

Unterschrift des Betreuers



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna University of Technology

# DIPLOMARBEIT

## Auswertung von VLBI Beobachtungen des "Quasar" Netzes in Russland

Ausgeführt am Institut für

Geodäsie und Geophysik

der Technischen Universität Wien

unter der Anleitung von Associate.Prof. Dr. Johannes Böhm  
und Dipl.-Ing. Matthias Madzak

durch

Florian Göbel

Zwinzstraße 3/6/6, 1160 Wien

Datum

Unterschrift (Student)

## Zusammenfassung

Die drei russischen VLBI-Stationen Svetloe, Badary und Zelenchukskaya zählen zum weltweiten VLBI-Netz und nehmen an den internationalen globalen VLBI-Programmen für geodätische Beobachtungen teil. Zusätzlich wird auch ein nationales Programm verfolgt. Das interne russische Netz trägt den Namen "Quasar" und hat seit 2006 viele Experimente zwischen den drei Stationen durchgeführt. Von den russischen Experimenten wurden 223 Files im NGS-Format bereitgestellt, von denen 108 Sessions über 24 Stunden und 115 Sessions zwischen einer und acht Stunden beinhalten. Die 24 Stunden Messungen dienen zur Bestimmung sämtlicher Erdrotationsparameter und die kürzeren (stündlichen) Sessions zur Ermittlung der Weltzeit UT1 bzw dUT1 (UT1-UTC). Zur Anwendung kam die Vienna VLBI Software VieVS - entwickelt am Institut für Geodäsie und Geophysik (IGG) der TU Wien. Aus den 24 Stunden Messungen wurden Erdrotationsparameter bestimmt - was durch die große Ost-West Ausbreitung des Netzes möglich ist – sowie dUT1 aus den stündlichen Sessions. Weiters wurden Wiederholbarkeiten von Basislinienlängen und Stationsgeschwindigkeiten berechnet. Der Vergleich der Ergebnisse für die Erdrotationsparameter zu Datensätzen vom International GNSS Service (IGS) ergab unter NNT/NNR Bedingungen für die Stationen eine Standardabweichung von 11 mas für xpol, 16 mas für ypol, und 0,3 ms für dUT1. Bei festgehaltenen Stationskoordinaten sank die Standardabweichung für xpol auf 8 mas, für ypol auf 14 mas, und für dUT1 auf 0,2 ms. Die Ergebnisse der Abweichungen zu den IGS-Daten konnten über den gesamten Zeitraum in drei - fast gleichlange - Bereiche, mit unterschiedlichen Genauigkeiten, aufteilt werden. Der letzte davon, seit Juli 2010, wies die beste Genauigkeit, mit einer Standardabweichung von 3 mas für xpol, 5 mas für ypol, und 0,1 ms für dUT1 unter NNT/NNR Bedingungen auf. Die Standardabweichung von dUT1 aus den stündlichen Sessions liegt bei 0,1 ms bzw. seit Februar 2009 bei 0,07 ms. Durch den Vergleich der präsentierten Daten wurde in Hinsicht auf die Ergebnisse beider Programme deutlich, dass sich die Qualität der russischen VLBI Daten seit Beginn verbessert hat.

## Abstract

The three Russian VLBI stations Svetloe, Badary and Zelenchukskaya are part of the global VLBI Network and take part in international global VLBI programs for geodetic observations. Additionally, a national program is observed. The domestic Russian Network is called "Quasar" and has carried out many experiments between the three stations since 2006. From the Russian experiments, 223 files were provided of which 108 sessions were carried out over 24 hours, and 115 sessions lasted between one and eight hours. The 24 hour measurements were used for estimating all earth rotation parameters and the shorter (hourly) sessions were carried out to determine the universal time UT1, or dUT1 (UT1-UTC), respectively. For processing, the Vienna VLBI Software VieVS was used – it has been developed at the Institute of Geodesy and Geophysics of the Vienna University of Technology. Earth rotation parameters have been determined by using the 24 hour sessions – that was possible because of the large extension of the Russian network – and dUT1 by using the hourly sessions. Additionally the baseline length repeatability and station velocities have been determined. A comparison between the results of the pole coordinates – under NNT/NNR conditions on the stations – and data sets of the International GNSS Service (IGS) yields a standard deviation of 11 mas for xpol, 16 mas for ypol, and 0,3 ms for dUT1. With fixed station coordinates the standard deviation dropped to 8 mas for xpol, 14 mas for ypol, and 0,2 ms for dUT1. The results of the differences to the IGS data were split into three intervals – almost of the same length – over the entire period, with different accuracies for each time span. The most recent part, since July 2010, exhibited the best accuracy with a standard deviation of 3 mas for xpol, 5 mas for ypol, and 0,1 ms for dUT1 under NNT/NNR conditions. The standard deviation of dUT1 for the hourly sessions is about 0,1 ms and 0,07 ms since February 2009. By the comparison of the presented data, and by relation to the results of both programs, it became clear, that the quality of the Russian VLBI data significantly improved in recent years of the program.

# Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung .....	5
2. VLBI .....	6
2.1 Allgemeines zu VLBI .....	6
2.2 Entwicklung der VLBI .....	11
2.3 Das russische VLBI-Netz.....	12
2.4 Das internationale und russische VLBI-Programm .....	15
3. VieVS .....	16
3.1 Programmaufbau.....	16
3.2 GUI (Graphical User Interface) .....	19
3.3 Spezielle Files von VieVS.....	20
4. Auswertung .....	23
4.1 Beurteilung und Aufbesserung der Daten .....	24
4.1.1 Parametrisierung und Berechnung der Standard Sessions.....	26
4.1.2 Parametrisierung und Berechnung der Intensive Sessions.....	30
4.1.3 Erstbeurteilung .....	31
4.1.4 Aufbesserung der Daten.....	33
4.1.5 Ausgeschlossene Sessions .....	41
4.1.6 Fazit der Aufbesserung.....	43
4.2 Auswertung der Standard Sessions.....	45
4.2.1 Berechnung der EOP .....	45
4.2.2 Bestimmung der Basislinienlängen .....	46
4.2.3 Stationsbewegung .....	50
4.3 Auswertung der Intensive Sessions.....	52
5. Ergebnisse .....	53
5.1 Ergebnisse der Standard-Files .....	53
5.1.1 EOP.....	53
5.1.2 Polbewegung.....	56
5.1.3 Basislinien .....	58
5.1.4 Stationsgeschwindigkeiten .....	60
5.2 Ergebnisse bei festgehaltenen Stationskoordinaten .....	62
5.2.1 EOP.....	62
5.2.2 Polbewegung.....	63
5.3 Ergebnisse der Intensive-Files .....	65
5.3.1 Genauigkeit der ermittelten dUT1-Werte .....	65
5.3.2 Plot von dUT1 .....	66
5.3.3 dUT1 Gesamt .....	67
6. Fazit .....	68
Abbildungsverzeichnis.....	69
Tabellenverzeichnis.....	71
Literaturverzeichnis .....	72

# 1. Einleitung

Ende der siebziger Jahre begann die Entwicklung der geodätisch ausgerichteten Radiointerferometrie auf langen Basislinien, besser bekannt als VLBI (Very Long Baseline Interferometry). Neben der Überwachung der Erdrotation und der Beobachtung plattentektonischer Veränderungen, zählt auch die Weiterentwicklung des terrestrischen Referenzrahmens zu den fundamentalen Grundaufgaben der VLBI (Campbell, Nothnagel und Schuh, 1992). Ebenso die Bestimmung der Länge eines Tages.

Heute ist dieser Dienst nicht mehr wegzudenken und spielt eine zentrale Rolle bei Navigation und Ortungsaufgaben. Die Generierung von Erdrotationsparametern stellt außerdem eine wichtige Aufgabe dar, wenn anhand jener die von GPS-Satelliten gesendeten Bahnparameter vom raumfesten Koordinatensystem ins erdfeste transformiert werden.

Nach dem International VLBI Service for Geodesy and Astronomy (IVS), gibt es seit 2012 31<sup>\*</sup> VLBI-Stationen weltweit. Die drei russischen Observatorien Badary, Svetloe und Zelenchukskaya beteiligen sich an internationalen Messkampagnen des globalen VLBI-Netzes (Finkelstein et al., 2010). 1997 starteten sie die ersten astrogeodätischen Beobachtungen in Svetloe und seit 2006, mit Abschluss der Installation der Station Badary, führen die Russen auch ein landesinternes Programm, zwischen den Basislinien des eigenen VLBI Netzes „Quasar“, durch. Dieses umfasst ganztägige Messungen und kurzfristige Experimente zwischen einer und acht Stunden (Finkelstein, 2009).

Das Ziel dieser Arbeit bestand darin Erdrotationsparameter zu berechnen, die sich ausschließlich auf die Messungen der russischen VLBI-Observatorien stützen. Dies war möglich, da sich Svetloe und Zelenchukskaya im Westen – in der Nähe des Längengrades von St. Petersburg – und Badary weit im Osten von Russland befinden. Daneben galt es auch, die Bewegung der landesinternen Erdkruste nachzuweisen, die Polbewegung zu veranschaulichen und  $dUT1$ , also die Abweichung der Weltzeit UT1 von der koordinierten Weltzeit UTC, zu bestimmen.

Für die Auswertung kam die Wiener VLBI-Auswertungssoftware, kurz VieVS – entwickelt am Institut für Geodäsie und Geophysik der Technischen Universität von Wien – zum Einsatz. Sie entspricht den Konventionen des internationalen Erdrotationsdienstes IERS. Die Ergebnisse dieser Arbeit dienen gleichzeitig den russischen Kollegen als unabhängige Kontrolle zu den eigenen VLBI-Auswertungsmethoden.

---

\* Quelle: <http://ivsc.gsfc.nasa.gov/about/org/components/ns-list.html>

## 2. VLBI

### 2.1 Allgemeines zu VLBI

Bei der VLBI werden extragalaktische Radiosignale, zum Beispiel von Quasaren, gemessen und deren Signal aufgezeichnet. Nach anschließender Korrelation der Daten mindestens zweier Stationen können die Observablen bestimmt werden. Mit der Auswertung solcher Beobachtungen, etwa nach der Methode der kleinsten Quadrate, kann man Erdorientierungsparameter, (EOP) bzw., die plattentektonischen Aktivitäten bestimmen, sowie Schwankungen der Erdrotation über die Zeit überwachen (Campbell, Nothnagel und Schuh, 1992).

#### Geometrisches Grundprinzip der VLBI

Die nachfolgende Skizze soll das Grundprinzip der VLBI veranschaulichen:

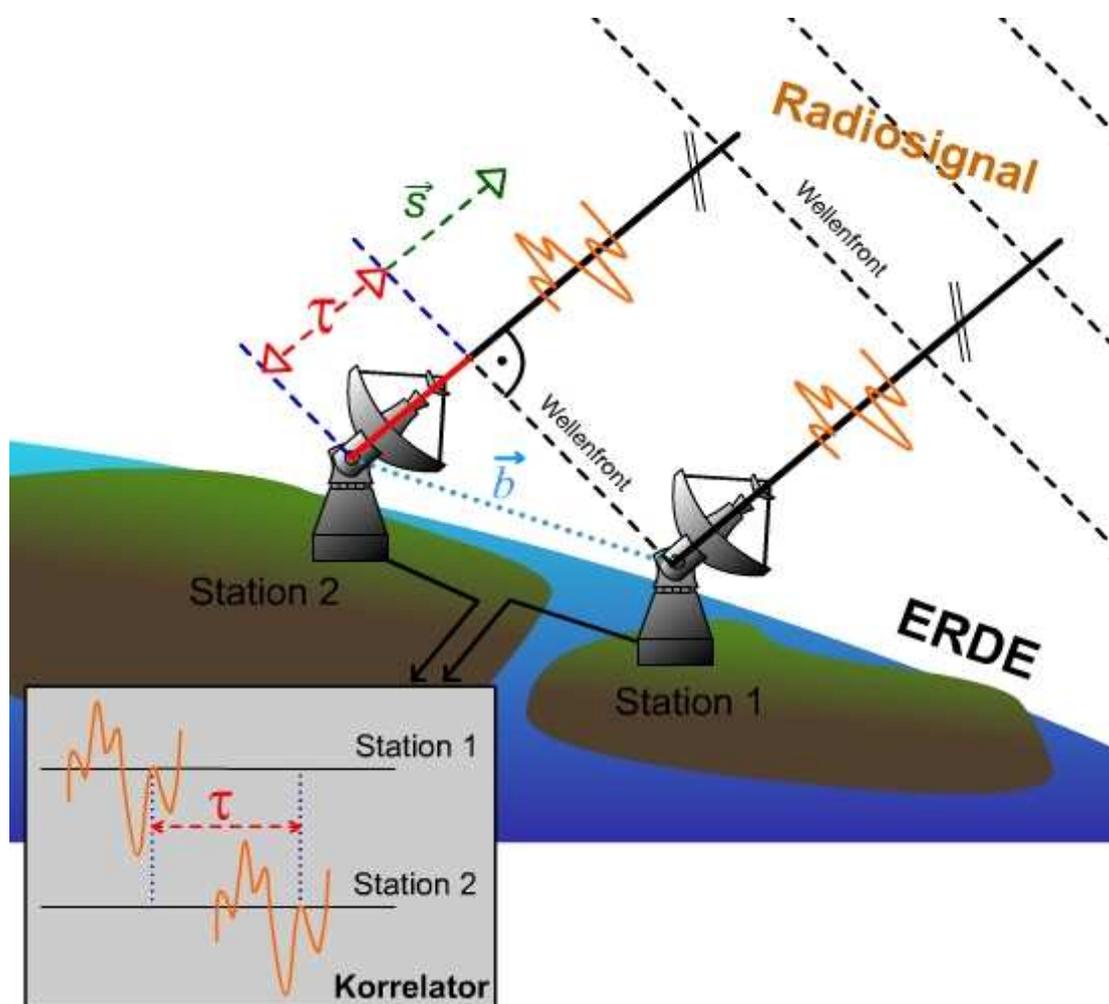


Abbildung 1: Grundprinzip VLBI (nach Schuh und Böhm, 2012)

Zwei Empfänger stehen in einer im Allgemeinen größeren Distanz zueinander, und nehmen dasselbe Signal auf. Radiowellen breiten sich kugelförmig aus. Da sich ein Quasar in sehr großer Distanz befindet, trifft die Wellenfront bei beiden Empfängern ebenflächig ein. Die Orte der Registrierung sind unterschiedlich. Die Grundaufgabe der VLBI ist somit, die Laufzeitdifferenz  $\tau$  der Ankunft des Signals zwischen den beiden Stationen messtechnisch und rechnerisch zu bestimmen (Schuh und Böhm, 2012).

In der obigen Skizze (Abbildung 1) wird bereits das geometrische Grundprinzip der VLBI ersichtlich. Das rechtwinklige Dreieck bildet einen direkten Zusammenhang zwischen dem Basislinien Vektor  $\vec{b}$  und dem Richtungsvektor  $\vec{s}_0$  zur Quelle (Campbell, 2000).  $\tau$  errechnet sich demnach aus dem Skalarprodukt der beiden Vektoren  $\vec{b}$  und  $\vec{s}_0$  durch die Lichtgeschwindigkeit und ist dabei gleich die Differenz der beiden Ankunftszeiten  $t_1$  und  $t_2$ :

$$(1) \quad \tau = -\frac{\vec{b} * \vec{s}_0}{c} = t_2 - t_1$$

Das ist natürlich nur eine geometrisch vereinfachte Darstellung des Prinzips.

### Datenerfassung

Die Datenerfassung erfolgt mittels eines Radioteleskops und einer Registriereinheit. Die nachfolgende Skizze (Abbildung 2) dient der Veranschaulichung.

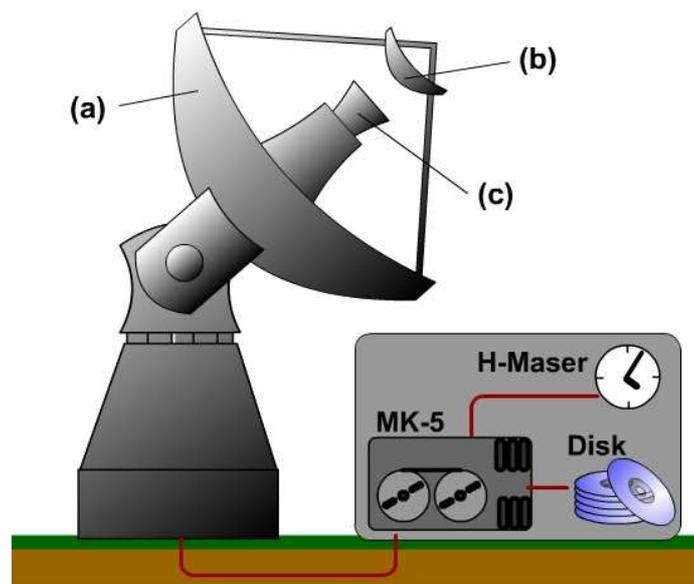


Abbildung 2: Komponenten einer VLBI-Station (nach Campbell, Nothnagel und Schuh, 1992)

Das Radioteleskop besteht aus einem schwenk- und drehbaren Paraboloid als Hauptreflektor (a), einem Hyperbolischen Subreflektor (b) und einem Signalhorn (c). Für den Signalempfang kann das Teleskop im Primär- oder Sekundärfokus arbeiten. Bei erstem geht das Signal direkt vom Hauptreflektor in das Empfangshorn über, bei zweitem noch zuerst über den Subreflektor (Schuh und Böhm, 2012). Die Signale werden gebündelt, in zwei Frequenzbänder 8,4 GHz und 2,3 GHz aufgespaltet und verstärkt, was direkt unterhalb des Empfangshorns geschieht, um störendes Rauschen zu vermeiden. Anschließend werden die Radiofrequenzen auf eine Zwischenfrequenz von ungefähr 300 MHz heruntergemischt und schließlich auf Basisfrequenzbänder von bis zu 2 MHz herabkonvertiert. Die Datenregistrierung erfolgt über Festplatten, oder früher mit Bändern. Das Mark I System (Whitney et al., 1976) war der erste Rekorder in der VLBI-Technik (vgl. Kapitel 2.2). Weiters versieht die interne Stationsuhr - eine Wasserstoff- (H-) Maser Atomuhr - die Aufnahme des Signals mit der zugehörigen Ankunftszeit (Campbell, Nothnagel und Schuh, 1992).

## Korrelation

Die reale Laufzeitverzögerung wird mittels Kreuzkorrelation bestimmt. Dazu werden die beiden an den Antennen aufgenommenen Signale zur Interferenz gebracht. Das geschieht im Korrelator. Dabei handelt es sich um einen Prozessor der zwei Signalströme überlagert, um nach gleichen Mustern zu suchen. Solche Übereinstimmungen werden erkannt, wenn die Kreuzmultiplikation mit derselben Verzögerung durchgeführt wird, die bei der Aufnahme herrschte. Danach wird der Korrelationsprozess auf ein relativ kleines Suchfenster angewandt bei dem der Bereich mit dem Korrelationsmaximum der Aufnahmesituation am nächsten kommt (Campbell, Nothnagel und Schuh, 1992).

Die Grundgleichung für die Korrelation sieht wie folgt aus:

$$(2) \quad R(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T V_1(t) * V_2^*(t - \tau) * dt \quad \dots \text{ mit } V_2^*(t - \tau) \text{ als konjugiert komplex.}$$

Demnach sind die beiden Antennenspannungen zwei Funktionen  $V_1(t)$  und  $V_2(t)$  über die Zeit  $t$ . Das Durchschnittsintervall auf der sich die Registrierung befindet, wird mit  $T$  bezeichnet (Sovers et al., 1998).

Nicht jede Station verfügt über einen eigenen Korrelator. Zur Auswertung gibt es zentrale Einrichtungen, wo Laufzeitverzögerungen bestimmt werden. Solche Büros verfügen über die notwendigen Technologien und befinden sich in den U.S.A. am Haystack Observatorium in Westford und im Naval Observatorium in Washington D.C.. In Deutschland gibt es einen Korrelator am Max Planck Institut für Radioastronomie in Bonn und in Japan einen am National Institute of Information and Communications Technology in Kashima (Schuh und Böhm, 2012). Das russische VLBI-Netz korreliert seine Daten am Institute of Applied Astronomy (IAA) of the Russian Academy of Science in St. Petersburg (Finkelstein et al., 2011).

## Geodätische Auswertung

Im Folgenden soll kurz die hochkomplexe geodätische Auswertung angeschnitten werden. Nach Schuh (1987) erfolgt diese über zwei Wege (vgl. Abbildung 3). Beim ersten Pfad auf Abbildung 3 misst man die Gruppenlaufzeitverzögerungen. Dabei werden instrumentelle Fehlereinflüsse durch Kalibrierung, sowie Einflüsse durch Troposphäre und Ionosphäre korrigiert, um die reduzierten Laufzeitverzögerungen zu erhalten. Beim zweiten Weg wird durch a priori Parameter - d.h. Vorkenntnisse von Stations- und Quellenkoordinaten, a priori Erdorientierungsparametern, Deformation der Erde, sowie ein relativistisches Model - die theoretische Laufzeitverzögerung erstellt.

Im Anschluss werden daraus Residuen gebildet, indem man die Werte des berechneten  $\tau$  von jenen des gemessenen subtrahiert. Daraus werden die geodätischen Zielparameter zum Beispiel nach der Methode der kleinsten Quadrate geschätzt. Dabei gehen die Lösungen aus einem überbestimmten Gleichungssystem hervor, d.h. gibt es mehr Beobachtungen als zur Bestimmung der Unbekannten erforderlich sind. Im folgenden soll ein kurzer Ausschnitt der Ausgleichung beschrieben werden, wie er in vergleichbarer Lektüre, z.B. Niemeier (2001) nachzulesen ist.

Man geht von einem funktionalen Zusammenhang zwischen den Werten eines Beobachtungsvektors  $L$ , mit den Beobachtungen  $L_1, L_2, \dots, L_n$ , und dem Wert des Parametervektors  $X$ , mit den unbekanntem Größen  $X_1, X_2, \dots, X_u$ , aus. Dabei ist der Beobachtungsvektor  $L$  nur eine Näherung seines wahren Wertes, welcher nicht festgestellt, aber durch eine Schätzung (Methode der kleinsten Quadrate) angegeben werden kann. Das

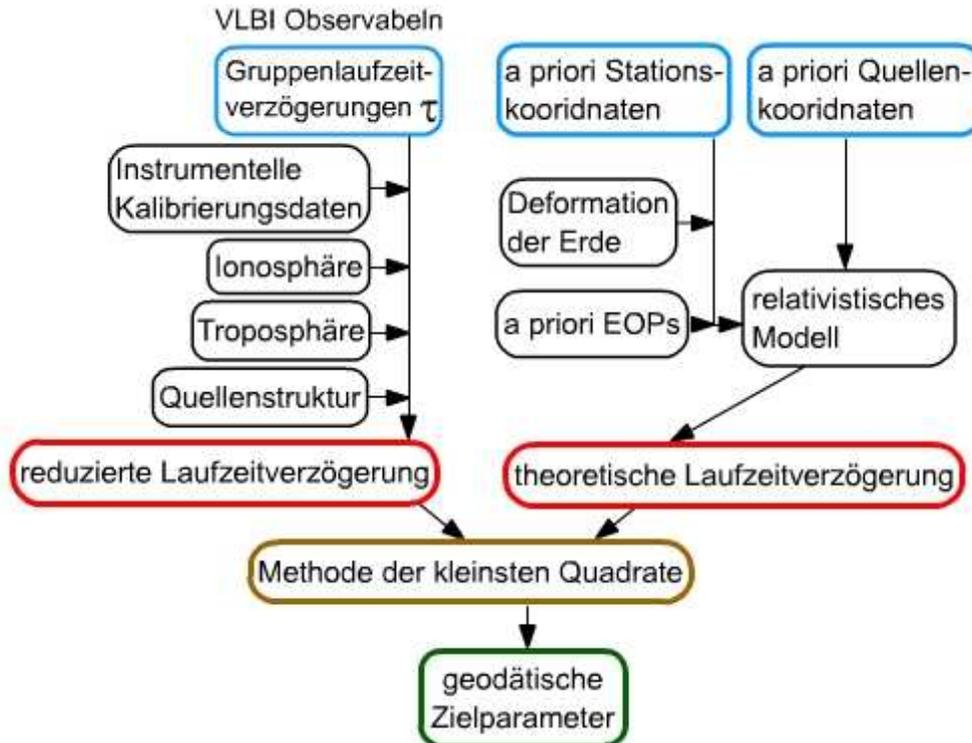


Abbildung 3: Programmfluss einer VLBI Auswertung nach Schuh (1987)

Ergebnis ist der ausgeglichene Beobachtungsvektor  $\hat{L}$ , der den plausibelsten Wert für die wahren Beobachtung  $\tilde{L}$  darstellt und den man erhält, wenn zu jedem Wert für  $L$  jeweils eine Verbesserung addiert wird. Dabei muss die Forderung der Methode der kleinsten Quadrate erfüllt sein. Das heißt, dass zu jeder Beobachtung einer Verbesserung  $v_i$  gesucht ist, für welche die Quadratsumme ein Minimum ergeben.

$$(3) \quad \sum_{i=1}^n p_i v_i^2 \rightarrow \min$$

Die  $p_i$  stellen dabei die Gewichte der Gewichtmatrix  $P$  dar. Formel 4 zeigt die selbe Forderung in Matrixschreibweise.

$$(4) \quad v^T P v \rightarrow \min$$

Mit der Forderung wird die Gleichung der Residuen (5) gebildet.

$$(5) \quad v = A * dx - l$$

Die Matrix  $A$  erhält man, in dem das funktionale Modell der Ausgleichung, also

$$(6) \quad \varphi(\hat{L}, \hat{X}) = 0$$

über die Taylorreihe entwickelt, und nach der ersten Ableitung abgebrochen wird. Auf die genaue Herleitung wird in dieser Arbeit verzichtet. Gleichung 6 besagt, dass der ausgeglichene Beobachtungsvektor  $\hat{L}$  und der ausgeglichene Parametervektor  $\hat{X}$  in einem funktionalen Zusammenhang durch den Vektor  $\varphi$  stehen.

Die über die Taylorentwicklung gebildeten partiellen Ableitungen nach den Unbekannten  $\hat{X}_1, \hat{X}_2, \dots, \hat{X}_u$  werden nun in der Designmatrix  $A$  (7) zusammengefasst.

$$(7) \quad A = \begin{pmatrix} \left( \frac{\partial \varphi_1}{\partial \hat{X}_1} \right) & \left( \frac{\partial \varphi_1}{\partial \hat{X}_2} \right) & \cdots & \left( \frac{\partial \varphi_1}{\partial \hat{X}_u} \right) \\ \left( \frac{\partial \varphi_2}{\partial \hat{X}_1} \right) & \left( \frac{\partial \varphi_2}{\partial \hat{X}_2} \right) & \cdots & \left( \frac{\partial \varphi_2}{\partial \hat{X}_u} \right) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left( \frac{\partial \varphi_r}{\partial \hat{X}_1} \right) & \left( \frac{\partial \varphi_r}{\partial \hat{X}_2} \right) & \cdots & \left( \frac{\partial \varphi_r}{\partial \hat{X}_u} \right) \end{pmatrix}$$

Den in (5) enthaltenen gekürzten Beobachtungsvektor  $l$  erhält man, indem vom gemessenen Beobachtungsvektor der gerechnete abgezogen wird.

"Bei kurzen Intervallzeiten für den Zenith Wet Delay (ZWD) kann es zu einem singulären Problem in der Ausgleichung kommen, wenn keine Beobachtungen in dem gewählten Zeitsegment vorhanden sind. Um dies zu umgehen wird eine Pseudo-Observation Matrix  $H$  (8) eingeführt" (Schuh und Böhm, 2012) und die Verbesserungsgleichung (5) damit erweitert.

$$(8) \quad H = \begin{pmatrix} H(1).sm & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & H(15).sm \end{pmatrix} \quad (\text{Böhm et al., 2010})$$

Damit erhält man das Normalgleichungssystem, also

$$(9) \quad dx = N^{-1}b$$

mit

$$(10) \quad N = \begin{pmatrix} A^T P A + H^T P_H H & C^T \\ C & 0 \end{pmatrix}$$

und

$$(11) \quad b = \begin{pmatrix} A^T P oc + H^T P_H och \\ bc \end{pmatrix} \quad (\text{Teke und Böhm, 2011}).$$

Dabei erfolgt die Gewichtung der Beobachtungen mit der Gewichtmatrix  $P$  für alle wahren Beobachtungen, und für die Pseudobeobachtungen mit der Gewichtmatrix  $P_H$ . In  $oc$  stehen die wahren Beobachtungen, sowie die Pseudobeobachtungen in  $och$ . Der Vektor  $bc$  ist ein Nullvektor, der für die NNT und NNR Konditionen eingeführt wird (Teke und Böhm, 2011).

Für das stochastische Modell wird außerdem die Varianz der Gewichtseinheit a posteriori eingeführt

$$(12) \quad \sigma_0 = \sqrt{\frac{v^T \cdot P \cdot v}{n - u}}$$

mit  $n$  als Anzahl der Beobachtungen und  $u$  als Anzahl der Unbekannten (Böhm et al., 2010).

## 2.2 Entwicklung der VLBI

Entwickelt hat sich die VLBI aus der Radiointerferometrie. Die Auswertung der Phasenmessung geschah über einen Prozessor, der mit den beiden Antennen durch phasenstabile Kabelverbindung verbunden war. Für größere Entfernungen war eine Lösung mit Kabelverbindung nicht mehr möglich, selbst bei höheren Frequenzen (Campbell, 2000). Dabei ist es nötig, einen phasenstabilen Frequenzstandard aufrecht zu erhalten, um den lokalen Oszillator für die Weiterverarbeitung der Signale aus dem Empfangshorn der Antenne, sowie die Stationsuhr zu speisen. Erst nach der Entwicklung der H-Maser-Oszillatoren konnte man Ende der siebziger Jahre Messungen zwischen Antennen ohne phasenstabile Kabelverbindung durchführen, worauf VLBI beruht. Die ersten Experimente dazu wurden auf einer 845km langen Basislinie zwischen dem Haystack Observatorium Massachusetts (U.S.) und dem National Radio Astronomy Observatory of Green Bank in West Virginia (U.S) gemacht (Hinteregger et al., 1972).

Für eine erfolgreiche VLBI-Session ist ein gutes Aufnahmesystem von Nöten. Der erste digitale Rekorder in der VLBI-Technik war das Mark I System (Whitney et al., 1976). Mit einer Aufzeichnungsrate von 0,72 Mbits/sek wurde es 1967 in den Vereinigten Staaten und Kanada entwickelt. Eine Verbesserung fand mit der Einführung des Mark II Systems 1972 statt, das bereits für ein 2 MHz Frequenzband konzipiert war (vgl. z.B. Takahashi et al., 2000).

Doch für die hohen geodätischen Ansprüche war das noch nicht genug. Daher wurde von der NASA 1975 das Mark III System in Auftrag gegeben und am Haystack Observatorium Massachusetts (U.S.) entwickelt. 1980 kam es zum Einsatz und benutzte zwei Frequenzbänder im Bereich von 8210.99 MHz bis 8570.99 MHz (X-Band) und von 2217.99 MHz bis 2302.99 MHz (S-Band). Diese Spaltung in zwei Frequenzbänder ermöglicht eine große Gesamtbandbreite mit höherer Auflösungsgenauigkeit der Laufzeitdifferenz. Außerdem kann man dadurch den dispersiven Einfluss der Ionosphäre auf die Radiosignale ermitteln und korrigieren. (Campbell, Nothnagel und Schuh, 1992).

Das Mk IV System war eine Weiterentwicklung des Mk III. Nach Whitney et al. (1991) war die angestrebte Bandbreite von 720 MHz und Datenrate von 1024 Mbits/sek eine beachtliche Steigerung der Leistung. Die Aufzeichnung erfolgte immer noch auf Bändern was sich nach 25 Jahren mit der Einführung des Mk 5 Systems ändern sollte (Whitney, 2007).

Seit 2003 findet das Mk 5 System seine Anwendung (Whitney, 2007). Die wesentliche Neuerung des Mk 5A war, dass dieser Rekorder bereits auf Festplatten aufzeichnete. Die Datenrate von 1024 Mbits/sek ist geblieben. 2006 folgte die Aufrüstung von Mk 5A auf Mk 5B. Grundsätzlich ist dieser Recorder dem Vorgänger sehr ähnlich, doch im Gegensatz dazu entspricht er dem internationalen VSI-H<sup>\*</sup> Interface Standard. Bereits früh hat man erkannt, dass die unterschiedlichen VLBI Datensysteme zu einigen Komplikationen führten, weshalb man sich mit dem Mk 5B auf einen Standard einigen wollte (Whitney, 2000).

Die russischen VLBI-Stationen sind bereits alle mit dem Mk 5 System ausgerüstet (Finkelstein et al., 2011). Trotzdem unterscheiden sich die drei Terminals wesentlich voneinander. In Kapitel 2.3 wird ausführlicher auf die Stationen und ihr Equipment eingegangen.

---

\* VSI-H: VLBI Standard Interface Hardware

### 2.3 Das russische VLBI-Netz

Das russische VLBI-Netz heißt "Quasar" und bestand zum Zeitpunkt dieser Arbeit aus drei Stationen. Diese befinden sich in Svetloe (Leningradsky Region), Zelenchukskaya (Republik Karachaevo-Cherkessia) und Badary (Republic Buryatia) (Finkelstein et al., 2011). Das Kontrollzentrum zur Prozessierung der Daten ist in St. Petersburg am Institute of Applied Astronomy (IAA). Geplant war 2010 das Netz um eine weitere Station in Ussurijsk zu vergrößern (vgl. z.B. Finkelstein, 2009). Abbildung 4 zeigt das russische VLBI-Netz mit den drei Stationen und den eingezeichneten Basislinien:

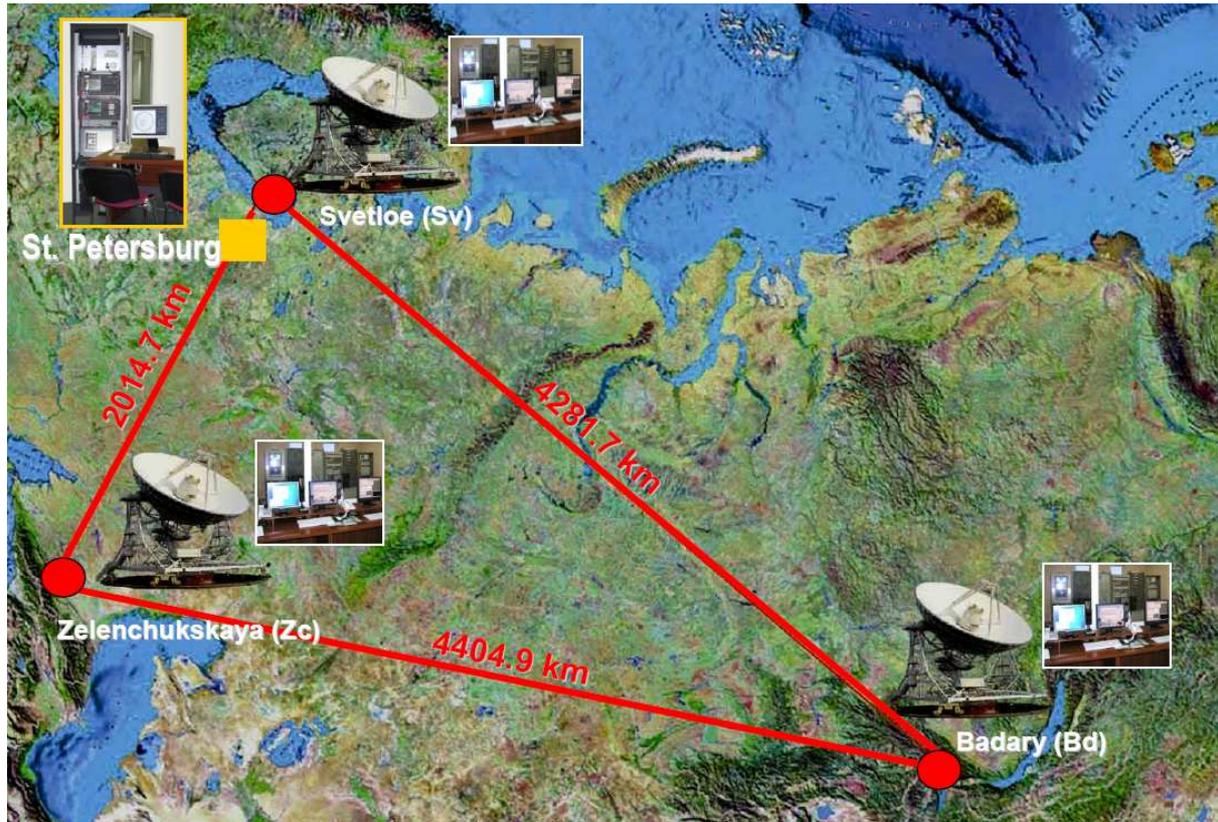


Abbildung 4: Das russische VLBI Netz "Quasar", Quelle: Russian VLBI-Network „Quasar“: 2009-213, A. Finkelstein, 26 May 2009, Onsala

Die Ost-West Ausbreitung des russischen VLBI-Netzes umfasst beinahe ganz Russland. Dadurch wird somit die Motivation dieser Arbeit, Erdorientierungsparameter aus den russischen VLBI-Daten zu berechnen, ersichtlich, da dies durch die zuvor genannte Eigenschaft möglich ist.

Seit 2006 folgt das Quasar Netzwerk dem Internationalen und nationalen VLBI Programm (vgl. Kapitel 2.4). Erste Messungen davor wurden 1997 in Svetloe gemacht, welche den Beginn der russischen VLBI-Technik darstellen. Nachfolgend werden die einzelnen Stationen des Quasar-Netzwerks detaillierter erörtert und auf deren Ausstattung genauer eingegangen.

## Svetloe



Abbildung 5: Radioantenne Svetloe, Quelle: Russian VLBI-Network "Quasar": 2009-213, A. Finkelstein, 26 May 2009, Onsala

Die Station befindet sich in Svetloe, in der Nähe von St. Petersburg. Die erste experimentelle Beobachtung wurde dort im November 1997 durchgeführt (vgl. z.B. [http://www.ipa.nw.ru/PAGE/ENG/olders/eng\\_svet.htm](http://www.ipa.nw.ru/PAGE/ENG/olders/eng_svet.htm)).

Das drehbare 32 Meter Radioteleskop ist mit HEMT-Transistoren, also High Electron Mobility Transistors, ausgestattet. Diese Transistoren mit hoher Elektronenbeweglichkeit sind für besonders hohe Frequenzen ausgelegt (Bächtold, 2002) und werden kryotechnisch\* gekühlt um ein Überhitzen zu verhindern. Tabelle 1 zeigt Wellenlänge und Frequenz der Radioantenne in Svetloe (vgl. z.B. Finkelstein, 2009). Diese Werte treffen auch für die anderen Stationen des russischen Netzes zu:

Wellenlänge [cm]	Frequenz [GHz]
21/18	1,38 - 1,72
13	2,15 - 2,50
6	4,60 - 5,10
3,5	8,18 - 9,08
1,3	22,02 - 22,52

Tabelle 1: Eigenschaften der Radioantennen

Die Zeit und der Frequenzstandard wird mit vier H-Masern verwirklicht. Das Datenaufzeichnungssystem besteht aus einem Mk 5A-Rekorder, einem Mk III-Rekorder, einem Mk IV-Datenaquisitionssystem, einem S2-Rekorder und einem S2-Datenaquisitionssystem, sowie einem Vierkanal-Radiometer (vgl. z.B. Finkelstein, 2009).

\* Kryotechnik ist eine Disziplin, die sich mit der Herstellung, Speicherung und Benutzung kryotechnischer Flüssigkeiten beschäftigt, die Temperaturen unter  $-240^{\circ}\text{F}$  erreichen. Bekannte kryotechnische Flüssigkeiten sind zum Beispiel Argon, Helium oder flüssiger Stickstoff (Bilstein, 1996, S90ff).

## Badary



Abbildung 6: Radioantenne Badary, Quelle: Russian VLBI-Network "Quasar": 2009-213, A. Finkelstein, 26 May 2009, Onsala

Das Badary VLBI-Observatorium wurde 2005 errichtet und besteht aus einer 32m Quasi-Paraboloid-Empfangsantenne mit HEMT-Transistoren für Wellenlängen wie Svetloe (vgl. Tabelle 1). Das VLBI-Terminal wurde zwischen 2006 und 2007 errichtet. Es besteht aus einem Multikanal-R1000-Datenaquisitionssystem, einer R4103-Kopplungseinheit für das Aufnahmesystem, einem S2-RT-Aufnahmeterminal und einem Mk 5B-Aufnahmeterminal (Fedotov, 2007).

## Zelenchujskaya

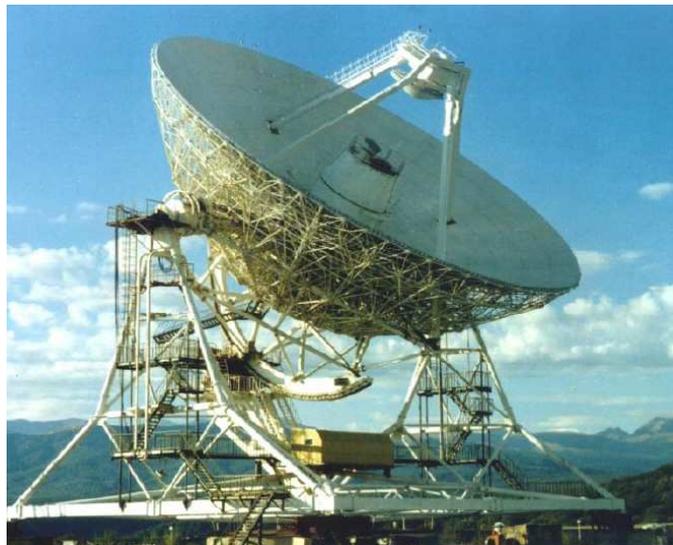


Abbildung 7: Radioantenne Zelenchujskaya, Quelle: Russian VLBI-Network "Quasar": 2009-213, A. Finkelstein, 26 May 2009, Onsala

Die Station befindet sich im nördlichen Kaukasus von Russland in Zelenchujskaya (Republik Karachaevo-Cherkessia). Das Terminal besteht aus einem VLBA4-Datenaquisitionssystem, einem Mk 5A- und einem Mk 5B-Rekorder.

## 2.4 Das internationale und russische VLBI-Programm

Das russischen Stationen nehmen an den internationalen globalen VLBI-Programmen für geodätische Beobachtungen teil. Nachfolgend werden die internationalen Programme kurz erläutert (Finkelstein, 2009).

**IVS-R1, IVS-R4:** Dabei werden wöchentlich am Montag und Donnerstag Messungen zur Einholung von Erdorientierungsparametern gemacht.

**IVS-T2:** Messungen werden zwei bis dreimal im Monat ausgetragen, um Stationskoordinaten zu überwachen.

**IVS-Intensive:** Messungen werden täglich, zur Bestimmung der Weltzeit UT1 gemacht.

**EURO:** Diese Experimente werden mindestens einmal pro Monat veranstaltet. Dabei geht es um die Ermittlung von Stationskoordinaten und ihre weitere Entwicklung im europäischen VLBI-Netz.

**VLBI-RDV:** Pro Jahr werden ein paar Messungen zur Kartierung geodätischer Quellen gemacht.

**RU-List 1,2:** Radiometrische Messungen werden gemacht zur Bestimmung der Flussdichte geodätischer Radioquellen.

Das nationale Programm der Russen konzentriert sich auf die Bestimmung der Erdorientierungsparameter, z.B. der Weltzeit UT1 (Finkelstein, 2009):

**RU-E:** Ganztägige Messungen werden einmal alle zwei Wochen ausgetragen, zur Bestimmung sämtlicher EOP.

**RU-U:** Einmal alle zwei Wochen werden ein bis achtstündige Sessions gehalten, um UT1 mittels der Basislinien der drei russischen Stationen zu bestimmen.

Für das einheimische Programm werden die beobachteten VLBI-Daten dem IAA (Institute of Applied Astronomy) zur Korrelation übergeben. Dabei werden die einstündigen Intensive Sessions per e-VLBI-Datentransfer über das Internet versendet und die 24 Stunden Beobachtungen auf Disks zum Korrelator in St. Petersburg gebracht (Finkelstein et al., 2011).

Tabelle 2 beinhaltet die RU-U und RU-E Messungen pro Jahr (Finkelstein et al., 2011):

Jahr	RU-U			RU-E		
	Svetloe	Zelenchk*	Badary	Svetloe	Zelenchk	Badary
2006		6	6	9	9	9
2007	10	12	17	9	9	9
2008	18	15	18	14	14	14
2009	13	26	30	23	23	23
2010	3	50	30	20	20	20
2011	6	23(50)	28(50)	16(50)	16(50)	16(50)

Tabelle 2: Anzahl der Beobachtungen im RU-E und RU-U Programm

\* Zelenchk steht kurz für Zelenchukskaya und wird im Verlauf auch noch öfters so geschrieben.

### 3. VieVS

Die Auswertesoftware VieVS (Vienna VLBI Software) wurde am Institut für Geodäsie und Geophysik (IGG), bei der Gruppe für Höhere Geodäsie an der Technischen Universität Wien entwickelt. Nachfolgend soll ein kurzer Überblick über die Grundfunktionen und die Zusammenhänge der einzelnen Modi erklärt werden. Für eine detaillierte Darstellung ist die Bedienungsanleitung von VieVS (Vienna VLBI Software - VieVS manual, Version 1c (Böhm et al., 2010) zu Rate zuziehen.



Abbildung 8: VieVS Logo © IGG, Vienna

Als Basis für die Programmierung wurde die Sprache Matlab benutzt. Das hat nicht nur den Grund, dass es eine der vielseitigsten mathematischen Programmplattformen ist, sondern weil die meisten Studenten technischer Studienrichtungen damit umzugehen wissen, im Vergleich zu teils älterer Software, wie C++ oder Fortran (Böhm et al., 2009). Außerdem ist Matlab eine neue, vielseitige und oft verwendete Sprache in der anwendungsorientierten Programmierung. Neben einer großen Anzahl an Tools und implementierten Funktionen, kann ein Nutzer VieVS um seine eigenen, individuellen Programme erweitern.

#### 3.1 Programmaufbau

Das Programm VieVS besteht aus mehreren Komponenten, die zusammen die Vienna VLBI Software ergeben. Dabei ist jedes Segment für eine andere Aufgabe in der Berechnung zuständig. Abbildung 9 zeigt den eigentlichen Programmhauptfluss mit Nebenaufgaben (vgl. Böhm et al., 2010, vgl. Nilsson et al., 2011):

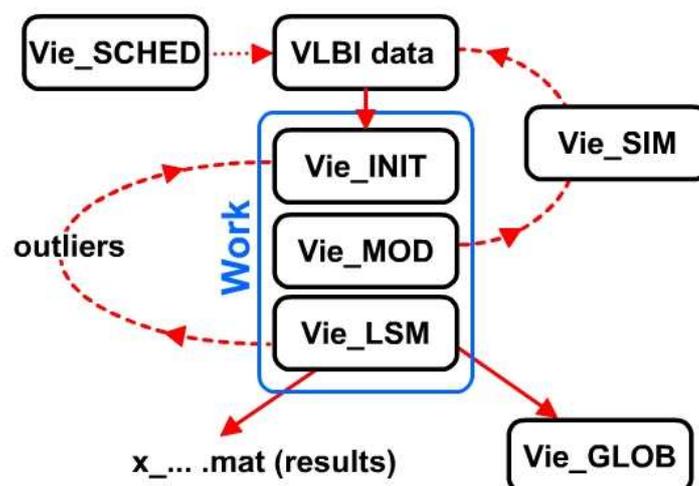


Abbildung 9: Programmfluss von VieVS (nach Nilsson et al., 2011)

**VIE\_SETUP** ist das graphische User Interface von VieVS. Es führt den Benutzer Schritt für Schritt durch die Einstellungen der Module Vie\_INIT, -MOD, -LSM, -SIM und -GLOB. Jede ausgewählte Session wird mit der gewählten Parametrisierung ausgewertet. Für häufig verwendete - das können mehrere oder weniger Sessions sein - ist es möglich diese zu einer

Prozessliste zusammenzustellen. Bei der Auswertung geht das Programm diese der Reihe nach durch und bearbeitet jede Session einzeln.

Eine zusammengestellte Prozessliste wird automatisch beim ersten Durchlauf im WORK Verzeichnis abgespeichert, sowie eine Parameterliste jeweils pro Session im Unterordner LEVEL0. Diese beschreibt, welche Modelle zur Berechnung benutzt werden bzw. Optionen für VIE\_LSM. Weiters wird im WORK Verzeichnis eine runp.mat Datei angelegt, die noch Informationen zum weiteren Auswerteverlauf beinhaltet, vor allem, welche Module von VieVS benutzt werden.

In dieser Arbeit wurde mit der VieVS Version **1d** gearbeitet.

**VIE\_INIT** ist jener Teil von VieVS, der die Beobachtungen einliest. Diese liegen im NGS-Format vor (vgl. Kapitel 4). Weiters liest es auch das zuvor in VIE\_SETUP erstellte Parameterfile vom LEVEL0 Ordner ein. Hat man beim ersten Durchlauf einer Session den Ausreißertest gemacht, d.h. das Programm nach Ausreißern suchen lassen, werden diese im zweiten Durchlauf über das Outlier File durch VIE\_INIT zum Ausschluss eingebracht. Die Benutzung von OPT Files wird ebenfalls durch VIE\_INIT ermöglicht (vgl. Kapitel 3.3).

Weiters erstellt VIE\_INIT im LEVEL0 Ordner eine strukturierte Datenreihe mit Informationen darüber, welche Stationen in einer Session benutzt wurden, welche Quellen man beobachtet hat und welche Scans es dazu gab.

Im Array antenna.mat befindet sich die Auflistung der Stationen, welche an der Messung beteiligt waren, sowie Informationen zu deren Positionen und Geschwindigkeiten.

Das Array sources.mat bezieht sich auf die beobachteten Quellen der Session und deren genauen Positionen.

Das Scan-Array trägt jegliche Informationen zu den einzelnen Scans. Solche sind die beobachteten Laufzeitverzögerungen und deren Standardabweichungen, die Korrekturen für die Ionosphäre, alle Beobachtungen des NGS-Files mit dem Qualitätscode sowie Druck und Temperatur (falls im NGS-File angegeben; sonst werden sie mit GPT\* berechnet).

**VIE\_MOD** berechnet die theoretische Laufzeitverzögerung. Weiters beinhaltet es auch alle notwendigen Parameter zur Stationskorrektur, wie die Gezeiten der festen Erde (vgl.: Kapitel 4.1, Parametrisierung beim Defaultdurchlauf).

Zur Berechnung werden aus dem LEVEL0 Ordner die Parameter-, Antennen-, Quellen- und Scan-Arrays eingelesen. Dagegen erstellt VIE\_MOD jeweils ein gleichnamiges File im LEVEL1 Ordner mit den Ergebnissen für die weiteren Berechnungen im kleinsten Quadrate-Ausgleich.

**VIE\_LSM** ist jener Teil von VieVS der mittels Methode der kleinsten Quadrate die gesuchten Unbekannten bestimmt (vgl.: Kapitel 2.1, Geodätische Auswertung). Bereits eine einzige Session liefert das vollständige Spektrum an VLBI-Parametern. Solche sind:

- Stationskoordinaten
- Quellenkoordinaten
- Uhrenparameter
- Troposphärische Zenitlaufzeitverzögerung
- Troposphärischer Horizontalgradient
- Erdorientierungsparameter

---

\* Global Pressure and Temperature model

Globale Parameter, z.B. Love/Shida Zahlen, werden erst ab einer großen Anzahl an Sessions bestimmt.

VIE\_LSM liest die Struktur-Arrays parameter-, antenna-, sources- und scan.mat aus dem LEVEL1 Ordner, bzw. wenn ausgewählt auch alle OPT Files zur jeweiligen Session. Anschließend kann im Ordner LEVEL2 eine Datei mit den Ergebnissen für globale Lösungen (vgl.: VIE\_GLOB) und im OUTLIER Archiv ein File mit den erkannten Ausreißern erstellt werden. Weiters werden im LEVEL3 Ordner drei Dateien angelegt:

*x\_(Sessionsname)* beinhaltet die von VIE\_LSM bestimmten Parameter.

*opt\_(Sessionsname)* enthält sämtliche Daten für eine globale Lösung.

*atpa\_/atpl\_(Sessionsname)* enthalten die Normalgleichungsmatrizen (vgl. Kapitel 2.1, Formel 5).

**VIE\_SIM** ist ein Erweiterungstool von VieVS, mit dem man eine VLBI-Beobachtung simulieren kann. Dabei werden künstliche Laufzeitverzögerungen erstellt, um z.B. verschiedene Auswertestrategien vergleichen zu können. In dieser Arbeit kam das VIE\_SIM Tool nicht zur Anwendung.

**VIE\_GLOB** kombiniert die Normalgleichungen einzelner Sessions in einer globalen Lösung um den terrestrischen Referenzrahmen (TRF) oder den himmelfesten Referenzrahmen (CRF<sup>\*</sup>) oder andere Parameter (Love/Shida) zu bestimmen. In dieser Arbeit kam das VIE\_GLOB Tool nicht zur Anwendung.

**VIE\_SCHED** ist eine übergeordnete Planungssoftware für VieVS. In dieser Arbeit kam das VIE\_SCHED Tool nicht zur Anwendung.

---

\* Celestial Reference Frame

## 3.2 GUI (Graphical User Interface)

Eine gute Software benötigt eine übersichtliche Benutzeroberfläche, die leicht zu bedienen ist. In VieVS gibt es gleich mehrere GUIs, die der Reihe nach aufscheinen, an denen der Nutzer seine Einstellungen machen kann. Auf Grund der großen Anzahl an auswählbaren Parametern wäre es nicht möglich, dies an einem einzigen Fenster unterzubringen. Es sei kurz angemerkt, dass am IGG bereits die Version VieVS 2.0 in Arbeit ist (Stand 2012) welche eine vereinfachte Benutzeroberfläche haben soll. Nachfolgend werden die ersten beiden GUIs von VieVS (Version 1d) kurz vorgestellt:

### GUI1 (inint\_qu)

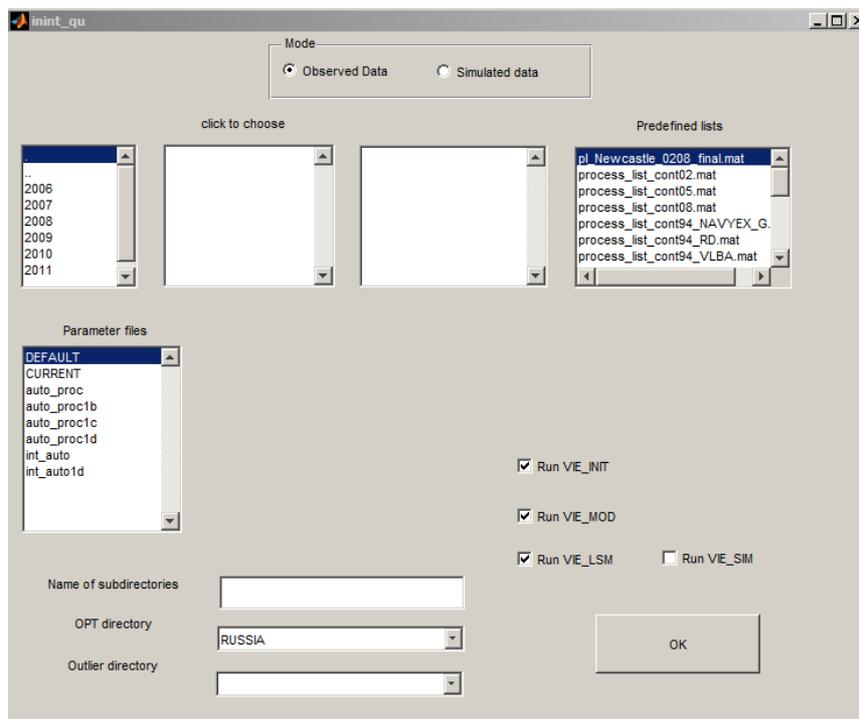


Abbildung 10: GUI 1 von VieVS, Setup/INIT

Das erste GUI beinhaltet die Funktionen, wie sie in VIE\_SETUP beschrieben wurden. Der Nutzer wählt Sessions aus den jeweiligen Jahresordnern und kann Prozesslisten erstellen, falls er mehrere Sessions häufiger benutzt. Es gibt jeweils ein Scrollmenü für vordefinierte Listen und auch Parameterfiles, die für eine Auswertung benutzt werden können, ohne selbst die Parametrisierung verändern zu müssen.

Um die Übersichtlichkeit zu wahren, ist es möglich einen eigenen Unterordner zu erstellen, in dem die Ergebnisse der Auswertung abgelegt werden. Dasselbe gilt auch für OPT- und Outlier-Files.

Über dem OK Button befinden sich noch die vier Hauptmodi von VieVS, die per Hackenkästchen angewählt werden können, damit sie beim folgenden Durchlauf vom Programm benutzt werden. VIE\_INIT/MOD/LSM sind bei jedem Neustart von VieVS immer ausgewählt. Für eine simulierte Auswertung kann man noch VIE\_SIM einschalten. Dafür muss auch, ganz oben am GUI, vom Modus *Observed Data* auf *Simulated Data* umgestellt werden. VIE\_GLOB kann am letzten GUI aktiviert werden.

## GUI2 (mod\_qu)

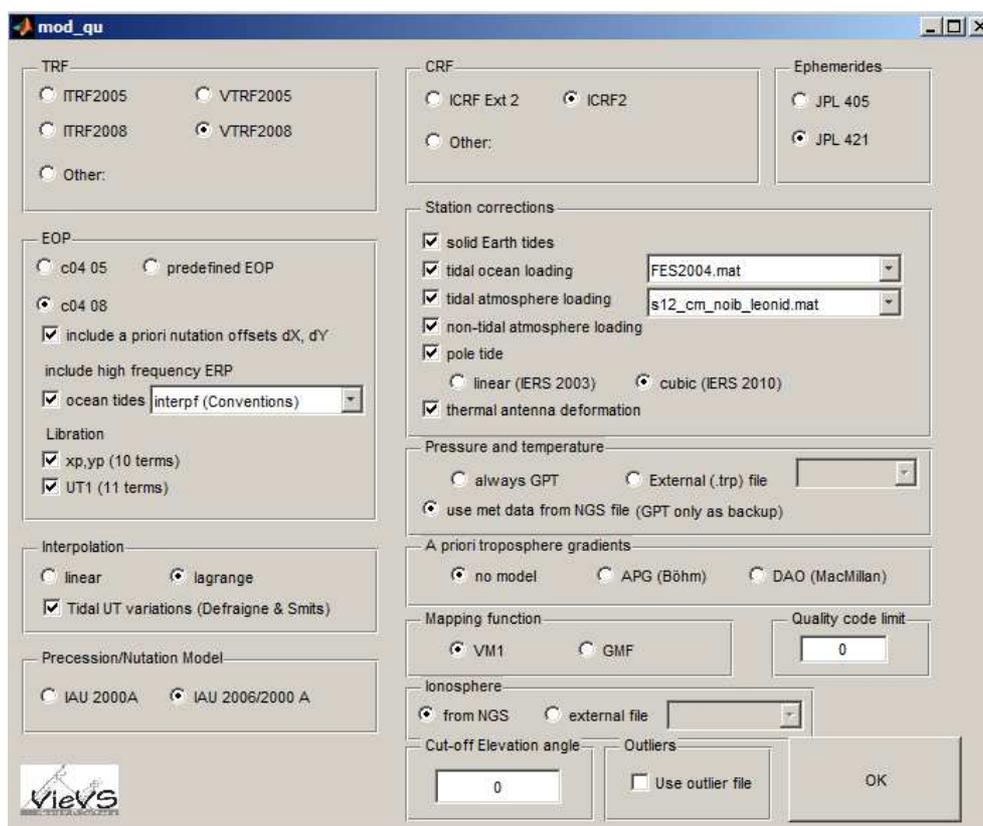


Abbildung 11: GUI 2 von VieVS, INIT/MOD Applikation

Das zweite GUI beinhaltet die Parametrisierung für die Prozesse VIE\_INIT und VIE\_MOD. Auf Abbildung 11 sind die Grundeinstellungen der beiden Module angegeben. Sie beinhalten bereits die neuesten Modelle der IERS-Konventionen, welche für die verschiedenen Korrekturen ausgewählt werden, die dann zusammen zum theoretischen Delay einfließen (vgl. Kapitel 2.1, geodätische Auswertung). Weiters wählt der Nutzer hier die Art der Interpolation und hat die Möglichkeit Outlier-Files in die Auswertung miteinzubeziehen.

Eine genauere Beschreibung der hier angeführten Funktionen wird in Kapitel 4.1.1 angeführt.

### Weitere GUIs und ihre Optionen

Die weiteren GUIs beinhalten die Einstellungen für den kleinsten Quadrate-Ausgleich. Vorzüglich wird hier die Parametrisierung angegeben, die es zu treffen gilt um jene Unbekannten zu bestimmen, wie sie bei der Beschreibung in VIE\_LSM (vgl. Kapitel 3.1) aufgezählt wurden. Außerdem kann der Nutzer die Intervalle zwischen den Uhrenoffsets einstellen, falls es in der Auswertung zu solchen kommt und weiters bestimmen, welche EOP berechnet werden sollen. So wird, z.B. im Fall einer Intensive Session (vgl. Kapitel 4.3) nur dUT1 ausgewählt. Wie diese Einstellungen für bestimmte Auswertungen zu treffen sind, ist in Kapitel 4 genauer beschrieben.

## 3.3 Spezielle Files von VieVS

VieVS enthält eine Menge an speziellen Files, die man selbst erstellen kann, oder vom Programm angelegt werden. Der Sinn besteht darin, die Auswertung einfacher und effizienter zu gestalten. Weiters wird die Fehleranfälligkeit minimiert. Nachfolgend werden

drei spezielle Files von VieVS ausführlicher beschrieben, wie sie auch in dieser Arbeit zur Anwendung gekommen sind.

### Processlist

Eine Prozessliste in VieVS ist eine Zusammenstellung von Sessions und kommt vor allem dann zur Anwendung, wenn man einen Datenset häufiger benutzt.

Um eine eigene Prozessliste zu erstellen, wählt man alle Sessions aus, welche diese enthalten soll. Nach dem Durchlauf von VieVS wird die Zusammenstellung im WORK Ordner unter der Datei *process\_list.mat* abgespeichert. Diese kann dann umbenannt und in den Unterordner WORK/Processlist verschoben werden. Beim nächsten Aufruf von VieVS ist es dann möglich, die Liste im vierten Scrollmenü *Predefined lists* auszuwählen. Dabei erscheinen links davon alle Sessions, welche die Liste beinhaltet und können nachträglich noch entfernt oder andere hinzugenommen werden.

### Outlier File

Das Outlier File beinhaltet alle Ausreißer einer Session, die von dem Programm als solche erkannt wurden. Nach der Ausgleichung werden die Residuen gebildet. Dabei kann es sein, dass manche durch fehlerhafte Messungen besonders groß sind. Solche werden per Ausreißertest erkannt. Bei der einfachen Version dieses Tests wird geprüft, ob das Residuum einer Beobachtung dreimal größer ist, als die a posteriori Standardabweichung der Gewichtseinheit. Daneben gibt es noch eine zweite Möglichkeit in der Ausreißerererkennung. Der Unterschied zur ersten ist, dass man nicht die a posteriori Standardabweichung der Gewichtseinheit, sondern den formalen Fehler der Residuen zum Vergleich benutzt. Wurde ein Ausreißer gefunden, wird der genaue Zeitpunkt, zu dem es zu diesem Ausreißer kam, in einer ASCII-Datei in MJD<sup>\*</sup> abgespeichert.

Erstellt wird das Outlier-File beim ersten Durchlauf der Session in VIE\_LSM, sofern der Outlier Test angewendet wurde (vgl. Kapitel 4.1.1). Die Datei wird in DATA/OUTLIER und im Ordner für das entsprechende Jahr abgelegt. Beim zweiten Durchlauf von VieVS kann dieses File benutzt werden, um die Ausreißer durch VIE\_INIT entfernen zu lassen.

### OPT File

Diese Datei muss vom Benutzer selbst angelegt werden (vgl. Kapitel 4.1.4). Bei manchen Sessions kann es zu schlechten Ergebnissen kommen, die auf Probleme wie Clockbreaks (ein Sprung bei einer Stationsuhr), fehlerhafte Beobachtungen an einer Station, zwischen zwei Basislinien oder zu Quellen zurückgeführt werden können. Mit dem OPT File ist es möglich eine problematische Session zu verbessern, in dem darin festgelegt wird, welche Stationen, Basislinien oder Quellen von der Auswertung ausgeschlossen werden sollen. Bei Clockbreaks muss der Nutzer den Zeitpunkt des Sprungs der Stationsuhr in MJD angeben.

Das OPT File befindet sich im DATA/OPT directory unter dem Ordner für das entsprechende Jahr.

---

<sup>\*</sup> Modifiziertes Julianisches Datum

### Weitere spezielle Files in VieVS

Das **predefined parameter file** ist eine Datei, welche eine Parametrisierung enthält, die ein Nutzer öfter verwendet. Hat der Anwender solch ein File erstellt, kann er es bei jedem Neustart von VieVS am ersten GUI im fünften Scrollmenü auswählen und muss für den nächsten Durchlauf nicht alle Parameter erneut einstellen.

Der Benutzer kann seinen eigenen **TRF Katalog** mit Stationskoordinaten und Geschwindigkeiten einbringen, sowie andere eigene Modelldaten für **CRF**, **EOP** und **ocean tides**.

## 4. Auswertung

Die Aufgabe der vorliegenden Arbeit ist es, aus den russischen VLBI-Beobachtungen über die Jahre 2006 bis 2011 Erdrotationsparameter und Basislinienlängen zu bestimmen. Die hierfür erforderlichen Daten wurden auf einem Internetserver zur Verfügung gestellt. Dabei handelte es sich um insgesamt 223 Files über einen Zeitraum vom 11. August 2006 bis zum 25. März 2011. Tabelle 3 zeigt die Anzahl der Sessions pro Jahr (RU-E und RU-U zusammen).

2006	14
2007	25
2008	37
2009	52
2010	73
2011	22

Tabelle 3: Anzahl der russischen Sessions pro Jahr

Davon sind 115 Sessions vom RU-U und 108 vom RU-E Programm. Vergleicht man Tabelle 3 mit Tabelle 2 in Kapitel 2.4 fällt auf, dass sie sich geringfügig in der Anzahl an Sessions pro Jahr unterscheiden. Tabelle 3 entspricht dem tatsächlich zur Verfügung gestellten Datenbereich russischer Beobachtungen, mit welchem die Auswertung erfolgte.

Man sieht bereits, dass 2010 das Jahr mit den meisten Messungen ist und die Anzahl der Beobachtungen absteigend bis 2006 geringer ausfällt. Auch wenn diese seit Beginn des russischen Programms kontinuierlich ansteigt, ist die Gesamtmenge der Observationen gegen die Zeit leider niedrig. Erdrotationsparameter unterliegen starken Schwankungen, daher wäre eine dichtere Reihe von Messungen wünschenswert. Im Gegensatz dazu benötigt man für den Nachweis der Plattentektonik lange Zeitreihen. Diese Bewegung ist sehr linear und schwankt kaum.

Außerdem sollte bedacht werden, dass sich nicht alle Beobachtungen zur Parameterschätzung eignen. Daher soll auch die Qualität russischer Sessions in dieser Arbeit betrachtet werden.

### NGS-Files

Die Daten aus den Korrelatorzentren werden in einem Datenbankformat ausgegeben. Danach müssen die Mehrdeutigkeiten (Ambiguities) gelöst sowie z.B. die ionosphärische Korrektur berechnet werden. Aus diesem Grund gibt es verschiedene Datei-Versionen eines VLBI-Experiments. Ab einem gewissen Fortschritt (meistens Version 4) werden auch im ASCII-Format sogenannte NGS-Dateien ausgegeben, die alle für die Auswertung benötigten Informationen beinhalten. Die Vienna VLBI Software führt die Auswertungen auf Basis dieser Dateien durch.

Die Beobachtungsdaten zu jeder Session liegen im NGS-Format vor, das aus mehreren Beobachtungsböcken besteht. Der nachfolgende Block einer einzelnen Beobachtung wurde dem NGS-File vom 7. April 2010 entnommen, und dient zur Veranschaulichung.



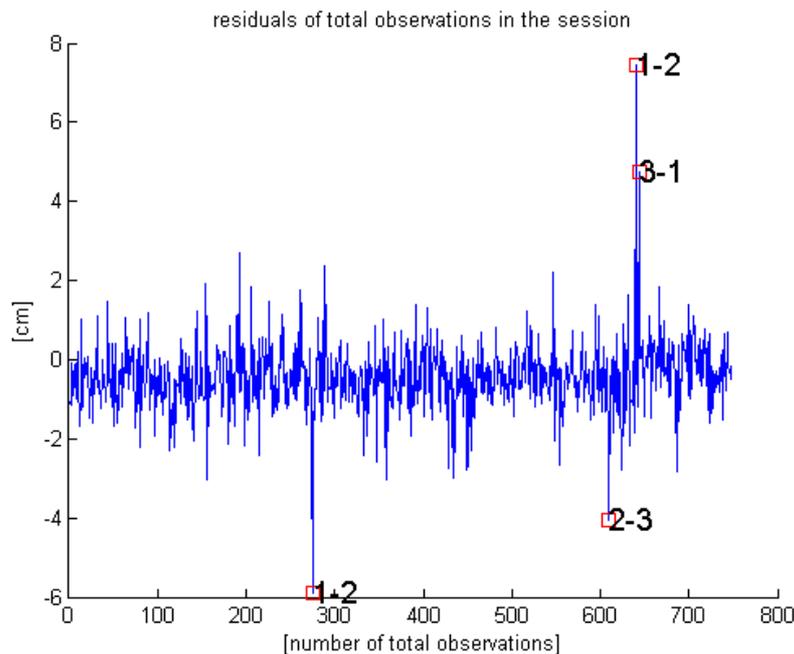


Abbildung 12: Residuenplot der Session vom 3. Dezember 2010

## OUTLIERS:

BADARY	SVETLOE	55534.322418981479
SVETLOE	ZELENCHK	55534.753101851857
BADARY	SVETLOE	55534.789837962962
ZELENCHK	BADARY	55534.792048611111

In den ersten zwei Spalten des Outlier Files stehen die beiden Stationen der gemessenen Basislinie. In der dritten Spalte befindet sich das zugehörige Modifizierte Julianische Datum.

Die Session vom 3. Dezember 2010 ist eine Messung auf drei Basislinien und liegt mit über 700 Beobachtungen in einem guten Bereich. Der Großteil der Residuen befindet sich zwischen  $\pm 2$  Zentimeter. Selbst die vier vorhandenen Ausreißer sind in einem akzeptablen Rahmen. Aufgrund der großen Anzahl an Beobachtungen verfälschen sie auch ohne deren Eliminierung das Ergebnis nicht signifikant.

Ein weiteres Maß der Genauigkeit stellt das  $\chi^2$  dar. Dabei ist dies nicht mit dem  $\chi^2$ -Test zu verwechseln. Hier ist die "Varianz der Gewichtseinheit a posteriori", kurz  $\sigma_0^2$  gemeint (vgl. Kapitel 2.1).

$$(13) \quad \chi^2 = \frac{\mathbf{v}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{v}}{n - u}$$

Bezogen auf die Genauigkeit bildet der Wert nur eine Richtlinie, von der man erwarten kann, dass eine Session gut ist. Warum in VieVS der Varianzfaktor  $\sigma_0^2$  mit  $\chi^2$  bezeichnet wurde, ist aus dem Grund geschehen, da jener Wert bei den amerikanischen Kollegen so benannt wurde.

Für das obige Beispiel vom 3. Dezember 2010 liegt der Wert des  $\chi^2$  bei 0,6608 und somit sehr gut.

Während der Erstauswertung wurde separat eine Liste mit den russischen Beobachtungen nach Datum angelegt, zu jeder einzelnen das  $\chi^2$  notiert und Probleme bzw. Auffälligkeiten in

einer kurzen Anmerkung protokolliert. Dabei wurde zwischen Standard- und Intensive Sessions unterschieden. Einige Residuenplots zeigen außergewöhnliche Muster, die mit veränderten Einstellungen nicht verbessert werden konnten (vgl. Kapitel 4.1.5).

#### 4.1.1 Parametrisierung und Berechnung der Standard Sessions

Bei den Standard Sessions handelt es sich um jene Messungen, die im russischen Programm als RU-E bezeichnet werden (vgl. Kapitel 2.4). Diese werden über einen Zeitraum von 24 Stunden ausgeführt und liefern bei der Auswertung sämtliche EOP.

Für die Berechnung der Standard Sessions wurde an der Parametrisierung in VieVS für den Erstdurchlauf der Sessions nichts geändert. Jedes Datum wurde einzeln ausgewertet. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Grundeinstellungen im zweiten GUI (vgl. Abbildung 11):

Kategorie	Einstellung
TRF	VTRF2008 (Böckmann et al., 2010)
CRF	ICRF2 (Fey et al., 2009)
Ephemerides	JPL 421
EOP	c04 08 (Bizouard und Gambis, 2009) <input checked="" type="checkbox"/> include a priori nutation offsets dX, dY <input checked="" type="checkbox"/> ocean tides: interpf (Conventions) <input checked="" type="checkbox"/> xp, yp (10 terms) <input checked="" type="checkbox"/> UT1 (11 terms)
Interpolation	lagrange <input checked="" type="checkbox"/> Tidal UT variations
Precession/Nutation Model	IAU 2006/2000 A (Petit und Luzum, 2010)
Sation corrections	<input checked="" type="checkbox"/> solid Earth tides <input checked="" type="checkbox"/> tidal ocean loading (McCarthy und Petit, 2004) <input checked="" type="checkbox"/> tidal atmosphere loading <input checked="" type="checkbox"/> non-tidal atmosphere loading <input checked="" type="checkbox"/> pole tide --> cubic (IERS 2010) <input checked="" type="checkbox"/> thermal antenna deformation
Pressure and temperature	use met data from NGS file
A priori troposphere gradients	no model
Mapping function	VM1 (Böhm et al., 2006a)
Quality code limit	0
Ionosphere	from NGS
Cut-off Elevation angle	0

Tabelle 4: Default Parametrisierung GUI 2

- Der Terrestrische Referenzrahmen, hier TRF für Terrestrial Reference Frame, ist ein terrestrisches System, das sich mit der Erde bewegt und seine Verwirklichung in Fixpunkten (Observatorien) findet. Der Internationale Terrestrische Referenzrahmen legt Geometrie und Kinematik des Erdkörpers fest (Petit und Luzum, 2010). Für die Auswertung wurde der VTRF2008 Katalog (Böckmann et al., 2010) benutzt, der Stationskoordinaten und Geschwindigkeiten enthält.
- Der Inertiale Referenzrahmen, CRF für Celestial Reference Frame, dient als Bezugssystem für die Bewegung des TRF. Realisiert wird er durch die Positionen

bekannter Radioquellen des ICRF2 (Fey et al., 2009). Für die Auswertung wurde dieser Katalog benutzt.

- Ephemeriden sind Tabellen mit astronomischen Ereignissen. So stellt die Ephemeridenzeit ein gleichförmiges Zeitmaß dar, das von der Planetenbewegung abgeleitet wird. Für die Auswertung wurde das JPL\_421.mat File mit den Ephemeriden der Planeten benutzt.
- Bei den Erdorientierungsparametern kann man sich entscheiden, eigens vordefinierte zu benutzen oder aus einem Katalog zu wählen. Für die Auswertung wurde der IERS 08 C04 Katalog (Bizouard und Gambis, 2009) benutzt, der von der IERS Homepage herunter geladen werden kann und tägliche Serien enthält, was laufende Updates erfordert.
- Der Nutationsoffset kann miteinbezogen oder ausgeschlossen werden. Er beinhaltet Werte für die Free Core Nutation, also die freie Nutation aufgrund der unterschiedlichen Richtungen der Erdrotationsachsen und der Rotationsachse des Erdkerns. Für die Auswertung wurden die Zuschläge miteinbezogen.
- Für die Ozeanischen Tiden wurden für die Parameter  $x_p$ ,  $y_p$  und UT1 die Tabellen der IERS-Konventionen 2003 (McCarthy und Petit, 2004) benutzt.
- Die Interpolation der EOP kann linear, oder nach Lagrange erfolgen. Für die Auswertung wurde die Interpolation nach Lagrange gewählt. Dabei werden die gezeitenverursachenden Variationen der Weltzeit UT1 vor der Interpolation zuerst abgezogen und anschließend wieder angebracht.
- Für das Präzessions/Nutationsmodell wurde der Katalog IAU2006/2000A der IERS Konventionen 2010 (Petit und Luzum, 2010) benutzt.

Für die Stationskorrekturen mussten mehrere Modelle angebracht werden. Für die Auswertung waren alle nachfolgenden ausgewählt.

- Bei den Gezeiten der festen Erde kann der radiale Versatz der Station an einem Tag bereits  $\pm 20$  cm betragen (Mathews et al., 1997). Das ist auf die gravitativen Kräfte von Mond und Sonne zurückzuführen, welche die Erdkruste anheben und wird in der Berechnung mit dem Solid Earth tides Modell angebracht.
- Selbst die Ozeanischen Gezeiten, das heißt, die Verlagerung der Wassermassen, können in einer Deformation auf die Kruste wirken. Für die Auswertung wurde das FES2004 Modell (Letellier, 2004) benutzt.
- Bei tidal atmosphere loading wird die Auswirkung der täglichen Temperatur-Änderung der Atmosphäre berücksichtigt die ebenfalls einen Versatz der Stationen herbeiführen kann. Mit non-tidal atmosphere loading wird dieser Versatz korrigiert.
- Die geozentrische Position der Erdrotationsachsen ist einer ständigen Änderung unterworfen, welche sich in einer Variation der Stationskoordinaten ausdrückt. Mit dem Pole tide Modell wird jene Variation der Zentrifugalbeschleunigung berücksichtigt.
- Selbst der Temperatureinfluss auf die Radioteleskope kann sich in einer Zeitverzögerung auf die Messung auswirken. Während einer 24 Stunden Messung können Temperaturschwankungen eine Dehnung des Teleskops hervorrufen (Nothnagel, 2009). Weiters kann die Aufladung durch Schnee und Eis die Messung

beeinflussen (Haas et al., 1999). Mit dem *Thermal deformation Modell* werden diese Werte einbezogen.

- Temperatur und Druck wurden dem NGS-File entnommen.
- Die Korrekturen der troposphärischen Laufzeitverzögerung wurden mit der Vienna Mapping Function 1 nach Böhm et al. (2006a) modelliert.
- Für das Quality code limit wurde 0 gewählt. Das bedeutet, dass nur Beobachtungen mit dem höchsten Qualitätsmerkmal für die Berechnung miteinbezogen wurden.
- Die ionosphärischen Daten wurden dem NGS-File entnommen. Diese wurden bereits im vorhinein berechnet.
- Der Wert des Cut-off Elevationswinkels betrug beim Eingang in die Auswertung 0. Daher wurden keine Beobachtungen aufgrund des Elevationswinkels ausgeschlossen.
- Da vor der ersten Auswertung noch keine Outlier-Files vorhanden waren, konnten auch keine Ausreißer entfernt werden. Daher blieb dieser Modus abgeschaltet.

Nach der Grundparametrisierung erfolgt die eigentlichen Prozessierung. Dabei gibt es die Möglichkeit zuerst eine einfache und dann eine vollständige Lösung zu rechnen.

### **Einfache Lösung**

Bei der Atomuhr einer Station kann es zu einem Sprung kommen. Dieser wird als Clockbreak bezeichnet. Bei der einfachen Lösung werden solche Clockbreaks schnell aufgedeckt und der Auswertende kann intervenieren, in dem er per OPT-File den Sprung der Uhr entfernt.

Grundsätzlich gilt es Uhrenparameter für jede Stationsuhr zu schätzen. Dies erfolgt über einen, zwei oder drei Uhrenparameter. Demnach hat man einen einzigen Offset, eine lineare oder quadratische Funktion, die für jede Uhr angepasst werden.

Außerdem werden bei der einfachen Lösung die Residuen Stationsweise geplottet und dadurch nicht nur ein Clockbreak ersichtlich, sondern auch das Verhalten der Ausreißer unter den Stationen zueinander. Im Anschluss an die einfache Lösung, kann man auch die vollständige Lösung rechnen.

### **Vollständige Lösung**

Um ein zufrieden stellendes Endresultat einer VLBI-Session (oder mehrere Sessions auf einmal) zu erhalten, bedarf es noch dem Anbringen mehrere Korrekturen und anderen Parameterschätzungen.

- Als Schätzverfahren für die Parameter wurde die Methode der kleinsten Quadrate verwendet. Diese ist jedoch nicht robust und liefert nur dann Schätzwerte mit der größten Wahrscheinlichkeit, wenn alle Beobachtungen normal verteilt sind (Niemeier 2001). Wenn also Ausreißer vorkommen, können sie sich negativ auf das Ergebnis auswirken und müssten demnach entfernt werden. Das geschieht mittels eines Ausreißertests, bei dem geprüft wird, ob das Residuum einer Beobachtung drei mal größer ist, als die a posteriori Standardabweichung der Gewichtseinheit.

(13) coefficient\*mo

$m_0$  steht hier für die a posteriori Standardabweichung der Gewichtseinheit und der Koeffizient ist jene Zahl, die definiert, ab wann der Ausreißer als solcher gewählt wird. Es ist aber auch möglich Ausreißer über den formalen Fehler der Residuen zu schätzen. In diesem Fall geht man nicht über die a posteriori Standardabweichung der Gewichtseinheit (Böhm et al., 2010).

- Der Uhrenoffset erfolgt stückweise und zu bestimmten Zeitpunkten. Im Zuge dieser Arbeit erfolgte der Offset (cm) nicht nur Stückweise. Die Berechnungen wurden so gewählt, dass man auch einen Rate (in cm/Tag) und einen quadratischen Term (cm/Tag<sup>2</sup>) erhielt. Die Intervalle zwischen den einzelnen Offsets wurden mit sechzig Minuten gewählt. Der *constraint* betrug 0,5 ps<sup>2</sup>/s und diente dazu, die Parameter nicht zu stark variieren zu lassen.
- Für eine VLBI Auswertung ist vor allem eine gute Schätzung des Zenith Wet Delays, kurz ZWD, nötig. Wenn ein Radiosignal in die neutrale Atmosphäre eintritt, wird es aufgrund des darin befindlichen Wasserdampfs refraktiert. Das heißt, dass die elektromagnetische Welle, streng nach dem Strahlenbrechungsgesetz von Snellius, beim Übergang in ein verschieden dichtes Medium gebrochen wird. In diesem Fall zum Lot, Richtung Erde. Jene Verzögerung, welche das Radiosignal auf seinem Weg durch die Troposphäre erfährt, kann dargestellt werden als Produkt der Zenitverzögerung und einer mapping function (Böhm et al., 2006a). Dabei wird die Zenitlaufzeitverzögerung in einen hydrostatischen und einen feuchten Anteil aufgespaltet. Die hydrostatische Zenitlaufzeitverzögerung (ZHD) hängt nur von der Dichte ab und kann mittels Luftdruckmessungen direkt an der Station ermittelt werden. Da der feuchte Anteil (ZWD) jedoch direkt vom Wasserdampf abhängt ist die Bestimmung dieses Fehlers nicht ganz so einfach. Grundsätzlich ändert sich für das Radiosignal der Gehalt des Wasserdampfes kontinuierlich auf seinem Weg durch die neutrale Atmosphäre. Im Gegensatz zur Bestimmung des Zenith Hydrostatic Delay, kurz ZHD - der durch Luftdruckmessungen an der Station und durch die Formel von Saastamoinen (1972) bestimmt werden kann - muss der ZWD im nachhinein bei der Auswertung modelliert werden.

Allerdings gibt es noch ein weiteres Problem, das bei der Troposphäre berücksichtigt werden muss, und zwar, dass bei verschiedenen Azimuten die Verzögerung anders ausfällt. Das heißt, dass weiter im Norden die Atmosphäre nicht so dick ist, wie am Äquator. Demnach ist die hydrostatische Verzögerung an den Polen kleiner als weiter im Süden. Aus dem Grund ist es nicht möglich vom Fall einer Symmetrie, sondern einer Asymmetrie in Azimutrichtung auszugehen. Die Gradienten beschreiben in diesem Fall eine Schiefstellung der Atmosphäre, d.h. eine Änderung der Laufzeitverzögerung je nach Azimut.

Bei der Prozessierung von Standard Sessions werden ZWD, Nord- und Südgradient Constraints zwischen den Offsets bestimmt. Der ZWD Constraint beträgt 0.7ps<sup>2</sup>/s. Die Intervallzeit für ZWD zwischen den Offsets ist 30 Minuten. Nach einer Stunde berechnet sich somit die Varianz nach  $60(\text{sek.}) \cdot 30(\text{min}) \cdot 0,7(\text{ps}^2/\text{s}) = 1260\text{ps}^2$ . Das ergibt eine Standardabweichung von 35ps welche für die Beobachtungsgleichung benutzt wird.

Bei den Gradienten in Nord- und Ostrichtung geht man ähnlich vor, nur dass in diesem Fall der relative Constraint linear ausfällt. Bei der Standardparametrisierung wird für NGR (Nordgradient) und EGR (Ostgradient) 2 mm/Tag gewählt. Die Intervallzeit beträgt 360 Minuten. Somit beträgt die Standardabweichung 0,5 mm.

- Die Stationskoordinaten können im Zuge einer Auswertung im TRF bestimmt werden. Dies geschieht durch das einführen so genannter NNT/NNR Konditionen. Dabei bezieht sich NNT auf eine Translation zwischen dem a priori TRF und dem bestimmten TRF. Für NNR gilt das selbe, nur dass es sich dabei um eine Rotation handelt.

Es ist aber auch möglich Stationskoordinaten in der Berechnung zu fixieren, d.h. die a priori Stationskoordinaten werden dem, für die Auswertung gewählten, Katalog entnommen. Das kann den Vorteil haben, bei der Parameterschätzung bessere Ergebnisse für die EOP zu bekommen. In Kapitel 5 werden für beide Varianten Lösungen für die EOP präsentiert.

- In der Auswertung werden zu den a priori EOP noch Werte dazu geschätzt. Das Intervall für den stückweise linearen Offset beträgt 1440 Minuten (24 Stunden), also einen Tag. Constraints werden zwischen den errechneten EOP benutzt. Deren Einheit ist für Nutation und Polbewegung mas/Tag. Für dUT1 ist es ms/Tag.

#### 4.1.2 Parametrisierung und Berechnung der Intensive Sessions

Mit der Parametrisierung für Standard Sessions ist es nicht möglich Intensive Sessions auszuwerten. Das hat den Grund, dass jene Experimente über einen zu kurzen Zeitraum erfolgten, dadurch zur Schätzung aller Parameter zu wenig Beobachtungen gemacht werden und man somit nur einen Offsets für die Uhrenfunktion benötigt. Das Ergebnis sind Schätzwerte für dUT1, da es aus den zuvor genannten Gründen nicht möglich ist Werte für  $x_{pol}$ ,  $y_{pol}$ ,  $dX$  und  $dY$  zu bekommen. Ebenso werden keine Stationskoordinaten mitbestimmt - nicht nur, weil die Beobachtungsdauer zu kurz, sondern die Lagerung der Koordinaten nicht gut ist. Die Grundidee hinter den Intensive Sessions ist es ohnehin dUT1 Werte schnell zu bestimmen, was z.B. für Navigationszwecke bedeutend ist.

- Die Wahl der Modelle wird bei den Intensives wie bei den Standard Sessions gewählt (vgl. 4.1.1).
- Der Uhrenoffset erfolgt pro Stationsuhr stückweise und ist linear. Rate und quadratischer Term sind nicht notwendig, da das Zeitintervall keinen ganzen Tag umfasst und die Anzahl der Beobachtungen dementsprechend gering ist. Außerdem werden keine Constraints eingeführt, da mit nur einem Offset keine benötigt werden.
- Auch wenn es bei Intensive Sessions eher selten zu Ausreißer kommt, so hat der Ausreißertest, mit einem gewählten Koeffizienten von 5, bei wenigen russischen Sessions Ausreißer gefunden. In dem Zusammenhang war es sogar nötig ein erstelltes Outlier-File für diese Sessions zu benutzen, um die Ausreißer zu entfernen.
- Wie bei den Standard Sessions, in Kapitel 4.1.1 erklärt, wird auch bei den Intensive Sessions die feuchte Zenithlaufzeitverzögerung (ZWD) geschätzt. Allerdings mit einer anderen Parametrisierung. ZWD werden pro Station alle 240 Minuten mit einem relativen Constraint von  $0.0001 \text{ps}^2/\text{s}$  geschätzt. Nach einer Stunde berechnet sich somit die Varianz nach  $60(\text{sek.}) \cdot 240(\text{min.}) \cdot 0.0001(\text{ps}^2/\text{s}) = 1.44 \text{ps}^2$ . Das ergibt eine Standardabweichung von 1.2 ps welche den Bestimmungsgleichungen zugeführt wird. Anders als bei den Standard Sessions wird bei den Intensives auf die Schätzung der horizontalen Gradienten verzichtet.

### 4.1.3 Erstbeurteilung

Die folgende Betrachtung stützt sich auf die rohe Auswertung der Daten ohne bisher Verbesserungsmaßnahmen getroffen zu haben. Dadurch kann man sich ein allgemeines Bild von der Qualität der russischen VLBI-Beobachtungen machen, die in einem durchschnittlichen Bereich liegt. Das in Abbildung 13 angeführte Summenhistogramm dient zur Veranschaulichung aller  $\chi^2$  Werte gegen die Anzahl der Files. Dabei wurde zwischen Intensive und Standard Sessions unterschieden. Bereits hier fällt auf, dass die Intensive bessere Werte im  $\chi^2$  aufweisen als die Standard Sessions. Trotzdem lagen bei beiden Programmen fast gleich viele Sessions in einem Bereich für das  $\chi^2$  größer als 10.

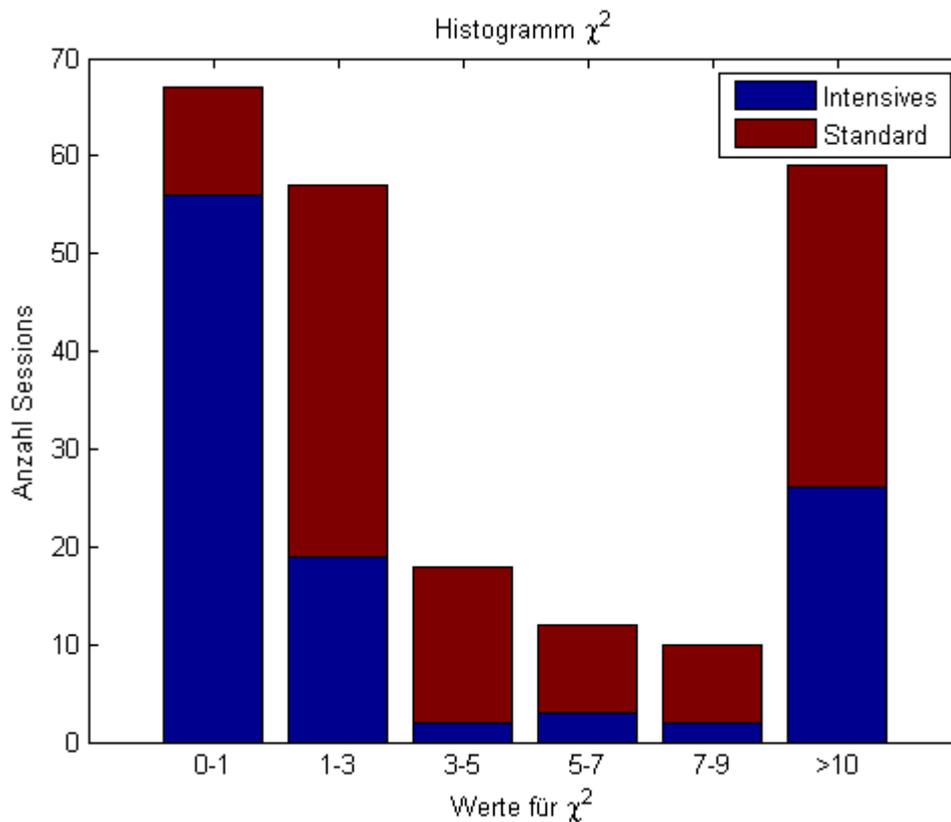


Abbildung 13: Histogramm  $\chi^2$  nach erster Betrachtung der Daten

30% der behandelten Daten weisen ein  $\chi^2$  kleiner gleich 1 auf - davon sind die meisten Intensive. Hebt man das Zulässigkeitsniveau des  $\chi^2$  auf eine Schranke von 3,5, fließen immerhin 61% der Daten in die Auswertung mit ein. Außerdem fällt in der Grafik auf, dass die Intensive im Vergleich zu den Standard Sessions von der Qualität her besser abschneiden. Das gilt auch unter Berücksichtigung der Quantität, da sich die Intensive auf 115 und die Standard Sessions auf 108 belaufen.

In dieser Hinsicht zeigt Tabelle 5, auf Seite 32, die Anzahl der Files pro Jahr. Zusätzlich gibt es noch zwei Spalten um die Summe jener Sessions pro Jahr aufzuzeigen, die für eine weitere Auswertung ausgeschlossen, oder benutzt werden können. Dabei wird erneut zwischen Intensive und Standard Sessions unterschieden. Die Spalte mit dem %-Zeichen sagt aus, wie viele Sessions des Jahres insgesamt für eine weitere Auswertung in Frage gekommen wären.

Die Standard Sessions belaufen sich zu dem Zeitpunkt, also nach der ersten Betrachtung, auf 54 NGS-Files und Intensive Sessions auf 78. Vor allem im Jahr 2010 liegt das Verhältnis

zwischen Intensives zu Standard bei 2,6 zu 1. Bis auf eine einzige Session liegt das  $\chi^2$  der restlichen 40 Intensives unter 1, was in dem Fall sehr gut ist.

Jahr	Sum Files	Ausgeschl. Sessions		Benutzte Sessions		[%]*
		Ausgeschl.	INT/STD	Benutzt	INT/STD	
2006	14	4	2/2	10	3/7	71
2007	25	10	3/7	15	10/5	60
2008	37	24	5/19	13	2/11	35
2009	52	25	10/15	27	13/14	52
2010	73	16	12/4	57	41/16	78
2011	22	12	5/7	10	9/1	45
Summe	223	91	37/54	132	78/54	

Tabelle 5: Anzahl ausgeschlossene und benutzte Sessions - Erstdurchlauf

Stützt man sich weiterhin auf das Verhältnis zwischen den zu benütenden Daten zu möglichen ausgeschlossenen, so schneidet das Jahr 2010 als bestes ab. Bei der genauen Betrachtung des  $\chi^2$  über die Zeit, fällt besonders auf, dass in den Jahren von 2006 bis 2009 keine nennenswerte Verbesserung geschehen ist, abgesehen davon, dass Jahr für Jahr mehr Messungen vorliegen. Erst ab 2010 ist die Qualitätsverbesserung sichtbar. Auch wenn die meisten Sessions zu der Zeit Intensives sind, und diese allgemein in einem besseren Rahmen liegen, wie man es auch in den russischen Daten der vergangenen Jahre beobachten konnte, befinden sich selbst die Standardmessungen beim  $\chi^2$  größtenteils unter 1.

Im Gegensatz dazu weist das Jahr 2011 eine Qualitätsverschlechterung auf. Zwar gehen die in dieser Arbeit benutzen Messungen nur bis zum 25. März, doch liegt bei den Standardfiles nur der 21. Jänner vor, der mit einem  $\chi^2$  von 2,0263 für die weitere Auswertung in Frage hätte kommen können. Die restlichen Daten fielen den Intensive Sessions zu.

Der nächste Schritt stellte die Aufbesserung der Daten da. Dazu wurden Schritte eingeleitet, um vor allem eine Verbesserung im Bereich des  $\chi^2$  zu erzielen.

#### 4.1.4 Aufbesserung der Daten

Für gewöhnlich sollte bei einer VLBI-Auswertung alles ohne Schwierigkeit funktionieren. Hin und wieder können Probleme auftreten, die sich dann am Residuenplot und im  $\chi^2$  bemerkbar machen. Ein erfahrener VLBI-Auswertender kann bei der Betrachtung eines Residuenplots oft erkennen, ob man eine Session mit einer speziellen Parametrisierung in VieVS verbessern könnte oder nicht. Liegt nun eine Beobachtung vor, deren Residuen sich in einem auffälligen Bereich befinden, zum Beispiel Werte in Kilometergröße aufweisen, und deren  $\chi^2$  viel größer als 1 ist, hat dies oft mehrere Ursachen. Geht man davon aus, dass es sich dabei nicht um messtechnische Probleme handelt, können sie auf einfache Weise gelöst werden. Andererseits muss man damit rechnen, die komplette Session auszuschließen. Nachfolgend seien jene Probleme genannt, die man durch einfache Parametrisierung umgehen kann.

#### Ausreißer

Ausreißer sind das Ergebnis einer fehlerhaften Beobachtung und können das Endresultat einer VLBI-Messung dramatisch beeinflussen. Der Residuenplot in Abbildung 14 vom 18. Februar 2011 dient der Veranschaulichung einer solchen Situation.

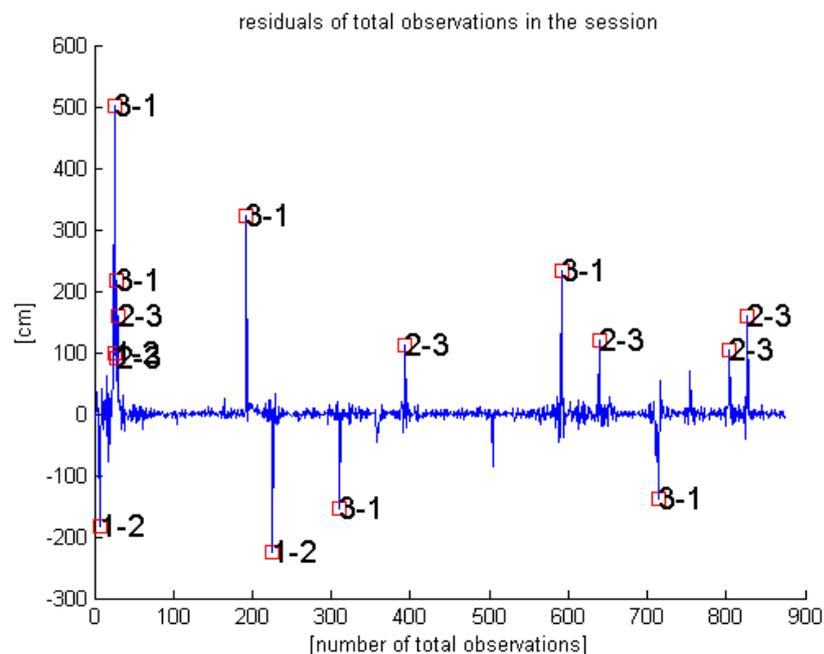


Abbildung 14: Ausreißer - Residuenplot 18. Februar 2011

Die Messung hat 900 Beobachtungen und 22 Ausreißer, die sich zwischen -100 und +500 cm befinden. Das  $\chi^2$  beträgt 18,0182. Die Ausreißer sind über den gesamten Zeitraum der Messung verstreut und treten zwischen allen Basislinien auf. Demnach hat es keinen Sinn, eine der Basislinien zu entfernen um das Problem zu beheben. Wesentlich einfacher ist es die Ausreißer zu lokalisieren und zu eliminieren.

Dazu wird von VieVS ein Outlier File im ASCII Format angelegt, das zwischen der jeweiligen Basislinie, zum Modifiziertes Julianischen Datum den entsprechenden Ausreißer dokumentiert. Das File für das oben stehende Szenario vom 18. Februar 2011 wird auf der folgenden Seite dargestellt.

```

BADARY SVETLOE 55610.963935185195
ZELENCHK BADARY 55610.982372685183
BADARY SVETLOE 55610.984641203700
SVETLOE ZELENCHK 55610.984641203700
ZELENCHK BADARY 55610.984641203700
SVETLOE ZELENCHK 55610.987094907410
ZELENCHK BADARY 55611.175879629627
BADARY SVETLOE 55611.216064814820
ZELENCHK BADARY 55611.299166666664
SVETLOE ZELENCHK 55611.423124999994
ZELENCHK BADARY 55611.665682870371
SVETLOE ZELENCHK 55611.713229166671
ZELENCHK BADARY 55611.788263888891
SVETLOE ZELENCHK 55611.878599537034
SVETLOE ZELENCHK 55611.904224537036
ZELENCHK BADARY 55611.357719907406
BADARY SVETLOE 55611.360127314816
ZELENCHK BADARY 55611.360127314816
ZELENCHK BADARY 55611.561874999999
SVETLOE ZELENCHK 55611.725613425930
ZELENCHK BADARY 55611.785567129627
SVETLOE ZELENCHK 55611.827905092592

```

Das File wird im Mode VIE\_LSM erstellt und im Programmordner DATA, unter OUTLIER, in dem Ordner für das entsprechende Jahr gespeichert. Die Datei trägt dabei den Namen der Session.

Der Ausreißertest kommt in VieVS immer dann zustande, wenn er ausgewählt wurde. Dabei kann er sich nach der a posteriori Standardabweichung der Gewichtseinheit oder dem formalen Fehler der Residuen berechnen. Werden dabei zu große Residuen erkannt, wird das zugehörige Modifizierte Julianische Datum im Outlier-File vermerkt. Dazu auch noch die Basislinie zwischen dem die Beobachtung stattfand.

Das Outlier-File wird erst erstellt, wenn man die Session das erste Mal mit dem Outliertest durchlaufen lässt. Im Anschluss daran ist es möglich die einzelnen Ausreißer von VieVS entfernen zu lassen. Entfernt man nun die bekannten Ausreißer des obige Beispiels vom 18. Februar 2011, liefert es das Ergebnis in Abbildung 15.

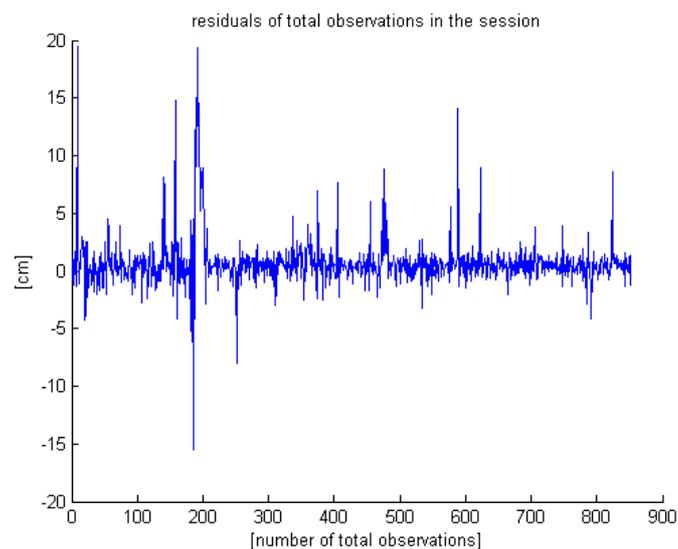


Abbildung 15: Ohne Ausreißer - Residuenplot 18. Februar 2011

Die Ausreißer wurden alle entfernt. Es mag erscheinen dass hier noch einzelne Beobachtungen im Bereich von -15 bis +20 cm liegen, doch wenn man einen Vergleich zur ersten Lösung zieht, bei der sich die Residuen in einem Bereich von mehreren Metern befunden haben, ist das Ergebnis akzeptabel. Bei fast 900 Beobachtungen ist der Durchschnitt sogar unter 5 cm, was nur wenige der russischen Daten aufweisen können. Auch das  $\chi^2$  beträgt nun  $\approx 1,6$  was für die weitere Auswertung genügt.

### Clockbreaks

Beim Clockbreak kommt es im Residuenplot zu seinem unsteten Übergang vom negativen Bereich in den positiven, oder umgekehrt. Dieser Uhrenfehler geschieht, wenn es zu einem Sprung bei einer Stationsuhr kommt. Im Residuenplot versteckt sich solch einer oft zwischen zwei größeren Ausreißern einer Basislinie, die einander gegenüberliegen. Zur Veranschaulichung dieses Problems soll das Beispiel des 23. Januar 2009 dienen, bei dem dieses Verfahren zur Anwendung kam.

Am Residuenplot in Abbildung 16 und einem  $\chi^2$  von 9,077 erkennt man bereits, dass mit der Session etwas nicht stimmen kann.

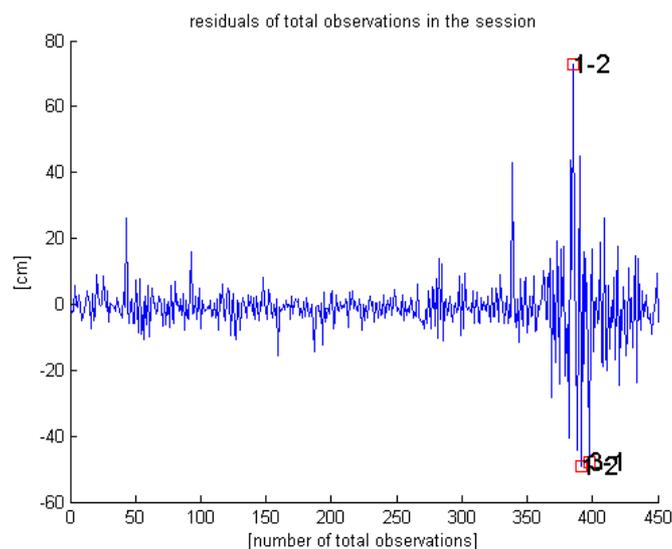


Abbildung 16: Residuenplot mit Clockbreak

Im Vergleich zu anderen russischen Sessions erscheint das  $\chi^2$  nicht all zu hoch zu sein. Doch selbst bei 450 Beobachtungen macht sich der fehlerhafte Übergang von einer quadratischen Funktion zur nächsten bemerkbar.

Der Clockbreak liegt im obigen Residuenplot im Bereich der 400-sten Beobachtung. Es gilt nun herauszufinden, bei welcher der drei Stationen dieser Fehler unterlaufen ist. Dafür muss man die Residuen der einzelnen Stationen betrachten. In Folge dessen wird nur eine einfache Lösung gerechnet (vgl. Kapitel 4.1.1). Im Anschluss daran erhält man für jede Station, die nicht Referenzstation ist, einen eigenen Plot (Abbildung 17, Seite 36).

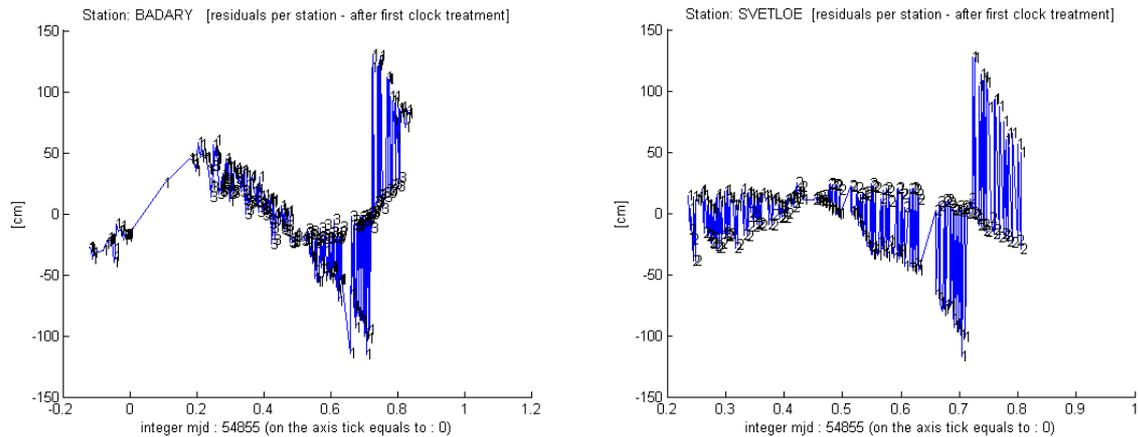


Abbildung 17: Residuenplots der Station Badary (li.) und der Station Svetloe (re.)

Da der Plot für Zelenchk nicht angezeigt wird, ist diese als Referenzuhr deklariert. An den Grafiken von Badary und Svetloe erkennt man, dass beide große Residuen zu Zelenchk (Station 1) aufweisen. Die plötzlichen Sprünge zwischen negativen und positiven Residuen lassen auf einen Clockbreak bei Zelenchk schließen. Um das genaue Datum des Fehlers zu bestimmen, gilt es sich zuerst den besagten Residuenplot ausgeben zu lassen. Es ist nun eine andere Station als Referenzuhr gewählt. Das geschieht, indem der Auswertender manuell ein OPT-File im zugehörigen Dateordner von VieVS anlegt. Am vorliegenden Beispiel vom 23. Januar 2009 sei dieser Vorgang demonstriert:

Zuerst wird ein Textfile erstellt, das den Namen der Session trägt. In diesem Fall sieht die Datei so aus:

```
09JAN23XQ.txt
```

In der Datei wird nun die neue Referenzuhr bestimmt. In diesem Fall legen wir sie auf Badary, da die Station niedrigere Residuen als Svetloe aufweist. Die Befehlszeile hat die Form:

```
CLOCK REFERENCE: BADARY
```

Damit VieVS die Datei benutzen kann, muss noch die Endung txt in OPT umbenannt werden:

```
09JAN23XQ.OPT
```

Diese Datei muss im zweiten Durchlauf in die Berechnung miteinbezogen werden. Das Programm setzt nun die Referenzuhr auf Badary, wodurch man einen Residuenplot für Zelenchk erhalten kann. Da wir noch auf der Suche nach dem Clockbreak sind, wird auch beim zweiten Durchlauf eine einfache Lösung gerechnet. Anschließend werden die Residuen von Svetloe und Zelenchk geplottet. Nun kann man auf die Suche nach dem Clockbreak gehen. Wirft man einen Blick auf den Plot von Zelenchk (Abbildung 18) ist dieser bereits offensichtlich.

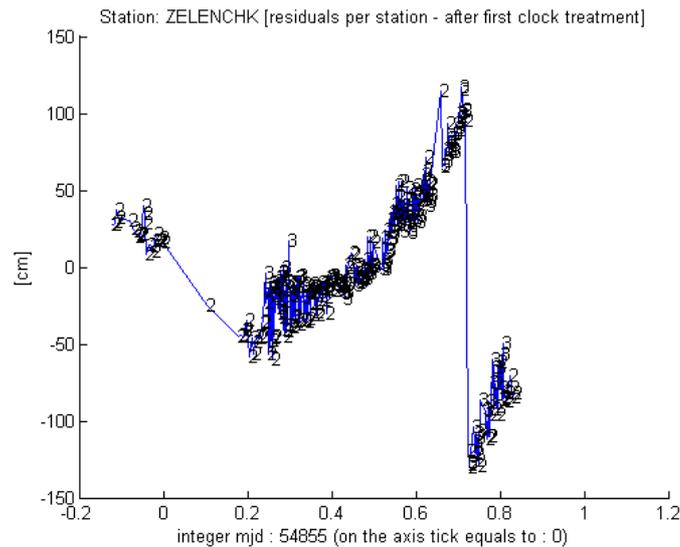


Abbildung 18: Residuenplot der Station Zelenchk

Der Clockbreak befindet sich irgendwo zwischen den Modifiziertes Julianischen Daten von 54855,6 und 54855,8, und zwar bei der plötzlichen Sprungstelle von positiv auf negativ. Mittels der Zoomfunktion von Matlab kann man den gewünschten Bereich noch vergrößern um den genauen Zeitpunkt zu bestimmen (Abbildung 19).

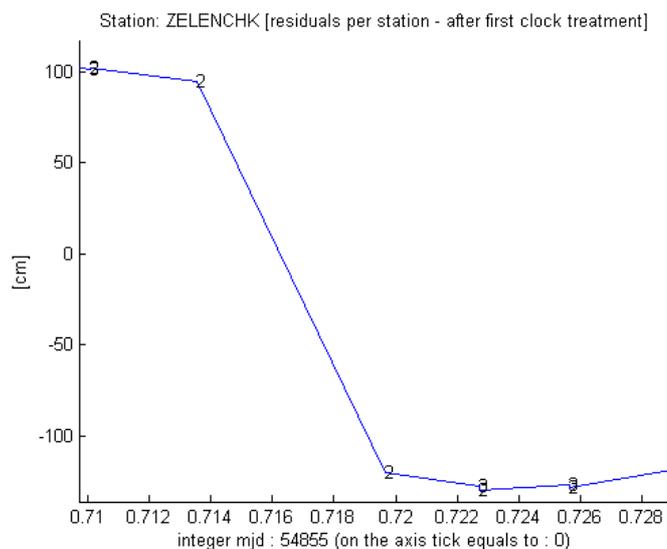


Abbildung 19: Clockbreak der Station Zelenchk

Der Clockbreak liegt zwischen  $\approx 0,714$  und  $\approx 0,72$  (54885 MJD). Der exakte Zeitpunkt ist bei der Definition nicht von Bedeutung, solange er sich im entsprechenden Intervall befindet. Dafür bietet sich das Modifizierte Julianische Datum 54855,716 an. Nun muss im zuvor erstellten File der Verweis auf diesen Zeitpunkt gemacht werden, damit VieVS den Clockbreak entfernt. Das geschieht, indem an der definierten Epoche des Clockbreaks eine neue quadratische Funktion gestartet wird.

Zuerst wird die Endung der Datei von OPT auf TXT zurück benannt, um darin Änderungen vornehmen zu können. Dann wird unter die zuvor erstellte Zeile mit der neuen Uhrenreferenz die Definition des Clockbreaks angehängt. Darin wird definiert, um wie viele Clockbreaks es sich handelt, welche Stationen einen aufweisen und zu welchen Zeitpunkten sie stattfanden. Beim vorliegenden Beispiel gibt es nur einen Clockbreak bei der Station Zelenchukskaya bei

54855,716 Modifiziertes Julianisches Datum. Demnach sieht der Verweis im File wie folgt aus:

```
CLOCK REFERENCE: BADARY  
CLOCK BREAKS: 1  
ZELENCHK 54855.716
```

Dabei ist zu beachten, dass alle Abstände zwischen den Worten und Zahlen eingehalten werden, damit die Daten richtig in VieVS eingelesen werden. Der Stationsname muss acht Zeichen umfassen. Wenn eine Station weniger Buchstaben hat, werden für die fehlenden Zeichen Leerzeichen eingefügt. Weiters werden noch zwei Leerzeichen zwischen die Station und das Mittlere Julianische Datum gestellt.

Jetzt muss noch die Endung der Datei auf OPT geändert werden und der dritte Rechendurchlauf kann gestartet werden. Dabei muss darauf geachtet werden, dass nun das OPT-File in den Prozess mit eingeschlossen wird. Diesmal folgt jedoch eine vollständige Lösung. Abbildung 20 zeigt den Residuenplot der Änderungen.

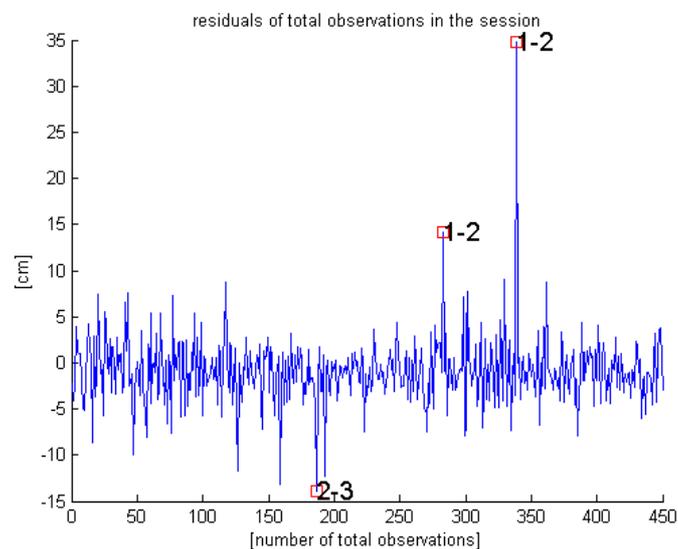


Abbildung 20: Residuenplot ohne Clockbreak

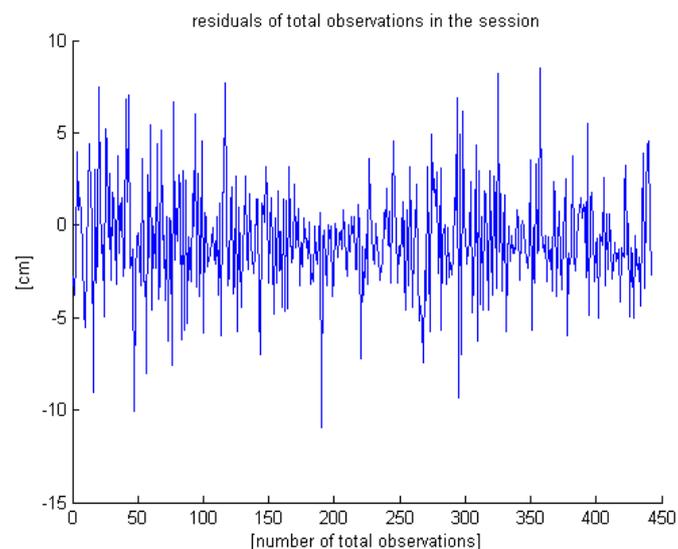


Abbildung 21: Residuenplot ohne Clockbreak und ohne Ausreißer

Mittlerweile befindet sich der Großteil der Beobachtungen in einem Bereich zwischen  $\pm 5$  cm und das  $\chi^2$  bei 2,6734. Aber es gibt noch drei Ausreißer. Selbst wenn die ersten beiden mit einem Wert von 15 cm, bei einer Menge von 450 Beobachtungen, nicht so sehr ins Gewicht fallen würden - und daher auch nicht entfernt werden müssten - könnte der dritte Ausreißer mit 35 cm zu einem Problem werden. Daher werden alle drei entfernt. Abbildung 21 zeigt das Ergebnis. Abschließend kann man sagen, dass die Verbesserung des 23. Januar 2009 erfolgreich war. Das  $\chi^2$  befindet sich mittlerweile bei  $\approx 2,2$ .

### Ausschluss von Basislinien

Hin und wieder kann es sein, dass zwischen zwei Basislinien große Residuen auftreten, die gleichmäßig über die gesamte Beobachtung gestreut sind. Der Grund dafür können fehlerhafte Beobachtungen zwischen zwei Stationen sein. Ein Beispiel für solch ein Problem stellt die russische Session vom 8. September 2006 dar (Abbildung 22).

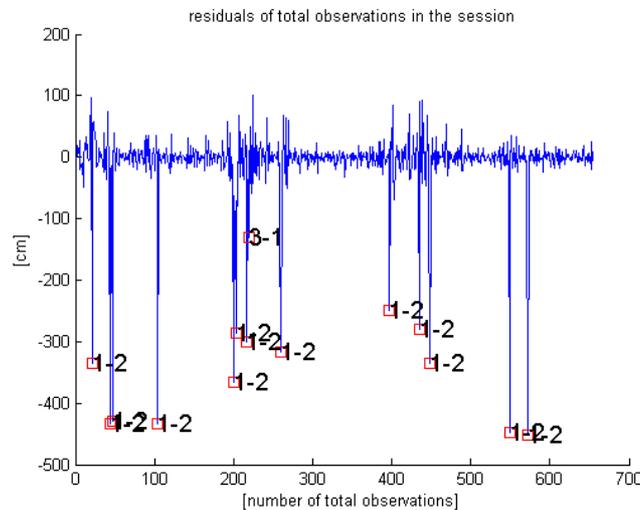


Abbildung 22: Residuenplot mit schlechter Basislinienbeobachtung

Das  $\chi^2$  beträgt 25,8511, und ist eindeutig zu hoch. Wirft man einen Blick auf die Residuenplots der einzelnen Stationen fällt auf, dass Badary, als Station 1, mit Svetloe, als Station 2, große Residuen hat und umgekehrt. Zelenchk hat dabei Residuen zu beiden anderen Stationen. Das bedeutet, dass etwas mit der Messung auf der Basislinie Badary - Svetloe nicht in Ordnung ist:

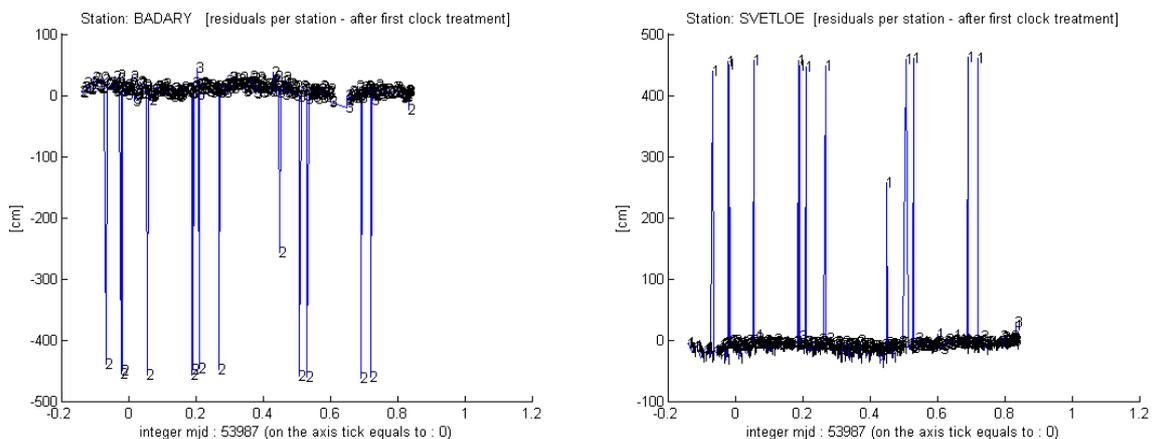


Abbildung 23: Ausreißer zwischen Badary (li.) und Svetloe (re.)

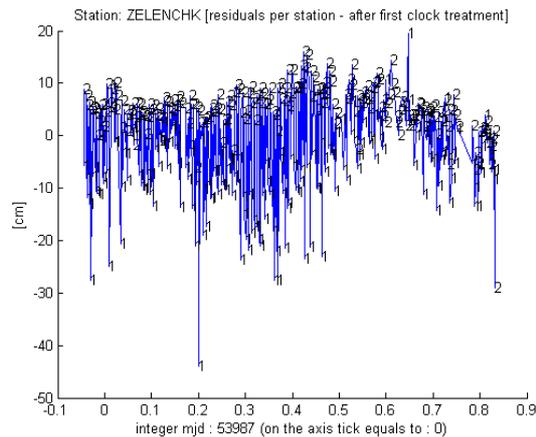


Abbildung 24: Ausreißer von Zelenchk zu Badary und Svetloe

Die Möglichkeit diesem Problem zu begegnen ist es die Basislinie Badary - Svetloe von der Berechnung auszuschließen, das heißt, dass keine Beobachtung davon benutzt wird. Um nun die Basislinie zu entfernen, muss ein OPT-File angelegt werden (vgl. Kapitel 4.1.4 Clockbreaks). Da Zelenchk als einzige der drei Stationen in jeder der beiden verbliebenen Basislinien vorhanden ist, fällt ihr die Funktion als Referenzuhr zu. Demnach lautet die Information im OPT File wie folgt:

```
CLOCK REFERENCE:
ZELENCHK
BASELINES TO BE EXCLUDED: 1
BADARY SVETLOE
```

Hier muss die korrekte Anzahl an Abständen zwischen den Stationen eingehalten werden. Badary besteht aus sechs Buchstaben, daher werden noch zwei Leerzeichen eingefügt um auf die erforderlichen acht Zeichen zu kommen. Weiters müssen sich zwei Leerzeichen zwischen den beiden Stationsnamen befinden, damit das OPT-File von VieVS benutzt werden kann.

Kommt das OPT-File beim zweiten Durchlauf zur Anwendung, werden die Beobachtungen der Basislinie Badary Svetloe für die Berechnung nicht benutzt und das Ergebnis des Residuenplots sieht weit besser aus.

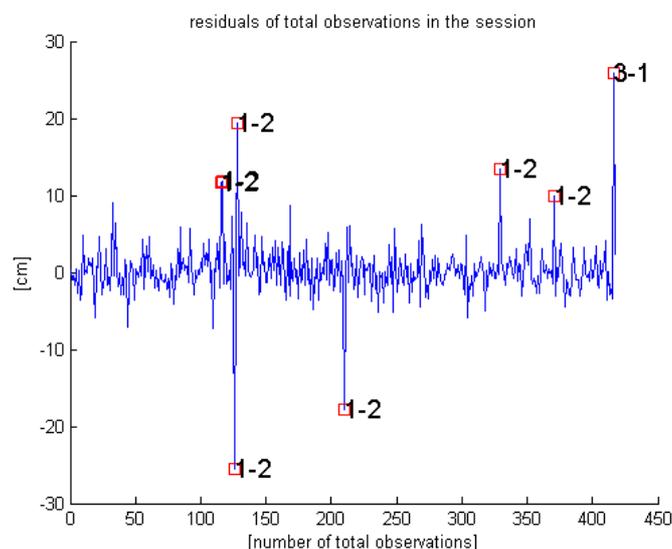


Abbildung 25: Residuenplot mit ausgeschlossener Basislinie

Die großen Ausreißer im negativen Bereich sind verschwunden (Abbildung 25) und das  $\chi^2$  beträgt nun 1,8429. Die Korrektur ist somit gelungen. Zwar hat die Session immer noch ein paar kleinere Ausreißer im cm Bereich, nur fallen diese bei einer Menge von 450 Beobachtungen kaum ins Gewicht, sodass eine Entfernung keine nennenswerte Verbesserung mit sich bringen würde. Zieht man hierfür als Vergleich die Session vom 23. Januar 2009, bei der der Clockbreak entfernt wurde, heran, so hat es durchaus Sinn gemacht dort die Ausreißer in derselben Größenordnung von bis zu 35 cm herauszunehmen, da sich das  $\chi^2$  über 2,6 befunden hat.

### **Sonstige Möglichkeiten der Problembehebung**

Neben den in Kapitel 4.1.4 besprochenen Lösungsmethoden zur Verbesserung schlechter Sessions gibt es noch andere, die bei Problemen in Betracht gezogen werden können. Natürlich gilt es vorher herauszufinden, um welches es sich dabei handelt. Gibt es bei einer Station ein messtechnisches Problem und sie hat infolge daraus als einzige der Session sehr große Residuen, empfiehlt es sich jene aus dem gesamten Beobachtungszeitraum herauszunehmen. Im Falle des russischen Netzes würde nur noch eine Basislinie übrig bleiben, was bedeutet, dass man nicht alle Parameter bestimmen kann. Der in das OPT-File einzufügende Text zur Entfernung einer Station (z.B.: Badary) würde demnach lauten:

```
STATIONS TO BE EXCLUDED:1  
BADARY
```

Ein weiteres Problem für ein schlechtes Ergebnis bei einer Session könnten schlechte Quellen sein. In dem Bezug stehen oft zu wenige Beobachtungen für eine Quelle, oder schlechte Koordinaten für diese. Um beispielsweise bei der russischen Session vom 3. Dezember 2010 die Quellen 2209+236 und 1334-127 zu entfernen, müsste die Zeile im OPT File wie folgt aussehen:

```
SOURCES TO BE EXCLUDED:2  
1334-127  
2209+236
```

Im Zuge dieser Arbeit kamen nur die Methoden zur Entfernung von Ausreißern, Clockbreaks und Basislinien zur Verbesserung zur Anwendung. Im Falle eines leeren Residuenplots oder einer Session mit seltsamen Verhalten in der Grafik (vgl. Abbildung 26, Seite 42) und großem  $\chi^2$  galt es zu prüfen, ob die richtige Parametrisierung angewendet worden war. Wie in Kapitel 4.1.2 bereits erklärt wurde, kann man mit einer Parametrisierung für Standard Sessions bei den Intensives zu keinem vernünftigen Ergebnis kommen. Ein erster Hinweis, dass es sich bei einer Parametrisierung für Standard Sessions um eine Intensive Session handelt, ist, dass sich nur eine Basislinie in der Berechnung befindet, bzw., dass man nur eine kleine Anzahl von Beobachtungen hat. In dem Fall sollte die Parametrisierung für Intensives (vgl. Kapitel 4.1.2) zu einem Ergebnis führen.

Allerdings kann auch der Fall eintreten, dass eine Session komplett unbrauchbar ist, und von der Auswertung ausgeschlossen werden muss.

### **4.1.5 Ausgeschlossene Sessions**

Auffällige Ergebnisse, solche mit seltsamen Verhalten im Residuenplot, kommen bei VLBI-Beobachtungen immer wieder vor. So auch bei den russischen Daten. Im Durchschnitt lassen sich manche Probleme dabei auf Clockbreaks, schlechte Basislinien oder Quellen zurückführen, doch hauptsächlich liegt der Grund dafür ganz wo anders. Großteils können messtechnische Probleme die Ursache sein. Sogar leichte Erdbeben auf einem ganz

anderen Kontinent sind dazu in der Lage das Misslingen einer VLBI-Messung zu begünstigen

Bei den russischen Daten gab es Sessions, die zu viele Ausreißer aufwiesen, und zwar auch auf den Residuenplots der einzelnen Stationen. Eine Säuberung mit dem Ausreißertest und anschließender Entfernung brachte bei solchen Problemen keine sonderliche Verbesserung im  $\chi^2$ , noch befanden sich die restlichen Residuen in einem Bereich unter 5 cm. Grundsätzlich ist dazu zu sagen, dass solch ein Datensatz die Standardabweichung der Basislinien über die Zeit negativ beeinflussen kann. Daher wurden solche Sessions nach der Erstauswertung für die weiteren Berechnungen nicht verwendet.

Als besonders bemerkenswertes Beispiel für eine nicht benutzte Session sei der 5. April 2009 hervorgehoben. Die Messung fand auf der Basislinie Zelenchk - Badary statt. Mit der Standardparametrisierung lieferte der Residuenplot einerseits Residuen unter 3 cm, doch ein  $\chi^2$  in der Höhe von  $\approx 25$ ! Da es sich hier nur um eine Basislinie gehandelt hat, wurde die Parametrisierung für eine Intensive Session vorgeschlagen, trotz einer Beobachtungsdichte von fast 300 Beobachtungen. Auf Abbildung 26 ist dazu das Ergebnis abgebildet.

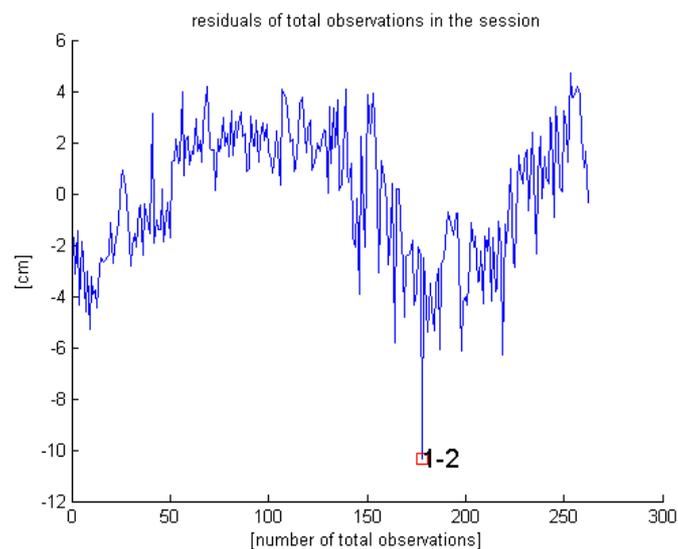


Abbildung 26: Sinusförmiger Residuenplot

Zwar ist das  $\chi^2$  auf  $\approx 1,8$  gesunken, aber das seltsame Verhalten der Residuen macht die Session unbrauchbar. Die sinusförmige Grafik lässt auf ein unlösbares Problem schließen, das einer bisher unbekanntem Ursache zu Grunde liegt.

Weiters kam es auch zu einem unlösbaren Problem bei der Session vom 14. Juni 2009, wo ein Phänomen auftrat, das man als "seltsamen Ausreißer" bezeichnen könnte. Grundsätzlich lagen alle im negativen Bereich, mit einer Größenordnung von -40 cm, wurden von VieVS mit dem Ausreißertest nicht als solche erkannt. Die war erst durch die Verkleinerung des Koeffizienten (Formel 13, S. 29) möglich, doch führte das Entfernen zu keinem Erfolg in der Verbesserung der Session. Das  $\chi^2$  betrug noch danach 194,4179

Neben den genannten Beispielen mussten insgesamt 32 Sessions von der weiteren Auswertung ausgeschlossen werden. Dazu kamen in späterer Folge noch Sessions hinzu, die einen ungünstigen Einfluss auf die Standardabweichung der Basislinien (vgl. Kapitel 4.2.2) ausübten, obwohl deren Residuenplots und auch deren  $\chi^2$  in einem guten Rahmen lagen.

### 4.1.6 Fazit der Aufbesserung

Nach Anwendung der in Kapitel 4.1.4. besprochenen Verbesserungsmaßnahmen war es möglich die Anzahl an Sessions, die für die weitere Auswertung in Frage kamen, dramatisch zu erhöhen. Tabelle 6 zeigt dazu das Resultat der Verbesserung in Zahlen.

Jahr	Sum Files	Ausgeschl. Sessions		Benutzte Sessions		[%]*
		Ausgeschl.	INT/STD	Benutzt	INT/STD	
2006	14	-	-	14	5/9	100
2007	25	4	1/3	21	12/9	88
2008	37	13	5/8	24	2/22	68
2009	52	12	3/9	42	20/22	79
2010	73	4	4/0	69	49/20	95
2011	22	2	1/1	20	13/7	91
Summe	223	35	14/19	190	101/89	

Tabelle 6: Anzahl ausgeschlossene und benutzte Sessions - nach Verbesserung

Vergleicht man Tabelle 6 mit Tabelle 5 in Kapitel 4.1.3 (Erstbeurteilung) wird der Anstieg an zu benutzenden Sessions ersichtlich. Das bedeutet, dass nun 85 Prozent der russischen Beobachtungen für die in dieser Arbeit anstehenden Berechnungen eingeflossen sind. Das sind 89 Standard- und 101 Intensive Sessions. Im Großen und Ganzen kann man von einer deutlichen Verbesserung seit der Erstauswertung sprechen. Ebenso hat sich das Summenhistogramm für das  $\chi^2$  verbessert:

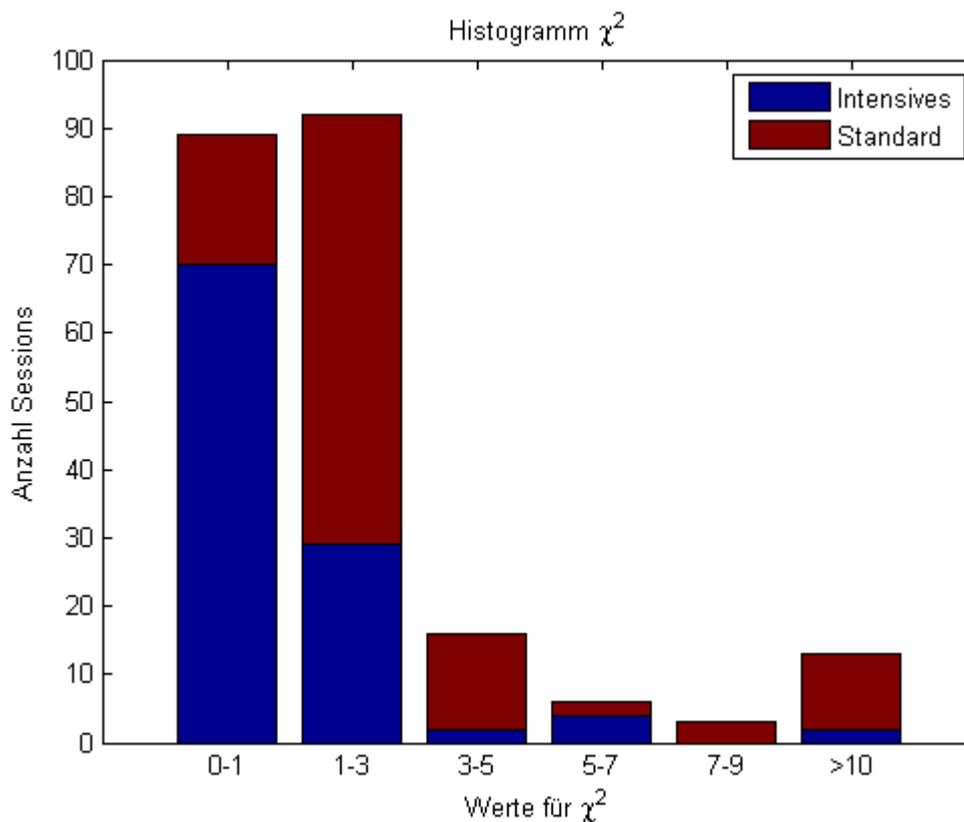


Abbildung 27: Histogramm  $\chi^2$  - Verbesserung

Da über einen Zeitabschnitt von etwa sechs Jahren die Datenmenge immer noch sehr gering ausfällt, sind durchgehende Plots bei der Polbewegung und dUT1 nicht möglich. Dazu muss gesagt werden, dass das russische VLBI-Programm (vgl. Kapitel 2.4) nicht für mehr Messkampagnen ausgelegt war. In weiterer Folge wurden Daten des International GNSS Service (IGS) für einen Vergleich der Ergebnisse herangezogen, um die Qualität der russischen Beobachtungen zu untersuchen (vgl. Kapitel 5).

An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass es trotz des russischen Programms (vgl. Kapitel 2.4) Sessions auf nur einer Basislinie gab, die über 24 Stunden durchgeführt wurden und nicht den Intensive Sessions zugefallen sind. In dem Zusammenhang gibt es über einen Beobachtungszeitraum von 24 Stunden ausreichend Messungen zur Bestimmung aller EOP.

## 4.2 Auswertung der Standard Sessions

Bei den Standard Sessions handelt es sich um jene Daten, aus denen man vollständige Sätze der Erdorientierungsparameter berechnen kann. Das sind grundsätzlich Messungen über einen Zeitraum von 24 Stunden mit mehreren hundert Beobachtungen. Nach der Aussegmentierung der brauchbaren NGS-Files aus dem russischen Datenbereich liegt die Zahl der zu verarbeitenden Daten bei 89 Stück.

Vor der eigentlichen Auswertung galt es in VieVS eine Prozessliste zu erstellen. Diese enthält die Namen der 89 NGS-Files, auf welche die Parametrisierung zur Bestimmung der EOP anzuwenden ist. Das zu tun beschleunigt nicht nur den Vorgang einer wiederholten Auswertung, sondern hilft auch bei der späteren Analyse und Auswertung der Daten, da hierbei oft die Prozessliste verwendet wird. Somit können die ermittelten Unbekannten für alle Sessions in einem Schritt exportiert werden.

Die Prozessliste der russischen Standard Sessions erhielt den Namen *quasar\_ru\_st.mat*.

### 4.2.1 Berechnung der EOP

Nachdem alle Standard Sessions, bis auf die beiden zuvor genannten Ausnahmen, mit der Defaultparametrisierung berechnet wurden, galt es einen Blick auf die Ergebnisse zu werfen. Zu dem Zeitpunkt gab es nur die durch den kleinsten Quadrate-Ausgleich ermittelten Parameter, die in Mat Files *x\_(Sessionname)* unter DATA/LEVEL3/ abgespeichert wurden. Um die endgültigen Lösung für die EOP zu erhalten, gilt es eine Summe aus a priori Werten mit hochfrequenten Anteilen und ermittelten Werten zu bilden. Das geschieht mittels eines Programms in Matlab, das auch die Resultate in ein Text-File schreibt. Nachfolgend sollen der Berechnungsvorgang und die Grundfunktionen des Programms beschrieben werden:

Zuerst werden die benötigten Parameter aus den jeweiligen Ordnern geholt. Dazu wird eine Verbindung zu den *x\_session\_name.mat*, *opt\_session\_name.mat* und *\_parameter* Files hergestellt. *x\_* und *opt\_* befinden sich im Level3 Datenordner. Aus den *x\_session\_name.mat* Files erhält man die ermittelten Werte für:

- MJD
- Polkoordinaten  $x_{pol}$ ,  $y_{pol}$
- Nutationsoffsetkoordinaten  $dX$ ,  $dY$
- Stationskoordinaten
- ZWD
- ...

Dazu werden noch die jeweiligen dazugehörigen Werte für die ermittelten Fehler geladen. *opt\_session\_name.mat* liefert die Abfrage (*opt\_nutdx.model*), ob die Werte für die Nutation berechnet wurden. In dem Fall wird das korrespondierende EOP-Model in die Analyse mit einbezogen. Für den Fall, dass die Nutation nicht mitbestimmt wurde, werden die [1x2] Arrays der Nutationsvariablen mit [0;0] definiert und das ermittelte MJD der Polkoordinaten genommen.

Es folgt eine Abfrage, ob Erdrotationsparameter und Nutation zu verschiedenen Zeitpunkten bestimmt wurden, was zur Folge hat, dass sie auf ein gemeinsames MJD linear interpoliert werden müssen. In diesem Fall auf den Zeitpunkt der ermittelten Erdrotationsparameter. Für die a priori Werte gilt das vom Benutzer gewählte Interpolationsmodell auf dem zweiten GUI. Im Fall des Defaultmodus geschieht dies für die EOP nach Lagrange, einer Polynominterpolation über einem Fenster aus 4 Datenpunkten. Davor benötigt man aber

noch ein von der Gezeitenvariation befreites  $dUT1$ , was man erreicht, indem die Korrekturen von den beobachteten Werten abgezogen werden (vgl. Defraigne, Smits, 1999). Nach erfolgter Interpolation werden die Zeitvariationen wieder angebracht.

### **EOP bei festgehaltenen Stationskoordinaten**

Neben der Schätzung von Zuschlägen zu den a priori Stationskoordinaten ist es auch interessant, die Entwicklung der restlichen geodätischen Parameter in Bezug zu festgehaltenen a priori Stationskoordinaten zu berechnen. Diese werden aus dem vom User gewählten Katalog entnommen und für die Auswertung fixiert. Um das zu erreichen, kommen keine NNT und NNR Konditionen zur Anwendung. Der Rest der vollständigen Lösung erfolgt wie gehabt.

### **4.2.2 Bestimmung der Basislinienlängen**

Die Basislinienlängen werden aus den Stationskoordinaten berechnet. Dabei handelt es sich grundsätzlich um eine einfache geometrische Aufgabe, bei der die Länge aus dem Vektor von Station A zu Station B ermittelt wird.

Aus *x\_session\_name.mat* erhält man die ermittelten Korrekturen zu den a priori Stationskoordinaten in Zentimeter, die Namen der Antennen und das zugehörige MJD.

Das *atpa\_session\_name.mat* File befindet sich im DATA/LEVEL3 Ordner und enthält die Koeffizienten des Normalgleichungssystems in einer Matrix. Ihre Größe hängt von der Anzahl der Parameter ab.

Zuerst werden die a priori Koordinaten zu den jeweiligen Beobachtungszeiten berechnet. Die ermittelten Korrekturen dazu werden durch 100 dividiert, also von Zentimeter auf Meter gebracht. Durch Addition mit den a priori Werten erhält man die korrigierten Stationskoordinaten. Daraus werden Differenzvektoren gebildet und deren Norm berechnet. Das heißt, dass man die X, Y und Z Koordinaten quadriert, aufsummiert und daraus die Wurzel zieht. Das daraus folgende Resultat sind die Basislinienlängen in Meter.

### **Basislinienwiederholbarkeit**

Beobachtet man die Basislinienlängen über einen größeren Zeitraum, kann man deren Veränderungen gegenüber den Ursprungsmessungen mitverfolgen. Demzufolge wird die Bewegung der Kontinentalplatten ersichtlich. Diese ist relativ klein und verläuft linear. Grundsätzlich sind diese Bewegungen kleiner als wenige Zentimeter pro Jahr. Durch die längere Zeitreihe der russischen Beobachtungen von 2006 bis 2011 hat man die Möglichkeit die Plattenverschiebungen deutlich zu veranschaulichen.

Zuerst wird von der Summe aller Beobachtungen jeder Basislinie, über den besagten Zeitraum, die Standardabweichung gerechnet. Die durchschnittliche Basislinienlänge erhält man in dem man den Trend abzieht. Anschließend werden die dazugehörigen Standardabweichungen auf einem Plot dargestellt. Je größer die Distanz, umso höher die Standardabweichung. Auf einem Plot mit vielen Basislinien würde man durch eine exponentielle Interpolation einen kurvenförmigen Anstieg in Richtung der positiven X-Achse erhalten. Da bei den russischen Sessions nur die Ergebnisse dreier Stationen verfügbar sind, wird auf dem Plot dieses Verhalten nicht ersichtlich.

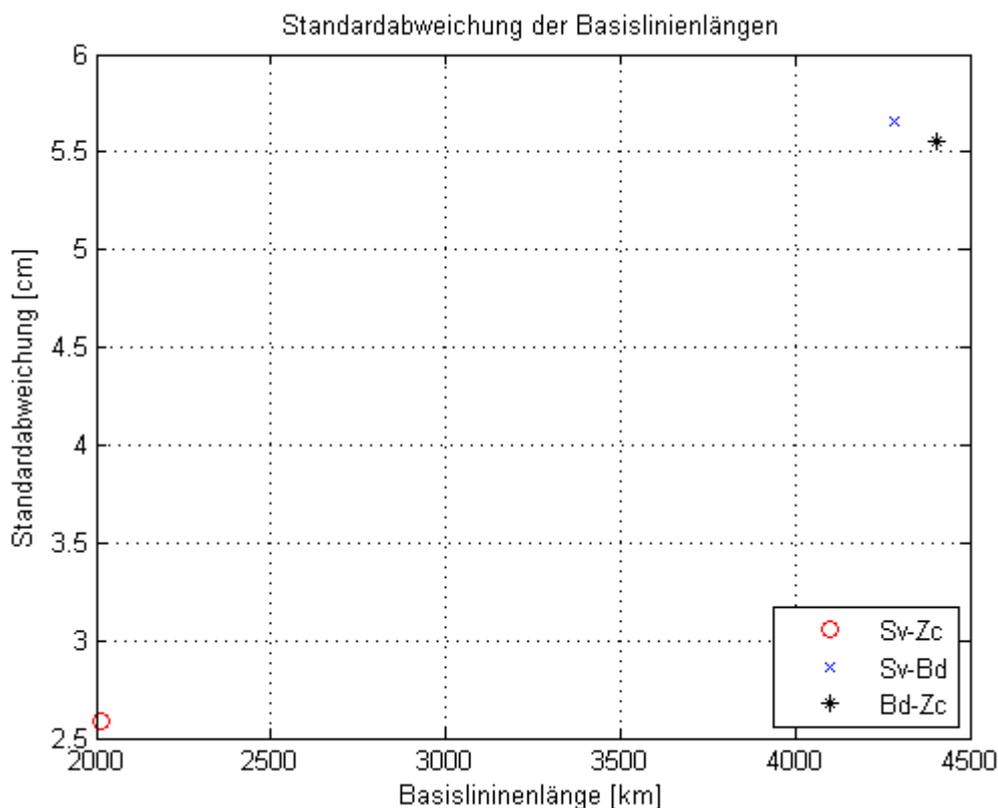


Abbildung 28: Basislinienwiederholbarkeit Erstaussgabe

Die Standardabweichungen liegen im Zentimeterbereich. Besonders auffällig sind die hohen Werte für die Linien Svetloe - Badary und Badary - Zelenchk. Es galt diese Beobachtungen näher zu untersuchen. Dazu werden alle Messungen einer Basislinie gegen die Zeit auf einem Plot dargestellt. Durch die Plattenbewegung und auch andere physischen Einflüsse sind die Ergebnisse gewissen Schwankungen unterworfen und werden in dem Bezug keinen exakten linearen Verlauf aufweisen, sich jedoch einem Trend annähern. Wenn eine Messung sehr weit von diesem abweicht, kann es sein, dass es sich dabei um eine Beobachtung schlechter Qualität handelt. Solche Sessions können im Zuge einer Nachauswertung vielleicht noch verbessert oder ausgeschlossen werden.

### Verbesserung der Standardabweichung

Auf Abbildung 29 (S. 48) werden die einzelnen Messungen der Basislinie Badary - Svetloe zwischen dem 11. August 2006 und dem 11. März 2011 dargestellt. Zwecks der Veranschaulichung wurden die jeweiligen Ausreißer farblich hervorgehoben. Vor allem das Ergebnis vom 6. November 2008 ist besonders auffällig. Diese Basislinienmessung unterscheidet sich vom Trend um fast 4 dm und ist somit unbrauchbar. Die andere Beobachtung vom 5. September 2008 fällt nicht ganz so hoch aus, hat mit ihren 2 dm Abweichung jedoch bestimmt Einfluss auf das Ergebnis.

Abbildung 30 zeigt die Messungen der Basislinie Badary - Zelenchk. Der in Abbildung 29 so auffällige 6. November liegt hier nicht ganz so entfernt vom Trend. Dagegen ist die Abweichung vom 5. September viel größer. Außerdem kommt noch ein dritter Ausreißer hinzu. Der grüne Kreis stellt eine Messung vom 18. März 2009 dar, die nur auf einer Basislinie erfolgt ist. Sie liegt fast 4 dm vom Trend entfernt.

Der Plot mit der größten Aussagekraft ist jener der Basislinie Svetloe - Zelenchk. Auf Abbildung 31 (S. 49) wird das große Ausmaß der Abweichung des 6. Novembers 2008 vom

Trend ersichtlich. Sie beträgt beinahe einen Meter! Im Vergleich dazu verschwindet der Ausreißer vom 5. September 08, der auf den vorherigen Plots doch deutlich als solcher hervorgegangen ist, förmlich zwischen den zahlreichen anderen Messergebnissen. Dass in Abbildung 31 die Streuung der Basislinie Svetloe - Zelenchk weit kleiner ist als auf den anderen beiden Plots legt den Schluss nahe, dass die Probleme größtenteils von Badary kommen. Dies wird auch bei der Wiederholbarkeit der Basislängen ersichtlich (vgl. Kapitel 5.1.3).

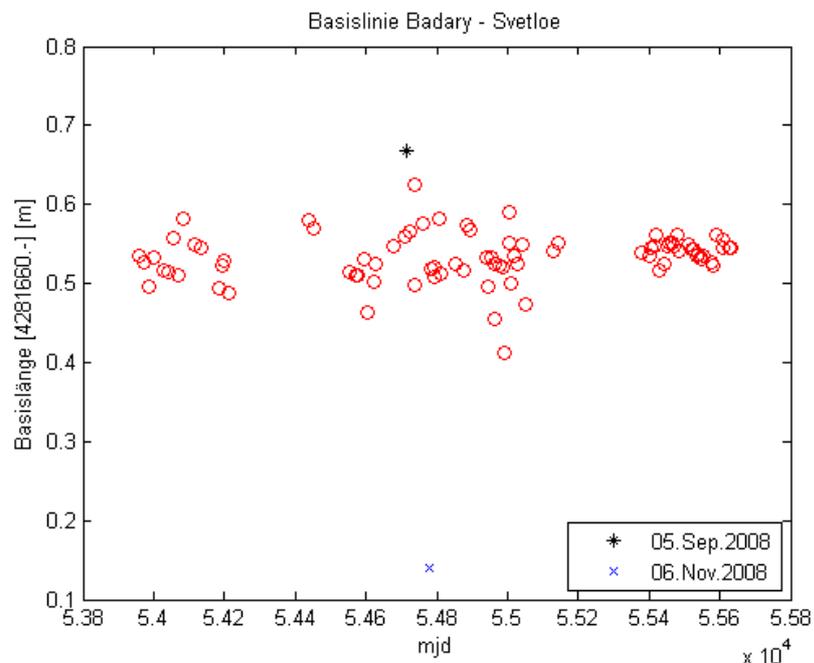


Abbildung 29: Basislinie Badary - Svetloe mit Ausreißer

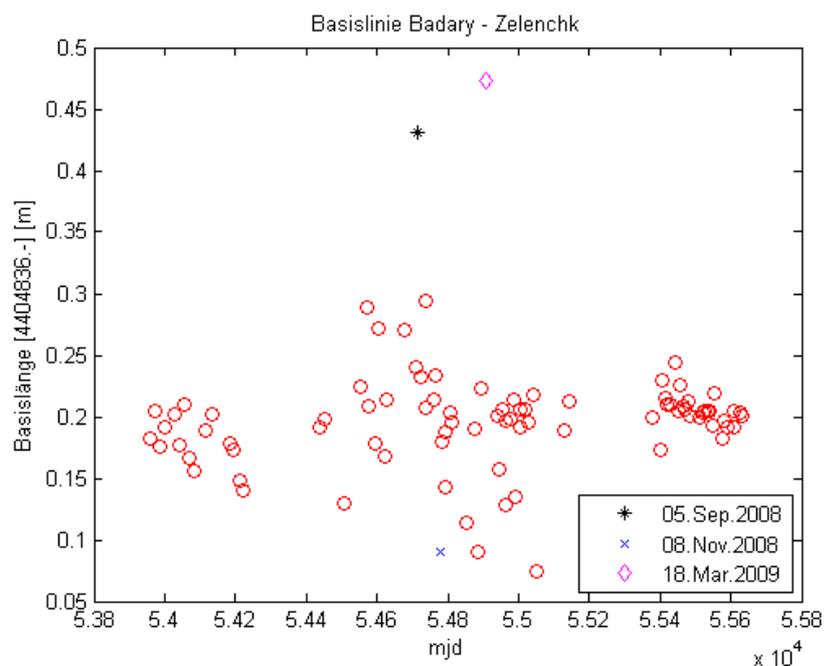


Abbildung 30: Basislinie Badary - Zelenchk mit Ausreißer

Nach der Ermittlung der problematischen Daten galt es die einzelnen Sessions noch einmal zu betrachten. Wie bereits in Kapitel 4.1.4 erwähnt wurde, macht es nicht immer Sinn alle Ausreißer einer VLBI-Beobachtung zu entfernen, da manche nicht ins Gewicht fallen. Darum

wurden sie bei etlichen Sessions nicht gelöscht, da eine Verbesserung nicht zu erwarten war. Aufgrund des Ergebnisses der Basislinienwiederholbarkeiten kann man behaupten, dass vielleicht genau diese Messungen Ausreißer haben, bei denen es sehr wohl Sinn gemacht hätte, diese zu entfernen.

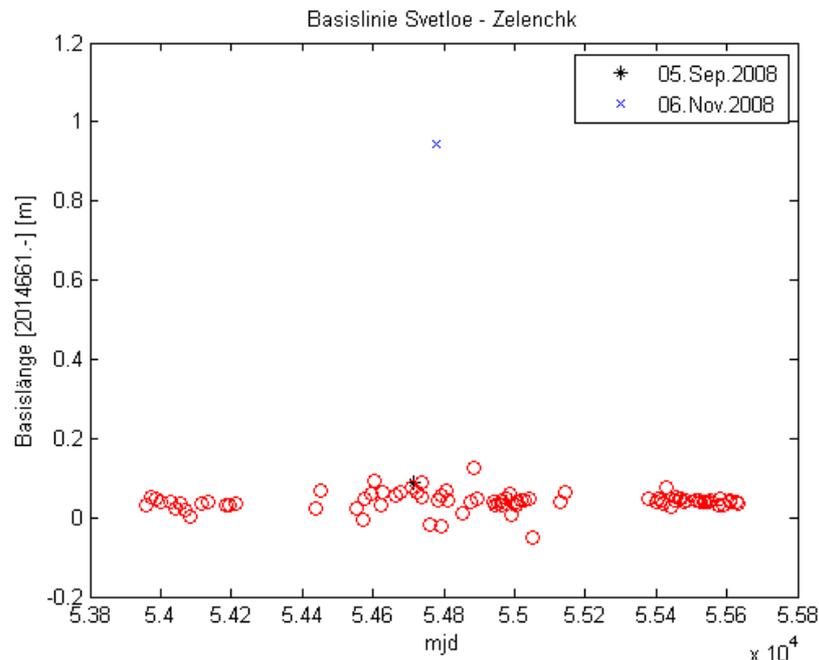


Abbildung 31: Basislinie Svetloe - Zelench mit Ausreißer

Im Zuge der Nachbetrachtung wurden erneut die Residuenplots der Problemsessions ausgegeben und untersucht. Abbildung 32 zeigt die Residuen des 6. Novembers 2008.

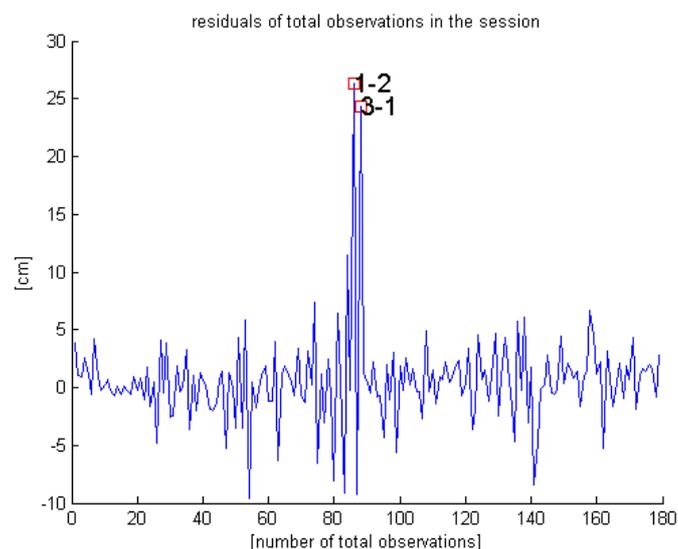


Abbildung 32: Residuenplot vom Problemdatum 6. November 2008

Auf der Grafik erkennt man zwei Ausreißer mit Werten von ungefähr 25 cm. Das  $\chi^2$  beträgt 3,1265. 180 Beobachtungen sind eine geringe Anzahl, trotzdem liegen die Residuen in jenem Bereich, wie es bei den restlichen russischen Sessions zu erwarten war. Auch ein Entfernen der Ausreißer trug zu keiner nennenswerten Verbesserung bei. Die Basislinien dieses Datums haben sich nur im Millimeterbereich geändert; das ist im Vergleich zu den vorherigen Werten kaum erwähnenswert.

Dasselbe Problem ergab sich bei den anderen beiden Beobachtungen. Dabei handelte es sich beim 5. September 2008 und beim 18. März 2009 bereits um verbesserte Sessions. Die Residuenplots dazu weisen keine besondere Abnormalität auf und das  $\chi^2$  befindet sich bei beiden unter dem Wert 3. Warum sie einen derartigen Einfluss auf die Schwankung der Stationskoordinaten hatten, ist genauso unklar. Die einzige Möglichkeit, hierfür eine Lösung zu finden, war, alle drei Sessions komplett auszuschließen. Der Einfluss, den sie auf die Standardabweichung hatten, wird erst ersichtlich, wenn man das Ergebnis sieht. Die Basislinien Badary - Svetloe und Badary - Zelenchk sind beide von über 5,5 cm auf 3,5 cm gefallen. Der endgültige Plot ist in Kapitel 5 abgebildet.

### Veränderlichkeit der Basislinien

Von großem Interesse ist vor allem der Betrag, um den sich die Basislinien seit Beginn der russischen VLBI Beobachtungen verändert haben. Auch wenn die Plattenbewegung linear verläuft, ist sie nicht exakt vorherzusehen, da sie den natürlichen Einflüssen der Erde unterliegen. Demzufolge stehen die Messwerte auch in keinem funktionalen Zusammenhang. Diesen kann man mittels linearer Regression herstellen. In dem Fall wird ein theoretisches Modell aus empirischen Daten (= beobachteten Basislinien) erzeugt (vgl. Niemeier, 2001).

Auf Abbildung 30 (S. 48) sieht man alle Messwerte der Basislinie Svetloe - Zelenchk gegen die Zeit. Es wird nun eine Gerade gesucht, bei der die Quadrate der vertikale Abstände ein Minimum ergeben. Zur Bestimmung des Betrags, um den sich die Basislinie seit Beginn der Messungen verändert hat, setzt man das erste Datum in MJD als den X-Wert in die Geradengleichung ein und erhält einen Y-Wert. Dasselbe geschieht für das Datum der letzten Beobachtung. Die Differenz aus den Ergebnissen ist die Bewegung über den gesamten Zeitraum aller Messungen.

### 4.2.3 Stationsbewegung

Um die Bewegung der Stationen einzeln zu dokumentieren, werden dazu die absoluten Werte (a priori Koordinaten plus Korrektur) ausgelesen. Der Schritt erfolgt wie in 4.2.2 erklärt. Es fällt lediglich die Bestimmung der Basislinie weg. Da bereits bei der allgemeinen Betrachtung der einzelnen, ermittelten Basislinienwerte jene Sessions ausgeschlossen wurden, die große Ausreißer hinterließen, sollte es bei der folgenden Betrachtung keine allzu großen Abweichungen geben. Auf Abbildung 33 (S. 51) sind alle z-Werte der Station Zelenchk über den gesamten Zeitraum des russischen VLBI-Programms dargestellt. Dieser Plot wurde aus dem Grund gewählt, da man hier sehr gut den vertikalen Versatz der Station erkennen kann, der sich auf durchschnittlich +1,2 cm pro Jahr beläuft.

Die Regressionsgerade ist in Abbildung 33 bereits eingetragen. Sie zeigt den linearen Anstieg der z-Koordinate an. Nachdem ihre unbekanntes Koeffizienten  $k$  und  $d$  ermittelt wurden, setzt man letztes und erstes Datum für  $x$  in die Geraden Gleichung (14), subtrahiert die beiden Ergebnisse voneinander und dividiert dieses durch die Zeitspanne der Beobachtungsdauer in MJD. Um nun den Versatz pro Jahr zu erhalten, multipliziert man noch mit 365.

$$(14) \quad y = kx + d$$

Wurde diese Prozedur an den Koordinaten der drei Stationen durchgeführt, hat man die Geschwindigkeiten erhalten, um die sie sich pro Jahr verändern. Es besteht nun die Möglichkeit, diese Bewegung in Form von Vektoren (horizontal und vertikal) darzustellen. Das geschieht mit dem Programm GMT. Dafür muss aber noch der Vektor, um welchen die

Station von ihrer Ausgangsposition versetzt wurde, vom geozentrischen Koordinatensystem\*, in das lokale System REN transformiert werden. Das geschieht über eine Rotationsmatrix, die über Geographische Länge und Breite der jeweiligen Station aufgestellt wird. Nach ihrer Inversion wird sie anschließend mit dem Geschwindigkeitsvektor in mm/Jahr multipliziert. Als Ausgabe erhält man den radialen-, östlichen- und nördlichen Versatz im REN System. Das Ergebnis kann mit GMT visualisiert werden. In Kapitel 5 werden die Geschwindigkeiten mit jenen der russischen Kollegen (Finkelstein et al., 2011) verglichen und auch als Vektorgrafik dargestellt.

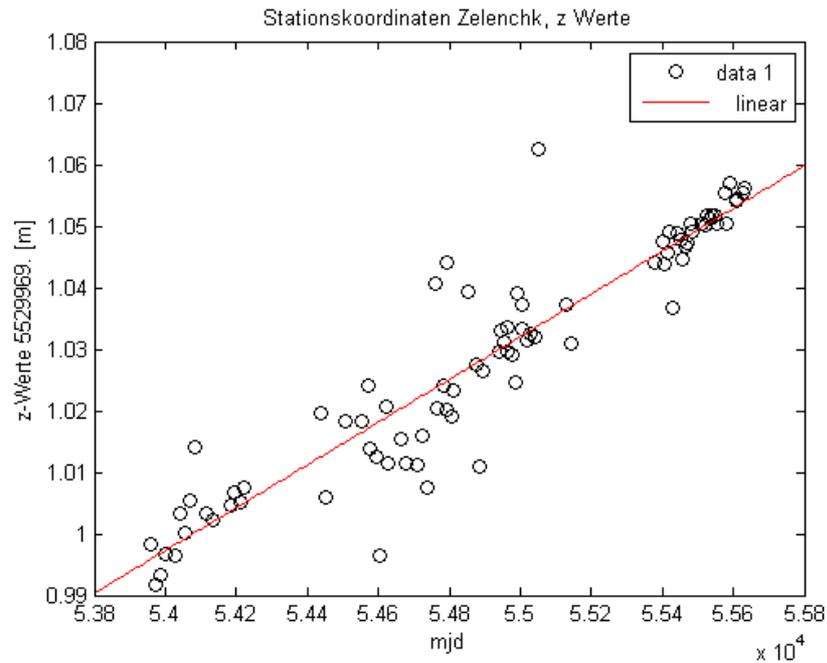


Abbildung 33: Plot aller z-Koordinaten für Zelenchik

\* Koordinatenursprung im Erdmittelpunkt

### 4.3 Auswertung der Intensive Sessions

Die Erdrotation ist unstetig. Nach der Entwicklung der Quarzuhren konnten bereits in den dreißiger Jahren saisonale Schwankungen beobachtet werden (Schödlbauer, 1999, s.S. 57). Schuld an der unregelmäßigen Erdrotation sind, z.B. Attraktion von Mond und Sonne, Rotation des turbulenten Erdkerns, als auch Prozesse auf der direkten Erdoberfläche wie Schnee, Wind und Meeresströmung. Diese Beträge fallen zwar einerseits sehr gering aus, doch über die Jahre akkumulieren sie sich zu weit größeren Werten.

UT1 ist jene Weltzeit, die der Schwankung der Erdrotation unterworfen ist. In diesem Fall ist sie unstetig. Man titulierte sie als den Greenwicher Stundenwinkel der mittleren Sonnenzeit<sup>\*</sup> +12 Stunden. Für den täglichen Gebrauch ist allerdings ein gleichförmiges Zeitmaß notwendig, nachdem der Alltag koordiniert werden kann. Dazu wurde 1972 die Koordinierte Weltzeit UTC eingeführt. Jene unterschreitet sich von UT1 um die Differenz dUT1. Da diese Differenz nicht mehr als 0,9 Sekunden betragen soll, muss UTC nach und nach, durch Einfügen von Schaltsekunden an UT1 angepasst werden (vgl. Torge, 2003, s.S. 22).

UTC - UT1 wird über VLBI Messungen bestimmt. Das sind kurzfristige Experimente von wenigen Stunden und werden Intensive Sessions genannt. Beim russischen Programm sind das alle RU-U Sessions, also Messungen, die auf einer Basislinie erfolgen und alle zwei Wochen ausgeführt werden (vgl. Kapitel 2.4).

Nach der Verbesserung der Datenmenge und Ausschluss unbrauchbarer Sessions (vgl. Kapitel 4.1.5) beläuft sich die Anzahl der auszuwertenden Files auf 101. Die Prozessliste der Intensive Sessions wurde *quasar\_ru\_int* genannt.

#### Berechnung von dUT1

Nach erfolgtem Programmdurchlauf ist es möglich, sofort einen Blick auf die ermittelten Werte von dUT1 zu machen. Bereits hier kann man Schwankungen deutlich erkennen. Dazu werden im DATA/LEVEL3 Ordner aus den *x\_session\_name.mat* Files die Werte zu den zugeordneten Variablen für MJD, dUT1 und der Standardabweichung geladen. Mit der `errorbar` Funktion von Matlab werden noch die Fehlerbalken - entsprechend der formalen Fehler - für jeden dUT1 Wert auf einem Plot ausgegeben (vgl. Kapitel 5, Abbildung 46).

Die absoluten Werte für dUT1 errechnen sich aus der Summe der a priori- und ermittelten Werte sowie der subtäglichen Korrekturen. Der Prozess ist derselbe wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben. Der einzige Unterschied liegt darin, dass man hier nur die Werte für dUT1 berechnet, da bei den Intensive Sessions keine Pol- und Nutationskoordinaten bestimmt werden können. In Kapitel 5 werden Plots mit den Ergebnissen für dUT1 aus den Intensive Sessions alleine, und dann im Gesamten mit jenen der Standard Sessions aufgeführt.

---

<sup>\*</sup> **Mittlere Sonnenzeit:** der Stundenwinkel jener fiktiven Sonne, die sich nicht auf der Ekliptik des 2. Äquatorsystems bewegt, sondern in den Äquator dieses Systems projiziert wird.

## 5. Ergebnisse

In diesem Kapitel werden nun die Ergebnisse der Berechnungen dieser Arbeit präsentiert. Da die Basislinien zur Ermittlung von EOP im Vergleich relativ kurz sind und nur die Messungen von drei Stationen bei der Auswertung zur Verfügung standen, wurde hier ein Vergleich zu den Daten vom IGS gemacht.

### 5.1 Ergebnisse der Standard-Files

#### 5.1.1 EOP

Sämtliche Werte der Erdorientierungsparameter wurden zwecks Veranschaulichung in einem Textdokument ausgegeben. Das hatte vor allem den Vorteil, dass man beim Auffinden von Ausreißern auf einer graphischen Darstellung schneller zu einem Ergebnis kam und sofort nach Besonderheiten suchen konnte.

Da die Liste der EOP sehr umfangreich ausfällt, wird nachfolgend auf Tabelle 7 nur ein Beispiel für die Angabe der exportierten Ergebnisse gezeigt. Dabei handelt es sich um die EOP für den 11. August 2006:

absolute EOP					
MJD	xpol	ypol	dut1	dX	dY
53958	103,635430	267,691511	179,409302	-0,708946	-0,550276
53959	102,886997	266,590764	178,369383	-0,702946	-0,527276
53960	102,142728	265,590705	177,267663	-0,691946	-0,489276
a priori EOP					
	107,115892	262,148775	179,492925	-0,113000	-0,223000
	106,367459	261,048028	178,453007	-0,107000	-0,200000
	105,623190	260,047968	177,351287	-0,096000	-0,162000
ermittelte EOP					
	-3,480462	5,542737	-0,083624	-0,595946	-0,327276
	-3,480462	5,542737	-0,083624	-0,595946	-0,327276
	-3,480462	5,542737	-0,083624	-0,595946	-0,327276
Fehler der ermittelten EOP					
	1,765551	3,451868	0,056276	0,276268	0,334242
	1,765551	3,451868	0,056275	0,276267	0,334242
	1,765551	3,451868	0,056275	0,276268	0,334242

Tabelle 7: EOP Output vom 11. August 2006 (xpol, ypol, dX, dY: mas, dut1: ms)

Es gibt drei Zeilen zu drei fortlaufenden ganzzahligen MJD, da als Intervall für die Bestimmung der EOP 24 Stunden gewählt wurde. In den Spalten stehen die Polkoordinaten xpol/ypol, die Abweichung dUT1 von der Koordinierten Weltzeit (UTC) sowie die Koordinaten der Nutation. Unter den absoluten EOP folgen die zugehörigen Werte für a priori-, sowie ermittelten EOP und schließlich die Fehler der ermittelten EOP. Alle Einheiten sind in Millibogensekunden. Nur die Werte für dUT1 stehen in Millisekunden, da es sich dabei um ein Zeitmaß und keinen Winkel handelt.

### Abweichung der russischen Polkoordinaten von IGS-Daten

Grundsätzlich ist die Genauigkeit der russischen Messungen von Interesse. Zum Vergleich werden die global ermittelten Daten vom IGS herangezogen. Dazu muss gesagt werden, dass die Präzision der IGS Daten nicht als absolut anzusehen ist. Abbildung 34 zeigt die Differenz zwischen den russischen Polkoordinaten mit denen vom IGS.

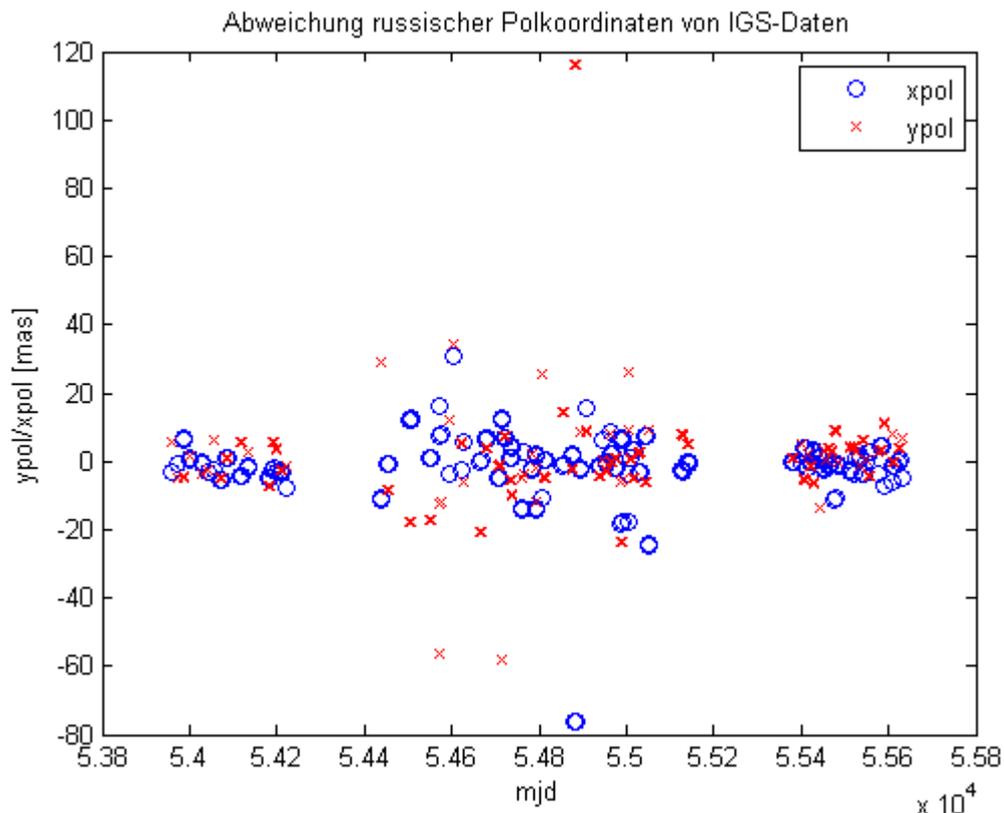


Abbildung 34: Abweichung russischer xpol und ypol Koordinaten von IGS Daten

Auf der X-Achse läuft das Modifizierte Julianische Datum von 53800 bis 55800. Tatsächlich beobachtet wurde von 53959 bis 55632 MJD.

Auf der Y-Achse werden die Abweichungen der russischen Polkoordinaten von denen der IGS-Daten dargestellt, also die Werte von IGS minus denen der russischen Sessions. Die blauen Kreise repräsentieren die Abweichungen der xpol-Koordinaten und die roten Kreuze die Abweichungen der ypol-Koordinaten. Je näher sich die Werte bei Null befinden, umso besser/geringer ist die Abweichung von den globalen Daten des IGS.

Bedenkt man, dass zur Berechnung der EOP nur drei Stationen benutzt wurden, und dass sich diese im selben Land befunden haben, so ist das Ergebnis ein durchaus wünschenswertes. Bei genauerer Betrachtung des Plots fallen besonders drei Bereiche mit Messungen auf: der erste Teil liegt zwischen 53959 und 54223 MJD. Der zweite zwischen 54438 und 55143 MJD; und der dritte zwischen 55379 und 55632 MJD. Weiters sind diese Bereiche durch zwei Zwischenräume ohne Beobachtungen getrennt. Diese befinden sich zwischen 54223 und 54438 MJD, sowie zwischen 55143 und 55379 MJD.

xpol und ypol des ersten Teils liegen dicht bei Null. Das Ergebnis ist somit gut und unterscheidet sich nur um einen kleinen Betrag von den Erdrotationsdaten des IGS. Der Zeitraum, zu dem diese Beobachtungen stattfanden, war zwischen dem 11. August 2006 und dem 1. Mai 2007.

Danach besteht eine Zeitspanne ohne Messungen bis zum 4. Dezember 2007, also ganze fünf Monate. In dem Bereich wurden sieben Beobachtungen gemacht, von denen sechs den Intensiv Sessions zugefallen sind. Nur eine war eine Standard Session (6. November 2007), die aber durch ihre schlechte Qualität aus der Auswertung ausgeschlossen wurde.

Zwischen dem 4. Dezember 2007 und dem 6. November 2009 fand jener Bereich der russischen Beobachtungen statt, der sich vom ersten entscheidend unterscheidet. Trotz einer höheren Anzahl an Messungen erfuhren diese auch die größte Abweichung von den IGS Daten.

Der zweite Teil wird vom dritten durch eine weitere Unterbrechung in den Beobachtungen getrennt. Zwischen dem 6. November 2009 und dem 2. Juli 2010 gab es 34 Sessions, von denen wieder 32 an die Intensives abfielen und nur zwei Standard Sessions, von denen eine komplett unbrauchbar war und die andere zu viele Ausreißer hatte.

Der dritte und letzte Teil der russischen VLBI-Beobachtungen begann am 2. Juli 2010 und endete mit dem Stopp des Datenflusses am 25. März 2011. Dieser Bereich befindet sich, ähnlich wie der erste, deutlich nahe an der Grenze Null. Auch weist er im Gegensatz zum ersten mehr Messungen auf. Demnach kann man von einer klaren Qualitätsverbesserung sprechen, wenn man diesen mit dem zweiten Bereich vergleicht.

Die Frage, welche sich hier stellt, ist, warum in früheren Jahren die Beobachtungen einerseits besser waren als in der Mitte, wo sie schlechter wurden, und dann wieder einen Aufstieg in der Qualität erfahren haben. Dieser Punkt ist ungeklärt.

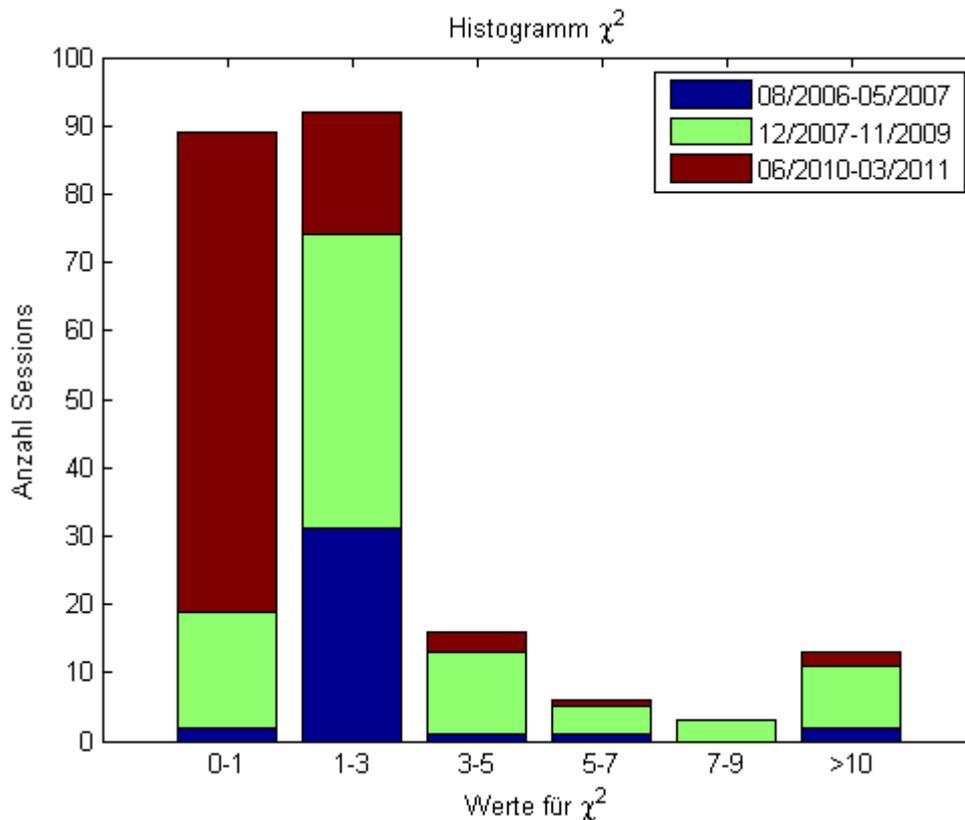
Besonders auffällig ist der 20. Februar 2009 (54883 MJD), der jeweils einen großen Ausreißer in xpol- und ypol-Richtung hat. In Kapitel 4.2.2 wurde bereits der Ausschluss von Sessions erwähnt, welche eine ungünstige Wirkung auf die Standardabweichung ausübten. Dieses Datum erwies sich im Zusammenhang mit der Basisliniengenauigkeit als eher unauffällig, was bei den Polkoordinaten nicht der Fall war. Weiters fällt der 14. April 2008 ins Auge, der bei 54570 MJD beim ypol eine starke Abweichung erfährt. Auch hier ist es nicht möglich zu sagen, warum die Beobachtung zu so einem großen Residuum neigt. Auch das Verhalten der Sessions vom 6. November und 5. September 2008 wurde untersucht. Die großen Abweichungen führten auch hier zum Ausschluss der Sessions.

Tabelle 8 zeigt die Standardabweichung jeweils für xpol- und ypol-Koordinaten für die einzelnen drei Bereiche in Bezug auf die IGS Daten.

von	bis	STD	
		xpol [mas]	ypol [mas]
11. Aug. 06	1. Mai. 07	3,5829	4,4809
4. Dez. 07	6. Nov. 09	14,2630	21,7635
2. Jul. 10	14. Jan. 11	3,2079	4,9980
Gesamt		11,0357	16,8301

Tabelle 8: Standardabweichung xpol, ypol in Bezug auf IGS Daten

Auf Abbildung 35 (S. 56) ist noch einmal das Summenhistogramm aus Kapitel 4.1.6 (Abbildung 27) angeführt. Dabei wurden auf den Balken die zuvor genannten drei Bereiche farblich dargestellt. Beachtet man vor allem den roten Anteil (ab Juli 2010) kann man sagen, dass sich die Qualität der russischen Beobachtungen allgemein verbessert hat.

Abbildung 35: Histogramm  $\chi^2$  unterteilt in drei Epochen

### 5.1.2 Polbewegung

Auf Abbildung 36 und Abbildung 37 ist das Ergebnis der Polbewegung für die russischen Sessions unter NNT/NNR Konditionen dargestellt. Abbildung 36 veranschaulicht die Trajektorie des Celestial Intermediate Pole, kurz CIP, im Raum mit der Zeit MJD als dritte Achse des Systems. Im Plot sind die einzelnen Messwerte der russischen Beobachtungen nach Datum, in verschiedenen Farben nach dem jeweiligen Jahr, chronologisch geordnet abgebildet. Abbildung 37 zeigt einen 2D-Plot von  $x_{pol}$  und  $y_{pol}$ , der ebenfalls die Chronologie der Ergebnisse in Farbe darstellt. Dadurch wird eine bessere Übersicht gewährt.

Da das russische Programm in Bezug auf die spärliche Messdichte nur ein paar Sessions pro Monat aufweist und auch ein kleiner Anteil entfernt werden musste, war es nicht möglich eine durchgehende Linie für die Polbewegung zu erstellen, ohne dabei die Punkte mit Geraden verbinden zu müssen. Stattdessen wurde die Polbewegung nach den IGS-Daten eingespielt um zu sehen, wie gut sich die russischen Messungen anschmiegen.

Im direkten Vergleich bildet die durchgehende, blaue IGS-Spirale der Polbewegung das Fundament, an das sich die Ergebnisse der russischen Sessions anschmiegen. So wie bereits in Kapitel 5.1.1 erklärt worden ist, erkennt man auch auf diesem Plot eine weit bessere Übereinstimmung gegen Anfang und Ende des landesinternen russischen VLBI-Programms. Dabei fallen jetzt auch die paar Ausreißer auf, die bei Abbildung 34 (S. 54) so deutlich hervorgestochen sind. Der 20. Februar 2009 ist das abstehende, schwarze Kreuz auf der linken Seite der Spirale, jeweils in Abbildung 36 und Abbildung 37 (S. 57).

Interessant ist auch folgende Beobachtung. Die beste Übereinstimmung der russischen Ergebnisse mit den IGS-Daten findet jeweils dann statt, wenn der Öffnungswinkel des

Polhodiekegels am kleinsten ist, also in den Jahren 2006 bis 2007 und seit Anfang 2010 bis zum Stopp des Datenflusses im März 2011.

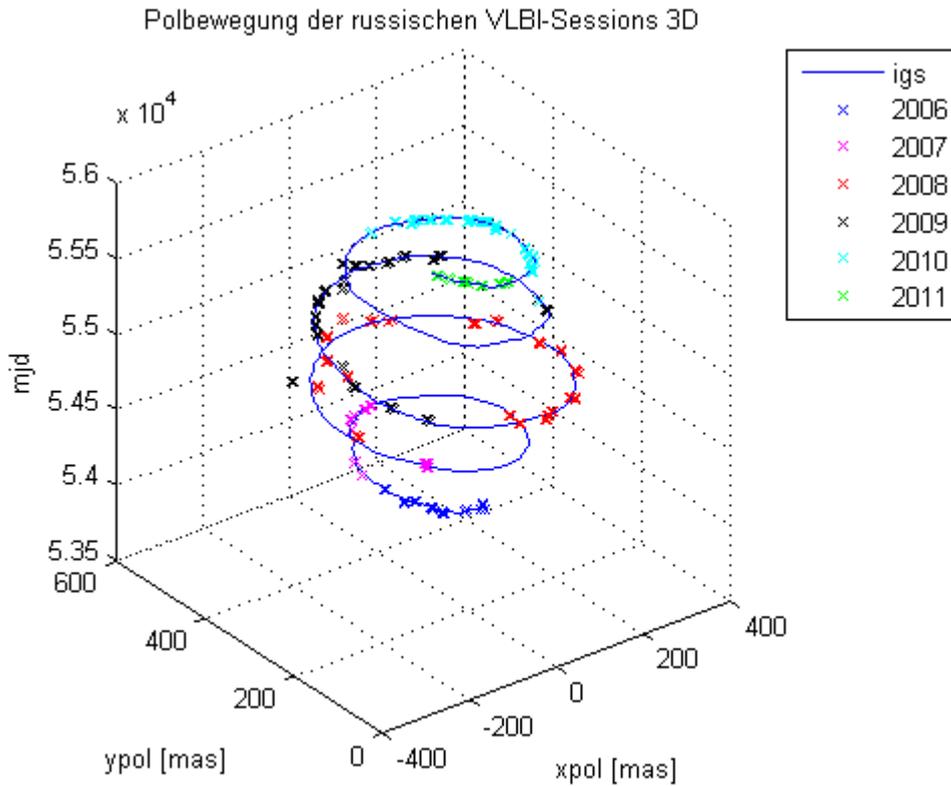


Abbildung 36: Polbewegung der russischen VLBI-Sessions 3D

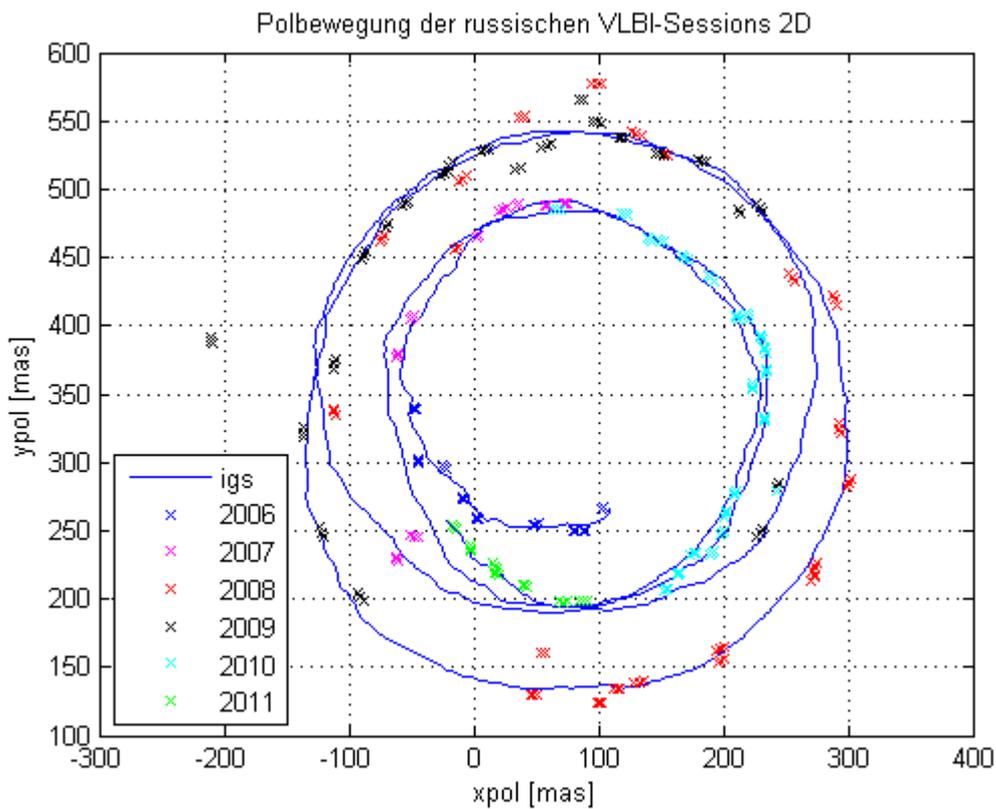


Abbildung 37: Polbewegung der russischen VLBI-Sessions 2D

Zu dem Zeitpunkt muss erwähnt werden, dass jene Problemdaten, die zur Verbesserung der Standardabweichung der Basislinienwiederholbarkeit entfernt wurden, sehr wohl zuerst in die Plots für die Polbewegung miteinbezogen wurden, um deren Genauigkeit in diesem Zusammenhang zu untersuchen. Das Problem dabei war lediglich, dass die Werte so weit von den IGS-Daten entfernt gelegen hatten, dass die Spirale förmlich im Zentrum der Abbildung verkleinert wurde, und man das Verhalten der russischen Sessions im Vergleich zu den IGS-Daten nicht mehr feststellen konnte. Das war nur möglich, nachdem die Zoomfunktion der Plotfenster benutzt wurde. Aus dem Grund wurden für die Abbildungen der Polbewegung diese Sessions bereits nicht mehr miteinbezogen. Deren schlechter Einfluss auf das Ergebnis wurde in dem Zusammenhang bereits ausreichend erläutert.

### 5.1.3 Basislinien

In Kapitel 4.2.2 wurden zur Verbesserung der Standardabweichung der Basislinienwiederholbarkeit drei Sessions aus der Berechnung herausgenommen, die das Ergebnis gravierend beeinflusst hatten (vgl. Abbildung 28, S. 47). Auf Abbildung 38, dem Resultat dieses Ausschlusses, wird der Unterschied nun offensichtlich.

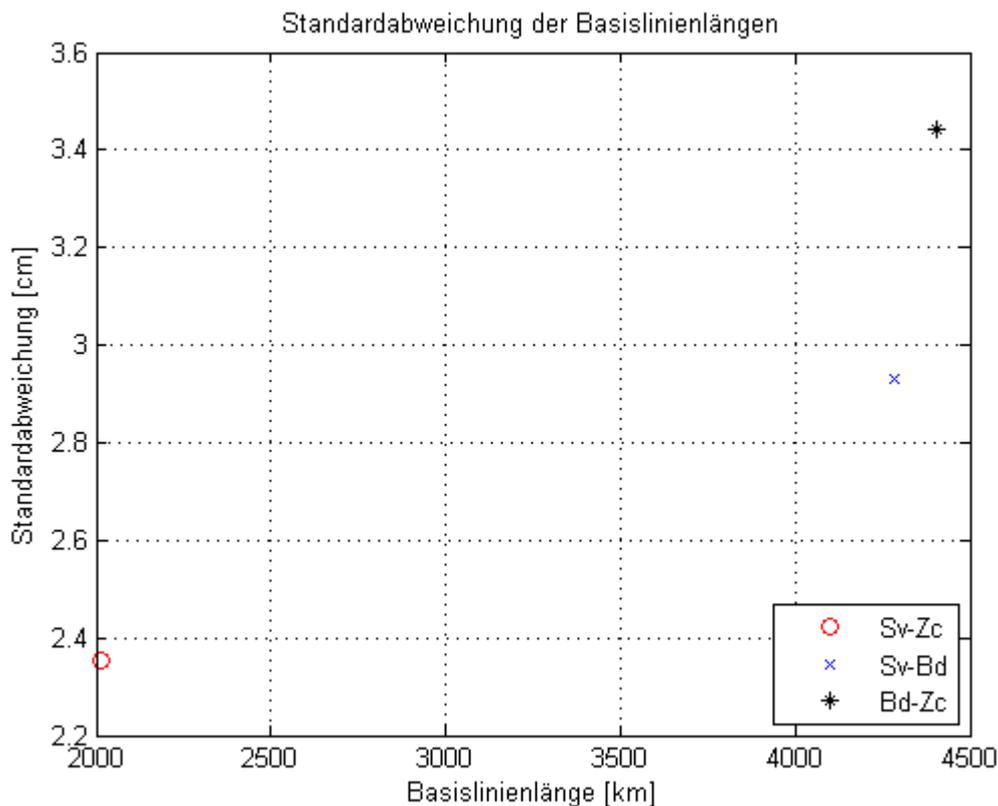


Abbildung 38: Basislinienwiederholbarkeit Endausgabe

Zur Erinnerung: die Standardabweichungen der Basislinien Svetloe - Badary und Badary - Zelenchk lagen beide knapp über 5,5 cm. Svetloe - Zelenchk befand sich in der Nähe von +2,5 cm. Während letztere nur um einen kleinen Betrag verbessert wurde, ist Bd-Zc unter 3,6 cm gefallen und Sv-Bd sogar unter 3 cm! Wirft man einen Blick auf die einzelnen Plots der Basislinien (Abbildung 39, 40 und 41), würde es noch ein paar Ausreißer geben, die man entfernen könnte.

Zum Ausschluss weiterer Ausreißer gilt es zu sagen, dass deren Beträge im Vergleich zu den Werten der ausgeschlossenen Sessions in Kapitel 4.2.2 in der Abweichung bereits so klein sind, dass die Standardabweichungen nur noch geringfügig verbessert werden können. Außerdem war das Hauptziel dieser Arbeit nicht das bestmögliche Resultat zu erzielen, sondern auch eine Überprüfung der Qualität der russischen Sessions zu liefern. Überdies würde ein weiteres Ausdünnen der Daten die Objektivität der zuvor getroffenen Aussagen gefährden.

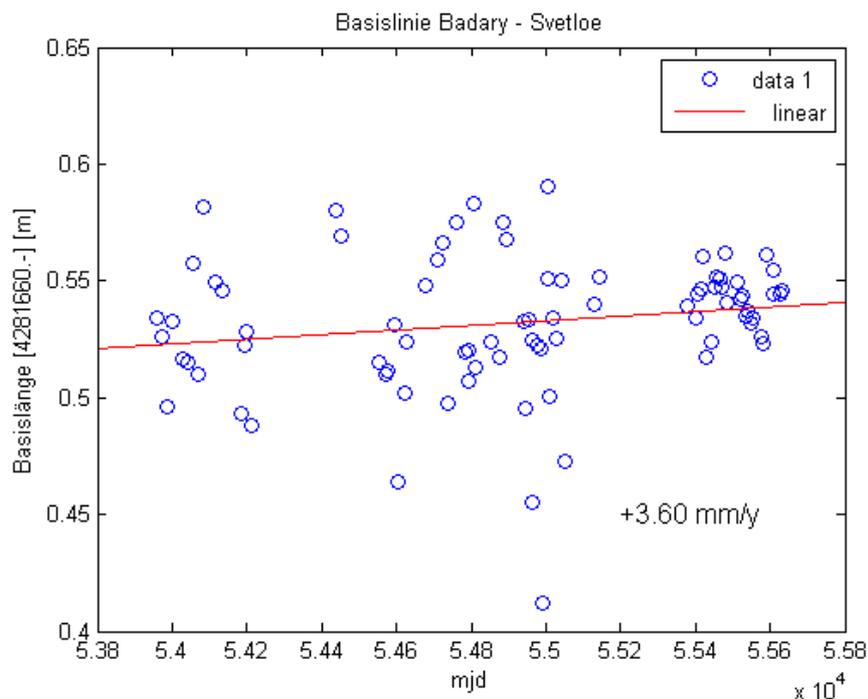


Abbildung 39: Basislinie Badary - Svetloe mit linearer Regression

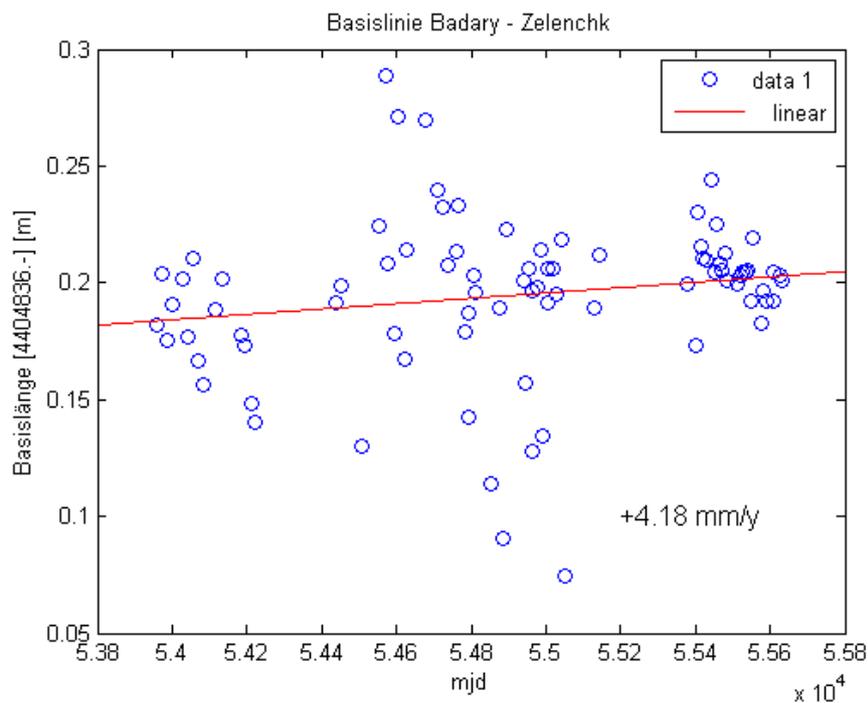


Abbildung 40: Basislinie Badary - Zelenchk mit linearer Regression

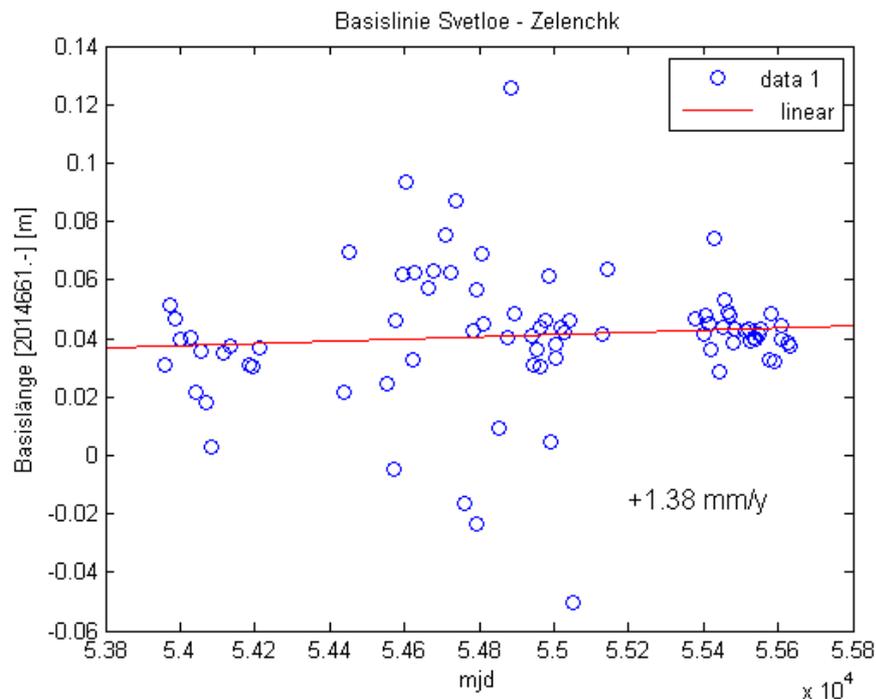


Abbildung 41: Basislinie Svetloe - Zelenchk mit linearer Regression

Auf Abbildung 39, 40 und 41 sind außerdem noch die Ergebnisse der jährlichen Geschwindigkeiten, zusätzlich zu VTRF 2008 (Böckmann et al., 2010), abzulesen. Demnach hat die kleinste Veränderung zwischen der Bobachtung Svetloe - Zelenchk stattgefunden. Dies war auch die kleinste Basislinie von ungefähr 2.000 km. Bei Badary - Zelenchk und Badary - Svetloe ist die Basislinie jeweils über 4.000 km lang und dementsprechend auch die Veränderung größer, durchschnittlich um den Faktor 2.8.

#### 5.1.4 Stationsgeschwindigkeiten

Betrachtet man separat zur Basislinienwiederholbarkeit die Bewegung der Stationen, wird die Analogie des Verhaltens der Basislinienlängen durchaus klar. Wie in Kapitel 4.2.3 beschrieben, wurden die Geschwindigkeiten des Verschiebungsvektors vom geozentrischen ITRF ins lokale REN-System umgerechnet, das positiv nach Norden und Osten weist. Der vertikale Versatz wurde dabei ebenfalls berücksichtigt. Abbildung 42 (S. 61) zeigt die Verschiebungsvektoren der drei Stationen auf einer Karte auf der Europa und Russland abgebildet sind. Die Orientierung der Pfeile weist jeweils in die Richtung der Bewegung der Eurasischen Platte. Die rot und gelb gefärbten Punkte sind den korrespondierenden Werten auf dem Farbbalken rechts zuzuweisen. Diese stellt die vertikale Geschwindigkeit der Stationen in mm/Jahr dar. Zelenchk hat demnach als roter Punkt die größte Änderung in der Höhe in positiver Richtung.

Während Svetloe und Zelenchk (beide links) in der Breite relativ dicht beieinander liegen, ist die Änderung der Basislinie von nur 1,38 mm/Jahr durchaus akzeptabel. Vergleicht man aber die Basislinien der beiden Stationen, die sie jeweils mit Badary im Osten bilden, sind die Änderungen mit 3,6 mm/Jahr (Bd-Sv) und 4,18 mm/Jahr (Bd-Zc) doch bemerkenswert.

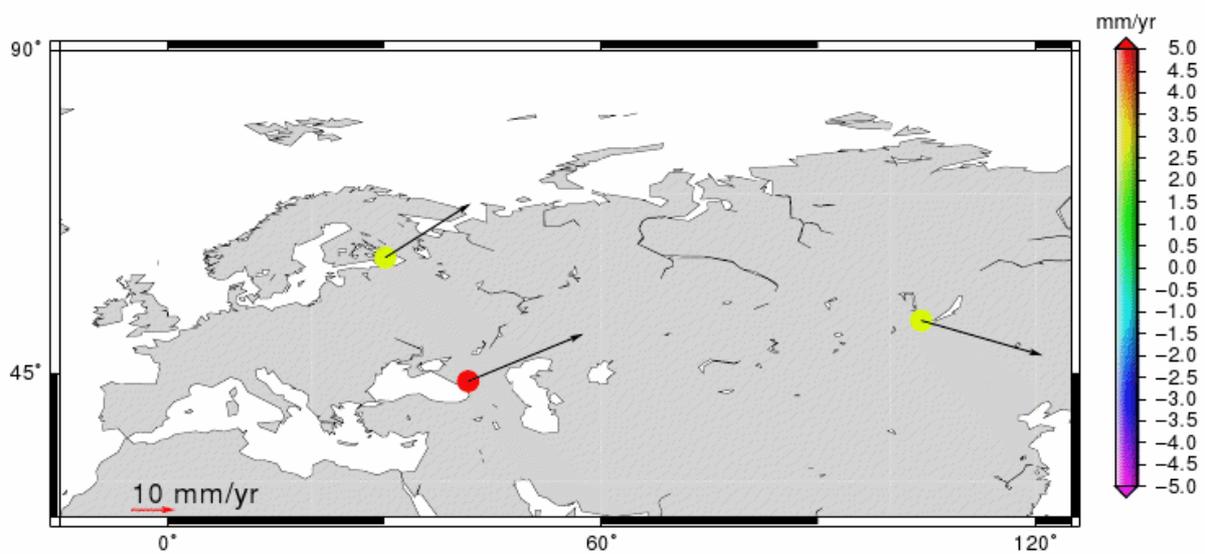


Abbildung 42: Stationsgeschwindigkeiten

Tabelle 9 zeigt die einzelnen Geschwindigkeiten der Stationskoordinaten in mm pro Jahr im geozentrischen ITRF, verglichen mit den Werten der russischen Kollegen (Finkelstein et al., 2011). Dazu kann man im Großen und Ganzen dazu sagen, dass sich die Ergebnisse gut decken. Der minimale Unterschied ist bestimmt darauf zurückzuführen, dass bei der Auswertung unterschiedliche Maßnahmen in der Berechnung und der Parametrisierung zur Anwendung kamen. Ebenso ist die Frage offen, welche Schritte die russischen Kollegen bei der Datenaufbesserung, bzw., der Ausdünnung gemacht haben.

Station		Finkelstein et al. 2011	VieVS
		mm/y	mm/y
Badary	Vx	-28,6	-28,63
	Vy	-2,2	0,88
	Vz	-4,9	-2,8
Zelenchik	Vx	-20,9	-19,15
	Vy	14,8	17,96
	Vz	9,6	12,68
Svetloe	Vx	-18,4	-17,96
	Vy	12,2	12
	Vz	8,1	8,33

Tabelle 9: Stationsgeschwindigkeiten

## 5.2 Ergebnisse bei festgehaltenen Stationskoordinaten

Werden bei der Parametrisierung der Standard Sessions die NNT/NNR Bedingungen abgewählt, führt dies zu einer leichten Abweichung der in 5.1 präsentierten Ergebnisse. Infolge dessen befinden sich die Stationen unter Zwang, werden somit festgehalten und alle bestimmten Variablen beziehen sich auf die a priori Koordinaten des VTRF2008 Katalogs. Da sich die Stationen in ihrer Lage nicht ändern, fällt auch der Schritt der Basislinienauswertung, ihrer Wiederholbarkeit und auch Berechnung der Stationsgeschwindigkeiten weg.

### 5.2.1 EOP

#### Abweichung der russischen Polkoordinaten von IGS-Daten, bei festgehaltenen Stationskoordinaten

Auch bei festgehaltenen Stationskoordinaten wurde ein direkter Vergleich der Polkoordinaten russischer Sessions mit den IGS-Daten gemacht. Auf Abbildung 43 (S. 63) sind die Abweichungen aufgetragen. Tabelle 10 liefert die dazugehörigen Standardabweichungen.

Alleine von den Zahlen und der Übersicht erscheint es, dass die Übereinstimmung bei festgehaltenen Stationskoordinaten besser ist.

Besonders interessant ist auch das Verhalten jener Sessions, die mit NNT/NNR-Konditionen zu Ausreißern in der Polbewegung geführt haben. Der 14. April 2008 macht sich hier kaum bemerkbar, während der 20. Februar 2009 fast gleich schlecht geblieben ist. Weiters hinzugekommen ist der 9. Februar 2008, der bei 54507 MJD einen ypol-Wert von -101 mas aufweist! Vergleicht man sein Verhalten unter NNT/NNR-Konditionen, so reißt er im Gegensatz dazu nur um -19 mas im ypol aus.

Der 6. November 2008 stellte sich bisher in jeder Hinsicht als ein Datum heraus, das für die Auswertung nicht in Frage kam. Auch bei festgehaltenen Stationskoordinaten sind die Abweichungen viel zu groß, als dass dieses Datum in die präsentierten Plots aufgenommen wurde. Dafür erwies sich der 5. September 2008 mit einer durchschnittlichen Abweichung von +28,5 mas im xpol als durchaus tauglich.

Was durch den Ausschluss der NNT/NNR-Konditionen nicht gelöst werden konnte, war die größere Abweichung der Beobachtungen im mittleren Teil der Zeitreihe.

von	bis	STD	
		xpol [mas]	ypol [mas]
11. Aug. 06	1. Mai. 07	4,0325	4,4217
4. Dez. 07	6. Nov. 09	9,9073	18,5581
2. Jul. 10	14. Jan. 11	2,7912	2,8187
Gesamt		7,8791	14,3106

Tabelle 10: Standardabweichung xpol, ypol ohne Schätzung der Stationskoordinaten

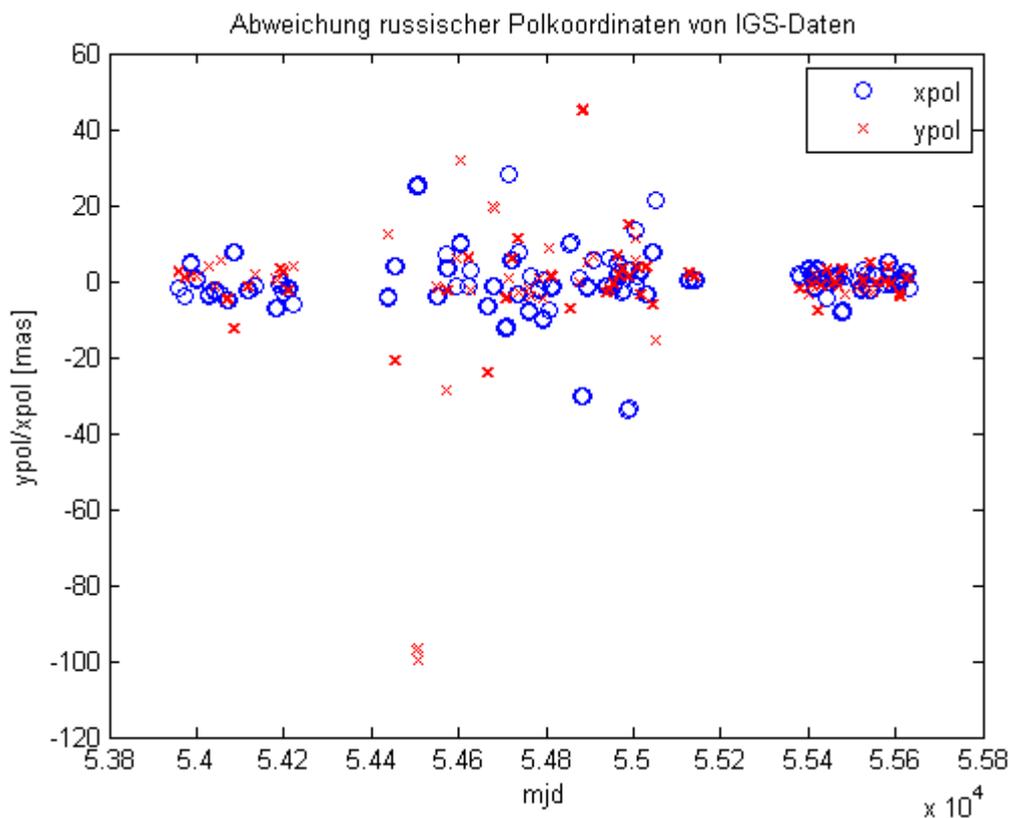


Abbildung 43: Abweichung russischer xpol- und ypol-Koordinaten von IGS-Daten ohne NNT/NNR

### 5.2.2 Polbewegung

Die Trajektorie des CIP, bei festgehaltenen Stationskoordinaten, ist auf Abbildung 44 und Abbildung 45 (S. 64) aufgetragen. Die russischen Ergebnisse wurden erneut farblich chronologisch geordnet und die Daten vom IGS dazu geplottet.

Vergleicht man die Standardabweichungen auf Tabelle 8 (S. 55) mit jenen auf Tabelle 10 (S. 62) wird ersichtlich, dass die Gesamtwerte für xpol von  $\approx 11$  mas auf  $\approx 8$  mas, und für ypol von  $\approx 16$  mas auf  $\approx 14$  mas gesunken sind. Daraus kann man schlussfolgern, dass sich die berechneten Werte mit festgehaltenen Stationskoordinaten durchaus besser an die IGS-Spirale anschmiegen.

Das Verhalten, dass die beste Übereinstimmung der Polkoordinaten gegen Anfang und Ende des russischen Programms stattfand, ist bei einer Lösung mit festgehaltenen Stationskoordinaten dasselbe wie unter NNT/NNR-Konditionen. Die Ergebnisse für die Polkoordinaten liegen den IGS-Daten am nächsten in den Jahren 2006 bis 2007 und seit Anfang 2010 bis Ende März 2011.

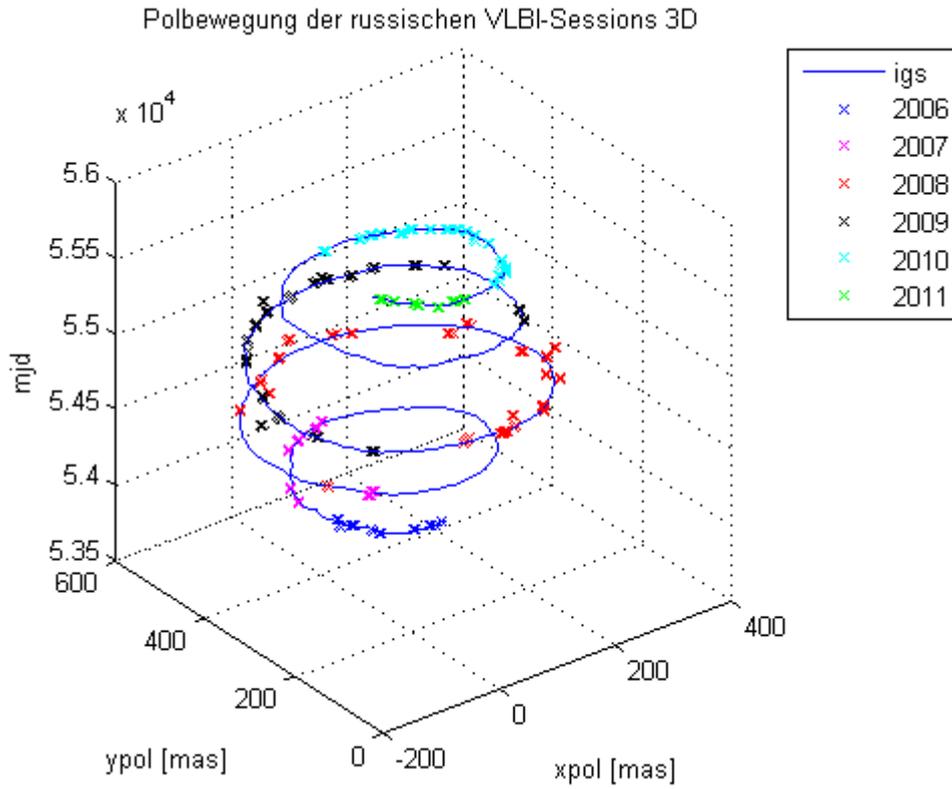


Abbildung 44: Polbewegung bei festgehaltenen Stationskoordinaten, 3D

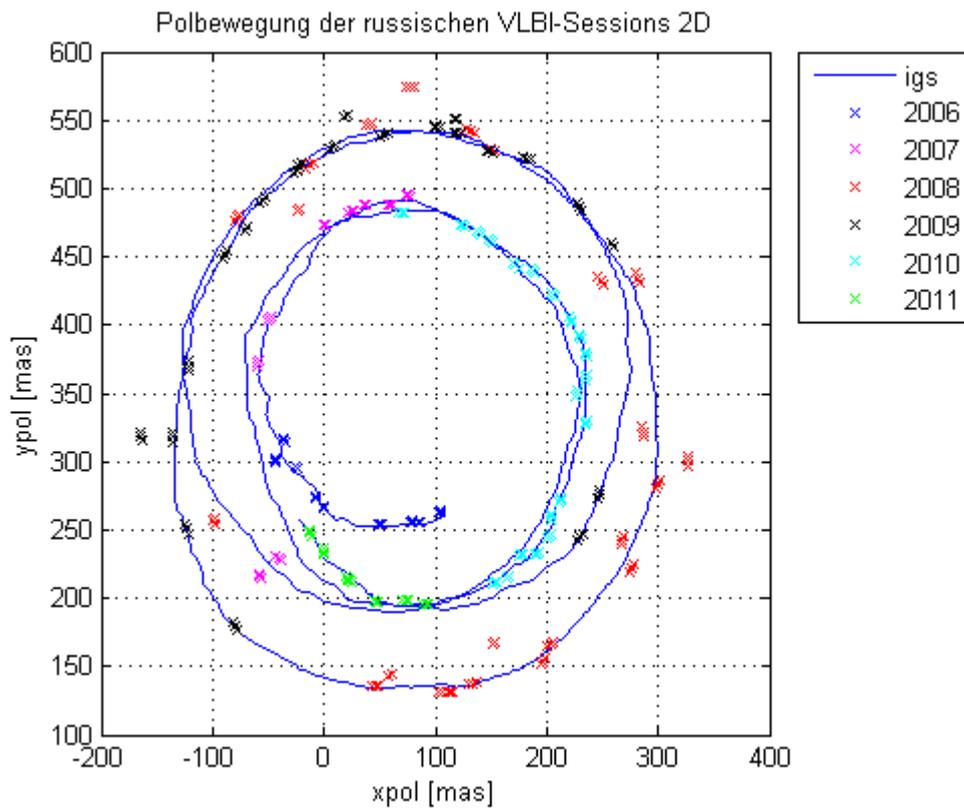


Abbildung 45: Polbewegung bei festgehaltenen Stationskoordinaten, 2D

## 5.3 Ergebnisse der Intensive-Files

### 5.3.1 Genauigkeit der ermittelten dUT1-Werte

In Kapitel 4.3.2 wurde bereits erklärt, dass auf der alleinigen Ausgabe der ermittelten Werte von dUT1 Schwankungen ersichtlich gemacht werden können. Auf Abbildung 46 sieht man das Ergebnis eines solchen Plots. Er stellt die ermittelten Werte für dUT1 graphisch dar.

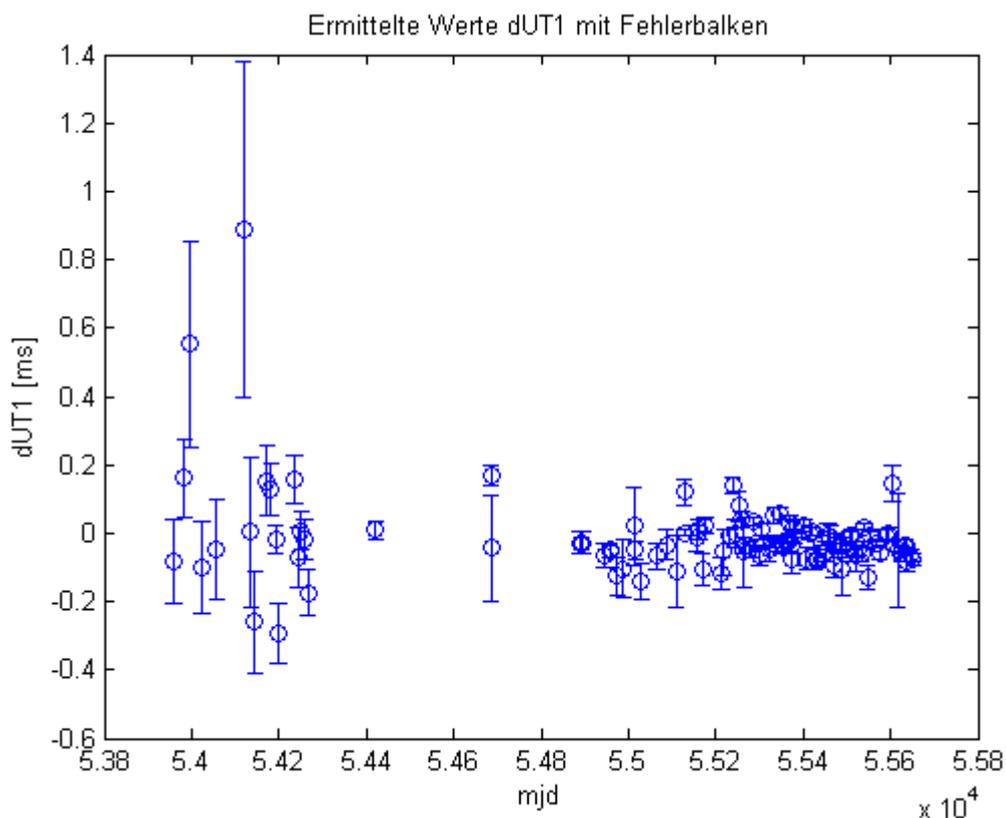


Abbildung 46: Ermittelte Werte von dUT1 [ms] mit Fehlerbalken im Vergleich zu IERS 08, c04 08

Anhand der Abbildung kann man aussagen, dass die ersten Messungen von dUT1 ein paar größere Ausreißer haben. Die Genauigkeit nimmt jedoch mit dem Datum zu. Ab Ende Juni 2007 (ca. 54270 MJD) folgt eine größere Datenlücke, die bis Februar 2009 andauert. 2008 gab es nur zwei brauchbare Sessions, deren Qualität ausreichend war, ebenso wie eine Messung im November 2007. Ab dem 27. Februar 2009 (54889 MJD) wurde die Anzahl der Sessions dichter und auch die Genauigkeit erfuh eine Steigerung.

Zur Veranschaulichung der Qualitätsverbesserung sei der Plot auf Abbildung 46 bei 54800 MJD (30. Nov. 2008) in zwei Bereiche aufgespaltet. Dabei haben die Messwerte auf der linken Seite - bis zu dieser Grenze - eine Standardabweichung von 0,2547 ms, während die Ergebnisse ab diesem Datum eine Standardabweichung von 0,0549 ms erreichen. Insgesamt beläuft sich die Genauigkeit der russischen Intensive Sessions auf eine Standardabweichung von 0,131ms.

### 5.3.2 Plot von dUT1

Die Ergebnisse der absoluten Werte der Intensive Sessions wurden mit den Daten von IGS verglichen und geplottet. IGS liefert in dem Zusammenhang Werte, die von der Tageslänge abgeleitet wurden. Auf Abbildung 47 wurde das Ergebnis wieder mit den IGS-Daten verglichen.

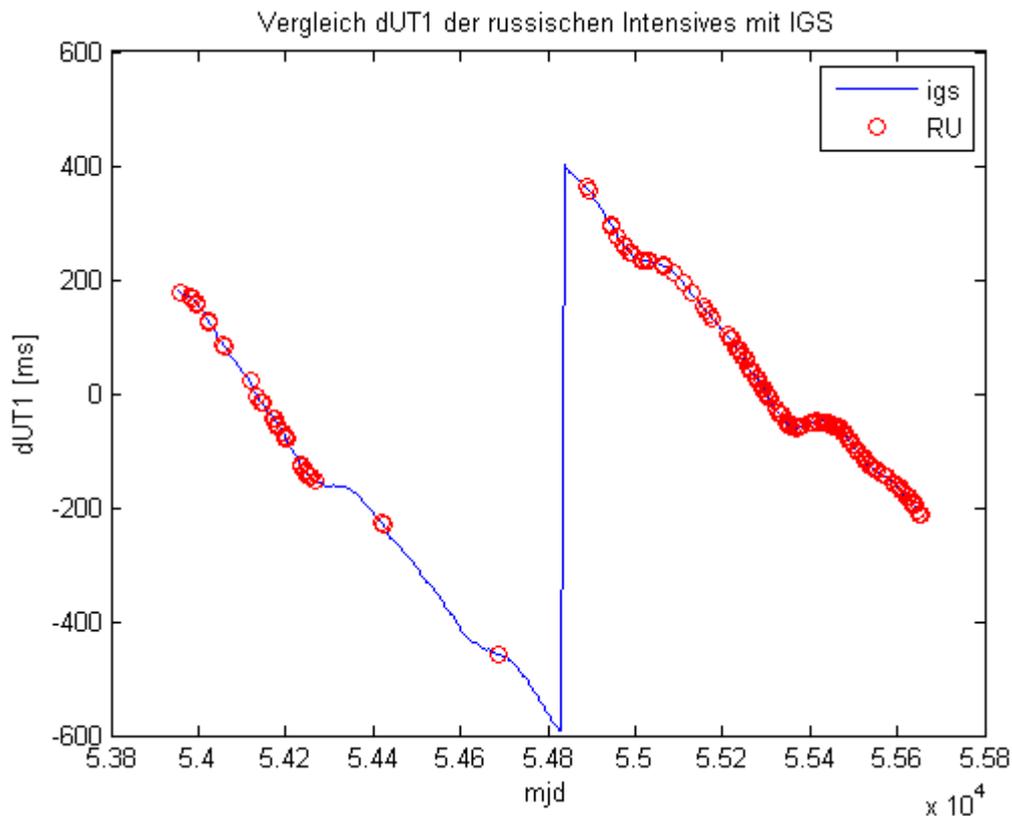


Abbildung 47: dUT1 des RU-U Programms im Vergleich zu den IGS Daten

Die roten Kreise sind die absoluten dUT1 Werte der RU-U Sessions. Die blaue, durchgezogene Linie stellt die Ergebnisse der IGS-Daten dar. Dabei fällt deutlich der Sprung zwischen 54832 und 54833 MJD auf. Das ist der Übergang von 31. Dezember 2008 auf 01. Januar 2009, wo eine Schaltsekunde eingefügt wurde um die Bedingung in Formel 15 (Torge, 2003, s.S 22) zu erfüllen.

$$(15) \quad UT1 - UTC = dUT1 < 0.9s$$

dUT1 ändert sich in negativer Richtung. Dabei ist die Koordinierte Weltzeit UTC in Relation zu UT1 so zu halten, dass dUT1 nie größer als 0,9 Sekunden wird. Andernfalls muss sie angepasst werden, so wie am 31. Dezember 2008. Dieses Datum ist somit die Unstetigkeitsstelle in Abbildung 47.

Im Vergleich zu den IGS-Daten - IGS-Werte minus russische Werte - beträgt die Standardabweichung insgesamt 0,1595 ms. Teilt man die Datenmenge erneut mit MJD (30. Nov. 2008) als Grenze, erhält man für die anfänglichen Sessions eine Standardabweichung von 0,3078 ms und für die nachfolgenden eine Standardabweichung von 0,0777 ms. Dadurch wird die Qualitätsverbesserung seit Beginn 2009 nochmals ersichtlich.

### 5.3.3 dUT1 Gesamt

Auch bei den Standard Sessions wurden Werte für dUT1 bestimmt. Daher kann es interessant sein, diese Ergebnisse mit denen der Intensive Sessions zusammenzulegen und gemeinsam als Plot auszugeben. Auf Abbildung 48 sind alle ausgewerteten, absoluten dUT1 Werte der RU-E und RU-U Sessions aufgetragen.

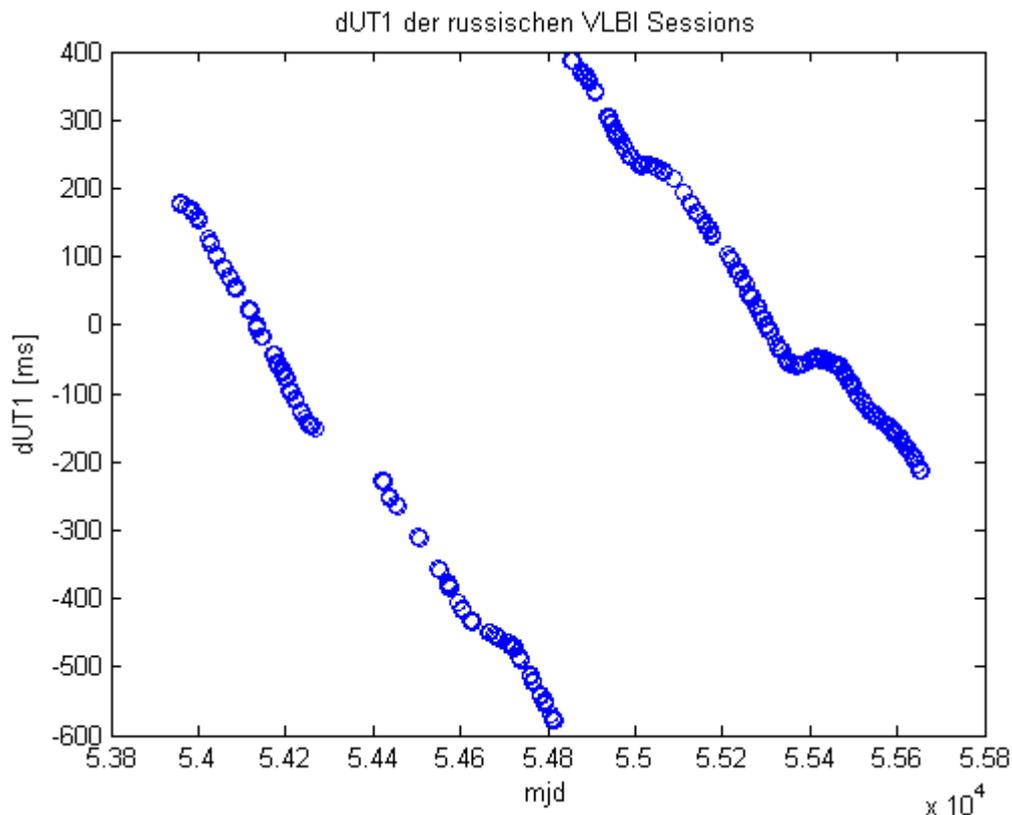


Abbildung 48: dUT1 der Programme RU-E und RU-U

Vergleicht man die Genauigkeiten der beiden russischen VLBI-Programme (RU-E und RU-U) in Bezug auf die Daten vom IGS, erhält man für die Standard Sessions eine Standardabweichung von 0,31236 ms und für die Intensive Sessions 0,1595 ms. Bei den Intensive Sessions wurde bereits gezeigt, dass sich seit Beginn 2009 eine deutliche Qualitätsverbesserung eingestellt hat. Untersucht man die ermittelten Werte der Standard Sessions in Bezug auf die drei Datenbereiche in Kapitel 5.1.1 (Tabelle 8) erneut mit den Daten vom IGS erhält man das Ergebnis in Tabelle 11. Daneben befindet sich eine Spalte, in der die Werte bei festgehaltenen Stationskoordinaten (ohne NNT/NNR) stehen.

von	bis	STD dUT1 [ms]	STD ohne NNT/NNR dUT1 [ms]
11.Aug.06	01.Mai.07	0,16452	0,13160
04.Dez.07	06.Nov.09	0,42566	0,28050
02.Jul.10	11.Mar.11	0,11666	0,11136
Gesamt		0,31236	0,21465

Tabelle 11: Standardabweichung dUT1 der Standard Sessions

## 6. Fazit

In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass man mit dem nationalen VLBI-Netz von Russland "Quasar", durch die große Ost-West-Ausbreitung Erdorientierungsparameter berechnen kann. Die Beobachtungen wurden auf den drei Stationen Badary, Svetloe und Zelenchukskaya, über den Zeitraum von 2006 bis Anfang 2011 gemacht. Die beiden längsten Basislinien - beide in Richtung Badary und damit nach Osten - hatten jeweils eine Länge von etwa 4.000 km.

Zur Auswertung kam die Software VieVS zum Einsatz. Von 223 russischen Experimenten waren 108 Sessions, die über 24 Stunden - zur Bestimmung der vollen EOP - gemacht wurden und 115 kurzzeitige Intensive Sessions zur Ermittlung der Abweichung dUT1 von der koordinierten Weltzeit. Von den zur Verfügung gestellten Daten flossen nach Aufbesserungsmaßnahmen 85% in die Auswertung mit ein, die in der Regel eine Grenze von 3,5 für das  $\chi^2$  nicht überschritten haben.

Die Ergebnisse aus den russischen Beobachtungen wurden mit Daten des IGS verglichen. Dabei erhielt man bei den Standard Sessions für die Polkoordinaten unter NNT/NNR-Konditionen eine Standardabweichung von insgesamt 11,0357 mas für xpol und 16,8301 mas für ypol. Bei festgehaltenen Stationskoordinaten sank die Standardabweichung für xpol auf 7,8791 mas und für ypol auf 14,3106 mas. Dabei ist es möglich die Datenmenge über die Zeit in drei Bereiche aufzuteilen, die durch zwei größere Datenlücken von mehreren Monaten getrennt sind und jeweils unterschiedliche Genauigkeiten aufwiesen. Es ist zu erwähnen, dass seit Juli 2010 - nach der zweiten großen Datenlücke - die Standardabweichungen bei der Auswertung unter NNT/NNR-Konditionen für xpol bei 3,2079 mas und für ypol bei 4,998 mas liegen. Bei festgehaltenen Stationskoordinaten und für denselben Zeitraum erhielt man für die Standardabweichung für xpol 2,7912 mas und für ypol 2,8187 mas. Demnach kann man von einer Verbesserung in der Qualität der russischen Beobachtungen sprechen.

Dasselbe wurde für dUT1 sowohl bei den Standard- als auch bei den Intensive Sessions demonstriert. Dabei erhielt man für die Standard Sessions eine Standardabweichung von 0,3123 ms und für die Intensive Sessions 0,1595 ms. Da es bei beiden Programmen für verschiedene Zeitbereiche unterschiedliche Genauigkeiten gab, wurden die Ergebnisse der Standard Sessions in drei und die Intensive Sessions in zwei Epochen aufgespalten. Davon hatten die Messungen der jeweils neuesten Zeitbereiche für die Standard Sessions eine Standardabweichung von 0,11666 ms und 0,0777 ms für die Intensive Sessions, jeweils in Relation zu den Daten vom IGS:

Durch den Vergleich der präsentierten Daten wurde sowohl in Hinsicht auf die Ergebnisse der Standard- und auch der Intensive Sessions, sowie deren Residuenplots und Werte für das  $\chi^2$  ersichtlich, dass sich die Qualität der russischen Daten seit Beginn 2010 deutlich verbessert hat.

Neben der Bestimmung der EOP und dUT1 galt es die Stationsgeschwindigkeiten für Badary, Svetloe und Zelenchukskaya zu berechnen und in einer Vektorgrafik auszugeben. Die Vektoren zeigen dabei in Richtung der Bewegung der Eurasischen Platte. Außerdem wurden die Werte der Stationsgeschwindigkeiten mit einer anderen Publikation von Finkelstein et al. (2011) verglichen. Die Ergebnisse decken sich gut.

Bei der Basislinienwiederholbarkeit wurde festgestellt, dass besonders die Standardabweichungen der beiden Linien, welche die Station Badary miteinschließen, mit Werten von 29 mm und 34 mm unerwartet hoch sind. Selbst die niedrigste Standardabweichung der kleinsten Basislinie liegt bei 23 mm.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Grundprinzip VLBI (nach Schuh und Böhm, 2012).....	6
Abbildung 2: Komponenten einer VLBI-Station (nach Campbell, Nothnagel und Schuh, 1992) .....	7
Abbildung 3: Programmfluss einer VLBI Auswertung nach Schuh (1987).....	9
Abbildung 4: Das russische VLBI Netz "Quasar", Quelle: Russian VLBI-Network „Quasar“: 2009-213, A. Finkelstein, 26 May 2009, Onsala .....	12
Abbildung 5: Radioantenne Svetloe, Quelle: Russian VLBI-Network "Quasar": 2009-213, A. Finkelstein, 26 May 2009, Onsala .....	13
Abbildung 6: Radioantenne Badary, Quelle: Russian VLBI-Network "Quasar": 2009-213, A. Finkelstein, 26 May 2009, Onsala .....	14
Abbildung 7: Radioantenne Zelenchukskaya, Quelle: Russian VLBI-Network "Quasar": 2009- 213, A. Finkelstein, 26 May 2009, Onsala .....	14
Abbildung 8: VieVS Logo © IGG, Vienna.....	16
Abbildung 9: Programmfluss von VieVS (nach Nilsson et al., 2011) .....	16
Abbildung 10: GUI 1 von VieVS, Setup/INIT.....	19
Abbildung 11: GUI 2 von VieVS, INIT/MOD Applikation.....	20
Abbildung 12: Residuenplot der Session vom 3. Dezember 2010 .....	25
Abbildung 13: Histogramm $\chi^2$ nach erster Betrachtung der Daten .....	31
Abbildung 14: Ausreißer - Residuenplot 18. Februar 2011 .....	33
Abbildung 15: Ohne Ausreißer - Residuenplot 18. Februar 2011.....	34
Abbildung 16: Residuenplot mit Clockbreak .....	35
Abbildung 17: Residuenplots der Station Badary (li.) und der Station Svetloe (re.).....	36
Abbildung 18: Residuenplot der Station Zelenchk .....	37
Abbildung 19: Clockbreak der Station Zelenchk .....	37
Abbildung 20: Residuenplot ohne Clockbreak .....	38
Abbildung 21: Residuenplot ohne Cockbreak und ohne Ausreißer .....	38
Abbildung 22: Residuenplot mit schlechter Basislinienbeobachtung.....	39
Abbildung 23: Ausreißer zwischen Badary (li.) und Svetloe (re.).....	39
Abbildung 24: Ausreißer von Zelenchk zu Badary und Svetloe.....	40
Abbildung 25: Residuenplot mit ausgeschlossener Basislinie.....	40
Abbildung 26: Sinusförmiger Residuenplot.....	42
Abbildung 27: Histogramm $\chi^2$ - Verbesserung .....	43
Abbildung 28: Basislinienwiederholbarkeit Erstausgabe .....	47
Abbildung 29: Basislinie Badary - Svetloe mit Ausreißer .....	48
Abbildung 30: Basislinie Badary - Zelenchk mit Ausreißer .....	48
Abbildung 31: Basislinie Svetloe - Zelenchk mit Ausreißer .....	49
Abbildung 32: Residuenplot vom Problemdatum 6. November 2008 .....	49
Abbildung 33: Plot aller z-Koordinaten für Zelenchk .....	51
Abbildung 34: Abweichung russischer xpol und ypol Koordinaten von IGS Daten .....	54
Abbildung 35: Histogramm $\chi^2$ unterteilt in drei Epochen .....	56
Abbildung 36: Polbewegung der russischen VLBI-Sessions 3D .....	57
Abbildung 37: Polbewegung der russischen VLBI-Sessions 2D .....	57
Abbildung 38: Basislinienwiederholbarkeit Endausgabe .....	58
Abbildung 39: Basislinie Badary - Svetloe mit linearer Regression .....	59
Abbildung 40: Basislinie Badary - Zelenchk mit linearer Regression.....	59
Abbildung 41: Basislinie Svetloe - Zelenchk mit linearer Regression .....	60
Abbildung 42: Stationsgeschwindigkeiten.....	61
Abbildung 43: Abweichung russischer xpol- und ypol-Koordinaten von IGS-Daten ohne NNT/NNR.....	63
Abbildung 44: Polbewegung bei festgehaltenen Stationskoordinaten, 3D .....	64
Abbildung 45: Polbewegung bei festgehaltenen Stationskoordinaten, 2D .....	64
Abbildung 46: Ermittelte Werte von dUT1 [ms] mit Fehlerbalken im Vergleich zu IERS 08, c04 08 .....	65

---

Abbildung 47: dUT1 des RU-U Programms im Vergleich zu den IGS Daten.....	66
Abbildung 48: dUT1 der Programme RU-E und RU-U.....	67

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eigenschaften der Radioantennen .....	13
Tabelle 2: Anzahl der Beobachtungen im RU-E und RU-U Programm .....	15
Tabelle 3: Anzahl der russischen Sessions pro Jahr .....	23
Tabelle 4: Default Parametrisierung GUI 2 .....	26
Tabelle 5: Anzahl ausgeschlossene und benutzte Sessions - Erstdurchlauf .....	32
Tabelle 6: Anzahl ausgeschlossene und benutzte Sessions - nach Verbesserung .....	43
Tabelle 7: EOP Output vom 11. August 2006 (xpol, ypol, dX, dY: mas, dut1: ms) .....	53
Tabelle 8: Standardabweichung xpol, ypol in Bezug auf IGS Daten .....	55
Tabelle 9: Stationsgeschwindigkeiten .....	61
Tabelle 10: Standardabweichung xpol, ypol ohne Schätzung der Stationskoordinaten .....	62
Tabelle 11: Standardabweichung dUT1 der Standard Sessions .....	67

## Literaturverzeichnis

- Bächtold, W.:** Mikrowellenelektronik; Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden, 2002, S49ff.
- Bilstein, R. E.:** **Stages to Saturn: A Technological History of the Apollo/Saturn Launch Vehicles (NASA SP-4206) (The NASA History Series)**, NASA History Office, ISBN 0-7881-8186-6, 1996.
- Böckmann, S., Artz, T., Nothnagel, A.:** VLBI terrestrial reference frame contributions to ITRF2008, *J. Geod.*, 84, 201 - 219, doi: 10.1007/s00190-009-0357-7, 2010
- Bizouard, C., Gambis, D.:** The combined solution C04 for Earth orientation parameters consistent with International Terrestrial Reference Frame, in *Geodetic Reference Frames*, edited by H. Drewes, pp. 265 - 270, Springer, Dordrecht, Netherlands, 2009.
- Böhm, J., Spicakova, H., Plank, L., Teke, K., Pany, A., Wresnik, J., English, S., Nilsson, T., Schuh, H., (Institute of Geodesy and Geophysics, Vienna University of Technology, 1040 Vienna, Austria), Hobiger, T., Ichikawa, R., Koyama, Y., Gotoh, T., Kubooka, T., (National Institute of Information and Communications Technology, Tokyo, Japan), Otsubo, T., (Hitotsubashi University, Tokyo, Japan):** Plans for the Vienna VLBI Software VieVS; Proceedings of the 19th European VLBI for Geodesy and Astrometry Working Meeting, 24 - 25 March, Bordeaux, 2009.
- Böhm, J., Schuh, H., Böhm, S., Nafisi, V., Nilsson, T., Pany, A., Plank, L., Spicakova, H., Sun, J., Teke, K.:** Vienna VLBI Software - VieVS manual, Version 1c. Technische Universität Wien, Institut für Geodäsie und Geophysik, Gruppe für Höhere Geodäsie, Wien, 2010.
- Böhm, J., Werl, B. and H Schuh:** Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data, *J. Geophys. Res.*, 111, B02406, doi: 10.1029/2005JB003629, 2006a.
- Campbell, J.; Nothnagel, A.; Schuh, H.:** Die Radiointerferometrie auf langen Basislinien (VLBI) als geodätisches Messverfahren höchster Genauigkeit; *AVN*, 99. Jahrgang, Heft 11 - 12, S. 484-502, 1992.
- Campbell, J.:** From Quasars to Benchmarks: VLBI Links Heaven and Earth. *IVS 2000 General Meeting Proceedings*, ed. by N.R. Vandenberg and K.D. Baver, NASA/CP-200-209893, pp. 19-43, 2000.
- Defraigne, P., Smits, I.:** Length of day variations due to zonal tides for an elastic Earth in non-hydrostatic equilibrium; *Geophysics J Int* 139(2): 563 - 571 DOI: 10.1046/j.1365-246x.1999.00966x, 1999.
- Fedotov, L.V.:** VLBI Terminal in Badary Observatory. In J. Böhm, A. Pany, and H. Schuh, editors, *Proceedings of the 18th Workshop Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry*, volume 79 of *Geowissenschaftliche Mitteilungen, Schriftenreihe Vermessung und Geoinformation der TU Wien*, pages 222 - 224, TU Wien, 2007.
- Fey, A. L., Gordon, D., Jacobs, C. S.:** The Second Realization of the International Celestial Reference Frame by Very Long Baseline Interferometry (IERS Technical Note No. 35), Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, 2009
- Finkelstein, A.:** Russian VLBI-Network „Quasar“: 2009-213, 26 May 2009, Onsala
- Finkelstein, A., Salnikov, A., Ipatov, A., Smolentsev, A., Surkis, I., Gayazov, I., Rahimov, I., Dyakov, A., Sergeev, R., Skurikhina, E., Kurdubov, S.:** EOP determination from observations of Russian VLBI-network "Quasar". Proceedings of the ... meeting of the European VLBI Group for Geodesy and Astronomy / 20. March 29 - 30, p 82 - 85, 2011
- Gayazov, I., Skurikhina, E.:** Improved velocities of the "Quasar" network stations. Proceedings of the ... meeting of the European VLBI Group for Geodesy and Astronomy / 20. March 29 - 30, p. 147 - 149, 2011
- Haas, R. et al.:** Explanatory Supplement to the Section "Antenna Deformation" of the IERS Conventions (1996). DGFI Report No. 71, editor Schuh, H., pp. 26 - 29, 1999.
- Hinteregger, H. F., Shapiro, I. I., Robertson, D. S., Knight, C. A., Ergas, R. A., Whitney, A. R., Rogers, A. E. E., Moran, J. M., Clark, T. A., Burke, B. F.:** Precision Geodesy via Radio Interferometry; *Science*, 178: 396 - 398, 1972.
- Letellier, T.:** Etude des ondes de marée sur les plateaux continentaux. Ph.D. thesis, Université III Paul Sabatier, 2004.
- Mathews, P.M., Dehant, V., Gipson, J.M.:** Tidal station displacement. *J Geophys Res*, Vol. 102(B9): 20469-20477, 1997
- McCarthy, D. D., Petit, G.:** IERS Conventions 2003. IERS Technical Note 32, Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, ISBN 3-89888-884-3, 2004.
- Niemeier, W.:** Ausgleichsrechnung: eine Einführung für Studierende und Praktiker des Vermessungs- und Geoinformationswesens; Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, 10785 Berlin, 2001.

- Nilsson, T., Böhm, J., Böhm, S., Madzak, M., Nafisi, V., Plank, L., Spicakova, H., Sun, J., Tierno Ros, C., Schuh, H.:** Status and future plans for the Vienna VLBI Software VieVS. Proceedings of the 20th Meeting of the European VLBI Group for Geodesy and Astronomy, Alef, W., Bernhart, S., Nothnagel, A. (eds.), Schriftenreihen des Instituts für Geodäsie und Geoinformation der Universität Bonn, Nr. 22, pp. 93-96, ISSN: 1864-1113, 2011.
- Nothnagel, A.:** Conventions on thermal expansion modelling of radio telescopes for geodetic and astronomic VLBI. *Journal of Geodesy* 83 (8): 787 - 792, 2009.
- Paus, H. J.:** Physik in Experimenten und Beispielen. Carl Hanser Verlag München, pp. 105, ISBN 978-3-446-41142-5, 2007.
- Petit, G., and B. Luzum (Eds.):** IERS Conventions 2010, Frankfurt am Main, IERS Tech. Note, 36, 179 pp., Verlag des Bundesamts für Kartogr. und Geod., Frankfurt, Germany, 2010.
- Takahashi, F., Kondo, T., Takahashi, Y., Koyama, Y.:** Very Long Baseline Interferometer; Wave Summit Course, Ohmsha, IOS Press, 2000.
- Teke, K., Böhm, J.:** VIE\_LSM (*lecture*), VieVS User Workshop, 14 - 16 September, Vienna, 2011.
- Saastamoinen, J.:** Atmospheric corrections for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites, in *The Use of Artificial Satellites for Geodesy, Geophys. Monogr. Ser.*, vol. 15, edited by S. W. Henriksen, A. Mancini, and B. H. Chovitz, pp. 247 - 251, AGU, Washington, D. C., 1972.
- Schödlbauer, A.:** Geodätische Astronomie: Grundlagen und Konzepte; Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, D - 10785 Berlin, 1999.
- Schuh, H.:** Die Radiointerferometrie auf langen Basen zur Bestimmung von Punktverschiebungen und Erdrotationsparametern. DGK-Reihe C, Heft Nr. 328, München 1987.
- Schuh, H., Böhm, J.:** Very Long Baseline Interferometry for Geodesy and Astrometry, TU Wien, in "Sciences of Geodesy II", edited by G. Xu, Springer Verlag, in press, 2012.
- Sovers, O. J., Fenselow, J. L., Jacobs, C. S.:** Astrometry and geodesy with radio interferometry: experiments, models, results. *Reviews of Modern Physics*, Vol. 70(4): 1393-1454, 1998.
- Torge, W.:** Geodäsie. Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, 10758 Berlin, ISBN 3-11-017545-2, 2003.
- Whitney, A. R., Rogers, A. E. E., Hinteregger, H. F., Knight, C. A., Lippincott, S., Levine, J. I., Clark, T. A., Shapiro, I. I., Robertson, D. S.:** A very-long-baseline interferometer system for geodetic applications, *Radio Science* 11(5), pp. 421 - 432, 1976.
- Whitney, A. R. et al.:** The Mark 4 Data Acquisition System. Proc. AGU Chapman Conference on Geodetic VLBI: Monitoring Global Change, NOAA Technical Report NOS 137 NGS 49, US Dept. of Commerce, NOAA/NOS, Rockville, MD, 1991.
- Whitney, A. R., Rogers, A. E. E., Cappallo, R. J., Hargreaves, J. E., Hinteregger, H. F., Smythe, D. L.:** The Mark 5 VLBI Data System. In J. Böhm, A. Pany, and H. Schuh, editors, *Proceedings of the 18th Workshop Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry*, volume 79 of *Geowissenschaftliche Mitteilungen, Schriftenreihe Vermessung und Geoinformation der TU Wien*, pp. 33 - 38, TU Wien, 2007.
- Whitney, A. R.:** The VLBI Standard Interface Hardware (VSI-H) Interface Specification. MIT Haystack Observatory, [http://vlbi.org/vsi/docs/VSI\\_H\\_paper\\_for\\_IVS\\_TOW.pdf](http://vlbi.org/vsi/docs/VSI_H_paper_for_IVS_TOW.pdf), Doc, 2000.