD wird die theoretische Laufzeitverzögerung berechnet, im Modul Vie\_LSM wird die Ausgleichung durchgeführt. Das Modul Vie\_SIM erlaubt eine Simulation von VLBI Beobachtungen, das Modul Vie\_SCHED die Erstellung eines Beobachtungszeitplanes und das Modul Vie\_GLOB die Schätzung von globalen Parametern.

(Quelle: Spicakova u. a. [2009])

Zusätzlich zu den drei bisher genannten Modulen ermöglicht uns VieVS weitere Optionen (siehe Abbildung 3). Unter VIE\_SETUP kann man sich die graphische Benutzeroberfläche zum Einstellen von Optionen und Auswahl von Sessions vorstellen. Die Version 2.0 von VieVS erlaubt mit dem Modul Vie\_SIM (Pany u. a. [2011]) eine Simulation von VLBI Beobachtungen, mit dem Modul Vie\_SCHED (Sun u. a. [2011]) die Erstellung eines Beobachtungszeitplanes für einen gesamten Beobachtungsablauf und mit dem Modul Vie\_GLOB (Spicakova u. a. [2010]) eine Schätzung von globalen Parametern von mehreren gleichzeitigen Beobachtungen. Das Modul Vie\_SIM simuliert drei Hauptfehlerquellen in der VLBI: die troposphärische Verzögerung mit der Methode von Nilsson u. Haas [2010], den Stationsuhrenfehler nach Herring u. a. [1990], und die Rauschstörung der Basislinien. Die simulierten Beobachtungen können verwendet werden um künstliche Beobachtungen für geplante VLBI Stationen, die noch nicht existieren, zu generieren oder für Forschungszwecke, denn auch die Fehlerverteilung in den Messungen der simulierte Beobachtungen ist bekannt. Das Modul Vie\_SCHED hat die Möglichkeit Beobachtungszeitpläne der VLBI Messungen zu erstellen, wie zum Beispiel die Einteilung welche Station, zu einer bestimmten Zeit, eine ausgewählte Radioquelle beobachten soll.

Dieses Modul berücksichtigt die speziellen Spezifikationen jeder Station, wie zum Beispiel die Drehgeschwindigkeit der Antenne in Azimuth und Elevation (Sun u. a. [2011]). Das Modul `Vie_GLOB` hat die Möglichkeit Beobachtungen von allen VLBI Stationen zu kombinieren und daraus Parameter zu schätzen. Diese globale Lösung wird für die Bestimmung des TRF mittels Stationskoordinaten und -geschwindigkeiten, und die Bestimmung des CRF mittels der Koordinaten der Quasare, benötigt.

## 2.4 Internationaler VLBI Service für Geodäsie und Astrometrie

Der Internationale VLBI Service für Geodäsie und Astrometrie (IVS) ist ein offizieller Service der Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG) und unterstützt geodätische und astrometrische Arbeiten an TRF, CRF und Erdorientierungsparametern (Schlüter [2000]). Der IVS wurde 1999 ins Leben gerufen und seit dem koordiniert er die internationale Zusammenarbeit der VLBI Stationen (siehe Abbildung 4). Er betreibt 79 permanente Messstationen an 41 Standorten in 19 Ländern verteilt (Behrend u. Baver [2011]). Vor der Gründung des IVS erfolgte die Zusammenarbeit der verschiedenen Organisationen auf einer ad-hoc Basis. Wenn jetzt eine Organisation als Mitglied des IVS akzeptiert wird, ist die Zusammenarbeit obligatorisch (Hana Krásná [2013]). Aus diesem Grund kann der IVS eine hohe Qualität seiner Produkte garantieren.

In Abbildung 5 sieht man einen Überblick über die aktuellen Produkte des IVS. Die Produkte aus den Daten der VLBI Beobachtungen sind sämtliche Erdorientierungsparameter, der TRF, der CRF und troposphärische Parameter (Schuh u. Behrend [2012]). Alle IVS Daten und Produkte werden in den Datenzentren archiviert und sind öffentlich verfügbar.

## 2.5 VLBI2010

Im Jahr 2005 wurde der Bericht 'VLBI2010: Current and Future Requirements for Geodetic VLBI Systems' (Niell u. a. [2005]) vom IVS akzeptiert und als Richtlinie für weitere Arbeiten und Forschungen in der VLBI verwendet. Der Bericht behandelt die Überarbeitung von allen aktuellen und zukünftigen Anforderungen der geodätischen VLBI, sowie aller Komponenten von der Antenne bis zur Analyse der Daten. Er steht für eine neue Generation von VLBI Systemen, die neue Kriterien für die Zukunft der IVS Produkte definieren.

Diese Kriterien sind:

- Basislinien mit 1 mm Genauigkeit,
- kontinuierliche Messungen für die Zeitserien der Stationspositionen und der Erdorientierungsparameter,
- Lieferung der Ergebnisse in unter 24 Stunden.

Aufgrund dieses Berichtes startete der IVS einige Studien, mit dem Ziel die geodätische VLBI nach diesen neuen Kriterien zu verbessern. Bei der Untersuchung von den drei dominantesten Fehlerquellen (Uhrfehler, Troposphäre und Messrauschen) hat sich die Atmosphäre als größte Fehlerquelle herauskristallisiert. Ein anderer wichtiger Punkt ist, dass Antennen mit einem kleineren Durchmesser (zum Beispiel 12 Meter) oder Zwillingsteleskope von Vorteil sind, weil diese eine höhere Drehgeschwindigkeit haben und so die Zeit, die man benötigt um von einer Radioquelle zur nächsten zu drehen, stark verringern. Um das dritte Kriterium zu erfüllen wurde das Ziel gesetzt sämtliche VLBI Stationen mit einem Glasfaser-Internetanschluss auszustatten mit einer Übertragungsrate von mindestens 1 GB pro Sekunde. Eine große Erwartungshaltung gibt es bei der Automatisierung der Stationen und der Kontrolltechnologie. In diesem Fall würde der Operator aus einer beliebigen Distanz vollen Zugang zu den Antennen haben und könnte mehrere gleichzeitig kontrollieren und steuern (Neidhardt u. a. [2011]). In der Tabelle 1 werden die aktuellen technischen Konfigurationen den Zielen der VLBI2010

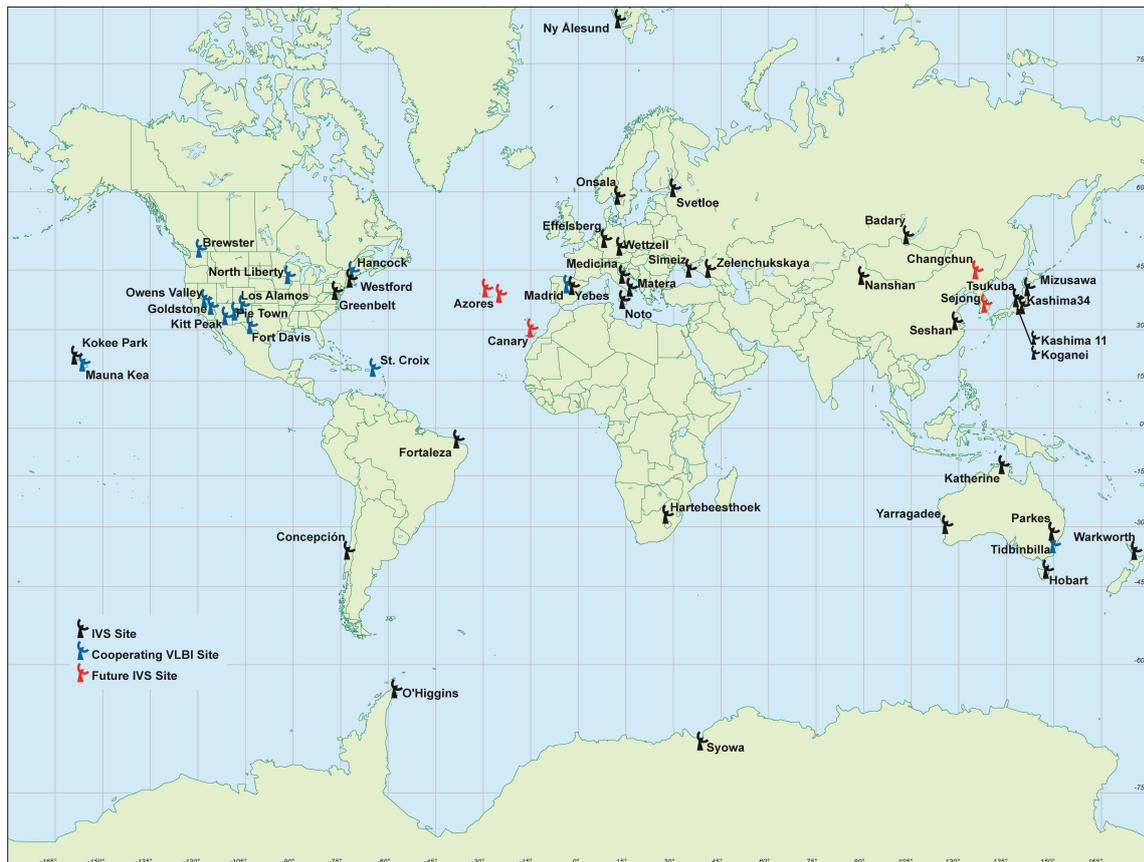


Abbildung 4: Auf dieser Karte werden alle VLBI Standorte, die der IVS koordiniert, abgebildet. Schwarze Teleskope sind die IVS Standorte, blaue Teleskope sind Standorte von anderen Organisationen, die mit dem IVS kooperieren, und rote Teleskope sind geplante IVS Standorte.

(Quelle: International VLBI Service for Geodesy and Astrometry [2013])

gegenübergestellt. Da das Jahr 2010 auch schon wieder länger zurück liegt, wird die VLBI2010 mittlerweile als VLBI Global Observing System (VGOS) bezeichnet.

PRODUCTS	SPECIFICATION	STATUS (2010)
Polar motion $x_p, y_p$	Accuracy	50-80 $\mu$ s
	Product delivery	8-10 days
	Resolution	1 day
	Frequency of solution	~3 days/week
UT1 - UTC	Accuracy	3-5 $\mu$ s
	Product delivery	8-10 day
	Resolution	1 day
	Frequency of solution	~3 days/week
UT1 - UTC (Intensives)	Accuracy	15-20 $\mu$ s
	Product delivery	1 day
	Resolution	1 day
	Frequency of solution	7 days/week
Celestial pole $dX, dY$	Accuracy	50 $\mu$ s
	Product delivery	8-10 days
	Resolution	1 day
	Frequency of solution	~3 days/week
TRF (x, y, z)	Accuracy	5 mm
CRF ( $\alpha, \delta$ )	Accuracy	40-250 $\mu$ s
	Frequency of solution	1 year
	Product delivery	3 months

Abbildung 5: IVS Produkte und deren Genauigkeiten.  
(Quelle: Schlüter [2000], Schuh u. Böhm [2013])

	Aktuell	VGOS
Antennendurchmesser	5 - 100 m	12 m
Drehgeschwindigkeit	20 - 200° / min	$\geq 360^\circ$ / min
Frequenzbereich	S/X Band	2 -14 (18) GHz
Aufzeichnungsgeschwindigkeit	128 - 512 Mb/s	8 -16 Gb/s
Sensitivität	200 - 15000 SEFD	$\leq 2500$ SEFD
Datentransfer	Speicherplattenversand, gelegentlich Internettransfer	Internettransfer, e-VLBI

Tabelle 1: Ziele des VGOS (früher VLBI2010): eine Gegenüberstellung von aktuellen und zukünftigen (VGOS) Anforderungen in der VLBI.

(Quelle: Wresnik [2009])

### 3 Stationsverschiebungen

In diesem Abschnitt wird ein Überblick über die Stationsverschiebungen aufgrund von geophysikalischen Effekten gegeben. Herkömmliche Modelle behandeln die Erdkrustendeformationen aus den Richtlinien des IERS. Die neueste Version (Petit u. Luzum [2010]) empfiehlt die Anbringung von Korrekturen von den Effekten der Gezeiten der festen Erde, von den Auflasteffekten der Gezeiten der Ozeane, der Atmosphäre, sowie den Effekten der Polbewegung und der Variation der Erdrotation auf die Stationskoordinaten. Die korrigierten Stationskoordinaten werden als momentane Positionen für die weiteren Beobachtungen verwendet. Der Einfluss der einzelnen Phänomene in vertikaler Richtung wird in der Abbildung 6 dargestellt. Horizontale Verschiebungen machen ungefähr ein Zehntel dieser Werte aus (Hana Krásná [2013]).

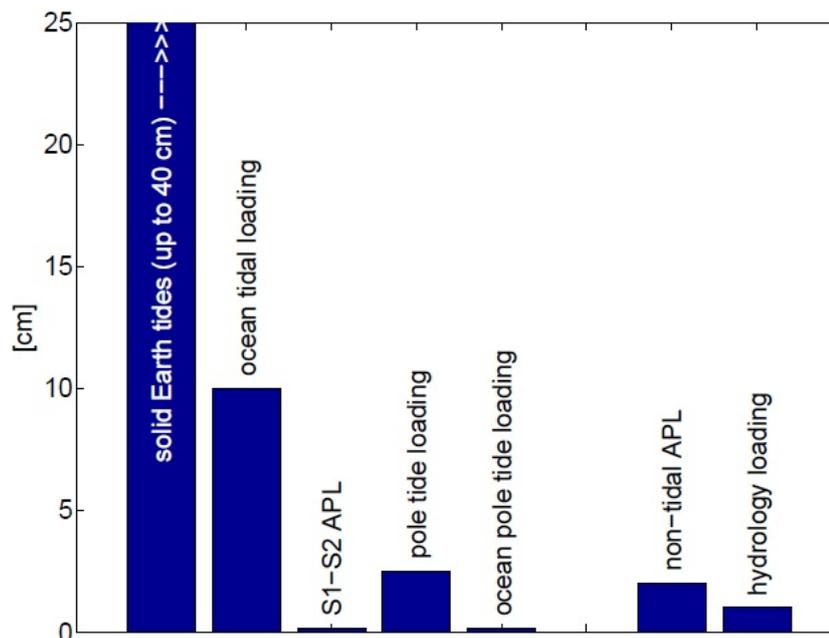


Abbildung 6: Stationsverschiebungen in Zentimetern in vertikaler Richtung aufgrund von Erdkrustendeformationen hervorgerufen durch die Gezeiten der festen Erde, ozeanischen, atmosphärische und hydrologische Auflasteffekte, sowie der Poltide und der ozeanischen Poltide. (Quelle: Hana Krásná [2013])

Die Verschiebungen verursacht durch atmosphärische und hydrologische Auflasteffekte (die rechten zwei Balken in der Abbildung 6) werden nicht von IERS Konventionen vorgeschrieben. Zusammen mit den ozeanischen Auflasteffekten werden diese in dieser Arbeit ebenfalls untersucht.

#### 3.1 Gezeiten der festen Erde

Abbildung 6 zeigt, dass der Einfluss der Gezeiten der festen Erde mit Abstand am größten ist. Die Deformationen der festen Erde werden vom Gezeitenpotential, welches von Mond und Sonne verursacht wird, erzeugt. In der Abbildung 7 sind die Bewegungen der VLBI Station Wettzell, verursacht durch die Gezeiten der festen Erde, innerhalb eines Monats abgebildet. Die vertikale Verschiebungen, in blau gekennzeichnet, liegen zwischen -20 und +20 cm, somit ergibt das eine Gesamtbewegung von 40 cm. Die horizontalen Verschiebungen (Nordrichtung in grün, Ostrichtung in rot) betragen nur ein paar Zentimeter (Hana Krásná [2013]).

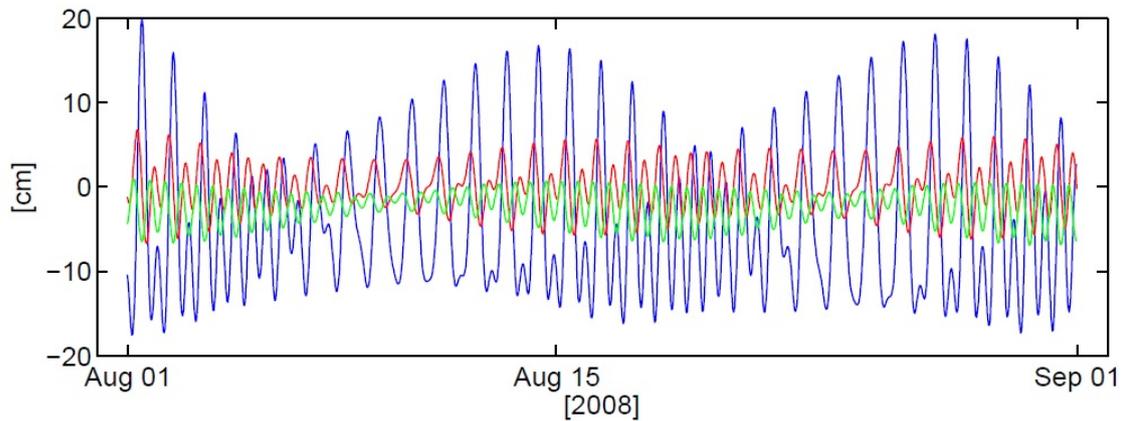


Abbildung 7: Die Stationsverschiebungen in Zentimeter durch die Gezeiten der festen Erde an der Station Wettzell von 01.08.2008 bis 31.08.2008. Die blaue Linie zeigt die Verschiebung in der vertikaler Richtung, die von +20 cm bis -20 cm reicht. Die horizontalen Verschiebungen (Nordrichtung in grün, Ostrichtung in rot) sind um vieles geringer. (Quelle: Hana Krásná [2013])

### 3.2 Ozeanische Auflasteffekte

Genauso wie die Gezeiten der festen Erde entstehen auch die Ozeangezeiten durch die Attraktion von Mond und Sonne. Die Umverteilung der Wassermassen verursacht eine Verformung der ozeanischen Erdkruste und diese beeinflusst ebenfalls die Verformung der Erdkruste über dem Wasser. Die Reaktion des Ozeans auf die Attraktion von Mond und Sonne ist abhängig von der Lage, sowie von den regionalen Gegebenheiten. Um diese Gezeiten darstellen zu können sind Modelle mit Gitternetzen notwendig (Petit u. Luzum [2010]). Der IERS empfiehlt die Verwendung von den zwei aktuellsten Modellen. TPXO7.2 (Egbert u. Erofeeva [2002]) ist ein Modell, das aus den Gezeitenpegeln und aus den Satellitendaten von TOPEX/Poseidon abgeleitet wird. TOPEX/Poseidon war ein Satellit zur Messung von Meereshöhen, der von NASA und CNES entwickelt wurde. Das zweite Modell, FES2004 (Letellier [2004]), ist eine hydrodynamische Lösung errechnet aus Altimeter Daten. In VieVS sind fünf verschiedene Modelle für die Korrekturen von ozeanischen Auflasteffekten implementiert. Abbildung 8 zeigt den Vergleich der fünf verschiedenen Modelle anhand der Stationen Kokee Park auf Hawaii und Wettzell in Deutschland (Hana Krásná [2013]).

An der Station Kokee auf Hawaii mitten im Meer ist der Einfluss der Ozeangezeiten um vieles größer als mitten in Deutschland an der Station Wettzell. Die Auflasteffekte der Ozeangezeiten verursachen an der Station Kokee eine vertikale Verschiebung von 5 cm und an der Station Wettzell gerade einmal noch 1 cm. Wie schon bei den Gezeiten der festen Erde, sind auch hier die horizontalen Verschiebungen um eine Größenordnung geringer.

In Abbildung 9 wird eine weltweite Übersicht über die Gezeitenwelle M2 gebracht. Rot kodiert sind jene Küstenbereiche, an denen die Gezeitenwellen mindestens 100 cm betragen. Dunkelblaue Bereiche zeigen ganz geringe (bis 10 cm) Variationen des Meeresspiegels. Die Höhe der Gezeitenwellen ist natürlich auch ausschlaggebend für die ozeanischen Auflasteffekte auf die Variation der Höhenkoordinate der VLBI Stationen.

### 3.3 Atmosphärische Auflasteffekte

Die Umverteilungen der Luftmassen in der Atmosphäre können vertikale Verschiebungen an den VLBI Stationen von mehreren Millimetern bewirken. An VLBI Stationen in den mittleren Breitengraden können die vertikalen Verschiebungen bis zu 2 cm erreichen, weil dies die Region mit den größten Luftdruckvariationen ist (Hana Krásná [2013]). Die atmosphärischen

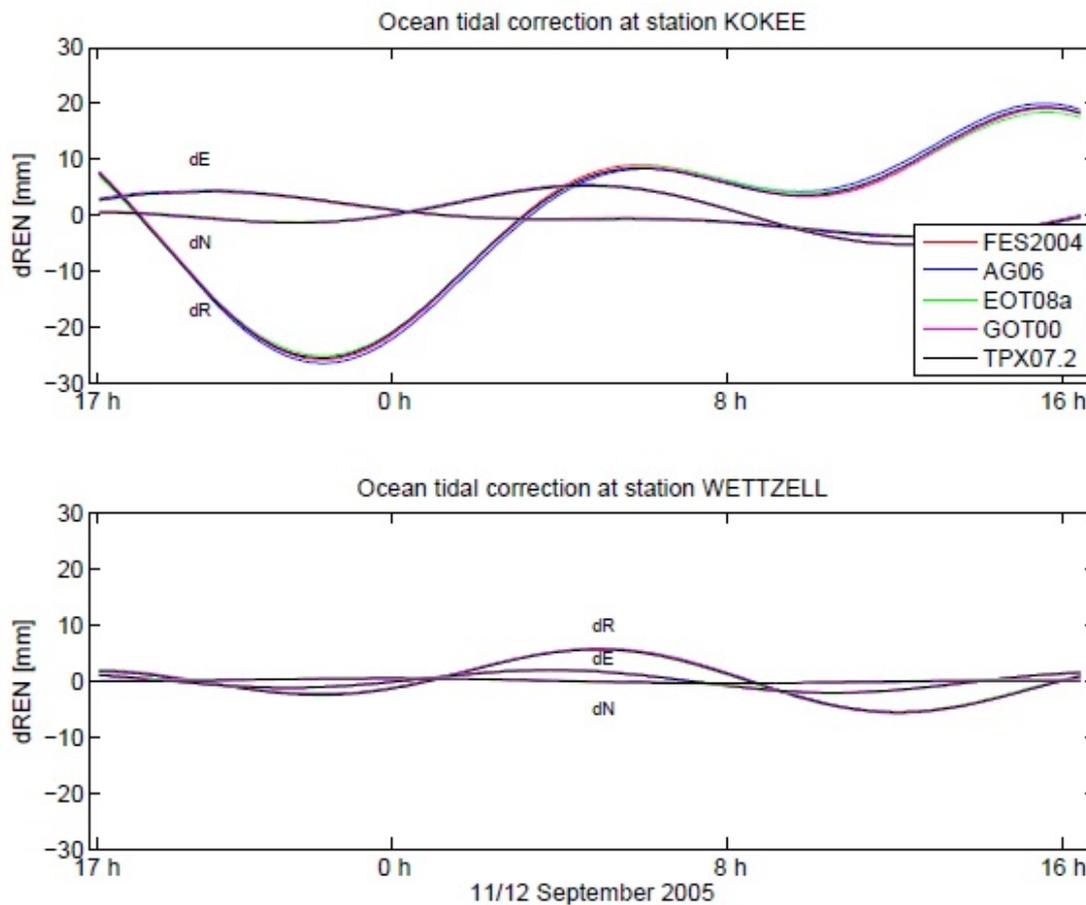


Abbildung 8: Der Vergleich von fünf verschiedenen Modellen (FES2004, AG06, EOT08a, GOT00 und TPX07.2) für die Korrektur von ozeanischen Auflasteffekten an den Stationen Kokee (oberer Grafik) und Wetzell (untere Grafik) innerhalb einer 24-stündigen Session am 12.09.2005. Die Verschiebungen in vertikaler Richtung ( $dR$ ) sind um das zehnfache größer als in horizontaler Richtung (Nordrichtung  $dN$  und Ostrichtung  $dE$ ). (Quelle: Hana Krásná [2013])

Auflasteffekte werden in Zeitserien, mit einer 6-stündigen Auflösung, bereitgestellt. In VieVS sind drei verschiedene Modelle auswählbar:

- Die Zeitserien vom Goddard Space Flight Center (GSFC) von der NASA, frei verfügbar im Internet (<http://gemini.gsfc.nasa.gov/aplo/> (Petrov [2004])),
- die Zeitserien (VANDAM) von der Universität Luxembourg, frei verfügbar im Internet ([http://geophy.uni.lu/ggfc\\_atmosphere/NCEP-loading.html](http://geophy.uni.lu/ggfc_atmosphere/NCEP-loading.html) (van Dam [2010])),
- und die Zeitserien von der TU Wien, ebenfalls frei verfügbar im Internet (<http://ggosatm.hg.tuwien.ac.at/LOADING/> (Wijaya u. a. [2012])).

Die Zeitserien GSFC und VANDAM werden aus dem Oberflächendruckmodell des NCEP (National Centers for Environmental Prediction) abgeleitet. Das Modell des NCEP besteht aus einem globalen Raster mit einer Auflösung von  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  (Hana Krásná [2013]). Die Zeitserien der TU Wien basieren auf den Daten (Luftdruck, Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit) des ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). Diese sind in einem Modell mit einem globalen Raster von  $0.125^\circ \times 0.125^\circ$  vorhanden und werden für die Zeitserien der TU Wien auf ein Raster von  $1.0^\circ \times 1.0^\circ$  reduziert (Hana Krásná [2013]). Die Daten beinhalten Signale von täglichen (S1) und halbtäglichen (S2) atmosphärischen Gezeiten. Da die Daten in einer zeitlichen Auflösung von 6 Stunden vorhanden

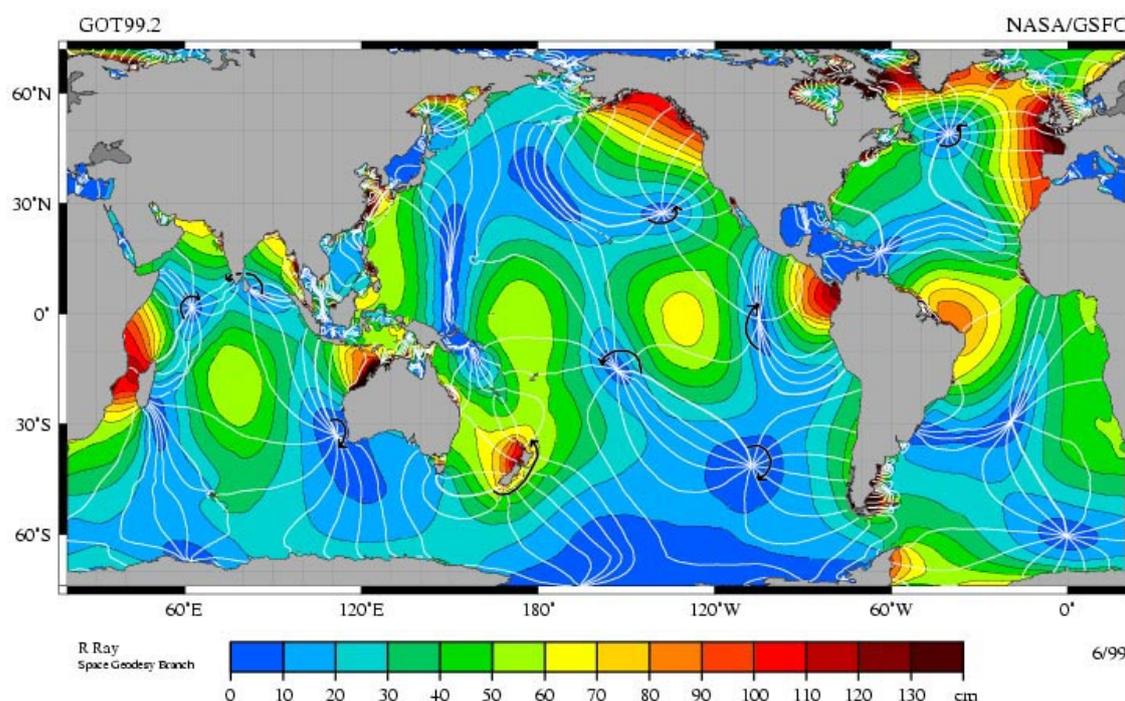


Abbildung 9: Die Darstellung der Gezeitenwelle M2 mit einem Tidenhub von 0 cm, in blau geplottet, bis 130 cm oder mehr, in dunkelrot dargestellt, erstellt vom GSFC der NASA. (Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Gezeiten#mediaviewer/File:M2\\_tidal\\_constituent.jpg](http://de.wikipedia.org/wiki/Gezeiten#mediaviewer/File:M2_tidal_constituent.jpg))

sind, können die atmosphärischen Gezeiten nicht genau genug dargestellt werden und müssen daher herausgefiltert werden um in einem eigenen Modell dargestellt zu werden (van den Dool, H. M. u. a. [1997]).

Hana Krásná [2013] hat den Einfluss des atmosphärischen Auflasteffektes untersucht. Sie verglich die bereits genannten drei Auflastmodelle mit einer Referenzlösung ohne atmosphärischer Korrektur. In Abbildung 10 werden die Differenzen der Standardabweichungen in der Höhenkoordinate der Stationen zwischen der Referenzlösung und den Auflastmodellen von GSFC (grün), VANDAM (pink) und der TU Wien (blau) dargestellt. Es ist kein großer Unterschied zwischen den drei Modellen zu sehen (Hana Krásná [2013]). Die Stationen sind nach dem Breitengrad sortiert und es ist gut zu erkennen, dass die größten Verbesserungen bei Anbringung der atmosphärischen Korrektur in den mittleren Breitengraden ( $40^\circ - 60^\circ$  N) zu finden sind (Hana Krásná [2013]). Das ist genau jener Bereich in dem auch die atmosphärischen Auflasteffekte am größten sind.

### 3.4 Pole tide loading

Die Erde rotiert nicht um die Figurenachsens sondern um die Rotationsachse. Dies führt zu einer Bewegung der Pole, die eine Veränderung der Zentrifugalkraft hervorrufen. Die Variationen der Zentrifugalkraft verursachen Verformungen der Erdoberfläche und diese führen zu Verschiebungen der VLBI Stationen. Diese Polbewegungen können Verschiebungen in den VLBI Stationen von mehreren Zentimetern verursachen (Hana Krásná [2013]). Der mittlere Pol der Erdrotationsachse folgt einer langzeitlichen Verschiebung Richtung Westen. In Abbildung 11 wird die Polbewegung in den Jahren 1962 bis 2010 dargestellt. In diesem Zeitraum ergibt sich eine Verschiebung des mittleren Pols der Erdrotationsachse in Richtung  $78^\circ$  W, mit einer jährlichen Verschiebung von rund 10 Zentimetern (Schindelegger [2014]). Hauptursache für diesen linearen Drift ist die postglaziale Landhebung (Schindelegger [2014]). Im Jahr 2005 gab es eine abrupte Richtungsänderung der Poldrift, bedingt durch die beschleunigte Abschmel-

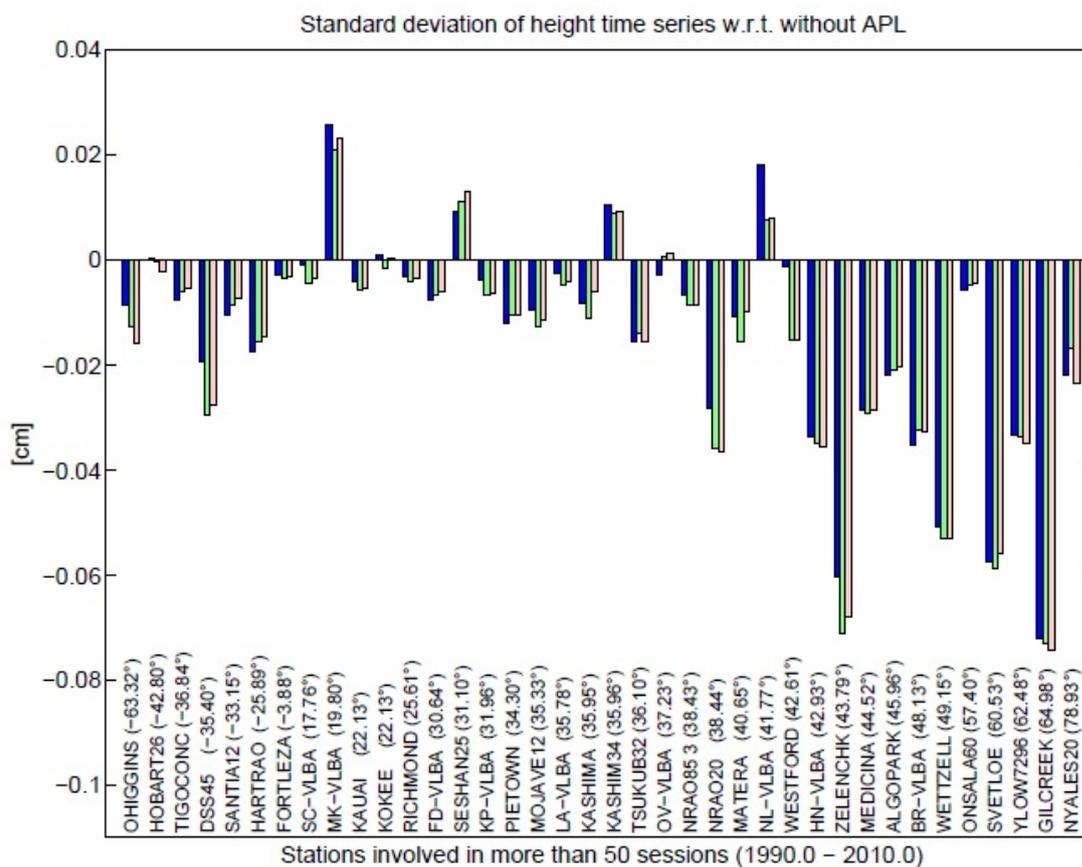


Abbildung 10: Die Standardabweichungen der Stationshöhen von verschiedenen atmosphärischen Auflastmodellen (TU Wien (blau), GSFC (grün), VANDAM (pink)). Aufgelistet sind nur Station, die an mindestens 50 Sessions im Zeitraum von 1990 - 2010 beteiligt waren und diese sind nach der Breite sortiert. Negative Werte sind in diesem Fall Verbesserungen und die größten sind in den mittleren Breitengraden (40° - 60° N) zu finden. (Quelle: Hana Krásná [2013])

zung der Polkappen. In den Jahren 1962 bis 2005 war die Richtung der linearen Bewegung 70° W. Aufgrund der abrupten Richtungsänderung seit dem Jahr 2005 ist die Polbewegung nun in Richtung 78° W (Schindelegger [2014]).

Laut den Konventionen des IERS vom Jahr 2003 wurden bis zu den Neuerungen im Jahr 2010 lineare Modelle für die Beschreibung der Polbewegung verwendet. Seit den Konventionen von 2010 sind diese Modelle durch kubische Funktionen ersetzt worden (Hana Krásná [2013]). In der Abbildung 12 sind beide Modelle (die lineare Funktion in rot und die kubische in blau) dargestellt. In dieser Abbildung ist auch gut zu erkennen, dass bis zum Jahr 2000 keine Differenzen zwischen dem linearen und dem kubischen Modell auftreten. Die Differenzen zwischen diesen zwei Modellen treten erst nach dem Jahr 2000 auf, zum selben Zeitpunkt wie der Start der beschleunigten Abschmelzung der Polkappen.

### 3.5 Ocean Pole tide loading

Die ozeanische Poltide, hervorgerufen durch den Ozean, ist die Reaktion des Ozeans auf die Veränderungen der Zentrifugalkraft, die durch geringe Variationen der Erdrotationsachse entstehen. Diese geringen Variationen der Erdrotationsachse treten mit Perioden von 433 Tagen (Chandler Periode) und einem Jahr auf (Desai [2002]). In Abbildung 6 erkennt man, dass die durch diesen Effekt erzielten vertikalen Verschiebungen der Stationen bei maximal 2 mm liegen. Der Vektor der Stationsverschiebung berechnet sich aus einer Funktion aus den Wobble

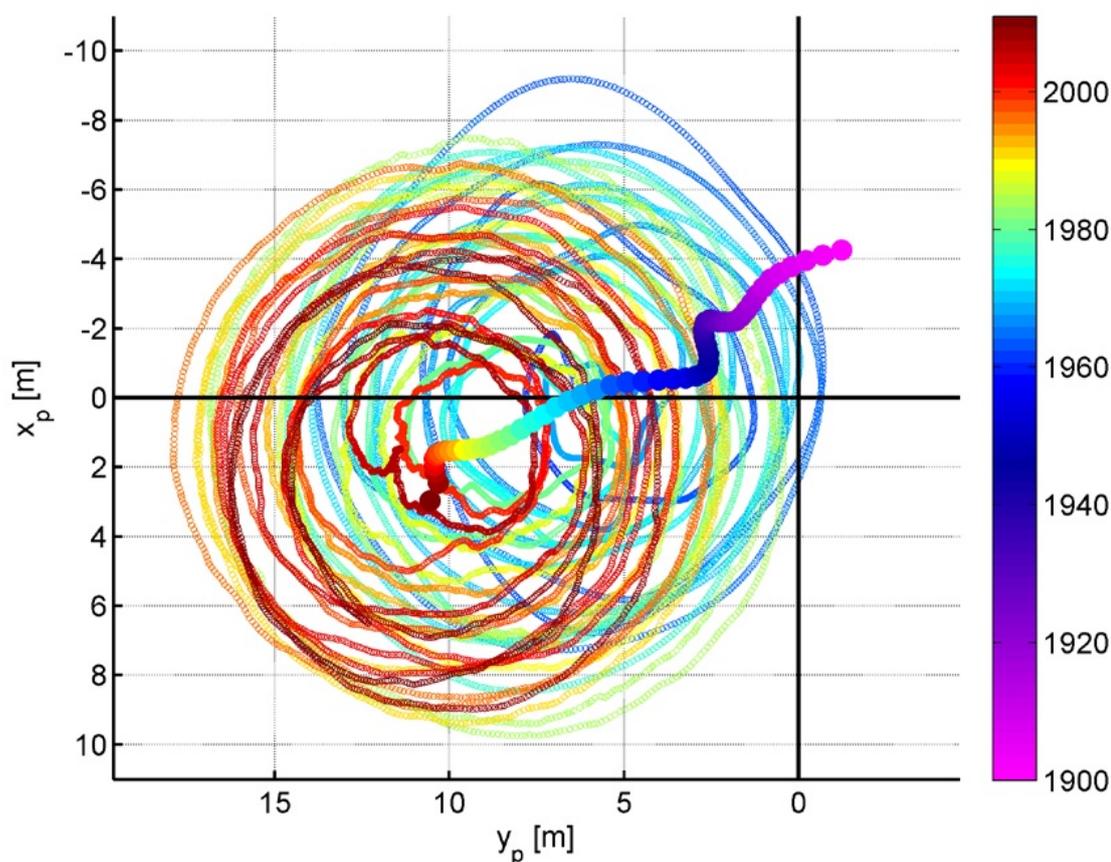


Abbildung 11: Die Polbewegung zwischen 1962 und 2010 zeigt einen Drift der Erdrotationsachse in Richtung  $78^\circ$  W, mit einer jährlichen Verschiebung von 10 cm. Der Beginn der Aufzeichnung ist mit der Farbe Magenta gekennzeichnet und ab dem Jahr 2000 wird der Drift in rot bis dunkelrot dargestellt.

(Quelle: Schindelegger [2014])

Paramtern  $m_1, m_2$ . Das sind zeitabhängige Abstände zwischen dem momentanen  $(x_p, y_p)$  und dem mittleren Pol  $(\bar{x}_p, \bar{y}_p)$  der Rotationsachse:  $m_1 = x_p - \bar{x}_p$  und  $m_2 = y_p - \bar{y}_p$  (Hana Krásná [2013]). In der unteren Grafik von Abbildung 13 sind im Zeitraum 1980 - 2012 die Koordinaten des momentanen Rotationspols dargestellt, in grün die x-Koordinate und in violett die y-Koordinate. Die Werte wurden aus der Zeitserie C04 08 entnommen. In der oberen Grafik von Abbildung 13 wird über den gleichen Zeitraum der Einfluss der ozeanischen Polbewegung auf die Stationsverschiebung von Kokee Park (blau) und Wettzell (rot) dargestellt. Für beide Stationen wird jeweils die lineare und kubische Lösung veranschaulicht (die lineare Lösung in dunkelrot/dunkelblau und die kubische in hellrot/hellblau). Wie in der Abbildung 13 leicht zu erkennen ist, gibt es zwischen den zwei Lösungen kaum Differenzen. Ab dem Jahr 2005 sieht man an der Station Kokee (rot) Differenzen im Submillimeter Bereich. Rund um das Jahr 2000 gibt es Differenzen von 0.1 mm an der Station Kokee (rot) (Hana Krásná [2013]).

### 3.6 Hydrologische Auflasteffekte

Hydrologische Variationen beeinflussen ebenfalls die Oberflächendeformationen der Erde. Unter hydrologischen Auflasteffekten versteht man die Einflüsse von der Wasserspeicherung (Bodenwasser, Grundwasser, Schnee und Eis, sowie Flüsse, Seen und Feuchtgebiete) in bestimmten Gebieten und dem Wasserablauf aus diesen Gebieten. Die durch hydrologische Auflasteffekte hervorgerufene vertikale Verschiebung beträgt im Normalfall ein paar Millimeter. In bestimmten Regionen mit sehr großen hydrologischen Variationen (Südamerika, Asien, Zen-

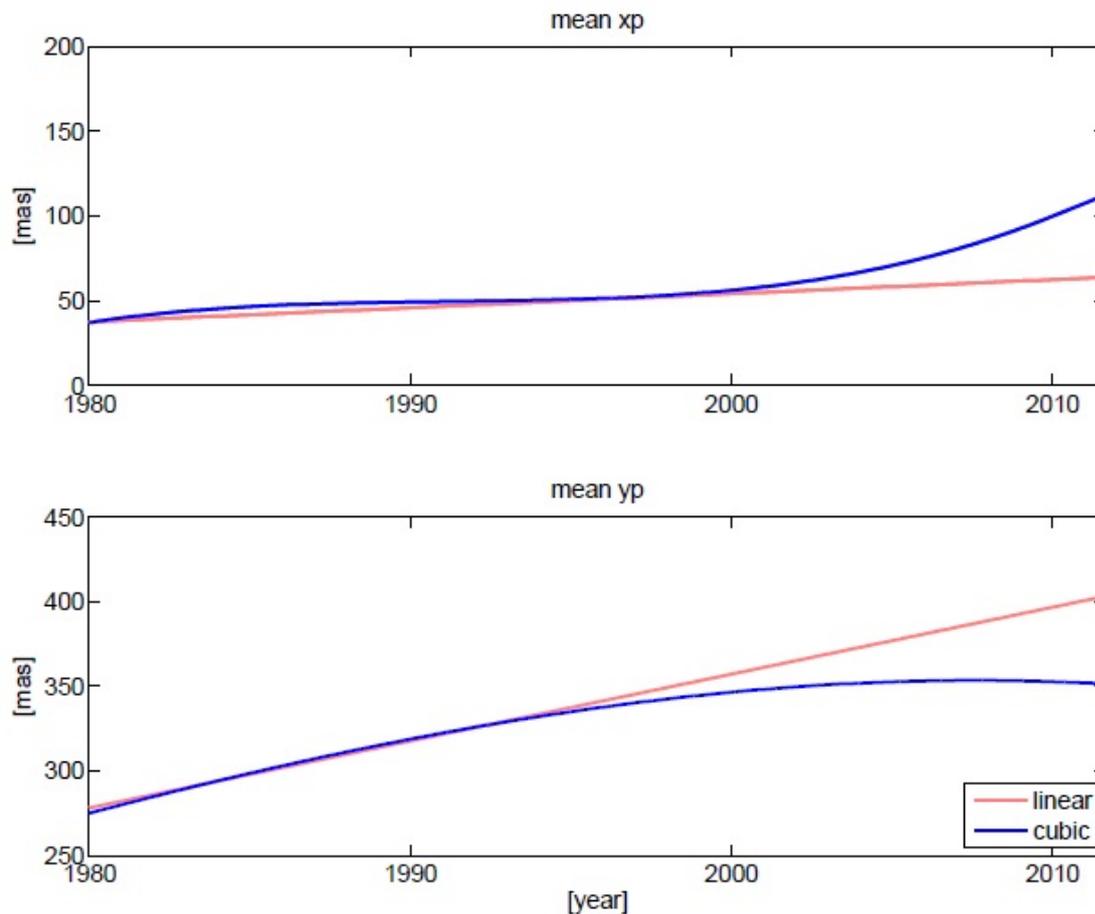


Abbildung 12: Das lineare und kubische Modell des mittleren Pols der Erdrotationsachse zum Vergleich: In der oberen Grafik werden beide Modelle in x-Richtung und in der unteren Grafik in y-Richtung über den Zeitraum von 1980 bis 2011 geplottet. In rot ist das lineare Modell und in blau das kubische Modell dargestellt. Ab dem Jahr 2000 kommt es, aufgrund der beschleunigten Abschmelzung der Polkappen, zu starken Abweichungen der beiden Modelle. (Quelle: Hana Krásná [2013])

traleuropa) können diese Auflasteffekte jedoch vertikale Verschiebungen von bis zu 2-3 cm betragen (Hana Krásná [2013]). Im VieVS ist das hydrologische Auflastmodell vom GSFC der NASA implementiert. Dieses ist im Internet frei erhältlich: <http://lacerta.gsfc.nasa.gov/hydro/> (Eriksson u. MacMillan [2012]). Diese Zeitserien sind von der NASA GSFC GLDAS Arbeitsgruppe aus dem GLDAS Noah Modell errechnet und in einem globalen Netz mit einer Auflösung von  $1.0^\circ \times 1.0^\circ$  realisiert. Dieses Modell berücksichtigt die Bodenfeuchte, Schnee- und Eisflächen, sowie die Feuchtigkeit in der Vegetation und stellt die Zeitserien des Auflasteffektes mit einer monatlichen Auflösung (am 15. Tag des Monats) dar. Im VieVS werden diese monatlichen Daten mit einer Interpolation auf den Tag der Messung berechnet.

In der Abbildung 14 sind für die VLBI Stationen Zelenchukskaya (blaue Linie) und Kokee (rote Linie) die Korrekturen des hydrologischen Auflasteffektes in vertikaler Richtung dargestellt. Die Station Zelenchukskaya steht östlich vom Schwarzen Meer im Kaukasus in Russland und zeichnet vertikale Verschiebungen von bis zu 2 cm auf, wobei das Maximum in den Sommermonaten registriert wird. Die Station Kokee Park (Hawaii) steht hingegen in einer hydrologisch relativ stabilen Gegend und zeigt daher Verschiebungen von ein paar wenigen Millimetern. In Abbildung 15 wird deutlich gezeigt, dass es je nach Stationsstandort große Unterschiede bei der Auswirkung von hydrologischen Auflasteffekten gibt. Die Station Zelenchukskaya (blaue Linie) im Inland und mittleren Breitengrad zeichnet zehnmal höhere Amplituden (4 mm) auf als die Station Kokee Park (rote Linie) direkt im Meer und niedrigen Breitengrad (Hana

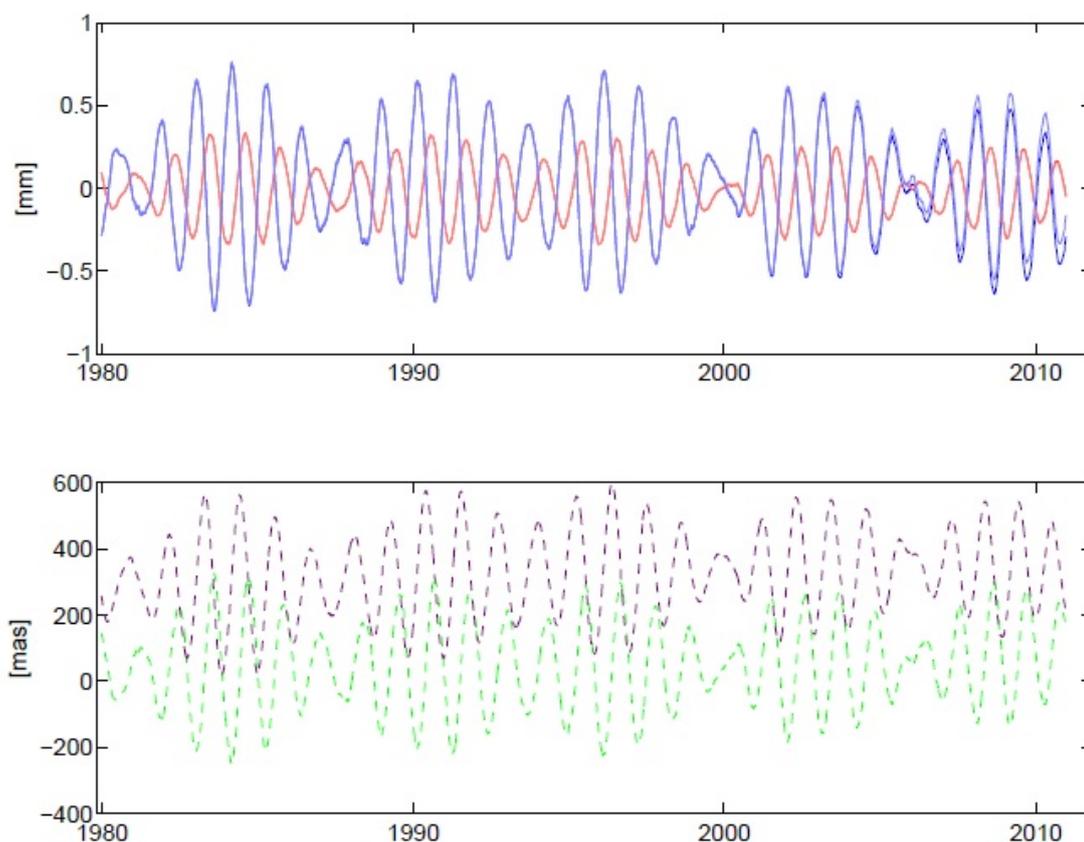


Abbildung 13: Obere Grafik: Der Einfluss der ozeanischen Poltide auf die vertikale Verschiebung der Station Kokee Park (blau) und Wettzell (rot). Jeweils in dunkler Farbe ist die lineare Lösung dargestellt und in heller Farbe die kubische Lösung. Bis zum Jahr 2005 ist kein Unterschied zwischen den zwei Lösungen zu sehen. Ab dem Jahr 2005 kommt es vor allem bei der Station Kokee Park zu sichtbaren Differenzen. Untere Grafik: Die Koordinaten des momentanen Pols der Rotationsachse (x-Koordinate in grün und y-Koordinate und violett). (Quelle: Hana Krásná [2013])

Krásná [2013]).

Die Qualität des hydrologischen Modells der NASA GSFC GLDAS Arbeitsgruppe wird mit der Standardabweichung der Zeitserien und den Basislinienwiederholbarkeiten überprüft. Zu diesem Zweck werden die Differenzen der Zeitserien zwischen einer Referenzlösung ohne hydrologischer Korrektur und den Lösungen mit hydrologischer Korrektur berechnet (Hana Krásná [2013]). In der Abbildung 16 werden die Differenzen (mit minus ohne hydrologischen Auflasteffekt) der Zeitserien in vertikaler Richtung für verschiedene Stationen dargestellt. Die Differenz der Standardabweichung beträgt für alle Stationen unter 0.5 mm. In der Abbildung 17 wird der Vergleich von Basislinienwiederholbarkeiten dargestellt. In der Grafik erscheinen nur Basislinien die in mehr als 200 VLBI Sessions beobachtet wurden. Es übersteigen nur drei Basislinien (TIGO - Hartebeesthoek (8431 km), Tsukuba - Wettzell (8445 km) und TIGO - Gilmore Creek (10837 km)) die Standardabweichung von 0.5 mm. Sieht man diese drei Basislinien als Ausreißer ergibt sich ein mittlere Wert für die Basislinienwiederholbarkeit von -0.01 mm (Hana Krásná [2013]).

Da die Länge der Basislinie in Bezug auf die NNT/NNR Bedingung invariant ist aber die Stationskoordinaten nicht dieses Kriterium erfüllen, ist die Standardabweichung der Basislinienlänge ein besseres Qualitätsmerkmal als die Standardabweichung der vertikalen Stationsverschiebung (Hana Krásná [2013]).

Abbildung 18 veranschaulicht die weltweite mittlere monatliche Variabilität der kontinentalen

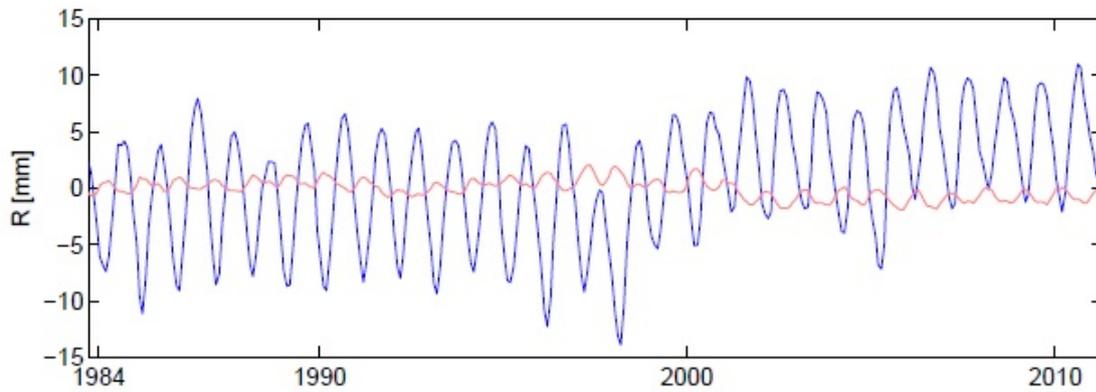


Abbildung 14: Vertikale Stationsverschiebungen in mm (Zelenchukskaya in blau, Kokee Park in rot) aufgrund von hydrologischen Auflasteffekten im Zeitraum von 1984 bis 2011. Zelenchukskaya weist Verschiebungen von bis zu 2 cm auf, Kokee Park hingegen von nur ein paar Millimetern.

(Quelle: Hana Krásná [2013])

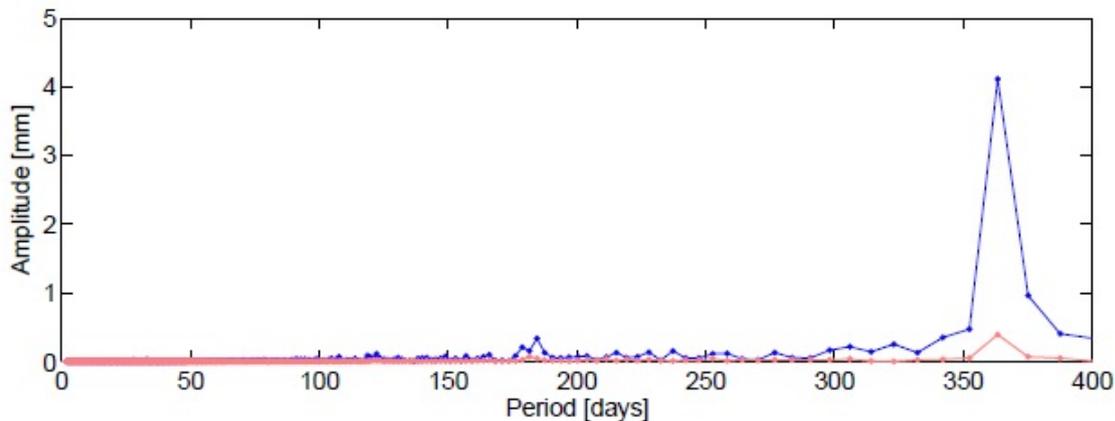


Abbildung 15: Der vertikale hydrologische Auflasteffekt im Fourierspektrum der Stationen Zelenchukskaya (blau) und Kokee Park (rot). Die Station Zelenchukskaya zeichnet zehn mal höhere Amplituden auf als die Station Kokee Park.

(Quelle: Hana Krásná [2013])

Wasserspeicherung aus GRACE-Daten für den Zeitraum 2002 bis 2011 in mm Wassersäule. Diese Grafik zeigt, dass es sehr große Variationen im Amazonasbecken, im Einzugsgebiet des Ganges, nördlich und südlich des Äquators in Afrika, sowie im nördlichsten Teil Australiens gibt. Auch in Teilen Alaskas, Zentraleuropas und Sibiriens kommt es zu großen Variationen. Hydrologisch am stabilsten sind die großen Wüstengebieten, wie zum Beispiel die Sahara (Afrika), die Gobi (Asien), die Atacama (Südamerika), die Namib und die Kalahari (Afrika) und die Wüsten in Australien.

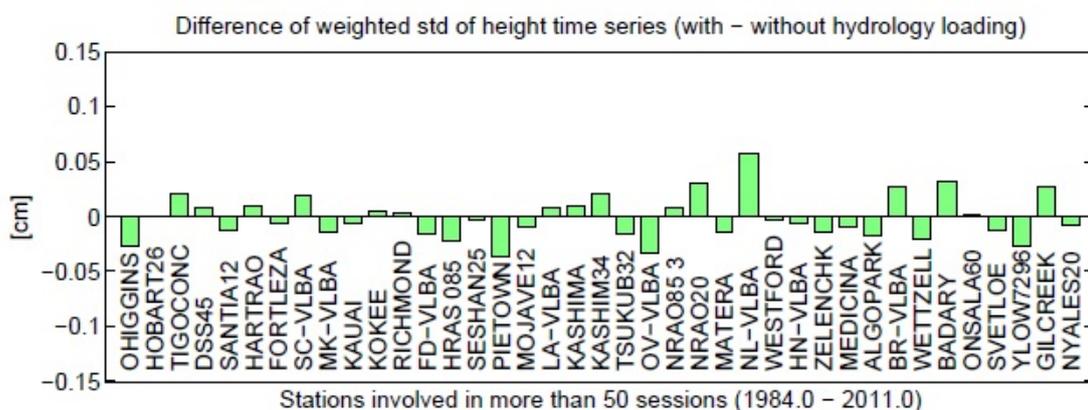


Abbildung 16: Differenzen der Standardabweichungen (mit minus ohne Korrektur der hydrologischen Auflasteffekte) der Zeitserien in vertikaler Richtung von allen Stationen die von 1984 bis 2011 an mindestens 50 Sessions beteiligt waren. Negative Werte stehen für eine Verbesserung der Standardabweichung.

(Quelle: Hana Krásná [2013])

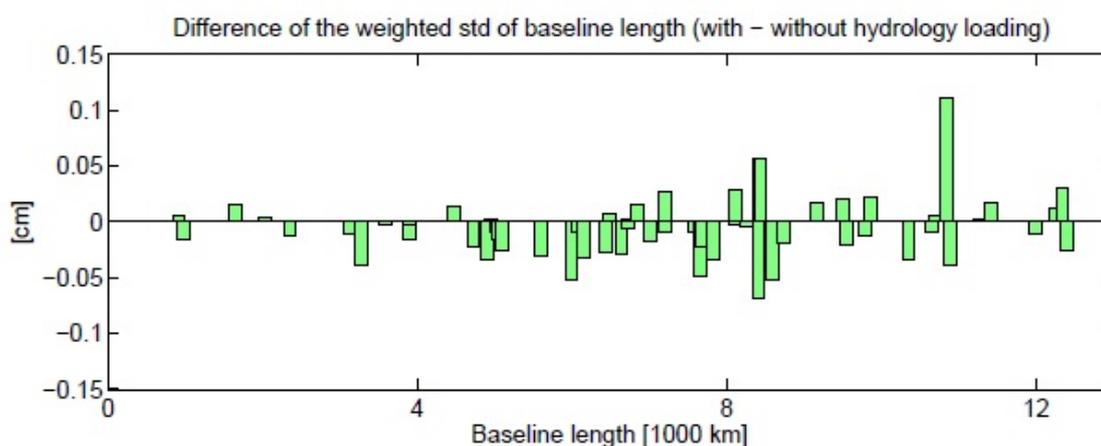


Abbildung 17: Differenzen der Standardabweichungen (mit minus ohne Korrektur der hydrologischen Auflasteffekte) der Basislinienlänge, dargestellt in km-Länge. Es erscheinen nur Basislinien die in mehr als 200 VLBI Sessions beobachtet wurden. Es übersteigen nur drei Basislinien (TIGO - Hartebeesthoek (8431 km), Tsukuba - Wettzell (8445 km) und TIGO - Gilmore Creek (10837 km)) die Standardabweichung von 0.5 mm. Sieht man diese drei Basislinien als Ausreißer ergibt sich ein mittlere Wert für die Basislinienwiederholbarkeit von -0.01 mm.

(Quelle: Hana Krásná [2013])

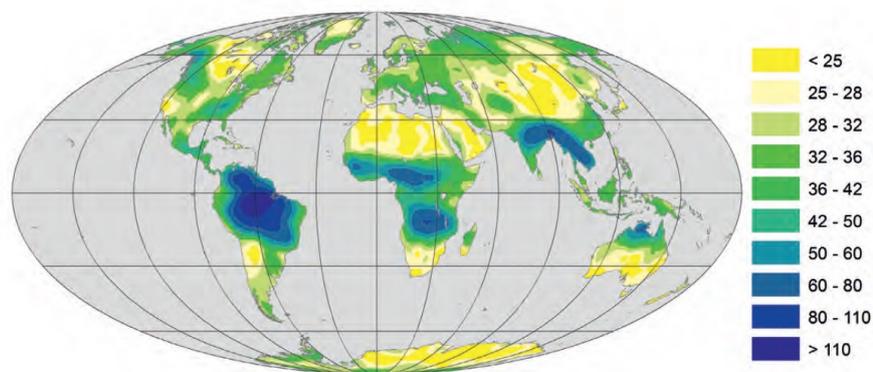


Abbildung 18: Mittlere monatliche Variabilität der kontinentalen Wasserspeicherung. Gelbe Regionen sind hydrologisch sehr stabile Regionen, blaue Regionen hingegen weisen eine sehr hohe Variabilität der Wasserspeicherung auf. Die meisten Teleskope stehen in den grünen Regionen, die ebenfalls hydrologisch variabel sind.  
(Quelle: Güntner u. a. [2012])

## 4 Auswertung

### 4.1 Ziel

Durch die Auswertung der VLBI Sessions des IVS von insgesamt 118 VLBI Stationen über einen Zeitraum von 13 Jahren soll der jährliche/halbjährliche Einfluss von ozeanischen, atmosphärischen und hydrologischen Auflasteffekten auf die Stationskoordinaten untersucht werden. Die Auswertung, Berechnung und Ausgabe erfolgt mit der Vienna VLBI Software (VieVS) und Matlab.

### 4.2 Auswahl der Sessions

Über den Zeitraum von 1.1.2000 bis 31.12.2012 stellt der IVS 1617 Sessions zu Verfügung. Insgesamt werden in diesen 1617 Sessions über 7000 Beobachtungen durchgeführt. Bis auf zwei fehlerhafte Sessions:

- 12OCT16XH\_N004 und
- 12SEP03XA\_N004

konnten alle anderen an der Auswertung teilnehmen. Damit stehen für die folgenden Berechnungen 1615 Sessions zu Verfügung.

### 4.3 Auswahl der Stationen

Von den 118 Stationen werden jene Stationen für die weitere Auswertung ausgewählt, die zumindest über drei Jahre kontinuierlich gemessen haben. Die nach der Untersuchung aller Stationen für die weitere Auswertung in Frage kommenden Stationen sind in der Tabelle 2 unterstrichen.

### 4.4 Berechnung

Zu Beginn wird eine Liste mit allen Sessions erstellt und eingelesen. Die zwei fehlerhaften Sessions werden direkt in der Liste herausgelöscht. Als zusätzliche Einstellung wird ein Häkchen für die Eliminierung von Ausreißern gesetzt (siehe linke Grafik von Abbildung 19: eliminate outliers). Als TRF wird der vievsTRF und für den CRF wird der vievsCRF eingestellt (siehe Abbildung 19).

Für die Anwendung der Stationskorrekturen gibt es folgende Auswahl (siehe auch Abbildung 20):

- Solid Earth tides
- Tidal ocean loading
- Tidal atmosphere loading
- Non-Tidal atmosphere loading
- Pole tide
- Ocean pole tide
- Hydrology loading
- Thermal antenna deformation

Die Korrekturen Solid Earth tides, Pole tide, Ocean pole tide und Thermal antenna deformation sind bei jeder Berechnung eingestellt. Die Auflasteffekte Tidal ocean loading, Tidal atmosphere loading, Non-Tidal atmosphere loading und Hydrology loading werden in allen Kombinationen durchgerechnet. Daraus ergeben sich 16 verschiedene Berechnungsmodelle,

A - F	F - K	K - N	N - P	Q - U	U - Z
AIRA	<u>FORTLEZA</u>	KAUAI	NOBEY_6M	QUINCY	URUMQI
<u>ALGOPARK</u>	<u>FORTORDS</u>	KODIAK	NOME	RICHMOND	VERAISGK
<u>BADARY</u>	GGAO7108	KOGANEI	NOTO	ROBLED32	VERNAL
BLKBUTTE	GIFU11	<u>KOKEE</u>	NOTOX	SANPAULA	VERAMZSW
BR-VLBA	<u>GILCREEK</u>	KP-VLBA	NRAO_140	SANTIA12	VLBA85_3
CHICHI10	GOLDMARS	KUNMING	NRAO20	SC-VLBA	VNDNBERG
CRIMEA	GORF7102	KWAJAL26	NRAO85_3	SESHAN25	WARK12M
CTVASBAY	<u>HART15M</u>	LA-VLBA	<u>NYALES20</u>	SEST	<u>WESTFORD</u>
CTVASTJ	<u>HARTRAO</u>	MARCUS	OHIGGINS	SINTOTU3	<u>WETTZELL</u>
DEADMANL	HATCREEK	MARPOINT	<u>ONSALA60</u>	SOURDOGH	WHTHORSE
DSS13	HAYSTACK	<u>MATERA</u>	OVRO_130	SNDPOINT	WIDE85_3
DSS15	HN-VLBA	<u>MEDICINA</u>	OV-VLBA	<u>SVETLOE</u>	YAKATAGA
DSS45	<u>HOBART12</u>	METSAHOV	PARKES	SYOWA	YARRA12M
DSS65	<u>HOBART26</u>	METSHOVI	PBLOSSOM	TIDBIN64	YEBES
DSS65A	HRAS_085	MIAMI20	PIETOWN	<u>TIGOCONC</u>	YEBES40M
EFLSBERG	JPL_MV1	MIZNAO10	PINFLATS	TIGOWTZL	YLOW7296
ELY	KASHIM11	MK-VLBA	PLATTVIL	TROMSONO	YUMA
FD-VLBA	KASHIM34	MOJAVE12	PRESIDIO	TRYSILNO	<u>ZELENCHK</u>
FLAGSTAF	KASHIMA	MON_PEAK	PT_REYES	<u>TSUKUB32</u>	
FORT_ORD	KATH12M	NL-VLBA	PVERDES	UCHINOUR	

Tabelle 2: Auswahl der Stationen: Von den 118 verfügbaren VLBI Stationen werden nur jene Stationen ausgewählt und unterstrichen, die mindestens drei Jahre kontinuierlich gemessen haben.

die anschließend untereinander verglichen werden um die Einwirkung der Auflasteffekte untersuchen zu können. Als Modell für die ozeanischen Auflasteffekte (Tidal ocean loading) wird FES2004 gewählt. Tidal atmosphere loading wird mit dem Korrekturmodell vandam berechnet. Für Non-tidal atmosphere loading und Hydrology loading wird das Modell vom GSFC eingestellt.

Zusätzliche Berechnungen und die gesamte Ausgabe werden in einem von mir selbst erstellten Matlab-File durchgeführt (siehe Anhang). Zu Beginn meines Programmes werden sämtliche Stationen aufgelistet. Aus diesen kann man sich eine auswählen und direkt über die Tastatur eingeben um die Berechnung zu starten. Die von VieVS ausgelesenen Koordinatenzuschläge werden vom VieVS Terrestrial Reference Frame (vievsTRF) ins lokale Horizontsystem transformiert. Diese Transformation erfolgt über die Gleichung (4.1):

$$\mathbf{x}' = S_x \cdot R_y(90 - \phi) \cdot R_z(\lambda) \cdot \mathbf{x} \quad (4.1)$$

mit  $\mathbf{x}$  = Koordinatenvektor im vievsTRF,  $\mathbf{x}'$  = Koordinatenvektor im lokalen Horizontsystem,  $S_x$  = Spiegelung um die X-Achse,  $R_y$  = Drehung um Y-Achse,  $R_z$  = Drehung um Z-Achse,  $\phi$  = Breite der Station und  $\lambda$  = Länge der Station.

Als nächstes werden die Sessions nach dem julianischen Datum sortiert, da das für die grafische Ausgabe wichtig ist. Anschließend wird die Standardabweichung der Koordinatenzuschläge bestimmt. Über die Standardabweichung sollen am Ende Aussagen über Verbesserungen und Verschlechterungen der Positionsermittlung der ausgewählten Station aufgrund der angewendeten Korrekturmodelle erfolgen. Mit Hilfe einer Ausgleichung werden jährliche und

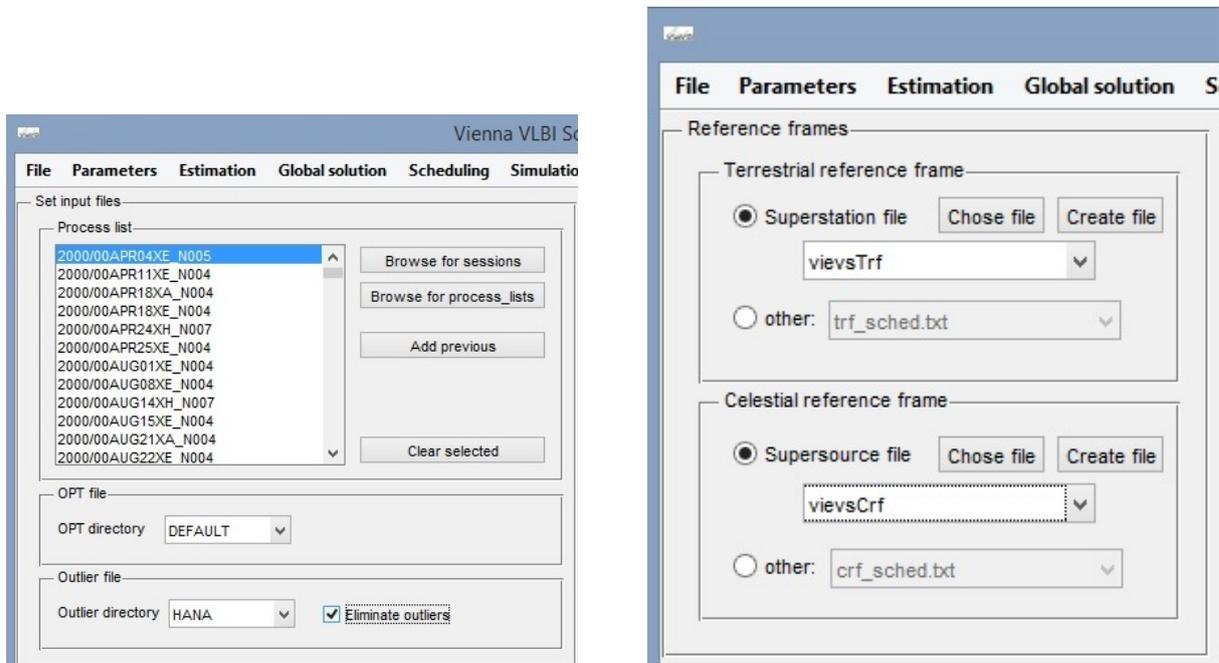


Abbildung 19: VieVs Benutzeroberfläche: Einlesen der Sessions (links), TRF und CRF Einstellungen (rechts)

halbjährliche Signale durch die Koordinatenzuschläge geschätzt. Gleichung (4.2) zeigt das Ausgleichungsmodell.

$$\Delta \hat{x} = (A' \cdot A)^{-1} \cdot A' \cdot \Delta l \quad (4.2)$$

mit  $A$  = Designmatrix,  $\Delta l$  = Differenz zwischen gemessenen ( $l$ ) und berechneten ( $l^0$ ) Beobachtungen.

Für die Designmatrix  $A$  werden die Ableitungen der Gleichung (4.3) mit der jährlichen und halbjährlichen Schwingung erstellt. Die Startwerte für die Amplituden ( $A_1$ ,  $B_1$ ,  $A_2$ ,  $B_2$ ) und den Vektor  $X_0$  sind jeweils 0.

$$l^0 = X_0 + A_1 \cdot \cos\left(\frac{(t - t_0) \cdot 2\pi}{365.2425}\right) + B_1 \cdot \sin\left(\frac{(t - t_0) \cdot 2\pi}{365.2425}\right) + A_2 \cdot \cos\left(\frac{(t - t_0) \cdot 2\pi}{182.62125}\right) + B_2 \cdot \sin\left(\frac{(t - t_0) \cdot 2\pi}{182.62125}\right) \quad (4.3)$$

mit  $X_0$  = Vektor mit den Startwerten 0,  $A_1, B_1$  = Amplituden der jährlichen Schwingung mit dem Startwert 0,  $A_2, B_2$  = Amplituden der halbjährlichen Schwingung mit dem Startwert 0,  $t$  = Zeitpunkt der Session im julianischen Datum und  $t_0$  = Startzeitpunkt 1.1.2000 im julianischen Datum.

Abschließend werden die Zeitserien (Nord, Ost, Höhe) der Koordinatenzuschläge aller ausgewählten VLBI Stationen mit der geschätzten Gesamtschwingung (Summe aus der jährlichen und halbjährlichen Schwingung) geplottet und untersucht. Abbildung 73 zeigt die Station Wettzell mit folgenden Korrekturmodellen: Solid Earth tides, Tidal ocean loading, Tidal atmosphere loading, Non-tidal atmosphere loading, Pole tide, Ocean pole tide, Hydrology loading und Thermal antenna loading.

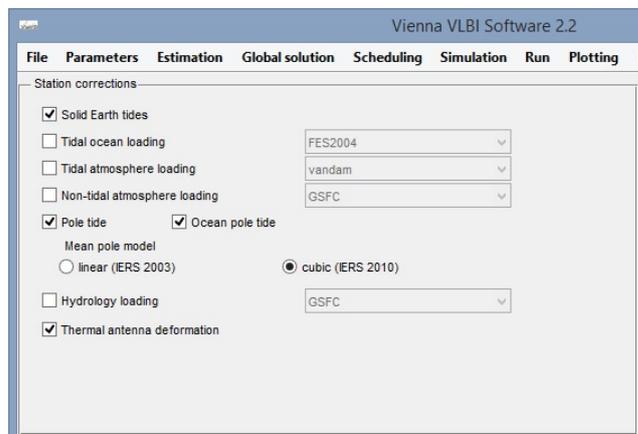


Abbildung 20: Stationskorrekturen: Solid Earth tides, Pole tide, Ocean pole tide und Thermal antenna deformation sind bei jeder Berechnung eingestellt. Alle anderen Korrekturen werden in allen möglichen Kombinationen durchgerechnet. Für die Auflasteffekte werden die voreingestellten Modelle verwendet.

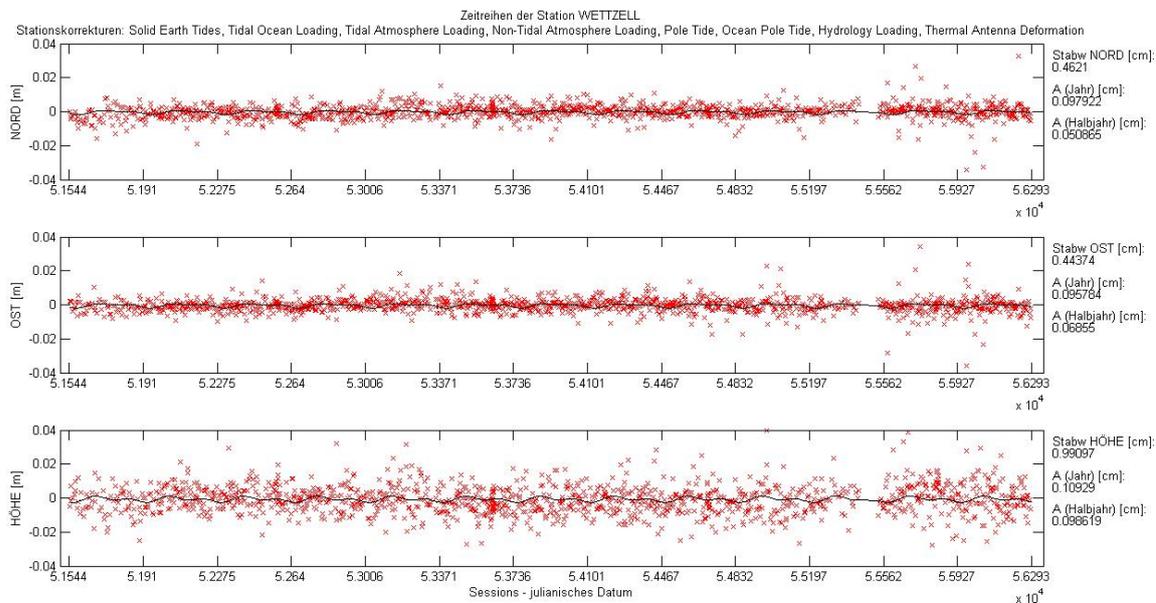


Abbildung 21: Die Station Wettzell mit sämtlichen geophysikalischen Korrekturmodellen

## 5 Ergebnisse

In diesem Kapitel wird der geophysikalische Einfluss auf die Stationskoordinaten von allen ausgewählten VLBI Stationen präsentiert und untersucht. In erster Linie wird die Variation der Stationshöhe genauer betrachtet, weil der geophysikalische Einfluss auf horizontale Stationsverschiebungen um das zehnfache geringer ist. Die ausgewählten Stationen sind (alphabetisch aufgelistet):

- ALGOPARK
- BADARY
- FORTLEZA
- FORTORDS
- GILCREEK
- HART15M
- HARTRAO
- HOBART12
- HOBART26
- KOKEE PARK
- MATERA
- MEDICINA
- NYALES20
- ONSALA60
- SVETLOE
- TIGOCONC
- TSUKUB32
- WESTFORD
- WETTZELL
- ZELENCHK

Bei den Barplots, die bei ein paar Stationen zu finden sind, stehen die roten Balken für die Standardabweichung, die blauen Balken für die Amplitude der jährlichen Schwingung und die grünen Balken für die Amplitude der halbjährlichen Schwingung. In jedem der drei Plots sind 16 Balken zu sehen. Das sind alle möglichen Kombinationen der Korrekturmodelle von den Auflasteffekten. Die Anbringung der Auflasteffekte sind hier vom Balken 1 bis Balken 16 aufgelistet:

- Balken 1: keine geophysikalischen Auflasteffekte
- Balken 2: tidal ocean loading
- Balken 3: tidal atmosphere loading
- Balken 4: non-tidal atmosphere loading
- Balken 5: hydrology loading
- Balken 6: tidal ocean loading, tidal atmosphere loading
- Balken 7: tidal ocean loading, non-tidal atmosphere loading
- Balken 8: tidal ocean loading, hydrology loading
- Balken 9: tidal atmosphere loading, non-tidal atmosphere loading
- Balken 10: tidal atmosphere loading, hydrology loading
- Balken 11: non-tidal atmosphere loading, hydrology loading
- Balken 12: tidal ocean loading, tidal atmosphere loading, non-tidal atmosphere loading
- Balken 13: tidal ocean loading, tidal atmosphere loading, hydrology loading
- Balken 14: tidal ocean loading, non-tidal atmosphere loading, hydrology loading
- Balken 15: tidal atmosphere loading, non-tidal atmosphere loading, hydrology loading
- Balken 16: tidal ocean loading, tidal atmosphere loading, non-tidal atmosphere loading, hydrology loading

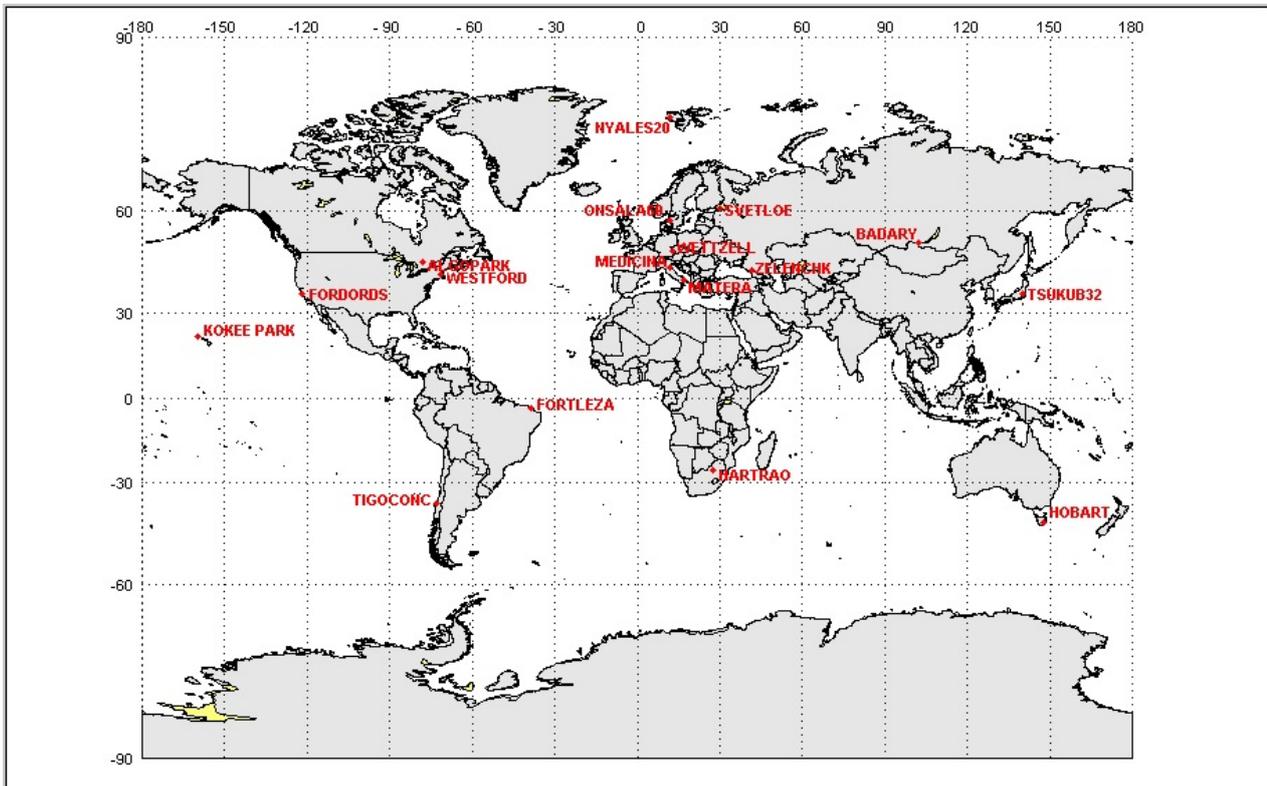


Abbildung 22: Die weltweite Verteilung der ausgewählten VLBI Stationen: HART15M und HARTRAO sind gemeinsam unter dem Namen HARTRAO geplottet und HOBART12 und HOBART26 gemeinsam unter dem Namen HOBART.

In der Abbildung 22 sind alle ausgewählten VLBI Stationen auf einer Weltkarte geplottet. Die Teleskope HART15M und HARTRAO befinden sich beide am Hartebeesthoek Radio Astronomy Observatory in Gauteng in Südafrika und sind unter dem Namen HARTRAO geplottet. HOBART12 und HOBART26 sind zwei Teleskope am gleichen Observatorium der Universität Tasmanien in Tasmanien, Australien, und sind mit dem Namen HOBART auf der Weltkarte geplottet.

## 5.1 ALGOPARK

ALGOPARK (Algonquin Radio Observatory) wurde betrieben von Geodetic Survey Division of Natural Resources Canada. Die Station beteiligte sich regelmäßig an IVS Beobachtungen. Im Jahr 2003 waren es 72 Sessions (R4, E3, R&D, T2). Es stehen nur Beobachtungen in der ersten Hälfte des ausgewählten Zeitraumes zu Verfügung, weil die Station zwischen 2008 und 2013 komplett saniert worden ist. Seit 2008 wird diese Station von der Firma Thoth Technology betrieben. ALGOPARK befindet sich im Algonquin provincial park in Ontario, rund 250 km nordwestlich von Ottawa, Kanada (siehe Tabelle 3) (Bérubé u. a. [2004]).

Abbildung 23 zeigt die Koordinatenzuschläge ohne geophysikalischen Korrekturen an der

Länge	78° 04' W
Breite	45° 57' N
Adresse	Algonquin Provincial Park, Ontario, Kanada

Tabelle 3: Die Lage und Adresse der Station ALGOPARK

VLBI Station ALGOPARK. Diese Station befindet sich in Kanada in dem Breitengrad (40° bis 60° N) mit den größten atmosphärischen Auflasteffekten. Bei Anbringung der atmosphärischen Korrektur erreicht man eine Verbesserung der Standardabweichung von 1.012 cm (siehe Abbildung 23) auf 0.974 cm (siehe Abbildung 24). Auch die hydrologischen Korrekturen führen zu einer deutlichen Verbesserung in den Amplituden der jährlichen Schwingung (siehe Abbildung 25). Die Verbesserung der Amplitude der jährlichen Schwingung beträgt 0.223 cm und der Amplitude der halbjährlichen Schwingung beträgt 0.051 cm mit einer Standardabweichung von 0.07 cm. Da ALGOPARK zwischen dem Meer und den großen Seen in Nordamerika steht, haben auch die ozeanischen Auflasteffekte einen Einfluss auf die Stationshöhe. In Abbildung 25 wird, zusätzlich zu atmosphärischen und hydrologischen Korrektur, noch die ozeanischen Korrektur angebracht. Würde diese Korrektur nicht angebracht werden, wäre die Standardabweichung um 0.013 cm schlechter.

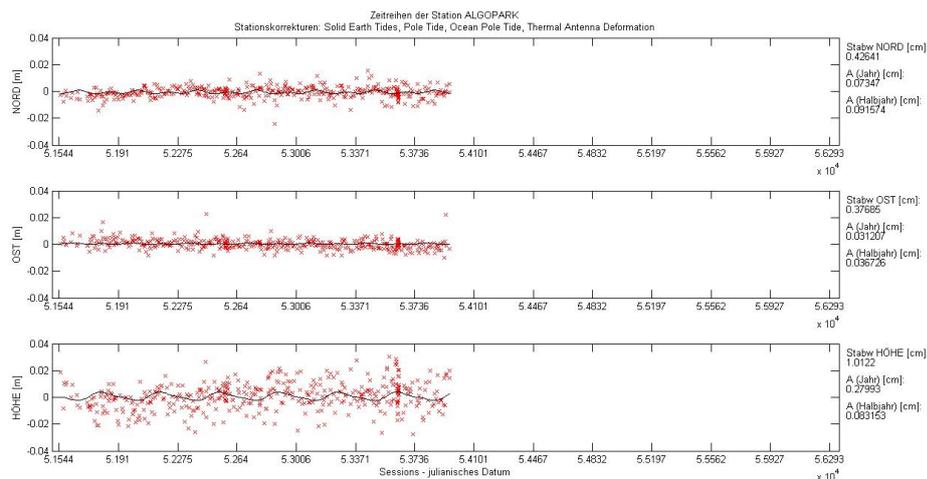


Abbildung 23: Die Zeitserien der Station ALGOPARK ohne geophysikalischen Korrekturmodellen

In Abbildung 26 stehen die roten Balken für die Standardabweichung, die blauen Balken für die Amplitude der jährlichen Schwingung und die grünen Balken für die Amplitude der halbjährlichen Schwingung der Station ALGOPARK. In jedem der drei Plots sind 16 Balken zu

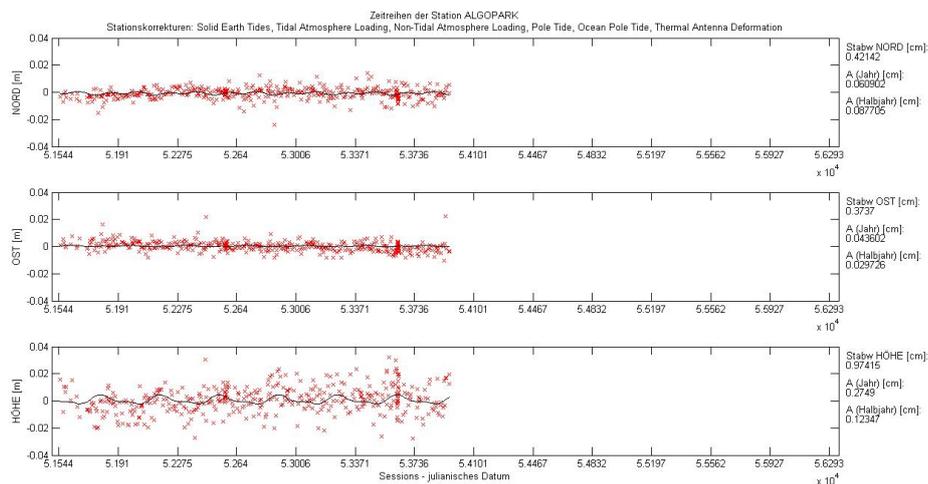


Abbildung 24: Die Zeitserien der Station ALGOPARK mit atmosphärischem Korrekturmodell

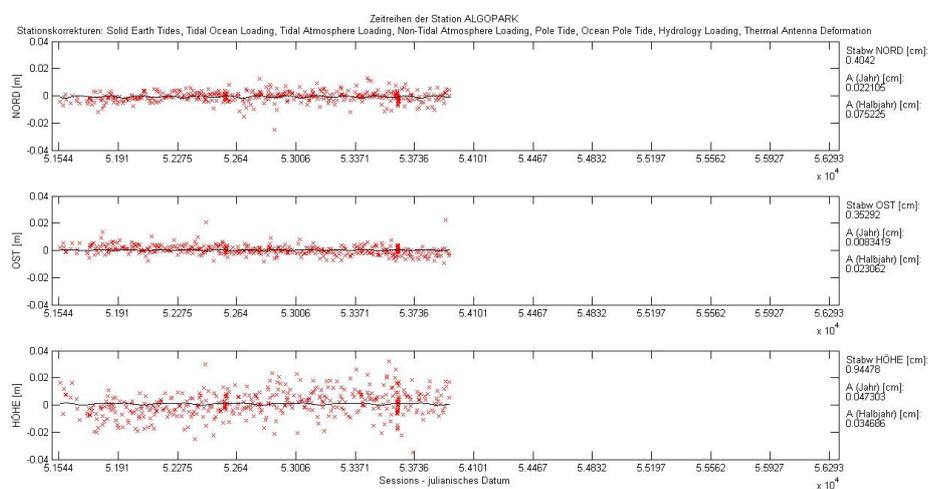


Abbildung 25: Die Zeitserien der Station ALGOPARK mit ozeanischen, atmosphärischen und hydrologischen Korrekturmodellen

sehen. Das sind alle möglichen Kombinationen der Korrekturmodelle von den Auflasteffekten. Die Kombinationen der Auflasteffekte sind am Beginn des Kapitels 5 aufgelistet. In dem blauen Plot der Abbildung 26 ist der Einfluss des hydrologischen Korrekturmodells sehr gut zu beobachten. Die Balken 5, 8, 10, 11, 13, 14, 15, und 16 sind jene Kombinationen mit hydrologischem Korrekturmodell und erreichen ungefähr ein Drittel der anderen Balken, die die jährliche Amplitude mit Kombinationen ohne hydrologischem Korrekturmodell darstellen.

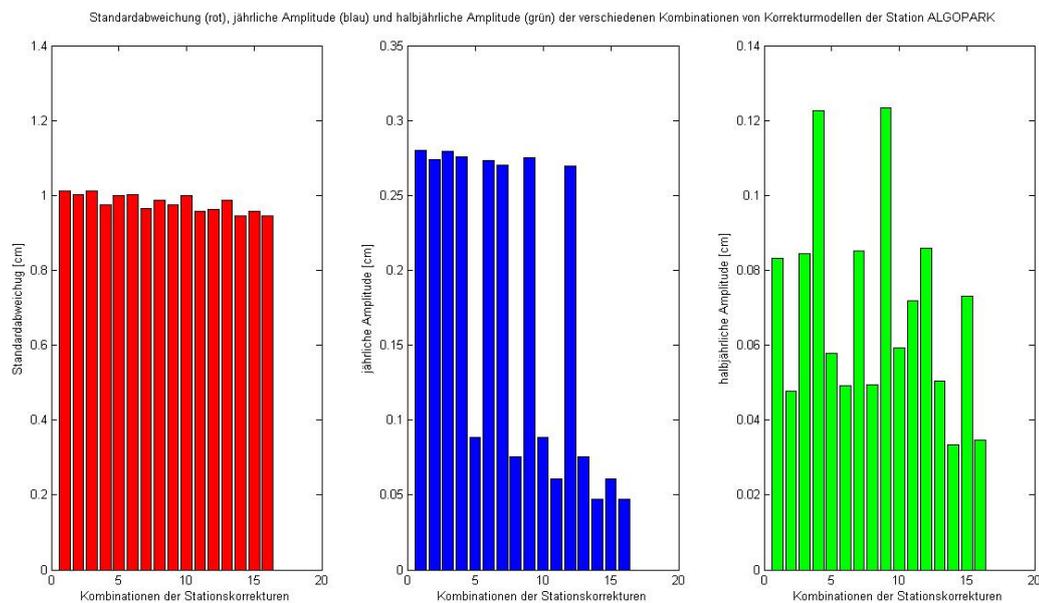


Abbildung 26: Die Plots zeigen alle möglichen Kombinationen der Korrekturmodelle von den Auflastmodellen (Balken 1 bis Balken 16) für die Station ALGOPARK. Rot: Standardabweichung. Blau: jährliche Amplitude. Grün: halbjährliche Amplitude.

## 5.2 BADARY

Die VLBI Station BADARY (Badary Radio Astronomical Observatory) ist eine von drei Stationen des russischen VLBI Dienstes QUASAR. Die Station beteiligt sich an IVS Beobachtungsprogrammen, sowie an inländischen VLBI Beobachtungsprogrammen. Im Jahr 2012 war BADARY an 27 ganztägigen IVS Sessions (IVS-R4, IVS-T2, und EURO) und an 47 ganztägigen inländischen Sessions (Beobachtungen der Erdorientierungsparameter) beteiligt, sowie an 191 einstündigen Sessions (Beobachtungen der Weltzeit UT1). Die Station liegt 130 km östlich vom Baikalsee in der Republik Buryatia in Ostsibirien (siehe Tabelle 4) (Smolentsev u. Olifrov [2013]).

Bei Vergleich der unterschiedlichen Auflasteffekte wird erkennbar, dass die hydrologischen

Länge	102° 14' O
Breite	51° 46' N
Adresse	Republik Buryatia, 671021, Russland

Tabelle 4: Die Lage und Adresse der Station BADARY

Auflasteffekte keinen Einfluss auf diese Station haben. Die Verbesserung der Amplituden der Schwingungen beträgt nur 0.020 cm mit einer Standardabweichung von 0.40 cm. Daher ist diese Verbesserung zu vernachlässigen. Das liegt daran, dass die Station in einer Gegend mit sehr stabilen hydrologischen Verhältnissen steht. Genauso ist auch der Einfluss der ozeanischen Auflasteffekte zu vernachlässigen. Das liegt daran, dass die Station mitten in Russland, weit weg von jedem Meer, steht. Abbildung 27 zeigt die Koordinatenzuschläge ohne Anbringung von geophysikalischen Auflasteffekten. BADARY weist, bei Anbringung der atmosphärischen Auflasteffekten, eine geringe Verbesserung der Standardabweichung (0.013 cm, siehe Abbildung 28) auf. Die Verbesserung bei Anbringung von atmosphärischen Korrekturen ist mit der geografischen Breite der Station zu erklären. Die größten atmosphärischen Umverteilungen findet man in den Breitengraden 40° bis 60° N und die Station BADARY liegt mit einer

Breite von  $51^\circ$  N genau in diesen Breitengraden.

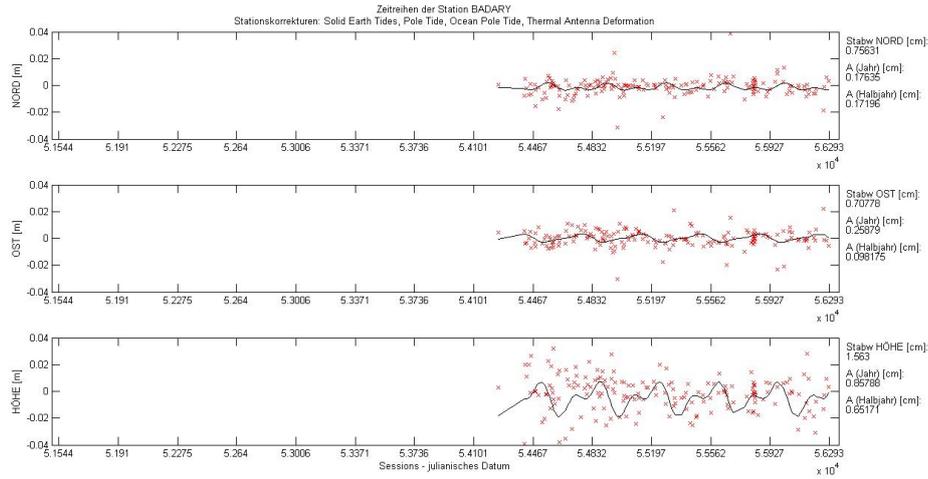


Abbildung 27: Die Zeitserien der Station BADARY ohne geophysikalischen Korrekturmodellen

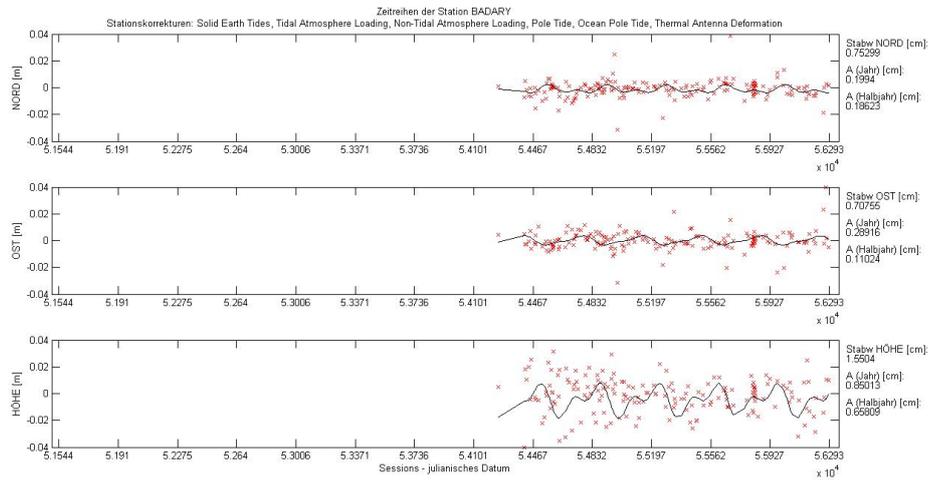


Abbildung 28: Die Zeitserien der Station BADARY mit atmosphärischem Korrekturmodell

### 5.3 FORTLEZA

FORTLEZA (Rádio Observatório Espacial do Nordeste), gehört zum brasilianischen Welt- raum Geodäsie Programm und war im Jahr 2013 an 99 Sessions des IVS beteiligt. Alle Aktivi- täten der Station FORTLEZA stehen in enger Verbindung mit der NASA, weil die Errichtung der Antenne und Instrumente von der NASA gesponsert wurde. Aus diesem Grund gibt es eine enge Zusammenarbeit zwischen NASA und brasilianischer Weltraumagentur (AEB). Die VLBI Station befindet sich in Eusébio, 30 km östlich von Fortaleza in Brasilien (siehe Tabelle 5) (Kaufmann u. a. [2014]).

Aufgrund der unmittelbaren Nähe zum Meer haben die ozeanischen Auflasteffekte auf die

Länge	38° 25' W
Breite	3° 52' S
Adresse	Eusébio - CE, 61760-000, Brasilien

Tabelle 5: Die Lage und Adresse der Station FORTLEZA

se Station die größten Einflüsse. Beim Vergleich der Abbildung 29 (ohne Korrekturmodelle) mit der Abbildung 30 (mit ozeanischen Korrekturmodell) wird eine Verbesserung der Stan- dardabweichung um 0.268 cm ersichtlich. Durch zusätzliche Anbringung der atmosphärischen und hydrologischen Korrekturen kann die Standardabweichung um weitere 0.003 cm verbes- sert werden (siehe Abbildung 31). Da diese Station in der Nähe des Äquators liegt und in Äquatornähe die atmosphärischen Massenumverteilungen sehr gering sind, ist der Einfluss der atmosphärischen Auflasteffekten auf die VLBI Station ebenfalls sehr gering. Aufgrund der relativ geringen Distanz zum Amazonasbecken (hydrologisch große Variationen) sollte der Anteil an den hydrologischen Auflasteffekten an der Station FORTLEZA größer sein. Bei Anbringung der hydrologischen Korrektur zeigt sich jedoch keine Verbesserung in den Am- plituden der jährlichen und halbjährlichen Schwingungen. Ein möglicher Grund wäre, dass die hydrologischen Variationen im Amazonasbecken um vieles größer sind als in den hydro- logischen Korrekturmodellen berechnet. Ein anderer Grund könnte sein, dass kaum jährliche hydrologische Variationen auftreten sondern nur monatliche hydrologische Variationen.

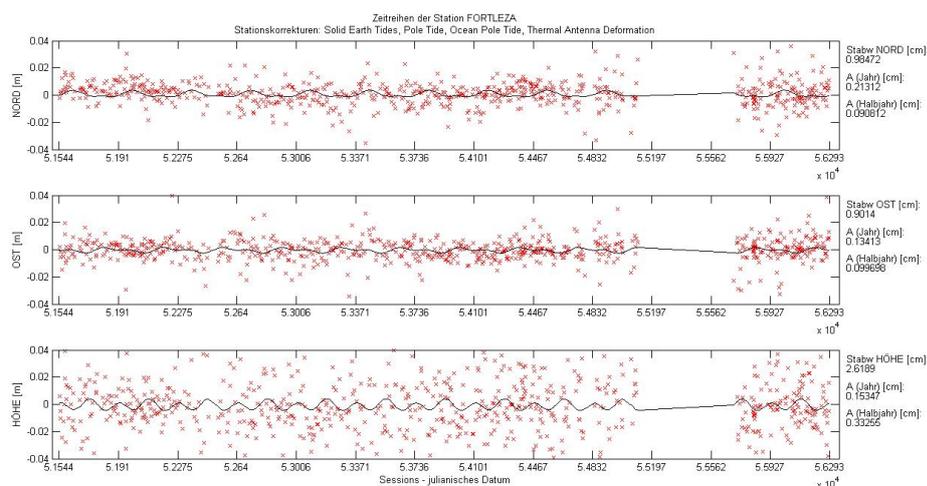


Abbildung 29: Die Zeitserien der Station FORTLEZA ohne geophysikalischen Korrekturmodellen

In Abbildung 32 stehen die roten Balken für die Standardabweichung, die blauen Balken für die Amplitude der jährlichen Schwingung und die grünen Balken für die Amplitude der

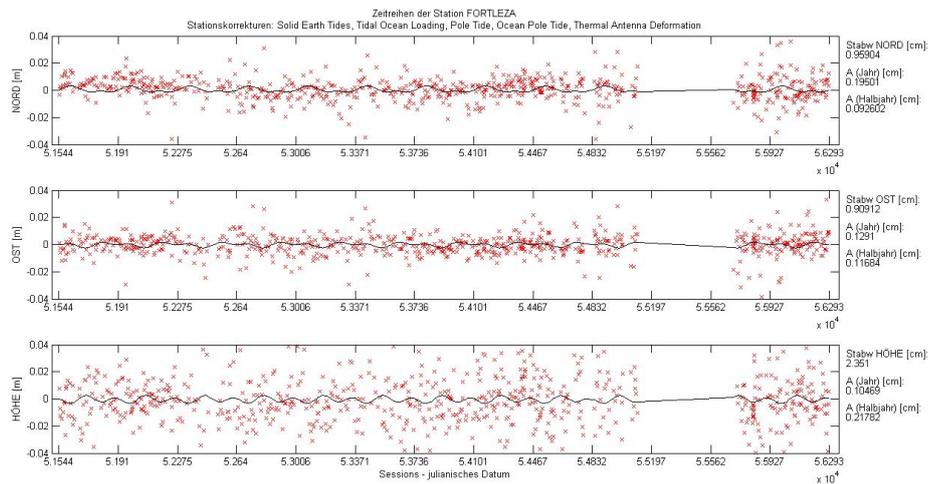


Abbildung 30: Die Zeitserien der Station FORTLEZA mit ozeanischem Korrekturmodell

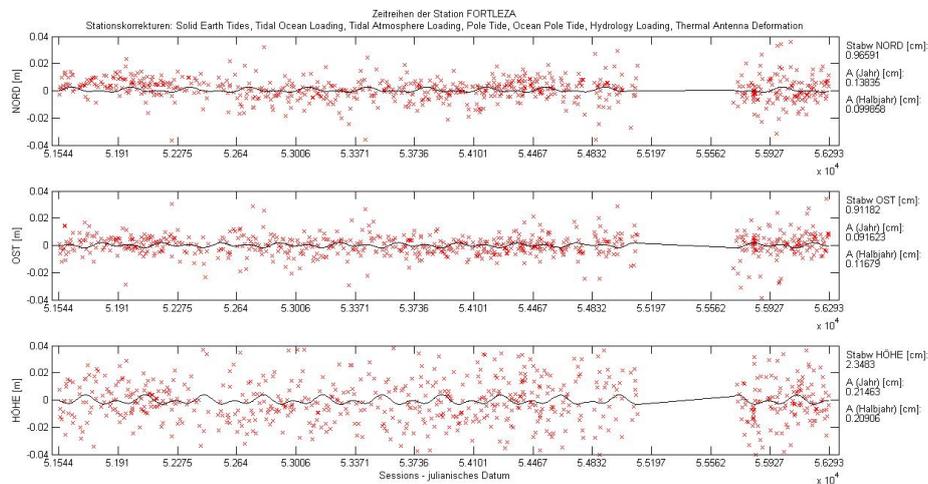


Abbildung 31: Die Zeitserien der Station FORTLEZA mit ozeanischen, atmosphärischen und hydrologischen Korrekturmodellen

halbjährlichen Schwingung der Station FORTLEZA. In jedem der drei Plots sind 16 Balken zu sehen. Das sind alle möglichen Kombinationen der Korrekturmodelle von den Auflasteffekten. Die Kombinationen der Auflasteffekte sind am Beginn des Kapitels 5 aufgelistet. Im grünen Plot der Abbildung 32 zeigt sich eine klare Verbesserung der halbjährlichen Amplitude bei den Balken 2, 6, 7, 8, 12, 13, 14, und 16. Das sind jene Balken an denen das ozeanische Korrekturmodell angebracht worden ist. Die gleichen Balken zeigen auch Verbesserungen in der Standardabweichung (roter Plot).

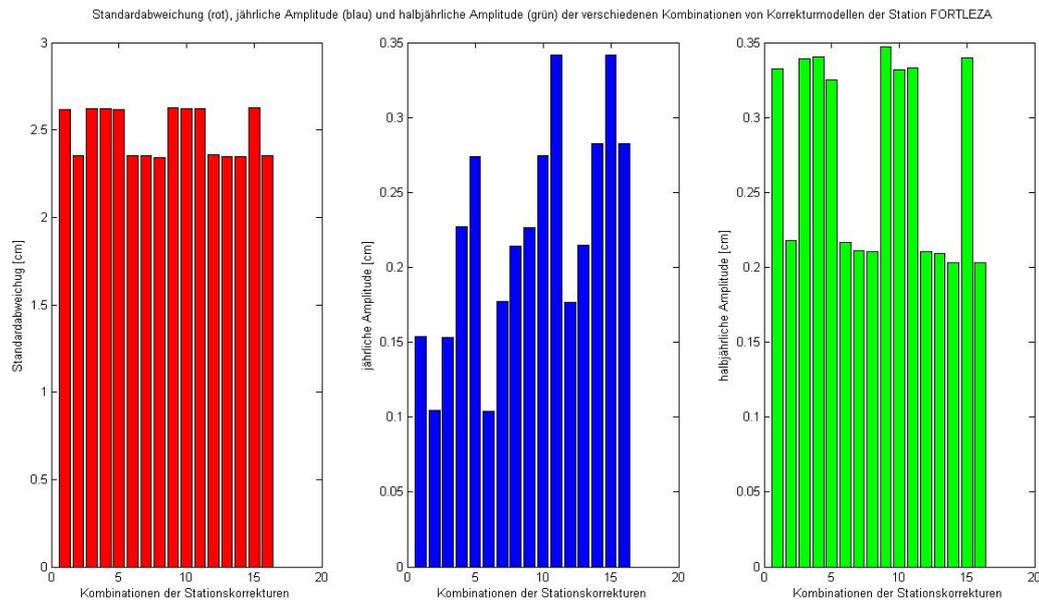


Abbildung 32: Die Plots zeigen alle möglichen Kombinationen der Korrekturmodelle von den Auflastmodellen (Balken 1 bis Balken 16) für die Station FORTLEZA. Rot: Standardabweichung. Blau: jährliche Amplitude. Grün: halbjährliche Amplitude.

## 5.4 FORTORDS

FORTORDS befindet sich auf einer Militärbasis der U.S. Army in Kalifornien, 40 km westlich von der San Andreas Verwerfung (siehe Tabelle 6). Bei dieser Station handelt es sich um eine mobile VLBI Antenne (NASA). Da FORTORDS auf einer Militärbasis der U.S. Army steht ist es sehr schwierig Informationen über diese Station zu finden.

Aus dem Vergleich von sämtlichen Abbildungen mit verschiedenen geophysikalischen Auf-

Länge	121° 46' W
Breite	36° 35' N
Adresse	U.S. military reservation, FORT ORD, California, USA

Tabelle 6: Die Lage und Adresse der Station FORTORDS

lasteffekten lässt sich herauslesen, dass die VLBI Station FORTORDS kaum Einflüsse von geophysikalischen Auflasteffekten unterliegt. Beim Vergleich von Abbildung 33 (Zeitreihen der Koordinatenzuschläge ohne geophysikalischen Korrekturen) mit Abbildung 34 (Zeitreihen der Koordinatenzuschläge mit ozeanischen Korrekturen) erkennt man eine Verbesserung der Standardabweichung um 0.050 cm. Hydrologische oder atmosphärische Auflasteffekte haben keinen Einfluss auf die Koordinatenzeitserien der Station FORTORDS.

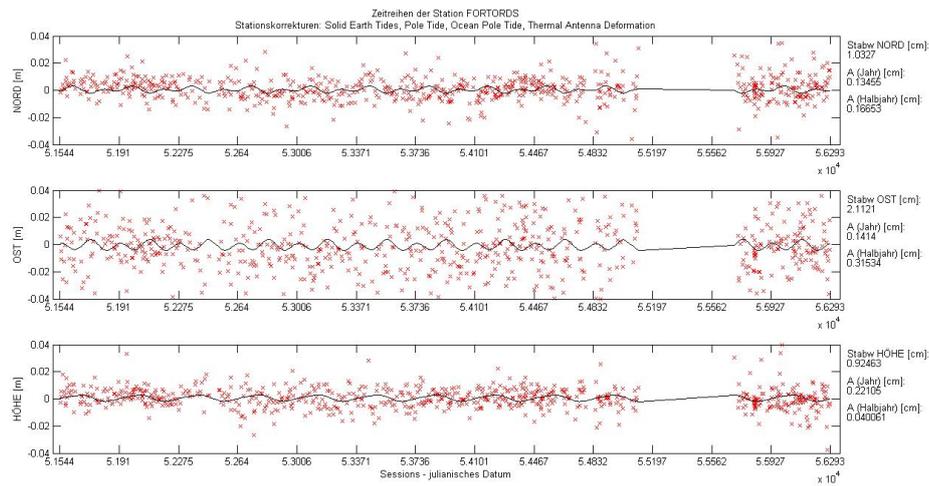


Abbildung 33: Die Zeitserien der Station FORTORDS ohne geophysikalischen Korrekturmodellen

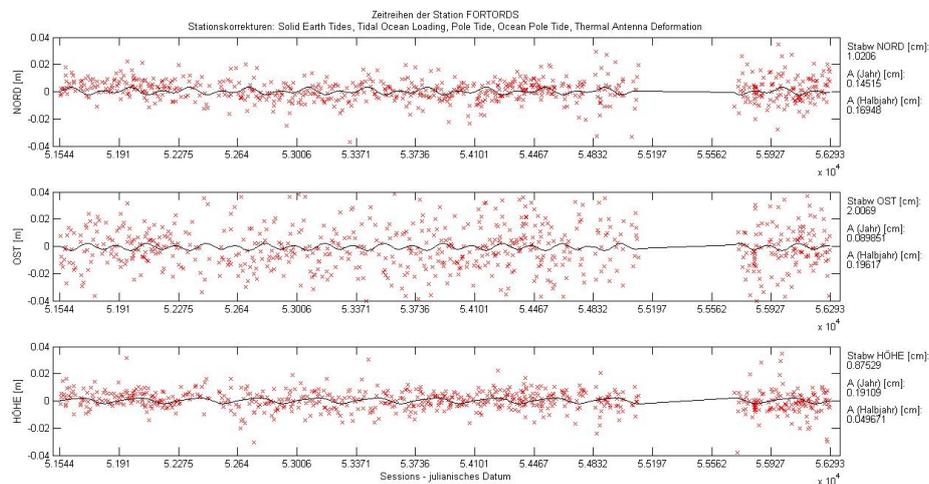


Abbildung 34: Die Zeitserien der Station FORTORDS mit ozeanischem Korrekturmodell

## 5.5 GILCREEK

Die VLBI Station GILCREEK (Gilmore Creek Geophysical Observatory) ist ein Teil des Weltraumgeodäsieprogramms der NASA und nahm regelmäßig an IVS Beobachtungen teil. Im Jahr 2003 beteiligte sich GILCREEK an 105 IVS Sessions. Nach einem schweren Erdbeben im November 2002, waren die Beobachtungen dieser Station nicht mehr so genau wie davor und seit 2005 wurden keine IVS Beobachtungen mehr durchgeführt. Diese Station befindet sich rund 20 km nordöstlich von Fairbanks in der Wildnis Alaskas, USA (siehe Tabelle 7) (Eberhart [2004]).

Die VLBI Station GILCREEK steht mitten in Alaska in der Nähe des großen Flusses Tanana.

Länge	147° 29' W
Breite	64° 58' N
Adresse	Fairbanks, Alaska, USA

Tabelle 7: Die Lage und Adresse der Station GILCREEK

Dieser hat ein großes Einzugsgebiet und mit den zusätzlichen starken Witterungsbedingun-

gen führt dies zu einem großen hydrologischen Einfluss. Bei Anbringung einer hydrologischen Korrektur verkleinern sich die Amplituden der jährlichen und halbjährlichen Schwingungen deutlich. Mit der Kombination von atmosphärischen Einflüssen verbessert sich die Amplitude der jährlichen Schwingung um 0.253 cm mit einer Standardabweichung von 0.06 cm. Außerdem gibt es in dieser Gegend starke atmosphärische Variationen. Beim Vergleich der Abbildung 35 (Zeitreihen der Koordinatenzuschläge ohne geophysikalischen Korrekturen) mit der Abbildung 36 (Zeitreihen der Koordinatenzuschläge mit atmosphärischer Korrektur) zeigt sich eine Verbesserung der Standardabweichung von 0.964 cm auf 0.862 cm. Die beste Standardabweichung (0.836 cm) erreicht man bei Anbringung der ozeanischen und atmosphärischen Korrektur (siehe Abbildung 37).

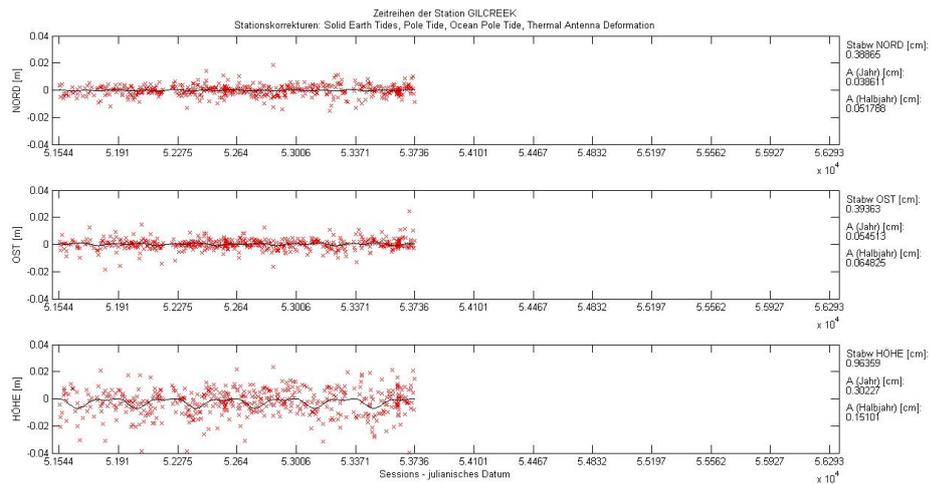


Abbildung 35: Die Zeitserien der Station GILCREEK ohne geophysikalischen Korrekturmodellen

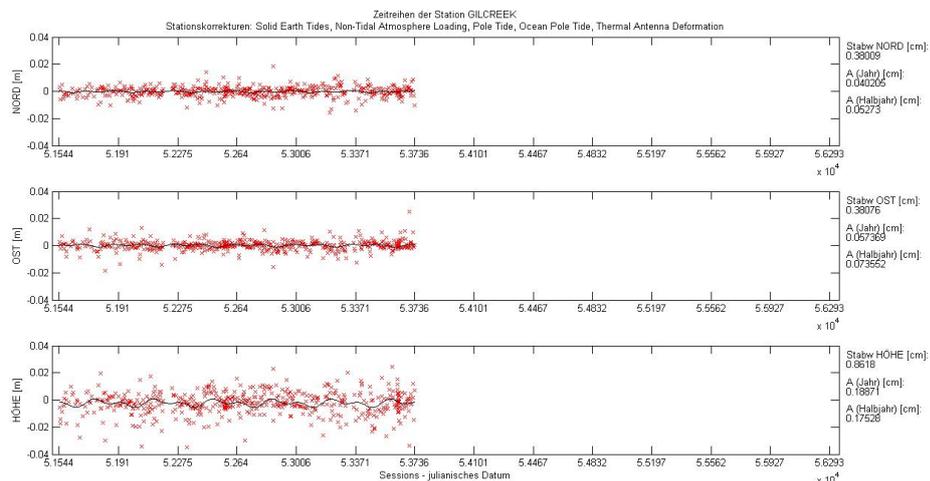


Abbildung 36: Die Zeitserien der Station GILCREEK mit atmosphärischem Korrekturmodell

In Abbildung 38 stehen die roten Balken für die Standardabweichung, die blauen Balken für die Amplitude der jährlichen Schwingung und die grünen Balken für die Amplitude der halbjährlichen Schwingung der Station GILCREEK. In jedem der drei Plots sind 16 Balken zu sehen. Das sind alle möglichen Kombinationen der Korrekturmodelle von den Auflasteffekten. Die Kombinationen der Auflasteffekte sind am Beginn des Kapitels 5 aufgelistet. Es zeigen sich im roten Plot (Standardabweichung) und im blauen Plot (Amplitude der jährlichen Schwingung) Verbesserungen in den Balken 4, 7, 9, 11, 12, 14, 15 und 16. Diese Balken

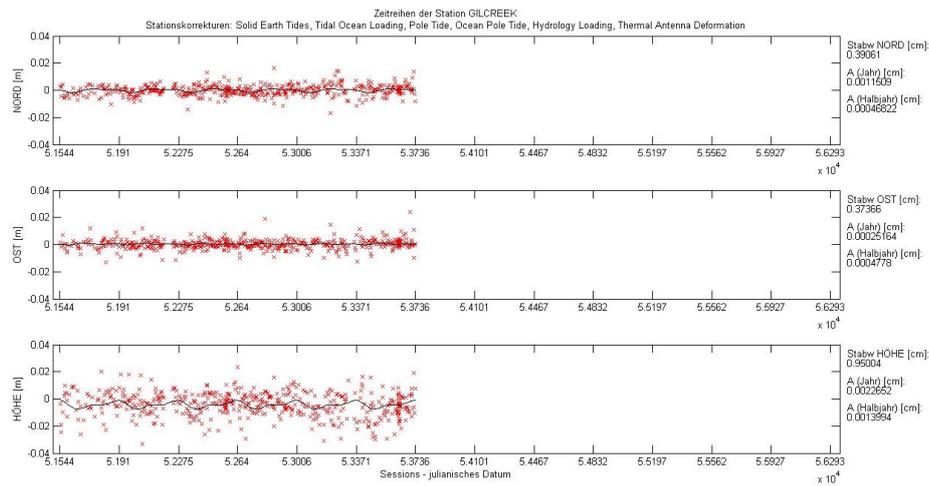


Abbildung 37: Die Zeitserien der Station GILCREEK mit ozeanischen und atmosphärischen Korrekturmodellen

zeigen die Standardabweichung und Amplitude der jährlichen Schwingung bei Anbringung der atmosphärischen Korrektur.

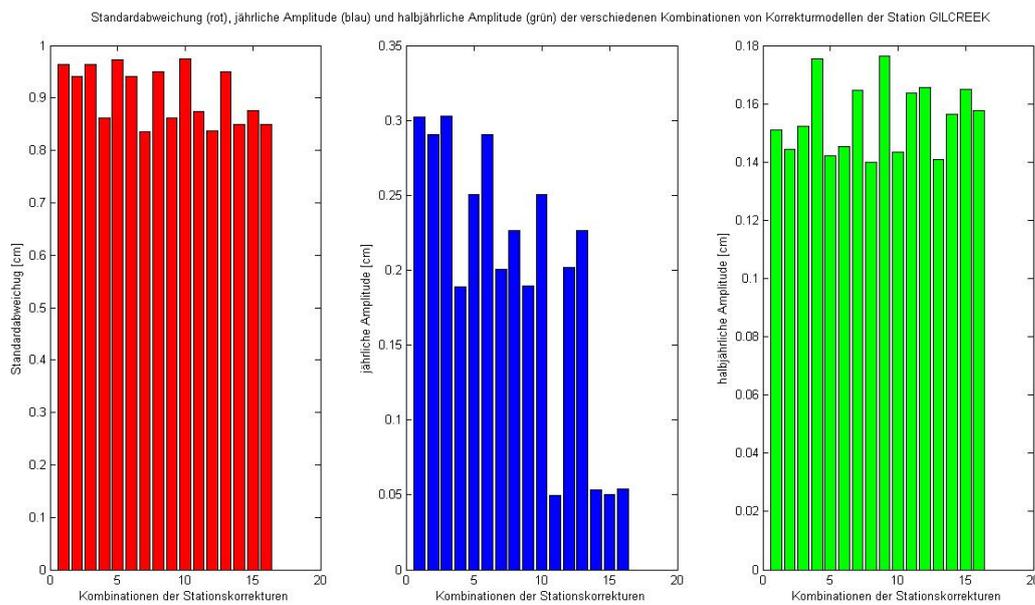


Abbildung 38: Die Plots zeigen alle möglichen Kombinationen der Korrekturmodelle von den Auflastmodellen (Balken 1 bis Balken 16) für die Station GILCREEK. Rot: Standardabweichung. Blau: jährliche Amplitude. Grün: halbjährliche Amplitude.

## 5.6 HARTRAO und HART15M

Die VLBI Station HARTRAO (Hartebeesthoek Radio Astronomy Observatory) ist die einzige Station des IVS in Afrika und beteiligt sich regelmässig an den IVS Beobachtungen. Im Jahr 2011 beteiligte sie sich an 63 24-stündigen Sessions. Ein zusätzliches großes Ereignis in diesem Jahr war der Start des Datentransfers über das Internet (e-VLBI). Die Station befindet sich 63 km nordwestlich von Johannesburg in der Provinz Gauteng in Südafrika (siehe Tabelle 8) (Nickola u. a. [2012]).

HARTRAO ist wieder eine Station, die nicht sehr weit von der Küste entfernt ist. Daher

Länge	27° 41' O
Breite	25° 53' S
Adresse	Gauteng, Südafrika

Tabelle 8: Die Lage und Adresse der Station HARTRAO

ergibt der Vergleich von Abbildung 39 (Zeitreihen der Koordinatenzuschläge ohne geophysikalischen Korrekturmodellen) mit der Abbildung 40 (Zeitreihen der Koordinatenzuschläge mit ozeanischem Korrekturmodell) eine große Verbesserung in der Standardabweichung von 0.054 cm. Eine zusätzliche Verbesserung (0.017 cm, siehe Abbildung 41) erhält man mit einer Kombination von ozeanischen und atmosphärischen Korrekturmodellen. Die Station befindet sich in einer hydrologisch stabilen Gegend, daher ist keine Verbesserung der Amplituden der jährlichen und halbjährlichen Schwingung bei Anbringung der hydrologischen Auflasteffekte zu sehen. Das zweite Teleskop HART15M liefert exakt die selben Koordinatenzeitreihen und Standardabweichungen.

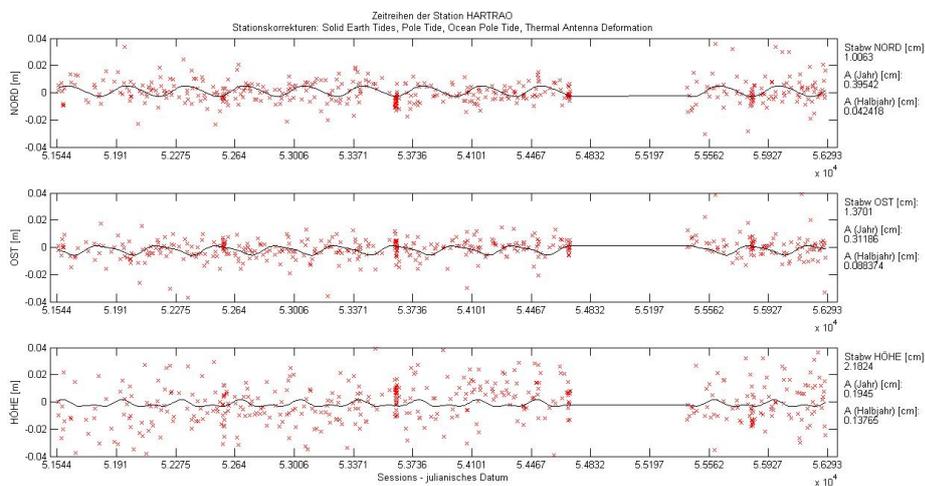


Abbildung 39: Die Zeitserien der Station HARTRAO ohne geophysikalischen Korrekturmodellen

In Abbildung 42 stehen die roten Balken für die Standardabweichung, die blauen Balken für die Amplitude der jährlichen Schwingung und die grünen Balken für die Amplitude der halbjährlichen Schwingung der Station HARTRAO / HART15M. In jedem der drei Plots sind 16 Balken zu sehen. Das sind alle möglichen Kombinationen der Korrekturmodelle von den Auflasteffekten. Die Kombinationen der Auflasteffekte sind am Beginn des Kapitels 5 aufgelistet. Im roten Plot der Abbildung 42 sieht man eine Verbesserung der Standardabweichung an den Balken 2, 6, 7, 8, 12, 13, 14 und 16. Diese Balken stehen für die Anbringung der ozeanischen Korrektur.

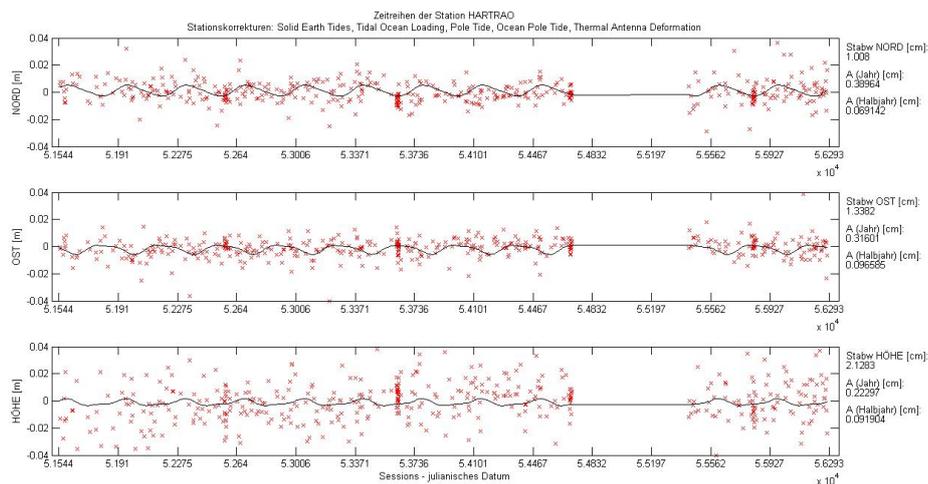


Abbildung 40: Die Zeitserien der Station HARTRAO mit ozeanischem Korrekturmodell

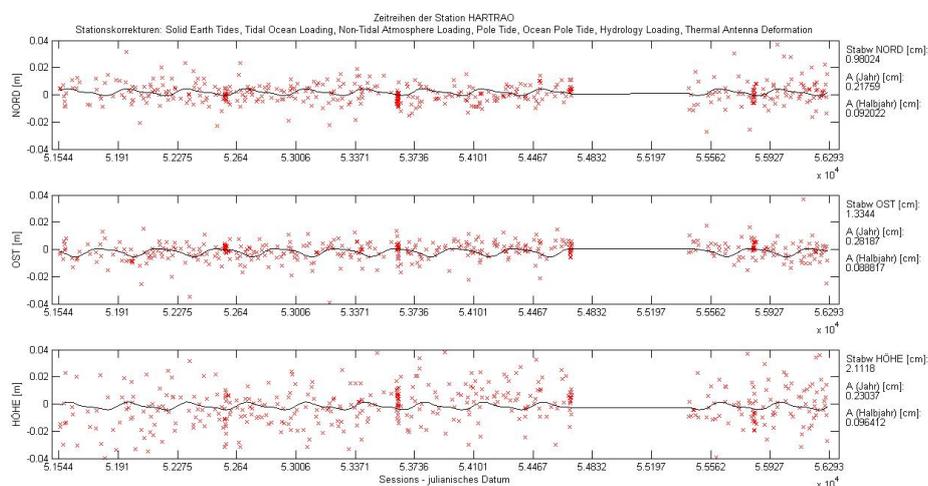


Abbildung 41: Die Zeitserien der Station HARTRAO mit ozeanischen und atmosphärischen Korrekturmodellen

## 5.7 HOBART12 und HOBART26

HOBART12 und HOBART26 sind zwei VLBI Antennen, die von der Universität Tasmanien, im Jahr 2009, errichtet wurden und von ihr betrieben werden. Beide Teleskope entsprechen dem IVS Standard der VLBI2010 und beteiligten sich im Jahr 2011 an 70 IVS Sessions. Aufgrund der relativ geringen Dichte an VLBI Stationen auf der südlichen Halbkugel liefern HOBART12 und HOBART26 wichtige Beiträge zur Verdichtung des CRF auf der südlichen Hemisphäre und dadurch werden Verbesserungen des TRF in dieser Region erreicht. Beide Stationen stehen auf der Insel Tasmanien, Australien (siehe Tabelle 9) (Lovell u. a. [2012]).

HOBART12 und HOBART26 zeigen keinerlei Verbesserungen in der Standardabweichung

Länge	147° 26' O
Breite	42° 48' S
Adresse	Tasmanien, Australien

Tabelle 9: Die Lage und Adresse der Stationen HOBART12 und HOBART26

oder der jährlichen und halbjährlichen Schwingung. Da beide Stationen direkt nebeneinander

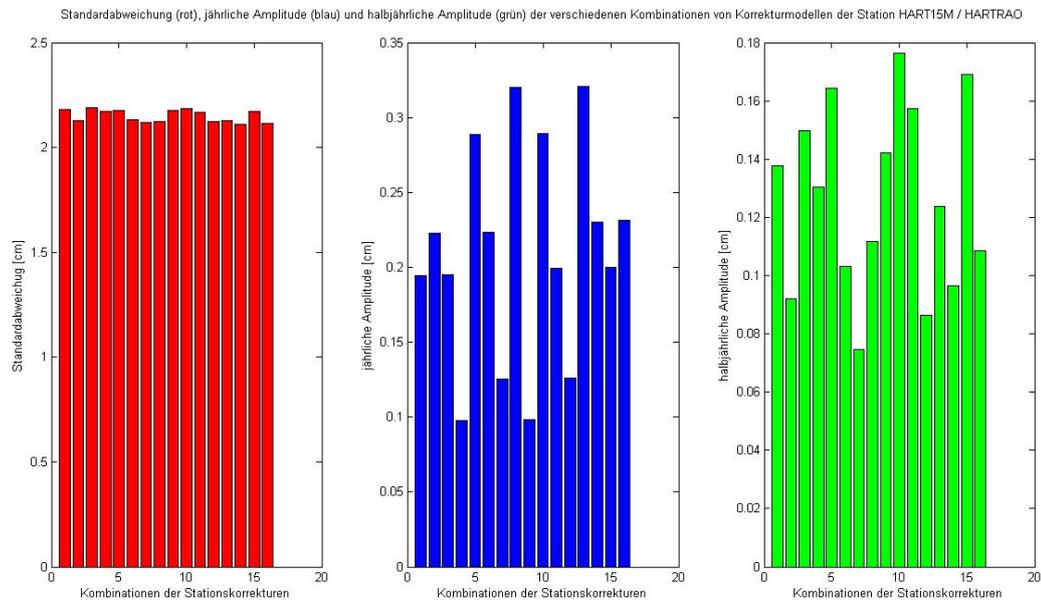


Abbildung 42: Die Plots zeigen alle möglichen Kombinationen der Korrekturmodelle von den Auflastmodellen (Balken 1 bis Balken 16) für die Station HARTRAO / HART15M. Rot: Standardabweichung. Blau: jährliche Amplitude. Grün: halbjährliche Amplitude.

stehen, sollten auch jeweils die gleichen Koordinatenzuschläge anzubringen sein. Vergleicht man die Zeitserien der beiden Teleskope, erkennt man, dass die Standardabweichung und die Amplituden der jährlichen und halbjährlichen Schwingungen identisch sind.

## 5.8 KOKEE PARK

Die VLBI Station KOKEE PARK (Kokee Park Geophysical Observatory) ist eine Station der NASA und beobachtet seit 1984. Seit 2002 beteiligt sich die Station jährlich an 104 24-stündigen Sessions des IVS. Ab dem Jahr 2008 sind die Ziele dieser Station eine real-time VLBI zu schaffen. KOKEE PARK befindet sich im Kokee State Park auf der Insel Kauai von Hawaii in der Nähe des Waimea Canyon (siehe Tabelle 10) (Curtis [2012]).

Da die Station KOKEE PARK auf HAWAII mitten im Meer liegt sind die größten Ein-

Länge	159° 39' W
Breite	22° 07' N
Adresse	Kokee State Park, Kauai, Hawaii

Tabelle 10: Die Lage und Adresse der Station KOKEE PARK

flüsse von geophysikalischen Auflasteffekten bei den ozeanischen Auflasteffekten zu finden. Der Vergleich von Abbildung 43 (Zeitserien der Koordinatenzuschläge ohne geophysikalischen Korrekturmodellen) mit Abbildung 44 (Zeitserien der Koordinatenzuschläge mit ozeanischem Korrekturmodell) zeigt eine deutliche Verbesserung der Standardabweichung von 2.132 cm auf 2.083 cm. Die größten atmosphärischen Umverteilungen findet man in den Breitengraden 40° bis 60° N. In diesen Breitengegend fällt die Station KOKEE PARK mit einer Breite von 22° 07' N nicht hinein. Zusätzlich liegt Hawaii in einer hydrologisch relativ stabilen Gegend. Aus diesen zwei Gründen ist es nicht verwunderlich, dass die Anbringung von atmosphärischen und hydrologischen Korrekturmodellen keine starken Verbesserungen auf die Koordinatenzeitreihen bringen (siehe Abbildung 45). Jedoch verbessert sich die Standardabweichung bei Anbringung sämtlicher geophysikalischen Korrekturmodellen auf 2.073 cm.

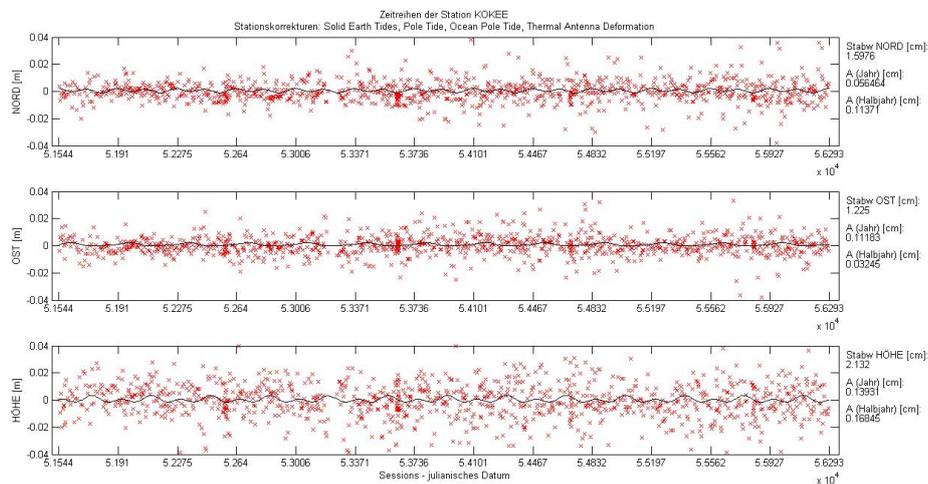


Abbildung 43: Die Zeitserien der Station KOKEE PARK ohne geophysikalischen Korrekturmodellen

In Abbildung 46 stehen die roten Balken für die Standardabweichung, die blauen Balken für die Amplitude der jährlichen Schwingung und die grünen Balken für die Amplitude der halbjährlichen Schwingung der Station KOKEE PARK. In jedem der drei Plots sind 16 Balken zu sehen. Das sind alle möglichen Kombinationen der Korrekturmodelle von den Auflasteffekten. Die Kombinationen der Auflasteffekte sind am Beginn des Kapitels 5 aufgelistet. Im grünen Plot der Abbildung 46 zeigt sich eine Verbesserung der Amplitude der halbjährlichen Schwingung an den Balken 2, 6, 7, 8, 12, 13, 14 und 16. Diese Balken stehen für die Anbringung der

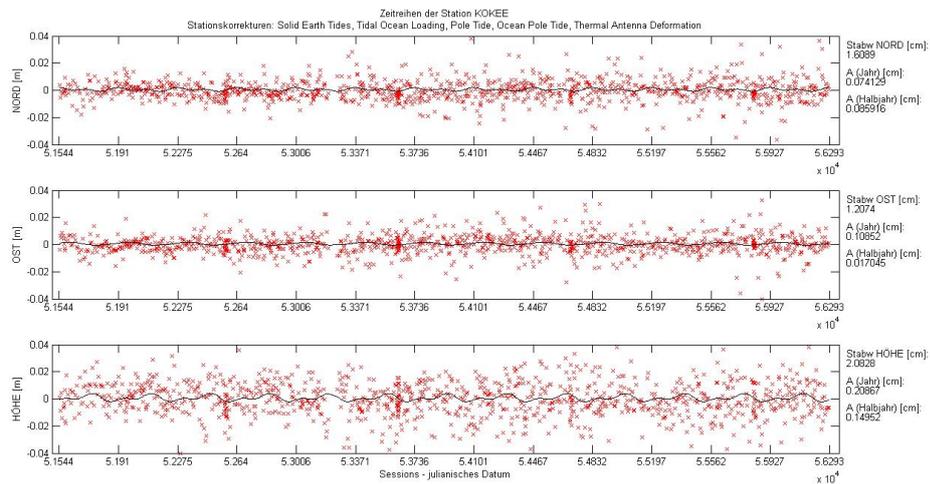


Abbildung 44: Die Zeitserien der Station KOKEE PARK mit ozeanischem Korrekturmodell

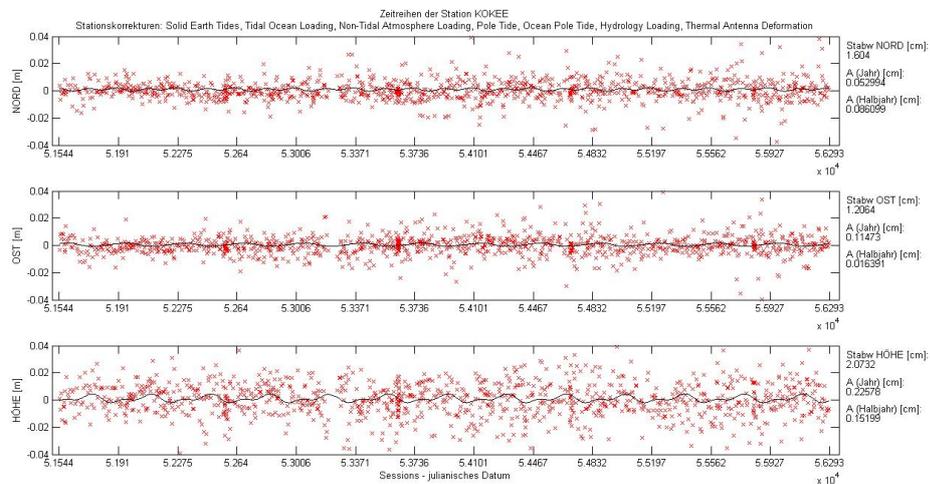


Abbildung 45: Die Zeitserien der Station KOKEE PARK mit ozeanischen, atmosphärischen und hydrologischen Korrekturmodellen

ozeanischen Korrektur. Im roten Plot erfahren die selben Balken eine Verbesserung. Das heißt, dass das ozeanische Korrekturmodell auch die Standardabweichung der Koordinatenzuschläge der Höhenzeitserie der Station KOKEE PARK verbessert.

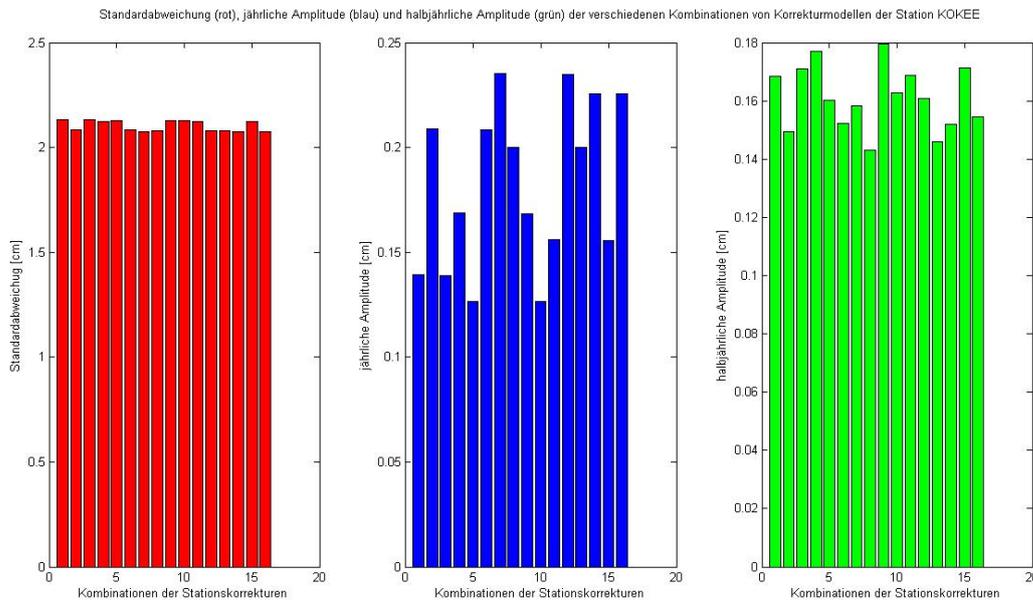


Abbildung 46: Die Plots zeigen alle möglichen Kombinationen der Korrekturmodelle von den Auflastmodellen (Balken 1 bis Balken 16) für die Station KOKEE PARK. Rot: Standardabweichung. Blau: jährliche Amplitude. Grün: halbjährliche Amplitude.

## 5.9 MATERA

Die VLBI Station MATERA wurde 1990 errichtet und seit dem von der italienischen Raumfahrtagentur betrieben. Im Jahr 2012 beteiligte sich die Station an 52 IVS Sessions. MATERA steht im Centro di Geodesia Spaziale G. Colombo in der Nähe von Matera, rund 180 km östlich von Neapel (siehe Tabelle 11) (Bianco u. a. [2013]).

MATERA befindet sich in einer geophysikalisch sehr stabilen Gegend. Die größte Verbesse-

Länge	16° 42' O
Breite	40° 38' N
Adresse	Matera, Italien

Tabelle 11: Die Lage und Adresse der Station MATERA

rung in der Standardabweichung der Koordinatenzuschläge in vertikaler Richtung erreicht man mit der Anbringung von ozeanischen, atmosphärischen und hydrologischen Korrekturmodellen. Es ergibt sich eine Differenz (mit minus ohne Korrekturmodell) von 0.055 cm (vergleiche Abbildung 47 und Abbildung 48 ).

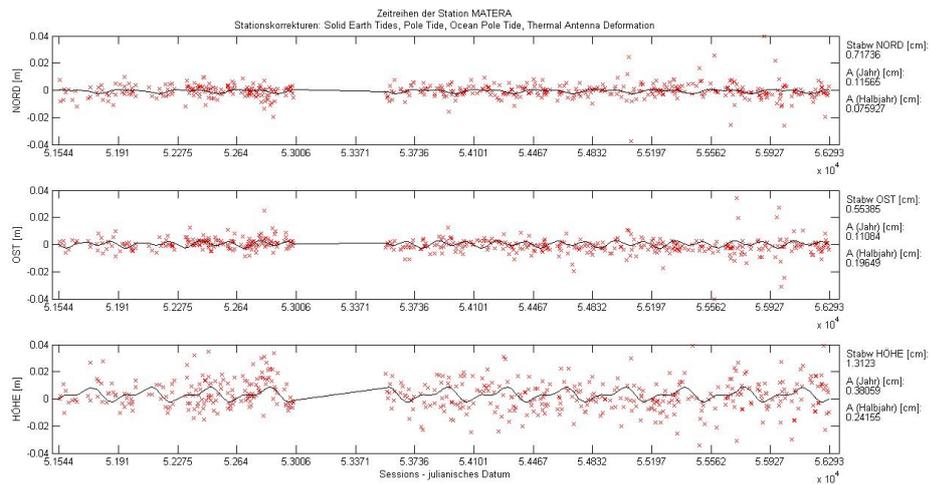


Abbildung 47: Die Zeitserien der Station MATERA ohne geophysikalischen Korrekturmodellen

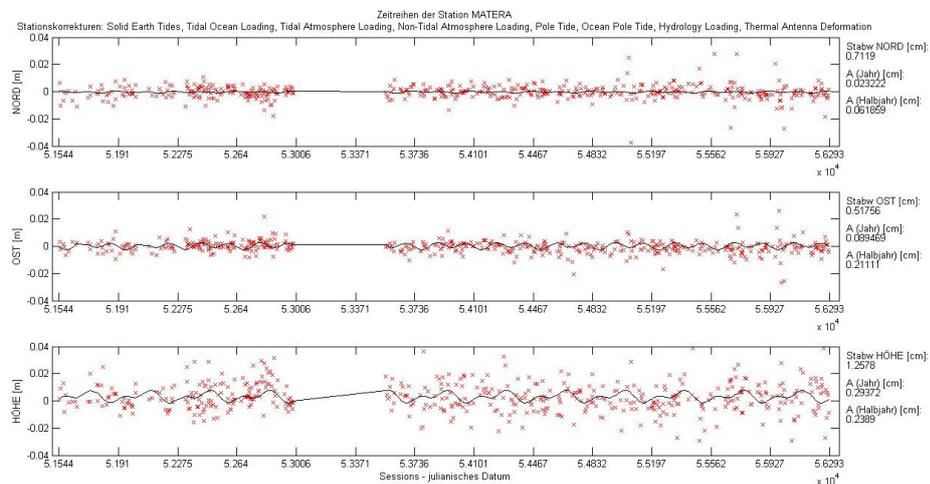


Abbildung 48: Die Zeitserien der Station MATERA mit ozeanischen, atmosphärischen und hydrologischen Korrekturmodellen

## 5.10 MEDICINA

Die VLBI Station MEDICINA (Medicina Radio Astronomy Station) wird vom italienischen Istituto di Radioastronomia betrieben. Seit 1985 beteiligt sie sich regelmäßig an IVS Beobachtungen. Im Jahr 2011 beteiligte sich MEDICINA an 23 24-stündigen IVS Sessions (IVS-T2, IVS-R4, EUROPE, R&D). Die Station befindet sich rund 30 km östlich von Bologna (siehe Tabelle 12) (Orfei u. a. [2012]).

MEDICINA hat eine geografische Breite von  $44^{\circ} 31' N$  und weil das der Breitengrad mit den größten atmosphärischen Auflasteffekten ist, findet man die größte Verbesserung der Standardabweichung (0,019 cm) bei Berücksichtigung der atmosphärischen Auflasteffekten. Der Unterschied zwischen den Zeitserien der Koordinatenzuschläge mit und ohne atmosphärischer Korrektur wird beim Vergleich der Abbildung 49 mit der Abbildung 50 deutlich. MEDICINA liegt in einer hydrologisch sehr stabilen Gegend, daher sind bei Anbringung der hydrologischen Korrektur keine Verbesserungen zu sehen. Da die Station, zusätzlich zur geografischen Breite, auch nur rund 60 km vom Meer entfernt liegt haben die ozeanischen Korrekturen einen Einfluss. Bei zusätzlicher Anbringung dieser Korrektur verbessert sich die Standardabweichung auf 1,343 cm (siehe Abbildung 51).

Länge	11° 38' O
Breite	44° 31' N
Adresse	Medicina, Bologna, Italien

Tabelle 12: Die Lage und Adresse der Station MEDICINA

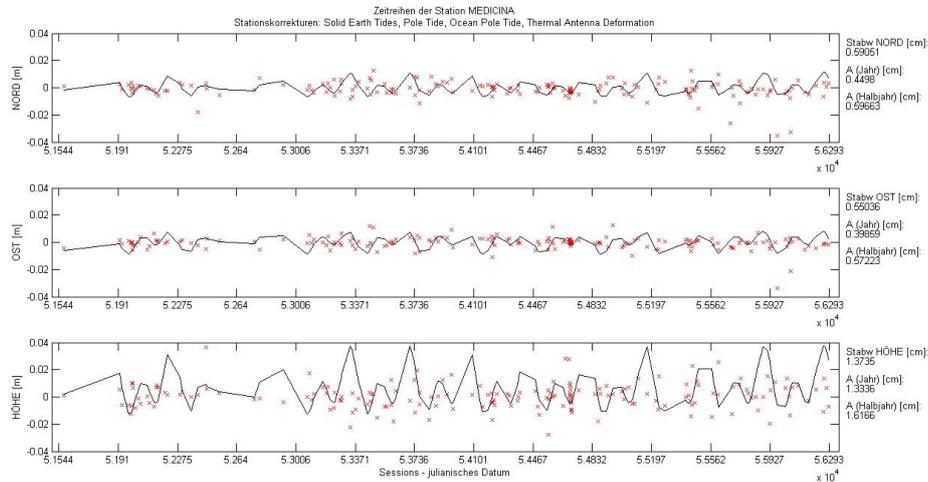


Abbildung 49: Die Zeitserien der Station MEDICINA ohne geophysikalischen Korrekturmodellen

In Abbildung 52 stehen die roten Balken für die Standardabweichung, die blauen Balken für die Amplitude der jährlichen Schwingung und die grünen Balken für die Amplitude der halbjährlichen Schwingung der Station MEDICINA. In jedem der drei Plots sind 16 Balken zu sehen. Das sind alle möglichen Kombinationen der Korrekturmodelle von den Auflasteffekten. Die Kombinationen der Auflasteffekte sind am Beginn des Kapitels 5 aufgelistet. In der Abbildung 52 zeigen sich im blauen und grünen Plot deutliche Verbesserungen bei den Balken 2, 6, 7, 8, 12, 13, 14 und 16. Das sind die Balken, die die Anbringung der ozeanischen Korrektur widerspiegeln. Somit wird klar, dass die Anbringung des ozeanischen Korrekturmodells große Auswirkungen auf die Amplitude der jährlichen und halbjährlichen Schwingung erreicht.

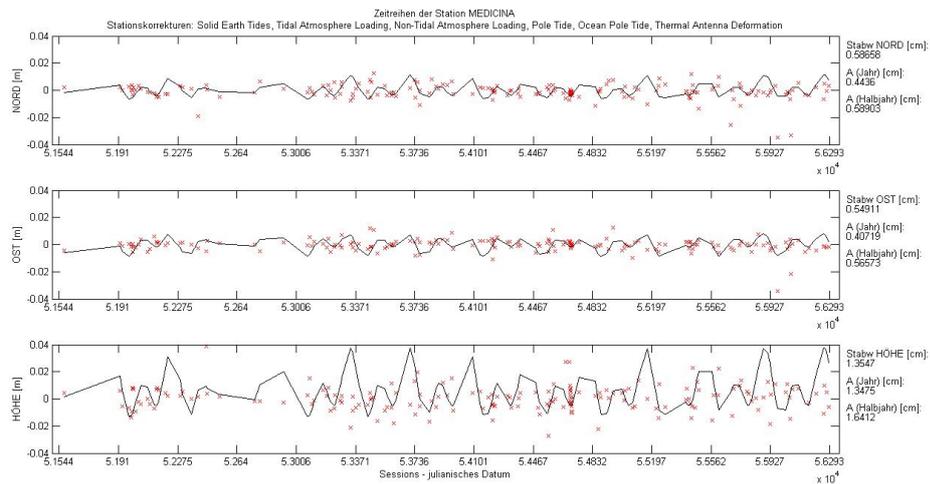


Abbildung 50: Die Zeitserien der Station MEDICINA mit ozeanischem Korrekturmodell

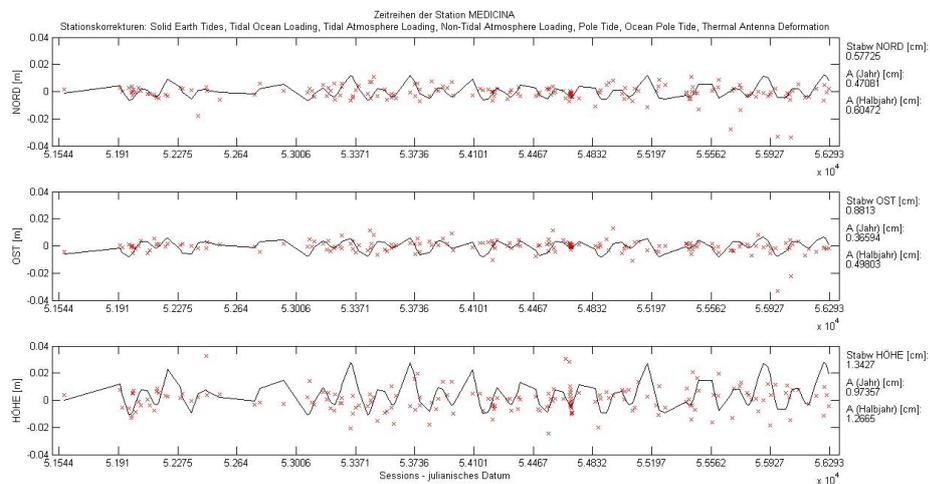


Abbildung 51: Die Zeitserien der Station MEDICINA mit ozeanischen und atmosphärischen Korrekturmodellen

## 5.11 NYALES20

NYALES20 (Ny-Ålesund 20-meter Antenna) beteiligte sich im Jahr 2011 an 115 24-stündigen IVS Sesssions (R1, R4, EURO, RD, T2, RDV) und an 41 einstündigen Sessions (CONT). Die Station befindet sich in Ny-Ålesund in der Kings Bay an der Westseite der Insel Svalbard von Spitzbergen (siehe Tabelle 13) (Nielson [2012]).

NYALES20 liegt sehr weit im Norden, daher sind hydrologische und atmosphärische Auf-

Länge	11° 59' O
Breite	78° 56' N
Adresse	Ny-Ålesund, Svalbard, Spitzbergen

Tabelle 13: Die Lage und Adresse der Station NYALES20

lasteffekte eher gering, trotzdem gibt es bei Anbringung dieser Korrekturen noch eine kleine Verbesserung in der Standardabweichung um 0.016 cm (siehe Abbildung 55). Da die Station direkt am Meer steht wird der größte geophysikalische Auflasteffekt durch die Gezeiten der

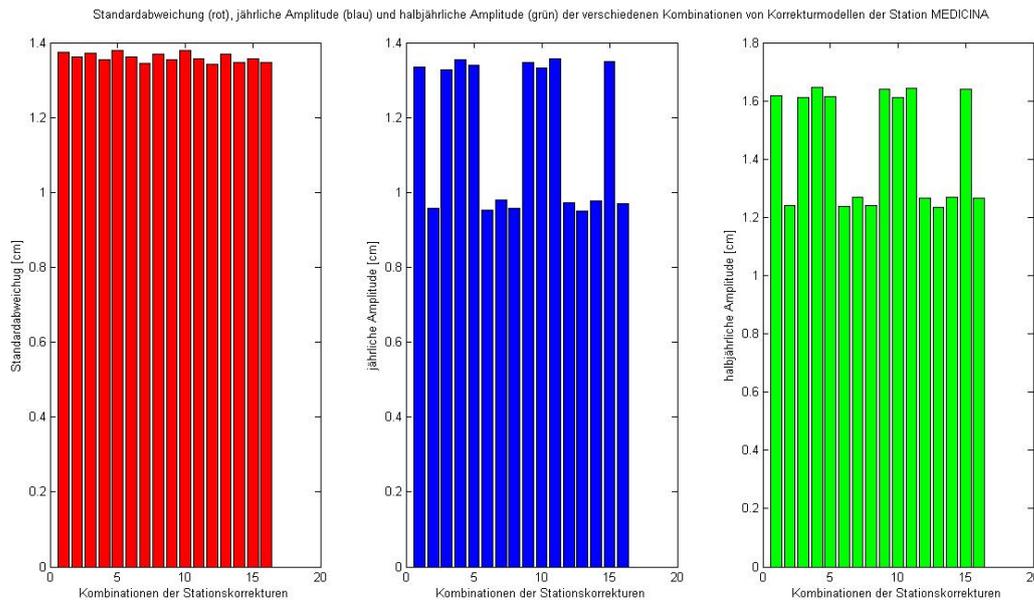


Abbildung 52: Die Plots zeigen alle möglichen Kombinationen der Korrekturmodelle von den Auflastmodellen (Balken 1 bis Balken 16) für die Station MEDICINA. Rot: Standardabweichung. Blau: jährliche Amplitude. Grün: halbjährliche Amplitude.

Ozeane hervorgerufen. Der Vergleich der Abbildung 53 (Zeitreihen der Koordinatenzuschläge ohne geophysikalischen Korrekturen) mit der Abbildung 54 (Zeitreihen der Koordinatenzuschläge mit ozeanischen Korrekturen) zeigt eine Verbesserung der Standardabweichung von 1.225 cm auf 1.204 cm.

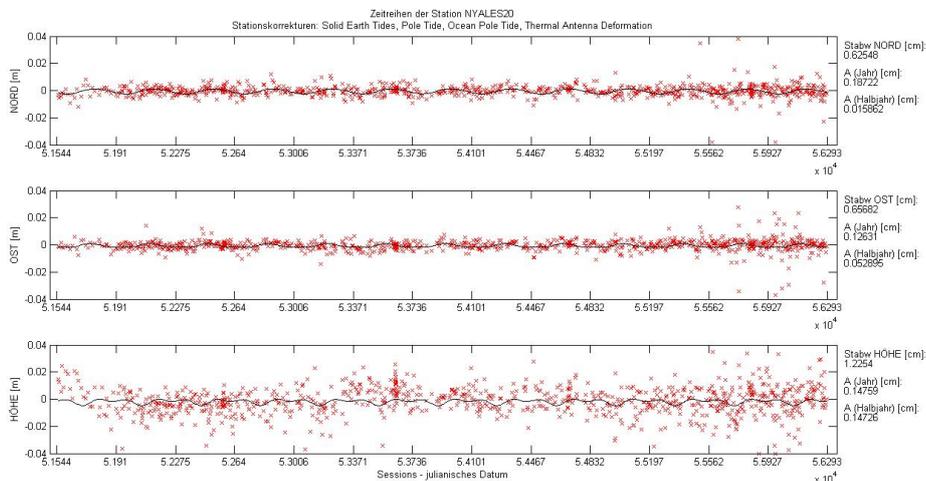


Abbildung 53: Die Zeitreihen der Station NYALES20 ohne geophysikalischen Korrekturmodellen

In Abbildung 56 stehen die roten Balken für die Standardabweichung, die blauen Balken für die Amplitude der jährlichen Schwingung und die grünen Balken für die Amplitude der halbjährlichen Schwingung der Station NYALES20. In jedem der drei Plots sind 16 Balken zu sehen. Das sind alle möglichen Kombinationen der Korrekturmodelle von den Auflasteffekten. Die Kombinationen der Auflasteffekte sind am Beginn des Kapitels 5 aufgelistet. Im grünen Plot der Abbildung 56 zeigt sich eine Verbesserung der Amplitude der halbjährlichen Schwingung an den Balken 2, 6, 7, 8, 12, 13, 14 und 16. Diese Balken stehen für die Anbringung der ozeanischen Korrektur. Im roten Plot erfahren die selben Balken eine Verbesserung. Das

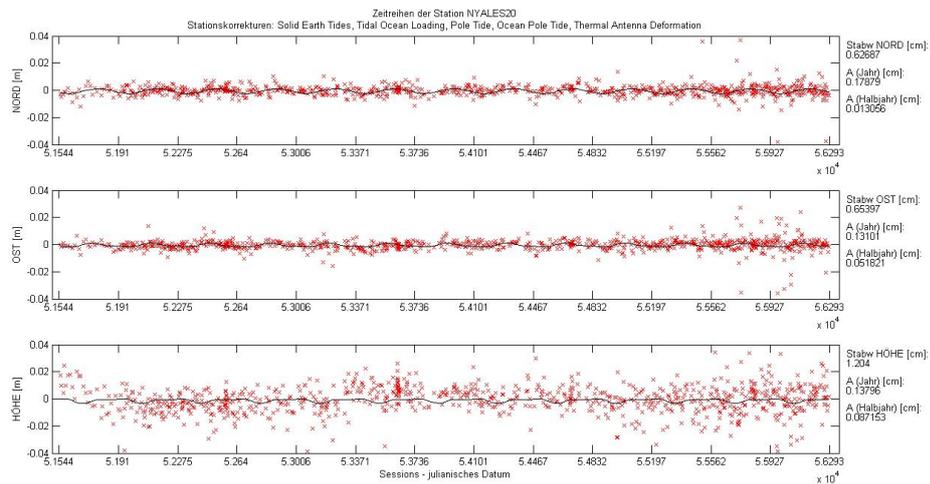


Abbildung 54: Die Zeitserien der Station NYALES20 mit ozeanischem Korrekturmodell

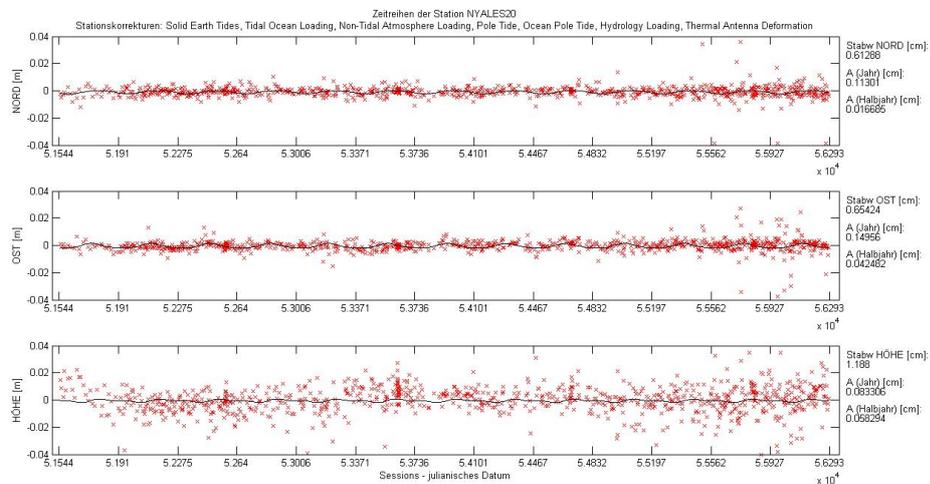


Abbildung 55: Die Zeitserien der Station NYALES20 mit ozeanischen, atmosphärischen und hydrologischen Korrekturmodellen

heißt, dass das ozeanische Korrekturmodell auch die Standardabweichung der Koordinaten-zuschläge der Höhenzeitserie der Station NYALES20 verbessert. Im blauen Plot sieht man Verbesserungen in den Balken 4, 7, 9, 11, 12, 14, 15 und 16. Diese Balken stehen für die Anbringung von atmosphärischen Korrekturmodellen. Das heißt, dass auch die atmosphärischen Korrekturen Verbesserungen in der Amplitude der jährlichen Schwingung bewirken.

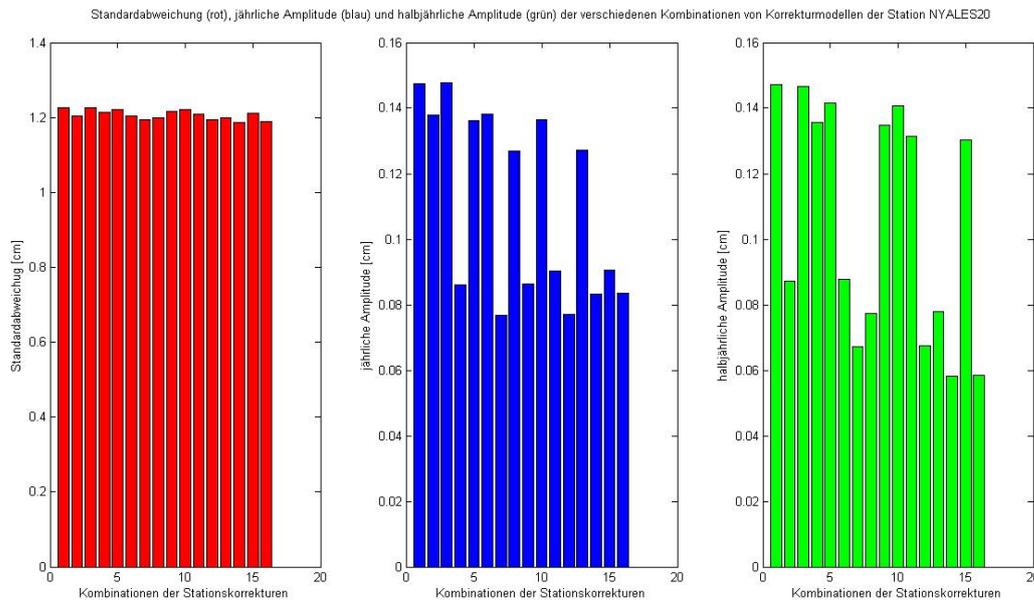


Abbildung 56: Die Plots zeigen alle möglichen Kombinationen der Korrekturmodelle von den Auflastmodellen (Balken 1 bis Balken 16) für die Station NYALES20. Rot: Standardabweichung. Blau: jährliche Amplitude. Grün: halbjährliche Amplitude.

## 5.12 ONSALA60

Die VLBI Station ONSALA60 (Onsala Space Observatory) ist eine geodätische Fundamentstation, die sich im Jahr 2011 an 38 IVS Sessions (EUROPE, R1, T2, RD und CONT11) beteiligte. Das Hauptaugenmerk liegt bei der Beobachtung der Weltzeit, gemeinsam mit der Station TSUKUB32. Die Organisation dieser Station erfolgt über die Chalmers University of Technology in Göteborg. ONSALA60 befindet sich 45 km südlich von Göteborg in Onsala (siehe Tabelle 14) (Haas u. a. [2012]).

ONSALA60 befindet sich zwar direkt am Meer, jedoch sind die Gezeitenwellen in diesem

Länge	11° 55' O
Breite	57° 23' N
Adresse	Onsala, Kungsbacka, Schweden

Tabelle 14: Die Lage und Adresse der Station ONSALA60

Bereich unter 10 cm (siehe Abbildung 9). Daher sind an dieser Station keine ozeanischen Auflasteffekte feststellbar. Auch die hydrologischen Einflüsse sind äußerst gering (siehe Abbildung 16). Die Anbringung der hydrologischen Korrektur bringt keine Verbesserung in der Amplitude der jährlichen und halbjährlichen Schwingung. Eine minimale Verbesserung der Standardabweichung in der Höhenkoordinate bringt die Anbringung der atmosphärischen Korrektur. Beim Vergleich der Abbildung 57 mit der Abbildung 58 zeigt sich eine Verbesserung von 0.009 cm. An dieser Station sind somit kaum geophysikalische Auflasteffekte feststellbar.

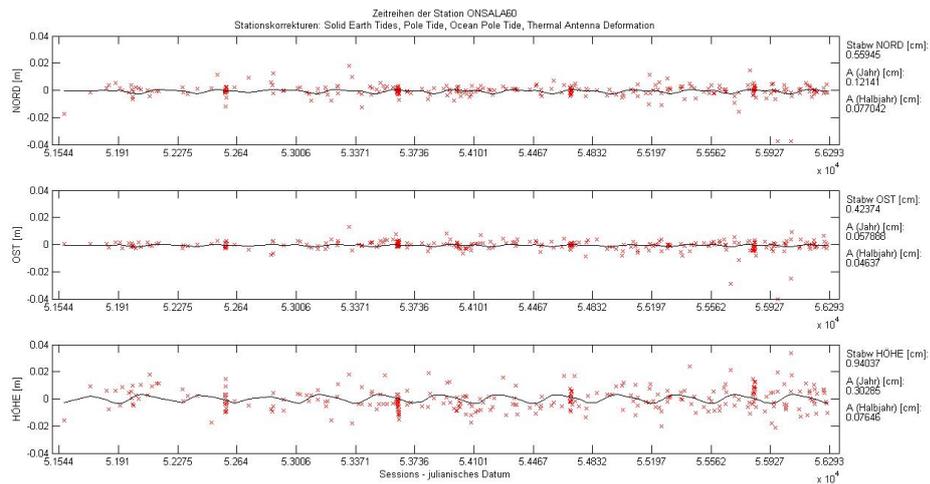


Abbildung 57: Die Zeitserien der Station ONSALA60 ohne geophysikalischen Korrekturmodellen

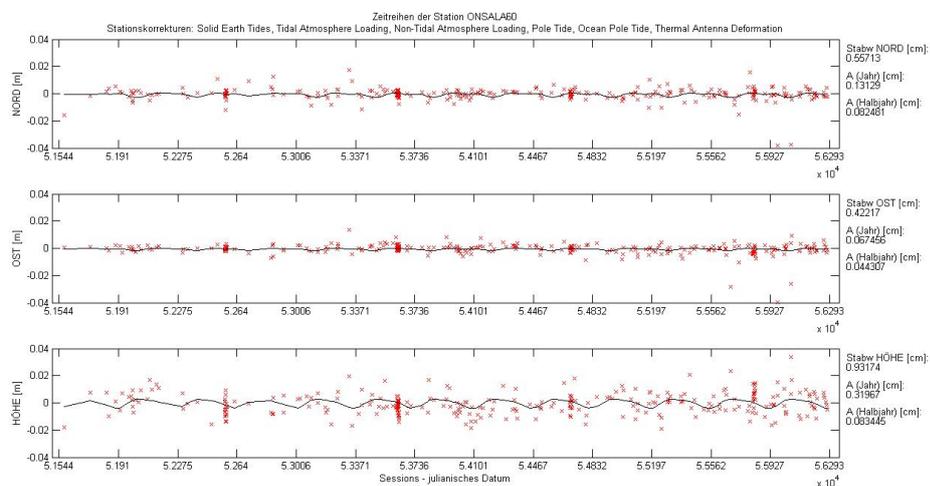


Abbildung 58: Die Zeitserien der Station ONSALA60 mit atmosphärischem Korrekturmodell

## 5.13 SVETLOE

SVETLOE (Svetloe Radio Astronomical Observatory) ist die erste von den drei VLBI Stationen des russischen VLBI Dienstes QUASAR. Diese Station beteiligt sich an IVS Beobachtungsprogrammen, sowie an inländischen VLBI Beobachtungsprogrammen. Im Jahr 2011 beteiligte sich SVETLOE an 27 24-stündigen IVS Sessions (IVS-R1, IVS-R4, IVS-T2, and EURO) und an 17 einstündigen IVS Sessions. Zusätzlich beteiligte sich die Station an 49 24-stündigen inländischen VLBI Sessions (Beobachtung der Erdorientierungsparameter), sowie an 5 einstündigen Sessions (Beobachtung der Weltzeit UT1). SVETLOE befindet in der Nähe der Stadt Svetloe, rund 70 km nördlich von St. Petersburg (siehe Tabelle 15) (Smolentsev u. Rahimov [2012]).

Svetloe liegt genau zwischen dem Golf von Finnland und dem großen See Ladoga. Zu beiden Gewässern sind es nicht einmal 50 km. Jedoch ist der Tidenhub sehr gering (siehe Abbildung 9) und daher auch der Einfluss der ozeanischen Korrekturmodelle. Beim Vergleich der Abbildung 59 und der Abbildung 60 lässt sich eine Verbesserung der Standardabweichung von 1.411 cm auf 1.351 cm, aufgrund der Anbringung der atmosphärischen Korrektur in Abbildung 60, feststellen. Die Station liegt in der Region mit den größten atmosphärischen Variationen ( $40^\circ$  bis  $60^\circ$  N). Ozeanische und atmosphärische Korrekturmodelle verbessern

Länge	29° 47' O
Breite	60° 32' N
Adresse	Leningrad region, Priozerski district, 188833 Russland

Tabelle 15: Die Lage und Adresse der Station SVETLOE

gemeinsam die Standardabweichung der Koordinatenzuschläge der Höhenzeitserien auf 1.326 cm (siehe Abbildung 61). Diese Region unterliegt auch hydrologischen Einflüssen. Die hydrologische Korrektur bringt eine Verbesserung der Amplitude der jährlichen Schwingung von 0.170 cm, allerdings mit einer Standardabweichung von 0.15 cm.

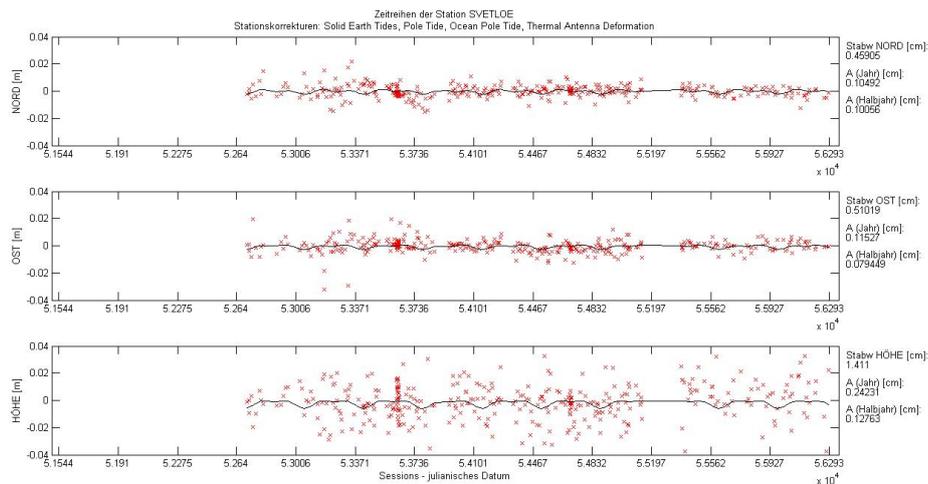


Abbildung 59: Die Zeitserien der Station SVETLOE ohne geophysikalischen Korrekturmodellen

In Abbildung 62 stehen die roten Balken für die Standardabweichung, die blauen Balken für die Amplitude der jährlichen Schwingung und die grünen Balken für die Amplitude der halbjährlichen Schwingung der Station SVETLOE. In jedem der drei Plots sind 16 Balken zu sehen. Das sind alle möglichen Kombinationen der Korrekturmodelle von den Auflasteffekten. Die Kombinationen der Auflasteffekte sind am Beginn des Kapitels 5 aufgelistet. Im roten Plot der Abbildung 62 sieht man eine Verbesserung der Standardabweichung bei den Balken 4, 7, 9, 11, 12, 14, 15 und 16. Das sind die Balken an denen die Korrektur von atmosphärischen Auflasteffekten angebracht worden sind. Im blauen Plot ist ebenfalls eine Verbesserung zu sehen, jedoch in den Balken 5, 8, 10, 11, 13, 14, 15 und 16. Diese spiegeln die Anbringung des hydrologischen Korrekturmodells.

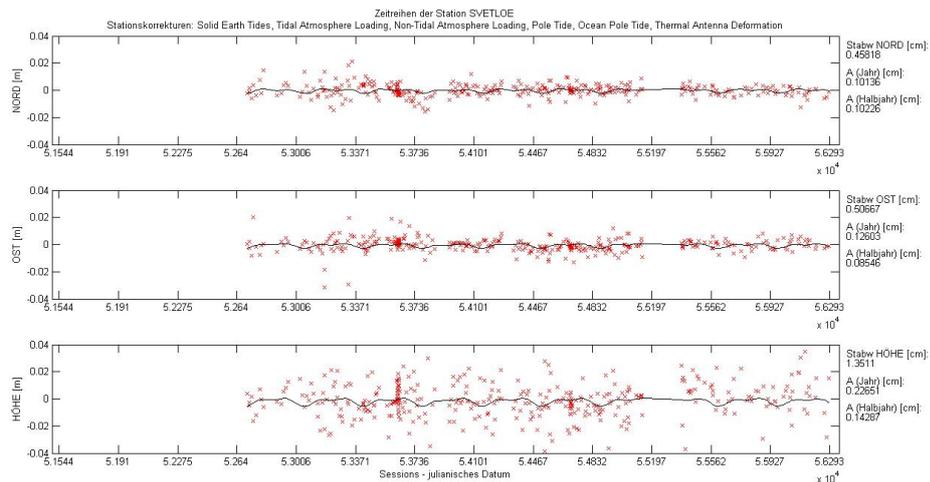


Abbildung 60: Die Zeitserien der Station SVETLOE mit atmosphärischem Korrekturmodell

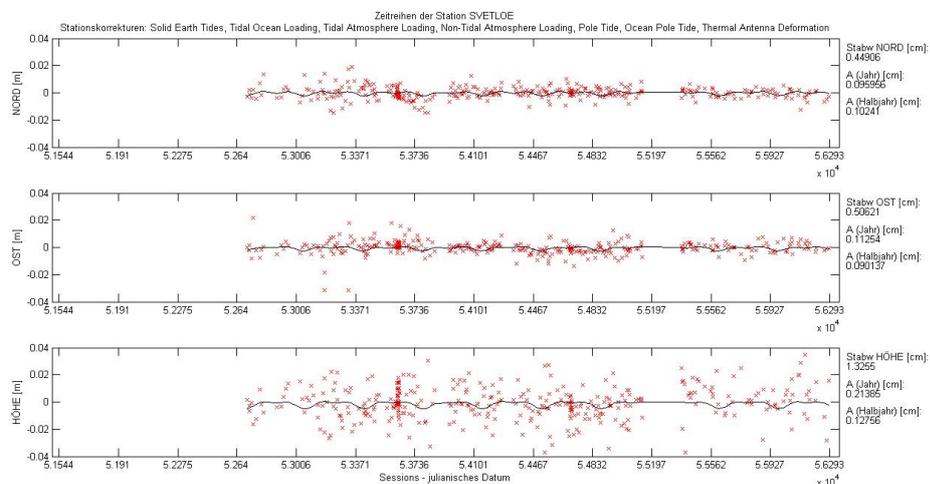


Abbildung 61: Die Zeitserien der Station SVETLOE mit ozeanischen und atmosphärischen Korrekturmodellen

## 5.14 TIGOCONC

Die VLBI Station TIGOCONC ist ein transportables, integriertes, geodätisches Observatorium (TIGO), dass vom deutschen Bundesamt für Kartographie und Geodäsie finanziert und entwickelt wurde. Seit Mai 2002 werden Beobachtungen des IVS durchgeführt und im Jahr 2013 war TIGOCONC an 117 IVS Sessions beteiligt. Die Station steht am Gelände der Universidad de Concepción, in Concepción, Chile (siehe Tabelle 16) (Hase u. a. [2013]).

Abbildung 63 zeigt die Zeitserien der Koordinatenzuschläge der Station TIGOCONC oh-

Länge	73° 01' W
Breite	36° 50' S
Adresse	Concepción, Chile

Tabelle 16: Die Lage und Adresse der Station TIGOCONC

ne Anbringung von geophysikalischen Korrekturen. TIGOCONC ist generell eine nicht sehr genaue VLBI Station. In den Abbildungen 63 und 64 sieht man die sehr verrauschten Koordinatenzuschläge dieser Station. TIGOCONC steht in einer hydrologisch stabilen Gegend

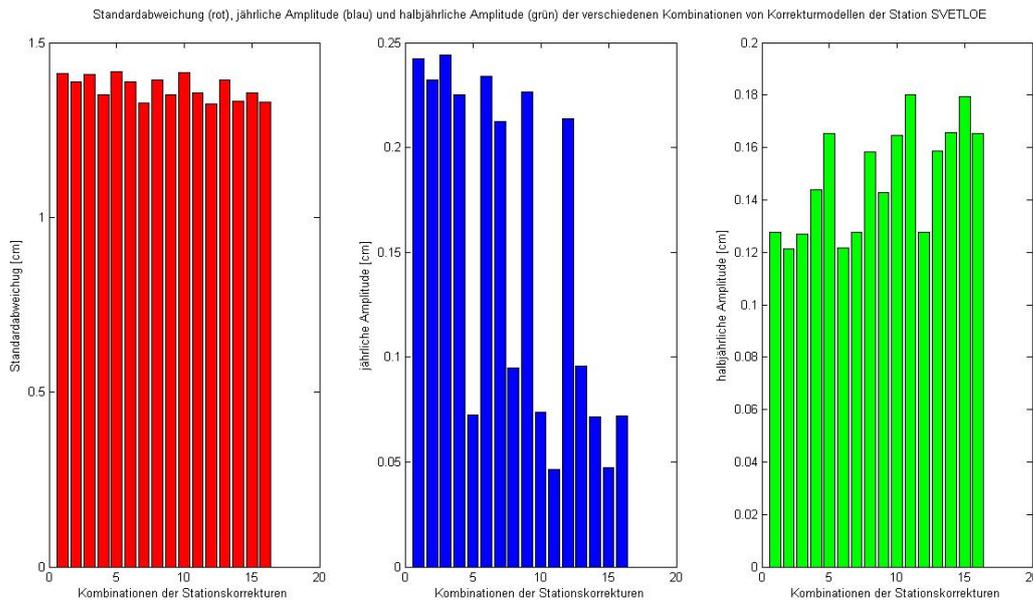


Abbildung 62: Die Plots zeigen alle möglichen Kombinationen der Korrekturmodelle von den Auflastmodellen (Balken 1 bis Balken 16) für die Station SVETLOE. Rot: Standardabweichung. Blau: jährliche Amplitude. Grün: halbjährliche Amplitude.

(siehe Abbildung 16), die atmosphärischen Einflüsse sind auf der Südhalbkugel um vieles geringer als auf der Nordhalbkugel (siehe Abbildung 10) und die Gezeitenwelle in dieser Gegend ist ebenfalls sehr gering (siehe Abbildung 9). Daher zeigt der Vergleich von Abbildung 63 (Zeitreihen der Koordinatenzuschläge ohne geophysikalischen Korrekturen) mit Abbildung 64 (Zeitreihen der Koordinatenzuschläge mit atmosphärischen und hydrologischen Korrekturen) eine Verbesserung der Standardabweichung von 0.022 cm. Die Standardabweichung der Amplituden der jährlichen Schwingung beträgt 0.41 cm und ist daher um vieles größer als die Verbesserung der jährlichen Amplitude (0.110 cm).

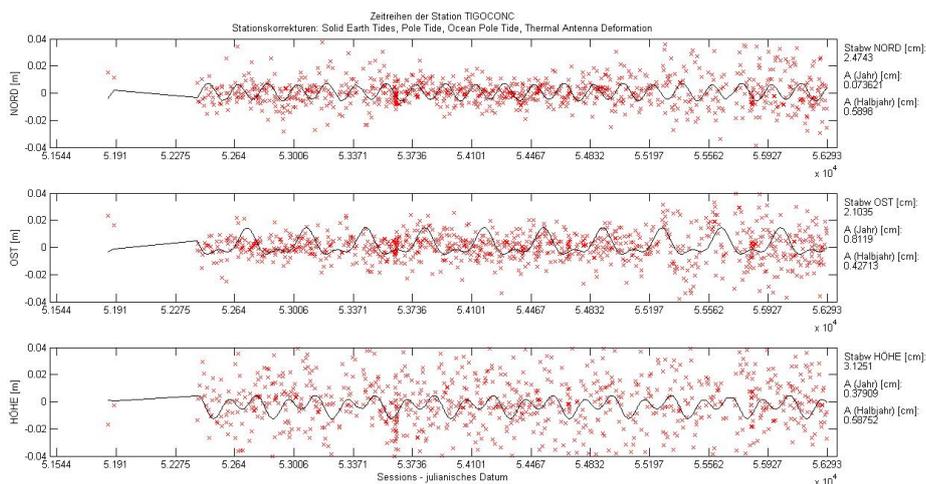


Abbildung 63: Die Zeitreihen der Station TIGOCONC ohne geophysikalischen Korrekturmodellen

In Abbildung 65 stehen die roten Balken für die Standardabweichung, die blauen Balken für die Amplitude der jährlichen Schwingung und die grünen Balken für die Amplitude der halbjährlichen Schwingung der Station TIGOCONC. In jedem der drei Plots sind 16 Balken zu sehen. Das sind alle möglichen Kombinationen der Korrekturmodelle von den Auflasteffekten.

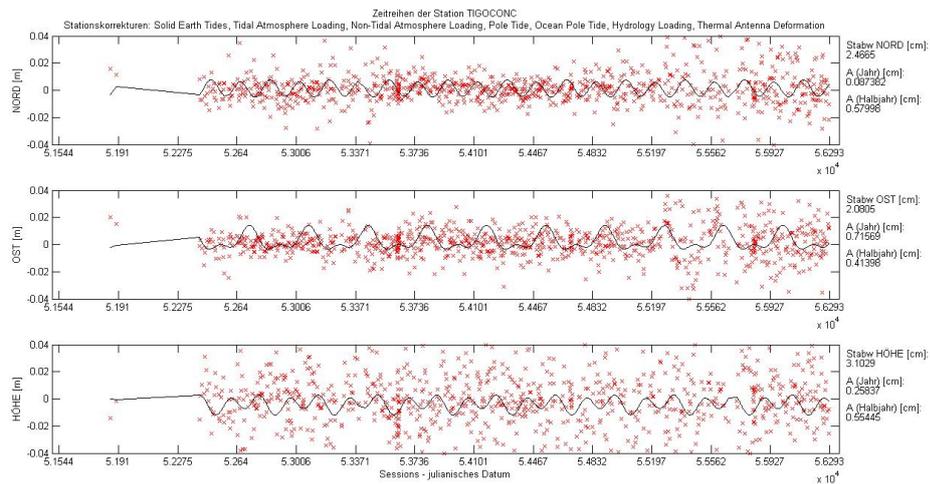


Abbildung 64: Die Zeitserien der Station TIGOCONC mit atmosphärischen und hydrologischen Korrekturmodellen

Die Kombinationen der Auflasteffekte sind am Beginn des Kapitels 5 aufgelistet. Im grünen Plot (Amplitude der halbjährlichen Schwingung) der Abbildung 65 zeigen die Balken 2, 6, 7, 8, 12, 13, 14 und 16 klare Verbesserungen. Diese Balken stehen für die Anbringung vom ozeanischen Korrekturmodell. Im blauen Plot der Abbildung 65 bringt die Anbringung der hydrologischen Korrektur eine scheinbare Verbesserung (zu sehen an den Balken 5, 8, 10, 11, 13, 14, 15 und 16), jedoch beträgt die Standardabweichung 0.41 cm.

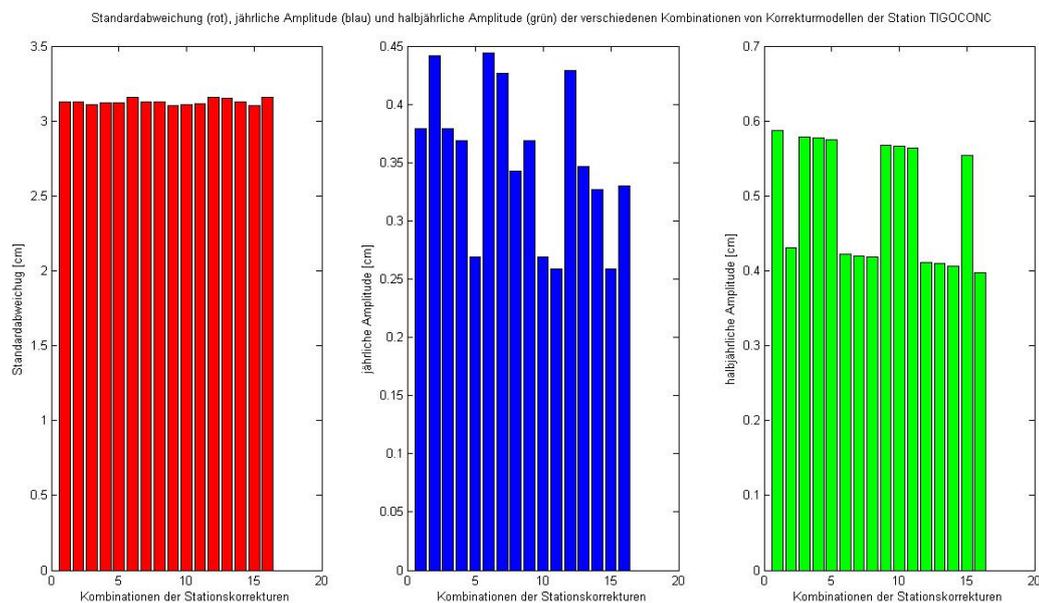


Abbildung 65: Die Plots zeigen alle möglichen Kombinationen der Korrekturmodelle von den Auflastmodellen (Balken 1 bis Balken 16) für die Station TIGOCONC. Rot: Standardabweichung. Blau: jährliche Amplitude. Grün: halbjährliche Amplitude.

## 5.15 TSUKUB32

TSUKUB32 (Tsukuba 32-m VLBI Station) ist eine von vier VLBI Stationen des geodätischen Netzwerkes in Japan (Geospatial Information Authority of Japan, GSI). Diese Station gehört zu den wichtigsten Stationen des IVS, mit 88 24-stündigen Sessions und 116 einstündigen Sessions im Jahr 2011. Im März 2011 wurde Japan durch ein sehr schweres Erdbeben an der pazifischen Küste erschüttert. Dank der guten Bauweise der Station, erlitt sie kaum Schäden und konnte drei Wochen später wieder in Betrieb genommen werden. TSUKUB32 befindet sich in Tsukuba rund 60 km nordöstlich von Tokio, Japan (siehe Tabelle 17) (Kawabata u. a. [2012]).

TSUKUB32 liegt rund 40 km vom Meer entfernt aber die Gezeitenwelle in Japan ist nicht

Länge	140° 06' O
Breite	36° 13' N
Adresse	Tsukuba, Honshū, Japan

Tabelle 17: Die Lage und Adresse der Station TSUKUB32

sehr hoch, daher ist kein Einfluss der ozeanischen Korrektur zu finden. Beim Vergleich der Abbildung 66 (Zeitreihen der Koordinatenzuschläge ohne geophysikalischen Korrekturmodellen) und Abbildung 67 (Zeitreihen der Koordinatenzuschläge mit atmosphärischen und hydrologischen Korrekturmodellen) fällt eine Verbesserung der Standardabweichung von 1.150 cm auf 1.129 cm auf. Die Station liegt in einer atmosphärisch und hydrologisch eher stabilen Gegend, trotzdem ist eine geringe Verbesserung der Standardabweichung der Koordinatenzuschläge der Höhenzeitreihen (0.021 cm) zu beobachten.

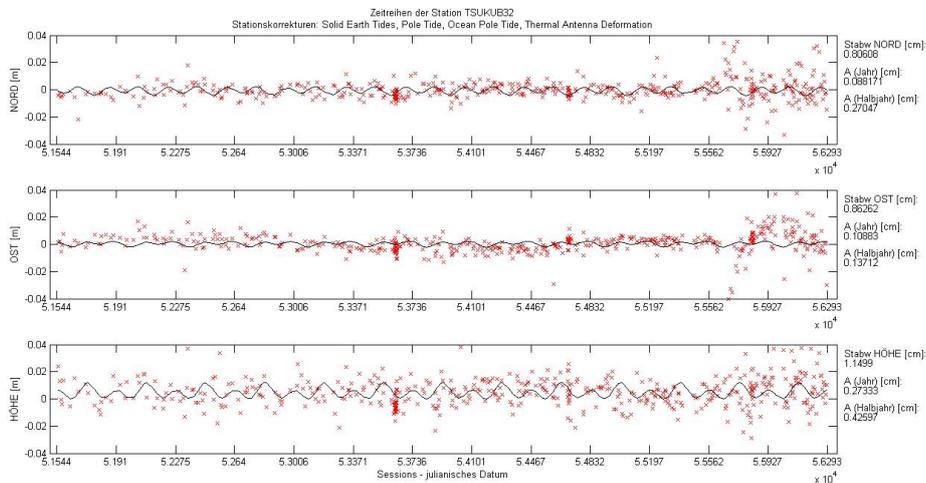


Abbildung 66: Die Zeitreihen der Station TSUKUB32 ohne geophysikalischen Korrekturmodellen

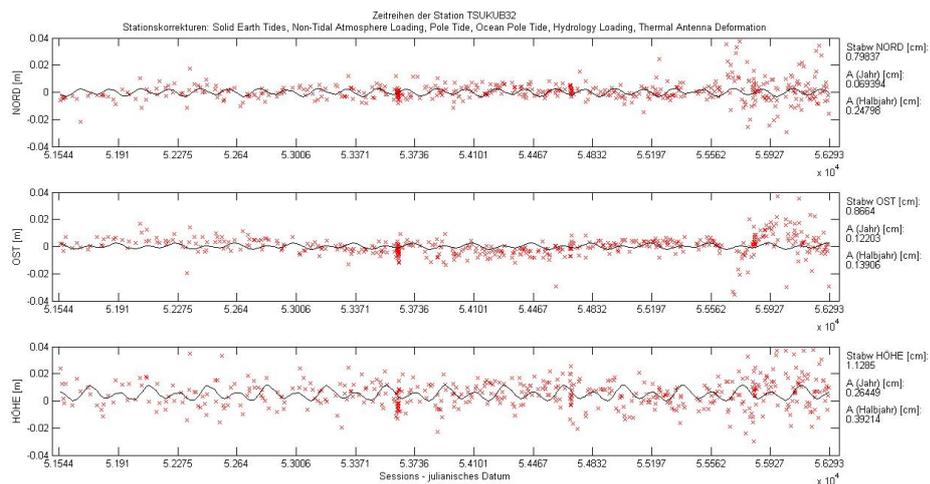


Abbildung 67: Die Zeitserien der Station TSUKUB32 mit atmosphärischen und hydrologischen Korrekturmodellen

## 5.16 WESTFORD

WESTFORD (Westford Antenna at Haystack Observatory) ist seit 1981 eine der wichtigsten geodätischen VLBI Stationen weltweit. Das Teleskop ist Teil des Haystack Observatoriums des Massachusetts Institute of Technology (MIT). Die Finanzierung der Station läuft über die weltraumgeodätischen Programme der NASA. Im Jahr 2011 beteiligte sich die Station an 46 24-stündigen IVS Sessions (IVS-R1, IVS-R&D, RD-VLBA). WESTFORD befindet sich rund 70 km nordwestlich von Boston, Massachusetts in der USA (siehe Tabelle 18) (Poirier [2012]). Aufgrund der relativ geringen Entfernung zwischen WESTFORD und dem Meer (rund 70

Länge	71° 29' W
Breite	42° 37' N
Adresse	Westford, MA 01886-1299 U.S.A.

Tabelle 18: Die Lage und Adresse der Station WESTFORD

km) ist der ozeanische Auflasteffekt auf jeden Fall zu berücksichtigen. Beim Vergleich von Abbildung 68 (Zeitserien ohne Korrekturmodell) und Abbildung 69 (Zeitserien mit ozeanischem Korrekturmodell) zeigt sich eine Verbesserung der Standardabweichung um 0.057 cm. Aufgrund des mittleren Breitengrades der Station ergibt die Anbringung der atmosphärischen Korrektur eine zusätzliche Verbesserung in der Standardabweichung. In Summe erreicht man eine Verbesserung der Standardabweichung auf 0.863 cm (siehe Abbildung 70). Da die Ostküste der USA keine hydrologischen Variationen aufweist bringt die Anbringung der hydrologischen Korrektur keine Glättung der jährlichen und halbjährlichen Schwingungen (siehe Abbildung 70).

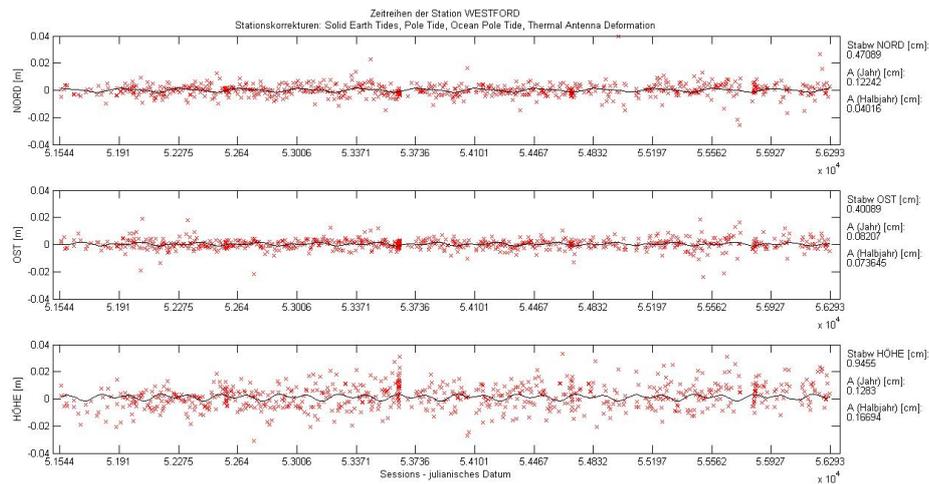


Abbildung 68: Die Zeitserien der Station WESTFORD ohne geophysikalischen Korrekturmodellen

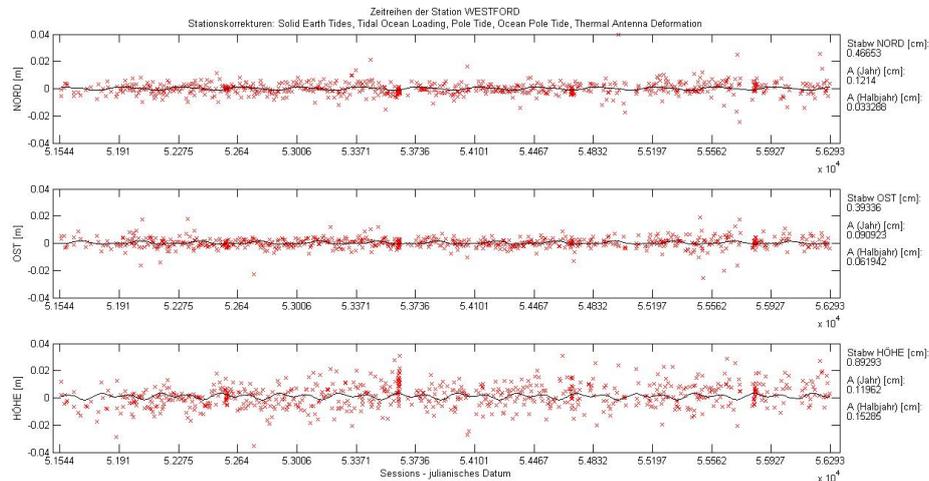


Abbildung 69: Die Zeitserien der Station WESTFORD mit ozeanischem Korrekturmodell

## 5.17 WETTZELL

Die VLBI Station WETTZELL (Geodetic Observatory Wettzell) wird betrieben vom deutschen Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, sowie der Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie von der Technischen Universität München. Es ist die erste Station bei der, nach den Richtlinien von VLBI2010, ein Zwillingsteleskop errichtet worden ist. WETTZELL zählt, mit jährlich 139 24-stündigen Sessions und 422 einstündigen Sessions (Stand 2011), zu den aktivsten Teleskopen des IVS weltweit. Mit einem auf dem Internet basierenden Datentransfer gehört WETTZELL zusätzlich zu den modernsten Stationen. Die Station liegt inmitten des Bayerischen Waldes bei Wettzell (rund 60 km östlich von Regensburg) in Deutschland (siehe Tabelle 19) (Neidhardt u. a. [2012]).

Abbildung 71 zeigt die Zeitserien der Koordinatenzuschläge der VLBI Station WETTZELL ohne angebrachten geophysikalischen Auflasteffekten. WETTZELL steht in mittlerer Breite in Mitteleuropa. Dies ist genau der Breitengrad in denen atmosphärische Variationen am größten sind. Beim Vergleich von Abbildung 71 mit Abbildung 72 (Zeitserien der Koordinatenzuschläge mit atmosphärischem Korrekturmodell) ist dieser Effekt deutlich zu erkennen. Hier fällt eine Verbesserung der Standardabweichung von 1.111 cm auf 1.020 cm auf. Mitteleuropa ist außerdem eine Gegend in der hydrologische Variationen nicht unbemerkt bleiben. Bei

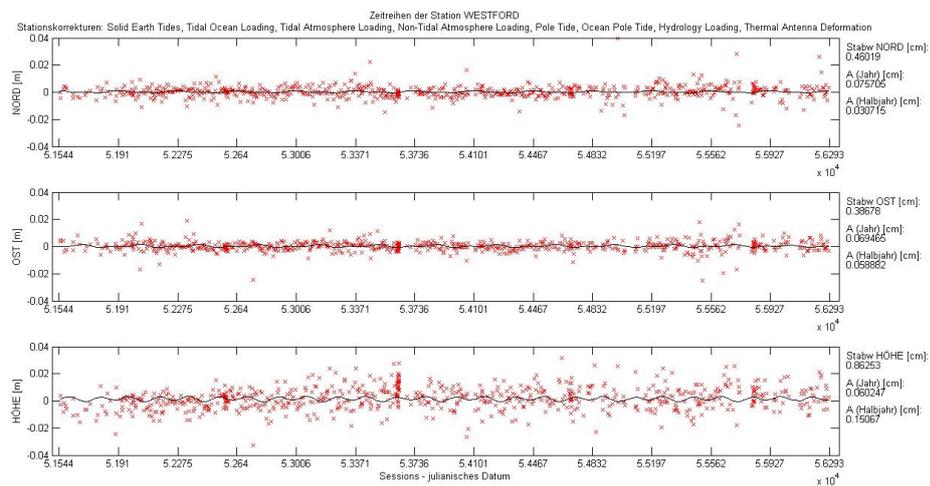


Abbildung 70: Die Zeitserien der Station WESTFORD mit ozeanischen, atmosphärischen und hydrologischen Korrekturmodellen

Länge	12° 52' O
Breite	49° 08' N
Adresse	Wettzell, Bayerischer Wald, Deutschland

Tabelle 19: Die Lage und Adresse der Station WETTZELL

Anbringung einer hydrologischen Korrektur in Abbildung 73 wird eine deutliche Glättung der jährlichen und halbjährlichen Schwingung sichtbar. Die Amplitude der jährlichen Schwingung verringert sich um 0.135 cm mit einer Standardabweichung von 0.06 cm. Zusätzlich verbessert sich die Standardabweichung bei Anbringung sämtlicher geophysikalischen Auflasteffekten auf 0.991 cm (siehe Abbildung 73).

In Abbildung 74 stehen die roten Balken für die Standardabweichung, die blauen Balken für die Amplitude der jährlichen Schwingung und die grünen Balken für die Amplitude der halbjährlichen Schwingung der Station WETTZELL. In jedem der drei Plots sind 16 Balken zu sehen. Das sind alle möglichen Kombinationen der Korrekturmodelle von den Auflasteffekten. Die Kombinationen der Auflasteffekte sind am Beginn des Kapitels 5 aufgelistet. Im grünen Plot der Abbildung 74 zeigt sich eine Verbesserung der Amplitude der halbjährlichen Schwingung an den Balken 5, 8, 10, 11, 13, 14, 15 und 16. Diese Balken stehen für die Anbringung der ozeanischen Korrektur. Im blauen Plot erfahren die Balken 2, 6, 7, 8, 12, 13, 14 und 16 eine Verbesserung. Das heißt, dass das hydrologische Korrekturmodell die Amplitude der jährlichen Schwingung der Station WETTZELL verbessert. Zusätzlich ist im roten Plot eine Verbesserung der Balken 4, 7, 9, 11, 12, 14, 15 und 16 zusehen. Diese Verbesserung der Standardabweichung wird mit der Anbringung der atmosphärischen Korrektur erreicht.

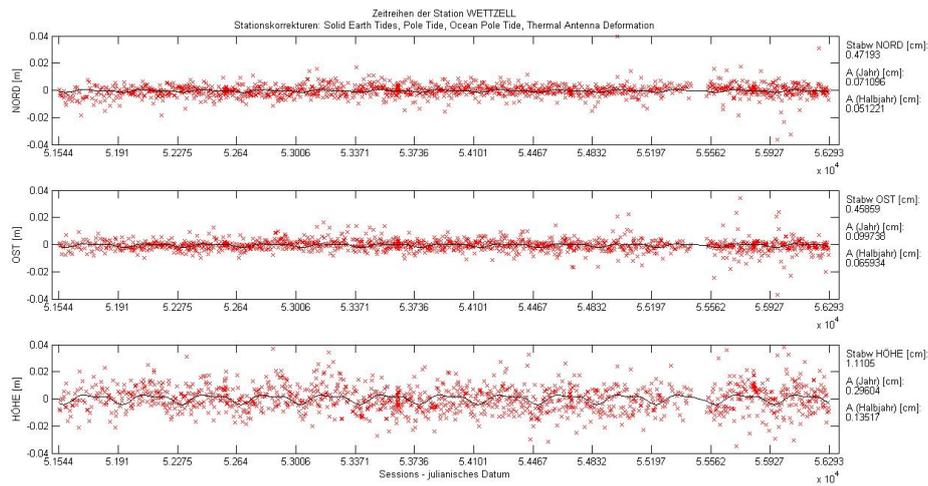


Abbildung 71: Die Zeitserien der Station WETTZELL ohne geophysikalischen Korrekturmodellen

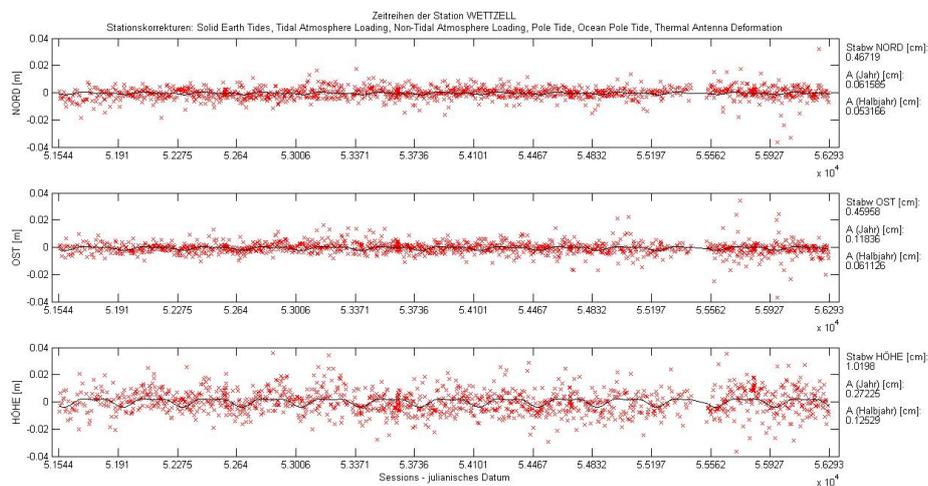


Abbildung 72: Die Zeitserien der Station WETTZELL mit atmosphärischem Korrekturmodell

## 5.18 ZELENCHK

ZELENCHK (Zelenchukskaya Radio Astronomical Observatory) ist eine von drei Stationen des russischen VLBI Dienstes QUASAR. ZELENCHK beteiligt sich, neben inländischen VLBI Beobachtungen, regelmäßig an IVS Beobachtungsprogrammen. Im Jahr 2011 beteiligte sich die Station an 49 24-stündigen IVS Sessions (IVS-R1, IVS-R4, IVS-T2, IVS-R&D, EURO, and CONT11), sowie an 49 24-stündigen inländischen Sessions zur Beobachtung der Erdorientierungsparameter und 55 einstündige inländische Sessions zur Beobachtung der Weltzeit UT1. Der Datentransfer bei dieser Station erfolgt schon mittels e-VLBI. Die Station liegt in der Republik Karachaevo-Cherkesskaya im Norden des Kaukasus, rund 70 km südlich von Cherkessk bei Zelenchukskaya (siehe Tabelle 20) (Smolentsev u. Dyakov [2012]).

Die VLBI Station ZELENCHK liegt nur knapp 100 km vom Schwarzen Meer entfernt im Kaukasus am 43. Breitengrad, daher ist auch eine geringe Verbesserung der Standardabweichung (0.004 cm) bei Anbringung des atmosphärischen Korrekturmodells (Vergleiche Abbildung 75 mit Abbildung 76) zu erkennen. Das ist sogleich die einzige Verbesserung die durch Anbringung von geophysikalischen Korrekturmodellen erreicht werden kann.

In Abbildung 77 stehen die roten Balken für die Standardabweichung, die blauen Balken für die Amplitude der jährlichen Schwingung und die grünen Balken für die Amplitude der

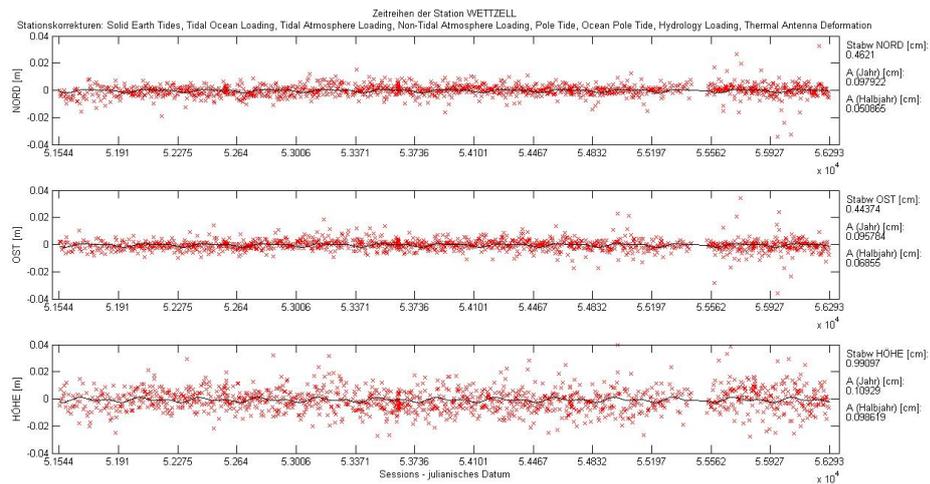


Abbildung 73: Die Zeitserien der Station WETTZELL mit ozeanischen, atmosphärischen und hydrologischen Korrekturmodellen

Länge	41° 34' O
Breite	43° 47' N
Adresse	Republik Karachaevo-Cherkesskaya, 369140, Russland

Tabelle 20: Die Lage und Adresse der Station ZELENCHK

halbjährlichen Schwingung der Station ZELENCHK. In jedem der drei Plots sind 16 Balken zu sehen. Das sind alle möglichen Kombinationen der Korrekturmodelle von den Auflasteffekten. Die Kombinationen der Auflasteffekte sind am Beginn des Kapitels 5 aufgelistet. Im grünen Plot der Abbildung 77 bewirkt die Anbringung vom hydrologischen Korrekturmodell eine Verbesserung der halbjährlichen Amplitude an den Balken 5, 10, 11, 14, 15 und 16.

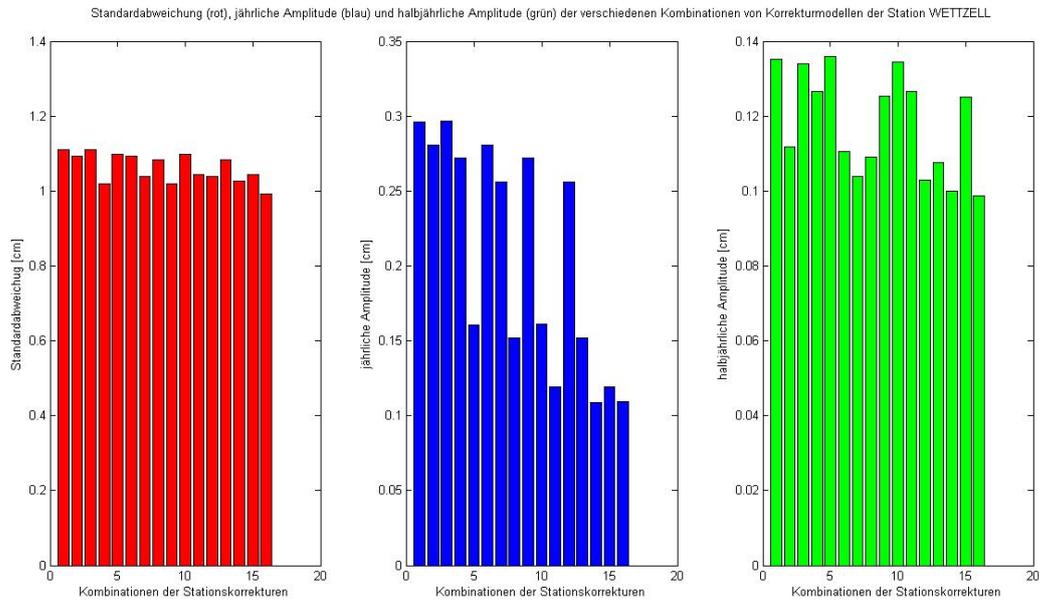


Abbildung 74: Die Plots zeigen alle möglichen Kombinationen der Korrekturmodelle von den Auflastmodellen (Balken 1 bis Balken 16) für die Station WETTZELL. Rot: Standardabweichung. Blau: jährliche Amplitude. Grün: halbjährliche Amplitude.

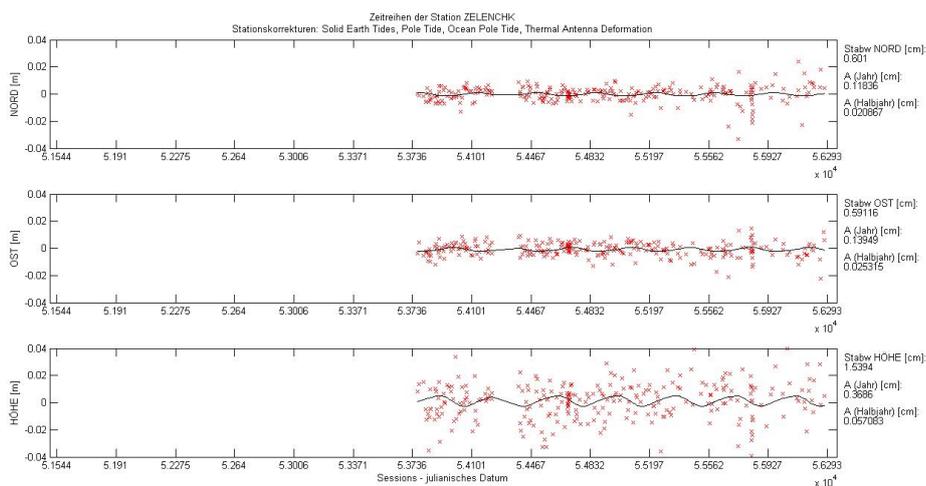


Abbildung 75: Die Zeitserien der Station ZELENCHK ohne geophysikalischen Korrekturmodellen

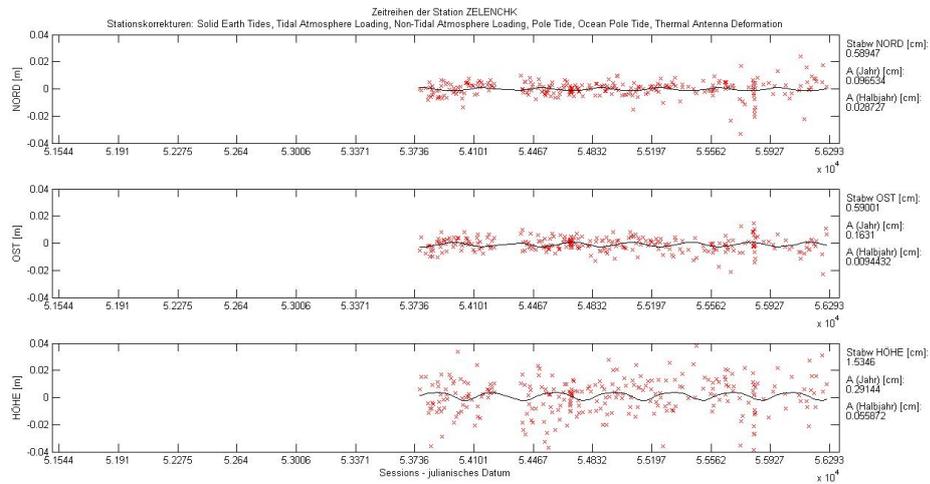


Abbildung 76: Die Zeitserien der Station ZELENCHK mit atmosphärischem Korrekturmodell

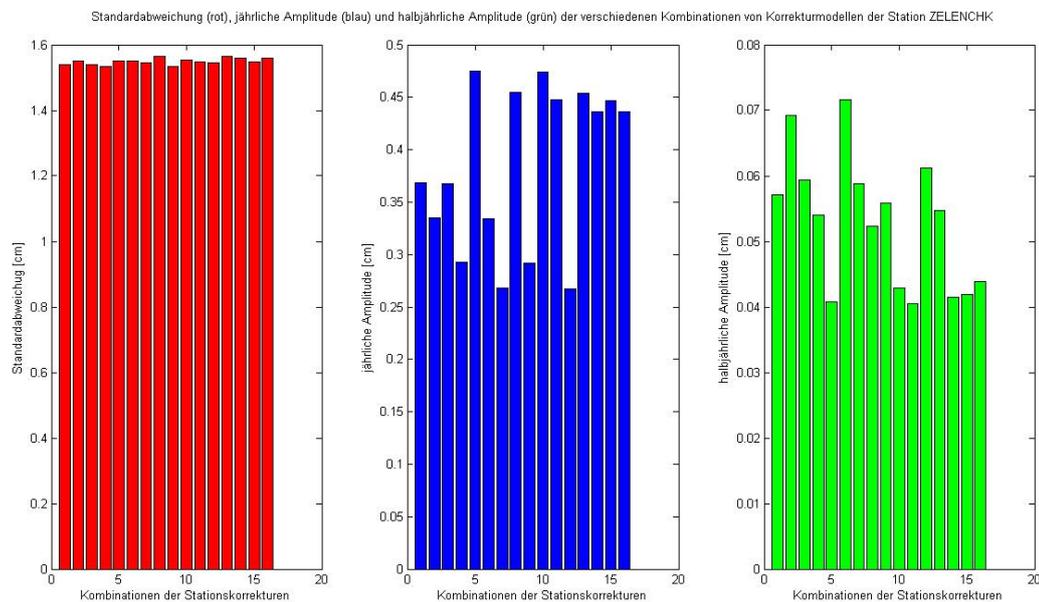


Abbildung 77: Die Plots zeigen alle möglichen Kombinationen der Korrekturmodelle von den Auflastmodellen (Balken 1 bis Balken 16) für die Station ZELENCHK. Rot: Standardabweichung. Blau: jährliche Amplitude. Grün: halbjährliche Amplitude.

## 6 Diskussion und Zusammenfassung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse diskutiert, sowie mit den Daten der Untersuchung von Hana Krásná [2013] verglichen. Es gilt herauszufinden, ob geophysikalische Auflasteffekte auf die Lage der Station mit der VLBI detektierbar sind, oder ob die Einflüsse zu gering sind.

### 6.1 Diskussion

#### 6.1.1 Anbringung von ozeanischen Korrekturmodellen

In Tabelle 21 sind sämtliche Stationen mit ihrer Lage und den Differenzen der Standardabweichungen der Koordinatenzuschläge in der Höhenkoordinate aufgelistet. Die Differenzen der Standardabweichungen ergeben sich aus den Standardabweichungen der Zeitserien ohne geophysikalischen Korrekturmodellen minus den Standardabweichungen der Zeitserien mit ozeanischen Korrekturmodellen. Die Differenzen der Standardabweichung beziehen sich nur auf die Zeitserien in der Höhe. Vergleicht man die Lage der Station mit den Differenzen der Standardabweichungen zeigt sich, dass die Stationen an der Küste oder an großen Seen eine höhere Verbesserung der Standardabweichung aufweisen. Zusätzlich hängt es sehr stark davon ab, wie groß die Gezeitenwellen an den jeweiligen Küsten sind.

FORTLEZA liegt unmittelbar am Meer in einer Region an der die Gezeitenwellen bis zu 90 cm betragen. Die ozeanische Korrektur an dieser Station verbessert die Standardabweichung um 0.268 cm.

TSUKUB32 liegt ebenfalls direkt am Meer, jedoch betragen dort die Gezeitenwellen nur 20 cm (siehe Abbildung 9). Daher unterliegt diese Station keiner Verbesserung der Standardabweichung.

Die Station BADARY liegt zentral in Asien, weit weg von jedem Ozean, jedoch in der Nähe des Baikalsees. Dieser See zählt zu den größten Seen weltweit und er ist das größte Süßwasserreservoir der Welt. Daher sind auch am Baikalsee ozeanische Gezeiten zu spüren. Der Tidenhub des Baikalsees erreicht bis zu 8 cm (Schulte [1999]). Die Station BADARY weist bei Anbringung der ozeanischen Korrektur trotzdem eine negative Differenz der Standardabweichung von -0.094 cm auf. Ein möglicher Grund wäre, dass die Gezeiten des Baikalsees nicht im Modell der Ozeangezeiten berücksichtigt werden.

WETTZELL liegt zentral in Europa, weit entfernt von jedem Ozean, jedoch sind die Gezeitenwellen an der französischen Atlantikküste mit über 150 cm sehr groß und haben somit trotzdem noch einen Einfluss auf diese Station. Bei angewendeten Korrekturmodell ergibt sich an der Station WETTZELL eine Verbesserung der Standardabweichung von 0.018 cm.

HARTRAO, KOKEE PARK und WESTFORD liegen auch nahe an der Küste und weisen daher bei Anbringung der ozeanischen Korrektur große Verbesserungen in der Standardabweichung der Koordinatenzuschläge der Höhenzeitserien der Stationen auf. ONSALA60 hingegen liegt direkt am Meer, jedoch sind in dieser Region kaum Gezeiten zu spüren (maximal 10 cm). Daher werden bei Anbringung der ozeanischen Korrektur an dieser Station keine Verbesserungen in der Standardabweichung hervorgerufen. Neben ONSALA60 gibt es noch vier weitere Stationen (BADARY, HOBART12 /HOBART26, TIGOCONC und ZELENCHK) an denen keine Verbesserungen in der Standardabweichung auftreten.

HOBART12 / HOBART26 ist der einzige VLBI Standort an dem sämtliche geophysikalischen Korrekturmodelle keine Verbesserungen in der Standardabweichung verursachen. TIGOCONC liegt zwar auch nicht weit weg von der Küste, jedoch hat diese Station generell eine schlechte Standardabweichung. Daher könnte der Grund für eine negative Differenz der Standardabweichung bei den verrauschten Daten liegen. ZELENCHK liegt zwar nur 100 km vom Schwarzen Meer entfernt, aber schon im Kaukassus Gebirge, und zusätzlich wird die M2-Tide nicht für das Scharze Meer berechnet (siehe Abbildung 9). Dies könnten Gründe für die negative Differenz sein.

Über FORTORDS findet man generell wenig Informationen aber diese Station liegt unweit der pazifischen Küste mit Gezeitenwellen von bis zu 45 cm. Aus diesem Grund tritt an dieser Station bei Anbringung der ozeanischen Korrektur eine Verbesserung der Standardabweichung von 0.050 cm auf.

Abbildung 78 zeigt einen Barplot mit den Differenzen der Standardabweichung (Standardabweichung ohne Korrekturen minus Standardabweichung mit ozeanischer Korrektur) für alle ausgewählten VLBI Stationen. Die Standardabweichung ist in Zentimeter angegeben und die Stationen alphabetisch sortiert. Positive Werte stehen für eine Verbesserung der Standardabweichung. Zu erkennen sind auch die fünf Stationen (BADARY, HOBART, ONSALA60, TIGOCONC und ZELENCHK) an denen, wie weiter oben schon beschrieben, die Anbringung des ozeanischen Korrekturmodells keine Verbesserung bewirkt. Die größten Verbesserungen bei Anbringung des ozeanischen Korrekturmodells treten bei den Stationen FORTLEZA, FORTORDS, HARTRAO / HART15M, KOKEE PARK und WESTFORD auf.

Da bei nahezu allen VLBI Stationen, bei Anbringung von ozeanischen Korrekturmodellen, eine Verbesserung in der Standardabweichung der Koordinatenzuschläge in der Höhenzeitserie erreicht werden, kann das Fazit gezogen werden, dass ozeanische Auflasteffekte auf jeden Fall berücksichtigt werden sollten und gegebenenfalls die ozeanischen Korrekturmodelle anzubringen sind. Wichtige Faktoren sind die Höhen der Gezeitenwellen und die tatsächliche Entfernung zum Meer oder großen Seen.

Station	Lage	Differenz der Standardabweichung [cm]
ALGOPARK	78° 04' W, 45° 57' N	0.038
BADARY	102° 14' O, 51° 46' N	-0.094
FORTLEZA	38° 25' W, 03° 52' S	0.268
FORTORDS	121° 46' W, 36° 35' N	0.050
GILCREEK	147° 29' W, 64° 58' N	0.023
HARTRAO / HART15M	27° 41' O, 25° 53' S	0.054
HOBART12 / HOBART26	147° 26' O, 42° 48' S	-0.211
KOKEE PARK	159° 39' W, 22° 07' N	0.049
MATERA	16° 42' O, 40° 38' N	0.024
MEDICINA	11° 38' O, 44° 31' N	0.012
NYALES20	11° 59' O, 78° 56' N	0.021
ONSALA60	11° 55' O, 57° 23' N	-0.011
SVETLOE	29° 47' O, 60° 32' N	0.022
TIGOCONC	73° 01' W, 36° 50' S	-0.002
TSUKUB32	140° 06' O, 36° 13' N	0.000
WESTFORD	71° 29' W, 42° 37' N	0.057
WETTZELL	12° 52' O, 49° 08' N	0.018
ZELENCHK	41° 34' O, 43° 47' N	-0.012

Tabelle 21: Differenzen der Standardabweichung: ohne minus mit ozeanischer Korrektur. Positive Werte stehen für eine Verbesserung in der Standardabweichung. Die Stationen sind alphabetisch angeordnet.

### 6.1.2 Anbringung von atmosphärischen Korrekturmodellen

In Tabelle 22 sind sämtliche Stationen und ihre Differenzen in der Standardabweichung nach dem Breitengrad sortiert. Die Differenzen der Standardabweichungen ergeben sich aus den Standardabweichungen der Zeitserien ohne geophysikalischen Korrekturmodellen minus den

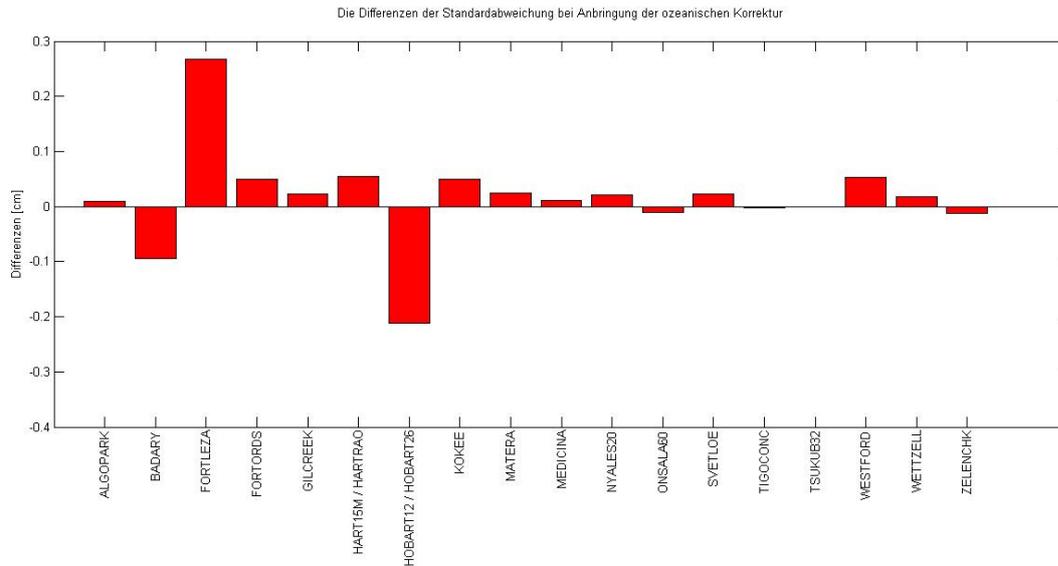


Abbildung 78: Die Differenzen der Standardabweichung: ohne minus mit ozeanischem Korrekturmodell. Positive Werte stehen für eine Verbesserung in der Standardabweichung. Die Differenzen sind in Zentimeter angegeben und die Stationen nach dem Alphabet geordnet.

Standardabweichungen der Zeitserien mit atmosphärischen Korrekturmodellen. Die Differenzen der Standardabweichung beziehen sich nur auf die Zeitserien in der Höhe. Beim Studieren der Tabelle 22 lässt sich schnell erkennen, dass die größten Differenzen in der Standardabweichung in den mittleren Breiten ( $40^\circ - 60^\circ$  N) auftreten. Das ist jener Breitengrad in dem die atmosphärischen Variationen am größten sind. Ab  $40^\circ$  N wird die Differenz der Standardabweichung um eine Größenordnung größer.

NYALES20 ist die nördlichste Station mit über  $78^\circ$  N und die dazugehörige Differenz der Standardabweichung (0.010 cm) ist ein Drittel des Mittelwertes (0.036 cm) der zehn Stationen im Breitengrad  $40^\circ - 60^\circ$  N. Innerhalb dieses Breitengrades gibt es zwei Ausnahmen (ZELENCHK mit 0.004 cm und ONSALA60 mit 0.009 cm), die deutlich geringer sind. Der Grund für die geringe Differenz der Standardabweichung der Station ZELENCHK könnte folgender sein: Die größten Differenzen zu den atmosphärischen Auflastmodellen treten bei Stationen auf Inseln und im Gebirge auf.

Die Station ZELENCHK liegt im nördlichen Kaukasus auf einer Höhe von knapp 1000 m. Im Gebirge ist die räumliche und zeitliche Auflösung der atmosphärischen Auflastmodelle zu gering. ONSALA60 liegt weder im Gebirge noch auf einer Insel. Jedoch befindet sich die Station ( $57^\circ$  N) schon an der Grenze vom Bereich mit großen atmosphärischen Variationen ( $40^\circ - 60^\circ$  N), zusätzlich liegt diese Station auf einer Halbinsel. Hier könnten die Effekte ähnlich einer Insel sein. Dies wären mögliche Begründungen für die geringe Differenz in der Standardabweichung der Stationen ZELENCHK und ONSALA60.

Abbildung 79 zeigt einen Barplot mit den Differenzen der Standardabweichung (Standardabweichung ohne Korrekturen minus Standardabweichung mit atmosphärischer Korrektur) für alle ausgewählten VLBI Stationen. Die Standardabweichung ist in Zentimeter angegeben und die Stationen nach der geografischen Breite sortiert. Positive Werte stehen für eine Verbesserung in der Standardabweichung. HOBART12 / HOBART26 und FORTLEZA sind die einzigen Stationen an denen keine Verbesserungen bei Anbringung der atmosphärischen Korrektur auftreten. Die größten Verbesserungen treten an den VLBI Stationen in den mittleren Breiten ( $40^\circ - 60^\circ$  N) auf. Das sind die Stationen von MATERA bis GILCREEK. ZELENCHK und ONSALA60 zeigen, im Vergleich zu den restlichen Stationen in mittlere Breite, eine deut-

lich geringere Verbesserung der Standardabweichung. Die Gründe dafür wurden etwas weiter vorne schon genannt.

Bei HOBART12 / HOBART26 treten, wie schon bei der Anbringung der ozeanischen Korrekturen, keine Verbesserungen auf. Bis auf die Stationen HOBART12 / HOBART26 und FORTLEZA werden bei allen VLBI Stationen, bei Anbringung von atmosphärischen Korrekturmodellen, Verbesserungen in den Standardabweichungen der Koordinatenzuschläge in der Höhenzeitserie erkennbar. Aus diesem Grund sollten bei allen Beobachtungen und Berechnungen atmosphärische Auflastmodelle berücksichtigt werden, vor allem bei den Stationen in den Breitengraden  $40^\circ$  -  $60^\circ$  N.

Vergleicht man dies mit den Untersuchungen von Hana Krásná [2013] zeigt sich die Übereinstimmung, dass die größten Verbesserungen in der Standardabweichung bei den VLBI Stationen im Breitengrad  $40^\circ$  -  $60^\circ$  N liegen und das somit der Bereich mit den größten atmosphärischen Variationen ist.

Station	Breitengrad	Differenz der Standardabweichung [cm]
HOBART12 / HOBART26	$42^\circ 48' S$	-0.010
TIGOCONC	$36^\circ 50' S$	0.015
HARTRAO / HART15M	$25^\circ 53' S$	0.004
FORTLEZA	$03^\circ 52' S$	-0.008
KOKEE PARK	$22^\circ 07' N$	0.004
TSUKUB32	$36^\circ 13' N$	0.012
FORTORDS	$36^\circ 35' N$	0.003
MATERA	$40^\circ 38' N$	0.012
WESTFORD	$42^\circ 37' N$	0.032
ZELENCHK	$43^\circ 47' N$	0.004
MEDICINA	$44^\circ 31' N$	0.019
ALGOPARK	$45^\circ 57' N$	0.038
WETTZELL	$49^\circ 08' N$	0.091
BADARY	$51^\circ 46' N$	0.013
ONSALA60	$57^\circ 23' N$	0.009
SVETLOE	$60^\circ 32' N$	0.060
GILCREEK	$64^\circ 58' N$	0.101
NYALES20	$78^\circ 56' N$	0.010

Tabelle 22: Differenz der Standardabweichung: ohne minus mit atmosphärischer Korrektur. Positive Werte stehen für eine Verbesserung der Standardabweichung. Die Stationen sind nach dem Breitengrad (von Süd nach Nord) geordnet. Die größten Verbesserungen sind bei jenen Stationen zu finden, die sich in den mittleren nördlichen Breitengraden befinden.

### 6.1.3 Anbringung von hydrologischen Korrekturmodellen

In Tabelle 23 sind sämtliche VLBI Stationen mit den Differenzen in der Standardabweichung und den Differenzen der Amplituden von jährlicher und halbjährlicher Schwingung alphabetisch aufgelistet, sowie der Standardabweichung der Amplituden. Die Differenzen der Standardabweichungen ergeben sich aus den Standardabweichungen der Zeitserien ohne geophysikalischen Korrekturmodellen minus den Standardabweichungen der Zeitserien mit hydrologischen Korrekturmodellen. Nach dem gleichen Schema wurden die Differenzen der Amplituden berechnet. Alle Differenzen beziehen sich nur auf die Zeitserien der Koordinatenzuschläge in der Höhe. Die Werte in der Tabelle 23 wirken alle relativ klein, trotzdem sind die hydrologischen Korrekturen teilweise nicht zu vernachlässigen.

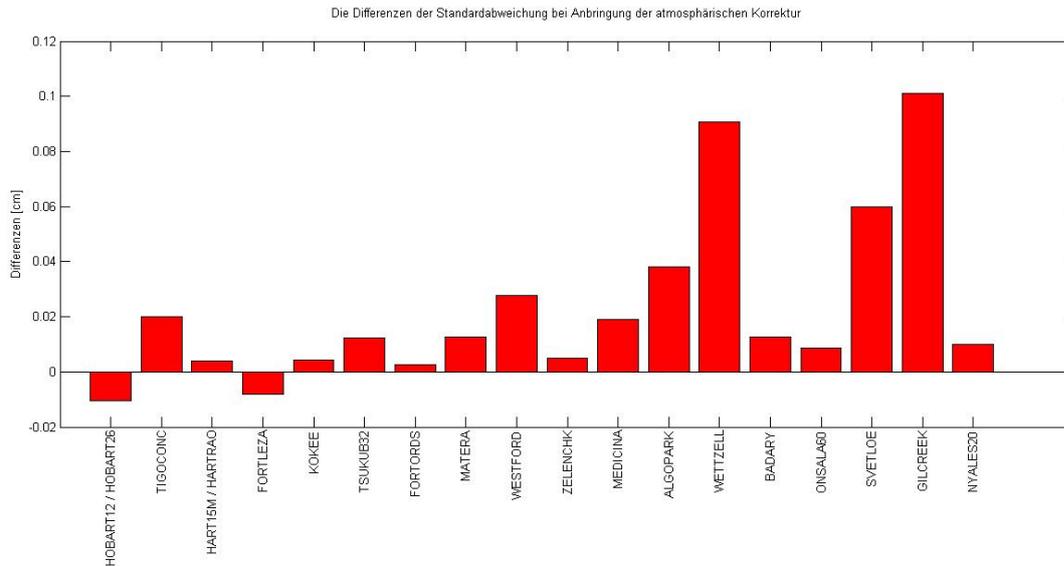


Abbildung 79: Die Differenzen der Standardabweichung: ohne minus mit atmosphärischem Korrekturmodell. Positive Werte stehen für eine Verbesserung in der Standardabweichung. Die Differenzen sind in Zentimeter angegeben und die Stationen nach der geografischen Breite sortiert.

Die Differenzen der Standardabweichung der Koordinatenzuschläge der Höhenkomponente jeder Station sind sehr klein. Das ist durchaus zu erwarten, denn die Korrektur der hydrologischen Auflasteffekte beeinflusst in erster Linie die Amplituden der jährlichen und halbjährlichen Schwingungen. ALGOPARK zeigt die größten Verbesserungen in der jährlichen Amplitude, die Verbesserung der halbjährlichen Amplitude ist geringer als die Standardabweichung. Die jährliche Schwingung an dieser Station wird fast vollständig geglättet. Der Grund dafür ist wahrscheinlich, dass diese Station in Kanada in einer Seenplatte steht und dort hydrologische Variationen groß sein können. Zusätzlich zu den verbesserten Amplituden wird auch die Standardabweichung deutlich verbessert.

Ebenfalls große Verbesserungen in der Amplitude der jährlichen Schwingung findet man bei den Stationen WETZELL und TIGOCONC. Bei der Station TIGOCONC ist jedoch die Standardabweichung der Amplitude weit größer als die Verbesserung. Eurasien gehört zu einem hydrologischen stark variierenden Gebiet. Daher fällt dies nicht nur bei der Station WETZELL auf, sondern auch bei der Station SVETLOE in der jährlichen Schwingung und bei der Station ZELENCHK in der halbjährlichen Schwingung. Bei der Station ZELENCHK sind zwar Verbesserungen zusehen, jedoch ist die Standardabweichungen der Amplitude höher als die Verbesserung selbst. SVETLOE weist zu dieser Verbesserung auch eine sehr hohe Standardabweichung der Amplituden auf. TIGOCONC steht südlich von der trockenen und hydrologisch sehr stabilen Atacamawüste und fällt daher nicht in einen hydrologischen Einfluss.

Die Station FORTLEZA steht in einer hydrologisch sehr instabilen Gegend, trotzdem werden keine Verbesserungen bei Anbringung der hydrologischen Korrektur sichtbar. Möglicherweise sind die hydrologischen Variationen im Amazonasgebiet um vieles größer als in den Modellen berechnet wird. Ein anderer Grund könnte auch sein, dass keine jährlichen hydrologischen Variationen auftreten, sondern nur monatliche, wie in Abbildung 18 zu sehen ist.

Abbildung 80 zeigt einen Barplot mit den Differenzen der Standardabweichung und Amplituden (Modell ohne Korrekturen minus Modell mit hydrologischer Korrektur) für alle ausgewählten VLBI Stationen. Die Differenzen der Standardabweichung und Amplituden sind in

Zentimeter angegeben und die Stationen alphabetisch sortiert. Positive Werte stehen für Verbesserungen in der Standardabweichung und den Amplituden. Die blauen Balken beschreiben die Verbesserung der Standardabweichung. Die jährliche Amplitude wird in einem grünen Balken dargestellt und in rot wird die halbjährliche Amplitude geplottet. Die größten Verbesserungen der jährlichen Amplitude findet man bei den Stationen ALGOPARK, SVETLOE, TIGOCONC und WETTZELL, die nicht alle in Gegenden mit großen hydrologischen Variationen stehen. TIGOCONC steht südlich der hydrologisch stabilen Atacamwüste und weist eine viel höhere Standardabweichung der Amplituden auf als die Verbesserung beträgt und die Verbesserung der Amplitude an der Station SVETLOE ist kaum größer als die Standardabweichung der Amplitude. FORTLEZA ist ein Ausnahme, denn diese Station steht im Amazonasgebiet, wo es große monatliche Variationen gibt. Möglicherweise treten hier keine großen jährlichen hydrologischen Variationen auf, sondern nur monatliche und daher ist an FORTLEZA keine Verbesserung der jährlichen Amplitude bei Anbringung der hydrologischen Korrektur zu sehen. ZELENCHK ist ebenfalls eine Ausnahme: hier treten zwar Verbesserungen bei den halbjährlichen Amplituden auf, jedoch ist auch hier die Standardabweichung größer als die Verbesserung selbst.

In den hydrologisch aktivsten Gegenden stehen keine VLBI Stationen. Nordamerika und Eurasien zählen aber doch auch noch zu hydrologisch variablen Erdteilen, und genau in diesem Teil der Erde stehen die meisten VLBI Teleskope. Zum Teil verbessert die Anbringung der hydrologischen Korrekturmodellen die Amplituden der jährlichen und/oder halbjährlichen Schwingungen, sowie teilweise auch die Standardabweichung der Koordinatenzuschläge der Höhenzeitserien. Aus diesem Grund sind auch die hydrologischen Auflasteffekte zu berücksichtigen.

Vergleicht man dies mit der Untersuchung von Hana Krásná [2013] so erkennt man wieder Übereinstimmungen, wie zum Beispiel, dass die Station ZELENCHK große halbjährliche Schwingungen aufweist und diese durch hydrologische Modelle verbessert werden können.

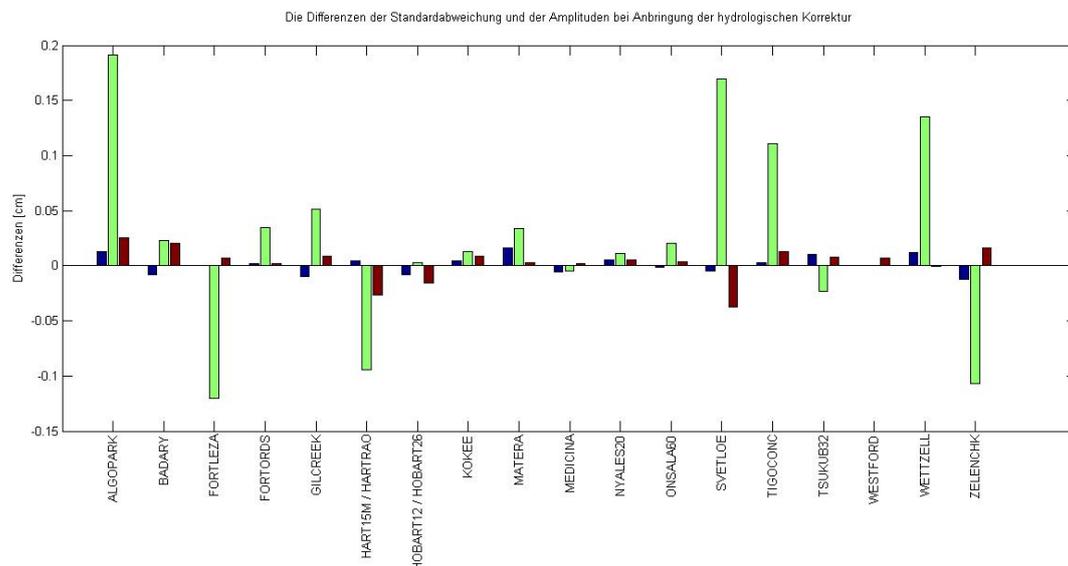


Abbildung 80: Die Differenzen der Standardabweichung und Amplituden: ohne minus mit hydrologischem Korrekturmodell. Positive Werte stehen für eine Verbesserung. Die Differenzen (Standardabweichung in blau, jährliche Amplitude in grün, halbjährliche Amplitude in rot) sind in Zentimeter angegeben und die Stationen nach dem Alphabet geordnet.

Station	$\Delta d$ Stdabw. [cm] Koord. Zuschläge	$\Delta d$ Amplituden der j. Schwingung [cm]	$\Delta d$ Amplituden der hj. Schwingung [cm]	Stdabw. [cm] Amplituden
ALGOPARK	0.013	0.191	0.025	0.07
BADARY	-0.008	0.023	0.020	0.40
FORTLEZA	0.001	-0.121	0.007	0.24
FORTORDS	0.002	0.035	0.002	0.11
GILCREEK	-0.010	0.052	0.009	0.06
HARTRAO	0.004	-0.094	-0.027	0.15
HOBART	-0.008	0.003	-0.016	0.37
KOKEE PARK	0.004	0.013	0.008	0.09
MATERA	0.016	0.034	0.003	0.12
MEDICINA	-0.005	-0.008	0.002	0.69
NYALES20	0.005	0.012	0.006	0.08
ONSALA60	-0.002	0.020	0.004	0.08
SVETLOE	-0.005	0.170	-0.038	0.15
TIGOCONC	0.002	0.110	0.013	0.41
TSUKUB32	0.010	-0.023	0.008	0.21
WESTFORD	0.005	0.000	0.007	0.07
WETTZELL	0.013	0.135	0.000	0.06
ZELENCHK	-0.013	-0.107	0.016	0.18

Tabelle 23: Differenzen der Standardabweichung und Amplituden: ohne minus mit hydrologischer Korrektur. Positive Werte stehen für eine Verbesserung der Standardabweichung und Amplituden. In der vierten Spalte ist die Standardabweichung der Amplituden notiert.

## 6.2 Ausblick

Eines der Ziele der VLBI2010 ist die Bestimmung der Basislinie zwischen zwei VLBI Stationen mit einer Genauigkeit von 1 mm. Um dieses Ziel auch erreichen zu können sind geophysikalische Auflasteffekte auf jeden Fall zu berücksichtigen. Das führt zu einer unabdingbaren Anbringung sämtlicher Korrekturmodelle geophysikalischer Auflasteffekte. Auch wenn diese Korrekturmodelle nur minimale Beiträge zur Verbesserung der Standardabweichung der Koordinatenzuschläge liefern, sind diese trotzdem enorm wichtig um eine Genauigkeit der Basislinien von 1 mm sicher zu stellen.

Das ganze System Erde ist sehr veränderlich: die Erdrotation ist nicht konstant, die Lage der Rotationsachse im Bezug zum Weltraum verändert sich, die Lage der Rotationsachse im Bezug zum Erdkörper verändert sich, Wetter und Klima unterliegen starken Schwankungen. Dies alles sind Zeichen für veränderte geophysikalische Auflasteffekte, weil geophysikalische Auflasteffekte sehr stark von gravitativen Kräften abhängen. Die Hauptauswirkung der Gezeitenwellen erfolgt immer in der Verbindungsachse Erde-Mond und Erde-Sonne. Die Ozeangezeiten hängen außerdem stark von der Beschaffung der Meeresbodentopographie ab. Es kann also durch Plattentektonik, Vulkanausbrüchen oder anderen Naturkatastrophen zu Veränderungen in der Meerestopographie und dadurch zu einer Änderung in der Höhe der Gezeitenwellen kommen. Auch hydrologische Effekte, wie zum Beispiel der Abfluss von Grundwasser und Austrocknung von großen Feuchtgebieten, und atmosphärische Variationen werden auch in Zukunft weiter bestehen.

Um die Ziele der VLBI2010 zu erreichen, muss daher stets auch auf das Gesamtsystem Erde und somit auch auf die geophysikalischen Auflasteffekte eingegangen werden und mit verbesserten Modellen möglichst gute Korrekturmodelle bereitgestellt werden.

## 6.3 Zusammenfassung

Geophysikalische Auflasteffekte, darunter versteht man ozeanische, atmosphärische und hydrologische Massenumverteilungen, haben einen Einfluss auf die Koordinaten der VLBI Stationen. Der Einfluss auf die horizontalen Koordinaten ist um eine Zehnerpotenz geringer als auf die vertikale Koordinate. Für die Untersuchung in dieser Arbeit werden von jeder VLBI Station die Zeitserien der Koordinatenzuschläge in *NORD*, *OST* und *HÖHE* geplottet sowie die Standardabweichung und die Summe einer jährlichen und halbjährlichen Schwingung berechnet. Bis auf die Station *HOBART12* / *HOBART26* werden bei allen Stationen, bei Anbringung von geophysikalischen Korrekturmodellen, Verbesserungen in der Standardabweichung der Koordinatenzuschläge der Zeitserie in vertikaler Richtung festgestellt. Ozeanische und atmosphärische Korrekturmodelle verbessern in erster Linie die Standardabweichung, hydrologische Korrekturmodelle verbessern vor allem die Amplituden der jährlichen und halbjährlichen Schwingung.

Die größten Effekte bei Anbringung der ozeanischen Korrektur zeigen sich an Stationen in der Nähe der Ozeane oder sehr großen Seen. Nur die Lage zum Ozean ist noch nicht ausschlaggebend, wichtig ist die Höhe der Gezeitenwelle im Bereich der VLBI Station. *FORTLEZA* in Brasilien liegt in einer Küstengegend mit Gezeitenwellen bis zu 90 cm und zeigt daher große Verbesserungen der Standardabweichung von 0.268 cm. *TSUKUB32* liegt auch unweit des Ozeans auf Japan, jedoch betragen die Gezeitenwellen in dieser Gegend lediglich bis zu 20 cm (siehe Abbildung 9) und es treten keine Verbesserungen in der Standardabweichung auf. Ein zweites Beispiel für eine Station am Meer ohne Verbesserung in der Standardabweichung ist die Station *ONSALA60*. Dort treten Gezeitenwellen von maximal 10 cm auf.

Die größten Verbesserungen bei Anbringung eines atmosphärischen Korrekturmodells treten bei den VLBI Stationen in den mittleren Breitengraden auf. Das liegt daran, dass in den Breitengraden  $40^\circ$  -  $60^\circ$  N die größten atmosphärischen Variationen zu finden sind. Bei den Stationen in dem genannten Bereich der Breite (*MATERA*, *WESTFORD*, *ZELENCHK*, *MEDICINA*, *ALGOPARK*, *WETTZELL*, *BADARY*, *ONSALA60*, *SVETLOE* und *GILCREEK*) treten Verbesserungen in der Standardabweichung zwischen 0.01 cm (*WESTFORD*) und 0.1 cm (*GILCREEK*) auf. An den Stationen südlich von  $40^\circ$  N erreicht die Verbesserung der Standardabweichung nur 0.004 cm (*KOKEE PARK*). Im Mittel erreichen die Stationen in der mittleren Breite eine Verbesserung von 0.036 cm und die Stationen südlich davon nur 0.003 cm. Das bedeutet, im Mittel ergibt das eine, um eine Zehnerpotenz, größere Verbesserung in den mittleren Breiten.

Die allergrößten hydrologischen Variationen treten im Amazonasgebiet in Brasilien, nördlich und südlich des Äquators in Afrika, in Südostasien und ganz im Norden von Northern Territory in Australiens auf. Genau in diesen Gebieten stehen, bis auf *FORTLEZA* (Brasilien) und *KATHERINE* (Northern Territory, Australien), keine VLBI Stationen. Die meisten Stationen stehen in Nordamerika und Eurasien, und auch das sind Gebiete mit großen hydrologischen Variationen. Die größte Verbesserung bei Anbringung der hydrologischen Korrektur erfährt die Station *ALGOPARK*. Diese steht in Nordamerika in einer Seenplatte mit hydrologisch großen Variationen. Die Amplituden (Verbesserung von 0.191 cm) der jährlichen Schwingung werden fast vollständig geglättet und auch die Standardabweichung stark verbessert (0.013 cm). Auch andere Stationen in Eurasien zeigen große Verbesserungen in den Amplituden der Schwingung, wie zum Beispiel *SVETLOE* (Verbesserung der Amplitude der jährlichen Schwingung um 0.170 cm) und *WETTZELL* (Verbesserung der Amplitude der jährlichen Schwingung um 0.135 cm).

## Literatur

- [Behrend u. Baver 2011] BEHREND, D. ; BAVER, K. D.: IVS Organization. Version: 2011. <http://ivscc.gsfc.nasa.gov/publications/ar2010/index.html>. In: BEHREND, D. (Hrsg.) ; BAVER, K. D. (Hrsg.): *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2010 Annual Report*. 2011, 2–3
- [Bérubé u. a. 2004] BÉRUBÉ, Mario ; KLATT, Calvin ; SEARLE, Anthony: Algonquin Radio Observatory. Version: 2004. <ftp://ivscc.gsfc.nasa.gov/pub/annual-report/2003/pdf/nsalgo.pdf>. In: VANDENBERG, N. R. (Hrsg.) ; BAVER, K. D. (Hrsg.): *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2003 Annual Report*. 2004, 29–31
- [Bianco u. a. 2013] BIANCO, Giuseppe ; COLUCCI, Giuseppe ; SCHIAVONE, Francesco: Matera CGS VLBI Station. Version: 2013. <ftp://ivscc.gsfc.nasa.gov/pub/annual-report/2012/pdf/nsmate.pdf>. In: BAVER, K. D. (Hrsg.) ; BEHREND, D. (Hrsg.) ; ARMSTRONG, K. (Hrsg.): *International VLBI Service for Geodesy and Astronometry 2012 Annual Report*. 2013, 106–109
- [Böhm u. a. 2012] BÖHM, J. ; BÖHM, S. ; NILSSON, T. ; PANY, A. ; PLANK, L. ; SPICAKOVA, H. ; TEKE, K. ; SCHUH, Harald: The new Vienna VLBI Software VieVS. In: KENYON, Steve C. (Hrsg.) ; PACINO, Maria C. (Hrsg.) ; MARTI, Urs (Hrsg.): *Geodesy for planet earth. Proceedings of the 2009 IAG Symposium*. 2012, S. 1007–1012
- [Böhm u. a. 2009] BÖHM, J. ; SPICAKOVA, H. ; PLANK, L. ; TEKE, K. ; PANY, A. ; WRESNIK, J. ; ENGLISH, S. ; NILSSON, T. ; SCHUH, H. ; HOBIGER, T. ; ICHIKAWA, R. ; KOYAMA, Y. ; GOTOH, T. ; KUBOOKA, T. ; OTSUBO, T.: Plans for the Vienna VLBI Software VieVS. Version: 2009. <http://www.u-bordeaux1.fr/vlbi2009/index.php?numpage=13&nompape=Proceedings>. In: BOURDA, G. (Hrsg.) ; CHARLOT, P. (Hrsg.) ; COLLIOD, A. (Hrsg.): *Proceedings of the 19th European VLBI for Geodesy and Astrometry Working Meeting*. 2009, 161–164
- [Caroline Schönberger 2013] CAROLINE SCHÖNBERGER: *Simulations of VLBI observations with the Onsala Twin Telescope*. Göteborg, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Diss., 2013
- [Curtis 2012] CURTIS, Ron: Kokee Park Geophysical Observatory. Version: 2012. <ftp://ivscc.gsfc.nasa.gov/pub/annual-report/2011/pdf/nskpgo.pdf>. In: BAVER, K. D. (Hrsg.) ; BEHREND, D. (Hrsg.): *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2011 Annual Report*. 2012, 62–65
- [Desai 2002] DESAI, Shailen D.: Observing the pole tide with satellite altimetry. In: *Journal of Geophysical Research* 107 (2002), Nr. C11, S. 13. <http://dx.doi.org/10.1029/2001JC001224>. – DOI 10.1029/2001JC001224. – ISSN 0148–0227
- [Eberhart 2004] EBERHART, Kyle: Gilmore Creek Geophysical Observatory. Version: 2004. <ftp://ivscc.gsfc.nasa.gov/pub/annual-report/2003/pdf/nsgcgo.pdf>. In: VANDENBERG, N. R. (Hrsg.) ; BAVER, K. D. (Hrsg.): *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2003 Annual Report*. 2004, 35–37
- [Egbert u. Erofeeva 2002] EGBERT, G. D. ; EROFEEVA, S. Y.: Efficient inverse modelling of barotropic ocean tides. Version: 2002. <http://ir.library.oregonstate.edu/xmlui/bitstream/handle/1957/27838/EgbertGaryD.CE0AS.EfficientInverseModeling.pdf?sequence=1>. In: *Journal of Atmospheric and Technology* Bd. 19(2). 2002, 183–204

- [Eriksson u. MacMillan 2012] ERIKSSON ; MACMILLAN, D.: *Hydrology loading displacements provided by the NASA GSFC VLBI group*. <http://lacerta.gsfc.nasa.gov/hydro/>. Version: 2012
- [Geospatial Information Authority of Japan 2005] GEOSPATIAL INFORMATION AUTHORITY OF JAPAN: *Prinziples of VLBI*. <http://www.spacegeodesy.go.jp/vlbi/en/whatisvlbi/principle.html>. Version: 2005
- [Güntner u.a. 2012] GÜNTNER, A. ; CREUTZFELDT, B. ; DILL, R. ; BARTHELMES, F.: Die Variabilität des kontinentalen Wasserkreislaufs in GRACE-Schwerefelddaten. Version: 2012. [http://gfzpublic.gfz-potsdam.de/pubman/item/escidoc:65125/component/escidoc:65158/GFZ\\_syserde.02.01.5.pdf](http://gfzpublic.gfz-potsdam.de/pubman/item/escidoc:65125/component/escidoc:65158/GFZ_syserde.02.01.5.pdf). In: *System Erde*. 2012
- [Haas u.a. 2012] HAAS, Rüdiger ; ELGERED, Gunnar ; LÖFGREN, Johan ; NING, Tong ; SCHERNECK, Hans-Georg: Onsala Space Observatory – IVS Network Station. Version: 2012. <ftp://ivscc.gsfc.nasa.gov/pub/annual-report/2011/pdf/nsoso.pdf>. In: BAVER, K. D. (Hrsg.) ; BEHREND, D. (Hrsg.): *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2011 Annual Report*. 2012, 88–91
- [Hana Krásná 2013] HANA KRÁSNÁ: *Estimation of solid Earth tidal parameters and FCn with VLBI*. Wien, Technische Universität Wien, Diss., 2013. <http://www.ub.tuwien.ac.at/diss/AC07814900.pdf>
- [Hase u.a. 2013] HASE, Hayo ; HERRERA, Cristian ; PINO, Pedro ; BELTRAN, Cristian: Status of the TIGO VLBI Station in Concepción. Version: 2013. <ftp://ivscc.gsfc.nasa.gov/pub/annual-report/2013/pdf/nstigo.pdf>. In: BAVER, K. D. (Hrsg.) ; BEHREND, D. (Hrsg.) ; ARMSTRONG, K. (Hrsg.): *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2012 Annual Report*. 2013, 171–172
- [Herring u. a. 1990] HERRING, T. ; DAVIS, J. ; SHAPIRO, I.: Geodesy by Radio Interferometry: The Application of Kalman Filtering to the Analysis of Very Long Baseline Interferometry Data. In: *Journal of Geophysical Research* Bd. 95/98. 1990, S. 12561–12581
- [International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2013] INTERNATIONAL VLBI SERVICE FOR GEODESY AND ASTROMETRY: *Network Stations: Map of Stations*. <http://ivs.nict.go.jp/mirror/stations/ns-map.html>. Version: 2013
- [Joeckel u. Stober 2008] JOECKEL, Rainer ; STOBER, Manfred: *Elektronische Entfernungsmessung*. 5., neubearb. und erw. Aufl. Stuttgart : Verlag Wittwer, 2008. – ISBN 3879074437
- [Kaufmann u. a. 2014] KAUFMANN, Pierre ; DE LUCENA, A. MACILIO PEREIRA ; DA SILVA, ADEILDO SOMBRA: Fortaleza Station 2013 Annual Report. Version: 2014. <ftp://ivscc.gsfc.nasa.gov/pub/annual-report/2013/pdf/nsfort.pdf>. In: BAVER, K. D. (Hrsg.) ; BEHREND, D. (Hrsg.) ; ARMSTRONG, K. (Hrsg.): *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2013 Annual Report*. 2014, 106–107
- [Kawabata u. a. 2012] KAWABATA, Ryoji ; KAWABATA, Shinobu ; KOKADO, Kensuke ; FUKUZAKI, Yoshihiro ; KURODA, Jiro ; ISHIHARA, Misao ; MUKAI, Yasuko ; NISHIKAWA, Takashi: Tsukuba 32-m VLBI Station. Version: 2012. <ftp://ivscc.gsfc.nasa.gov/pub/annual-report/2011/pdf/nstskb.pdf>. In: BAVER, K. D. (Hrsg.) ; BEHREND, D. (Hrsg.): *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2011 Annual Report*. 2012, 111–114

- [Letellier 2004] LETELLIER, T.: *Etudes des ondes de marée sur les plateaux continentaux*. Toulouse, Université de Toulouse III, Diss., 2004
- [Lovell u. a. 2012] LOVELL, Jim ; DICKEY, John ; REID, Brett ; MCCALLUM, Jamie ; SHABALA, Stas ; ELLINGSEN, Simon: AuScope VLBI Project and Hobart 26-m Antenna. Version: 2012. <ftp://ivsc.gsfc.nasa.gov/pub/annual-report/2011/pdf/nshobart.pdf>. In: BAVER, K. D. (Hrsg.) ; BEHREND, D. (Hrsg.): *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2011 Annual Report*. 2012, 50–53
- [NASA ] NASA: *FORT ORD SITE INFORMATION*. [http://cddis.nasa.gov/site\\_cat/forto.html](http://cddis.nasa.gov/site_cat/forto.html)
- [Neidhardt u. a. 2011] NEIDHARDT, Alexander ; Ettl, M. ; ROTTMANN, H. ; PLÖTZ, Christian ; MÜHLBAUER, M. ; HASE, Hayo ; ALEF, W. ; SOBARZO, S. ; HERRERA, Cristian ; BEAUDOIN, C. ; HIMWICH, E.: New technical observation strategies with e-control (new name: e-RemoteCtrl). Version: 2011. <http://www.mpifr-bonn.mpg.de/20thEVGA>. In: ALEF, W. (Hrsg.) ; BERNHART, S. (Hrsg.) ; NOTHNAGEL, A. (Hrsg.): *Proceedings of the 20th European VLBI for Geodesy and Astrometry Working Meeting*. 2011, 26–30
- [Neidhardt u. a. 2012] NEIDHARDT, Alexander ; KRONSCHNABL, Gerhard ; SCHATZ, Raimund: Geodetic Observatory Wettzell - 20-m Radio Telescope and Twin Telescope. Version: 2012. <ftp://ivsc.gsfc.nasa.gov/pub/annual-report/2011/pdf/nswett.pdf>. In: BAVER, K. D. (Hrsg.) ; BEHREND, D. (Hrsg.): *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2011 Annual Report*. 2012, 127–130
- [Nickola u. a. 2012] NICKOLA, Marisa ; QUICK, Jonathan ; COMBRINCK, Ludwig ; GAYLARD, Mike: Hartebeesthoek Radio Astronomy Observatory (HartRAO). Version: 2012. <ftp://ivsc.gsfc.nasa.gov/pub/annual-report/2011/pdf/nshartrao.pdf>. In: BAVER, K. D. (Hrsg.) ; BEHREND, D. (Hrsg.): *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2011 Annual Report*. 2012, 46–49
- [Niell u. a. 2005] NIELL, A. ; WHITNEY, A. ; PETRACHENKO, B. ; SCHLÜTER, Wolfgang ; VANDENBERG, N. R. ; HASE, Hayo ; KOYAMA, Y. ; MA, C. ; SCHUH, H. ; TUCCARI, G.: VLBI2010: Current and Future Requirements for Geodetic VLBI Systems. In: *Report of Working Group 3 to the IVS Directing Board*. 2005, S. 21
- [Nielson 2012] NIELSON, Carl P.: Ny-Ålesund 20-meter Antenna. Version: 2012. <ftp://ivsc.gsfc.nasa.gov/pub/annual-report/2011/pdf/nsnyal.pdf>. In: BAVER, K. D. (Hrsg.) ; BEHREND, D. (Hrsg.): *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2011 Annual Report*. 2012, 80–83
- [Nilsson u. a. 2011] NILSSON, T. ; BÖHM, J. ; BÖHM, S. ; MADZAK, M. ; NAFISI, V. ; PLANK, L. ; SPICAKOVA, H. ; SUN, J. ; TIerno ROS, C. ; SCHUH, H.: Status and future plans for the Vienna VLBI Software VieVS. Version: 2011. <http://www.mpifr-bonn.mpg.de/20thEVGA>. In: ALEF, W. (Hrsg.) ; BERNHART, S. (Hrsg.) ; NOTHNAGEL, A. (Hrsg.): *Proceedings of the 20th European VLBI for Geodesy and Astrometry Working Meeting*. 2011, 93–96
- [Nilsson u. Haas 2010] NILSSON, T. ; HAAS, R.: Impact of atmospheric turbulence on geodetic very long baseline interferometry. In: *Journal of Geophysical Research* 115 (2010), Nr. B3, S. 11. <http://dx.doi.org/10.1029/2009JB006579>. – DOI 10.1029/2009JB006579. – ISSN 0148–0227
- [Orfei u. a. 2012] ORFEI, Alessandro ; ORLATI, Andrea ; MACCAFERRI, Giuseppe: The Medicina Station Status Report. Version: 2012. <ftp://ivsc.gsfc.nasa.gov/pub/>

- annual-report/2011/pdf/nsmedi.pdf. In: BAVER, K. D. (Hrsg.) ; BEHREND, D. (Hrsg.): *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2011 Annual Report*. 2012, 70–71
- [Pany u. a. 2011] PANY, A. ; BÖHM, J. ; MACMILLAN, D. ; SCHUH, H. ; NILSSON, T. ; WRESNIK, J.: Monte Carlo simulations of the impact of troposphere, clock and measurement errors on the repeatability of VLBI positions. In: *Journal of Geodesy* 85 (2011), Nr. 1, S. 39–50. <http://dx.doi.org/10.1007/s00190-010-0415-1>. – DOI 10.1007/s00190-010-0415-1. – ISSN 0949–7714
- [Petit u. Luzum 2010] PETIT, G. ; LUZUM, B.: *IERS Conventions 2010. IERS Technical Note No. 36*. Frankfurt am Main : Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, 2010 <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a535671.pdf>
- [Petrov 2004] PETROV, Leonid: Study of the atmospheric pressure loading signal in very long baseline interferometry observations. In: *Journal of Geophysical Research* 109 (2004), Nr. B3. <http://dx.doi.org/10.1029/2003JB002500>. – DOI 10.1029/2003JB002500. – ISSN 0148–0227
- [Plank u. a. 2013] PLANK, L. ; SPICAKOVA, H. ; BÖHM, J. ; NILSSON, T. ; PANY, A. ; SCHUH, H.: Systematic errors of a VLBI determined TRF investigated by simulations. In: ALTAMIMI, Zuheir (Hrsg.) ; COLLILIEUX, Xavier (Hrsg.): *IAG Symposium REFAG2010*. 2013. – ISBN 978–3–642–32997–5
- [Poirier 2012] POIRIER, Mike: Westford Antenna. Version: 2012. <ftp://ivsc.gsfc.nasa.gov/pub/annual-report/2011/pdf/nswest.pdf>. In: BAVER, K. D. (Hrsg.) ; BEHREND, D. (Hrsg.): *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2011 Annual Report*. 2012, 123–126
- [Roman Dittrich 2012] ROMAN DITTRICH: *Untersuchung des Erdbebens in Japan am 11. März 2011: Bachelorarbeit*. Wien, Technische Universität Wien, Diss., 2012
- [Schindelegger 2014] SCHINDELEGGGER, Michael: *Erdrotation und globale dynamische Prozesse: Vorlesung an der TU Wien*. TU Wien, 2014
- [Schlüter 2000] SCHLÜTER, Wolfgang: Report of the IVS chair. Version: 2000. <http://ivsc.gsfc.nasa.gov/publications/gm2000/schlueter2/>. In: VANDENBERG, N. R. (Hrsg.) ; BAVER, K. D. (Hrsg.): *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2000 General Meeting Proceedings*. 2000, 11–15
- [Schlüter u. a. 2007] SCHLÜTER, Wolfgang ; BRANDL, Nikolaus ; DASSING, Reiner ; HASE, Hayo ; KLÜGEL, Thomas ; KILGER, Richard ; LAUBER, Pierre ; NEIDHARDT, Alexander ; PLÖTZ, Christian ; RIEPL, Stefan ; SCHREIBER, Ulrich: Fundamentalstation Wettzell - ein geodätisches Observatorium. In: MÜLLER, Jürgen (Hrsg.) ; SANDMANN, Stefan (Hrsg.) ; EICHHORN, Andreas (Hrsg.) ; THIEMANN, Karl-Heinz (Hrsg.): *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*. 2007, S. 158–167
- [Schuh u. Behrend 2012] SCHUH, H. ; BEHREND, D.: VLBI: A fascinating technique for geodesy and astrometry. In: *Journal of Geodynamics* 61 (2012), S. 68–80. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jog.2012.07.007>. – DOI 10.1016/j.jog.2012.07.007. – ISSN 02643707
- [Schuh u. Böhm 2013] SCHUH, H. ; BÖHM, J.: Very Long Baseline Interferometry for Geodesy and Astrometry. In: XU, Guochang (Hrsg.): *Sciences of geodesy-II*. Berlin and New York : Springer, 2013. – ISBN 978–3–642–28000–9, S. 339–376

- [Schuh 2000] SCHUH, Harald: Geodetic Analysis Overview. Version:2000. <ftp://ivsc.gsfc.nasa.gov/pub/general-meeting/2000/pdf/schuh1.pdf>. In: VANDENBERG, N. R. (Hrsg.) ; BAVER, K. D. (Hrsg.): *International VLBI Service for Geodesy and Astronomy 2000 General Meeting Proceedings*. 2000, 219–229
- [Schulte 1999] SCHULTE, Wipke: *Fachliche und didaktische Ausarbeitung der Vorlesung Mechanik und Wärmelehre*. [http://web.physik.rwth-aachen.de/~fluegge/Vorlesung/PhysIpub/Physik\\_1.pdf](http://web.physik.rwth-aachen.de/~fluegge/Vorlesung/PhysIpub/Physik_1.pdf). Version:1999
- [Smolentsev u. Dyakov 2012] SMOLENTSEV, Sergey ; DYAKOV, Andrei: Zelenchukskaya Radio Astronomical Observatory. Version:2012. <ftp://ivsc.gsfc.nasa.gov/pub/annual-report/2011/pdf/nszele.pdf>. In: BAVER, K. D. (Hrsg.) ; BEHREND, D. (Hrsg.): *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2011 Annual Report*. 2012, 135–138
- [Smolentsev u. Olifirov 2013] SMOLENTSEV, Sergey ; OLIFIROV, Valery: Badary Radio Astronomical Observatory. Version:2013. <ftp://ivsc.gsfc.nasa.gov/pub/annual-report/2012/pdf/nsbada.pdf>. In: BAVER, K. D. (Hrsg.) ; BEHREND, D. (Hrsg.) ; ARMSTRONG, K. (Hrsg.): *International VLBI Service for Geodesy and Astronomy 2012 Annual Report*. 2013, 75–78
- [Smolentsev u. Rahimov 2012] SMOLENTSEV, Sergey ; RAHIMOV, Ismail: Svetloe Radio Astronomical Observatory. Version:2012. <ftp://ivsc.gsfc.nasa.gov/pub/annual-report/2011/pdf/nssvet.pdf>. In: BAVER, K. D. (Hrsg.) ; BEHREND, D. (Hrsg.): *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2011 Annual Report*. 2012, 99–102
- [Spicakova u. a. 2010] SPICAKOVA, H. ; BÖHM, J. ; BÖHM, S. ; NILSSON, T. ; PANY, A. ; PLANK, L. ; TEKE, K. ; SCHUH, H.: Estimation of geodetic and geodynamical parameters with VieVS. Version:2010. <http://ivsc.gsfc.nasa.gov/publications/gm2010/spicakova.pdf>. In: BEHREND, D. (Hrsg.) ; BAVER, K. D. (Hrsg.): *International VLBI Service for Geodesy and Astronomy 2010 General Meeting Proceedings*. 2010, 202–206
- [Spicakova u. a. 2009] SPICAKOVA, H. ; BÖHM, J. ; ENGLICH, S. ; NILSSON, T. ; PANY, A. ; PLANK, L. ; WRESNIK, J. ; TEKE, K. ; SCHUH, H. ; HOBIGER, T. ; ICHIKAWA, R. ; KOYAMA, Y. ; GOTOH, T. ; OTSUBO, T. ; KUBOOKA, T.: The new Vienna VLBI Software VieVS. In: *Poster PS7-Th32 at IAG Symposium 2009*. 2009
- [Sun u. a. 2011] SUN, J. ; PANY, A. ; NILSSON, T. ; BÖHM, J. ; SCHUH, H.: Status and future plans for the VieVS scheduling package. Version:2011. <http://www.mpifr-bonn.mpg.de/20thEVGA>. In: ALEF, W. (Hrsg.) ; BERNHART, S. (Hrsg.) ; NOTHNAGEL, A. (Hrsg.): *Proceedings of the 20th European VLBI for Geodesy and Astrometry Working Meeting*. 2011, 44–48
- [Teke u. a. 2009] TEKE, K. ; BÖHM, J. ; SPICAKOVA, H. ; PANY, A. ; PLANK, L. ; SCHUH, H. ; TANIR, E.: Piecewise linear offsets for VLBI parameter estimation. Version:2009. <http://www.u-bordeaux1.fr/vlbi2009/index.php?numpage=13>. In: BOURDA, G. (Hrsg.) ; CHARLOT, P. (Hrsg.) ; COLLIOD, A. (Hrsg.): *Proceedings of the 19th European VLBI for Geodesy and Astrometry Working Meeting*. 2009, 63–67
- [van Dam 2010] VAN DAM, T.: *NCEP Derived 6-hourly, global surface displacements at 2.5 x 2.5 degree spacing*. [http://geophy.uni.lu/ggfc\\_atmosphere/NCEP-loading.html](http://geophy.uni.lu/ggfc_atmosphere/NCEP-loading.html). Version:2010
- [van den Dool, H. M. u. a. 1997] VAN DEN DOOL, H. M. ; SAHA, S. ; SCHEMM, J. ; HUANG, J.: A temporal interpolation method to obtain hourly atmospheric surface pressure tides in reanalysis 1979-1995. In: *Journal of Geophysical Research*. 1997, S. 22.013–22.024

- [Wijaya u. a. 2012] WIJAYA, D. D. ; BÖHM, J. ; SPICAKOVA, H. ; SCHINDELEGGGER, M. ; KARBON, M. ; SALSTEIN, D. ; SCHUH, H.: Determination of atmospheric pressure loading corrections and a new concept of reference pressure. In: *Journal of Geodesy*. 2012
- [Wresnik 2009] WRESNIK, J.: *Simulation für die neue Generation von VLBI-Systemen*. Wien, Technische Universität Wien, Diss., 2009. [http://geo.tuwien.ac.at/fileadmin/editors/GM/GM85\\_wresnik.pdf](http://geo.tuwien.ac.at/fileadmin/editors/GM/GM85_wresnik.pdf)

# Anhang I

Matlab-Code für die Programmierung der Ausgabe von VieVS:

```

1  %% -----Masterarbeit-----
2  %% ----Untersuchung von geophysikalischen Auflasteffekten mit der VLBI----
3  % Roman Dittrich, 0825149
4  % Hauptbetreuer: Johannes Böhm
5  % Nebenbetreuer: Hana Krásná
6  % Letzte Aktualisierung: 15.04.2015
7
8  clc
9  clear all
10 close all
11 format long g
12
13 %% -----Öffnen der Text-Datei-----
14 % und Stationsnamen, sowie die Koordinaten in eine Matrix speichern
15 fid=fopen('C:\Users\Roman Dittrich\Desktop\Masterarbeit_NEU\VieVS\TRF\create\superstationio
16 %fid=fopen('viewstrf.csv')
17
18 if fid < 0
19     fprintf('Fehler');
20 end
21
22 i=1;
23 stationsnamen = cell(152,1);
24 while 1
25     zei=fgetl(fid);
26     if zei <0
27         break
28     end
29     a=sscanf(zei,'%c',1);
30     if strcmp('%',a) ~= 1
31         tmp = strsplit(zei);
32         stationsnamen{i} = tmp{1};
33         xyz(i,1:3) = [str2num(tmp{2}), str2num(tmp{3}), str2num(tmp{4})];
34         i = i + 1;
35     end
36     if zei < 0
37         fclose(fid);
38         break
39     end
40 end
41
42 stationskoord = cell(152,4);
43 for k = 1:152
44     stationskoord{k,1} = stationsnamen{k};
45     stationskoord{k,2} = xyz(k,1);
46     stationskoord{k,3} = xyz(k,2);
47     stationskoord{k,4} = xyz(k,3);
48 end
49
50 %% ----Ausgabe der Zeitreihe 2000–2012 von der gewünschten Station-----
51
52 %% -----Auflistung aller Stationsnamen-----
53 disp([stationsnamen(1:25),stationsnamen(26:50),stationsnamen(51:75),...
54     stationsnamen(76:100),stationsnamen(101:125),stationsnamen(126:150)])
55
56 %% -----Eingabe über die Tastatur-----

```

```

57 station = input('Station = ','s');
58 if isempty(station)
59     disp('Keine Station eingegeben');
60     station = -Inf;
61 end
62
63 %% -----Transformation VTRF -> Horizontsystem-----
64 % Koordinaten der Station aus VieVS - TRF - create - superstation -
65 % neededFiles - vievsTRF in [m]
66
67 for k = 1:152
68     if strcmp(stationskoord(k,1), station)
69         stationsname = cell2mat(stationskoord(k,1));
70         x_station = cell2mat(stationskoord(k,2));
71         y_station = cell2mat(stationskoord(k,3));
72         z_station = cell2mat(stationskoord(k,4));
73     end
74 end
75
76
77
78
79 % Bildschirmausgabe der Station und der Koordinaten
80 disp(stationsname)
81 disp('x [m]:')
82 disp(x_station)
83 disp('y [m]:')
84 disp(y_station)
85 disp('z [m]:')
86 disp(z_station)
87
88 %x_wettzell = 4075539.8373
89 %y_wettzell = 931735.3109
90 %z_wettzell = 4801629.4016
91
92 % Länge
93 lambda = atan2(y_station,x_station);
94 % Breite
95 phi = asin(z_station/(sqrt(x_station^2+y_station^2+z_station^2)));
96 % Spiegelmatrix um x
97 Sx = [-1 0 0;0 1 0;0 0 1];
98 % Drehmatrix um y
99 Ry = [cos(pi/2-phi) 0 -sin(pi/2-phi);0 1 0;sin(pi/2-phi) 0 cos(pi/2-phi)];
100 % Drehmatrix um z
101 Rz = [cos(lambda) sin(lambda) 0;-sin(lambda) cos(lambda) 0;0 0 1];
102
103 R = Sx*Ry*Rz;
104
105 %% -Ordner-Array erstellen in denen die Berechnungen durchgeführt werden---
106 ordner = cell(16,1);
107 ordner{1} = 'TEST3';
108 ordner{2} = 'TEST4';
109 ordner{3} = 'TEST5';
110 ordner{4} = 'TEST6';
111 ordner{5} = 'TEST7';
112 ordner{6} = 'TEST8';
113 ordner{7} = 'TEST9';
114 ordner{8} = 'TEST10';
115 ordner{9} = 'TEST11';
116 ordner{10} = 'TEST12';
117 ordner{11} = 'TEST13';

```

```

118 ordner{12} = 'TEST14';
119 ordner{13} = 'TEST15';
120 ordner{14} = 'TEST16';
121 ordner{15} = 'TEST17';
122 ordner{16} = 'TEST18';
123
124 %% -----Array für Stationskorrturen-----
125 statkorr = cell(16,1);
126 statkorr{1} = ['Solid Earth Tides, ', 'Pole Tide, ', 'Ocean Pole Tide, ', ...
127 'Thermal Antenna Deformation'];
128 statkorr{2} = ['Solid Earth Tides, ', 'Tidal Ocean Loading, ', 'Pole Tide, ', ...
129 'Ocean Pole Tide, ', 'Thermal Antenna Deformation'];
130 statkorr{3} = ['Solid Earth Tides, ', 'Tidal Atmosphere Loading, ', ...
131 'Pole Tide, ', 'Ocean Pole Tide, ', 'Thermal Antenna Deformation'];
132 statkorr{4} = ['Solid Earth Tides, ', 'Non-Tidal Atmosphere Loading, ', ...
133 'Pole Tide, ', 'Ocean Pole Tide, ', 'Thermal Antenna Deformation'];
134 statkorr{5} = ['Solid Earth Tides, ', 'Pole Tide, ', 'Ocean Pole Tide, ', ...
135 'Hydrology Loading, ', 'Thermal Antenna Deformation'];
136 statkorr{6} = ['Solid Earth Tides, ', 'Tidal Ocean Loading, ', ...
137 'Tidal Atmosphere Loading, ', 'Pole Tide, ', 'Ocean Pole Tide, ', ...
138 'Thermal Antenna Deformation'];
139 statkorr{7} = ['Solid Earth Tides, ', 'Tidal Ocean Loading, ', ...
140 'Non-Tidal Atmosphere Loading, ', 'Pole Tide, ', 'Ocean Pole Tide, ', ...
141 'Thermal Antenna Deformation'];
142 statkorr{8} = ['Solid Earth Tides, ', 'Tidal Ocean Loading, ', 'Pole Tide, ', ...
143 'Ocean Pole Tide, ', 'Hydrology Loading, ', 'Thermal Antenna Deformation'];
144 statkorr{9} = ['Solid Earth Tides, ', 'Tidal Atmosphere Loading, ', ...
145 'Non-Tidal Atmosphere Loading, ', 'Pole Tide, ', 'Ocean Pole Tide, ', ...
146 'Thermal Antenna Deformation'];
147 statkorr{10} = ['Solid Earth Tides, ', 'Tidal Atmosphere Loading, ', ...
148 'Pole Tide, ', 'Ocean Pole Tide, ', 'Hydrology Loading, ', ...
149 'Thermal Antenna Deformation'];
150 statkorr{11} = ['Solid Earth Tides, ', 'Non-Tidal Atmosphere Loading, ', ...
151 'Pole Tide, ', 'Ocean Pole Tide, ', 'Hydrology Loading, ', ...
152 'Thermal Antenna Deformation'];
153 statkorr{12} = ['Solid Earth Tides, ', 'Tidal Ocean Loading, ', ...
154 'Tidal Atmosphere Loading, ', 'Non-Tidal Atmosphere Loading, ', ...
155 'Pole Tide, ', 'Ocean Pole Tide, ', 'Thermal Antenna Deformation'];
156 statkorr{13} = ['Solid Earth Tides, ', 'Tidal Ocean Loading, ', ...
157 'Tidal Atmosphere Loading, ', 'Pole Tide, ', 'Ocean Pole Tide, ', ...
158 'Hydrology Loading, ', 'Thermal Antenna Deformation'];
159 statkorr{14} = ['Solid Earth Tides, ', 'Tidal Ocean Loading, ', ...
160 'Non-Tidal Atmosphere Loading, ', 'Pole Tide, ', 'Ocean Pole Tide, ', ...
161 'Hydrology Loading, ', 'Thermal Antenna Deformation'];
162 statkorr{15} = ['Solid Earth Tides, ', 'Tidal Atmosphere Loading, ', ...
163 'Non-Tidal Atmosphere Loading, ', 'Pole Tide, ', 'Ocean Pole Tide, ', ...
164 'Hydrology Loading, ', 'Thermal Antenna Deformation'];
165 statkorr{16} = ['Solid Earth Tides, ', 'Tidal Ocean Loading, ', ...
166 'Tidal Atmosphere Loading, ', 'Non-Tidal Atmosphere Loading, ', ...
167 'Pole Tide, ', 'Ocean Pole Tide, ', 'Hydrology Loading, ', ...
168 'Thermal Antenna Deformation'];
169
170 %% Matrix um Stdabw, Amplituden und formalen Fehler zu speichern
171 stdabw = cell(16,6);
172
173
174 %% ---For-Schleife um in die Ordner hinein zu springen und zu berechnen----
175 for n = 1:size(ordner,1)
176     cd(ordner{n})
177
178     %% -Alle Dateien in einer Liste speichern und eine 0-Matrix erstellen---

```

```

179     liste = dir('x_*.mat');
180     allesessions = length(liste);
181     alledaten = cell(6,allesessions); % Nullmatrix
182     x = 0;
183
184     %% -----Nullmatrix befüllen-----
185     % mit Stationsnamen, Werten, Abweichungen und dem julianischen Datum
186     idstation = 0;
187     for k = 1:allesessions
188         alledaten{1,k} = load(liste(k).name);
189         for i = 1:length(alledaten{1,k}.x_.antenna)
190             if strcmp(alledaten{1,k}.x_.antenna(i).name, station, 4)
191                 idstation = i;
192             end
193         end
194
195         if idstation > 0
196             alledaten{2,k} = [alledaten{1,k}.x_.coorx(idstation).val/100;
197                             alledaten{1,k}.x_.coory(idstation).val/100;
198                             alledaten{1,k}.x_.coorz(idstation).val/100];
199
200             alledaten{3,k} = [alledaten{1,k}.x_.coorx(idstation).mx;
201                             alledaten{1,k}.x_.coory(idstation).mx;
202                             alledaten{1,k}.x_.coorz(idstation).mx];
203
204             alledaten{4,k} = [alledaten{1,k}.x_.coorx(idstation).mjd];
205
206             % Zuschläge im Horizontsystem
207             alledaten{5,k} = R*[alledaten{1,k}.x_.coorx(idstation).val/100;
208                                alledaten{1,k}.x_.coory(idstation).val/100;
209                                alledaten{1,k}.x_.coorz(idstation).val/100];
210
211             % Standardabweichung im Horizontsystem
212             alledaten{6,k} = R*[alledaten{1,k}.x_.coorx(idstation).mx;
213                                alledaten{1,k}.x_.coory(idstation).mx;
214                                alledaten{1,k}.x_.coorz(idstation).mx];
215         end
216
217         % Zählen der nicht verwendeten Sessions
218         if idstation < 1
219             %alledaten{1,k} = load(liste(k+1).name);
220             x = x+1;
221         end
222
223         % Abbruchbedingung
224         if x > allesessions-10
225             disp('Diese Station hat zu wenig Messwerte')
226
227             run('C:\Users\Roman Dittrich\Desktop\Masterarbeit_NEU\VieVS\DATA\LEVEL3\ma
228         end
229
230         idstation = 0;
231     end
232
233     %% Nur die Spalten mit der angegebenen Station in eine Matrix speichern
234     auswahl = cell(6,allesessions-x); % Nullmatrix
235     z = 0;
236
237     for k = 1:allesessions
238         if alledaten{4,k} > 0
239             z = z+1;

```

```

240     auswahl{1,z} = alledaten{1,k};
241     for i = 1:length(alledaten{1,k}.x_.antenna)
242         if strcmp(alledaten{1,k}.x_.antenna(i).name, station, 4)
243             idstation = i;
244         end
245     end
246     auswahl{2,z} = [alledaten{1,k}.x_.coorx(idstation).val/100;
247                   alledaten{1,k}.x_.coory(idstation).val/100;
248                   alledaten{1,k}.x_.coorz(idstation).val/100];
249
250     auswahl{3,z} = [alledaten{1,k}.x_.coorx(idstation).mx;
251                   alledaten{1,k}.x_.coory(idstation).mx;
252                   alledaten{1,k}.x_.coorz(idstation).mx];
253
254     auswahl{4,z} = [alledaten{1,k}.x_.coorx(idstation).mjd];
255
256     auswahl{5,z} = R*[alledaten{1,k}.x_.coorx(idstation).val/100;
257                     alledaten{1,k}.x_.coory(idstation).val/100;
258                     alledaten{1,k}.x_.coorz(idstation).val/100];
259
260     auswahl{6,z} = R*[alledaten{1,k}.x_.coorx(idstation).mx;
261                     alledaten{1,k}.x_.coory(idstation).mx;
262                     alledaten{1,k}.x_.coorz(idstation).mx];
263
264     end
265 end
266 %% -----Erstellte Matrix nach julianischem Datum sortieren-----
267
268 sortiert = (sortrows(auswahl',4))';
269
270 %% -----Standardabweichung-----
271 X = cell(1,allesessions-x);
272 Y = cell(1,allesessions-x);
273 Z = cell(1,allesessions-x);
274
275 for k = 1:allesessions-x
276     X{1,k} = sortiert{5,k}(1,1);
277     Y{1,k} = sortiert{5,k}(2,1);
278     Z{1,k} = sortiert{5,k}(3,1);
279 end
280
281 Xmat = cell2mat(X);
282 Ymat = cell2mat(Y);
283 Zmat = cell2mat(Z);
284
285 % Standardabweichung * 100 um auf [cm] zu kommen
286 std_x = std(Xmat,1)*100;
287 std_y = std(Ymat,1)*100;
288 std_z = std(Zmat,1)*100;
289
290 %% -Parameter für Ausgleichung (Jährliches und halbjährliches Signal)--
291 X0 = 0;
292 x_Ac = 0;
293 x_As = 0;
294 x_Ac2 = 0;
295 x_As2 = 0;
296
297 Y0 = 0;
298 y_Ac = 0;
299 y_As = 0;
300 y_Ac2 = 0;

```

```

301     y_As2 = 0;
302
303     Z0 = 0;
304     z_Ac = 0;
305     z_As = 0;
306     z_Ac2 = 0;
307     z_As2 = 0;
308
309     t0 = 51544.5;
310
311     %% -----Ausgleichung NORD-----
312     x0 = [X0; x_Ac; x_As; x_Ac2; x_As2];
313     l = zeros(allesessions-x,1);
314     t = zeros(allesessions-x,1);
315     Sigmall = zeros(allesessions-x,allesessions-x);
316     for k = 1:allesessions-x
317         l(k,1) = sortiert{5,k}(1,1);
318         Sigmall(k,k) = (sortiert{6,k}(1,1))^2;
319         t(k,1) = sortiert{4,k};
320     end
321     P11 = inv(Sigmall);
322     omega = 2*pi/365.2425;
323
324
325     Abbruch_S = 1;
326     while Abbruch_S > 10^(-12)
327         X0 = x0(1);
328         x_Ac = x0(2);
329         x_As = x0(3);
330         x_Ac2 = x0(4);
331         x_As2 = x0(5);
332
333         l0 = X0 + x_Ac*cos((t-t0)*2*pi/365.2425)...
334             + x_As*sin((t-t0)*2*pi/365.2425)...
335             + x_Ac2*cos((t-t0)*2*pi/182.62125)...
336             + x_As2*sin((t-t0)*2*pi/182.62125);
337         deltal = l -l0;
338
339
340         A(:,2) = cos((t-t0)*2*pi/365.2425);
341         A(:,3) = sin((t-t0)*2*pi/365.2425);
342         A(:,4) = cos((t-t0)*2*pi/182.62125);
343         A(:,5) = sin((t-t0)*2*pi/182.62125);
344         A(:,1) = 1;
345
346         %x_Qxx = inv(A'*P11*A);
347         x_Qxx = inv(A'*A);
348         %deltaxdach = x_Qxx*A'*P11*deltal;
349         deltaxdach = x_Qxx*A'*deltal;
350         deltaldach = A*deltaxdach;
351         x_ldach = l0 + deltaldach;
352         xdach = x0 + deltaxdach;
353
354         X0 = xdach(1,1);
355         x_Ac = xdach(2,1);
356         x_As = xdach(3,1);
357         x_Ac2 = xdach(4,1);
358         x_As2 = xdach(5,1);
359
360         x0 = xdach;
361

```

```

362     Abbruch_S = max(abs(deltaxdach));
363 end
364
365 X0dach = X0;
366 x_Acdach = x_Ac;
367 x_Asdach = x_As;
368 x_Ac2dach = x_Ac2;
369 x_As2dach = x_As2;
370
371 % Mit 100 multipliziert um auf cm zu kommen
372 x_amplitude = sqrt(x_Acdach^2 + x_Asdach^2)*100;
373 x2_amplitude = sqrt(x_Ac2dach^2 + x_As2dach^2)*100;
374
375 %% -----Ausgleichung OST-----
376 y0 = [Y0; y_Ac; y_As; y_Ac2; y_As2];
377 l = zeros(allesessions-x,1);
378 t = zeros(allesessions-x,1);
379 Sigmall = zeros(allesessions-x,allesessions-x);
380 for k = 1:allesessions-x
381     l(k,1) = sortiert{5,k}(2,1);
382     Sigmall(k,k) = (sortiert{6,k}(2,1))^2;
383     t(k,1) = sortiert{4,k};
384 end
385 P11 = inv(Sigmall);
386 omega = 2*pi/365.2425;
387
388
389 Abbruch_S = 1;
390 while Abbruch_S > 10^(-12)
391     Y0 = y0(1);
392     y_Ac = y0(2);
393     y_As = y0(3);
394     y_Ac2 = y0(4);
395     y_As2 = y0(5);
396
397     10 = Y0 + y_Ac*cos((t-t0)*2*pi/365.2425)...
398           + y_As*sin((t-t0)*2*pi/365.2425)...
399           + y_Ac2*cos((t-t0)*2*pi/182.62125)...
400           + y_As2*sin((t-t0)*2*pi/182.62125);
401     deltal = 1 -10;
402
403
404     A(:,2) = cos((t-t0)*2*pi/365.2425);
405     A(:,3) = sin((t-t0)*2*pi/365.2425);
406     A(:,4) = cos((t-t0)*2*pi/182.62125);
407     A(:,5) = sin((t-t0)*2*pi/182.62125);
408     A(:,1) = 1;
409
410     %y_Qxx = inv(A'*P11*A);
411     y_Qxx = inv(A'*A);
412     %deltaxdach = y_Qxx*A'*P11*deltal;
413     deltaydach = y_Qxx*A'*deltal;
414     deltaldach = A*deltaydach;
415     y_ldach = 10 + deltaldach;
416     ydach = y0 + deltaydach;
417
418     Y0 = ydach(1,1);
419     y_Ac = ydach(2,1);
420     y_As = ydach(3,1);
421     y_Ac2 = ydach(4,1);
422     y_As2 = ydach(5,1);

```

```

423
424     y0 = ydach;
425
426     Abbruch_S = max(abs(deltaydach));
427 end
428
429     Y0dach = Y0;
430     y_Acdach = y_Ac;
431     y_Asdach = y_As;
432     y_Ac2dach = y_Ac2;
433     y_As2dach = y_As2;
434
435     % Mit 100 multipliziert um auf cm zu kommen
436     y_amplitude = sqrt(y_Acdach^2 + y_Asdach^2)*100;
437     y2_amplitude = sqrt(y_Ac2dach^2 + y_As2dach^2)*100;
438
439     %% -----Ausgleichung HÖHE-----
440     z0 = [z_Ac; z_As; z_Ac2; z_As2; Z0];
441     l = zeros(allesessions-x,1);
442     t = zeros(allesessions-x,1);
443     Sigmall = zeros(allesessions-x,allesessions-x);
444     for k = 1:allesessions-x
445         l(k,1) = sortiert{5,k}(3,1);
446         Sigmall(k,k) = (sortiert{6,k}(3,1))^2;
447         t(k,1) = sortiert{4,k};
448     end
449     P11 = inv(Sigmall);
450     omega = 2*pi/365.2425;
451
452
453     Abbruch_S = 1;
454     while Abbruch_S > 10^(-12)
455         Z0 = z0(1);
456         z_Ac = z0(2);
457         z_As = z0(3);
458         z_Ac2 = z0(4);
459         z_As2 = z0(5);
460
461
462         l0 = Z0 + z_Ac*cos((t-t0)*2*pi/365.2425)...
463             + z_As*sin((t-t0)*2*pi/365.2425)...
464             + z_Ac2*cos((t-t0)*2*pi/182.62125)...
465             + z_As2*sin((t-t0)*2*pi/182.62125);
466         deltal = l -l0;
467
468
469         A(:,2) = cos((t-t0)*2*pi/365.2425);
470         A(:,3) = sin((t-t0)*2*pi/365.2425);
471         A(:,4) = cos((t-t0)*2*pi/182.62125);
472         A(:,5) = sin((t-t0)*2*pi/182.62125);
473         A(:,1) = 1;
474
475         %z_Qxx = inv(A'*P11*A);
476         z_Qxx = inv(A'*A);
477         %deltaxdach = z_Qxx*A'*P11*deltal;
478         deltazdach = z_Qxx*A'*deltal;
479         deltaldach = A*deltazdach;
480         z_ldach = l0 + deltaldach;
481         zdach = z0 + deltazdach;
482
483         Z0 = zdach(1,1);

```

```

484     z_Ac = zdach(2,1);
485     z_As = zdach(3,1);
486     z_Ac2 = zdach(4,1);
487     z_As2 = zdach(5,1);
488
489     z0 = zdach;
490
491     Abbruch_S = max(abs(deltaxdach));
492 end
493
494 Z0dach = Z0;
495 z_Acdach = z_Ac;
496 z_Asdach = z_As;
497 z_Ac2dach = z_Ac2;
498 z_As2dach = z_As2;
499
500 % Mit 100 multipliziert um auf cm zu kommen
501 z_amplitude = sqrt(z_Acdach^2 + z_Asdach^2)*100;
502 z2_amplitude = sqrt(z_Ac2dach^2 + z_As2dach^2)*100;
503
504
505 % Fehlerfortpflanzung
506 v = A*zdach-1;
507 diagonale = [z_Qxx(1,1) z_Qxx(2,2) z_Qxx(3,3) z_Qxx(4,4) z_Qxx(5,5)];
508 Fehler = sqrt((v'*v)/(length(1)-length(zdach))*diagonale);
509
510 z_amplitude_Fehler = sqrt((((2*z_Acdach)/(sqrt(z_Acdach^2 + z_Asdach^2)*2)) ...
511     * Fehler(2))^2 + (((2*z_Asdach)/(sqrt(z_Acdach^2 + z_Asdach^2)*2)) ...
512     * Fehler(3))^2)*100;
513
514 z2_amplitude_Fehler = sqrt((((2*z_Ac2dach)/(sqrt(z_Ac2dach^2 + z_As2dach^2)*2)) ...
515     * Fehler(4))^2 + (((2*z_As2dach)/(sqrt(z_Ac2dach^2 + z_As2dach^2)*2)) ...
516     * Fehler(5))^2)*100;
517
518 %% -----Plotten-----
519 % Zeitreihe in Nord-Richtung
520 set(0,'DefaultFigurePosition',get(0,'Screensize'))
521 figure(n)
522 subplot(3,1,1)
523 for k = 1:allesessions-x
524     nord(k) = sortiert{5,k}(1,1);
525     datum(k) = sortiert{4,k};
526     errornord(k) = (sortiert{6,k}(1,1))/100;
527 end
528
529 %errorbar(datum, nord, errornord, 'xr')
530 plot(datum, nord, 'xr')
531 hold on
532 plot(datum, x_ldach, '-k')
533 hold off
534 title(['Zeitreihen der Station ', station]; ['Stationskorrekturen: '...
535     ,statkorr{n}]))
536 ylabel('NORD [m]')
537 text(56400,0.03,['Stabw NORD [cm]: \newline', num2str(std_x)],...
538     'clipping', 'off')
539 text(56400,0.01,['A (Jahr) [cm]: \newline', num2str(x_amplitude)],...
540     'clipping', 'off')
541 text(56400,-0.01,['A (Halbjahr) [cm]: \newline',...
542     num2str(x2_amplitude)], 'clipping', 'off')
543 Ticks = 51544.5:365.25:56292.75;
544 set(gca, 'XTickMode', 'manual', 'XTick', Ticks, 'xlim', [51500 56350]);

```

```

545     ylim([-0.04 0.04])
546
547     % Zeitreihe in Ost-Richtung
548     subplot(3,1,2)
549     for k = 1:allesessions-x
550         ost(k) = sortiert{5,k}(2,1);
551         datum(k) = sortiert{4,k};
552         errorost(k) = (sortiert{6,k}(2,1))/100;
553     end
554
555     %errorbar(datum, ost, errorost, 'xr')
556     plot(datum, ost, 'xr')
557     hold on
558     plot(datum, y_ldach, '-k')
559     hold off
560     ylabel('OST [m]')
561     text(56400,0.03,['Stabw OST [cm]: \newline', num2str(std_y)],...
562          'clipping', 'off')
563     text(56400,0.01,['A (Jahr) [cm]: \newline', num2str(y_amplitude)],...
564          'clipping', 'off')
565     text(56400,-0.01,['A (Halbjahr) [cm]: \newline',...
566                  num2str(y2_amplitude)], 'clipping', 'off')
567     set(gca, 'XTickMode', 'manual', 'XTick', Ticks, 'xlim', [51500 56350]);
568     ylim([-0.04 0.04])
569
570     % Zeitreihe in Höhe-Richtung
571     subplot(3,1,3)
572     for k = 1:allesessions-x
573         up(k) = sortiert{5,k}(3,1);
574         datum(k) = sortiert{4,k};
575         errorup(k) = (sortiert{6,k}(3,1))/100;
576     end
577
578     %errorbar(datum, up, errorup, 'xr')
579     plot(datum, up, 'xr')
580     hold on
581     plot(datum, z_ldach, '-k')
582     hold off
583     xlabel('Sessions - julianisches Datum')
584     ylabel('HÖHE [m]')
585     text(56400,0.03,['Stabw HÖHE [cm]: \newline', num2str(std_z)],...
586          'clipping', 'off')
587     text(56400,0.01,['A (Jahr) [cm]: \newline', num2str(z_amplitude)],...
588          'clipping', 'off')
589     text(56400,-0.01,['A (Halbjahr) [cm]: \newline',...
590                  num2str(z2_amplitude)], 'clipping', 'off')
591     % text(56400,-0.03,['Formaler Fehler: \newline',...
592           num2str(Fehler)], 'clipping', 'off')
593     set(gca, 'XTickMode', 'manual', 'XTick', Ticks, 'xlim', [51500 56350]);
594     ylim([-0.04 0.04])
595
596     %% Speichern von Stdabw und Amplituden in die Matrix
597     stdabw{n,1} = std_z;
598     stdabw{n,2} = z_amplitude;
599     stdabw{n,3} = z2_amplitude;
600     stdabw{n,4} = Fehler;
601     stdabw{n,5} = z_amplitude_Fehler;
602     stdabw{n,6} = z2_amplitude_Fehler;
603
604     cd ..
605

```

```
606 end
607
608 %% Speichern von Standardabweichung, jährl. und halbjährl. Amplitude
609 filename = ['stdabw_' stationsname];
610 save(filename, 'stdabw')
```

## Anhang II

Matlab-Code für die Programmierung der Weltkarte:

```
1
2 set(0,'DefaultFigurePosition',get(0,'ScreenSize'))
3 figure
4 axesm('MapProjection','miller','grid','on','MLineLocation',30,...
5       'PLineLocation',30,'GLineWidth',1,'GColor','k','MeridianLabel','on',...
6       'ParallelLabel','on','LabelFormat','none','FontSize',8,'GLineWidth',0.05,...
7       'GLineStyle','.')
8 load coast
9 %geoshow(lat,long,'color','k')
10 geoshow('ne_50m_admin_0_countries.shp')
11 geoshow('landareas.shp','FaceColor',[0.9 0.9 0.9])
12
13 % Algopark
14 lat = 45.956;
15 lon = -78.067;
16 plotm(lat,lon,'.','color','r')
17 textm(45, -76, 'ALGOPARK','color','r','FontSize',8,'FontWeight','bold')
18
19 % Badary
20 lat = 51.767;
21 lon = 102.233;
22 plotm(lat,lon,'.','color','r')
23 textm(54, 80, 'BADARY','color','r','FontSize',8,'FontWeight','bold')
24
25 % Fortleza
26 lat = -3.867;
27 lon = -38.416;
28 plotm(lat,lon,'.','color','r')
29 textm(-3, -36, 'FORTLEZA','color','r','FontSize',8,'FontWeight','bold')
30
31 % FORTORDS
32 lat = 36.583;
33 lon = -121.767;
34 plotm(lat,lon,'.','color','r')
35 textm(36, -119, 'FORDORDS','color','r','FontSize',8,'FontWeight','bold')
36
37 % HARTRAO
38 lat = -25.883;
39 lon = 27.683;
40 plotm(lat,lon,'.','color','r')
41 textm(-28, 30, 'HARTRAO','color','r','FontSize',8,'FontWeight','bold')
42
43 % Hobart
44 lat = -42.806;
45 lon = 147.438;
46 plotm(lat,lon,'.','color','r')
47 textm(-40, 150, 'HOBART','color','r','FontSize',8,'FontWeight','bold')
48
49 % Kokee Park
50 lat = 22.126;
51 lon = -159.665;
52 plotm(lat,lon,'.','color','r')
53 textm(24, -157, 'KOOKEE PARK','color','r','FontSize',8,'FontWeight','bold')
54
55 % Matera
56 lat = 40.633;
```

```
57 lon = 16.7;
58 plotm(lat,lon, '.', 'color', 'r')
59 textm(38, 19, 'MATERA', 'color', 'r', 'FontSize', 8, 'FontWeight', 'bold')
60
61 % Medicina
62 lat = 44.517;
63 lon = 11.633;
64 plotm(lat,lon, '.', 'color', 'r')
65 textm(46, -15, 'MEDICINA', 'color', 'r', 'FontSize', 8, 'FontWeight', 'bold')
66
67 % Nyales20
68 lat = 78.933;
69 lon = 11.983;
70 plotm(lat,lon, '.', 'color', 'r')
71 textm(77, -15, 'NYALES20', 'color', 'r', 'FontSize', 8, 'FontWeight', 'bold')
72
73 % Onsala60
74 lat = 57.383;
75 lon = 11.917;
76 plotm(lat,lon, '.', 'color', 'r')
77 textm(60, -19, 'ONSALA60', 'color', 'r', 'FontSize', 8, 'FontWeight', 'bold')
78
79 % Svetloe
80 lat = 60.533;
81 lon = 29.783;
82 plotm(lat,lon, '.', 'color', 'r')
83 textm(60, 32, 'SVETLOE', 'color', 'r', 'FontSize', 8, 'FontWeight', 'bold')
84
85 % Tigoconc
86 lat = -36.833;
87 lon = -73.017;
88 plotm(lat,lon, '.', 'color', 'r')
89 textm(-36, -103, 'TIGOCONC', 'color', 'r', 'FontSize', 8, 'FontWeight', 'bold')
90
91 % Tsukub32
92 lat = 36.217;
93 lon = 140.1;
94 plotm(lat,lon, '.', 'color', 'r')
95 textm(36, 142, 'TSUKUB32', 'color', 'r', 'FontSize', 8, 'FontWeight', 'bold')
96
97 % Westford
98 lat = 42.617;
99 lon = -71.483;
100 plotm(lat,lon, '.', 'color', 'r')
101 textm(41, -69, 'WESTFORD', 'color', 'r', 'FontSize', 8, 'FontWeight', 'bold')
102
103 % Wettzell
104 lat = 49.133;
105 lon = 12.867;
106 plotm(lat,lon, '.', 'color', 'r')
107 textm(50, 15, 'WETTZELL', 'color', 'r', 'FontSize', 8, 'FontWeight', 'bold')
108
109 % Zelenchk
110 lat = 43.783;
111 lon = 41.567;
112 plotm(lat,lon, '.', 'color', 'r')
113 textm(44, 43, 'ZELENCHK', 'color', 'r', 'FontSize', 8, 'FontWeight', 'bold')
```

## Anhang III

Matlab-Code für die Programmierung der Barplots:

```

1  %% -----Barplots-----
2
3  clc
4  clear all
5  close all
6  format long g
7
8  %% -Ordner-Array erstellen in denen die Berechnungen durchgeführt werden---
9  ordner = cell(18,1);
10 ordner{1} = 'stdabw_ALGOPARK.mat';
11 ordner{2} = 'stdabw_BADARY.mat';
12 ordner{3} = 'stdabw_FORTLEZA.mat';
13 ordner{4} = 'stdabw_FORTORDS.mat';
14 ordner{5} = 'stdabw_GILCREEK.mat';
15 ordner{6} = 'stdabw_HART15M.mat';
16 ordner{7} = 'stdabw_HOBART12.mat';
17 ordner{8} = 'stdabw_KOKEE.mat';
18 ordner{9} = 'stdabw_MATERA.mat';
19 ordner{10} = 'stdabw_MEDICINA.mat';
20 ordner{11} = 'stdabw_NYALES20.mat';
21 ordner{12} = 'stdabw_ONSALA60.mat';
22 ordner{13} = 'stdabw_SVETLOE.mat';
23 ordner{14} = 'stdabw_TIGOCONC.mat';
24 ordner{15} = 'stdabw_TSUKUB32.mat';
25 ordner{16} = 'stdabw_WESTFORD.mat';
26 ordner{17} = 'stdabw_WETTZELL.mat';
27 ordner{18} = 'stdabw_ZELENCHK.mat';
28
29 %% -----Stations-Array mit den Stationsnamen-----
30 station = cell(18,6);
31 station{1} = 'ALGOPARK';
32 station{2} = 'BADARY';
33 station{3} = 'FORTLEZA';
34 station{4} = 'FORTORDS';
35 station{5} = 'GILCREEK';
36 station{6} = 'HART15M / HARTRAO';
37 station{7} = 'HOBART12 / HOBART26';
38 station{8} = 'KOKEE';
39 station{9} = 'MATERA';
40 station{10} = 'MEDICINA';
41 station{11} = 'NYALES20';
42 station{12} = 'ONSALA60';
43 station{13} = 'SVETLOE';
44 station{14} = 'TIGOCONC';
45 station{15} = 'TSUKUB32';
46 station{16} = 'WESTFORD';
47 station{17} = 'WETTZELL';
48 station{18} = 'ZELENCHK';
49
50 %% -----Schleife um für alle Stationen die Plots zu erstellen-----
51 for n = 1:size(ordner,1)
52 % Laden der Datei
53 load (ordner{n})
54
55 % Befüllen des Station-Arrays mit der Differenz der Standardabweichung der
56 % ozeanischen Korrektur

```

```

57 station{n,2} = stdabw{1,1} - stdabw{2,1};
58
59 % Befüllen des Station-Arrays mit der Differenz der Standardabweichung der
60 % atmosphärischen Korrektur
61 station{n,3} = stdabw{1,1} - stdabw{9,1};
62
63 % Befüllen des Station-Arrays mit der Differenz der Standardabweichung und
64 % der Differenzen der Amplituden der hydrologischen Korrektur
65 station{n,4} = stdabw{1,1} - stdabw{5,1};
66 station{n,5} = stdabw{1,2} - stdabw{5,2};
67 station{n,6} = stdabw{1,3} - stdabw{5,3};
68
69 % Vektor erstellen für die Barplots
70 x = [stdabw{1,1} stdabw{2,1} stdabw{3,1} stdabw{4,1} stdabw{5,1} ...
71      stdabw{6,1} stdabw{7,1} stdabw{8,1} stdabw{9,1} stdabw{10,1} ...
72      stdabw{11,1} stdabw{12,1} stdabw{13,1} stdabw{14,1} stdabw{15,1} ...
73      stdabw{16,1}];
74
75 y = [stdabw{1,2} stdabw{2,2} stdabw{3,2} stdabw{4,2} stdabw{5,2} ...
76      stdabw{6,2} stdabw{7,2} stdabw{8,2} stdabw{9,2} stdabw{10,2} ...
77      stdabw{11,2} stdabw{12,2} stdabw{13,2} stdabw{14,2} stdabw{15,2} ...
78      stdabw{16,2}];
79
80 z = [stdabw{1,3} stdabw{2,3} stdabw{3,3} stdabw{4,3} stdabw{5,3} ...
81      stdabw{6,3} stdabw{7,3} stdabw{8,3} stdabw{9,3} stdabw{10,3} ...
82      stdabw{11,3} stdabw{12,3} stdabw{13,3} stdabw{14,3} stdabw{15,3} ...
83      stdabw{16,3}];
84
85 % Plotten
86 set(0, 'DefaultFigurePosition', get(0, 'Screensize'))
87 figure(n)
88 subplot(1,3,1)
89 bar(x, 'r')
90 ylabel('Standardabweichung [cm]')
91 xlabel('Kombinationen der Stationskorrekturen')
92 subplot(1,3,2)
93 bar(y, 'b')
94 title({'Standardabweichung (rot), jährliche Amplitude (blau) und ', ...
95       'halbjährliche Amplitude (grün) der verschiedenen Kombinationen von ', ...
96       'Korrekturmodellen der Station ', station{n,1}], [''])
97 ylabel('jährliche Amplitude [cm]')
98 xlabel('Kombinationen der Stationskorrekturen')
99 subplot(1,3,3)
100 bar(z, 'g')
101 ylabel('halbjährliche Amplitude [cm]')
102 xlabel('Kombinationen der Stationskorrekturen')
103
104 end
105
106 %% -----Plots von den Differenzen-----
107
108 % Plotten der Differenzen der Standardabweichung der ozeanischen Korrektur
109 a = [station{1,2} station{2,2} station{3,2} station{4,2} station{5,2} ...
110      station{6,2} station{7,2} station{8,2} station{9,2} station{10,2} ...
111      station{11,2} station{12,2} station{13,2} station{14,2} station{15,2} ...
112      station{16,2} station{17,2} station{18,2}];
113
114 figure(19)
115 bar(a, 'r')
116 title({'Die Differenzen der Standardabweichung bei Anbringung der ', ...
117       'ozeanischen Korrektur'}, [''])

```

```

118 ylabel('Differenzen [cm]')
119 set(gca,'XTick',1:18,'XTickLabel',station(:,1))
120 h=gca;
121 set(gca,'position',[0.1 0.3 0.8 0.6])
122 th = rotateticklabel(h,90);
123
124
125
126 % Plotten der Differenzen der Standardabweichung der atmosphär. Korrektur
127 b = [station{7,3} station{14,3} station{6,3} station{3,3} station{8,3} ...
128      station{15,3} station{4,3} station{9,3} station{16,3} station{18,3} ...
129      station{10,3} station{1,3} station{17,3} station{2,3} station{12,3} ...
130      station{13,3} station{5,3} station{11,3}];
131
132 stations = [station(7,1); station(14,1); station(6,1); station(3,1); station(8,1); ..
133             station(15,1); station(4,1); station(9,1); station(16,1); station(18,1); ...
134             station(10,1); station(1,1); station(17,1); station(2,1); station(12,1); ...
135             station(13,1); station(5,1); station(11,1)];
136
137 figure(20)
138 bar(b,'r')
139 title({'Die Differenzen der Standardabweichung bei Anbringung der ',...
140       'atmosphärischen Korrektur'}, [''])
141 ylabel('Differenzen [cm]')
142 set(gca,'XTick',1:18,'XTickLabel',stations)
143 h=gca;
144 set(gca,'position',[0.1 0.3 0.8 0.6])
145 th = rotateticklabel(h,90);
146
147
148
149 % Plotten der Differenzen der Standardabweichung und der Amplituden
150 % der hydrologischen Korrektur
151 c = [station{1,4} station{1,5} station{1,6};
152      station{2,4} station{2,5} station{2,6};
153      station{3,4} station{3,5} station{3,6};
154      station{4,4} station{4,5} station{4,6};
155      station{5,4} station{5,5} station{5,6};
156      station{6,4} station{6,5} station{6,6};
157      station{7,4} station{7,5} station{7,6};
158      station{8,4} station{8,5} station{8,6};
159      station{9,4} station{9,5} station{9,6};
160      station{10,4} station{10,5} station{10,6};
161      station{11,4} station{11,5} station{11,6};
162      station{12,4} station{12,5} station{12,6};
163      station{13,4} station{13,5} station{13,6};
164      station{14,4} station{14,5} station{14,6};
165      station{15,4} station{15,5} station{15,6};
166      station{16,4} station{16,5} station{16,6};
167      station{17,4} station{17,5} station{17,6};
168      station{18,4} station{18,5} station{18,6}];
169
170 figure(21)
171 bar(c)
172 title({'Die Differenzen der Standardabweichung und der Amplituden bei ',...
173       'Anbringung der ozeanischen Korrektur'}, [''])
174 ylabel('Differenzen [cm]')
175 set(gca,'XTick',1:18,'XTickLabel',station(:,1))
176 h=gca;
177 set(gca,'position',[0.1 0.3 0.8 0.6])
178 th = rotateticklabel(h,90);

```