



TU WIEN
DEPARTMENT OF
GEODESY AND
GEOINFORMATION

DIPLOMARBEIT

Lokale VLBI Messungen an der Station Wetzell

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur/in

ausgeführt am Department für

Geodäsie und Geoinformation

Forschungsbereich Höhere Geodäsie

der Technischen Universität Wien

unter Anleitung von

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

durch

Hannes Sieberer

Matrikelnummer: 01618526

Wien, im Jänner 2023

Unterschrift (Verfasser/in)

Unterschrift (Betreuer/in)

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Wien, im Jänner 2023

Danksagung

Während der Zeit meines Studiums an der TU Wien habe ich stets große Unterstützung erhalten. Besonders bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Johannes Böhm der mich stets unterstützt hat, mir auch immer freie Hand bei der Erstellung meiner Diplomarbeit gelassen hat, und immer für Fragen zur Verfügung stand. Der sehr offene und persönliche Zugang hat mir sehr geholfen beim Erstellen meiner Diplomarbeit sowie der Absolvierung meines Studiums.

Ebenso möchte ich mich bei all meinen Freunden und meiner Familie bedanken, die mir auch in schwierigen Momenten, sowie von Motivationsproblemen geprägten Phasen immer den Rücken stärkten und mir wieder neue Motivation für mein Studium verliehen haben. Ohne sie wäre es mir nicht möglich gewesen mein Studium zu absolvieren und zu beenden.

Kurzfassung

Bei der Very Long Baseline Interferometry (VLBI) beobachten global verteilte Stationen extragalaktische Radioquellen. Die primäre Beobachtungsgröße ist die Differenz in den Ankunftszeiten der von den Radioquellen ausgesandten Strahlung. Die VLBI ist das einzige moderne geodätische Weltraumverfahren, mit dem alle fünf Erdorientierungsparameter (EOP) bestimmt werden können. In den letzten Jahren wurden vermehrt VLBI Antennen der neuesten Generation (VGOS) errichtet, welche nun gemeinsam mit den älteren Antennen (Legacy) beobachten. Im Zuge dieser Arbeit wurde die Verknüpfung dieser beiden Systeme am geodätischen Observatorium Wettzell in Deutschland untersucht und mit terrestrischen Tachymetermessungen verglichen. Durch immerzu steigende Genauigkeitsanforderungen ist die bestmögliche Verknüpfung dieser beiden Systeme unerlässlich. Für die Auswertung wurden insgesamt 27 lokale Sessions an der Station Wettzell, im Zeitraum von 2014 bis 2020 untersucht. Beobachtet wurde jeweils von den drei in Wettzell vorhandenen VLBI Antennen, bei denen es sich um eine Legacy und zwei baugleiche VGOS Antennen handelt.

Die Messungen wurden jeweils in Bezug auf ihre lokale Ost-, Nord- und Höhenkomponente untersucht. Beim Vergleich der Tachymetermessungen mit jenen der VLBI fällt auf, dass es vor allem in der Höhenkomponente eine Differenz von etwa 5 Millimetern gibt. Dadurch, dass die älteren und größeren Legacy Antennen bekanntermaßen unter Einflüssen der Gravitation stärker deformiert werden als VGOS Antennen, liegt es nahe, dass diese Differenz aus der Nichtberücksichtigung dieser Effekte resultiert. Je nach Verkippung (Elevation) der Antennen wirkt der Einfluss der gravitativen Deformation dabei unterschiedlich. Da es für die Legacy Antenne in Wettzell zum Zeitpunkt der Auswertung noch kein Modell zur Korrektur dieses Einflusses gab, wurde das Modell der VLBI Antenne in Onsala verwendet, welches bauähnlich zu jenem in Wettzell ist. Nach Verwendung des Modells konnte die Differenz der VLBI Messungen zu den terrestrischen Messungen deutlich verringert werden. Im Mittel beträgt diese in der Höhenkomponente nach der Korrektur der gravitativen Deformation nur noch -0.8mm. Die Ost- und Nordkomponente sind von den Einflüssen der gravitativen Deformation kaum betroffen, die Mittelwerte vor und nach Verwendung des Modells sind ident (0.1mm und -0.2mm).

Abstract

In Very Long Baseline Interferometry (VLBI), globally distributed stations observe extragalactic radio sources. The primary observable is the difference in the arrival times of the radiation emitted by the radio sources. VLBI is the only modern space geodetic method that can be used to determine all five Earth Orientation Parameters (EOPs). In recent years VLBI antennas of the latest generation (VGOS) have been built, which now monitor together with the older antennas (Legacy). In the course of this work, the interconnection of these two systems was investigated at the geodetic observatory Wettzell in Germany and results were compared with terrestrial tachymetry measurements. Due to ever increasing accuracy requirements, the best possible combination of these two systems is essential. For the evaluation, a total of 27 local sessions at the station Wettzell, in the period from 2014 to 2020, were investigated. Observations were made from the three VLBI antennas in Wettzell, which are a legacy and two identical VGOS antennas.

The measurements were examined in relation to their local eastern, northern and height components. When comparing the tachymeter measurements with those of the VLBI, it is noticeable that there is a difference of about 5 millimetres in the up component. Since older and larger legacy antennas are known to be more deformed under the influence of gravity than VGOS antennas, it is likely that this difference results from disregarding these effects. Depending on the tilt (elevation) of the antennas, the influence of the gravitational deformation has a different effect. Since there was no model for the Legacy Antenna in Wettzell at the time of the evaluation, the model of the VLBI antenna in Onsala was used, which is similar in design to the one in Wettzell. After using the model, the difference between VLBI measurements and terrestrial measurements was significantly reduced. On average, the difference in the height component after correction of the gravitational deformation is only -0.8mm. The eastern and northern components are hardly affected by the influence of the gravitational deformation, the mean values before and after using the model are identical (0.1mm and -0.2mm).

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Kurzfassung | III |
| Abstract | IV |
| Abbildungsverzeichnis | VII |
| Tabellenverzeichnis | IX |
| Abkürzungsverzeichnis | X |
| 1 Einleitung und Motivation | 1 |
| 2 Theoretischer Hintergrund | 3 |
| 2.1 VLBI | 3 |
| 2.1.1 Messprinzip | 3 |
| 2.1.2 Scheduling | 5 |
| 2.1.3 Korrelation | 5 |
| 2.1.4 Parameterschätzung | 5 |
| 2.1.5 IVS | 6 |
| 2.2 Legacy und VGOS Antennen | 7 |
| 2.3 Fehlereinflüsse | 9 |
| 2.3.1 Gravitative Deformation | 9 |
| 2.3.2 Thermale Deformation | 10 |
| 2.3.3 Sonstige Fehlereinflüsse | 11 |
| 2.4 VieVS | 13 |
| 3 Local-tie Messungen in Wettzell | 14 |
| 3.1 VLBI Antennen in Wettzell | 14 |
| 3.1.1 Legacy Antenne | 14 |
| 3.1.2 VGOS Twin Teleskope | 15 |
| 3.2 Daten | 17 |
| 4 Auswertung | 19 |
| 4.1 Fehlereliminationsverfahren | 19 |
| 4.1.1 Fehlerelimination mittels 5-sigma Test | 19 |
| 4.1.2 Manuelle Fehlerelimination | 22 |
| 4.2 Parameterfile | 24 |
| 4.3 Gravitatives Deformations Modell Onsala | 26 |
| 4.4 Berechnungen in Matlab | 31 |
| 4.4.1 Berechnung der Stationskoordinaten aus dem x_.mat-File | 31 |
| 4.4.2 Local-ties und Rotation in UEN | 36 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5 | Ergebnisse | 38 |
| 5.1 | Einfluss der Fehlereliminationsverfahren auf die local-ties | 38 |
| 5.2 | Ergebnisse ohne Gravitativem Deformations Modell | 44 |
| 5.2.1 | Basislinie Wz - Wn | 44 |
| 5.2.2 | Mixed-mode Sessions | 48 |
| 5.3 | Ergebnisse mit Gravitativem Deformations Modell | 52 |
| 5.3.1 | Basislinie Wz - Wn | 52 |
| 5.3.2 | Mixed-mode Sessions | 56 |
| 6 | Zusammenfassung und Ausblick | 60 |
| | Referenzen | 62 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | Vergleich der modernen geodätischen Weltraumverfahren | 3 |
| 2.2 | Messprinzip der VLBI | 4 |
| 2.3 | Übersicht VGOS Antennen | 7 |
| 2.4 | Gravitative Deformation in Onsala | 10 |
| 2.5 | Thermal Deformation in Onsala | 11 |
| 2.6 | Cable Delay in Onsala | 12 |
| 3.1 | Panoramabild Geodätisches Observatorium Wettzell | 14 |
| 3.2 | Aufriss Legacy Antenne in Wettzell | 15 |
| 3.3 | VGOS Antenne in Wettzell | 16 |
| 3.4 | Grundriss Wettzell Observatorium | 16 |
| 4.1 | Residuenplot vor Fehlerelimination | 20 |
| 4.2 | Residuenplot mit erkannten Ausreißern des 5-sigma Tests | 20 |
| 4.3 | Residuenplot nach der Ausreißerelimination | 21 |
| 4.4 | Residuenplot ohne erkennbare Ausreißer | 22 |
| 4.5 | Ausreißerfile VieVS | 22 |
| 4.6 | Residuenplot mit manueller Ausreißerentfernung | 23 |
| 4.7 | Laufweg eines Signals | 26 |
| 4.8 | Variationen des Signallaufwegs im Onsala 20m Teleskop | 29 |
| 4.9 | Deformation eines Radioteleskops aufgrund von Gravitation | 30 |
| 5.1 | Manuelle Fehlerelimination: Basislinienlänge | 39 |
| 5.2 | Manuelle Fehlerelimination: Up Komponente | 40 |
| 5.3 | Manuelle Fehlerelimination: East Komponente | 40 |
| 5.4 | Manuelle Fehlerelimination: North Komponente | 41 |
| 5.5 | Fehlerelimination mittels 5-sigma Test: Basislinienlänge | 41 |
| 5.6 | Fehlerelimination mittels 5-sigma Test: Up Komponente | 42 |
| 5.7 | Fehlerelimination mittels 5-sigma Test: East Komponente | 42 |
| 5.8 | Fehlerelimination mittels 5-sigma Test: North Komponente | 43 |
| 5.9 | Basislinie Wz-Wn: local-ties ohne Gravitativem Deformations Modell: Baseline length | 44 |
| 5.10 | Basislinie Wz-Wn: local-ties ohne Gravitativem Deformations Modell: Up Komponente | 45 |
| 5.11 | Basislinie Wz-Wn: local-ties ohne Gravitativem Deformations Modell: East Komponente | 45 |
| 5.12 | Basislinie Wz-Wn: local-ties ohne Gravitativem Deformations Modell: North Komponente | 46 |
| 5.13 | Mixed-mode sessions: local-ties ohne Gravitativem Deformations Modell: Baseline length | 48 |

| | |
|--|----|
| 5.14 Mixed-mode sessions: local-ties ohne Gravitativem Deformations Modell: Up Komponente | 49 |
| 5.15 Mixed-mode sessions: local-ties ohne Gravitativem Deformations Modell: East Komponente | 49 |
| 5.16 Mixed-mode sessions: local-ties ohne Gravitativem Deformations Modell: North Komponente | 50 |
| 5.17 Basislinie Wz-Wn: local-ties mit Gravitativem Deformations Modell: Baseline length | 52 |
| 5.18 Basislinie Wz-Wn: local-ties mit Gravitativem Deformations Modell: Up Komponente | 53 |
| 5.19 Basislinie Wz-Wn: local-ties mit Gravitativem Deformations Modell: East Komponente | 53 |
| 5.20 Basislinie Wz-Wn: local-ties mit Gravitativem Deformations Modell: North Komponente | 54 |
| 5.21 Mixed-mode sessions: local-ties mit Gravitativem Deformations Modell: Baseline length | 56 |
| 5.22 Mixed-mode sessions: local-ties mit Gravitativem Deformations Modell: Up Komponente | 57 |
| 5.23 Mixed-mode sessions: local-ties mit Gravitativem Deformations Modell: East Komponente | 57 |
| 5.24 Mixed-mode sessions: local-ties mit Gravitativem Deformations Modell: North Komponente | 58 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Vergleich Legacy und VGOS System | 8 |
| 3.1 | Kategorien Sessions | 17 |
| 3.2 | Stationskoordinaten der terrestrischen Local-Tie Messungen | 17 |
| 3.3 | Übersicht Sessions | 18 |
| 4.1 | Inhalt Parameterfile | 24 |
| 4.2 | Multiplikationsfaktoren für die Geschwindigkeiten der Stationen | 33 |
| 4.3 | Stationskoordinaten Wz für alle 27 Sessions | 34 |
| 4.4 | Stationskoordinaten Wn für alle 27 Sessions | 35 |
| 4.5 | Stationskoordinaten Ws horizontal für beide Sessions | 35 |
| 4.6 | Stationskoordinaten Ws vertikal für beide Sessions | 36 |
| 5.1 | Unterschiede in den local-ties je nach Fehlereliminationsverfahren | 38 |
| 5.2 | Differenzen in den local-ties je nach Fehlereliminationsverfahren | 39 |
| 5.3 | local-tie Werte ohne Gravitations Deformations Modell aller 27 Sessions | 47 |
| 5.4 | Mittelwerte und mittlere Standardabweichung der local-ties ohne Gravitations Deformations Modell für alle 27 Sessions | 48 |
| 5.5 | Werte der local-ties ohne Gravitations Deformations Modell für die mixed-mode Sessions | 50 |
| 5.6 | local-tie Werte mit Gravitations Deformations Modell aller 27 Sessions | 55 |
| 5.7 | Mittelwerte und mittlere Standardabweichung der local-ties mit Gravitations Deformations Modell für alle 27 Sessions | 56 |
| 5.8 | Werte der local-ties mit Gravitations Deformations Modell für die mixed-mode Sessions | 59 |

Abkürzungsverzeichnis

GNSS Global Navigation Satellite Systems

VLBI Very Long Baseline Interferometry

DORIS Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite

SLR Satellite Laser Ranging

IVS Internationaler VLBI Service für Geodäsie und Astrometrie

ITRF International Terrestrial Reference Frame

ICRF International Celestial Reference Frame

EOP Erdorientierungsparameter

IERS International Earth Rotation Service

VGOS VLBI Global Observing System

RFI Radio Frequency Interferences

MJD Modifiziertes Julianisches Datum

WRMS Weighted root mean square

1 Einleitung und Motivation

Die Very Long Baseline Interferometry (VLBI) ist neben Global Navigation Satellite Systems (GNSS), Satellite Laser Ranging (SLR) und Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (DORIS) eines der vier geodätischen Weltraumverfahren. VLBI ist dabei maßgebend für die Bestimmung des International Celestial Reference Frames (ICRF) sowie des International Terrestrial Reference Frame (ITRF). Ebenso ist VLBI das einzige geodätische Weltraumverfahren, das alle Erdorientierungsparameter bestimmen kann. Bei der Very Long Baseline Interferometry messen jeweils zwei VLBI Antennen die Differenz in der Ankunftszeit von elektromagnetischen Wellen, welche von extragalaktischen Radioquellen, sogenannten Quasaren, emittiert werden.

Im Zuge dieser Arbeit wurden an der VLBI Station im Bayrischen Wettzell 27 lokale VLBI Sessions ausgewertet. Im Anschluss werden diese mit terrestrischen Tachymetermessungen verglichen. Die Ergebnisse der beiden Messverfahren werden dann miteinander verglichen und es wird untersucht ob, und warum es zu Differenzen zwischen den beiden Messverfahren kommt.

Weltweit gibt es eine Vielzahl von VLBI Stationen, an welchen neben älteren, sogenannten Legacy Antennen, auch Antennen der neuen Generation, sogenannte VGOS Antennen, in Betrieb sind. Um diese perfekt miteinander zu verknüpfen, ist es nötig verschiedenste Fehlereinflüsse der jeweiligen Antenne zu korrigieren. Man spricht dabei auch von localtie Messungen. Besonders die Verformung aufgrund der Gravitation bei den älteren, und auch deutlich größeren, Legacy Antennen spielt dabei eine zentrale Rolle. Bereits Niell et al. (2021) und Varenius et al. (2021) haben die Auswirkungen solcher Deformationen in ihren Arbeiten untersucht. Die große Herausforderung dabei besteht darin, dass es nicht für alle älteren Antennen Deformations Modelle gibt, welche derartige Deformationen beschreiben. Bereits Niell et al. (2021) hielten fest, dass eine Verknüpfung im Submillimeter Bereich ohne die genaue Kenntnis der Gravitativen Deformation nicht möglich ist. Diese ist jedoch nötig um auch bei zukünftigen Realisierungen des ITRF noch einmal eine Steigerung der Genauigkeit erreichen zu können.

Im Zuge dieser Arbeit wurde der Einfluss der Gravitativen Deformation an der Station Wettzell im Bayrischen Wald untersucht. Dort befinden sich ebenfalls eine ältere Legacy, sowie zwei neuere VGOS Antennen. Auch in diesem Fall war kein Modell für die Beschreibung der Verformung der Legacy Antenne aufgrund der Gravitation vorhanden. Das Teleskop ist allerdings gleicher Größe und auch Bauweise wie das Legacy Teleskop in Onsala (Schweden), weshalb für die Berechnungen dessen Modell verwendet wurde. Zu Beginn der Arbeit wird zuerst das VLBI Messprinzip erklärt und anschließend der Unterschied der beiden Antennentypen erklärt. Ebenso wird eine theoretische Erklärung der Gravitativen Deformation

geliefert. In Kapitel 3 werden die verwendeten Daten, sowie die verwendeten Wettzeller Antennen genauer beschrieben. Kapitel 4 beschäftigt sich mit der Auswertung der Daten. Darin beschrieben sind etwa die Fehlereliminationsverfahren, das verwendete Gravitational Deformation Modell, sowie das verwendete Parameterfile. In Kapitel 5 werden die Ergebnisse der Arbeit gezeigt, bevor in Kapitel 6 noch ein Ausblick in die Zukunft erfolgt.

2 Theoretischer Hintergrund

2.1 VLBI

Bereits seit den 1970er Jahren werden weltweit VLBI Messungen durchgeführt, um die Rotationseigenschaften der Erde näher zu untersuchen, oder präzise Koordinaten auf der Erdoberfläche zu bestimmen. Bei der VLBI handelt es sich um ein geometrisches Messprinzip, die Beobachtungsgleichungen sind daher relativ einfach herleitbar. Durch die Messung von extragalaktischen Radioquellen stellt die VLBI ebenso einen Bezug zur Astronomie her. Die VLBI ist das einzige moderne geodätische Weltraumverfahren, welches alle Erdorientierungsparameter beobachten kann (siehe Abbildung 2.1). Im folgenden Kapitel soll das Messprinzip etwas näher erläutert und die Beobachtungsgleichungen erklärt werden.

| Parameter | VLBI | GNSS | DORIS | SLR | LLR | Altimetry |
|-----------------|------|------|-------|-----|-----|-----------|
| ICRF (quasars) | X | | | | | |
| Nutation | X | (X) | | (X) | X | |
| Polar motion | X | X | X | X | X | |
| UT1 | X | | | | | |
| Length of day | (X) | X | X | X | X | |
| ITRF (stations) | X | X | X | X | X | (X) |
| Geocenter | | X | X | X | | X |
| Gravity field | | X | X | X | (X) | X |
| Orbits | | X | X | X | X | X |
| LEO orbits | | X | X | X | | X |
| Ionosphere | X | X | X | | | X |
| Troposphere | X | X | X | | | X |
| Time/frequency | (X) | X | | (X) | | |

Abbildung 2.1: Vergleich der modernen geodätischen Weltraumverfahren aus Schuh und Behrend (2012)

2.1.1 Messprinzip

In Abbildung 2.2 ist das geometrische Prinzip der VLBI vereinfacht dargestellt. Für die Beobachtung sind immer zwei VLBI Antennen nötig. Die Wellenfronten der extragalaktischen Radioquellen kommen aufgrund der sehr großen Entfernung als ebene Wellenfronten auf der Erde an. Das Dreieck zur Bestimmung des Basislinienvektors \vec{b} reduziert sich daher zu einem rechtwinkligen Dreieck. Mit dem Einheitsvektor \vec{s}_0 in Richtung der Quelle, sowie dem gemessenen Zeitunterschied τ in den Ankunftszeiten der Wellenfronten an den beiden

VLBI Stationen und der Lichtgeschwindigkeit c ergibt sich Formel 2.1 (Böhm, 2017).

$$\tau = -\frac{\vec{b} \cdot \vec{s}_0}{c} = t_2 - t_1 \quad (2.1)$$

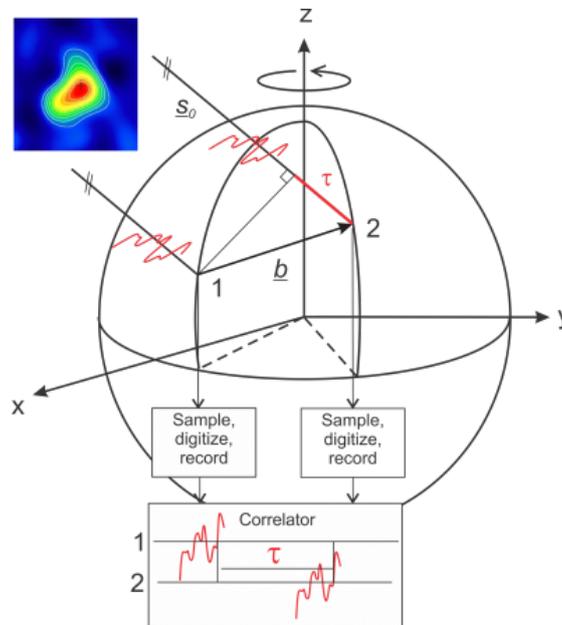


Abbildung 2.2: Messprinzip der VLBI aus Schuh und Behrend (2012)

Diese Gleichung stellt natürlich nur eine vereinfachte Näherung dar. Für ein präzises Ergebnis sind noch viele Fehlereinflüsse zu berücksichtigen. Um den Einfluss der Ionosphäre auf die Messungen bereits vorab so gut wie möglich zu eliminieren, wird bei der VLBI typischerweise auf zwei Frequenzen beobachtet. Im S-Band mit 2.3 GHz und im X-Band mit 8.4 GHz. Dadurch, dass Quasare ein breites Spektrum an Frequenzen emittieren, wird in beiden Frequenzen in verschiedenen Bandbreiten beobachtet. Somit ist die eigentliche Beobachtungsgröße der VLBI der Group Delay (Schuh und Behrend, 2012).

Gleichung 2.1 muss also noch um einige Terme, die einen Einfluss auf τ haben, erweitert werden. Nach Schuh und Behrend (2012) ergibt sich somit Formel 2.2 :

$$\tau = \tau_{\text{geom}} + \tau_{\text{ab}} + \tau_{\text{clk}} + \tau_{\text{inst}} + \tau_{\text{trop}} + \tau_{\text{iono}} + \tau_{\text{rel}} \quad (2.2)$$

Darin enthalten sind die Terme τ_{geom} , welcher den geometrischen Delay, wie in Formel 2.1 beschrieben darstellt, τ_{ab} ist der Beitrag der täglichen Aberration, τ_{clk} ist der Uhrenfehler aufgrund unsynchronisierter Stationsuhren, τ_{inst} beschreibt Delays, die im Instrument selbst entstehen (z.B. in Kabeln), τ_{trop} gibt die Verzögerung des Signals durch die Troposphäre wieder, τ_{iono} beinhaltet die Laufzeitverzögerung durch die Ionosphäre und τ_{rel} beschreibt relativistische Effekte. Die Einflüsse der Aberration und die relativistischen Effekte können

dabei durch physikalische Ansätze gelöst werden. Der Delay, der durch die Instrumente selbst entsteht, kann größtenteils durch Kalibrierung dieser eliminiert werden, die Einflüsse der unsynchronisierten Uhren, sowie der Troposphäre werden üblicherweise mit der Methode der kleinsten Quadrate modelliert und entfernt. Der Einfluss der Ionosphäre wird letztlich, wie bereits erwähnt, dadurch eliminiert, dass auf zwei Frequenzen beobachtet wird. (Schuh und Behrend, 2012)

2.1.2 Scheduling

Um nun eine Vielzahl von VLBI Antennen miteinander zu koordinieren, ist es notwendig, Beobachtungspläne - sogenannte Schedules - zu erstellen. Typischerweise werden in einem Schedule bis zu 100 verschiedene Quellen in bis zu 1000 Scans (Beobachtungen der gleichen Quelle von mehreren Antennen) beobachtet. Die Schwierigkeit besteht nun darin, alle verfügbaren Antennen zu koordinieren um ein optimales Ergebnis zu erhalten. Dabei ist etwa zu berücksichtigen, dass jede Antenne eine andere Drehrate besitzt. Ebenso muss ein Kompromiss zwischen der Anzahl an Beobachtungen und einer guten Quellenverteilung über den Himmel gefunden werden. Strebt man etwa eine gute Verteilung der Quellen an, führt dies dazu, dass viele Drehungen der Antennen nötig sind, was wiederum dazu führt, dass in Summe weniger Beobachtungen generiert werden können. Die Aufgabe einer Scheduling Software besteht darin, all diese Faktoren zu berücksichtigen und den besten Kompromiss aus Quellenverteilung und Anzahl der Beobachtungen zu finden. (Schartner und Böhm, 2019)

2.1.3 Korrelation

Nachdem die Beobachtungen abgeschlossen sind, ist es noch notwendig, diese zu korrelieren, um den Delay zu erhalten. Dadurch, dass bei VLBI riesige Datenmengen zusammenkommen, ist es oft noch nötig diese Daten auf physischen Speichermedien zu den Korrelatoren zu bringen. In den Korrelatoren werden anschließend die Signale solange gegeneinander verschoben, bis die Korrelationsfunktion ein Maximum erreicht. (Whitney, 2000)

2.1.4 Parameterschätzung

Mit den fertig korrelierten Daten ist es nun möglich eine Vielzahl von Parametern zu bestimmen. Aufgrund der Vielzahl von Beobachtungen erfolgt dies mithilfe der Methode der kleinsten Quadrate. (Schuh und Böhm, 2012) Dies soll hier anhand der Berechnungsweise in VieVS kurz skizziert werden. Ausgehend von Gleichung 2.3

$$v = Ax - l \quad (2.3)$$

in der v der Vektor der Verbesserungen, A die Designmatrix, x der Vektor der Verbesserungen für die a priori Werte der Unbekannten und l der gekürzte Beobachtungsvektor (beobachtet

minus berechnet) sind, lassen sich mit Gleichung 2.4

$$x = N^{-1}A^TPl \quad (2.4)$$

in der N die Normalgleichungsmatrix $N = A^TPA$ und P die Gewichtsmatrix sind, die Unbekannten Parameter x bestimmen. (Böhm et al., 2018)

2.1.5 IVS

Möchte man bereits fertig ausgewertete VLBI Messdaten oder Produkte verwenden, ist dies auf der Homepage des IVS (Internationaler VLBI Service für Geodäsie und Astrometrie) möglich. Dabei handelt es sich um einen Zusammenschluss von Internationalen Organisationen zur koordinierten Nutzung der VLBI. (Schlüter und Behrend, 2007) Zu den Produkten zählen etwa der ITRF (International Terrestrial Reference Frame, siehe Altamimi et al. (2016)), der ICRF (International Celestial Reference Frame, siehe Charlot et al. (2020)), Erdorientierungsparameter (EOPs, siehe MacMillan (2022)) oder auch Informationen über die Quellen, welche von der VLBI beobachtet werden. (Nothnagel et al., 2016)

2.2 Legacy und VGOS Antennen

Dieses Unterkapitel soll den bereits in der Einleitung erwähnten Unterschied von Legacy und VGOS (VLBI Global Observing System) Antennen erklären. Mit fortschreitendem Stand der Technik ist es auch im Bereich der VLBI nötig geworden, neue Antennen mit besserer Leistung zu entwickeln, um den immer höheren Anforderungen an die Genauigkeit der bestimmten Parameter gerecht zu werden. Mithilfe der VGOS Antennen soll es somit gelingen, die Genauigkeit der Stationskoordinaten auf bis zu 1mm zu verbessern. (Schuh und Behrend, 2012) In den letzten Jahren wurden somit mehr und mehr Stationen mit den neuen Teleskopen ausgestattet. Abbildung 2.3 zeigt die momentane Verteilung der VGOS Stationen (in grün) sowie zukünftige VGOS Stationen (in blau). An Stationen, welche zusätzlich noch mit einem Kreis umrandet sind befindet sich zudem noch eine Legacy VLBI Antenne. (IVS, 2022)



Abbildung 2.3: Verteilung der aktuellen und zukünftigen VGOS Antennen (IVS, 2022)

Bei den seit etwa 1970 in Verwendung befindlichen Legacy Antennen handelt es sich fast ausschließlich um sehr große Teleskope mit Durchmessern von 20 Metern oder mehr. Daraus ergeben sich dementsprechend langsame Drehraten der Antennen. Ebenso können damit nur 2 Frequenzbänder (2.3 GHz und 8.4 GHz) beobachtet werden. Durch neue Entwicklungen ist es gelungen, die viel kleineren, aber deutlich leistungsfähigeren VGOS Antennen zu entwerfen. Diese sind mit einem Durchmesser von etwa 12 Metern deutlich kleiner als die Legacy Teleskope und besitzen daher auch eine erheblich höhere Drehrate, mit bis zu 12 Grad pro Sekunde im Vergleich zu den maximal 3 Grad pro Sekunde bei der älteren Generation von Antennen. Aufgrund der Größe und der Bauweise der VGOS Teleskope ist auch

deren Deformation beinahe vernachlässigbar für die Auswertung. Eine weitere Neuerung ist, dass nun nicht nur 2 sondern 4 Frequenzbänder beobachtet werden können. Diese liegen im Bereich zwischen 2 GHz und 14 GHz. Auch die Aufzeichnungsrate hat sich von etwa 512 Mbps auf bis zu 32 Gbps erhöht. Tabelle 2.1 zeigt die wesentlichen Parameter der beiden VLBI Systeme. (Schuh und Behrend, 2012)

| | Legacy System | VGOS System |
|-------------------|-----------------|----------------|
| Antennengröße | ab 20 m | 12 m |
| Drehrate | bis 3°/s | bis zu 12°/s |
| Frequenzbänder | 2 | 4 |
| Frequenzbereiche | 2.3 und 8.4 GHz | 2-14 GHz |
| Aufzeichnungsrate | bis zu 512Mbps | bis zu 32 Gbps |

Tabelle 2.1: Wesentliche Unterschiede der Systeme Legacy und VGOS (Schuh und Behrend, 2012)

Damit VGOS und Legacy Antennen gemeinsam beobachten können, ist es wichtig den local-tie Vektor (lokaler Verknüpfungsvektor) der beiden Antennen zu kennen. Üblicherweise werden diese local-ties mit herkömmlichen geodätischen Tachymetern zwischen allen an einem Observatorium befindlichen geodätischen Weltraumverfahren bestimmt. Nun ist es allerdings auch möglich zwischen den VLBI Antennen selbst mit VLBI solche local-tie Messungen durchzuführen und deren Vektor zu bestimmen. Bereits Varenius et al. (2021) und Niell et al. (2021) führten diese Messungen in den Observatorien in Onsala bzw. Kokee Park durch. Eine Steigerung der Genauigkeit zukünftiger Internationaler Referenzrahmen setzt die genaue Kenntnis dieses local-tie Vektors voraus. (Varenius et al., 2021) Diese Steigerung kann allerdings nur durch eine exakte Modellierung etwaiger Fehlereinflüsse, wie sie in nachfolgenden Kapiteln besprochen werden, gelingen.

2.3 Fehlereinflüsse

Um das zukünftige Ziel von 1 Millimeter Gesamtgenauigkeit und 0.1mm/Jahr Stabilität zu erreichen ist es nötig, die local-ties mit einer Genauigkeit von ebenfalls 0.1mm zu bestimmen. Da es zwischen den local-tie Messungen mit klassischen geodätischen Verfahren und jenen mit modernen geodätischen Weltraumverfahren nach wie vor Differenzen gibt, liegt es nahe, dass bei den geodätischen Weltraumverfahren noch einige systematische Fehler unbehandelt bleiben. (Bergstrand et al., 2018) Diese sollen im Folgenden kurz erläutert werden.

2.3.1 Gravitative Deformation

Bedingt dadurch, dass jede VLBI Messung in verschiedenen räumlichen Ausrichtungen erfolgt, kommt es auch zu unterschiedlichen gravitativen Einflüssen auf das jeweilige VLBI Teleskop und dadurch zu von der Richtung abhängigen Deformationen. Es werden also auch die gemessenen Delays immer abhängig von der Ausrichtung der Antenne beeinflusst. Bei der Gravitativen Deformation wird davon ausgegangen, dass die Antenne, wenn sie zum Zenit zeigt, überall gleich deformiert wird, sprich die Gravitationskraft symmetrisch wirkt. Wird die Antenne allerdings für Beobachtungen verkippt, wirken die Gravitationskräfte asymmetrisch auf das Teleskop. Die Form des Teleskops ist zwar auch dann noch ein Paraboloid, der Brennpunkt ist allerdings verschoben. Durch den geänderten Brennpunkt kommt es folglich auch zu einer Längenänderung im Signallaufweg. Ebenso kommt es zu einer Positionsänderung des Sub-Reflektors, was ebenfalls zu einer Änderung des Signallaufweges führt. Diese Effekte konnten in der Vergangenheit aufgrund der geringeren Genauigkeitsanforderungen vernachlässigt werden, werden allerdings mit Einführung der VGOS Beobachtungen immer relevanter. Soll das Ziel von local-tie Genauigkeiten im Submillimeterbereich erreicht werden, müssen diese gravitativen Effekte berücksichtigt werden. Durch die Weiterentwicklung bei terrestrischen Laserscannern, wird es nun auch immer einfacher Modelle für die Deformationen der VLBI Teleskope zu bestimmen. (Nothnagel et al., 2019) Abbildung 2.4 zeigt die starke Elevationsabhängigkeit der Gravitativen Deformation. Ebenso ist darin ersichtlich, dass die neuen VGOS Teleskope (in blau dargestellt) kaum unter dem Einfluss der Gravitativen Deformation leiden, während bei den älteren Legacy Antennen (in rot dargestellt) genau das Gegenteil der Fall ist. Die Abbildung zeigt das Beispiel Onsala in Schweden.

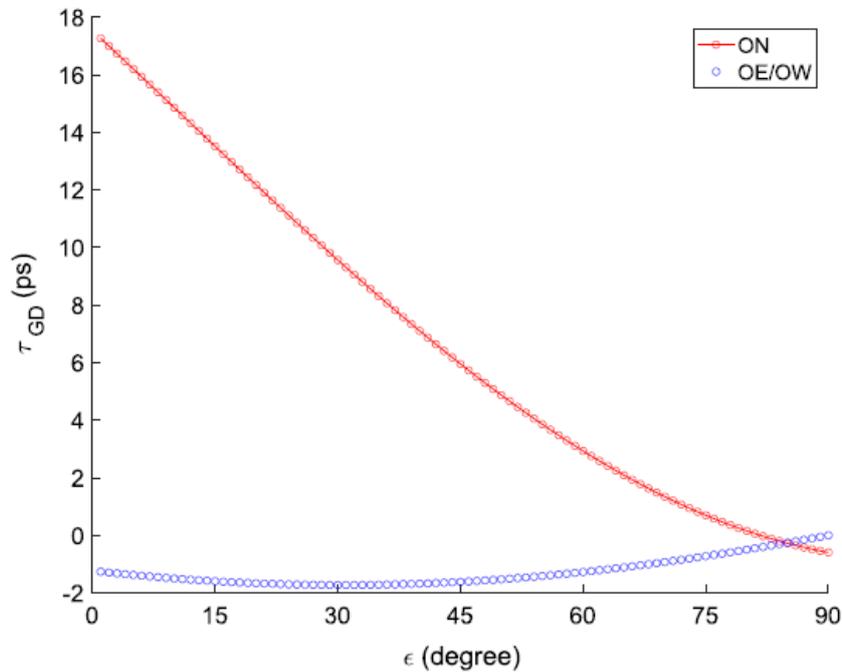


Abbildung 2.4: Einfluss und Elevationsabhängigkeit der Gravitativen Deformation der VGOS Antenne (blau) und der Legacy Antenne (rot) in Onsala, Schweden (Varenius et al., 2021)

2.3.2 Thermale Deformation

Ebenso wie die Gravitative Deformation ist auch die Thermale Deformation, die Deformation aufgrund von Temperatureinflüssen, bei der Bestimmung von Parametern mit höchster Genauigkeit zu berücksichtigen. Auch hierbei handelt es sich wieder um einen systematischen Fehlereinfluss, der mithilfe von geeigneten Modellen eliminiert werden kann. Dabei ist die Ausdehnung der Teleskope natürlich stark von der Zusammensetzung des Materials, aus dem es gebaut wurde, abhängig. Durch die Ausdehnung der Antennen kommt es zu einer Verschiebung des Referenzpunktes der VLBI Teleskope. Bezogen werden diese Verschiebungen immer auf einen mittleren Referenzpunkt und eine mittlere Temperatur. Bedingt dadurch, dass VLBI Teleskope weltweit in unterschiedlichen Klimazonen existieren, ist für jede VLBI Station eine individuelle Referenztemperatur zu wählen. Üblicherweise kommt es bei Nichtberücksichtigung der Thermalen Deformation zu Höhenänderungen des Referenzpunktes von etwa 4-6 Millimetern. Dies ist der Fall für geodätische VLBI Antennen die üblicherweise 32m oder kleiner sind. Für größere Teleskope kann dieser Einfluss Größenordnungen im Zentimeterbereich erreichen. (Nothnagel, 2008) Abbildung 2.5 zeigt den Einfluss der Thermalen Deformation auf die VGOS (blau) und Legacy (rot) Antennen in Onsala bei einer Abweichung von 10 Kelvin zur Referenztemperatur.

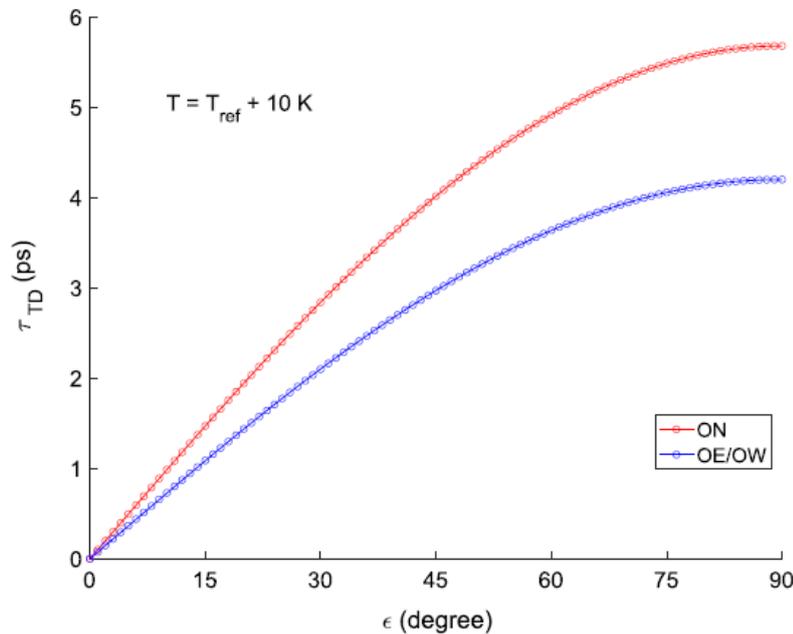


Abbildung 2.5: Einfluss und Elevationsabhängigkeit der Thermalen Deformation der VGOS Antenne (blau) und der Legacy Antenne (rot) in Onsala, Schweden (Varenius et al., 2021)

2.3.3 Sonstige Fehlereinflüsse

Neben den oben genannten Fehlereinflüssen kann es noch zu einigen anderen systematischen Einflüssen kommen. Hierzu zählt etwa der Cable Delay. Dabei handelt es sich um eine Längenänderung der am Teleskop verwendeten Kabel durch die Bewegung dieser oder durch die Änderung der Temperatur. (Varenius et al., 2021) In Abbildung 2.6 lässt sich sehr gut erkennen, dass zum Beispiel die Legacy Antenne in Onsala (ON) sehr stark vom Cable Delay beeinflusst wird, während dies bei den beiden VGOS Antennen nicht der Fall ist. Weitere Faktoren, die nicht außer Acht gelassen werden sollten, sind sogenannte Radio Frequency Interferences (RFI). Darunter versteht man Interferenzerscheinungen der von der VLBI beobachteten Signale der Quasare mit Signalen, die im Umfeld von VLBI Stationen entstehen. Dazu würden etwa Handysignale oder auch WLAN Signale zählen. Es wird daher immer angestrebt auf Frequenzen zu beobachten, die möglichst wenigen äußeren Störeinflüssen unterliegen. (Varenius et al., 2021)

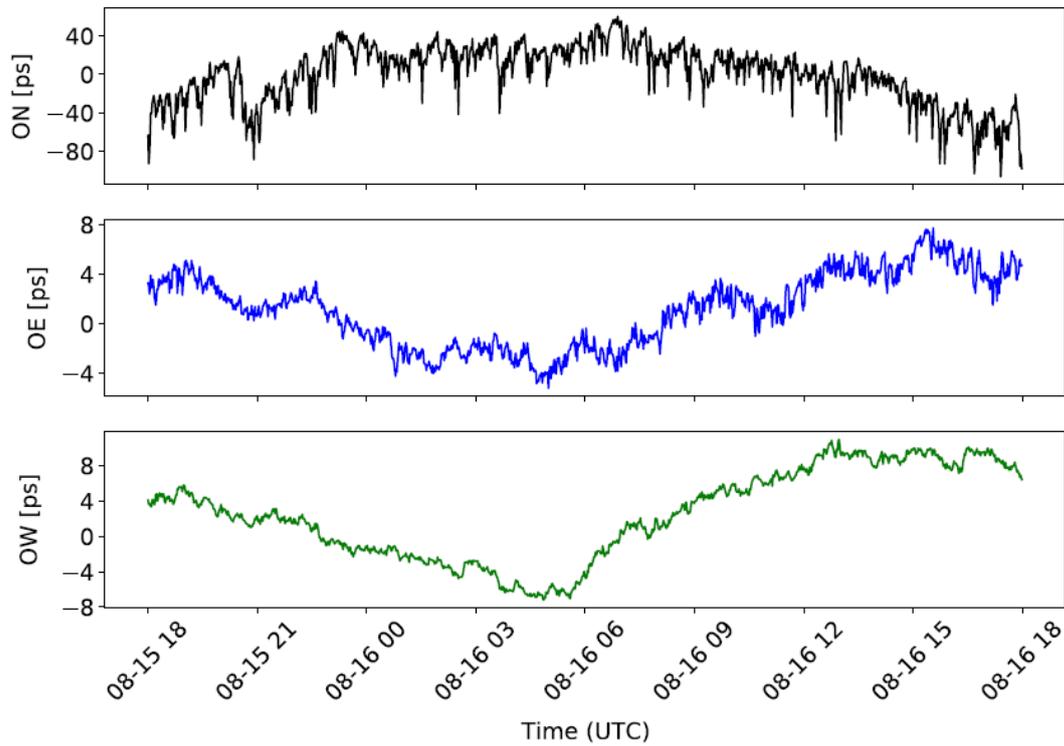


Abbildung 2.6: Einfluss des Cable Delays auf die drei VLBI Stationen ON (Oben - Legacy), OE (Mitte - VGOS) und OW (Unten - VGOS) in Onsala, Schweden (Varenius et al., 2021)

2.4 VieVS

VieVS ist eine Software zur Berechnung von VLBI und Satellitendaten. Entwickelt wurde sie von der Forschungsgruppe Höhere Geodäsie der TU Wien. Aufgrund der einfachen Handhabung wurde die Software in Matlab programmiert und erlaubt somit die einfache Änderung des Quellcodes, sowie Weiterverwendung der mit VieVS berechneten Parameter. Das Programm besteht dabei grundsätzlich aus den drei Hauptteilen VIE_INIT, VIE_MOD und VIE_LSM.

Im Modul VIE_INIT werden die Daten eingelesen. Die Daten müssen dabei im NGS oder im VGOSDB Format sein und werden im Unterordner LEVEL0 gespeichert.

Das Modul VIE_MOD berechnet theoretische Delays und deren partielle Ableitungen, Modelle nach IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service) Konventionen werden hier implementiert. Die Daten werden im Ordner LEVEL1 gespeichert.

Der dritte Teil des Programms, VIE_LSM, ist letztlich für die Berechnung der Parameter mittels der Methode der kleinsten Quadrate verantwortlich. Parameter wie etwa EOPs oder Stationskoordinaten können hiermit berechnet werden und werden anschließend im LEVEL3 Ordner gespeichert.

Abgesehen von diesen drei Hauptmodulen gibt es in VieVS noch zwei weitere Module: VIE_SIM und VIE_GLOB. Mit VIE_SIM lassen sich verschiedenste Simulationen für einen bestimmten Beobachtungsplan durchführen. VIE_GLOB kombiniert Normalgleichungen und ermöglicht somit die Berechnung von Referenzrahmen und globalen Parametern. (VieVS-Wiki, 2022) Dadurch, dass alle berechneten Ergebnisse im LEVEL3 Ordner des Programms gespeichert werden, lassen sich diese mittels Matlab jederzeit abändern und weiterverarbeiten. So ist es zum Beispiel möglich, anstatt der in VieVS implementierten Ansicht der Ergebnisse, diese selbst zu plotten und deren Darstellung nach Belieben zu verändern. Ein weiterer und nicht unwesentlicher Vorteil der Software ist, dass diese gratis zur Verfügung steht und nur eine funktionierende Matlab Version benötigt.

3 Local-tie Messungen in Wettzell

3.1 VLBI Antennen in Wettzell

Das Geodätische Observatorium in Wettzell, Bayern, betreibt Anlagen aller modernen geodätischen Weltraumverfahren. Neben SLR, DORIS und GNSS Anlagen werden in Wettzell auch drei VLBI Antennen (Wettzell, Wettzell Nord und Wettzell Süd) betrieben. Abbildung 3.1 zeigt ein Panoramabild des Geodätischen Observatoriums, die drei VLBI Teleskope sollen im Folgenden kurz näher beschrieben werden.



Abbildung 3.1: Panoramabild des Geodätischen Observatoriums Wettzell. In der Abbildung sind die drei VLBI Antennen (TTW1, TTW2 und RTW) zu sehen, ebenso wie deren Durchmesser und die Länge der 3D Basislinie zwischen diesen. (Schüler et al., 2018)

3.1.1 Legacy Antenne

Bei der VLBI Legacy Antenne in Wettzell (Abkürzung Wz) handelt es sich um eine Antenne der Cassegrain-Bauweise mit Haupt- und Subreflektor mit einem Durchmesser von 20 Metern. In Betrieb ist das Teleskop seit dem Jahr 1983. Gemessen wird in den klassischen Frequenzbereichen der VLBI, im S-Band mit 2,1-2,3 GHz und im X-Band mit 8,1-8,9 GHz. Es besitzt eine Drehrate von 3°/Sek für die Stehachse und 1,5°/Sek für die Schwenkachse. Abbildung 3.2 zeigt das Legacy Teleskop im Aufriss. Darin sind Hauptreflektor, Subreflektor, sowie Feedhorn zu sehen. (BKG, 2022)

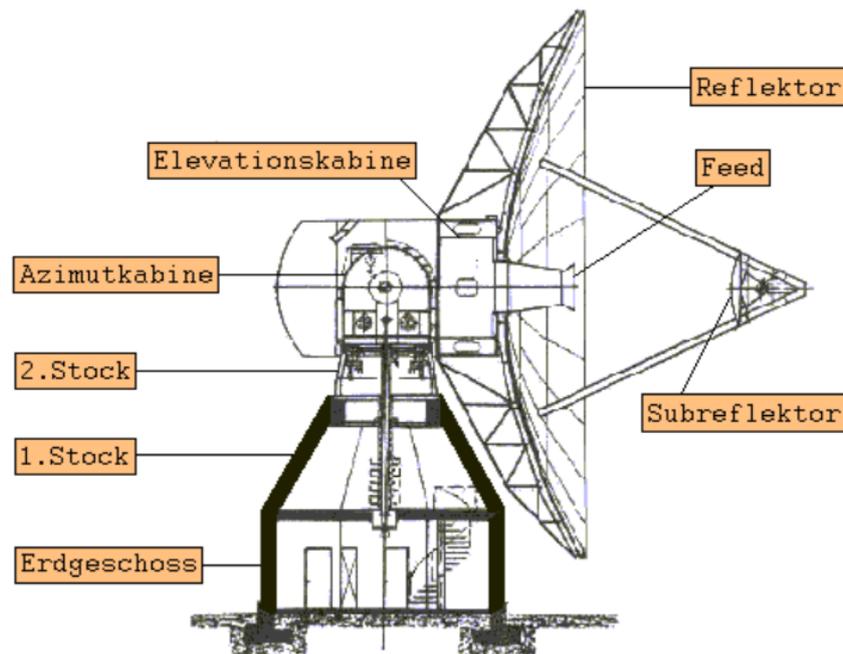


Abbildung 3.2: Aufriss der Legacy Antenne in Wettzell (BKG, 2022)

3.1.2 VGOS Twin Teleskope

Neben der bereits etwas älteren Legacy Antenne befinden sich in Wettzell auch zwei VLBI Antennen der neueren VGOS Generation (Abkürzungen Wn und Ws). Die beiden neuen Teleskope sind seit dem Jahr 2012 in Betrieb, haben einen Durchmesser von 13,2 Metern und sind identer Bauweise. Beobachtet wird damit im Frequenzbereich von 2 bis 14 GHz. Auch bei der Drehrate gibt es erhebliche Unterschiede zur Legacy Antenne. Die beiden VGOS Teleskope besitzen eine Drehrate von $12^\circ/\text{Sek}$ für die Stehachse und von $6^\circ/\text{Sek}$ für die Elevationsachse. (Neidhardt et al., 2011) Der Abstand der beiden Teleskope beträgt etwa 70 Meter. Eine Besonderheit im Vergleich zu den beiden anderen VLBI Antennen liefert das Ws Teleskop, dieses besitzt im Gegensatz zum Wn Teleskop ein sogenanntes "high-performance triple band feedhorn". Damit ist es möglich nicht nur auf dem S- und X-Band zu beobachten sondern zusätzlich auch noch auf dem Ka-Band mit Frequenzen von bis zu 32 GHz. Zusätzlich beobachtet das Ws Teleskop keine rechts-zirkularen Polarisationen, sondern horizontale und vertikale Polarisationen. Beim Bau der beiden VGOS Antennen wurde sehr großer Wert darauf gelegt den "Path Length Error", also den Fehler der Länge des Signalweges möglichst klein zu halten. Dies ist besonders wichtig da in der VLBI alle Parameter aus der Signallaufzeit, und damit auch der Länge des Signalwegs abgeleitet werden. Der Path Length Error besteht aus einem statischen Teil, bedingt durch eine Dezentrierung des Phasenzentrums im Feed Horn, und einem dynamischen Anteil, bedingt durch eine Deformation des Hauptreflektors. Für die beiden VGOS Antennen in Wettzell wird der Anteil des dynamischen Path

Length Errors mit unter 0.3 Millimetern beziffert. (Schüler et al., 2015) Eines der beiden VGOS Teleskope ist in Abbildung 3.3 zu sehen. Abbildung 3.4 zeigt abschließend noch einen Grundriss aller wichtigen geodätischen Instrumente in Wettzell, die in diesem Kapitel erwähnten Teleskope sind als RTW (Legacy Antenne), TTW 1 und TTW 2 (VGOS Antennen) gekennzeichnet.



Abbildung 3.3: VGOS Antenne in Wettzell

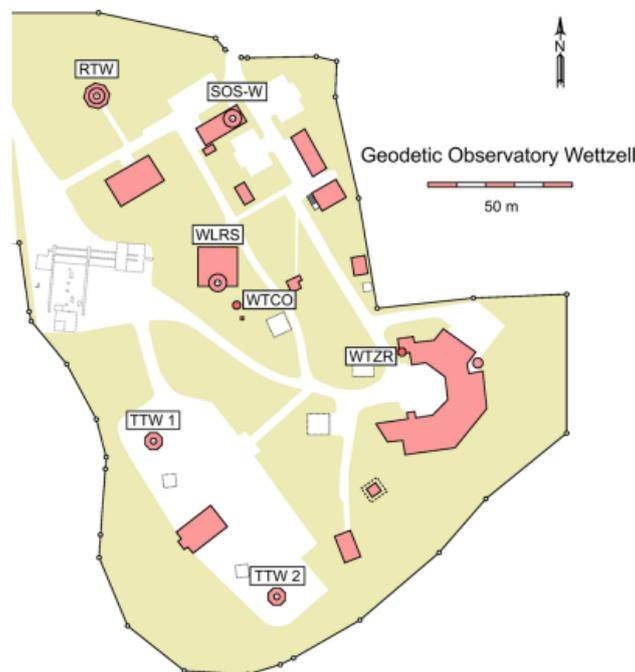


Abbildung 3.4: Grundriss des Geodätischen Observatoriums Wettzell, die VLBI Antennen sind mit RTW (Legacy) und TTW 1 bzw. TTW 2 (VGOS) in der Grafik ersichtlich (Kodet et al., 2018)

3.2 Daten

Für die Auswertung wurden insgesamt 27 Sessions analysiert. Diese wurden in 3 verschiedene Kategorien gegliedert und sind in Tabelle 3.1 ersichtlich.

| Kategorie | Anzahl | Stationen |
|-----------|--------|------------|
| Mixed | 2 | Wz, Wn, Ws |
| Whisp | 4 | Wz, Wn |
| Apurva | 21 | Wz, Wn |

Tabelle 3.1: Kategorien der Sessions. Die Liste der Apurva Sessions wurde deswegen so benannt, da sich Kollegin Apurva an der Station Wettzell speziell mit diesen Sessions beschäftigt hat

Zu erwähnen ist noch, dass ursprünglich 29 Sessions zur Verfügung standen, zwei davon beinhalteten allerdings grob fehlerhafte Daten und wurden daher nicht für die Auswertung verwendet. Während in den Whisp und Apurva Sessions jeweils nur Wz und Wn beobachtet haben, wurde in den beiden Mixed Mode Sessions auch von der VGOS Antenne Ws beobachtet. Zusätzlich wurde in zwei der Whisp Sessions (siehe Halsig et al., 2016) noch von der Legacy Antenne in Onsala beobachtet, diese Beobachtungen wurden für die Auswertung allerdings eliminiert.

Ebenso standen für den Vergleich auch terrestrische local-tie Messungen zur Verfügung. Die sich daraus ergebenden Stationskoordinaten wurden von Thomas Klügel (Observatorium Wettzell) zur Verfügung gestellt und sind in Tabelle 3.2 ersichtlich.

| Antenne | x [m] | y [m] | z [m] |
|---------|--------------|-------------|--------------|
| Wz | 4075539.7499 | 931735.3999 | 4801629.4536 |
| Wn | 4075627.7862 | 931774.1314 | 4801552.2908 |
| Ws | 4075659.0943 | 931824.6359 | 4801516.1593 |

Tabelle 3.2: Stationskoordinaten der terrestrischen Messungen

Insgesamt standen für die Auswertung 9662 Beobachtungen aller drei Kategorien zur Verfügung. Für die Sessions aus der Mixed Mode und der Whisp Kategorie standen diese im "VGOSDB" Format zur Verfügung. Die Sessions aus der Apurva Kategorie waren vom "NGS" Datenformat. Für die beiden Mixed Mode Sessions standen zudem verhältnismäßig viele Beobachtungen zur Verfügung, dies ist der Tatsache geschuldet, dass in diesen beiden Sessions alle drei Antennen in Wettzell beobachtet haben, während in den anderen Sessions immer nur Wz und Wn beobachtet haben. Eine detaillierte Auflistung der Beobachtungen ist in Tabelle 3.3 ersichtlich.

| Übersicht Sessions | | | |
|--------------------|-----------|----------------------|-------------|
| Kategorie | Session | Anzahl Beobachtungen | Datenformat |
| Mixed Mode | 20DEC09XB | 1697 | vgosdb |
| Mixed Mode | 20JAN29XD | 1386 | vgosdb |
| Whisp | 14AUG27XF | 536 | vgosdb |
| Whisp | 14OCT23-F | 593 | vgosdb |
| Whisp | 16NOV09-F | 237 | vgosdb |
| Whisp | 17FEB22-F | 457 | vgosdb |
| Apurva | 17AUG23X9 | 350 | ngs |
| Apurva | 17AUG28X9 | 171 | ngs |
| Apurva | 17JUL10X9 | 208 | ngs |
| Apurva | 17JUL17X9 | 184 | ngs |
| Apurva | 17JUL24X9 | 186 | ngs |
| Apurva | 17NOV02X9 | 121 | ngs |
| Apurva | 17NOV16X9 | 245 | ngs |
| Apurva | 17OCT04X9 | 353 | ngs |
| Apurva | 17OCT10X9 | 329 | ngs |
| Apurva | 17OCT12X9 | 314 | ngs |
| Apurva | 17OCT19X9 | 298 | ngs |
| Apurva | 17OCT26X9 | 143 | ngs |
| Apurva | 17OCT30X9 | 52 | ngs |
| Apurva | 17SEP04X9 | 267 | ngs |
| Apurva | 17SEP05X9 | 371 | ngs |
| Apurva | 17SEP21X9 | 320 | ngs |
| Apurva | 17SEP28X9 | 256 | ngs |
| Apurva | 18FEB07X9 | 144 | ngs |
| Apurva | 18JAN10X9 | 159 | ngs |
| Apurva | 18JAN24X9 | 202 | ngs |
| Apurva | 18JAN25X9 | 83 | ngs |

Tabelle 3.3: Übersicht der verwendeten Sessions

4 Auswertung

Die Auswertung der in Kapitel 3.2 beschriebenen Daten erfolgte im ersten Schritt mit VieVS. Damit wurden die einzelnen Sessions prozessiert und Fehler eliminiert. Die weiterführenden Berechnungen der local-ties wurden mit Matlab durchgeführt. Hierfür wurden die Ergebnisse der VieVS Berechnungen aus dem LEVEL3 Ordner verwendet. Die einzelnen Schritte der Auswertung sollen im Folgenden näher erläutert werden.

4.1 Fehlereliminationsverfahren

Im ersten Schritt der Auswertung mussten mit VieVS die Daten ausgewertet werden und die darin enthaltenen Fehler eliminiert werden. Dafür bietet VieVS grundsätzlich zwei Möglichkeiten. Einerseits besteht die Möglichkeit in den Einstellungen die Ausreißer mittels 5-sigma Test zu detektieren und in einem weiteren Berechnungsschritt zu eliminieren. Andererseits besteht auch die Möglichkeit, diese manuell im Residuenplot zu entfernen. In beiden Fällen ist die Fehlerelimination ein iterativer Prozess, der so lange durchgeführt wird, bis alle offensichtlichen Fehler eliminiert sind.

4.1.1 Fehlerelimination mittels 5-sigma Test

Wählt man in den Einstellungen von VieVS die Option „simple outlier test“, werden von VieVS bei erneuter Berechnung alle Ausreißer mit dem gewählten sigma-Niveau detektiert. Standardmäßig ist in VieVS 5-sigma voreingestellt. In Abbildung 4.1 ist der Residuenplot der Session 20JAN29XD zu sehen. Darin lässt sich gut erkennen, dass noch sehr viele Ausreißer vorhanden sind, welche das Ergebnis erheblich beeinflussen. Die Residuen sind dabei je nach beobachtender Antenne anders eingefärbt. Ebenso sind in der Grafik statistische Werte wie etwa die Anzahl der Beobachtungen oder der wrms (weighted root mean square) Wert in Zentimetern bzw. Pikosekunden enthalten.

4 AUSWERTUNG

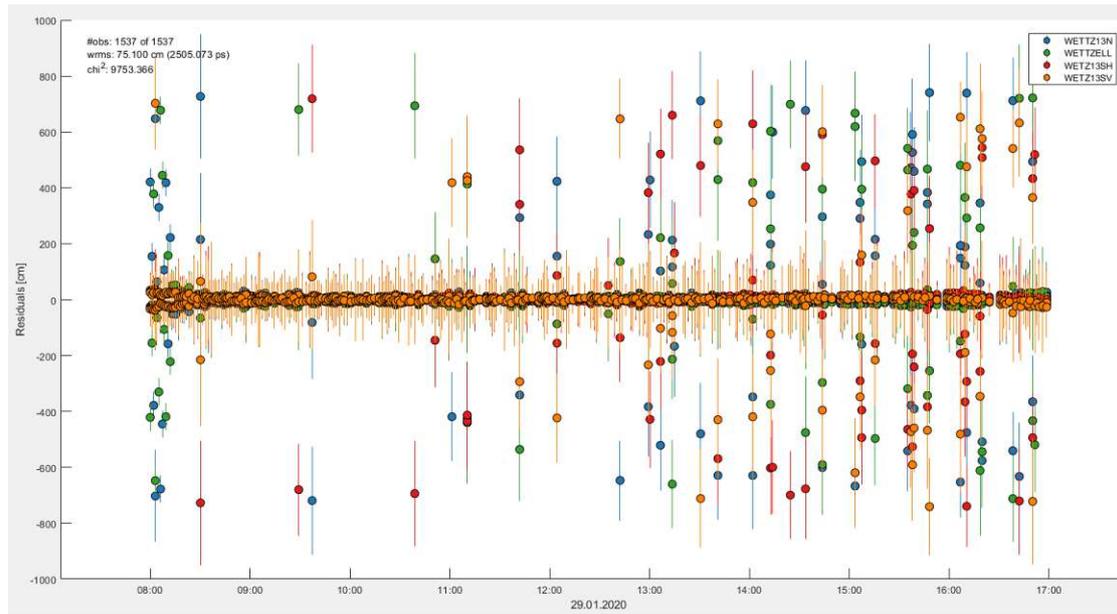


Abbildung 4.1: Residuenplot in VieVS vor der Fehlereliminierung

Im zweiten Berechnungsschritt werden nun alle Ausreißer mithilfe des VieVS 5-sigma Tests detektiert. Diese werden mit einem schwarzen X gekennzeichnet. Man kann in Abbildung 4.2 sehr gut erkennen, wie viele Ausreißer in der ersten Iteration erkannt wurden. Prozessiert man die Daten jetzt erneut und wählt in den Einstellungen, dass die erkannten Ausreißer eliminiert werden sollen, erhält man erneut einen Residuenplot. Der Residuenplot für die Session 20JAN29XD mit den eliminierten Ausreißern ist nun in Abbildung 4.3 ersichtlich.

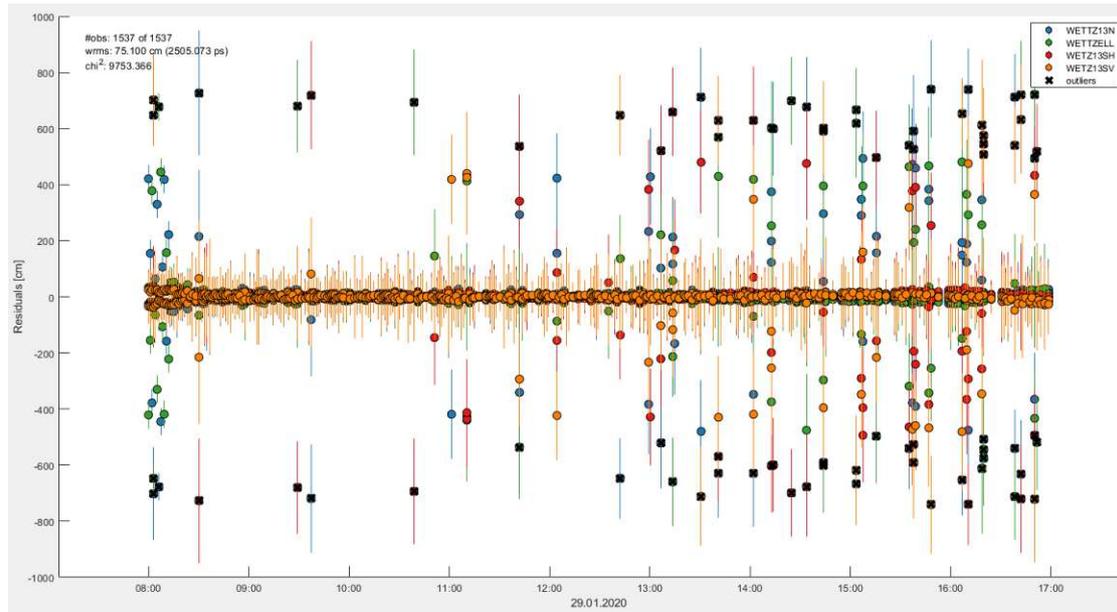


Abbildung 4.2: Residuenplot in VieVS mit den erkannten Ausreißern des 5-sigma Tests

4 AUSWERTUNG

Betrachtet man die statistischen Werte im linken oberen Bereich des Plots, erkennt man, dass insgesamt 41 Ausreißer eliminiert wurden und sich dadurch auch der wrms Wert etwas verringert hat. Es ist allerdings klar ersichtlich, dass immer noch sehr viele Ausreißer in den Daten vorhanden sind. Je nachdem, welches Ergebnis erzielt werden soll, ist es nötig den Prozess iterativ noch einige Male durchzuführen. Für diese Session würden sich insgesamt 5 Iterationen ergeben, bis das Ergebnis zufriedenstellend ist. Insgesamt werden dabei 132 Beobachtungen eliminiert. In Abbildung 4.4 ist der Residuenplot nach der fünften Iteration zu sehen. Darin sind keine erkennbaren Ausreißer mehr vorhanden, die Daten also nun fertig aufbereitet, um weitere Berechnungen damit durchführen zu können. Diese Aussage deckt sich auch mit den statistischen Werten. Der wrms Wert beträgt nun nur mehr 0.75 Zentimeter bzw. 25 Pikosekunden. Im Zuge dieser Arbeit wurde auch der Einfluss der Iterationen auf das Ergebnis der local-ties untersucht. Die Ergebnisse dafür sind in Kapitel 5 ersichtlich.

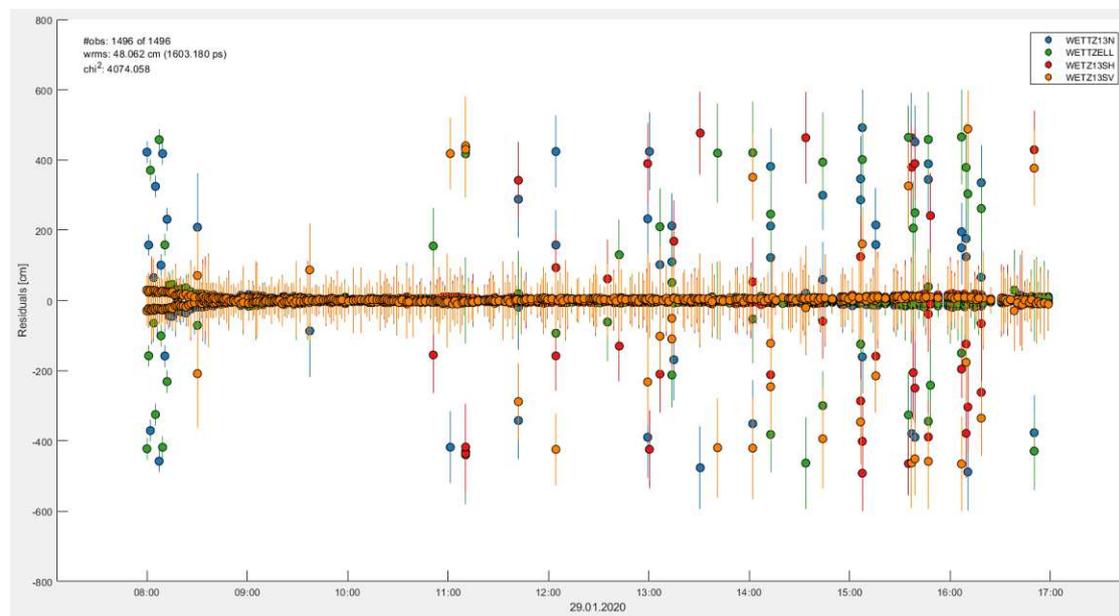


Abbildung 4.3: Residuenplot in VieVS nach der Ausreißerelimination

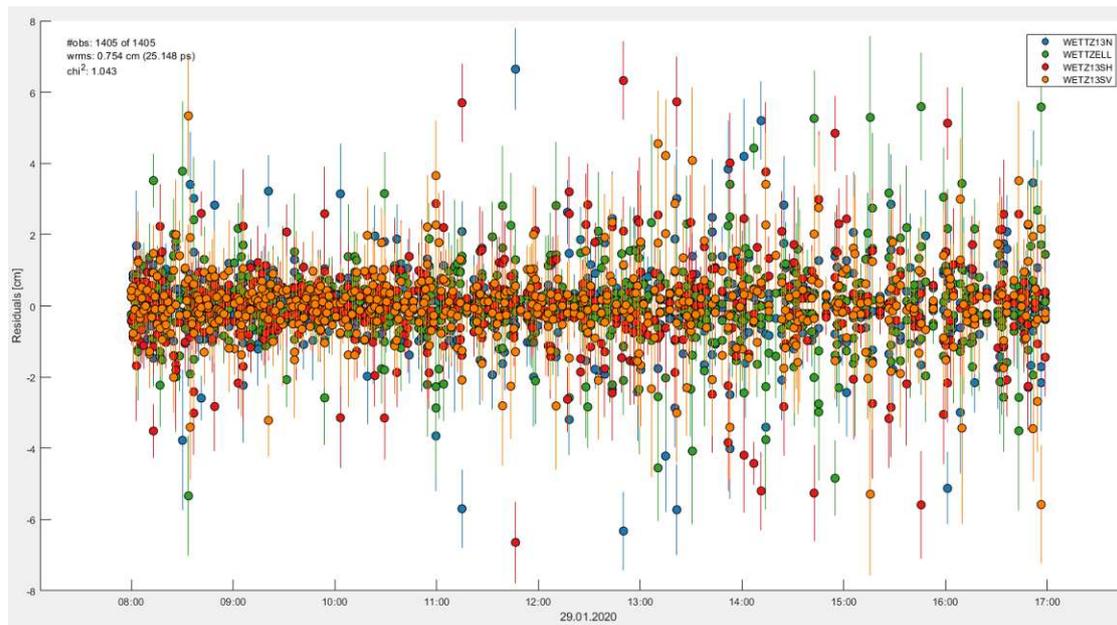


Abbildung 4.4: Residuenplot in VieVS nachdem alle Ausreißer eliminiert wurden

In VieVS gibt es auch die Möglichkeit die eliminierten Beobachtungen in einem gewünschten Ordner abzuspeichern. Standardmäßig werden diese im Default Ordner gespeichert. Abbildung 4.5 zeigt ein solches Ausreißerfile. Dieses wird für jede prozessierte Session eigens erstellt. Jede eliminierte Beobachtung wird dabei in einer Zeile gespeichert. Darin enthalten sind etwa die beiden beobachtenden Stationen sowie in der letzten Spalte die Quelle, welche beobachtet wurde und der Zeitpunkt der Beobachtung, angegeben in MJD (Modifiziertes Julianisches Datum).

20JAN29XD.OUT - Editor

| Datei | Bearbeiten | Format | Ansicht | Hilfe |
|----------|------------|--------------------|----------|-------|
| WETTZ13N | WETTZELL | 58877.335636574076 | 1555+001 | |
| WETTZ13N | WETT13SV | 58877.335636574076 | 1555+001 | |
| WETTZ13N | WETTZELL | 58877.337812500002 | 0814+425 | |
| WETT13SH | WETTZ13N | 58877.354467592595 | 1519-273 | |
| WETT13SH | WETTZELL | 58877.395486111112 | 1123+264 | |
| WETT13SH | WETTZ13N | 58877.401064814811 | 1351-018 | |
| WETT13SH | WETTZELL | 58877.443888888891 | 1555+001 | |
| WETT13SH | WETTZELL | 58877.487696759265 | 1555+001 | |
| WETTZ13N | WETT13SV | 58877.529583333337 | 1920-211 | |
| WETT13SH | WETTZ13N | 58877.546435185184 | 2149+056 | |
| WETT13SH | WETTZELL | 58877.551365740735 | 1920-211 | |

Abbildung 4.5: Ausreißerfile in VieVS mit den beobachtenden Stationen, dem Zeitpunkt der Beobachtung und der beobachteten Quelle

4.1.2 Manuelle Fehlerelimination

Neben der Möglichkeit Ausreißer in den Daten mittels Ausreißertest in VieVS zu eliminieren, besteht auch die Möglichkeit diese manuell im Residuenplot zu entfernen. Eine Elimination auf diese Art und Weise erfolgt völlig willkürlich und ohne statistische Grundlage. Sind

4 AUSWERTUNG

Ausreißer allerdings so deutlich erkennbar wie etwa in Abbildung 4.1, ist dieses Verfahren eine gute Möglichkeit um grob fehlerhafte Daten ohne viele Iterationen zu entfernen. In Abbildung 4.6 ist wieder der Residuenplot der Session 20JAN29XD zu sehen, diesmal allerdings nach der dritten Iteration. Betrachtet man den Plot, würde man manuell etwa die Werte überhalb von 50 und unterhalb von -50 entfernen (symbolisiert durch die roten Linien). Dies deckt sich auch mit den Beobachtungen, welche vom 5-sigma Test als Ausreißer erkannt werden. Hat man entschieden, welche Beobachtungen man eliminieren möchte, muss man nur noch im Menü des Residuenplots die Option „Select“ im Untermenü „Outliers“ wählen und anschließend die gewünschte Beobachtung markieren und dann entfernen. Auch diese Art der Ausreißerentfernung kann wieder iterativ erfolgen. Um ein möglichst genaues Ergebnis zu erhalten, sollten dabei alle Beobachtungen mit Residuen von mehr als 6 Zentimetern entfernt werden. Das Endergebnis deckt sich dann größtenteils mit jenem des 5-sigma Ausreißertests.

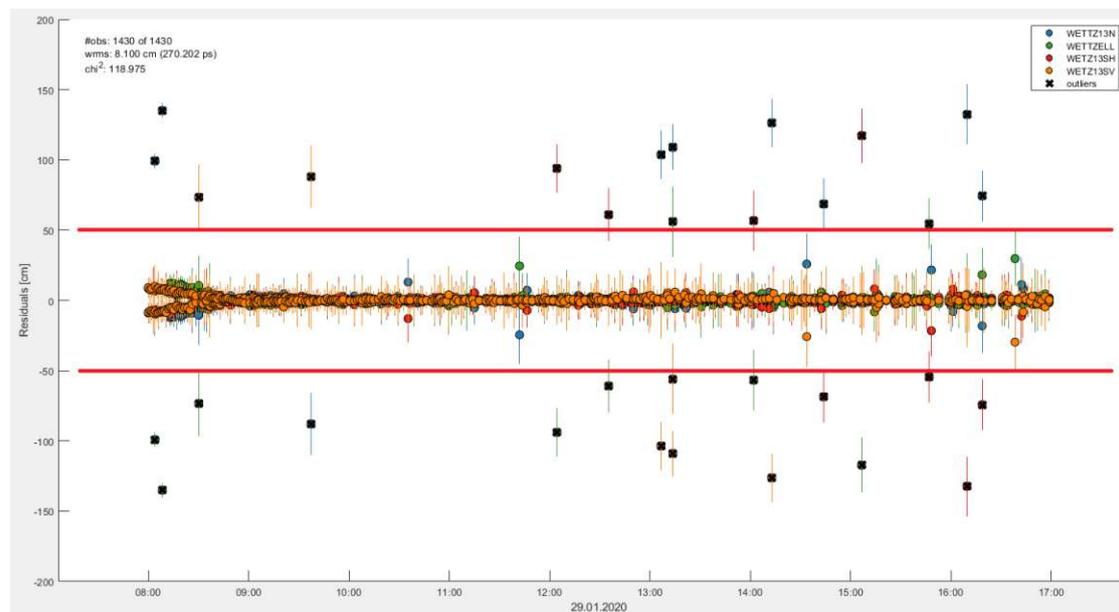


Abbildung 4.6: Residuenplot in VieVS - Beobachtungen, welche nicht zwischen den roten Linien liegen, würden manuell entfernt werden

4.2 Parameterfile

In VieVS ist es zudem möglich eine Datei, das sogenannte Parameterfile, zu erstellen, welches alle Einstellungen für die Auswertung beinhaltet. Dadurch ist es möglich verschiedene Konfigurationen schneller zu laden, ohne durch die einzelnen Menüpunkte navigieren zu müssen, um dort die jeweiligen Einstellungen zu treffen. Für die Auswertung dieser Arbeit wurde ebenfalls ein Parameterfile verwendet, welches nun etwas näher beschrieben werden soll. Da VieVS auf Matlab basiert ist auch die Datei mit den Parametern ein File im „mat“ Format. Will man dieses öffnen, ist dies möglich in dem man die Datei einfach ins Command Window von Matlab hineinzieht. Danach scheint die Datei im Workspace von Matlab auf und kann mit einem Doppelklick geöffnet werden. Macht man dies, sieht man bereits, dass sich das Parameterfile in 6 Unterkategorien gliedert. Diese, sowie eine kurze Beschreibung dazu sind in Tabelle 4.1 ersichtlich.

| Unterordner | Kurzbeschreibung |
|------------------|--|
| opt | Festlegung ob OPT-Files verwendet werden sollen und falls ja, aus welchem Ordner |
| outlier | Festlegung ob Ausreißerfiles generiert oder verwendet werden sollen und falls ja, aus welchem Ordner |
| obs_restrictions | Festlegung von Elevation cut off Winkel |
| vie_init | Festlegung aller Einstellungen für die Berechnung, etwa TRF, CRF, oder auch Ionosphäre und Troposphäre |
| vie_mod | Einstellungen zu verwendeten Modellen, etwa Thermale- und Gravitative Deformation |
| lsmopt | Einstellungen zu den Ausgabeparametern, welche mit VieVS berechnet werden |

Tabelle 4.1: Inhalt Parameterfile

Auf die wichtigsten Einstellungen im verwendeten Parameterfile soll nun kurz eingegangen werden. Für die Auswertung wurden die ICRF3 Koordinaten fixiert und nicht mitgeschätzt im Auswerteprozess. Ebenso wurden die ITRF2014 Koordinaten der WZ Antenne fixiert. Die Koordinaten der Wn und Ws Antenne wurden mitgeschätzt. Die Näherungskordinaten dafür stammen von Hana Krasna. Gespeichert sind diese in vievsTrf im „superstation.mat“ File, in dem Koordinaten von allen VLBI Antennen aus verschiedenen Berechnungen (z.B.: ITRF2014) enthalten sind. Wie üblich wurden auch folgende Stationskorrekturen angebracht: solid earth tides, tidal ocean loading, tidal and non-tidal atmosphere loading, pole tide und ocean pole tide loading. Für die Auswertung wurden keine Troposphären Parameter mitgeschätzt. Der Zenit hydrostatic delay wurde apriori mit Druckwerten aus dem GPT3 Modell (Böhm et al., 2007 und Landskron und Böhm, 2017) berechnet, dabei wurden die Höhenunterschiede der Antennen berücksichtigt. Die Thermale Deformation wurde für die

Auswertung ebenso berücksichtigt, mit Temperaturmessungen an der Station. Natürlich wurde für die Auswertung auch die Gravitative Deformation berücksichtigt. Für das Wz Teleskop existiert allerdings kein Modell, das die Gravitative Deformation beschreibt. Abhilfe wurde dadurch geschaffen, dass dafür anstelle das Modell der bau-ähnlichen Legacy Antenne in Onsala verwendet wurde. Dieses ist in Kapitel 4.3 näher beschrieben. Um den Einfluss der Verwendung eines solchen Modells zu ergründen, war es nötig, einmal alle Daten ohne Gravitative Deformations Modell zu prozessieren und einmal mit Gravitivem Deformations Modell. Dafür musste im `superstation.mat` File der Eintrag für die Gravitative Deformation bei der Wz Antenne mit den Daten der Onsala Antenne ergänzt werden. Die Uhren wurden als `piecewise linear offsets` (Teke et al., 2009) alle 60 Minuten geschätzt, es wurden keine von der Basislinie abhängigen Terme geschätzt. Ebenso wurden keine EOPs in der Auswertung berechnet.

4.3 Gravitations Deformations Modell Onsala

Bei der Legacy Antenne in Onsala handelt es sich um ein Cassegrain Teleskop mit 20 Metern Durchmesser, welches der selben Bauart wie das Wettzell Legacy Teleskop entspringt. Wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt besitzt das Onsala Teleskop im Gegensatz zu Wz jedoch ein Modell, welches die Gravitative Deformation beschreibt. (Nothnagel et al., 2019) Da dieses Modell für die Auswertung essentiell ist, soll darauf in diesem Kapitel detaillierter eingegangen werden, die Grundlage dafür liefert das von Nothnagel et al. (2019) entwickelte Modell, welches zudem noch die Ausdehnungseffekte der einzelnen Bauteile des Teleskops aufgrund von Temperaturänderungen berücksichtigt.

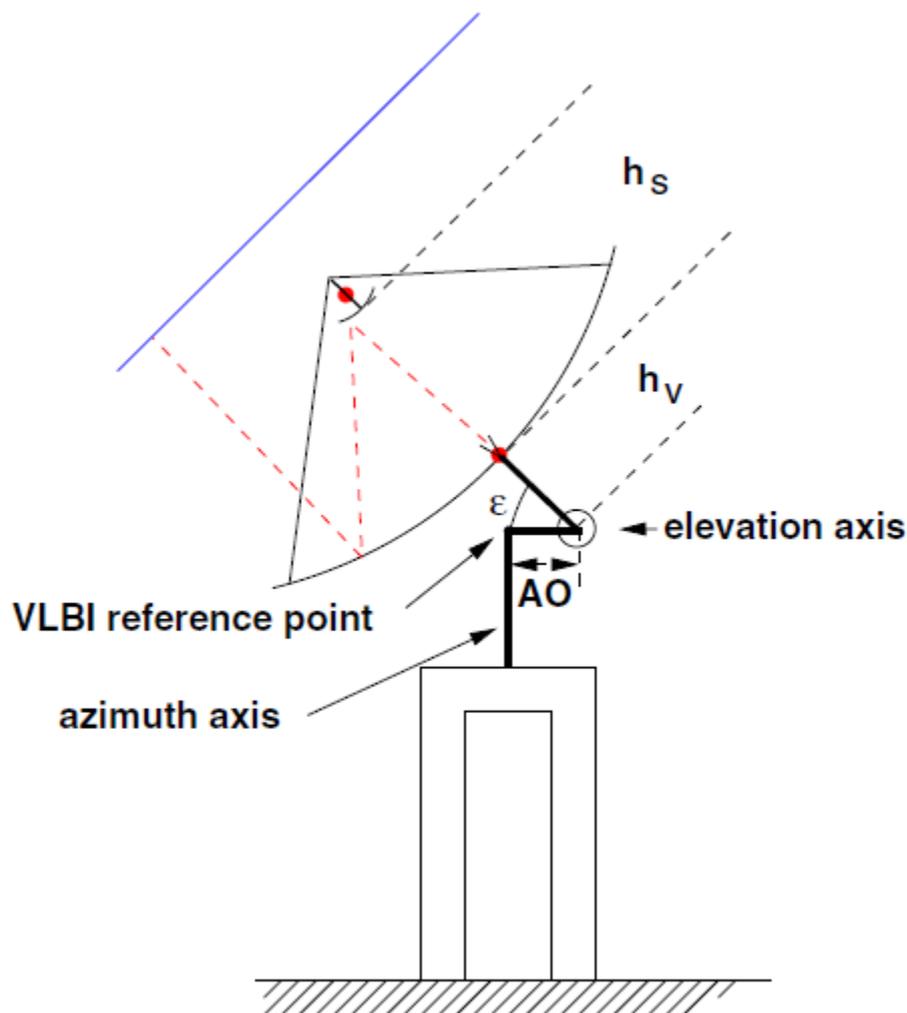


Abbildung 4.7: Laufweg eines Signals im Onsala 20m Teleskop. Die blaue Linie symbolisiert eine ebene Wellenfront, die rot strichlierte Linie skizziert den Pfad des Signals, die roten Punkte markieren die Brennpunkte des Primär- und Subreflektors (Nothnagel et al., 2019)

Wie bereits in Kapitel 2.3.1 beschrieben, kommt es durch unterschiedliche Verkippungen der VLBI Antennen zu unterschiedlichen Einflüssen der Gravitation und dadurch zu elevationsabhängigen Verformungen dieser. Als Grundsatz bei der Gravitativen Deformation wird angenommen, dass das Teleskop bei einer Ausrichtung gegen den Zenit (90° Elevation) gleichmäßig symmetrische Verformungen erfährt. Bei einer Verkippung und damit einer Änderung des Elevationswinkels, ist dies nicht mehr der Fall, die Gravitationskräfte wirken asymmetrisch und die Parabolantenne verformt sich ungleichmäßig. (Nothnagel et al., 2019) In Abbildung 4.7 ist der typische Laufweg eines Signals einer VLBI Quelle sichtbar. Erwähnenswert ist noch, dass es sich beim Onsala 20m Teleskop um eine Antenne handelt, welche sich nicht als ganzes dreht, sondern nur der obere Teil mit dem Reflektor ("turning head approach"). Der obere Teil des Teleskops besteht aus Eisen, alle anderen Teile (Haupt- und Subreflektor) bestehen aus Aluminium. Für die Entwicklung des Gravitativen Deformations Modells wurden im Jahr 2015 Messungen mit einem terrestrischen Laserscanner durchgeführt. Die Änderung des Signallaufwegs im Teleskop wird von 5 verschiedenen Effekten wesentlich beeinflusst (Nothnagel et al., 2019):

- Δl_1 , verursacht durch Höhenvariationen der Sekundärachse
- Δl_2 , verursacht durch Änderungen im Abstand zwischen Elevationsachse und Scheitelpunkt des Paraboloids
- Δl_3 , verursacht durch Deformationen des Hauptreflektors
- Δl_5 , verursacht durch defokussierte Optik bedingt durch den shift des Subreflektors
- Δl_6 , verursacht durch die Deplatzierung des feed horns bei der zweiten Fokussierung

Nach Nothnagel et al. (2019) ergibt sich der Gesamteinfluss als Summe der einzelnen Änderungen in der Länge des Signalweges:

$$\Delta l_{\text{total}}(\epsilon) = \Delta l_1(\epsilon) + \Delta l_2(\epsilon) + \Delta l_3(\epsilon) + \Delta l_5(\epsilon) + \Delta l_6(\epsilon) \quad (4.1)$$

Dadurch, dass es sich bei Δl_1 um einen Einfluss handelt, der rein von Temperaturänderungen beeinflusst wird, vereinfacht sich Gleichung 4.1 zu (Nothnagel et al., 2019):

$$\Delta l_{\text{total}}(\epsilon) = \Delta l_2(\epsilon) + \Delta l_3(\epsilon) + \Delta l_5(\epsilon) + \Delta l_6(\epsilon) \quad (4.2)$$

mit den darin enthaltenen Termen und numerischen Werten für das Onsala 20m Teleskop (Nothnagel et al., 2019):

$$\Delta l_2(\epsilon) = 2.786 \cdot \frac{3503.7^2}{4} \cdot \left[\frac{1}{(8979.6 + 10.5 \cdot \sin \epsilon + 0.04 \cdot \cos \epsilon) \cdot (1 + \gamma_{A1} \cdot (T - T_0))} - \frac{1}{8990.1 \cdot (1 + \gamma_{A1} \cdot (T - T_0))} \right] + 3400.0 \cdot \gamma_{A1} \cdot (T - T_0) \quad (4.3)$$

$$\Delta l_3(\epsilon) = 0.214 \cdot [8979.6 + 10.5 \cdot \sin\epsilon + 0.04 \cdot \cos\epsilon - 8990.1 \cdot (1 - \gamma_{A1} \cdot (T - T_0))] \quad (4.4)$$

$$\Delta l_5(\epsilon) = 2 \cdot 0.893 \cdot [(3.3 - 3.4 \cdot \sin\epsilon + 0.5 \cdot \cos\epsilon) + 8211.7 \cdot \gamma_{A1} \cdot (T - T_0)] \quad (4.5)$$

$$\Delta l_6(\epsilon) = -1.0 \cdot \frac{3503.7^2}{4} \cdot \left[\frac{1}{(8979.6 + 10.5 \cdot \sin\epsilon + 0.04 \cdot \cos\epsilon) \cdot (1 + \gamma_{A1} \cdot (T - T_0))} - \frac{1}{8990.1 \cdot (1 + \gamma_{A1} \cdot (T - T_0))} \right] \quad (4.6)$$

worin γ_{A1} der thermische Ausdehnungskoeffizient und ϵ die Elevation sind.

Um die Delay Beobachtungen nun zu korrigieren, ist der gesamte Einfluss von den beobachteten Delays zu subtrahieren, oder äquivalent dazu, zum apriori Delay Modell zu addieren. (Nothnagel et al., 2019) Abbildung 4.8 zeigt den Einfluss der vier eben beschriebenen Terme, sowie den Gesamteinfluss. Dargestellt für eine Temperatur von 9°C, was zudem der Referenztemperatur T_0 der Antenne entspricht. Der Einfluss der einzelnen Terme liegt dabei zwischen etwa -2mm und etwa 7mm bei einer Elevation von 0°. Mit ansteigender Elevation in Richtung Zenit wird der Einfluss naturgemäß immer kleiner, bis er im Zenit schließlich verschwindet. (Nothnagel et al., 2019) Abbildung 4.9 zeigt die Veränderung eines Teleskops, wenn sich der Elevationswinkel von 90° zu 0° ändert.

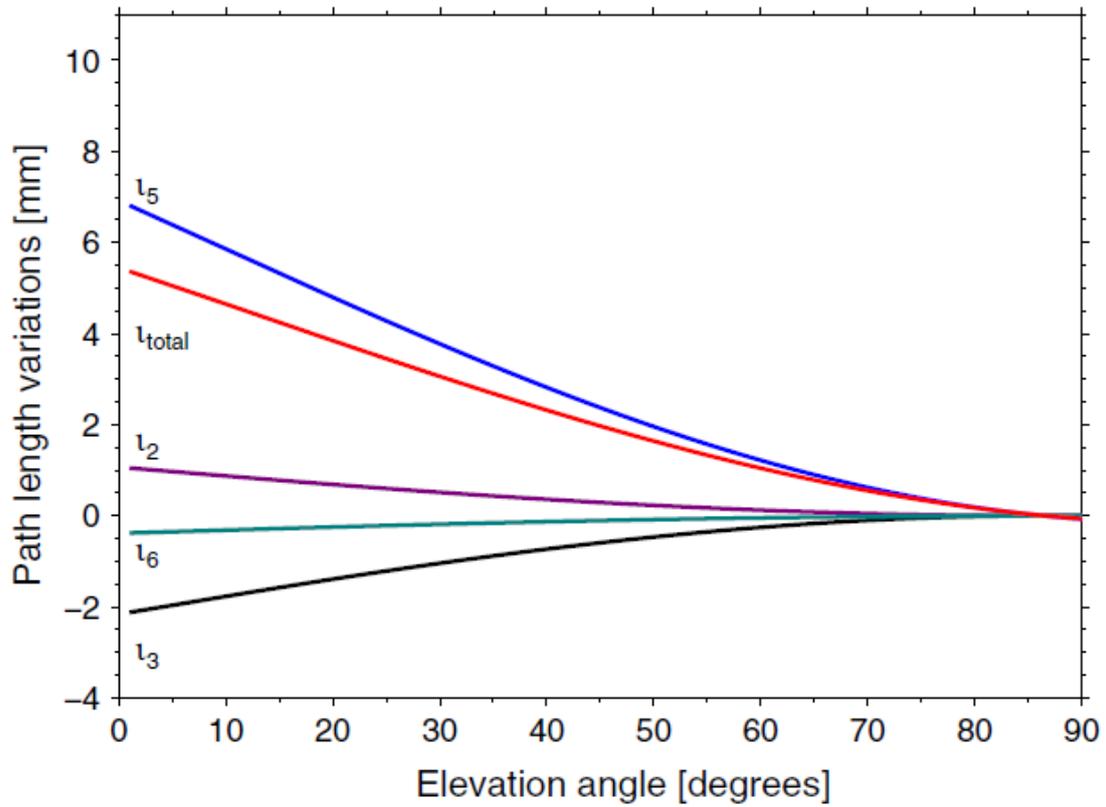


Abbildung 4.8: Einfluss der einzelnen Terme auf den Signallaufweg l_2 (magenta), l_3 (schwarz), l_5 (blau), l_6 (grün) sowie der Gesamteinfluss l_{total} zur Referenztemperatur von 9°C für das 20m Teleskop in Onsala (Nothnagel et al., 2019)

4.4 Berechnungen in Matlab

4.4.1 Berechnung der Stationskoordinaten aus dem x_.mat-File

Nachdem alle Sessions in VieVS prozessiert worden sind, erfolgte die weitere Auswertung mit Matlab. Verwendet wurde dafür das „x_.mat“-File aus dem LEVEL3 Ordner von VieVS. Darin sind alle berechneten Parameter für weiterführende Berechnungen enthalten. Zu Beginn der Auswertung wurden alle x_.mat Files sowie die von Herrn Klügel zur Verfügung gestellten terrestrischen Koordinaten der Antennen importiert. Die erste Schwierigkeit bestand nun darin, die Koordinaten der jeweiligen Station zu den jeweiligen Zeitpunkten der Sessions zu berechnen. Für diese Berechnung war zudem noch das antenna.mat File nötig, welches ebenso von VieVS im LEVEL3 Ordner erstellt wird. Dabei handelt es sich um eine Datei in der die in der Berechnung verwendeten VLBI Teleskope aus dem superstations.mat File exportiert werden. Von Bedeutung sind hier die x,y und z Koordinaten, die Epoche aus der diese stammen, sowie die Geschwindigkeiten v_x , v_y und v_z der Stationen. Um die Koordinaten der Station zum Zeitpunkt der Beobachtung zu erhalten, mussten zu den Koordinaten der Antenne zur Referenzepoche die Geschwindigkeiten in x,y und z angebracht werden. Zudem mussten aus dem x_.mat File die berechneten Koordinatenzuschläge, sowie deren Standardabweichung extrahiert werden. Die Berechnung der Stationskoordinaten erfolgte dann nach Formel 4.7 (beispielhaft für die x Koordinate, für y und z erfolgte die Berechnung analog):

$$X = X_{\text{apriori}} + X_{\text{zuschlag}} + v_x \cdot f_x \quad (4.7)$$

mit

- X , X Koordinate zum Zeitpunkt der Session
- X_{apriori} , apriori Koordinate aus dem antenna.mat File
- X_{zuschlag} , berechneter Koordinatenzuschlag aus dem x_.mat File
- v_x , Stationsgeschwindigkeit pro Jahr aus dem antenna.mat File
- f_x , Multiplikationsfaktor, nötig um von den jährlichen Geschwindigkeiten auf jene von Referenzepoche bis zum Zeitpunkt der Session zu gelangen

Der Multiplikationsfaktor f_x berechnet sich dabei wie folgt:

$$f_x = \frac{MJD_{\text{session}} - MJD_{\text{ref_epoche}}}{365.25} \quad (4.8)$$

mit

4 AUSWERTUNG

- MJD_{session} , MJD Zeitpunkt der Session
- $MJD_{\text{ref_epoche}}$, MJD Zeitpunkt der Referenzeпоche, dem Zeitpunkt von welchem die Stationskoordinaten im antenna.mat File stammen

Die Referenzeпоchen sind dabei:

- Wz - 55197 [mjd]
- Wn - 57023 [mjd]
- Ws - 58484 [mjd]

Die sich daraus ergebenden Faktoren für die VLBI Antennen Wz, Wn und Ws sind in Tabelle 4.2 ersichtlich.

| Session | Wz | Wn | Ws |
|-----------|---------|---------|--------|
| 20DEC09XB | 10.9400 | 5.9411 | 1.9411 |
| 20JAN29XD | 10.0780 | 5.0787 | 1.0787 |
| 14AUG27XF | 4.6543 | -0.3450 | |
| 14OCT23-F | 4.8104 | -0.1889 | |
| 16NOV09-F | 6.8583 | 1.8590 | |
| 17FEB22-F | 7.1458 | 2.1465 | |
| 17AUG23X9 | 7.6441 | 2.6448 | |
| 17AUG28X9 | 7.6578 | 2.6585 | |
| 17JUL10X9 | 7.5236 | 2.5243 | |
| 17JUL17X9 | 7.5428 | 2.5435 | |
| 17JUL24X9 | 7.5619 | 2.5626 | |
| 17NOV02X9 | 7.8385 | 2.8392 | |
| 17NOV16X9 | 7.8768 | 2.8775 | |
| 17OCT04X9 | 7.7591 | 2.7598 | |
| 17OCT10X9 | 7.7755 | 2.7762 | |
| 17OCT12X9 | 7.7810 | 2.7817 | |
| 17OCT19X9 | 7.8001 | 2.8008 | |
| 17OCT26X9 | 7.8193 | 2.8200 | |
| 17OCT30X9 | 7.8303 | 2.8309 | |
| 17SEP04X9 | 7.6769 | 2.6776 | |
| 17SEP05X9 | 7.6797 | 2.6804 | |
| 17SEP21X9 | 7.7235 | 2.7242 | |
| 17SEP28X9 | 7.7426 | 2.7433 | |
| 18FEB07X9 | 8.1040 | 3.1047 | |
| 18JAN10X9 | 8.0274 | 3.0281 | |
| 18JAN24X9 | 8.0657 | 3.0664 | |
| 18JAN25X9 | 8.0684 | 3.0691 | |

Tabelle 4.2: Multiplikationsfaktoren für die Geschwindigkeiten der Stationen

Wendet man nun Formel 4.7 nicht nur für X sondern auch für Y und Z an, erhält man die Stationskoordinaten für die Stationen Wz, Wn und Ws für alle 27 Sessions. Dadurch, dass das Teleskop Ws horizontale und vertikale Polarisierungen berücksichtigt, ergeben sich hier auch leichte Unterschiede in den Stationskoordinaten. Die sich ergebenden Koordinaten sind in den Tabellen 4.3 - 4.6 angeführt. Bei allen ist bereits der Effekt der Gravitativen Deformation berücksichtigt.

| Session | Wz | | |
|-----------|-------------|------------|-------------|
| | X [m] | Y [m] | Z [m] |
| 20DEC09XB | 4075539.497 | 931735.669 | 4801629.605 |
| 20JAN29XD | 4075539.511 | 931735.655 | 4801629.596 |
| 14AUG27XF | 4075539.598 | 931735.562 | 4801629.542 |
| 14OCT23-F | 4075539.596 | 931735.565 | 4801629.544 |
| 16NOV09-F | 4075539.563 | 931735.600 | 4801629.564 |
| 17FEB22-F | 4075539.558 | 931735.605 | 4801629.567 |
| 17AUG23X9 | 4075539.550 | 931735.613 | 4801629.572 |
| 17AUG28X9 | 4075539.550 | 931735.613 | 4801629.572 |
| 17JUL10X9 | 4075539.552 | 931735.611 | 4801629.571 |
| 17JUL17X9 | 4075539.552 | 931735.611 | 4801629.571 |
| 17JUL24X9 | 4075539.551 | 931735.612 | 4801629.571 |
| 17NOV02X9 | 4075539.547 | 931735.616 | 4801629.574 |
| 17NOV16X9 | 4075539.546 | 931735.617 | 4801629.574 |
| 17OCT04X9 | 4075539.548 | 931735.615 | 4801629.573 |
| 17OCT10X9 | 4075539.548 | 931735.615 | 4801629.573 |
| 17OCT12X9 | 4075539.548 | 931735.615 | 4801629.573 |
| 17OCT19X9 | 4075539.548 | 931735.616 | 4801629.573 |
| 17OCT26X9 | 4075539.547 | 931735.616 | 4801629.574 |
| 17OCT30X9 | 4075539.547 | 931735.616 | 4801629.574 |
| 17SEP04X9 | 4075539.550 | 931735.614 | 4801629.572 |
| 17SEP05X9 | 4075539.549 | 931735.614 | 4801629.572 |
| 17SEP21X9 | 4075539.549 | 931735.614 | 4801629.573 |
| 17SEP28X9 | 4075539.548 | 931735.615 | 4801629.573 |
| 18FEB07X9 | 4075539.543 | 931735.621 | 4801629.577 |
| 18JAN10X9 | 4075539.544 | 931735.620 | 4801629.576 |
| 18JAN24X9 | 4075539.543 | 931735.620 | 4801629.576 |
| 18JAN25X9 | 4075539.543 | 931735.620 | 4801629.576 |

Tabelle 4.3: Stationskoordinaten Wz für alle 27 Sessions

| Session | Wn | | |
|-----------|-------------|------------|-------------|
| | X [m] | Y [m] | Z [m] |
| 20DEC09XB | 4075627.533 | 931774.400 | 4801552.446 |
| 20JAN29XD | 4075627.547 | 931774.386 | 4801552.433 |
| 14AUG27XF | 4075627.636 | 931774.295 | 4801552.381 |
| 14OCT23-F | 4075627.634 | 931774.297 | 4801552.384 |
| 16NOV09-F | 4075627.600 | 931774.332 | 4801552.403 |
| 17FEB22-F | 4075627.592 | 931774.329 | 4801552.400 |
| 17AUG23X9 | 4075627.587 | 931774.346 | 4801552.409 |
| 17AUG28X9 | 4075627.586 | 931774.345 | 4801552.409 |
| 17JUL10X9 | 4075627.588 | 931774.343 | 4801552.407 |
| 17JUL17X9 | 4075627.588 | 931774.344 | 4801552.409 |
| 17JUL24X9 | 4075627.585 | 931774.343 | 4801552.405 |
| 17NOV02X9 | 4075627.585 | 931774.348 | 4801552.414 |
| 17NOV16X9 | 4075627.582 | 931774.349 | 4801552.415 |
| 17OCT04X9 | 4075627.586 | 931774.347 | 4801552.411 |
| 17OCT10X9 | 4075627.584 | 931774.347 | 4801552.410 |
| 17OCT12X9 | 4075627.584 | 931774.347 | 4801552.412 |
| 17OCT19X9 | 4075627.584 | 931774.348 | 4801552.411 |
| 17OCT26X9 | 4075627.583 | 931774.347 | 4801552.412 |
| 17OCT30X9 | 4075627.584 | 931774.346 | 4801552.412 |
| 17SEP04X9 | 4075627.585 | 931774.346 | 4801552.410 |
| 17SEP05X9 | 4075627.587 | 931774.347 | 4801552.410 |
| 17SEP21X9 | 4075627.585 | 931774.346 | 4801552.410 |
| 17SEP28X9 | 4075627.586 | 931774.346 | 4801552.410 |
| 18FEB07X9 | 4075627.579 | 931774.352 | 4801552.414 |
| 18JAN10X9 | 4075627.579 | 931774.350 | 4801552.413 |
| 18JAN24X9 | 4075627.586 | 931774.354 | 4801552.417 |
| 18JAN25X9 | 4075627.580 | 931774.352 | 4801552.414 |

Tabelle 4.4: Stationskoordinaten Wn für alle 27 Sessions

| Session | Ws horizontal | | |
|-----------|---------------|------------|-------------|
| | X [m] | Y [m] | Z [m] |
| 20DEC09XB | 4075658.849 | 931824.906 | 4801516.316 |
| 20JAN29XD | 4075658.855 | 931824.893 | 4801516.302 |

Tabelle 4.5: Stationskoordinaten Ws horizontal für beide Sessions

| Session | Ws vertikal | | |
|-----------|-------------|------------|-------------|
| | X [m] | Y [m] | Z [m] |
| 20DEC09XB | 4075658.850 | 931824.905 | 4801516.317 |
| 20JAN29XD | 4075658.855 | 931824.892 | 4801516.303 |

Tabelle 4.6: Stationskoordinaten Ws vertikal für beide Sessions

4.4.2 Local-ties und Rotation in UEN

Mit den in Kapitel 4.4.1 berechneten Koordinaten ist es nun möglich Werte für die local-ties zu berechnen. Mit den drei vorhandenen VLBI Antennen, sowie der Tatsache, dass die Ws Antenne vertikale und horizontale Polarisation beobachtet, können somit 6 Basislinien bestimmt werden. Nach Formel 4.9 lassen sich alle Basislinien berechnen:

$$local - tie_{vlbi} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = Station_1 \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} - Station_2 \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

Im Falle der terrestrischen Messungen gibt es lediglich 3 Basislinien, da in diesem Fall bei der Antenne Ws nicht zwischen vertikaler und horizontaler Polarisation unterschieden wird. Die Berechnung der local-ties erfolgt analog zu jenen der VLBI. Für die Bestimmung der local-tie Differenzen müssen im nächsten Schritt dann noch die Basislinien der VLBI Beobachtungen, sowie jene der terrestrischen Beobachtungen subtrahiert werden. Dies passiert nach Formel 4.10:

$$local - tie_{diff} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = local - tie_{terrestrisch} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} - local - tie_{vlbi} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

In der VLBI ist es üblich Ergebnisse in einem lokalen topozentrischen System auszudrücken um etwa Ergebnisse hinsichtlich der vertikalen Komponente untersuchen zu können. Diese Systeme sind meist rechtshändige Koordinatensysteme mit Up, East und North Komponente. Durch die Erdkrümmung sind diese Koordinaten allerdings nur auf ein kleines Gebiet um die VLBI Antenne beschränkt. (Nothnagel, 2022) Die mit Formel 4.10 erhaltenen local-tie Werte wurden deshalb noch in das UEN-System transformiert. Der für die Auswertung gewählte Referenzpunkt hat folgende Werte für die geografische Länge, sowie Breite:

- λ : 12.8775°
- ϕ : 49.1450°

Für die Rotation wurde folgende Rotationsmatrix (4.11) verwendet:

$$\begin{pmatrix} \cos(\phi) \cdot \cos(\lambda) & \cos(\phi) \cdot \sin(\lambda) & \sin(\phi) \\ -\sin(\lambda) & \cos(\lambda) & 0 \\ -\sin(\phi) \cdot \cos(\lambda) & -\sin(\phi) \cdot \sin(\lambda) & \cos(\phi) \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

Die Berechnung der local-tie Werte im UEN-System erfolgte dann mit Formel 4.12:

$$\begin{pmatrix} U \\ E \\ N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\phi) \cdot \cos(\lambda) & \cos(\phi) \cdot \sin(\lambda) & \sin(\phi) \\ -\sin(\lambda) & \cos(\lambda) & 0 \\ -\sin(\phi) \cdot \cos(\lambda) & -\sin(\phi) \cdot \sin(\lambda) & \cos(\phi) \end{pmatrix} \cdot local - tie \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (4.12)$$

Zusätzlich zu den Werten der local-ties sind natürlich auch noch deren Standardabweichung von Interesse. Die Berechnung dieser erfolgte mittels Formel 4.13 (Nothnagel, 2022):

$$Q^{UEN} = R(\lambda, \phi) \cdot Q^{xyz} \cdot R^T(\lambda, \phi) \quad (4.13)$$

mit:

- R: Transformationsmatrix (4.11)
- Q^{xyz} : Standardabweichungen aus dem x_.mat-File

Die Standardabweichungen für die Up, East und North Komponente sind in der Diagonalen der Q^{UEN} Matrix enthalten. Die Werte für Q^{xyz} erhält man wiederum aus dem x_.mat-File. Alle sich ergebenden Werte für die local-ties, sowie deren Genauigkeiten sind im nächsten Kapitel angeführt.

5 Ergebnisse

5.1 Einfluss der Fehlereliminationsverfahren auf die local-ties

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse des Einflusses der verschiedenen Fehlereliminationsverfahren auf die local-ties zu finden. Bei allen Ergebnissen wurde das Gravitative Deformations Modell von Onsala verwendet. Dargestellt ist dies anhand der beiden mixed-mode Sessions. In Tabelle 5.1 sind die jeweiligen Unterschiede in den local-ties ersichtlich.

| Basislinie | Session | Manuell | | | 5-sigma Test | | |
|------------|-----------|---------|--------|--------|--------------|--------|--------|
| | | U [mm] | E [mm] | N [mm] | U [mm] | E [mm] | N [mm] |
| Wn - Wsh | 20DEC09XB | -7.1 | 0.8 | 5.0 | -7.0 | 0.8 | 5.0 |
| | 20JAN29XD | -1.1 | -2.8 | 0.9 | -0.6 | -2.6 | 0.4 |
| Wn - Wsv | 20DEC09XB | -7.7 | 1.5 | 4.5 | -7.9 | 1.4 | 4.6 |
| | 20JAN29XD | -1.0 | -1.7 | -0.6 | -1.3 | -1.6 | -0.7 |
| Wsv - Wsh | 20DEC09XB | -0.6 | 0.7 | -0.5 | -0.9 | 0.6 | -0.3 |
| | 20JAN29XD | 0.1 | 1.1 | -1.5 | -0.7 | 1.0 | -1.1 |
| Wz - Wn | 20DEC09XB | -2.5 | 0.6 | -2.7 | -2.4 | 0.6 | -2.8 |
| | 20JAN29XD | 0.1 | 0.5 | 0.1 | 0.5 | 0.5 | 0.2 |
| Wz - Wsh | 20DEC09XB | -9.6 | 1.5 | 2.2 | -9.5 | 1.4 | 2.2 |
| | 20JAN29XD | -0.9 | -2.3 | 1.0 | -0.1 | -2.1 | 0.5 |
| Wz - Wsv | 20DEC09XB | -10.2 | 2.1 | 1.8 | -10.3 | 2.0 | 1.9 |
| | 20JAN29XD | -0.8 | -1.3 | -0.5 | -0.8 | -1.1 | -0.5 |

Tabelle 5.1: Unterschiede in den local-ties je nach Fehlereliminationsverfahren, je nach Basislinie für die beiden mixed-mode Sessions

Tabelle 5.2 listet schließlich auch noch einmal die jeweiligen Differenzen zwischen den beiden Verfahren auf. Wie man sofort erkennen kann, sind die Unterschiede allesamt im Submillimeter Bereich. Generell lässt sich aber sagen, dass die Differenzen der Session am 29. Jänner 2020 etwas größer sind als jene am 9. Dezember 2020. Im Anschluss an Tabelle 5.2 sind noch die dazugehörigen Plots zu finden. Abbildung 5.1 bis Abbildung 5.4 zeigen dabei die Basislinien sowie die Up, East und North Komponente der local ties, wobei hier die Fehlerauswertung manuell erfolgte. Der jeweilige Wert ist stets die Differenz der VLBI Messung zu den terrestrischen Messungen (siehe Formel 4.10). Die terrestrischen Messungen sind in den Plots als schwarze Linie dargestellt. Zusätzlich dazu ist zu jedem Wert auch die Standardabweichung ersichtlich. Da für jede Session mehrere Basislinien vorliegen, wurden die Daten zur besseren Sichtbarkeit entlang der Zeitachse versetzt.

| Basislinie | Session | Differenz | | |
|------------|-----------|-----------|--------|--------|
| | | U [mm] | E [mm] | N [mm] |
| Wn - Wsh | 20DEC09XB | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| | 20JAN29XD | -0.5 | -0.2 | 0.5 |
| Wn - Wsv | 20DEC09XB | 0.2 | 0.0 | -0.1 |
| | 20JAN29XD | 0.3 | -0.1 | 0.1 |
| Wsv - Wsh | 20DEC09XB | 0.3 | 0.0 | -0.1 |
| | 20JAN29XD | 0.8 | 0.0 | -0.4 |
| Wz - Wn | 20DEC09XB | -0.1 | 0.0 | 0.0 |
| | 20JAN29XD | -0.4 | 0.0 | 0.0 |
| Wz - Wsh | 20DEC09XB | -0.1 | 0.0 | 0.0 |
| | 20JAN29XD | -0.9 | -0.2 | 0.5 |
| Wz - Wsv | 20DEC09XB | 0.2 | 0.1 | -0.1 |
| | 20JAN29XD | -0.1 | -0.2 | 0.0 |

Tabelle 5.2: Differenzen in den local-ties je nach Fehlereliminierungsverfahren

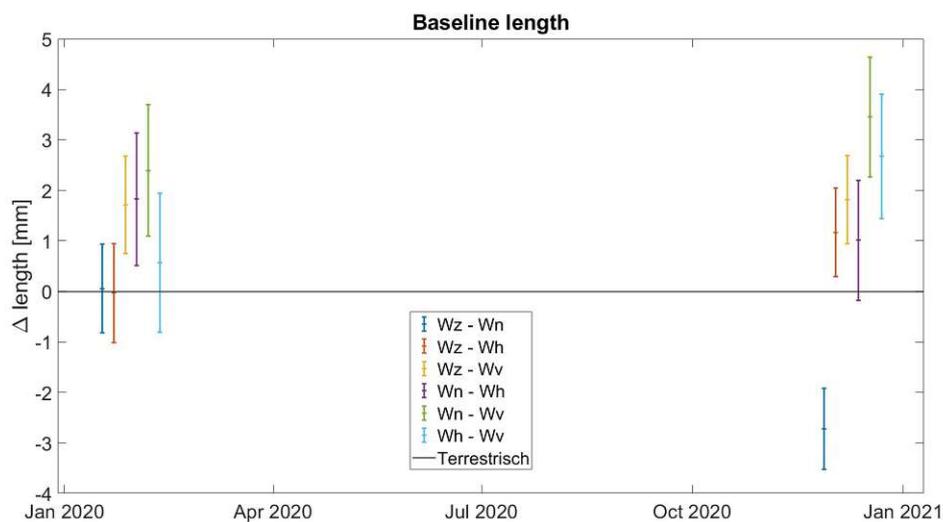


Abbildung 5.1: Manuelle Fehlereliminierung: Basislinienlänge, um eine Überlagerung der Daten zu verhindern, wurden diese entlang der Zeitachse versetzt

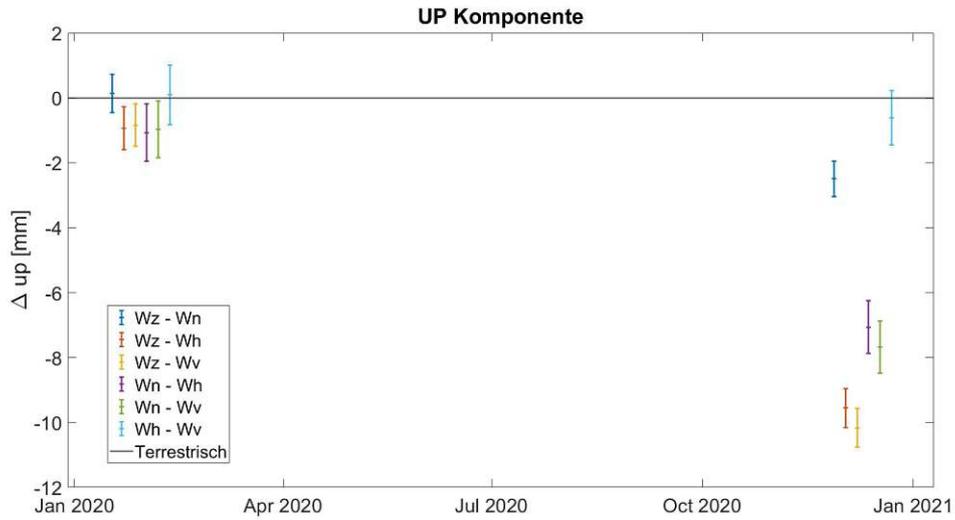


Abbildung 5.2: Manuelle Fehlerelimination: Up Komponente, um eine Überlagerung der Daten zu verhindern, wurden diese entlang der Zeitachse versetzt

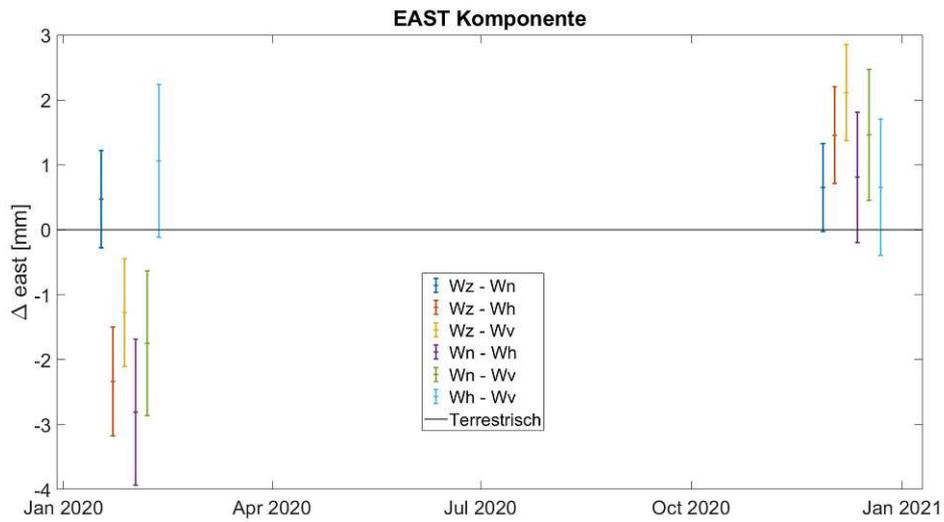


Abbildung 5.3: Manuelle Fehlerelimination: East Komponente, um eine Überlagerung der Daten zu verhindern, wurden diese entlang der Zeitachse versetzt

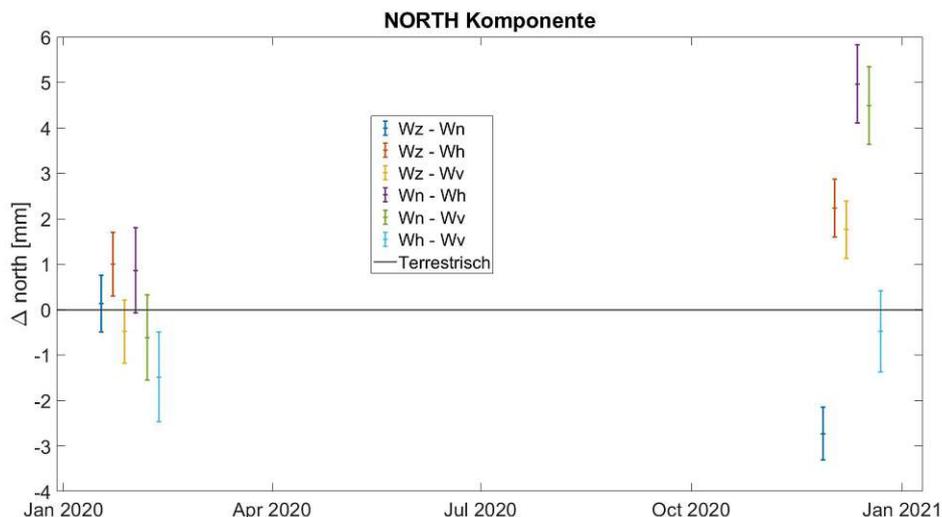


Abbildung 5.4: Manuelle Fehlerelimination: North Komponente, um eine Überlagerung der Daten zu verhindern, wurden diese entlang der Zeitachse versetzt

Die folgenden Abbildungen 5.5 bis 5.8 zeigen nun die Ergebnisse der Auswertung mittels 5-sigma Test. Vergleicht man nun die Ergebnisse der beiden Fehlereliminationsverfahren grafisch miteinander, so erkennt man, wie auch durch die numerischen Werte gedeckt, dass sich kaum Unterschiede in den local-ties ergeben. Je nach Genauigkeitsanforderung an die abgeleiteten Ergebnisse wäre es daher durchaus legitim, bei der Auswertung der Sessions die Fehlerelimination nur manuell durchzuführen, was die Auswertzeit der Sessions deutlich verkürzt.

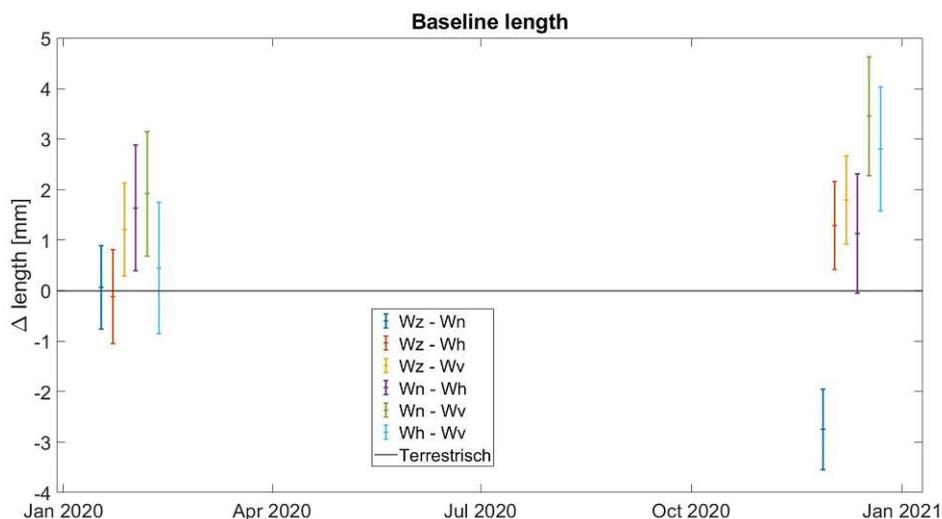


Abbildung 5.5: Fehlerelimination mittels 5-sigma Test: Basislinienlänge, um eine Überlagerung der Daten zu verhindern, wurden diese entlang der Zeitachse versetzt

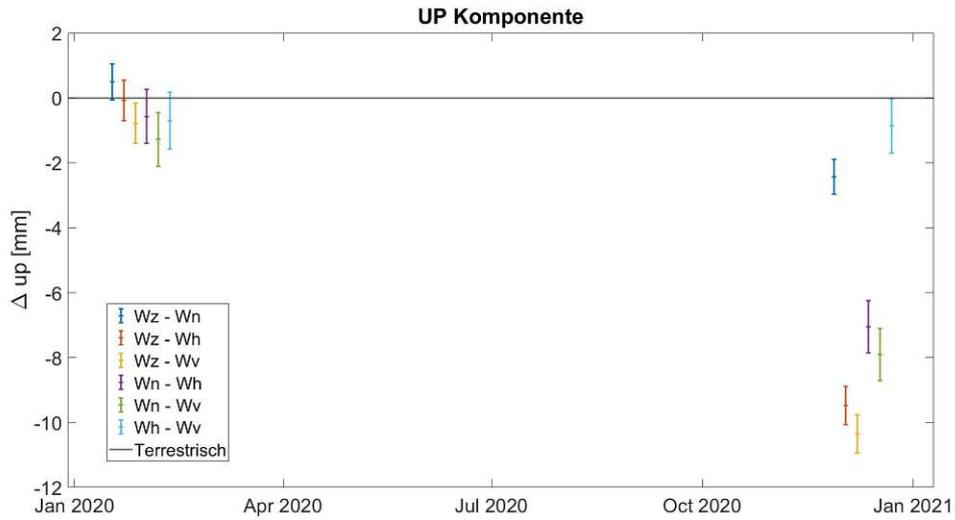


Abbildung 5.6: Fehlerelimination mittels 5-sigma Test: Up Komponente, um eine Überlagerung der Daten zu verhindern, wurden diese entlang der Zeitachse versetzt

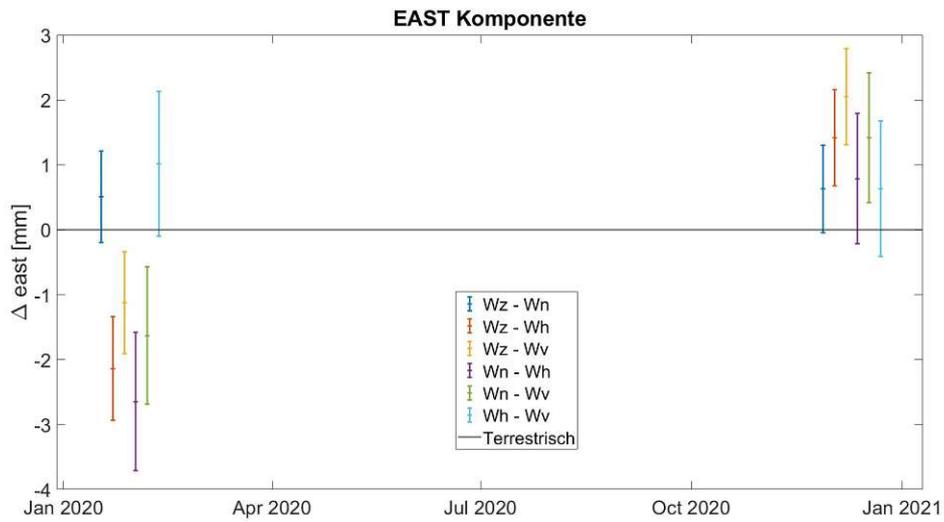


Abbildung 5.7: Fehlerelimination mittels 5-sigma Test: East Komponente, um eine Überlagerung der Daten zu verhindern, wurden diese entlang der Zeitachse versetzt

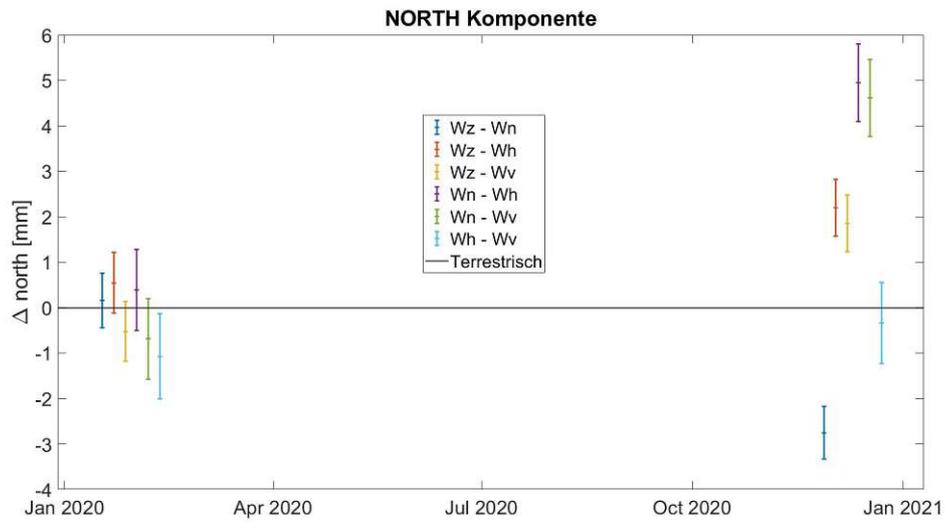


Abbildung 5.8: Fehlerelimination mittels 5-sigma Test: North Komponente, um eine Überlagerung der Daten zu verhindern, wurden diese entlang der Zeitachse versetzt

5.2 Ergebnisse ohne Gravitations Deformations Modell

In diesem Kapitel werden alle Ergebnisse der local-tie Messungen präsentiert. Jedoch wurde für alle Berechnungen noch keine Gravitative Deformation berücksichtigt. Die Abbildungen 5.9 bis 5.12 zeigen die Ergebnisse der local-ties bei denen kein Gravitations Deformations Modell berücksichtigt wurde. Dargestellt ist die Basislinie Wz - Wn. Geplottet sind jeweils die Werte der Differenzen aus VLBI und terrestrischer Messung, auch hier wurden, wie im vorherigen Kapitel, aufgrund der besseren Ersichtlichkeit die Werte entlang der Zeitachse versetzt. In Tabelle 5.3 sind die Werte, welche in den Abbildungen dargestellt wurden, numerisch aufgelistet. Im Anschluss daran erfolgt eine kurze Diskussion der gezeigten Ergebnisse. Zum Abschluss des Kapitels werden die Ergebnisse der beiden mixed-mode Sessions präsentiert und diskutiert.

5.2.1 Basislinie Wz - Wn

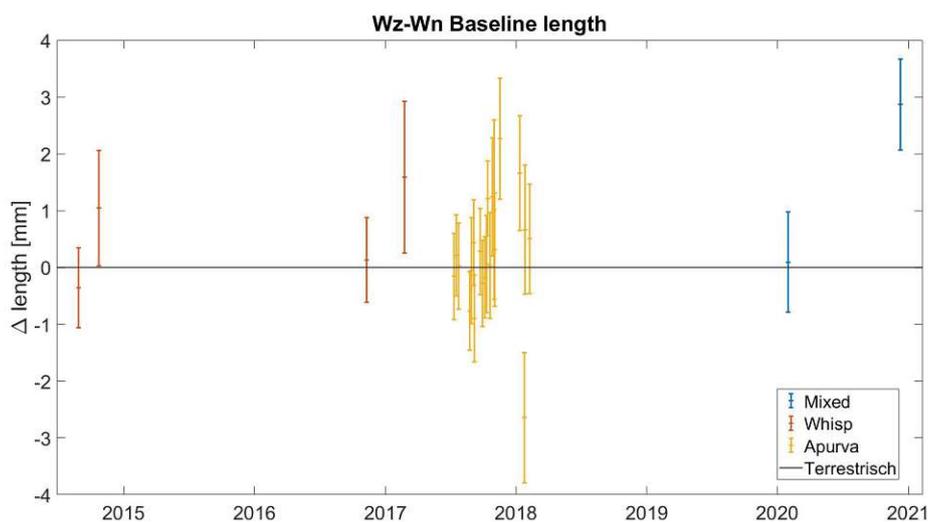


Abbildung 5.9: Basislinie Wz-Wn: local-ties ohne Gravitations Deformations Modell: Baseline length, um eine Überlagerung der Daten zu verhindern, wurden diese entlang der Zeitachse versetzt

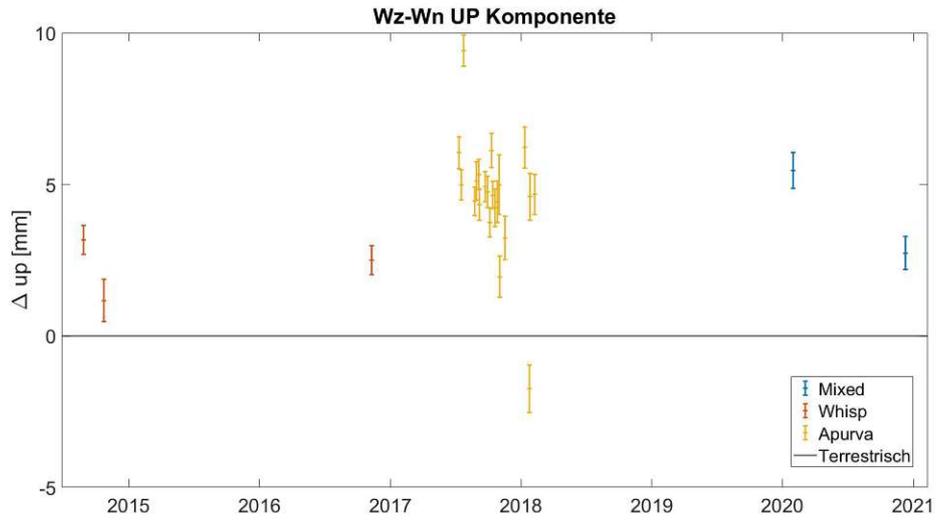


Abbildung 5.10: Basislinie Wz-Wn: local-ties ohne Gravitative Deformations Modell: Up Komponente, um eine Überlagerung der Daten zu verhindern, wurden diese entlang der Zeitachse versetzt

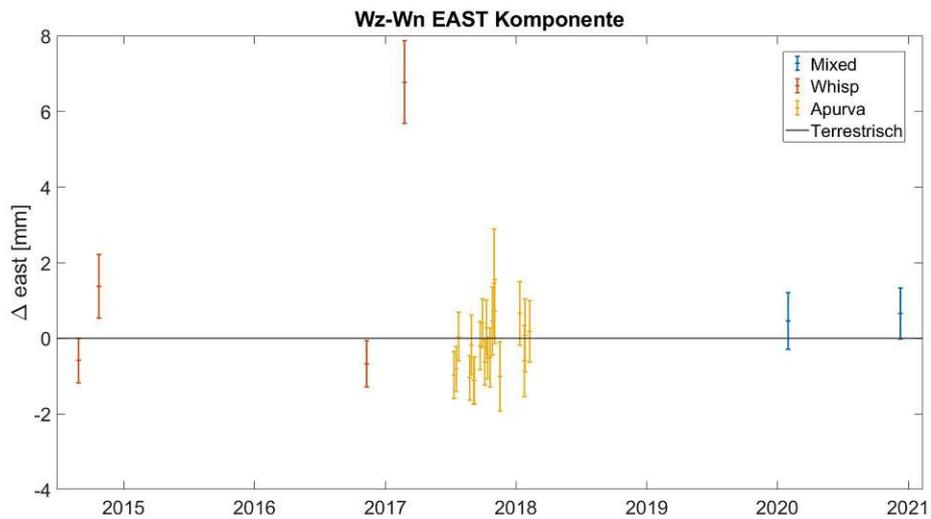


Abbildung 5.11: Basislinie Wz-Wn: local-ties ohne Gravitative Deformations Modell: East Komponente, um eine Überlagerung der Daten zu verhindern, wurden diese entlang der Zeitachse versetzt

| Session | U [mm] | E [mm] | N [mm] | Baseline length [mm] |
|-----------|--------|--------|--------|----------------------|
| 20DEC09XB | 2.7 | 0.7 | -2.7 | 2.9 |
| 20JAN29XD | 5.5 | 0.5 | 0.1 | 0.1 |
| 14AUG27XF | 3.2 | -0.6 | 0.4 | -0.4 |
| 14OCT23-F | 1.2 | 1.4 | -0.8 | 1.0 |
| 16NOV09-F | 2.5 | -0.7 | -0.2 | 0.1 |
| 17FEB22-F | 14.7 | 6.8 | -0.2 | 1.6 |
| 17AUG23X9 | 4.4 | -1.0 | 0.7 | -0.8 |
| 17AUG28X9 | 5.1 | -0.2 | 0.2 | -0.1 |
| 17JUL10X9 | 6.0 | -1.0 | 0.2 | -0.2 |
| 17JUL17X9 | 5.0 | -0.8 | -0.2 | 0.2 |
| 17JUL24X9 | 9.4 | 0.0 | 0.2 | 0.0 |
| 17NOV02X9 | 1.9 | 0.7 | -0.2 | 0.3 |
| 17NOV16X9 | 3.2 | -1.0 | -2.4 | 2.3 |
| 17OCT04X9 | 3.7 | -0.6 | 0.2 | -0.2 |
| 17OCT10X9 | 6.1 | 0.3 | 0.2 | 0.1 |
| 17OCT12X9 | 4.6 | -0.5 | -1.2 | 1.2 |
| 17OCT19X9 | 4.2 | -0.5 | 0.0 | 0.0 |
| 17OCT26X9 | 4.4 | 0.5 | -1.1 | 1.2 |
| 17OCT30X9 | 5.0 | 1.4 | -0.7 | 1.0 |
| 17SEP04X9 | 5.3 | -1.1 | -0.5 | 0.4 |
| 17SEP05X9 | 4.3 | -1.1 | 0.9 | -0.9 |
| 17SEP21X9 | 4.9 | -0.2 | -0.2 | 0.3 |
| 17SEP28X9 | 4.8 | 0.4 | 0.5 | -0.3 |
| 18FEB07X9 | 4.7 | 0.2 | -0.4 | 0.5 |
| 18JAN10X9 | 6.2 | 0.6 | -1.4 | 1.7 |
| 18JAN24X9 | -1.7 | -0.6 | 2.5 | -2.6 |
| 18JAN25X9 | 4.6 | 0.1 | -0.5 | 0.7 |

Tabelle 5.3: local-tie Werte ohne Gravitative Deformations Modell aller 27 Sessions für die Up, East und North Komponenten, sowie die Basislinienlänge für die Basislinie Wz-Wn

Betrachtet man die Abbildungen, so fällt auf, dass die Basislinienlänge, sowie die East und North Komponente, bis auf ein paar einzelne Sessions, sehr gut mit den terrestrischen Messungen übereinstimmen. Es fällt aber auch sofort auf, dass bei der Up Komponente ein deutlicher Unterschied vorhanden ist. Es lässt sich sagen, dass eine Verschiebung von etwa 4-5 Millimetern in den Daten vorhanden ist. Dies ist erklärbar durch das fehlende Gravitative Deformations Modell, da sich dieser Einfluss besonders stark auf die Up Komponente auswirkt, wie auch bereits von Varenius et al. (2021) und Niell et al. (2021) festgestellt wurde.

In Tabelle 5.3 sind die Werte aus den Abbildungen aufgelistet. Auch hier kann man schon auf den ersten Blick feststellen, dass die Up Komponente deutlich stärker betroffen ist. In Tabelle 5.4 sind die Mittelwerte der drei Komponenten angeführt. Die Werte dieser decken sich mit den vorherigen Aussagen, in der Up Komponente gibt es eine Verschiebung von 4.7 Millimetern im Mittel, in der East und North Komponente sind diese mit 0.1 und -0.2 Millimetern vernachlässigbar. Selbiges gilt für die Länge der Basislinie, auch hier beträgt die mittlere Abweichung nur 0.4 Millimeter, ein systematischer Effekt auf diese Komponente ist damit ebenfalls auszuschließen.

| | U [mm] | E [mm] | N [mm] | Baseline length [mm] |
|-----------------------------|--------|--------|--------|----------------------|
| Mittelwert | 4.7 | 0.1 | -0.2 | 0.4 |
| mittlere Standardabweichung | 0.6 | 0.8 | 0.7 | 0.9 |

Tabelle 5.4: Mittelwerte und mittlere Standardabweichung der local-ties ohne Gravitationsmodell für alle 27 Sessions

5.2.2 Mixed-mode Sessions

Die folgenden Abbildungen 5.13 bis 5.16 zeigen den selben Sachverhalt, allerdings für die 6 verschiedenen Basislinien der beiden mixed-mode Sessions.

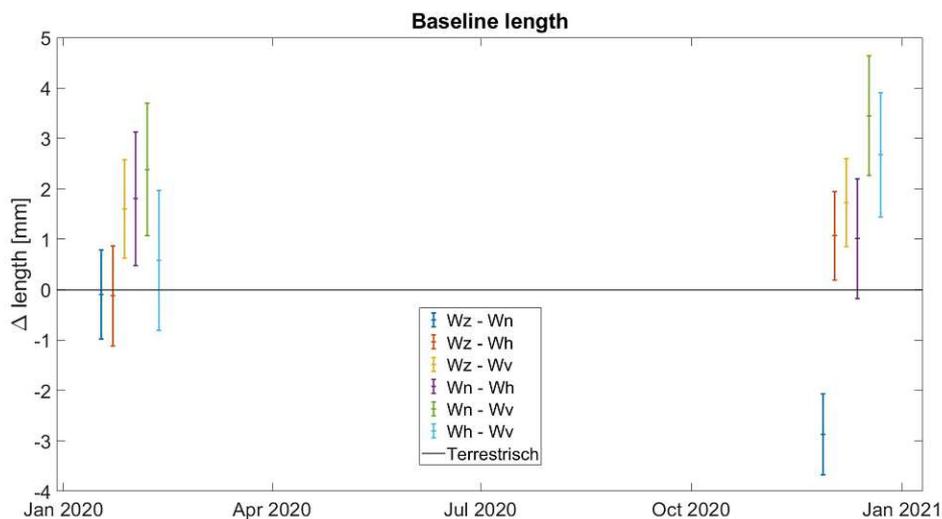


Abbildung 5.13: Mixed-mode sessions: local-ties ohne Gravitationsmodell: Baseline length, um eine Überlagerung der Daten zu verhindern, wurden diese entlang der Zeitachse versetzt

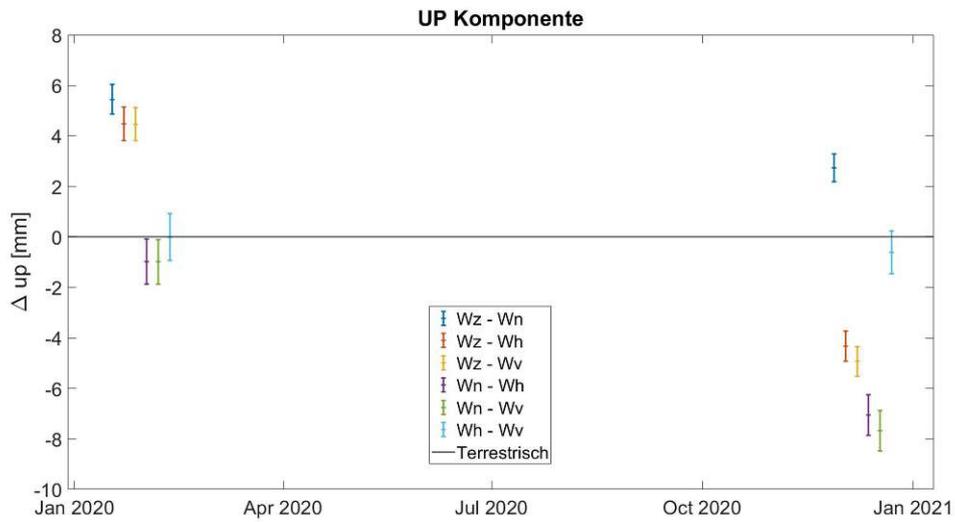


Abbildung 5.14: Mixed-mode sessions: local-ties ohne Gravitations Deformations Modell: Up Komponente, um eine Überlagerung der Daten zu verhindern, wurden diese entlang der Zeitachse versetzt

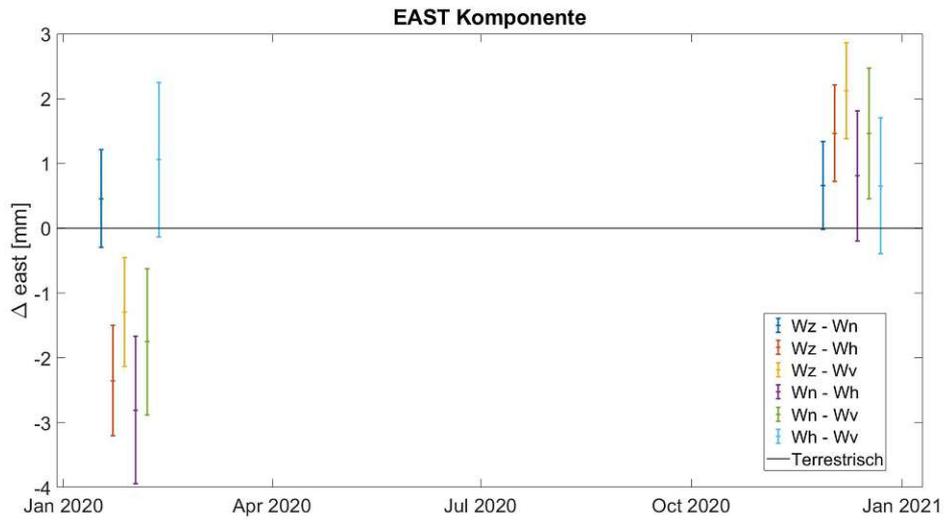


Abbildung 5.15: Mixed-mode sessions: local-ties ohne Gravitations Deformations Modell: East Komponente, um eine Überlagerung der Daten zu verhindern, wurden diese entlang der Zeitachse versetzt

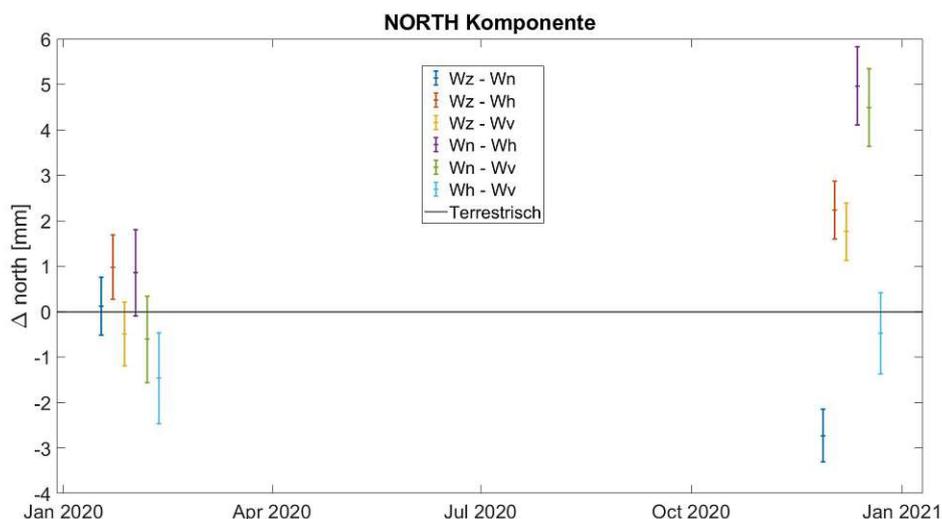


Abbildung 5.16: Mixed-mode sessions: local-ties ohne Gravitations Deformations Modell: North Komponente, um eine Überlagerung der Daten zu verhindern, wurden diese entlang der Zeitachse versetzt

| Basislinie | Session | U [mm] | E [mm] | N [mm] | Baseline length [mm] |
|------------|-----------|--------|--------|--------|----------------------|
| Wn - Wsh | 20DEC09XB | -7.1 | 0.8 | 5.0 | -2.9 |
| | 20JAN29XD | -1.0 | -2.8 | 0.9 | -0.1 |
| Wn - Wsv | 20DEC09XB | -7.7 | 1.5 | 4.5 | 1.1 |
| | 20JAN29XD | -1.0 | -1.8 | -0.6 | -0.1 |
| Wsv - Wsh | 20DEC09XB | -0.6 | 0.7 | -0.5 | 1.7 |
| | 20JAN29XD | 0.0 | 1.1 | -1.5 | 1.6 |
| Wz - Wn | 20DEC09XB | 2.7 | 0.7 | -2.7 | 1.0 |
| | 20JAN29XD | 5.5 | 0.5 | 0.1 | 1.8 |
| Wz - Wsh | 20DEC09XB | -4.3 | 1.5 | 2.2 | 3.5 |
| | 20JAN29XD | 4.5 | -2.4 | 1.0 | 2.4 |
| Wz - Wsv | 20DEC09XB | -4.9 | 2.1 | 1.8 | 2.7 |
| | 20JAN29XD | 4.5 | -1.3 | -0.5 | 0.6 |

Tabelle 5.5: Werte der local-ties ohne Gravitations Deformations Modell für die mixed-mode Sessions

Im Gegensatz zur Basislinie Wz-Wn lassen sich hier auch bei der Up Komponente keine Systematiken erkennen, dies liegt an der Tatsache, dass hier hauptsächlich Basislinien von VGOS Antennen vorhanden sind, bei denen der Einfluss der Gravitations Deformation beinahe vernachlässigbar ist. Dies deckt sich auch mit den Werten aus Tabelle 5.5, wenngleich hier die Werte zumindest in der North Komponente und Basislinienlänge etwas größer sind als bei

der Wz-Wn Basislinie. Aufgrund der Tatsache, dass allerdings nur zwei Sessions vorliegen, lässt sich hier keine allgemeine Aussage über mögliche systematische Einflüsse treffen.

5.3 Ergebnisse mit Gravitivem Deformations Modell

In diesem Kapitel sollen letztlich die Ergebnisse, bei denen das Gravitative Deformations Modell von Onsala für die Antenne Wz verwendet wurde, gezeigt und diskutiert werden. Auch hier sind zuerst die Ergebnisse für die Basislinie Wz-Wn zu sehen und anschließend jene der mixed-mode Sessions.

5.3.1 Basislinie Wz - Wn

Abbildung 5.17 bis 5.20 zeigen wieder die Basislinienlänge, sowie die Up, East und North Komponente der local-ties für die Basislinie Wz-Wn, nur diesmal mit Gravitivem Deformations Modell für die Wz Antenne.

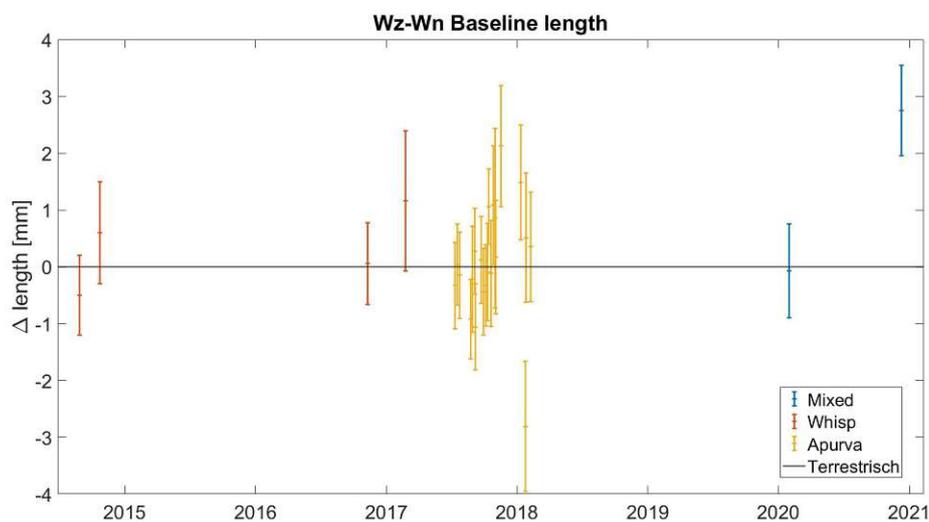


Abbildung 5.17: Basislinie Wz-Wn: local-ties mit Gravitivem Deformations Modell: Baseline length, um eine Überlagerung der Daten zu verhindern, wurden diese entlang der Zeitachse versetzt

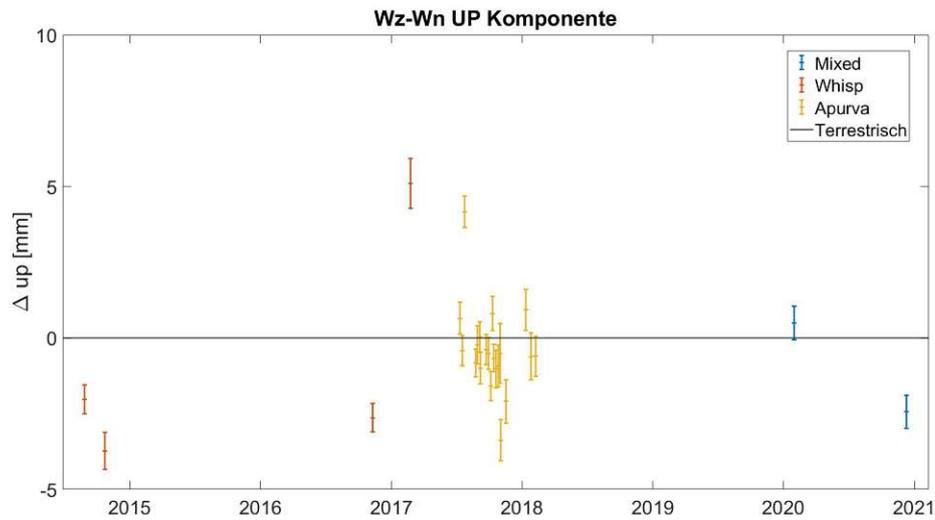


Abbildung 5.18: Basislinie Wz-Wn: local-ties mit Gravitivem Deformations Modell: Up Komponente, um eine Überlagerung der Daten zu verhindern, wurden diese entlang der Zeitachse versetzt

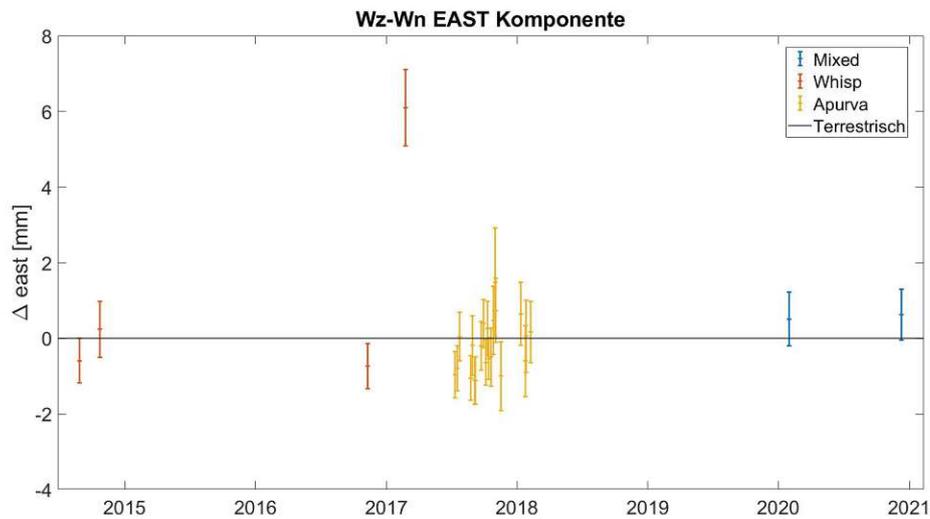


Abbildung 5.19: Basislinie Wz-Wn: local-ties mit Gravitivem Deformations Modell: East Komponente, um eine Überlagerung der Daten zu verhindern, wurden diese entlang der Zeitachse versetzt

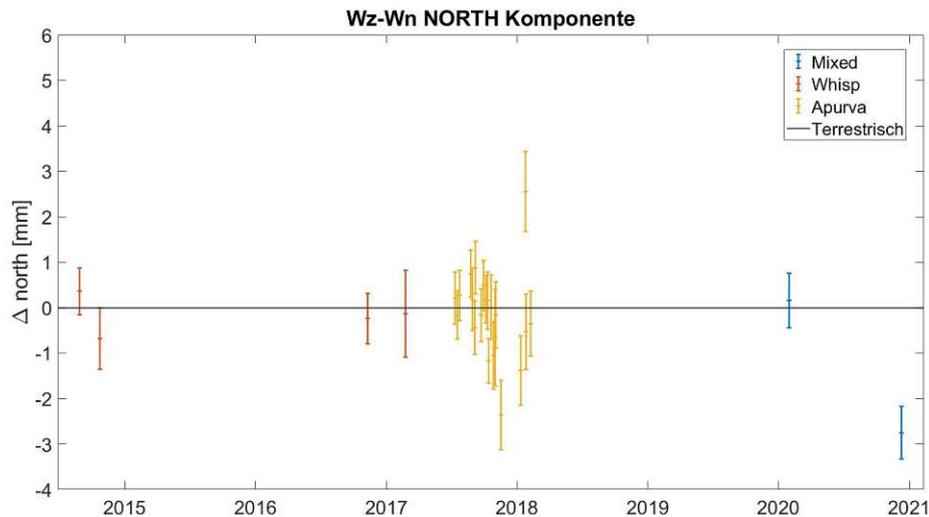


Abbildung 5.20: Basislinie Wz-Wn: local-ties mit Gravitivem Deformations Modell: North Komponente, um eine Überlagerung der Daten zu verhindern, wurden diese entlang der Zeitachse versetzt

Betrachtet man die Abbildungen, so ist ersichtlich, dass auch hier wieder sowohl für die Basislinienlänge, sowie die East und North Komponente eine gute Übereinstimmung mit den terrestrischen Messungen vorliegt. Im Gegensatz zu den Ergebnissen im vorherigen Kapitel ist diese Übereinstimmung nun aber auch für die Up Komponente gegeben. Der shift von etwa 5 Millimetern in der Up Komponente ist nun durch die Verwendung des Gravitativen Deformations Modells für die Wz Antenne beinahe verschwunden. Die sich ergebenden Werte sind in der nachfolgenden Tabelle (5.6) ersichtlich.

| Session | U [mm] | E [mm] | N [mm] | Baseline length [mm] |
|-----------|--------|--------|--------|----------------------|
| 20DEC09XB | -2.4 | 0.6 | -2.8 | 2.7 |
| 20JAN29XD | 0.5 | 0.5 | 0.2 | -0.1 |
| 14AUG27XF | -2.0 | -0.6 | 0.4 | -0.5 |
| 14OCT23-F | -3.7 | 0.2 | -0.7 | 0.6 |
| 16NOV09-F | -2.6 | -0.7 | -0.2 | 0.1 |
| 17FEB22-F | 5.1 | 6.1 | -0.1 | 1.2 |
| 17AUG23X9 | -0.8 | -1.1 | 0.8 | -0.9 |
| 17AUG28X9 | -0.2 | -0.2 | 0.2 | -0.2 |
| 17JUL10X9 | 0.7 | -1.0 | 0.2 | -0.3 |
| 17JUL17X9 | -0.4 | -0.8 | -0.2 | 0.0 |
| 17JUL24X9 | 4.2 | 0.0 | 0.3 | -0.1 |
| 17NOV02X9 | -3.4 | 0.7 | -0.2 | 0.2 |
| 17NOV16X9 | -2.1 | -1.0 | -2.4 | 2.1 |
| 17OCT04X9 | -1.6 | -0.6 | 0.2 | -0.3 |
| 17OCT10X9 | 0.8 | 0.3 | 0.2 | -0.1 |
| 17OCT12X9 | -0.7 | -0.5 | -1.2 | 1.1 |
| 17OCT19X9 | -1.0 | -0.5 | 0.0 | -0.1 |
| 17OCT26X9 | -0.9 | 0.5 | -1.1 | 1.1 |
| 17OCT30X9 | -0.5 | 1.5 | -0.7 | 0.9 |
| 17SEP04X9 | 0.0 | -1.1 | -0.4 | 0.3 |
| 17SEP05X9 | -1.0 | -1.1 | 0.9 | -1.1 |
| 17SEP21X9 | -0.4 | -0.2 | -0.2 | 0.1 |
| 17SEP28X9 | -0.5 | 0.4 | 0.5 | -0.4 |
| 18FEB07X9 | -0.6 | 0.2 | -0.3 | 0.4 |
| 18JAN10X9 | 0.9 | 0.6 | -1.4 | 1.5 |
| 18JAN24X9 | -7.1 | -0.6 | 2.6 | -2.8 |
| 18JAN25X9 | -0.6 | 0.1 | -0.5 | 0.5 |

Tabelle 5.6: local-tie Werte mit Gravitivem Deformations Modell aller 27 Sessions für die Up, East und North Komponenten, sowie die Basislinienlänge für die Basislinie Wz-Wn

Die Mittelwerte aller Komponenten sind in Tabelle 5.7 ersichtlich. Der shift in der Up Komponente ist nun nicht mehr signifikant sondern im Mittel bei -0.8 Millimetern und damit deutlich geringer. Für die East und North Komponente, sowie die Basislinienlänge sind diese ebenso vernachlässigbar im Submillimeterbereich. Es lässt sich also sagen, dass die Verwendung eines geeigneten Modells für die Gravitative Deformation bei Legacy Antennen eine erhebliche Verbesserung der Ergebnisse bewirkt. Vor allem für ein aussagekräftiges Ergebnis in der Up Komponente ist die Verwendung dieser Modelle beinahe unerlässlich.

| | U [mm] | E [mm] | N [mm] | Baseline length [mm] |
|-----------------------------|--------|--------|--------|----------------------|
| Mittelwert | -0.8 | 0.1 | -0.2 | 0.2 |
| mittlere Standardabweichung | 0.6 | 0.8 | 0.7 | 0.9 |

Tabelle 5.7: Mittelwerte und mittlere Standardabweichung der local-ties mit Gravitivem Deformations Modell für alle 27 Sessions

5.3.2 Mixed-mode Sessions

Im Folgenden sollen nun auch noch die Ergebnisse der beiden mixed-mode Sessions unter Verwendung des Gravitativen Deformations Modells angeführt werden. Bei diesen ist der Einfluss des Modells allerdings geringer, da nicht in allen Basislinien eine Legacy Antenne mitbeobachtet. Abbildungen 5.21 bis 5.24 zeigen wieder die Ergebnisse für die Basislinienlänge sowie die Up, East und North Komponente der local-ties.

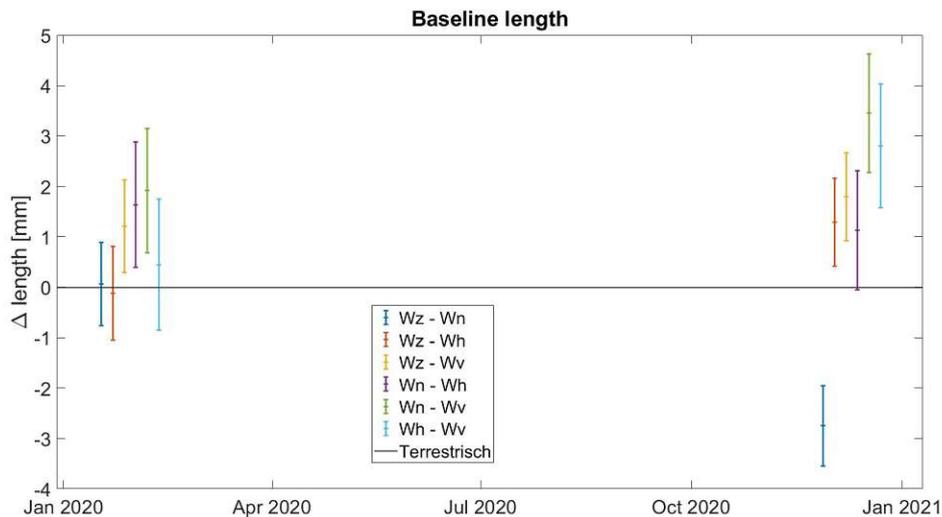


Abbildung 5.21: Mixed-mode sessions: local-ties mit Gravitivem Deformations Modell: Baseline length, um eine Überlagerung der Daten zu verhindern, wurden diese entlang der Zeitachse versetzt

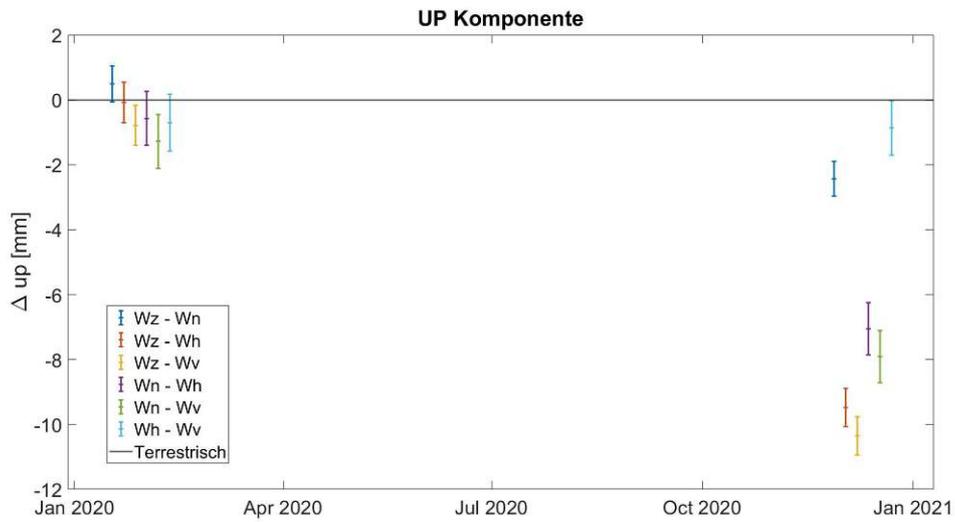


Abbildung 5.22: Mixed-mode sessions: local-ties mit Gravitivem Deformations Modell: Up Komponente, um eine Überlagerung der Daten zu verhindern, wurden diese entlang der Zeitachse versetzt

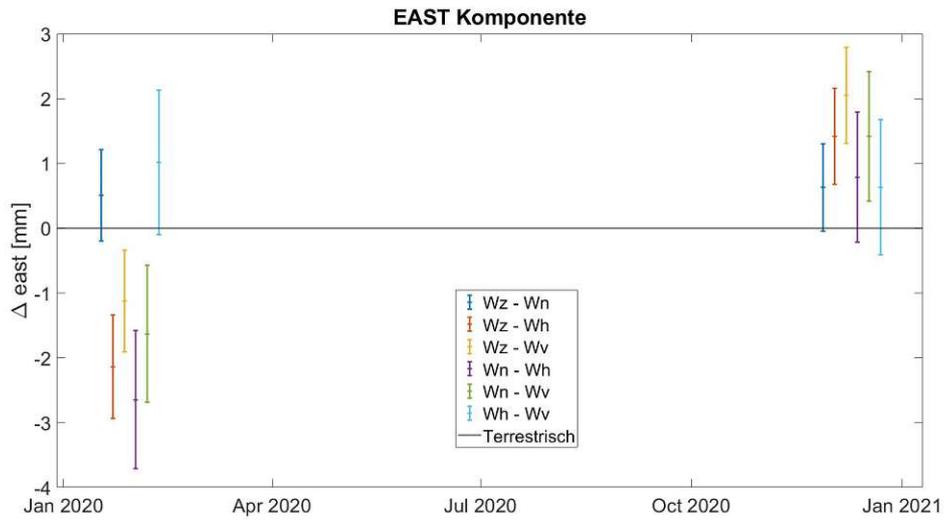


Abbildung 5.23: Mixed-mode sessions: local-ties mit Gravitivem Deformations Modell: East Komponente, um eine Überlagerung der Daten zu verhindern, wurden diese entlang der Zeitachse versetzt

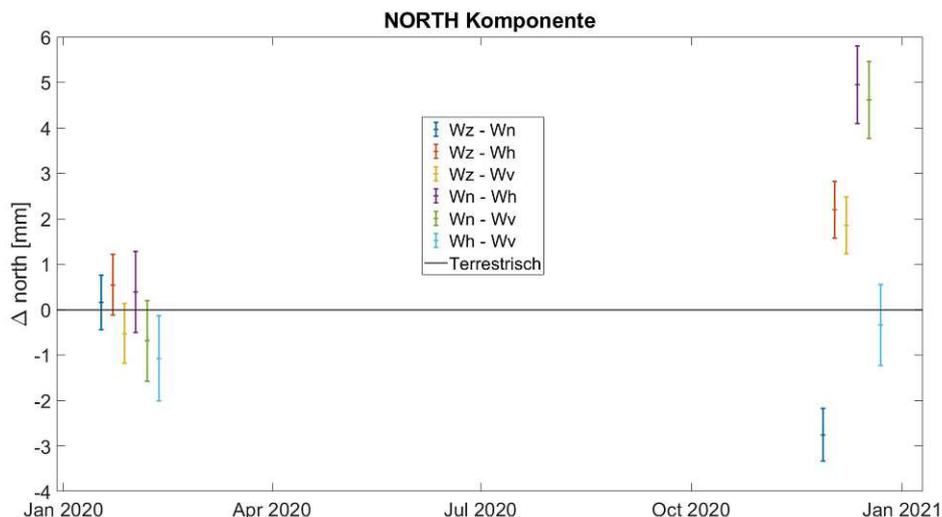


Abbildung 5.24: Mixed-mode sessions: local-ties mit Gravitivem Deformations Modell: North Komponente, um eine Überlagerung der Daten zu verhindern, wurden diese entlang der Zeitachse versetzt

Zusätzlich zu der Tatsache, dass hier nur bei drei der sechs Basislinien eine Legacy Antenne beobachtet, lässt sich hier auch aufgrund der Tatsache, dass lediglich zwei Sessions für die Auswertung zur Verfügung standen, keine allgemeine Aussage treffen. In Tabelle 5.8 sind erneut die Ergebnisse aus den Abbildungen aufgelistet. Man kann jedoch in den Daten erkennen, dass vor allem bei der Session „20DEC09XB“ die Up Komponente deutlich größere Differenzen zu den terrestrischen Messungen aufweist. Dadurch, dass allerdings kaum Vergleichsdaten vorliegen, lassen sich keine Aussagen über eine mögliche Systematik treffen.

5 ERGEBNISSE

| Basislinie | Session | U [mm] | E [mm] | N [mm] | Baseline length [mm] |
|------------|-----------|--------|--------|--------|----------------------|
| Wn - Wsh | 20DEC09XB | -7.0 | 0.8 | 5.0 | -2.7 |
| | 20JAN29XD | -0.6 | -2.6 | 0.4 | 0.1 |
| Wn - Wsv | 20DEC09XB | -7.9 | 1.4 | 4.6 | 1.3 |
| | 20JAN29XD | -1.3 | -1.6 | -0.7 | -0.1 |
| Wsv - Wsh | 20DEC09XB | -0.9 | 0.6 | -0.3 | 1.8 |
| | 20JAN29XD | -0.7 | 1.0 | -1.1 | 1.2 |
| Wz - Wn | 20DEC09XB | -2.4 | 0.6 | -2.8 | 1.1 |
| | 20JAN29XD | 0.5 | 0.5 | 0.2 | 1.6 |
| Wz - Wsh | 20DEC09XB | -9.5 | 1.4 | 2.2 | 3.5 |
| | 20JAN29XD | -0.1 | -2.1 | 0.5 | 1.9 |
| Wz - Wsv | 20DEC09XB | -10.3 | 2.0 | 1.9 | 2.8 |
| | 20JAN29XD | -0.8 | -1.1 | -0.5 | 0.4 |

Tabelle 5.8: Werte der local-ties mit Gravitivem Deformations Modell für die mixed-mode Sessions

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Zuge dieser Masterarbeit wurde der Einfluss von Modellen für die Gravitative Deformation auf VLBI local-tie Messungen untersucht. Dafür wurden 27 Sessions im Zeitraum von 2014 bis 2020 am Geodätischen Observatorium in Wettzell analysiert. Ebenso wurde untersucht, welche Unterschiede manuelle Fehlereliminationsverfahren in VieVS zu iterativen 5-sigma Fehlereliminationsverfahren liefern.

Da zum Zeitpunkt der Auswertung noch kein Gravitives Deformations Modell für die Legacy Antenne in Wettzell zur Verfügung stand, wurde das Modell der Legacy Antenne in Onsala, Schweden verwendet. Dies ist zulässig, da die beiden Teleskope der selben Bauweise entspringen. Zum Zeitpunkt der Auswertung wurde allerdings auch in Wettzell bereits an einem Gravitativen Deformations Modell für die Legacy Antenne, sowie für die beiden VGOS Antennen gearbeitet. Beinahe zeitgleich mit Abschluss dieser Arbeit wurde das von Lösler et al. (2022) entwickelte Modell publiziert. Wenig überraschend decken sich die Werte für die jeweiligen Elevationswinkel größtenteils mit jenen aus Nothnagel et al. (2019). Zusätzlich sind nun Korrekturmodelle für die beiden VGOS Antennen vorhanden. Im Zuge dieser Arbeit wurde die Deformation der VGOS Antennen jedoch nicht berücksichtigt. Betrachtet man allerdings die im Modell enthaltenen Werte für den Fehler im Signallaufweg für diese Antennen, so erkennt man, dass diese selbst bei einem Elevationswinkel von 90° mit nur 2.2ps sehr gering sind. Im Vergleich dazu ist dieser Wert bei der Legacy Antenne 12.3ps, also erheblich größer.

Anhand der Ergebnisse dieser Arbeit kann man erkennen, dass eine manuelle Fehlerelimination in VieVS durchaus denkbar ist und auch kaum Unterschiede in den local-ties zu jenen Ergebnissen aufweist, bei denen die Ausreißer in den Daten iterativ mittels 5-sigma Test entfernt wurden. Die Differenzen der VLBI Stationskoordinaten zu jenen die terrestrisch ermittelt wurden sind bei beiden Verfahren beinahe ident.

Beim Einfluss der Gravitativen Deformation wurde jeweils in Basislinie Wz-Wn und mixed-mode Sessions (Sessions mit beiden VGOS Antennen) unterschieden. Der Grund dafür ist, dass für die Basislinie Wz-Wn Daten aus allen 27 Sessions zur Verfügung standen, in der mixed-mode Konfiguration standen allerdings lediglich zwei Sessions mit je 6 Basislinien zur Verfügung. Bezogen wurden die Ergebnisse immer auf die terrestrischen Messungen. Anschließend wurde der Einfluss der Gravitativen Deformation auf die Basislinienlänge, sowie die Up-, East- und Northkomponente untersucht. Dazu wurden alle Daten einmal ohne Modell für die Gravitative Deformation und einmal mit Modell prozessiert und daraus die local-ties berechnet. In den Ergebnissen kann man sehr gut erkennen, dass die Verwendung eines Gravitativen Deformations Modells kaum Auswirkungen auf die Basislinienlänge sowie auf die East und North Komponente der local-ties hat. In der Up Komponente konnte die

Übereinstimmung mit den terrestrischen Messungen allerdings durch die Verwendung eines Gravitativen Deformations Modells signifikant verbessert werden. Lag bei den Ergebnissen ohne Gravitativem Deformations Modell noch ein shift von knapp 5 Millimetern in der Up Komponente vor, so konnte dieser durch die Verwendung des Modells auf -0.8 Millimeter reduziert werden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit legen also nahe, dass in Zukunft die Verwendung von Modellen zur Korrektur der Gravitativen Deformation für die Legacy Antennen unumgänglich ist, um eine weitere Genauigkeitssteigerung in den von der VLBI abgeleiteten Daten zu erzielen. Zum Zeitpunkt dieser Abhandlung ist dies allerdings noch nicht der Fall und nur die wenigsten Legacy Antennen besitzen Modelle mit denen der Einfluss der Gravitation auf die Teleskope modelliert und eliminiert werden kann.

Referenzen

- Altamimi, Z., Rebischung, P., Metivier, L. & Collilieux, X. (2016). ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. *Journal of Geophysical Research*. <https://doi.org/10.1002/2016JB013098>
- Bergstrand, S., Herbertsson, M., Rieck, C., Spetz, J., Svantesson, C.-G. & Haas, R. (2018). A gravitational telescope deformation model for geodetic VLBI. *Journal of Geodesy*. <https://doi.org/10.1007/s00190-018-1188-1>
- BKG. (2022). Radioteleskop Wettzell. Verfügbar 16. September 2022 unter https://www.bkg.bund.de/DE/Observatorium-Wettzell/Messsysteme-Wettzell/Radioteleskop-Wettzell/radioteleskop_cont.html
- Böhm, J. (2017). Wiener Vorlesungen der Höheren Geodäsie. Forschungsbereich Höhere Geodäsie.
- Böhm, J., Böhm, S., Boisits, J., Girdiuk, A., Gruber, J., Hellerschmied, A., Krasna, H., Landskron, D., Madzak, M., Mayer, D., McCallum, J., McCallum, L., Schartner, M. & Teke, K. (2018). Vienna VLBI and Satellite Software (VieVS) for Geodesy and Astrometry. *The Astronomical Society of the Pacific*. <https://doi.org/10.1088/1538-3873/aaa22b>
- Böhm, J., Heinkelmann, R. & Schuh, H. (2007). Short Note: A global model of pressure and temperature for geodetic applications. *Journal of Geodesy*, 81, 679–683. <https://doi.org/10.1007/s00190-017-0135-3>
- Charlot, P., Jacobs, C. S., Gordon, D., Lambert, S., de Witt, A., Böhm, J., Fey, A. L., Heinkelmann, R., Skurikhina, E., Titov, O., Arias, E. F., Bolotin, S., Bourda, G., Ma, C., Malkin, Z., Nothnagel, A., Mayer, D., MacMillan, D. S., Nilsson, T. & Gaume, R. (2020). The third realization of the International Celestial Reference Frame by very long baseline interferometry. *Astronomy Astrophysics*. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038368>
- Halsig, S., Artz, T., Iddink, A. & Nothnagel, A. (2016). Using an atmospheric turbulence model for the stochastic model of geodetic VLBI data analysis. *Earth, Planets and Space*. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0482-5>
- IVS. (2022). About the IVS. Verfügbar 9. September 2022 unter <https://vlbi.org/welcome-to-the-ivs/information/about-the-ivs-2/>
- Kodet, J., Schreiber, K. U., Eckl, J., Plötz, C., Mähler, S., Schüler, T., Klügel, T. & Riepl, S. (2018). Co-location of space geodetic techniques carried out at the Geodetic Observatory Wettzell using a closure in time and a multi-technique reference target. *Journal of Geodesy*, 92, 1097–1112. <https://doi.org/10.1007/s00190-017-1105-z>
- Landskron, D. & Böhm, J. (2017). VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions. *Journal of Geodesy*, 92, 349–360. <https://doi.org/10.1007/s00190-017-1066-2>
- Lösler, M., Eschelbach, C., Greiwe, A., Brechtken, R., Plötz, C., Kronschnabl, G. & Neidhardt, A. (2022). Ray tracing-based delay model for compensating gravitational deforma-

- tions of VLBI radio telescopes. *Journal of Geodetic Science*, 12. <https://doi.org/10.1515/jogs-2022-0141>
- MacMillan, D. S. (2022). Comparison of EOP and scale parameters estimated from the three simultaneous CONT17 VLBI observing networks. *Journal of Geodesy*. <https://doi.org/10.1007/s00190-022-01611-2>
- Neidhardt, A., Kronschnabl, G., Klügel, T., Hase, H., Pausch, K., Göldi, W. & Wettzell, V. T. (2011). Proceedings of the 20th Meeting of the European VLBI Group for Geodesy and Astronomy. Universität Bonn, Institut für Geodäsie und Geoinformation.
- Niell, A. E., Barrett, J. P., Cappallo, R. J., Corey, B. E., Elosegui, P., Mondal, D., Rajagopalan, G., Ruzsarczyk, C. A. & Titus, M. A. (2021). VLBI measurement of the vector baseline between geodetic antennas at Kokee Park Geophysical Observatory, Hawaii. *Journal of Geodesy*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00190-021-01505-9>
- Nothnagel, A. (2008). Conventions on thermal expansion modelling of radio telescopes for geodetic and astrometric VLBI. *Journal of Geodesy*. <https://doi.org/10.1007/s00190-008-0284-z>
- Nothnagel, A. (2022). *Elements of Geodetic and Astrometric Very Long Baseline Interferometry*. Forschungsbereich Höhere Geodäsie.
- Nothnagel, A., Artz, T., Behrend, D. & Malkin, Z. (2016). International VLBI Service for Geodesy and Astrometry - Delivering high-quality products and embarking on observations of the next generation. *Journal of Geodesy*, 711–721. <https://doi.org/10.1007/s00190-016-0950-5>
- Nothnagel, A., Holst, C. & Haas, R. (2019). A VLBI delay model for gravitational deformations of the Onsala 20m radio telescope and the impact on its global coordinates. *Journal of Geodesy*. <https://doi.org/10.1007/s00190-019-01299-x>
- Schartner, M. & Böhm, J. (2019). VieSched++: A New VLBI Scheduling Software for Geodesy and Astrometry. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 131(1002). <https://doi.org/10.1088/1538-3873/ab1820>
- Schlüter, W. & Behrend, D. (2007). The International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS): current capabilities and future prospects. *Journal of Geodesy*. <https://doi.org/10.1007/s00190-006-0131-z>
- Schuh, H. & Behrend, D. (2012). VLBI: A fascinating technique for geodesy and astrometry. *Journal of Geodynamics*. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2012.07.007>
- Schuh, H. & Böhm, J. (2012). Very Long Baseline Interferometry for Geodesy and Astrometry. *Sciences of Geodesy*, 339–376. https://doi.org/10.1007/978-3-642-28000-9_7
- Schüler, T., Klügel, T., Mähler, S. & Plötz, C. (2018). Local Radio Telescope Ties from the Wettzell Precision Engineering Surveying Network. *IVS 2018 General Meeting Proceedings*.
- Schüler, T., Kronschnabl, G., Plötz, C., Neidhardt, A., Bertarini, A., Bernhardt, S., la Porta, L., Halsig, S. & Nothnagel, A. (2015). Initial Results Obtained with the First TWIN

REFERENZEN

- VLBI Radio Telescope at the Geodetic Observatory Wettzell. *Sensors*, 18767–18800. <https://doi.org/10.3390/s150818767>
- Teke, K., Böhm, J., Spicakova, H., Pany, A., Plank, L. & Schuh, H. (2009). Piecewise Linear Offsets for VLBI Parameter Estimation. *Proceedings of the 19th European VLBI for Geodesy and Astrometry Working Meeting*.
- Varenius, E., Haas, R. & Nilsson, T. (2021). Short-baseline interferometry local-tie experiments at the Onsala Space Observatory. *Journal of Geodesy*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00190-021-01509-5>
- VieVS-Wiki. (2022). VieVS Wiki. Verfügbar 9. September 2022 unter <https://viewswiki.geo.tuwien.ac.at/en/VLBI-Analysis>
- Whitney, A. (2000). How Do VLBI Correlators Work? *IVS 2000 General Meeting Proceedings*, 187–205.