

Technische Universität Wien

Department für Geodäsie und Geoinformation
Forschungsgruppe Höhere Geodäsie
Gusshausstraße 27-29 / E120-4
A-1040 Wien

Tel.: +43 (1) 58801 - 12806, Fax: +43 (1) 58801 - 12896

Diplomarbeit

Die Station Warkworth im globalen geodätischen VLBI Netz

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

unter der Anleitung von
Univ.-Prof. DI Dr.techn. Johannes Böhm
DI Dr.techn. Sigrid Böhm

durch
Alexander Helekal
Matr.Nr.: 0825867
Biesenfeldweg 2, 4040 Linz
E-mail: alex.helekal@gmx.at

Wien, im Mai 2014

Kurzfassung

Die vorliegende Diplomarbeit befasst sich mit der im Jahre 2008 errichteten VLBI-Station Warkworth in Neuseeland und ihrem Beitrag zum globalen geodätischen VLBI-Netz.

Nach einer Einführung in die Grundlagen der VLBI, wird detailliert auf das Projekt VLBI 2010 eingegangen. Um die ambitionierten Ziele und Anforderungen dieses Projekts zu erreichen, werden Strategien und Untersuchungen zur Verbesserung der VLBI erläutert. Anschließend wird auf das zentrale Thema der Arbeit, die VLBI-Station Warkworth, eingegangen. Die 2008 errichtete Antenne in Warkworth in Neuseeland ist eine neue VLBI-Station im globalen geodätischen VLBI-Netz, die den Anforderungen des Projekts VLBI 2010 entspricht. Durch die Lage auf der südlichen Hemisphäre nimmt sie einen wichtigen Platz im VLBI-Netz ein. Um den Stellenwert der Position der Station Warkworth zu überprüfen werden VLBI-Sessions, an denen die Station in den Jahren 2011 und 2012 teilgenommen hat, mit der Vienna VLBI Software ausgewertet, einmal mit Teilnahme der Station Warkworth und einmal ohne Teilnahme der Antenne. Aufgrund des Auslassens der Station bei den Berechnungen soll eine Verschlechterung in den Ergebnissen für die Erdorientierungsparameter erwiesen werden. Weiters ist mit einer Abnahme der Zahl der beobachteten Radioquellen zu rechnen.

Die Auswertungen entsprechen den erwarteten Ergebnissen. 60 Prozent der Sessions weisen ohne Berücksichtigung der Station Warkworth eine Verringerung, um mindestens eine beobachtete Radioquelle, auf. Anhand der Analyse der fehlenden Radioquellen lässt sich außerdem feststellen, dass diese Quellen zum Großteil eine hohe negative Deklination zwischen -20 und -80° aufweisen. Die Sessions müssen somit auf einige Radioquellen auf der südlichen Hemisphäre verzichten, was wiederum zu einer geringeren Anzahl an Beobachtungen und zu einer Verschlechterung der Erdorientierungsparameter führt.

Von den jeweils 5 ausgewerteten Erdorientierungsparametern pro Session weisen 31 von 50 verschlechterte Werte für den formalen Fehler auf. Der Unterschied in den Ergebnissen beträgt im Mittelwert 0,04 Millibogensekunden, bei einer Session ist der formale Fehler sogar 0,72 Millibogensekunden.

Diese Ergebnisse zeigen klar den Nutzen und den Stellenwert der Station Warkworth für das globale geodätische VLBI-Netz durch ihre Lage auf der südlichen Halbkugel.

Abstract

The content of this master thesis is the description of the VLBI station Warkworth in New Zealand built in 2008 and its contribution to the global geodetic VLBI network.

After an introduction to the basics of VLBI the project VLBI 2010 will be described in detail.

In order to reach the aims and goals of the project strategies for improving VLBI will be explained. Subsequently the central topic of the thesis – the VLBI station Warkworth – will be discussed. The antenna that was erected in 2008 in Warkworth in New Zealand is a new VLBI station in the global geodetic VLBI network, which meets the requirements of the project VLBI 2010. Owing to its location on the southern hemisphere it plays an important role in the global VLBI network. To prove the significance of this location VLBI sessions of the years 2011 and 2012 are calculated with the Vienna VLBI Software with and without participation of the antenna in Warkworth. An aggravation of the results for the earth orientation parameters are estimated due to omitting the data of the station Warkworth. Furthermore a decline of the observed radio sources is expected.

The results proved the hypotheses right: 60 percent of the sessions that do not take the Warkworth station into account show a decline of minimum one observed radio source. The analysis of the missing radio sources suggests that the majority of them have a high negative declination between -20 and -80° . The excluding of several radio sources on the southern hemisphere leads to a smaller amount of observations of these sessions. In addition the earth orientation parameters are 62 percent inferior compared to the sessions that include the VLBI station in Warkworth.

Five earth orientation parameters were evaluated per session and 31 of 50 revealed inferior values for the formal error. The average difference between the results amounts 0,04 milliarcseconds, for one session the formal error is even 0,72 milliarcseconds.

The results record the benefit and the significance of this station in the global geodetic VLBI network.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich im Zuge meiner Diplomarbeit unterstützt haben. Ein besonderer Dank gilt Univ. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Harald Schuh, der mir die Umsetzung dieser Arbeit auf Basis eines Aufenthalts vor Ort in Neuseeland ermöglicht hat.

Ebenfalls großer Dank gilt Univ. Prof. DI Dr.techn. Johannes Böhm, der mir ab dem Zeitpunkt der Übernahme der Arbeit und während der Arbeiten in Auckland immer mit Rat und Tat zur Seite gestanden ist. Weiters möchte ich mich noch bei DI Dr.techn Sigrid Böhm bedanken, die ebenfalls während meines Aufenthaltes jede akut auftretende Frage umgehend beantwortet hat.

Mein Dank gilt auch Professor Sergei Gulyaev und seinem Team am Institute of Radio Astronomy und Space Research an der Auckland University of Technology, das mich während meines Aufenthaltes in Neuseeland bestens unterstützte.

Zuletzt danke ich noch meinem Vater für das Korrekturlesen der Arbeit und generell meinen Eltern für die Unterstützung anlässlich meines Auslandsaufenthalts und bei der Diplomarbeit.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	2
Abstract	3
Danksagung	4
Motivation und Einleitung	8
1. VLBI Grundlagen	10
1.1. Grundprinzip der VLBI	10
1.1.1. Radioquellen	10
1.1.2. Antennen	11
1.1.3. Radiosignale	11
1.1.4. Stationsuhr, Aufzeichnungseinheit und Korrelator	12
1.1.5. Mathematisches Messprinzip	13
1.2. Globales Stationsnetz	14
1.3. VLBI-Produkte	15
1.3.1. Genauigkeit der VLBI	17
1.4. Zusammenfassung	17
2. VLBI 2010	18
2.1. Ziele und Anforderungen	18
2.1.1. Problematik des alten Systems	18
2.1.2. Neueste Entwicklungen	19
2.1.3. Konkrete Zielsetzung	20
2.1.4. Herausforderungen für das neue System	20
2.2. Strategien und Untersuchungen	20
2.2.1. Reduktion des zufälligen Fehlers der Laufzeitverzögerung	21
2.2.2. Zunehmende Beobachtungsdichte	21
2.2.3. Reduktion der systematischen Fehler	22
2.2.4. Aufstockung und bessere geographische Verteilung der VLBI-Stationen	23
2.2.5. Reduzieren von Messfehlern aufgrund externer Interferenzen	26
2.2.6. Neue Beobachtungsstrategien entwerfen	26
2.2.7. Datenanalyse verbessern	27
2.3. Empfehlungen für VLBI 2010	28
2.3.1. Antenneneigenschaften	28
2.3.2. Frequenzbandintervall	29
2.3.3. Datentransfer	30

2.3.4.	Verbesserung der Datenanalyse.....	30
2.3.5.	Automation des Mess- und Auswertevorganges.....	31
2.4.	Status Quo VLBI 2010.....	32
2.5.	Zusammenfassung.....	33
3.	VLBI-Station Warkworth.....	34
3.1.	Historie.....	35
3.2.	Geographie.....	35
3.2.1.	Stationskoordinatenbestimmung.....	36
3.2.2.	Ocean tide loading Modell.....	37
3.3.	Technische Informationen und Apparaturen.....	38
3.4.	Messkampagnen und Probleme.....	40
3.5.	Nutzung und erste Ergebnisse.....	41
3.5.1.	Universitäre Nutzung.....	41
3.5.2.	30 Meter Antenne Warkworth.....	41
3.5.3.	Horizon Mask.....	42
3.5.4.	Weitere Nutzungsmöglichkeiten.....	45
3.6.	Ausblick.....	46
4.	Programme für die Auswertung.....	47
4.1.	Matlab.....	47
4.2.	Vienna VLBI Software (VieVs).....	48
4.2.1.	NGS-Files.....	50
4.2.2.	Aufbau der Vienna VLBI Software.....	53
4.2.3.	Benutzeroberfläche (Graphical User Interface).....	58
4.2.4.	Ergebnisse der Auswertungen mittels VieVS.....	69
4.3.	Microsoft Excel.....	70
4.4.	Google Earth.....	70
5.	Auswertung der Daten und Ergebnisse.....	74
5.1.	Sessions.....	74
5.2.	Ablauf der Auswertung.....	78
5.2.1.	Process List und Parameter.....	79
5.2.2.	Schätzwerte für die kleinste Quadrate Ausgleichung.....	80
5.2.3.	Aussortieren der problematischen Sessions.....	82
5.2.4.	Auswertung.....	83
5.3.	Ergebnisse.....	84
5.3.1.	Ausgabe der Ergebnisse aus Matlab.....	84
5.3.2.	Anzahl der beobachteten Radioquellen.....	85

5.3.3. Unterschied in den Erdorientierungsparametern.....	89
6. Zusammenfassung.....	93

Motivation und Einleitung

Die VLBI Station in Warkworth in Neuseeland ist eine der neuesten VLBI-Antennen im globalen geodätischen VLBI Netz. Sie verfügt über die neuesten Apparaturen und entspricht den derzeit höchsten Standards der VLBI.

Im Zuge dieser Arbeit führte mich der Weg nach Neuseeland um die Station zu besuchen und kennenzulernen. Die vom „Institute for Radio Astronomy and Space Research“ (IRASR) der Auckland University of Technology betreute Antenne, befindet sich etwa 60 Kilometer nördlich der Großstadt Auckland. 100 Meter von der 12m Antenne entfernt befindet sich eine 30m Antenne, die ehemals von der Telecom New Zealand genutzt wurde und jetzt zu Forschungszwecken ebenfalls vom IRASR verwendet wird. Wenige Hundert Meter entfernt besitzt die Telecom New Zealand weitere Antennen zur Kommunikation zwischen Neuseeland und den Pazifischen Inseln. Dieses Gebiet ist für Signalübertragung und Empfang sehr beliebt, da ein Funkbetrieb in der Umgebung verboten ist und es so zu keinen Interferenzen kommen kann.

Die Station nimmt seit 2011 regelmäßig an internationalen VLBI-Sessions des IVS teil. Aus diesem Grund ist eine Untersuchung der Station und ihrem Beitrag zum globalen geodätischen VLBI Netz höchst interessant. Aufgrund ihrer Position auf der Südhalbkugel sowie den modernen Apparaturen werden verbesserte Ergebnisse der Erdorientierungsparameter und ein positiver Beitrag zum globalen Netz erwartet.

Überprüft wird dies anhand 10 ausgewerteter Sessions an denen Warkworth teilnahm. In einem zweiten Auswertedurchgang wird anschließend die Station aus den Auswertungen herausgenommen und nur mit den restlichen Stationen gerechnet. Eine Verschlechterung der Erdorientierungsparameter, sowie eine Abnahme der beobachteten Radioquellen sind die Folge. Dies wiederum beweist den Nutzen der Station für das globale geodätische VLBI Netz.

Zum besseren Verständnis werden im Kapitel [1] die Grundlagen der VLBI angeführt. Das Kapitel [2] beschreibt das Projekt VLBI 2010, das die VLBI noch leistungsfähiger machen soll und die Eingliederung der Station Warkworth in dieses Konzept. Anschließend werden die technischen Daten der Station sowie die Antenne in Kapitel [3] detailliert beschrieben.

Zusätzlich konnte ich während meines Aufenthalts die Horizon Mask der 12- und 30-Meter Antenne mittels Tachymeter bestimmen, da diese zuvor nur ungenügend bestimmt wurde, sich aber auf den Beobachtungsplan auswirken kann. Die Ergebnisse sind ebenfalls in Kapitel [3] und im Anhang angeführt. Kapitel [4] beinhaltet eine Auflistung der verwendeten Programme die im Zuge der Auswertung zum Einsatz kamen. Speziell wird die Vienna VLBI Software (VieVS) beschrieben, da diese zum Berechnen der 10 Sessions verwendet wurde. Die Ergebnisse der Auswertungen sowie die Interpretation dieser sind in den Kapiteln [5] und [6] angeführt.

Aus den Ergebnissen lässt sich sehr gut der Nutzen der Station für das globale geodätische VLBI Netz erkennen. Durch das Ausschließen der Station nimmt die Anzahl der beobachteten Radioquellen ab und führt ebenso zu einer Verschlechterung der Erdorientierungsparameter.

1. VLBI Grundlagen

VLBI steht für Very Long Baseline Interferometry. Es ist eines der ältesten geodätischen Weltraumverfahren und wurde ab dem Jahr 1967 entwickelt. Den Grundstein legte jedoch schon Karl G. Jansky 1933 als er als Erster von Radiosignalen kosmischer Quellen außerhalb des Sonnensystems sprach (H. Schuh et al., 2011). Später baute Grote Reber die erste Parabolantenne. Diese wird noch immer als Prototyp für die heutigen Antennen verwendet. Durch die spätere Einführung der aus der Optik bekannten Interferometrie konnte die Beobachtungsmethode verfeinert und per Verbinden zweier Antennen mittels Kabel das Auflösungsvermögen erhöht werden. Als 1960 schließlich die Atomfrequenznormale eingeführt wurde, konnten die Messungen zeitreferenziert und daher die Interferometrie kabellos zwischen mehreren 1000 Kilometer entfernten Antennen durchgeführt werden.

Dieses Verfahren ist für die Geodäsie von so großer Bedeutung, da die geometrische Grundgleichung der VLBI nicht nur die Position der Radioquelle als Parameter enthält, sondern auch die Richtung und den Betrag des Basislinienvektors zwischen den Antennen sowie die Erdorientierungsparameter [Abb. 3].

Grundlage für Kapitel [1] liefert H. Schuh und J. Böhm (2).

1.1. Grundprinzip der VLBI

1.1.1. Radioquellen

Die Grundlage für die VLBI bilden die extragalaktischen Radioquellen, sogenannte Quasare. Sie sind schwarze Löcher im Zentrum einer Galaxie und strahlen große Energiemengen in verschiedenen Wellenlängenbereichen aus. Sie werden aufgrund der großen Entfernung als quasi Fixsterne (quasi-stellar) angenommen und besitzen deshalb eine bekannte Rektaszension und Deklination im ICRF (International Celestial Reference Frame), dem internationalen himmelfesten Bezugskoordinatensystem. Es können alle der 3414 Radioquellen des derzeitigen ICRF 2¹ für VLBI Beobachtungen verwendet werden, doch eignen sich einige aufgrund ihrer Struktur besser für VLBI Messungen als andere.

¹ <http://www.iers.org/iers/en/DataProducts/ICRF/ICRF2/icrf2.html>

Entscheidend, ob eine Radioquelle bei einer VLBI Session verwendet wird, sind die Intensität der Strahlung und der Strukturindex, welcher die Punktförmigkeit und die Stabilität des Quasars beschreibt.

1.1.2. Antennen

Wie schon in Kapitel [2] erwähnt, sind die Teleskope als Paraboloid ausgelegt. Diese sollten bei jeder Witterung ihre Form millimetergenau beibehalten, da ansonsten die Beobachtungen fehlerhaft zu werden drohen. Die Oberflächengenauigkeit sollte dabei $1/20$ der beobachteten Wellenlänge ($\sim 3,5\text{cm}$ im X-Band und $\sim 13\text{cm}$ im S-Band) sein, also im Millimeterbereich. Es werden an jeder Station Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchte gemessen, um möglichen Verformungen nachzugehen und Beobachtungen a posteriori zu korrigieren. Auch die Sonneneinstrahlung, Wind und die eigene Schwerkraft der Antenne können zu Verformungen des Paraboloids führen. Einzelne Stationen besitzen ein Radom, eine dünne Hülle die vor Wind und Schnee schützt, Strahlung jedoch durchlässt [Abb. 1].



Abbildung 1: VLBI Station Onsala (SWE)

Um ein gutes Signal-to-Noise Ratio (SNR) zu erreichen, sollte der Durchmesser der Antennenschale so groß wie möglich sein. Je größer die Teleskope allerdings sind, umso langsamer ist ihre Schwenkgeschwindigkeit. Der Durchmesser aktiver VLBI-Antennen beträgt bei den kleinsten 10 Meter und bei der größten Antenne 100 Meter. Voraussetzungen für eine geeignete Radioantenne sind somit eine entsprechende Oberflächengenauigkeit, eine hohe Schwenkgeschwindigkeit, gutes SNR und eine hohe Empfindlichkeit der Empfangseinheit.

(Quelle:

<http://ivs.nict.go.jp/mirror/publications/ar1999/nsoso/>)

1.1.3. Radiosignale

Die Strahlung die von Quasaren ausgesendet und von den VLBI-Antennen empfangen wird, hat eine Frequenz zwischen 0,4 und 22 GHz (H. Schuh et al., 2011), was einer Wellenlänge von 75 – 1,5 Zentimetern entspricht. Radioquellen, die für die VLBI verwendet werden, besitzen eine spektrale Flussdichte von wenigen Milli-Jansky bis 10 Jansky. Im

Vergleich dazu ist das allgemeine Himmelsrauschen 100mal stärker. Daher muss genau festgelegt sein, auf welchen Frequenzen beobachtet wird. In der VLBI werden 2 Frequenzbänder verwendet, X-Band im Bereich von 8,4 GHz und S-Band im Bereich von 2,3 GHz. Grundsätzlich würde ein Frequenzband zur Auswertung der Signale genügen, jedoch wird die zweite Frequenz benötigt um aus den Laufzeitdifferenzen die durch den Einfluss der Ionosphäre verursachte Laufzeitverzögerung des Signales eliminieren zu können.

1.1.4. Stationsuhr, Aufzeichnungseinheit und Korrelator

Um den Ankunftszeitpunkt des Signales genauestens festzustellen und um dieses zu zeitreferenzieren, werden hochgenaue Wasserstoffmaser (H-Maser) oder Cäsium-beziehungsweise Rubidiumuhren verwendet.

Sobald das Signal akquiriert wird, beginnt die Aufzeichnungseinheit mit der Speicherung der Daten. Dies waren jahrelang riesige Magnetbänder, die später auf dem Postweg zur Korrelatoreinheit versandt wurden. Heute werden die Daten auf Festplatten gespeichert und auch über den digitalen Weg versendet.

Die gesammelten Daten der verschiedenen VLBI Stationen werden schließlich in den Korrelationszentren korreliert und ausgewertet und nach einigen Tagen veröffentlicht.

Für „real time“-Auswertungen, auch e-VLBI genannt, müssen die Stationen an Highspeed-Internetverbindung mit einer Datenrate von mindestens 512Mb/s oder schneller angeschlossen sein. Bei solchen speziellen „*Intensive Sessions*“ stehen die Resultate schon nach weniger als einer Stunde zur Verfügung (H. Schuh et al., 2011).

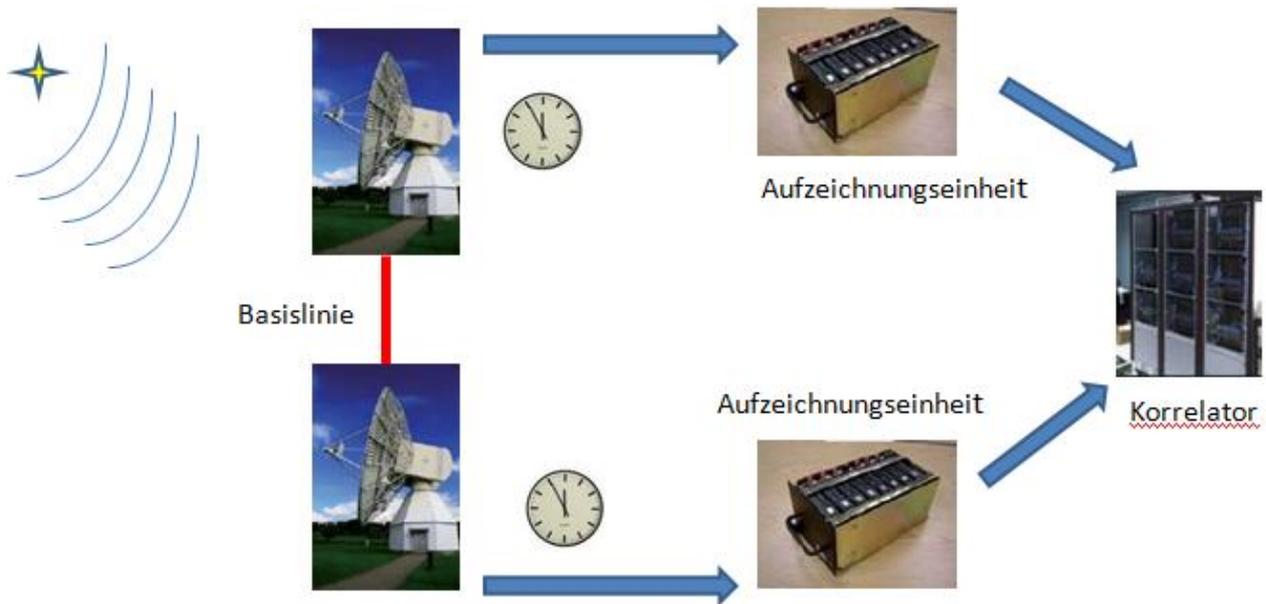


Abbildung 2: Grundprinzip der VLBI

1.1.5. Mathematisches Messprinzip

Nachdem die Stationen ihre Daten an das Korrelationszentrum gesendet haben, wird dort mittels Kreuzkorrelation der für die Auswertung erforderliche Parameter, die Laufzeitverzögerung T_{obs} , errechnet. Dieser „time delay“ wird für jede Basislinie zwischen den teilnehmenden Stationen ermittelt [Abb. 2]. Sie gibt den Unterschied der Empfangszeitpunkte der Radiosignale an den jeweiligen Stationen wieder. Dieser wird jedoch auch schon a priori mit der vereinfachten Formel (1) berechnet, da Stations- und Quellkoordinaten aus dem ITRF (International Terrestrial Reference Frame) und dem ICRF [Kap. 2.1.1.] bekannt sind.

$$T_{comp} = -\frac{1}{c} * \vec{k} * \vec{b} \quad (1)$$

mit

T_{comp} errechnete Laufzeitverzögerung (time delay)

c Lichtgeschwindigkeit

\vec{k} Einheitsvektor zur Radioquelle

\vec{b} Basislinienvektor

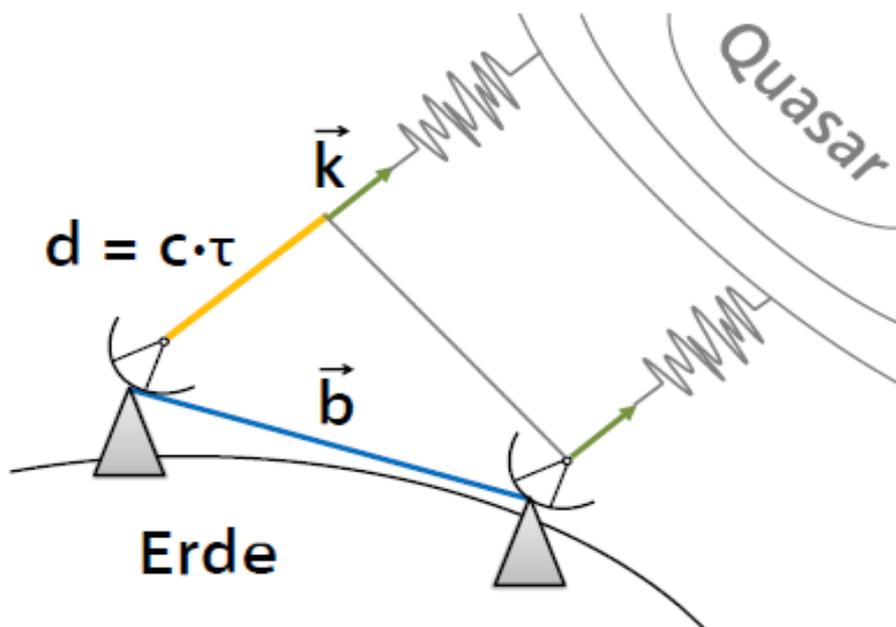


Abbildung 3: Mathematisches Messprinzip

(Quelle: H.Schuh, L. Plank; LV Skriptum der TU Wien, Moderne geodätische Weltraumverfahren, (2011))S. 20)

Aus dem Differenzvektor von $T_{obs} - T_{comp}$ und anschließender Ausgleichung lassen sich Veränderungen der Basislinienlänge sowie der Stations- und Quellenkoordinaten errechnen. Dies ist jedoch nur eine vereinfachte Darstellung, da bei der wahren Auswertung Atmosphärenparameter, gravitative und relativistische Effekte, Stationsbewegungen und die Erdrotation in der Ausgleichung mitgeschätzt werden müssen.

1.2. Globales Stationsnetz

Das weltweite Stationsnetz an VLBI-Stationen umfasst derzeit rund 50 aktive VLBI-Stationen. Die verschiedenen Antennendurchmesser betragen von 10m bis 100m [Kap. 2.1.2.]. Es gibt jedoch nur wenige „reine“ VLBI-Antennen. An den meisten Teleskopen arbeiten auch Wissenschaftler anderer Disziplinen, wie zum Beispiel Radioastronomen, mit. Somit ist auch die Planung von VLBI-Sessions kompliziert. Je mehr Stationen teilnehmen, umso schwieriger wird es einen geeigneten Termin für die 24h Sessions zu finden. Größere Projekte über mehrere Tage oder Wochen sind daher beinahe unmöglich oder nur alle paar Jahre durchführbar. Die Planung der VLBI-Sessions obliegt dem IVS (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry). Dieser stellt unter anderem auch die Messdaten der

ausgewerteten Sessions zur Verfügung. Zu den genannten Zwecken wurde der IVS 1998 als einer der Dienste der IAG (International Association of Geodesy) ins Leben gerufen. Drei Viertel der Antennen befinden sich auf der nördlichen Hemisphäre [Abb. 4]. Dies ist multikausal. Die nördliche Halbkugel bietet doppelt so viel Landfläche und auch die großen Wirtschaftsmächte, die einerseits das Geld für solche Forschungsprojekte und andererseits die ausgebildeten Experten dafür besitzen. Grundsätzlich wird ein homogen verteiltes Stationsnetz angestrebt. Dies ist zwar aus den oben genannten geomorphologischen Gründen nicht machbar, jedoch wird seit einigen Jahren an einer Verbesserung der Stationsnetzverteilung gearbeitet [Kap. 3].

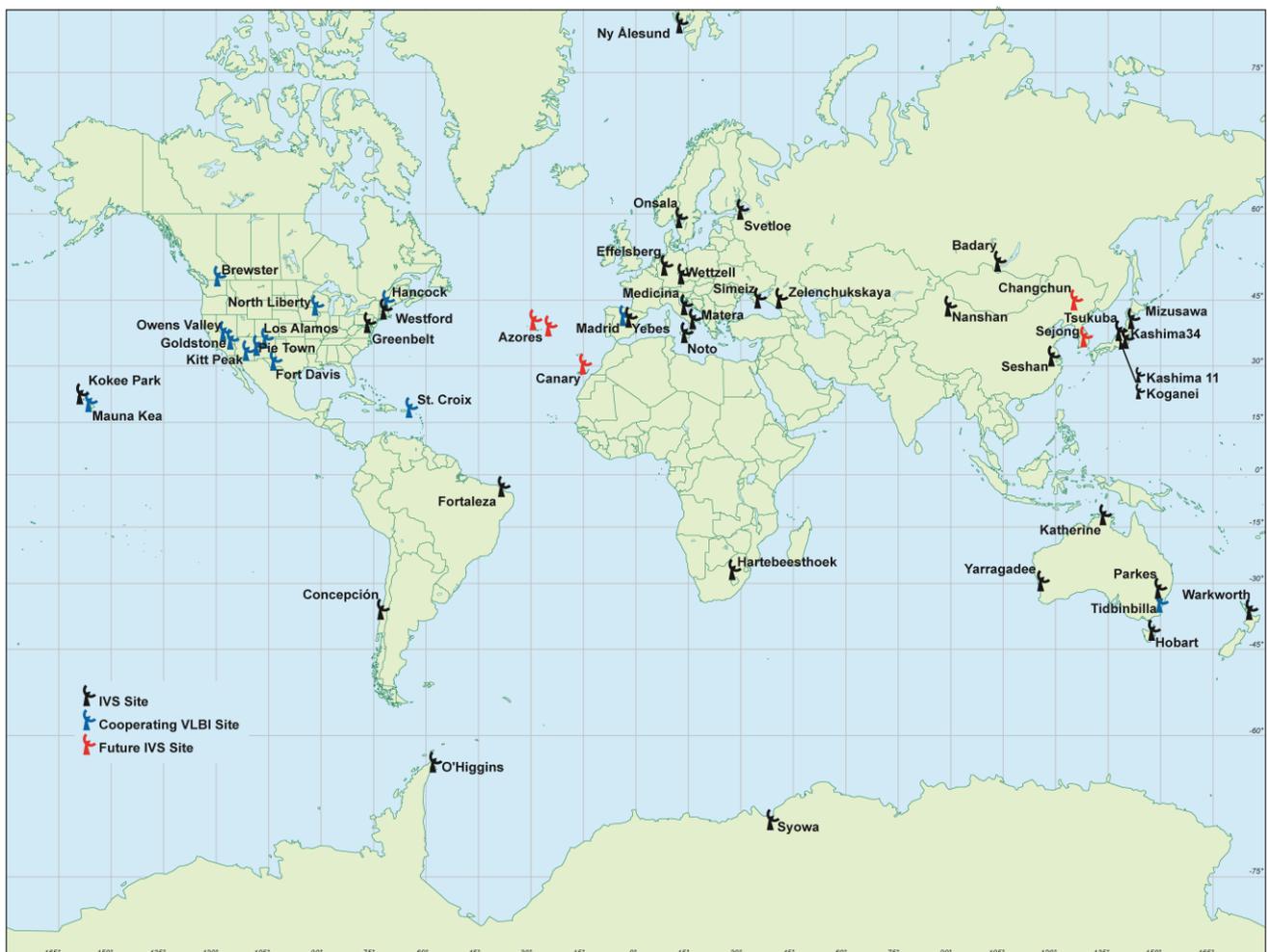


Abbildung 4: VLBI Stationsnetz 2012

(Quelle: <http://ivscc.gsfc.nasa.gov/stations/ns-map.html>)

1.3. VLBI-Produkte

Die Very Long Baseline Interferometry bietet eine Vielzahl an nützlichen Produkten. Aus den VLBI Beobachtungen können die Erdorientierungsparameter (EOP) Nutation,

Präzession, die 2 Polkoordinaten und die tatsächliche Tageslänge (UT1 – UTC) bestimmt werden.

Für die Messung von UT1 (Length of Day) sowie Nutation und Präzession ist die VLBI unverzichtbar. Kein anderes Weltraumverfahren kann diese Werte so gut bestimmen wie die VLBI. Auch die Koordinaten von Quasaren im ICRF können nur durch dieses Verfahren ermittelt werden. In naher Zukunft ist auch keine Alternative zum Bestimmen dieser Parameter absehbar. Diese Produkte mit den jeweiligen Genauigkeiten im Jahr 2010 sind in Tabelle 1 angeführt (H.Schuh, J. Böhm, 2013).

Weiters können die Stationskoordinaten im ITRF und daraus Stationsbewegungen berechnet werden. Durch Zeitserien von Basislinien ist es möglich auch die tektonischen Plattenbewegungen auf der Erde nachzuvollziehen [Abb. 5]. Diese Resultate können mit Ergebnissen aus GNSS-Auswertungen verglichen werden, sofern sich an beiden Stationen ebenfalls eine GNSS-Messeinheit befindet. Mittels VLBI wurde zum Beispiel nach einem verheerenden Erdbeben 2010 in Chile eine Erdoberflächenverschiebung um 3 Meter festgestellt. Stationspositionsänderungen können jedoch auch durch Deformationen der Erdkruste an Bruchlinien, durch die postglaziale Landhebung oder Vulkanausbrüche verursacht werden.

Weiters ist es möglich über den Zenith Wet Delay (Luftfeuchte in zenitaler Richtung) Klimastudien über mehrere Jahrzehnte zu errechnen (Heinkelmann, 2008).

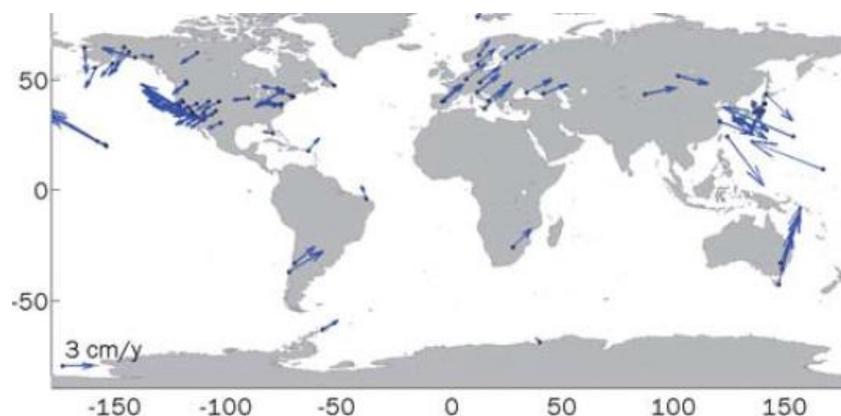


Abbildung 5: Weltweite Stationsbewegungen

(Quelle: H. Schuh, J. Böhm; Sciences of Geodesy – II, Kapitel 7 Very Long Baseline Interferometry in Geodesy and Astrometry S.368, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013)

Polbewegung (x_p, y_p)	50 – 80 μs
UT1 – UTC	3 – 5 μs
UT1 – UTC (Intensives)	15 – 20 μs
Nutation und Präzession (dX, dY)	50 μs
TRF (x, y, z)	5 mm
CRF (α, δ)	40 – 250 μs

Tabelle 1: VLBI Produkte und ihre Genauigkeiten

(Quelle: H. Schuh, J. Böhm (modifiziert von Schlüter und Behrend, 2007); Sciences of Geodesy – II, Kapitel 7 Very Long Baseline Interferometry in Geodesy and Astrometry S.366, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013)

1.3.1. Genauigkeit der VLBI

Seit dem Beginn der ersten VLBI-Sessions hat sich die Genauigkeit rapide gesteigert. Waren die ersten Ergebnisse in den 60er und 70er Jahren noch im Dezimeterbereich, so wurde durch Weiterentwicklung der Systeme, der Antennen und der Methoden die Genauigkeit um die Jahrtausendwende auf den Subzentimeter gesenkt. Die Anforderung für die kommenden Jahre ist aber die Messungen auf den Millimeter genau auszuwerten [Kap. 3]

1.4. Zusammenfassung

Als eines der sechs großen Weltraumverfahren (GNSS, DORIS, SLR, LLR, Altimetrie und VLBI) profiliert sich die Very Long Baseline Interferometry mit ihren einzigartigen Produkten [Kap. 2.3.]. Sie gilt als noch junges Weltraumverfahren, allerdings wird viel Zeit und Geld investiert um sie noch leistungsfähiger und effizienter zu gestalten. Weltweit wird von Wissenschaftlern viel Werbung betrieben, um mehr Antennen zu bauen und das Stationsnetz noch homogener zu gestalten mit dem Ziel der Genauigkeitssteigerung der berechenbaren Parameter.

2. VLBI 2010

Aufgrund steigender Anforderungen, einem langsam alternden System und immer besser werdenden Technologien haben Anfang des ersten Jahrzehnts der 2000er Jahre die Spezialisten des IVS das Projekt VLBI 2010 ins Leben gerufen. Um die VLBI zu revolutionieren und in den kommenden Jahren das große Ziel zu erreichen, die Positions- und die Driftgenauigkeit der Station auf 1mm beziehungsweise 0,1mm pro Jahr zu steigern, wurde im September 2005 die IVS Working Group 3 „VLBI 2010“ eingerichtet. Diese Expertengemeinschaft setzte sich das Ziel, die alten überholten Antennen und Systeme, die hohe Kosten mit sich brachten, durch neuere billigere und vor allem schnellere Antennen zu ersetzen und an Highspeed Netzwerke anzuschließen. Dies soll auch zu einer erhöhten Automation führen.

Die Grundlage für Kapitel [2] bildet die Arbeit von A. Neill, A. Whitney, B. Petrachenko, W. Schlüter, N. Vandenberg, H. Hase, Y. Koyama, C. Ma, H. Schuh, G. Tuccari (1).

2.1. Ziele und Anforderungen

2005 bestand die Herausforderung das damalige VLBI-System und -Netzwerk so zu überarbeiten, dass es den modernen Anforderungen des 21. Jahrhunderts gerecht wird. In den letzten 30 Jahren wurden Fortschritte beim Bau der Antennen, bei der digitalen Elektronik sowie in der Datenübertragungstechnologie erzielt. Diese Verbesserungen galt es in das bestehende Netz zu verankern und beim Ausbau der Stationen einzubauen. Dadurch erhoffte man sich bessere Genauigkeiten, höhere Zuverlässigkeit und kürzere Wartezeiten auf die Produkte.

2.1.1. Problematik des alten Systems

Der Großteil der heute verwendeten Antennen ist während den Anfängen der VLBI in den 1970er und 1980er Jahren entwickelt worden. Im Laufe der Jahre wurde die Apparatur immer weiter verbessert und ist bereits an die Grenzen des Ausbaus gestoßen. Die immer öfter notwendig werdenden Wartungsarbeiten an den Stationen sind sehr kostspielig. Diese alten Antennen besitzen auch noch sehr niedere Schwenkgeschwindigkeiten. Somit ist es kaum möglich während einer Session Quellen über das ganze Firmament zu messen.

In den letzten Jahren wurde außerdem die Radio Frequency Interference (RFI), Funkstörungen im Bereich des S-Bandes, immer stärker. Diese reduzieren die Sensitivität und erhöhen das Risiko von Messabweichungen.

Des Weiteren ist die globale Stationsverteilung nicht ideal und es gibt immer wieder sehr große Lücken zwischen den Antennen, die zur Bestimmung des ITRF sowie den EOP's (Erdorientierungsparametern) nicht von Vorteil sind.

Mit den älteren Stationen ist es leider auch nicht möglich Messungen unbemannt durchzuführen, also die Antenne während einer Session von einer anderen Station aus zu steuern. Dies würde die Personalkosten senken und gleichzeitig der Planung mehr Flexibilität verleihen.

Schließlich dauert die Auswertung der finalen Produkte im alten System mit den Magnetbändern sehr lange, da diese über den Postweg zu den Korrelatoren einige Tage benötigen. Eigentlich werden in der heutigen Zeit Ergebnisse in beinahe Real Time erwünscht.

2.1.2. Neueste Entwicklungen

Durch die technischen Fortschritte des 21. Jahrhunderts eröffnen sich viele Verbesserungsmöglichkeiten und Erneuerungen, die für das Projekt VLBI 2010 genutzt werden können. Nicht nur durch die VLBI, sondern auch durch andere Forschungsrichtungen wurde die Entwicklung der Antennen und Teleskope immer weiter vorangetrieben. So sind die heutigen Antennen kleiner, schneller, um vieles billiger und somit auch leistbar für Staaten mit weniger Forschungsinvestitionen.

Die rasende Entwicklung in der Computertechnologie macht es möglich die Datenkapazität enorm zu erhöhen und dies obendrein zu einem günstigeren Preis. Mit dem globalen Glasfasernetzwerk ist ein Datentransfer direkt zu den Korrelationszentren realisierbar. Hinzu kommen noch große Fortschritte in der digitalen Signalbearbeitung, die die Stabilität, Wiederholbarkeit und Berechenbarkeit verbessern.

Letztendlich dienen auch die immer engere Zusammenarbeit verwandter Disziplinen und die Erkenntnisse daraus zur Entwicklung neuer Methoden und Systeme.

2.1.3. Konkrete Zielsetzung

Die IVS Working Group 3 erarbeitete in ihrem Bericht drei klare Ziele (A. Neill et al., 2005):

- Die Stationspositionsgenauigkeit von 1mm und eine Driftgenauigkeit von 0,1mm pro Jahr im ITRF
- Kontinuierliche Messungen der Erdorientierungsparameter
- Erstergebnisse sollen innerhalb weniger Stunden abrufbar sein

Diese Herausforderungen sollen aber auch unter dem Blickpunkt folgender Kriterien bewältigt werden: Die Kosten des Aus- beziehungsweise Umbaus der Stationen sowie die Betriebskosten sollen niedrig gehalten werden und dies unter dem Aspekt der schnelleren Auswertung der Messergebnisse und schnellerem Bereitstellen der Produkte.

2.1.4. Herausforderungen für das neue System

Um die in Kapitel [3.1.3.] genannten Ziele umzusetzen wurde eine Vielzahl an Möglichkeiten ausgearbeitet und untersucht, die zur Verbesserung des Systems beitragen:

- Bau von kleineren, schnelleren low-cost-Antennen
- Optimierung der verwendeten Beobachtungsfrequenzen
- Untersuchung aller bestehenden Antennen
- Modernisierung des Datenakquirierungssystems zur höheren Stabilität und Zuverlässigkeit, sowie einer größeren Bandbreite
- Datenübertragung über Highspeed Netzwerke (e-VLBI)
- Neue Beobachtungsstrategien
- Automation der Beobachtungen, unbemannte Stationen
- Verbesserung der Korrelatoren
- Verbesserung der Modelle für die Datenanalyse
- Automation der Datenprozessierung

2.2. Strategien und Untersuchungen

Zur Umsetzung der in Kapitel [3.1.3.] beschriebenen Ziele werden eine Vielzahl an Strategien und Untersuchungen durchgeführt. Die in den nächsten Kapiteln beschriebenen

Analysen dienen hauptsächlich dazu die geforderte Positionsgenauigkeit von 1mm zu erreichen.

2.2.1. Reduktion des zufälligen Fehlers der Laufzeitverzögerung

Der zufällige Fehler der Laufzeitverzögerung beschränkt überwiegend die Höhengenaugigkeit auf etwa 3 mm. Die Hauptbeitragenden dafür sind der direkte Laufzeitverzögerungsmessfehler pro Beobachtung, das stochastische Verhalten der Troposphäre sowie das stochastische Verhalten des Frequenzstandards. Diese drei Faktoren sind stark miteinander korreliert, deshalb ist es schwer diese Fehler einzeln zu reduzieren.

Um den direkten Laufzeitverzögerungsmessfehler zu verbessern, muss das Störrauschen der Instrumente laut WG 3 Report etwa 4 Picosekunden betragen. Dies kann durch ein verbessertes Signal-to-Noise Ratio erreicht werden. Eine weitere Möglichkeit wäre auf ein weiteres (höheres) Frequenzband, zum Beispiel Ka-Band (32 GHz), umzusteigen oder mehrere neue Frequenzbänder im Bereich zwischen 1GHz bis 14GHz einzuführen.

Der Einfluss der Troposphäre ist einer der am schwierigsten handzuhabenden Effekte der geodätischen Weltraumverfahren. Es ist sehr schwer die Troposphäre zu modellieren. Die atmosphärischen Verzögerungen hängen dabei sehr stark von der Genauigkeit der Modelle ab. Jedoch haben Forschungen ergeben, dass mit meteorologischen, numerischen Wettermodellen die Parameter von analytischen Mappingfunktionen oder numerische Beziehungen zwischen den Beobachtungen in verschiedenen Richtungen die notwendige Genauigkeit für die Troposphärenmodelle erhöht werden können.

Eine zusätzliche Information bietet ein Wasserdampfradiometer an der VLBI-Station.

2.2.2. Zunehmende Beobachtungsdichte

Eine steigende Anzahl an Beobachtungen pro Zeiteinheit bringt laut Simulationen des Internationalen VLBI-Service eine Vielzahl von Vorteilen.

- Aufgrund einer hohen Anzahl an bestimmbarern Parametern im Vergleich zur Anzahl der Beobachtungen wirkt sich eine steigende Beobachtungsdichte positiv auf die

Robustheit der Ausgleichung aus. Dies erhöht auch den Freiheitsgrad und da die nicht modellierten Fehler unabhängig sind, werden die finalen Ergebnisse exakter.

- Eine Mehrzahl an Beobachtungen ermöglicht die Verbesserung der Genauigkeit von geophysikalischen und instrumentalen Modellen. Es muss jedoch ein Mittelweg zwischen der erhöhten Parametrisierung zur Verringerung von nicht modellierten Effekten und einer maximalen Parametrisierung zur Steigerung der Robustheit der Ausgleichung gefunden werden.
- Eine höhere Beobachtungsdichte bietet die Möglichkeit die Troposphärenparameter besser zu schätzen.
- Eine effektivere Planung der Beobachtungen (Scheduling) verringert die Korrelation zwischen der troposphärischen Laufzeitverzögerung, dem Uhrenfehler und der vertikalen Komponente der Basislinie. Diese Parameter können durch eine größere Anzahl an Beobachtungen in der Ausgleichung weitgehend unkorreliert behandelt werden.

2.2.3. Reduktion der systematischen Fehler

Um eine Stationsgenauigkeit von 1 Millimeter zu erreichen ist es notwendig die Summe aller systematischen Fehlereinflüsse kleiner als 1mm zu halten. Folgende Fehlereinflüsse müssen dabei beachtet werden:

- Instrumentenfehler (z.B. Temperatur und Spannungsfehler in den analogen Komponenten)
- Mechanische Fehler (z.B. thermische oder gravitative Formänderung der Antenne)
- Loading Effekte (Atmosphäre, Ozeane, usw.)
- Fehler in der Quellenstruktur

Zur Verringerung dieser Fehler ist es nötig Kalibrationen der Instrumente häufiger und noch exakter vorzunehmen, wie auch öfter Wartungsarbeiten durchzuführen. Zusätzlich können gute Antennenmodelle die Fehler minimieren.

An die Antennen wird die hohe Anforderung gestellt über mehrere Dekaden ihre Stabilität und Struktur millimetergenau unter allmöglichen Witterungsverhältnissen einzuhalten.

Zur Überprüfung der Antennenstruktur kann mittels eines fixen externen Referenzpunktes der Antennenreferenzpunkt jederzeit kontrolliert werden.

Fehler in der Quellenstruktur können durch eine größere Anzahl an Quellen, welche für VLBI Messungen verwendbar sind, gesenkt werden. Dies führt zu einer besseren Verteilung und dadurch zu einer robusteren Verbindung zum ICRF.

2.2.4. Aufstockung und bessere geographische Verteilung der VLBI-Stationen

Eine Vergrößerung der Anzahl an GNSS-Stationen sowie eine bessere geographische Verteilung dieser hat bewiesen, dass sich Investitionen in diesen Bereichen lohnen. Liegt die horizontale Genauigkeit global nur bei 3 – 5mm, so ist die Wiederholbarkeit in regionale GNSS-Netze mit etwa 1000km Stationsabstand etwa 1 – 2mm. Ein dichteres Netz bringt somit bessere Messergebnisse.

Das VLBI-Netzwerk war zu Beginn des Projekts VLBI 2010 im Jahr 2005 sehr inhomogen und schlecht verteilt [Abb. 6]. Südamerika, Afrika und Asien hatten kaum Stationen und nicht die Mittel welche zu errichten. Eine gute homogene Stationsverteilung ist ein wesentlicher Bestandteil um eine Positionsgenauigkeit von 1mm zu erreichen. Vor VLBI 2010 lag die horizontale Genauigkeit bei 1,5 – 3mm. Nützt man GNSS und VLBI in Kombination so würden Stationen, welche beide Weltraumverfahren nützen, in einem Abstand von 2000km genügen um die geforderte Stationsgenauigkeit von 1 mm zu erreichen. Diese Stationsaufteilung würde global etwa 40 Antennen erfordern; davon 14 in Eurasien, 7 in Afrika, 6 in Nordamerika, 6 in Südamerika, 2 in Australien, 2 in der Antarktis, 2 im südlichen Pazifik und eine in Grönland.

Die minimalste denkbare Verteilung wäre 3 Stationen pro vorher genannten Kontinent; das bedeutet 3 in Nordamerika, 3 in Südamerika, 6 in Eurasien, 3 in Australien, 3 in Afrika und jeweils eine in Grönland und in der Antarktis. Somit würden 20 Stationen genügen.

Darüber hinaus sollte darauf geachtet werden möglichst viele dieser Stationen mit GNSS, VLBI und SLR (Satellite Laser Ranging) auszurüsten

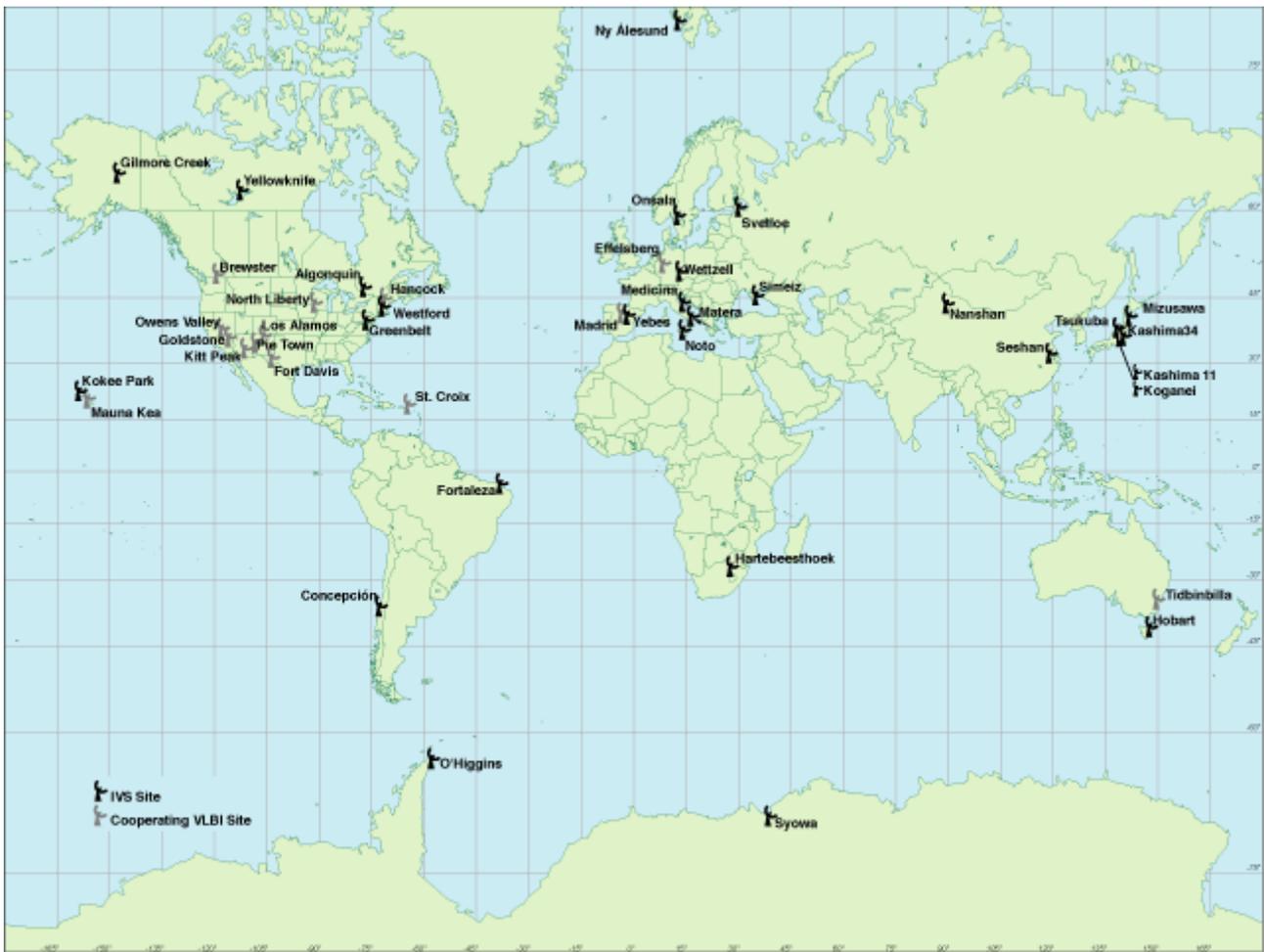


Abbildung 6: Stationsnetzwerk 2005

(Quelle: <http://ivscc.gsfc.nasa.gov/stations/ivsnetmap.gif>)

Seit des WG 3 Reports des IVS ist schon eifrig an der Ausweitung des VLBI-Netzwerkes gearbeitet worden. Bis zum Jahr 2012 sind 9 neue, beziehungsweise aufgewertete, Stationen in das globale Netz aufgenommen worden [Abb. 7]. Eine der neuen Stationen ist unter anderem das Teleskop in Warkworth/Neuseeland, von welchem diese Arbeit handelt. Bis 2017 stehen noch ein weiterer Ausbau und Aufwertungen rund 25 diverser Station auf dem Plan [Abb. 8]. Ob dieser Ausbau planmäßig durchgeführt wird, hängt nicht nur vom Internationalen VLBI-Service ab, sondern auch zu einem Großteil von der Politik und der wirtschaftlichen Stellung der Länder in den nächsten Jahren. Es bleibt zu hoffen, dass die Mehrzahl der Projekte durchgeführt werden kann und das Ziel des Projekts VLBI 2010, die geforderte 1mm Stationspositionsgenauigkeit, erreicht wird.



VLBI2010 very fast

😊 radio telescope

😊😊 twin radio telescope

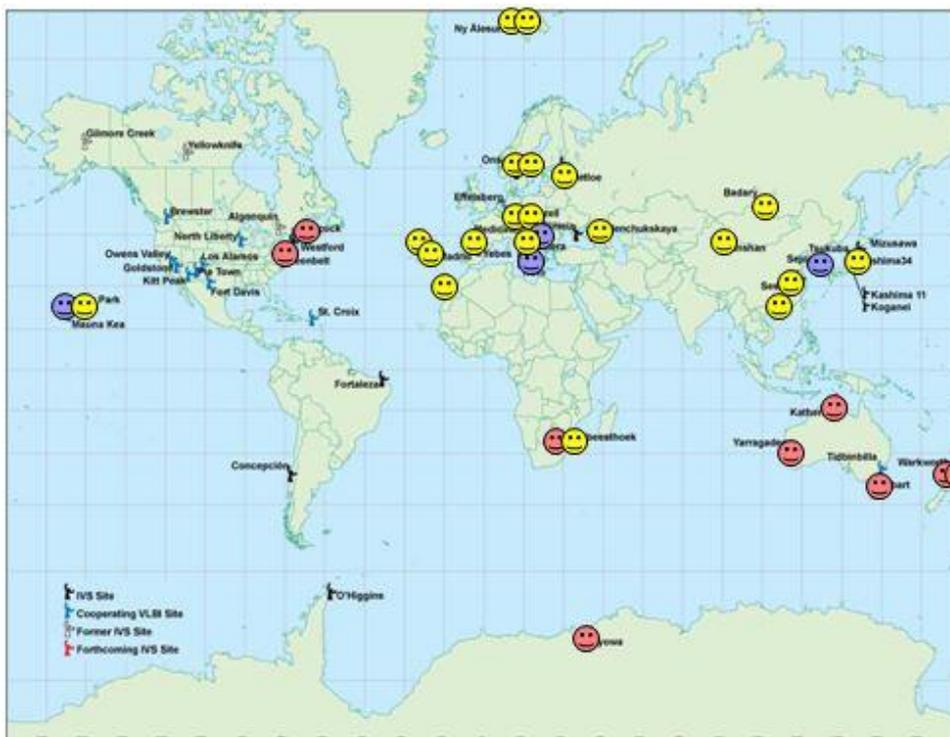
😞 radio telescope

upgrade legacy

😞 radio telescope

Abbildung 7: Stationsnetzwerk 2012

(Quelle: H. Hase et. al.; The future global VLBI 2010 network of the IVS; 20th EVGA Meeting Bonn; 2011)



VLBI2010 very fast

😊 radio telescope

😊😊 twin radio telescope

VLBI2010 fast

😞 radio telescope

upgrade legacy

😞 radio telescope

Abbildung 8: Stationsnetzwerk 2017

(Quelle: H. Hase et. al.; The future global VLBI 2010 network of the IVS; 20th EVGA Meeting Bonn; 2011)

2.2.5. Reduzieren von Messfehlern aufgrund externer Interferenzen

Durch den immer größer werdenden Bedarf an Frequenzbändern in der Technik der letzten Jahre und Jahrzehnte, zum Beispiel durch Mobiltelefonie, kommt es im Bereich von VLBI-Stationen zu Störungen durch andere Radio Frequenzen, die sogenannte Radio – Frequency Interference (RFI). Vor allem im S-Band kommt es häufig zu solchen Interferenzen, die zu fehlerhaften Messungen führen können. Es gibt zwei Optionen um diesem Problem so gut wie möglich aus dem Wege zu gehen:

- Man will die derzeitigen zwei verwendeten Frequenzbänder S-Band (2,3 GHz) und X-Band (8,4 GHz) auf ein großes Intervall von 1 – 14 GHz ausweiten. In diesem Bereich sollen Bänder ausgewählt werden, die frei von jeglichen Interferenzen sind. Dies ist allerdings nur mit neuen Breitband-Antennen möglich, die sehr geringe Signale gut verstärken können.
- Die Alternative wäre alle möglichen Frequenzbänder aufzunehmen, so dass die durchschnittliche Datenrate ausreichend SNR erträgt und anschließend die Frequenzen, die RFI enthalten, vom Korrelationsprozess ausschließen.

2.2.6. Neue Beobachtungsstrategien entwerfen

In einem globalen Netz von kleinen, schnell drehenden Antennen besteht die Möglichkeit eine weitaus höhere Anzahl an Quellenbeobachtungen durchzuführen. Laut Petrachenko et. al (2005) wird von einem Faktor 5 oder höher ausgegangen, was über 1000 Beobachtungen pro Tag bedeuten würde. Außerdem führt die stetige Verbesserung der Genauigkeit der Daten anschließend auch dazu bessere Modelle (z.B. Atmosphäre) zu berechnen, die folglich zur Verbesserung der Beobachtungsstrategien führen sollen.

Die neuen, kleineren, schnelleren Antennen haben zusätzlich den Vorteil, dass sie bedeutend billiger sind als ihre Vorgänger. Dies bietet die Möglichkeit zwei Antennen an einer Station zu bauen, sogenannte Twin Telescopes [Abb. 9]. Die Vorteile dabei sind, dass die Beobachtungsdichte enorm gesteigert werden kann, da eine Antenne eine Quelle beobachten kann, während die andere zu einer neuen Quelle schwenkt. Die Mehrzahl an Beobachtungen kann wiederum helfen die systematischen Fehler, die durch die Atmosphäre verursacht werden, zu verringern. Schließlich ist die Station zu 99% vor

Ausfällen geschützt, da bei Störungen einer Antenne diese repariert werden kann während die andere den Beobachtungsplan weiterhin problemlos ausführt.



Abbildung 9: Twin Teleskop Wetzell (GER)

2.2.7. Datenanalyse verbessern

Die stetige Analyse der Daten bringt in Zukunft gesehen eine Verbesserung der Modelle und der Strategien.

Modelle im Bereich der Geophysik (Atmosphäre, Loading Effekte, Hydrologie), Astronomie (Quellenstruktur) und Mechanik (thermische und gravitative Deformation der Antenne) können immer weiter verfeinert werden.

Zusätzlich werden aus der Datenanalyse Strategien verbessert und neue ausgearbeitet.

Dazu gehören:

- Erhöhung der Robustheit und Zuverlässigkeit der VLBI-Ergebnisse
- Entwicklung gemeinsamer Ergebnisse von ITRF, EOP's und ICRF

- Untersuchung der Unterschiede in verschiedener Auswertesoftware
- Errechnen von Phasenverzögerungsergebnissen für alle Basislinienlängen

2.3. Empfehlungen für VLBI 2010

Aus den in Kapitel [3.2.] erläuterten Strategien und Untersuchungen, die zur Verbesserung der Stationspositionsgenauigkeit auf 1mm beitragen sollen, haben die Spezialisten der „Working Group 3“ ein Konzept für das Projekt VLBI 2010 ausgearbeitet. Das Kernstück dabei bilden die schnellen kleinen „low-cost“-Antennen und das darauf angepasste Beobachtungssystem verknüpft mit einem Highspeed-Internetanschluss. Zusätzlich soll der Vorgang von der Datenakquirierung zur Endauswertung bestmöglich automatisiert werden.

Die Standardcharakteristika der Teleskope sind:

- 10 – 12 Meter Antennendurchmesser
- Schwenkgeschwindigkeit $>5^\circ/\text{sec}$ in Elevation und Azimut
- Dual-Polarisation Empfangseinheit
- Kontinuierliche Radiofrequenzbänder zwischen $\sim 2 - 14$ GHz
- Übertragbare Datenrate von bis zu 32 Gbit/s
- Wasserstoffmaser (H-Maser) als Stationsuhr bzw. Frequenzstandard
- 20 – 40 Antennen im globalen VLBI – Netzwerk, im Idealfall mit anderen geodätischen Weltraumverfahren an einer Station
- Auswertung der Daten und Veröffentlichung der Ergebnisse in so gut wie Echtzeit

2.3.1. Antenneneigenschaften

Die neue Generation der kleinen Antennen bietet eine Vielzahl an positiven Eigenschaften. Eine der wichtigsten Merkmale sind die hohen Schwenkgeschwindigkeiten von 5 Grad pro Sekunde in Elevation und Azimut. Das ermöglicht der Antenne in weniger als 30 Sekunden fast alle Quellen am Firmament anzuzielen und erhöht so die Beobachtungsdichte während den Sessions signifikant.

Durch den geringeren Antennendurchmesser, verglichen zum Großteil der Antennen älterer Generationen, können allerdings schwache Quellen nicht mehr verwendet werden, da das Signal-to-Noise Ratio zu schwach ist. Aufgrund der höheren Schwenkgeschwindigkeiten

und der großen Bandbreite wird dieses Faktum aber nebensächlich, da man durch die schnelleren Rotationen in den Beobachtungspausen und das größere Frequenzbandintervall aus mehr Quellen auswählen und so die Quasare mit starken Signalen anzielen kann.

Die kleinere und kompaktere Bauweise macht die neuen Antennen auch unempfindlicher bei windigen Bedingungen. Die Antennenform wird durch eine steifere Konstruktion besser gehalten und hält so die geforderte Formgenauigkeit von 0,1mm für längere Perioden. Reparaturen und Kalibrierungen durch Verschiebung des Antennenreferenzpunktes sollen dadurch so selten wie möglich anfallen.

Schließlich ist die schon mehrmals erwähnte Kostenersparnis beim Kauf der Antennen zu erwähnen, die es auch finanziell weniger potenten Staaten ermöglicht eine VLBI-Station zu bauen.

2.3.2. Frequenzbandintervall

Die neuen Antennen bieten die Möglichkeit nicht nur im X-Band im Bereich von 8,4 GHz und S-Band im Bereich von 2,3 GHz Signale zu empfangen, sondern im ganzen Frequenzbandintervall zwischen ~2 GHz und 14 GHz. Dieser Bereich wurde aus mehreren Gründen ausgewählt. Einerseits beinhaltet er sowohl S- wie X-Band, andererseits lassen sich Gruppenlaufzeitverzögerungen über einen breiteren Radiofrequenzbereich bestimmen und schließlich bietet dieses Intervall die Option jene Radiosignale zu verwenden, die frei von Interferenzen sind. Ein weiterer Vorteil wäre, wenn es VLBI-Antennen GNSS-Signale empfangen könnten, die knapp über 1 GHz senden. So könnte der GNSS- bezogene Referenzrahmen mit dem VLBI- bezogenen Referenzrahmen direkt in Beziehung gebracht werden.

Ursprünglich wäre auch die Variante mit einem weiteren Frequenzband (Ka-Band bei 32 GHz) in Betracht gezogen worden. Diese Variante hätte den Vorteil gehabt, dass es die gleichen Frequenzen genutzt hätte wie das neue „NASA tracking System“.

Die Modifikation des Frequenzbandintervalls auf ~1 GHz bis 14 GHz ist jedoch leichter umsetzbar, billiger und besitzt eine höhere Empfindlichkeit der Empfangseinheit. Der

wichtigste Unterschied ist allerdings, dass es mit dem alten S/X-Band System kompatibel ist.

2.3.3. Datentransfer

Das neue Datentransfersystem besteht einerseits aus den bestehenden Harddisks, die durch Verbesserung über eine Speicherkapazität bis zu einigen Gbit/s verfügen, und andererseits einem Highspeed-Internetnetz, das die VLBI-Station direkt mit der Korrelatoreinheit verbindet. Stationen mit diesem Anschluss haben somit die Möglichkeit ihre Daten für „real time“-Auswertungen direkt zum Korrelator zu senden. Dadurch können die berechneten EOP's in wenigen Stunden zur Verfügung gestellt werden. Stationen, denen es nicht möglich ist an einen Highspeed-Internetanschluss zu gelangen (zum Beispiel O'Higgings in der Antarktis), bieten die neuen Harddisks das Potential mehrere Tage oder Wochen unbeaufsichtigt zu beobachten, bevor diese anschließend an die Korrelatoreinheit zur Auswertung gesendet werden.

2.3.4. Verbesserung der Datenanalyse

Um das Ziel, die Positionsgenauigkeit der Stationen auf 1mm, zu erreichen, muss nicht nur die Hardware, sondern auch die Software immer weiterentwickelt werden. So sind die Modelle, welche in den verschiedenen Auswertesoftwaren implementiert sind, immer weiter ergänzt und verbessert worden. Bezogen auf die Troposphäre gibt es neue Mapping-Funktionen, Gradienten - und Turbulenzen Modelle.

Die Verfeinerungen der Massen-Ladung und der Gezeiten-Modelle erlaubt es lokale Modelle für die Regionen der VLBI-Stationen zu entwerfen.

Um die Formgenauigkeit der Antenne in den Modellen zu berücksichtigen sind Konzepte zur thermalen Deformation entworfen worden. Diese benötigen eine Referenztemperatur, von der die Deformationen berechnet werden können. Aufgrund der neuen kleineren Antennen fällt somit der gravitative Einfluss auf die Deformation nicht mehr so stark ins Gewicht, sollte aber dennoch berücksichtigt werden, vor allem bei älteren Stationen mit größeren Antennendurchmessern.

Zusätzlich zur Verbesserung der genannten Modelle werden auch neue Analyse Strategien entwickelt:

- Die Resultate der VLBI-Lösungen sollen robuster und zuverlässiger werden. Da in den letzten Jahren immer mehr Parameter in der Ausgleichung zu schätzen sind, verlor diese an Robustheit und einzelne fehlerhafte Beobachtungen haben sich stärker auf das Ergebnis ausgewirkt als früher. Um die Qualität der Ergebnisse aufrechtzuerhalten muss die Ausgleichung mittels neuer Analysestrategien und Scheduling-Plänen überarbeitet werden.
- In Zusammenarbeit mit allen anderen geodätischen Weltraumverfahren sollen im Zuge von GGOS (Global Geodetic Observing System) ITRF, ICRF und die EOP konsequent und dauerhaft bestimmt werden können.
- Infolge der immer größer werdenden Anzahl an Auswertesoftwareprogrammen kann durch Untersuchungen und Vergleiche der Ergebnisse der Programme Unterschiede ermittelt werden. Aus den Erkenntnissen können anschließend die Programme adaptiert und die Qualität der Auswertungen verbessert werden.
- Unter sehr speziellen Bedingungen können aus Beobachtungen die Phasenverzögerung bestimmt und daraus die Basislinien berechnet werden. Dafür müssen allerdings die Stationen ihre Hardware mit phasenstabilen Komponenten aufrüsten. So könnte dieses Verfahren in den nächsten Jahren eine praktikable Alternative werden.

2.3.5. Automation des Mess- und Auswertevorganges

Grundsätzlich wird eine Automation des kompletten Beobachtungsvorganges und dem Datentransfer bis zum Korrelator angestrebt. Trotzdem gibt es einige Bereiche in denen eine völlige Automation kritisch ist. Es fehlt an Flexibilität, sollten Stationen, bei denen unerwartet Fehler auftreten, entfernt oder ersetzt werden. Auch auf etwaig auftretende Radiofrequenz-Interferenzen kann nicht reagiert werden.

Im Allgemeinen soll der Ablauf aber so weit wie möglich automatisiert werden, da dies eine der Voraussetzungen ist um die Resultate der Erdorientierungsparameter in Echtzeit zu berechnen und zur Verfügung zu stellen.

Wie die Automation von der Beobachtung bis zur Korrelation funktionieren soll, wird in Abbildung [10] illustriert. Die Stationen Onsala(SWE) oder Metsähovi(FIN) nehmen an einer Intensive-Session mit der Station Tsukuba (JPN) teil. Sobald die Beobachtungen getätigt

sind, werden die Daten automatisch aus Europa per Highspeed-Internetverbindung zum Korrelator (der in Tsukuba vor Ort steht) gesendet. Gleichzeitig überträgt die Antenne in Tsukuba ihre Daten ebenfalls automatisch an den Korrelator, der schließlich die Daten auswertet und die Resultate der EOP's veröffentlicht.

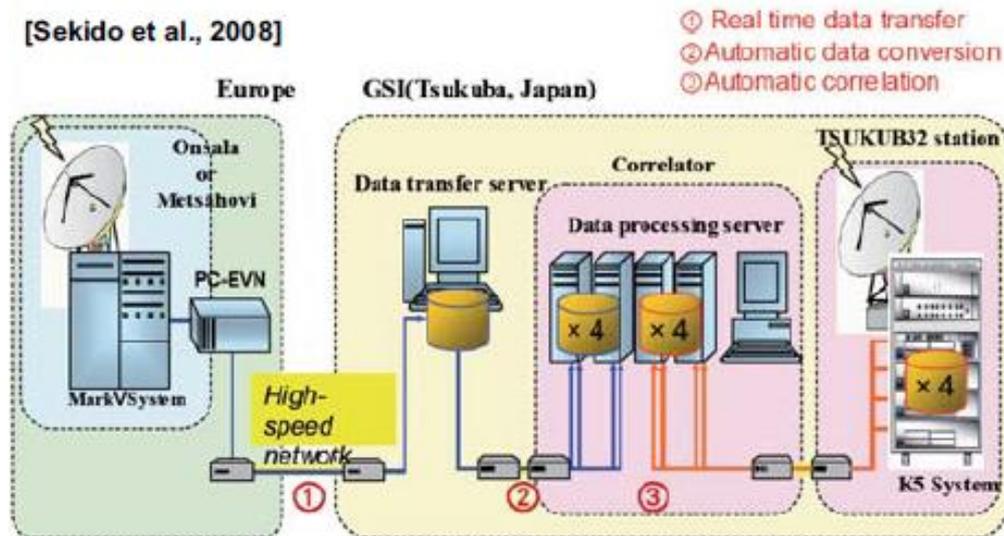


Abbildung 10: Automation der VLBI

(Quelle: M. Sekido, H. Takiguchi, Y. Koyama, T. Kondo, R. Haas, J. Wagner, J. Ritakari, S. Kurihara, K. Kokado; Ultra-rapid UT1 measurement by e-VLBI; Earth Planets Space 60(8): 865-870; 2008)

2.4. Status Quo VLBI 2010

Der Ausbau der VLBI Stationen weltweit geht stetig voran. In den letzten Jahren sind einige neue Stationen, zumeist neue kleine 12 Meter Antennen, in das globale Netz eingebunden worden. Beispiele dafür sind neue Antennen auf der südlichen Hemisphäre in Australien und Neuseeland [Abb. 11]. Außerdem ist das erste Twin-Teleskop in Wettzell [GER] in Betrieb genommen worden [Abb. 9].

Ein weiterer großer Schritt in Richtung Positionsgenauigkeit der Stationen auf 1mm wurde durch die Monte Carlo-Simulation gesetzt. In dieser wurden spezielle Faktoren, wie der Einfluss der Atmosphäre, Turbulenzmodelle, Schwenkgeschwindigkeiten der Antennen, Qualität der Maser und Beobachtungspläne untersucht und mittels Simulation getestet ob die geforderte Positionsgenauigkeit überhaupt erreichbar ist. Das Ergebnis ist vielversprechend, der limitierende Faktor ist der Einfluss der Atmosphäre. Die

Turbulenzmodelle liefern realistische Abschätzungen, die nötige Schwenkgeschwindigkeit der Antennen von 6°/sek ist mit den neuen Teleskopen möglich, die Qualität der Wasserstoffmaser der heutigen Generation ist ausreichend und die neu erstellten „uniform sky coverage“-Beobachtungspläne führen ebenfalls zu besseren Ergebnissen.

Schließlich wird auch stetig an der Verbesserung der Hardware und Software gearbeitet. Eine neue Software zur Auswertung von VLBI-Sessions wurde von der Technischen Universität Wien entwickelt und auch im Zuge dieser Diplomarbeit verwendet. Sie wird in Kapitel [5] noch näher erläutert.

2.5. Zusammenfassung

2005 wurde vom IVS eine eigene Working Group eingesetzt um im Zuge des Projekts „VLBI 2010“ die „Very Long Baseline Interferometry“ weiterzuentwickeln und leistungsfähiger zu machen. Dafür wurden drei Ziele besonders hervorgehoben:

- Eine Stationspositionsgenauigkeit von 1mm sowie eine Stationsdriftgenauigkeit von 1mm pro Jahr.
- Kontinuierliche Messungen der Erdorientierungsparameter
- Berechnungen und Veröffentlichung der Ergebnisse in Echtzeit

Damit diese Ziele erreicht werden, erarbeiteten die Spezialisten des IVS einen Aufgabenkatalog mit Anforderungen, die zu einer Verbesserung des Systems beitragen sollen. Die Verringerung der systematischen und zufälligen Fehler durch falsche Modelle oder schlechte Hardware sind beispielsweise ein Teil dieser Anforderungen. Andere Ansätze sind der Ausbau der globalen VLBI Netzes mit neuen schnellen low-cost Antennen, Anschluss der Stationen an Highspeed-Internetzugängen und die Verbesserung von Beobachtungsstrategien. Weiters soll auch der Vorgang der Beobachtung, der Datenübertragung und der Auswertung möglichst hoch automatisiert werden.

Bisher wurden schon einige Ziele zum Teil oder gänzlich umgesetzt. Der Ausbau des VLBI-Stationensnetzwerkes, speziell auf der südlichen Hemisphäre, ist ebenfalls voll im Gange. Eine dieser neuen Stationen befindet sich seit 2008 in Warkworth, auf der Nordinsel Neuseelands. Diese Arbeit widmet sich im Folgenden dieser Station und ihrer Auswirkung auf das globale VLBI-Netzwerk.

3. VLBI-Station Warkworth

Eine der Strategien um das in Kapitel [3] genannte Ziel des Projekts „VLBI 2010“, die Positionsgenauigkeit der VLBI Stationen auf 1mm bestimmen zu können, zu erreichen, ist der Ausbau des weltweiten Stationsnetzwerkes und eine bessere globale Verteilung der Antennen. Der Ausbau des Netzwerkes soll mit kleinen schnellen „low-cost“ Antennen in Regionen erfolgen, die auf der Weltkarte geodätisch kaum oder gar nicht vertreten sind. Besonders auf der südlichen Hemisphäre sind kaum Stationen zu finden (siehe Abbildung 6).

Um diesen Ansprüchen gerecht zu werden, ließ die „Auckland University of Technology“ (AUT) im Auftrag des „Institute for Radio Astronomy and Space Research“ (IRASR) eine hochmoderne 12m Antenne mitsamt Ausstattung und Highspeed-Internetanschluss um etwa 1 Million Euro im Sommer 2008 im Norden Neuseelands in Warkworth errichten [Abb. 11]. Das Teleskop befindet sich einige Kilometer südlich der Stadt [RT].

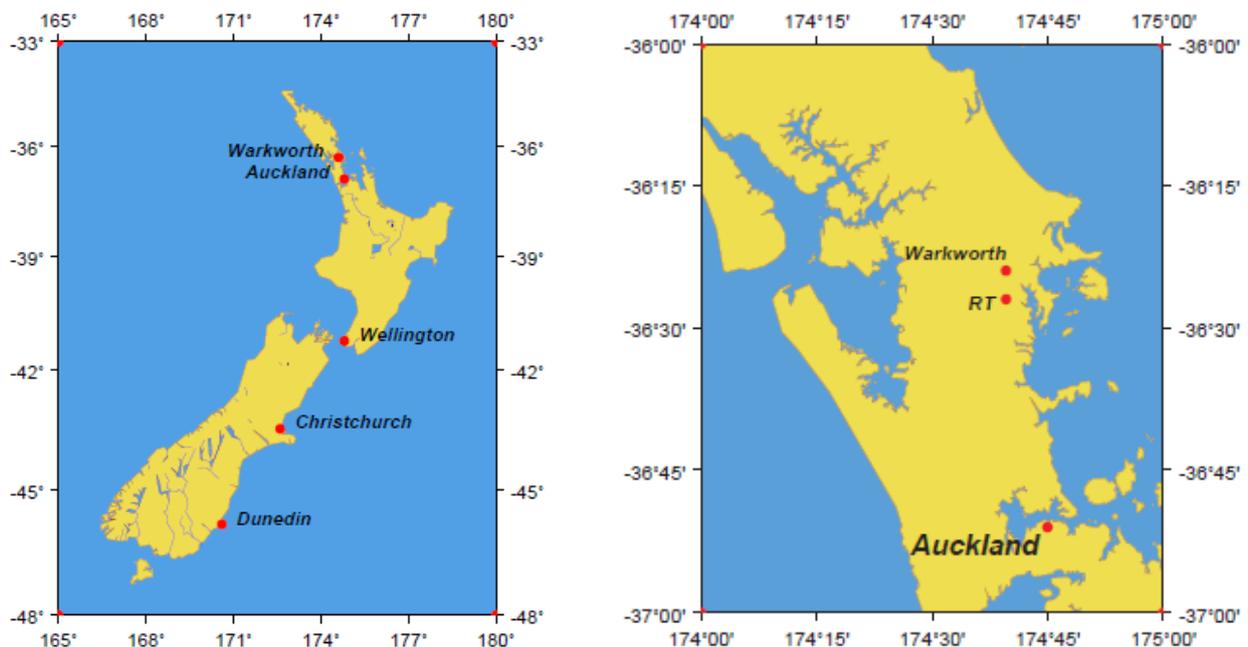


Abbildung 11: Geographische Lage der Station Warkworth

(Quelle: S.Gulyaev, T. Natusch: New Zealand 12-m VLBI Station for Geodesy and Astronomy)

3.1. Historie

2005 nahm Neuseeland das erste Mal an einem VLBI-Test teil. Bei dieser Studie zwischen sechs 22m Antennen der Station Narrabri (New South Wales, Australien) und einer kleinen 6m Antenne der AUT in der Nähe von Auckland wurden erste Frings festgestellt und hochauflösende Bilder eines Quasars aufgenommen. Nach diesem ersten Erfolg wurde 2006 eine zweite Session zwischen den genannten Stationen und einer weiteren 34m Antenne in Kashima (Japan) durchgeführt. Durch die erfolgreiche Abhaltung dieser beiden Testläufe stellte Neuseeland die Kompetenz für moderne radioastronomische und geodätische VLBI unter Beweis und erbaute so 2008 das erste Radioteleskop in Neuseeland. Es ist unter anderem Teil des 4 Milliarden Megaprojekts SKA (Square Kilometre Array). Dabei sollen ab 2020 etwa 5000 Antennen gemeinsam als ein virtuelles Superradioteleskop mit einem Durchmesser von 1 Quadratkilometer arbeiten, welches 50 mal empfindlicher ist, als alle derzeitigen Antennen.

3.2. Geographie

Neuseeland liegt im südlichen Pazifik östlich von Australien. Die Tasmanische See trennt diese beiden Länder um mehr als 1500 Kilometer. Neuseeland selbst besteht aus 2 Hauptinseln, die durch die 23 Kilometer breite Cookstraße getrennt sind. Tektonische Aktivitäten sind für Neuseeland keine Seltenheit, liegt das Land bekanntlich auf der Grenze zwischen der Australischen und der Pazifischen Kontinentalplatte, einem Teil des Pazifischen Feuerrings [Abb. 12]. Dieser Charakteristik verdankt Neuseeland sein Landschaftsbild mit hohen Gebirgen, Erdbeben, Vulkanismus und geothermalen Aktivitäten.

Das Radioteleskop Warkworth liegt dabei auf der nördlichen Insel und demnach auf der Australischen Platte.



Abbildung 12: Australisch – Pazifische Plattengrenze

(Quelle: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:NZ_transform_%28deutsch%29.JPG)

Konkret liegt die Station 60 Kilometer nördlich der größten Stadt Neuseelands, Auckland. 5 Kilometer südlich der kleinen Ortschaft Warkworth befindet sich die Station in einem kleinen

Tal, das die Firma Telecom New Zealand besitzt. [Abb. 11] Diese betreibt dort selbst weitere Antennen zur Kommunikation zwischen Neuseeland und den Pazifischen Inseln. Dieses Gebiet wurde für die VLBI-Station ausgewählt, da gesetzlich kein Funk in der unmittelbaren Umgebung erlaubt ist und so keine Radio Frequency Interference auftreten sollte.

3.2.1. Stationskoordinatenbestimmung

Zuerst wurde eine vorläufige Näherungsmessung der Stationskoordinaten mittels GNSS vorgenommen. Ziel war es Näherungskordinaten für den Referenzpunkt der Antenne zu finden, an dem sich die Azimut- und die Elevationsachse kreuzen [Abb. 13]. Die Messungen wurden in Zusammenarbeit mit dem New Zealand Geological and Nuclear Science Research Institute (GNS Science) und der Land Information New Zealand (LINZ) durchgeführt. Diese beiden Einrichtungen betreiben das größte GNSS-Netzwerk in Neuseeland mit 33 laufend betriebenen Stationen am Festland, einer auf Chatham Island (400 Kilometer vor der Ostküste Neuseelands) und drei weiteren Stationen in der Antarktis. Dieses Netzwerk übergibt seine Daten auch an den IGS (International GNSS Service) und trägt so zum ITRF bei. Eine dieser Stationen (RTK Referenz Receiver) wurde während des Baus der Antenne 2008 in der näheren Umgebung errichtet [Abb. 13]. Mittels „real time“-Kinematik (RTK) GPS wurde die Kante des Hauptreflektors in verschiedenen Azimut- und Elevationsstellungen vermessen und so die ersten Näherungskordinaten des Referenzpunktes der Antenne bestimmt.

Nach dieser Bestimmung [Tabelle 2] nahm die Station Warkworth (später „Wark12m“) an der ersten VLBI Messung (7. Mai 2010) mit sechs weiteren Station aus Australien (ASKAP-29, Ceduna, ATCAPN5, Mopra, Parkes und Hobart²⁶) an einer 7 stündigen Session teil. Die ausgewerteten Stationskoordinaten sind ebenfalls in Tabelle 1 enthalten. Ab diesem Zeitpunkt nahm Wark12m an regulären IVS-Sessions teil. Die erste Session mit brauchbaren Daten fand allerdings erst im Februar 2011 statt. Die Berechnung der Koordinaten aus diesen globalen Sessions bestätigen die bereits ermittelten Näherungskordinaten [Tabelle 2].

Beobachtung	X [m]	Y [m]	Z [m]
RTK GPS	$-5115324,5 \pm 0,1$	$477843,3 \pm 0,1$	$-3767193,0 \pm 0,1$
Lokales VLBI Netz	$-5115325,55 \pm 0,10$	$477842,95 \pm 0,05$	$-3767194,41 \pm 0,09$
IVS Session	$-5115324,41 \pm 0,02$	$477843,31 \pm 0,02$	$-3767192,93 \pm 0,06$

Tabelle 2 Stationskoordinatenbestimmung

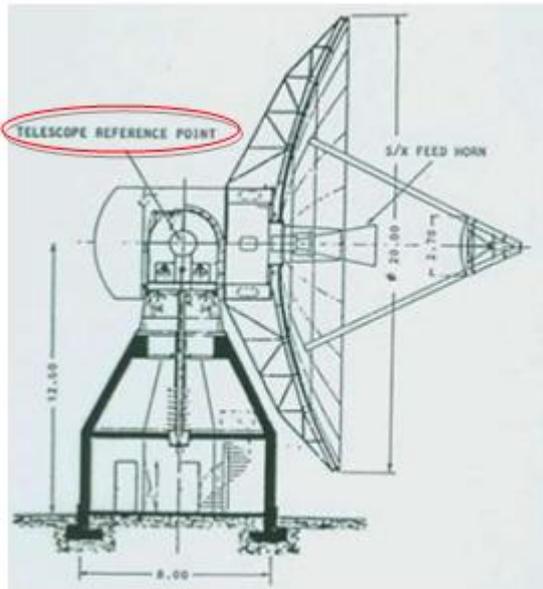


Abbildung 13: Referenzpunkt VLBI Antenne und GNSS Station „WARK12M“

(Quelle: l.: Skriptum „Moderne geodätische Weltraumverfahren“ S. 34; r.: H. Takiguchi, S. Gulyaev: Towards synergy of VLBI and GNSS geodetic techniques in geologically dynamic New Zealand)

3.2.2. Ocean tide loading Modell

Durch die Nähe der Station zum Meer müssen gute geodynamische Modelle zur VLBI-Analyse verwendet werden. Speziell der ocean tide loading-Effekt muss gut modelliert werden um den Genauigkeitsansprüchen der VLBI 2010 zu genügen. Neuseeland besitzt allerdings kein ausreichend gutes Modell. Zur Bestimmung des ocean tide loading Effekts werden 11 Tiden rund um Neuseeland verwendet. Anhand dieser werden vom Onsala Space Observatory (Schweden) der horizontale ($\pm 10\text{mm}$) und der vertikale Koeffizient ($\pm 40\text{mm}$) des Effekts berechnet. Da diese Werte zu ungenau für die 1mm Positionsgenauigkeit sind, wurde vom IRASR ein genaueres Modell entwickelt. Die Genauigkeitssteigerung dieses Modells um den Faktor 10 (horizontale ($\pm 1\text{mm}$) und vertikale Koeffizient ($\pm 4\text{mm}$)) ist Voraussetzung um das ambitionierte Ziel zu erreichen (H. Takiguchi et. al., 2012).

Zusätzlich wurde 2010 ein meteorologischer Sensor an der Station installiert. Dieser bestimmt permanent die lokalen atmosphärischen Werte (Temperatur, Druck, Feuchte, etc.) und speichert diese im Log-File der IVS-Messungen ab um den Einfluss der atmosphärischen Effekte während der Beobachtungen zu minimieren und die dazugehörigen Modelle zu verbessern.

3.3. Technische Informationen und Apparaturen

Der Bau des Radioteleskopes wurde im Sommer 2008 durchgeführt. Unter der Mithilfe des „MIT Haystack Observatoriums“ und des „Italienischen Instituts für Radioastronomie“ errichtete das „Institute for Radio Astronomy and Space Research“ der Auckland University of Technology die 12 Meter Dual-shaped Cassegrain Antenne der Firma Cobham/Patriot (Albion, Michigan, USA).

Das Fundament besteht aus einem 1,22m dicken und 6,7m x 6,7m großen bewehrten Betonblock, der in verwitterten Sandstein gegossen wurde. Darauf befindet sich ein Stahlzylinder mit 2,5m Durchmesser, der zur Unterstützung der Elevationsachse, die sich in 7,1m Höhe befindet, dienen soll. Die restlichen Bauteile wie der Reflektor oder die „feed horn“-Unterstützungseinheit sind aus Aluminium. Die detaillierten Spezifikationen sind in Tabelle 3 aufgelistet.

Antennentyp	Dual-shaped Cassegrain
Hersteller	Cobham/Patriot, USA
Antennendurchmesser (D)	12,1m
Brennweite (F)	4,538m
F/D Verhältnis	~ 0,375
Oberflächengenauigkeit	0,35mm
Pointing Genauigkeit	0,005°
Frequenzbandbreite	2,1 – 32 GHz
Azimutaler Schwenkbereich	± 270°
Max. Schwenkgeschwindigkeit	5°/sek
Elevations Schwenkbereich	+4,5 – 88°

Max. Schwenkgeschwindigkeit	1°/sek
Betriebstemperatur	- 15 – 55°C
Max. Windstärke für reibungslosen	
Betrieb	< 50 km/h
Max. aushaltbare Windstärke	< 160km/h

Tabelle 3: Spezifikationen des Radioteleskopes Warkworth (WARK12m)

(Quelle: S. Gulyaev, T. Natusch; New Zealand 12-m VLBI Station for Geodesy and Astronomy, IVS 2008 Annual Report, S. 68 – 73, 2009)

Die Antenne ist mit einem coaxial dual band (S und X), dual polarization (circular left and right) feed horn ausgestattet [Abb. 14]. Für beide Frequenzbänder und jede Polarisation ist je ein MITEQ (Microwave Information Transmission Equipment) Signalverstärker installiert. Der S- und X-Band Empfänger befindet sich direkt am „feed horn“ und besitzt einen ausreichend guten Verstärker um die 65 Meter Kabellänge zum Observatoriums Kontrollraum und zum Datenrekorder ohne Datenverluste zu meistern. Das Herzstück bildet der Symmetricom Active Hydrogen Maser MHM-2010 (75001-114) mit 5MHz, 10MHz, 100MHz, 1pps (pulse per second) Output und einer 1pps Synchronisationseinheit. Weiters sind noch ein Digitaler Base Band Konverter (DBBC), der vom Italienischen Institut für Radioastronomie entwickelt wurde, und ein Mark 5B+ und Mark5C Datenrekorder zur Datenauswertung in Verwendung.

Um den Datentransfer zu den Korrelatoren mittels e-VLBI durchzuführen ist die Station Warkworth direkt mit dem regionalen Kiwi Advanced Research and Education Network (KAREN) verbunden. Dieses Netzwerk bietet eine Übertragungsrate von bis zu 10Gbps über Glasfaserkabel. 2011 wurde daher nur mehr ein „diskpack“ physisch per Schiff zum Korrelator versendet, der Rest wurde unter Verwendung von KAREN übertragen. Dadurch entfallen die Transportkosten und die Zeitspanne zur Auswertung wird verkürzt.

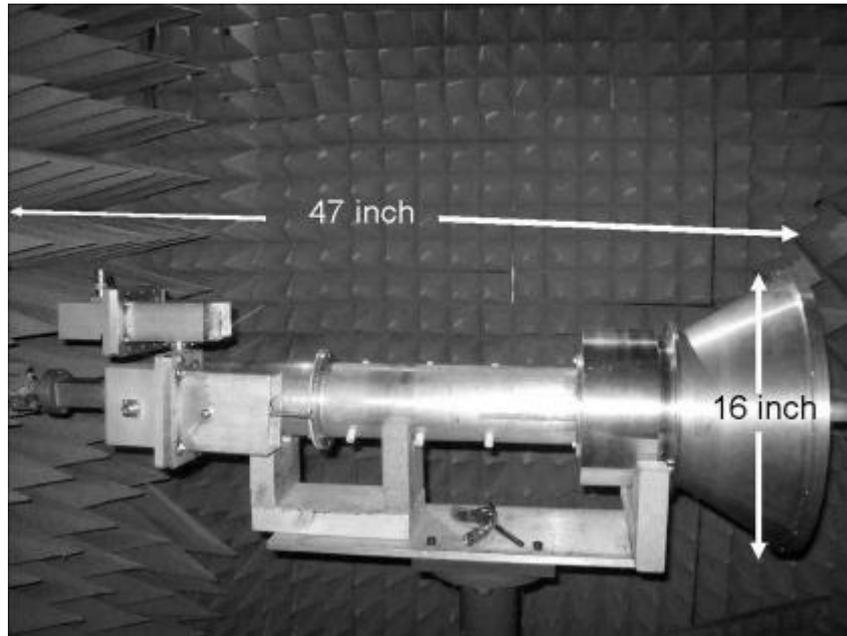


Abbildung 14: Feed horn

(Quelle: S. Gulyaev, T. Natusch: New Zealand 12-m VLBI Station for Geodesy and Astronomy)

3.4. Messkampagnen und Probleme

Im Februar 2011 nahm Wark12m schließlich an der ersten offiziellen IVS-Session teil. Laut Plan sollte die Station im Jahr 2011 an 15 Sessions, 2012 an 12 Sessions und 2013 an 50 Sessions teilnehmen und so Beiträge zum ITRF und zur Berechnung der EOP's im globalen Netz beisteuern. Aufgrund technischer Anfangsschwierigkeiten in den ersten beiden Jahren sind jährlich lediglich 5 beziehungsweise 4 brauchbare Auswertungen der Sessions zu berechnen gewesen. (Das Jahr 2013 war zur Zeit des Verfassens dieser Arbeit noch nicht zu Ende) Die Ursachen dafür sind vielfältig. Zu kurze Aufzeichnungszeiten, zu wenig Daten akquiriert, nur Daten im S-Band aufgenommen, Probleme mit dem Elevationsantrieb und Auswertungsprobleme des Korrelators mit den Wark12m-Daten bescherten den Verantwortlichen viel Arbeit. Das größte Problem und der Hauptgrund, warum es 2012 nur zu sehr wenigen Sessions kam, war der Ausfall des Hydrogenmasers, der eine Fehlfunktion aufwies und somit zum Hersteller zur Reparatur gesendet werden musste. Dieser Defekt zog sich von Mitte 2012 bis März 2013. In diesem Zeitraum konnte das Teleskop an keinen VLBI - Messungen teilnehmen.

Für das Jahr 2014 sind ambitionierte 67 Sessions geplant, wobei Warkworth dabei das erste Mal an mehrtägigen Projekten (CONT14- und AUST14-Sessions) teilnehmen soll.

3.5. Nutzung und erste Ergebnisse

3.5.1. Universitäre Nutzung

Aufgrund Verantwortung und Aufsicht der Antenne durch das Institute for Radio Astronomy and Space Research wurde 2009 ein neuer „Astronomy Major“ Masterstudiengang basierend auf dem Bachelorstudium „Mathematical Sciences“ an der Auckland University of Technology eingeführt. Die Station wird dabei in den Lehrveranstaltungen „Astrophysics“, „Radio Astronomy“, „Practical Astrophysics“ oder „Space Geodesy“ zu Forschungszwecken verwendet. Auch für Abschlussarbeiten bietet das Lehrpersonal interessante Versuche mit der Antenne an.

3.5.2. 30 Meter Antenne Warkworth

Im November 2010 erwarb die Auckland University of Technology nach Absprache mit Experten von der Telecom New Zealand eine 30 Meter Cassegrain wheel and track beam-waveguide-Antenne ab. Sie stand 26 Jahre im Dienste der Telecom NZ zur Kommunikation zwischen den Pazifischen Inseln und Neuseeland. Die Antenne, lediglich 200 Meter nördlich von Wark12m gelegen, und besitzt ein großes Kontrollgebäude [Abb. 15]. Um jedoch für astronomische und geodätische Zwecke genutzt zu werden, muss die Antenne gewartet und überarbeitet werden. Sobald sie einsatzbereit ist, bietet sich nun die Möglichkeit die Station Warkworth als sogenanntes Twin-Teleskop zu nützen, wie auch die Station Wettzell [Kap. 3.2.6.]. Ein weiterer Fortschritt um die Genauigkeit zu steigern und Fehler beziehungsweise Ausfälle zu minimieren.

2011 wurde mit dem Umbau und den Erneuerungen begonnen. Die Motoren für die Bewegung in Azimut und Elevation wurden durch neue ersetzt, ein Kontrollsystem, ähnlich dem für Wark12m, konnte installiert werden und für die Datenaufzeichnung wurden ein Mark 5C sowie ein weiterer Digitaler Base Band-Konverter (DBBC) bestellt. Das Kontrollgebäude wird nun für die Überwachung und Steuerung der Antennen verwendet. Diese Veränderung schafft den Vorteil, dass der Maser nun alleine in einem Container arbeiten kann und die Gefahr von Überhitzung nicht gegeben ist, da man zuvor von diesem Container aus ebenfalls gearbeitet hat. Derzeit wird versucht in L-, S-, C- und X-Band Beobachtungen durchzuführen.



Abbildung 15: Wark12m (links) und Wark30m (rechts)

(Quelle: S. Gulyaev, T. Natusch, H. Takiguchi, S. Weston: Warkworth 12-m VLBI Station: WARK12M)

3.5.3. Horizon Mask

Für hinreichend gute Beobachtungen der VLBI Antennen sind nicht nur gute Vormodellierungen der atmosphärischen Schwankungen oder des ocean tide loadings notwendig, sondern auch eine ausreichend gute „Horizon Mask“. Diese bildet mathematisch die umliegende Landschaft ab. Konkret werden die Zenitdistanzen von Hindernissen wie Bäume, Hügel oder Häuser gemessen, die weniger als 90 Grad aufweisen. Solche Hindernisse können zu einem schlechteren Empfang des Radiosignals führen oder im schlimmsten Fall ist kein direkter „Sichtkontakt“ mit der Radioquelle möglich. Beispielsweise stünde ein Teleskop in einem Gebirgstal an der Südseite eines Berges, so könnten keine Quasare im Norden beobachtet werden. Daher wird versucht Teleskope möglichst exponiert zu positionieren. Dies wiederum birgt die Gefahr extremen Wetterlagen ausgesetzt zu sein. Ein Sichthindernis ist in dieser Situation jedoch um einiges störender. Für das Teleskop Wark12m wurde die Horizon Mask 2010 für die ersten Beobachtungen lediglich geschätzt. Man kann anhand Abbildung 15 allerdings erkennen, dass im Süden von Wark12m ein Wald gelegen ist. Um sicher zu gehen wurde im April 2013 eine Horizon Mask mittels Tachymetermessungen erstellt.

Die Vorgabe war Hindernisse festzustellen, die eine Zenitdistanz kleiner als 85 Grad aufweisen. Das bedeutet, falls sich ein Baum im Sichtfeld bei 220 Grad azimuthalem Winkel befindet, so wird die Zenitdistanz an der höchsten Stelle des Baumes gemessen. Befinden sich eine Baumreihe oder gar ein Wald im Sichtfeld, so werden der Azimutwinkel und die

Zenitdistanz beim ersten Hindernis aufgenommen und diese Zenitdistanz für jedes folgende Azimut gleich angenommen, bis zum nächsten Höhenunterschied in der Baumreihe. Dort wird wiederum Azimut und Zenitdistanz gemessen. Ist die Zenitdistanz kleiner als 85 Grad wird wie soeben erläutert vorgegangen, ist die Zenitdistanz größer als 85 Grad ist der Baumreihe kein Störfaktor mehr für das Teleskop. Die Vorgabe, kleiner als 85°, beruht darauf, dass das Teleskop Beobachtungen, die tiefer sind, nicht anzielt, da die Nähe zur Erdoberfläche zu viele Störsignale mit sich bringen kann.

Für Wark12m ergibt sich folgende Horizon Mask [Abb. 16]. Dabei sind auf der Ordinate der Elevationswinkel ($90^\circ - \text{Zenitdistanz}$) aufgetragen und auf der Abszisse der Azimutwinkel mit 0° als Nordrichtung. Die Nordrichtung wurde mangels Festpunkten mit Bussole und Kompass festgestellt und im post processing mit dem Google Earth Measurement Tool überprüft. Die konkreten Werte sind im Anhang angeführt.

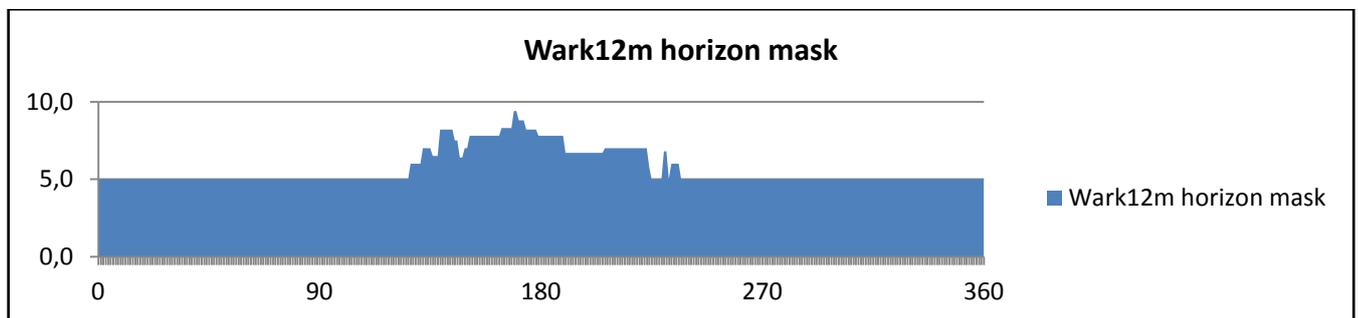


Abbildung 16: Wark12m Horizon Mask

Für das neue Teleskop Wark30m wurde ebenfalls eine neue Horizon Mask eingemessen.

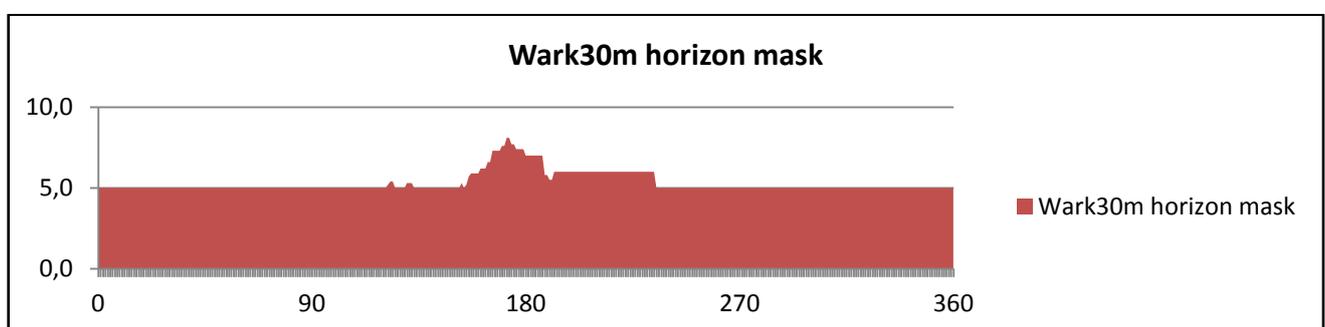


Abbildung 17: Wark30m Horizon Mask

Diese Horizon Masks beruhen allerdings auf der Tatsache, dass man im Antennenzentrum mit einem Tachymeter nicht messen kann und somit rund 7 und 15 Meter tiefer auf festem Untergrund messen muss [Abb. 18].



Abbildung 18: Horizon Mask Messungen für Wark30m

Daher müssen die Werte für die Zenitdistanz in das Antennenzentrum verschoben werden um die tatsächlichen Zenitdistanzen zu bekommen. Wie in Abbildung 19 zu erkennen ist benötigt man dafür auch den Abstand zum Hindernis. Dieser wurde auf 10 Meter genau wiederum mittels Google Earth Measurement Tool [Kap. 5.4.] geschätzt.

Der mathematische Formelapparat sieht dabei wie folgt aus:

$$\tan e \times d = z \quad (1)$$

$$z - h = y \quad (2)$$

$$\tan^{-1} \frac{y}{d} = \beta \quad (3)$$

mit den gegeben Werten

- e 90° - gemessener Zenitdistanz
- d Entfernung zum Hindernis
- h Höhenunterschied zwischen Tachymeter und Antennenzentrum

und den gesuchten Werten

- z Höhe des Hindernisses
- y Höhe des Hindernisses aus Sicht des Antennenzentrums

β Zenitdistanz aus Sicht des Antennenzentrums

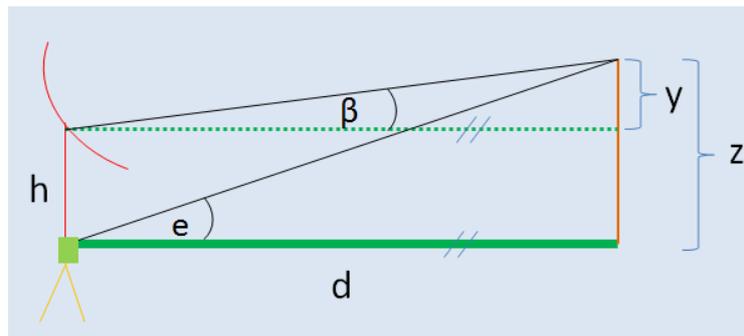


Abbildung 19: Messung der Zenitdistanz aus Sicht des Antennenzentrums

Daraus ergeben sich folgende korrigierte Horizon Masks.

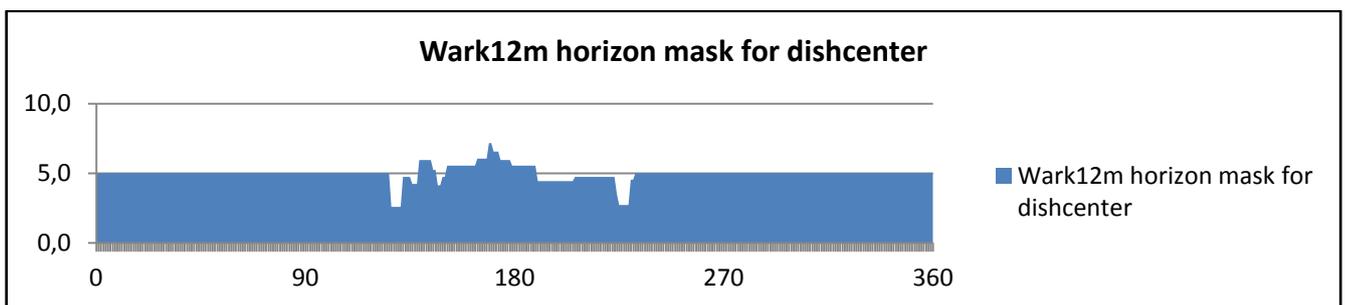


Abbildung 20: Wark12m Horizon Mask aus Sicht des Elevationszentrum

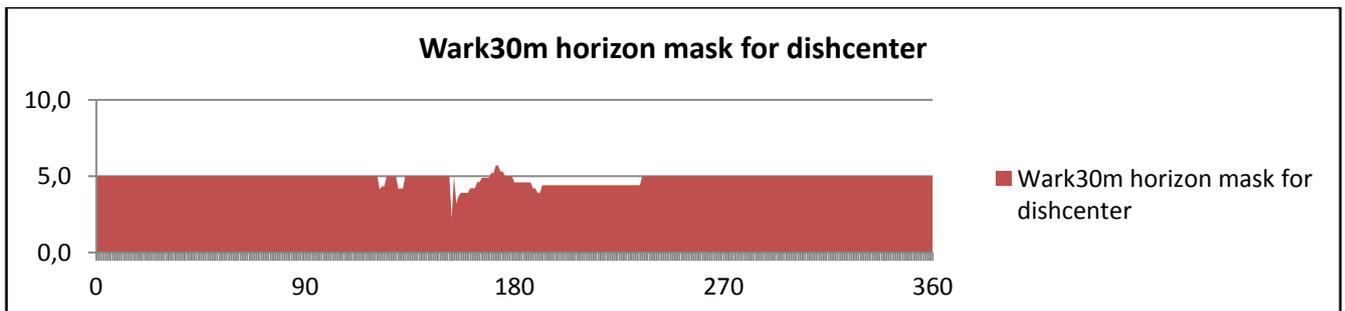


Abbildung 21: Wark30m Horizon Mask aus Sicht des Elevationszentrum

3.5.4. Weitere Nutzungsmöglichkeiten

Die beiden Teleskope werden auch auf anderen Gebieten eingesetzt. Wie in Kapitel [4.1.] kurz angeschnitten ist Wark12m ein Teil des SKA- (Square Kilometer Array) Projektes von Australien und Neuseeland, welches derzeit noch in den Kinderschuhen steckt. Dabei werden rund 5000 Radioantennen in Australien und Neuseeland miteinander verknüpft um als ein riesiges virtuelles Teleskop zu arbeiten. Die gemeinsame Antennenfläche aller

Teleskope beträgt hierbei 1 km², wovon auch der Name rührt. Der Vorteil liegt darin, dass dieses virtuelle Array von Teleskopen 50mal empfindlicher ist als heutige Antennen. Astronomen erwarten sich davon mehrere Milliarden von Jahren zurückblicken zu können, möglicherweise zum Ursprung unseres Universums. Der Vollausbau und operationelle Start wird 2020 angestrebt.

Außerdem nimmt die Station Warkworth, speziell Wark12m, nicht nur an regulären Beobachtungssessions des IVS teil, sondern fungiert seit 2012 auch als „tracking station“ für die Raumschiffe des SpaceX Unternehmens. Diese Raumschiffe sind bis dato die Einzigen, die mit großer Nutzlast auch wieder auf der Erde landen können, im Vergleich zu unbemannten Raumschiffen, die in der Erdatmosphäre verglühen. So wird zum Beispiel die Versorgung der ISS (International Space Station) sichergestellt.

Die theoretische Abteilung des IRASR der AUT beschäftigt sich außerdem mit theoretischen Studien und Beobachtungen von hoch angeregten Atomen und Molekülen in der Milchstraße und Quasaren.

Darüber hinaus werden auch bisherige VLBI-Baseline-Messungen zwischen Hobart(AUS) und Warkworth mit GNSS-Baseline-Messungen verglichen. Diese beiden Stationen befinden sich auf einer tektonischen Platte, allerdings wird eine kleine Intra-Plattenbewegung vermutet. Das bedeutet, Neuseeland driftet jährlich rund 5cm von Australien ab. Dafür ist jedoch die derzeitige VLBI-Datenmenge noch zu gering um ordentliche statistische Auswertungen machen zu können und so die beiden Methoden miteinander zu vergleichen [Kap. 6].

3.6. Ausblick

Die beiden Teleskope in Warkworth sind noch sehr jung und blicken großen Aufgaben entgegen. Sobald die Startprobleme behoben sind, wird sich die Station zu einer wichtigen Position im globalen Raum entwickeln. Aus diesem Grund wird auch fieberhaft an einem Ausbau der Station gearbeitet um sie zu einer geodätischen Fundamentalstation zu verbessern. Derzeit befinden sich mit VLBI und GNSS zwei Weltraumverfahren an der Station. Es sind jedoch schon Untersuchungen zum Bau eines Absolut-Gravimeters im Gange sowie einer zweiten VLBI Station auf der Südinsel Neuseelands. Aus internationaler Sicht kann dieser Schritt nur begrüßt werden.

4. Programme für die Auswertung

Die Berechnungen, statistischen Auswertungen und Analysen sind mit verschiedenen Computer Softwareprogrammen vorgenommen worden, vorwiegend mit dem mathematischen Rechen- und Programmierprogramm Matlab. Dieses bietet eine benutzerfreundliche Oberfläche und eine graphische Ausgabe.

Das Kernstück der Auswertungen bildet VieVS. Mit der Vienna VLBI-Software wurden alle Berechnungen und Auswertungen der VLBI-Sessions dieser Arbeit durchgeführt. Diese Software wurde in Matlab geschrieben und ist eine leicht zu handhabende VLBI-Software mit graphischer Ausgabe.²

Schließlich wurden Auflistungen und Graphen in Microsoft Excel erstellt um Ergebnisse besser vergleichen zu können. Auch die in der Horizon Mask [Kap. 4.5.4.] verwendeten Werte und die graphische Ausgabe sind in Microsoft Excel erstellt worden. Um die Nordrichtung der Tachymetermessungen herauszufinden ist zu Hilfszwecken Google Earth eingesetzt worden.

4.1. Matlab

Matlab, kurz für Matrix Laboratory, ist eine zum wissenschaftlichen numerischen Rechnen verwendete höhere Programmiersprache. Sie bietet auch die Möglichkeit zur graphischen Darstellung oder wie im Fall VieVS [Kap. 5.2.] zur Programmierung von Skripten. Dadurch können Daten analysiert, Algorithmen entwickelt und Modelle erstellt werden. Laut Entwicklerfirma „MathWorks“ lassen sich mittels dieser Programmiersprache mit ihren vielzähligen Tools und den integrierten mathematischen Funktionen Lösungen und Tabellenkalkulationen schneller berechnen als mit herkömmlichen Programmiersprachen wie C/C+ oder Java. Matlab läuft unter der Mehrzahl der Computerbetriebssysteme (Linux, Unix, Windows, Mac OS X und Solaris). Für das Ausführen der Vienna VLBI-Software wird eine Version ab Matlab 7.6 (R2008a) oder jünger benötigt.

Im Zuge dieser Arbeit wird Matlab als Plattform für die VieVS verwendet. Diese ist ein in Matlab programmiertes Skript, das nur unter der Verwendung von Matlab selbst laufen kann. Es werden dabei keine großen Kenntnisse vorausgesetzt. Das Starten der Software

² <http://vievs.geo.tuwien.ac.at/>

und das Aufrufen des VieVS Matlab Codes sind die einzigen Schritte, die durchgeführt werden müssen. Während des Arbeitens mit VieVS muss allerdings der Ordner, in dem das VieVS Startfile und die dazugehörigen Matlabfiles gespeichert sind, geöffnet sein und bleiben, da die VLBI-Software ansonsten nicht ordnungsgemäß oder gar nicht arbeitet [Abb. 22].

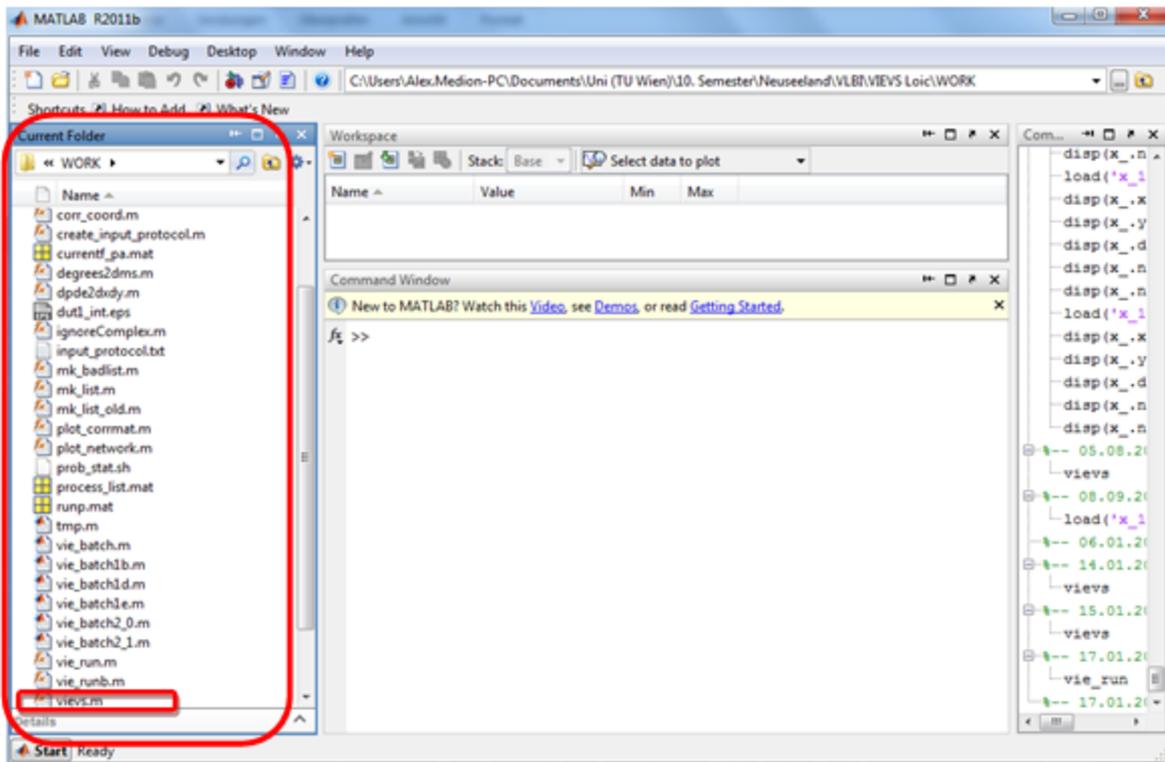


Abbildung 22: Matlab: Start von VieVS Version Februar 2013

4.2. Vienna VLBI Software (VieVS)

Die Vienna VLBI Software ist eine neue, moderne Software zur Auswertung und Analyse von geodätischen VLBI-Daten. Die Entwicklung begann 2008 am Department for Geodesy and Geoinformation (Research Group for Advanced Geodesy) der Technischen Universität Wien, 2009 wurde die erste Version veröffentlicht. Der Standard der Software entspricht den letzten Konventionen des International Earth Rotation and Reference System Service (IERS) (G. Petit, B. Luzum; 2010). Das Programm ist zur Gänze in Englisch verfasst.



Abbildung 23: VieVS

Vor der Entwicklung von VieVS wurde an der TU Wien mit der Auswertesoftware Occam gearbeitet. Diese weist jedoch einen sehr alten, aber keineswegs schlechten Programmcode auf und ihre Entwickler sind quer über den Globus verstreut. Zusätzlich ist

es fast nur Spezialisten möglich mit dieser Software zu arbeiten und verfügt über kein graphisches Interface. Nichtsdestotrotz liefert Occam gute Ergebnisse und wird in vielen internationalen VLBI-Einrichtungen verwendet.

Die Entwicklung von VieVS erweitert das Spektrum von VLBI-Auswertesoftwareprogrammen (Occam, Calc/Solve, etc.). Es steht nun ein weiteres modernes Programm zu Verfügung und bietet so die Möglichkeit Qualitätsvergleiche mit anderen Programmen durchzuführen.

Zielsetzung bei der Entwicklung von VieVS war eine klare Struktur in den Programmcode zu bringen und diesen um nicht mehr benötigte Programmblöcke zu kürzen. In den ersten Versionen wurde versucht Teile des Occam Quellcodes zu implementieren. Dies stellte jedoch die Entwickler immer wieder vor größere Probleme, sodass schließlich das Programm von Grund auf neu programmiert wurde. In der Occam Version 6.1 wurde das Gauß-Markov Modell der kleinsten Quadrate Ausgleichung verwendet. Dieses basiert auf der stückweise linearen Funktion, die eine Darstellungsart des Zenit Wet Delay, der Uhren und der Erdorientierungsparameter ist. Weil die erste Epoche dabei frei gewählt werden kann, ist das Maß der obengenannten Parameter kein Intervall von Integer Stunden. In VieVS hingegen werden die Parameter als stückweise lineare Offsets zu Integer Stunden geschätzt. Daher können die Resultate mit Ergebnissen anderer Weltraumverfahren wie GNSS oder SLR verglichen werden.

Die einfachere Struktur (in Matlab) bietet die Möglichkeit jederzeit neue Modelle und Änderungen am Programm vorzunehmen. Ein Meilenstein war die Erstellung einer graphischen Benutzeroberfläche (GUI). Diese Erweiterungen machen VieVS zu einer leicht zu handhabenden Software, die von Bachelor- und Masterstudenten sowie von Doktoranden leicht erlernt werden kann.

Auch ich begann diese Arbeit ohne jegliche Vorkenntnisse und lernte durch regelmäßiges Arbeiten viel von und über die Software.

Die Entscheidung Matlab als Plattform für die neue Software zu verwenden hat viele Gründe. Wie schon im letzten Absatz erwähnt, spielt die leichte Handhabung sowie das einfache Ändern des Quellcodes eine wesentliche Rolle. Zusätzlich bietet Matlab eine gute graphische Ausgabe und ist für alle wichtigen Betriebssysteme verfügbar. Als kommerzielle

Software ist Matlab allerdings teuer und auch ein wenig langsamer als andere Programmiersprachen wie C++ oder Fortran. In den meisten Forschungseinrichtungen zählt Matlab allerdings zur Basisausstattung und muss somit im seltensten Fällen extra gekauft werden. In Spezialfällen kann VieVS auch ohne Matlab oder mit nicht kommerziellen, Matlab-ähnlichen Programmen wie Octave ausgeführt werden. Für Studenten bietet MathWorks bei Vorlage des Studentenausweises beziehungsweise der Matrikelnummer freie jährliche Zugänge und stellt Downloads der Matlab Software zur Verfügung.

Die Systemvoraussetzungen wurden in Kapitel [5.1.] bereits angeschnitten. Der Quellcode des Programms ist lediglich 10 Megabyte groß. Möchte man allerdings alle NGS-Files seit der ersten Aufnahme 1979 beziehen, so sollten mehr als 7 Gigabyte Speicherplatz zur Verfügung stehen. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass nach jeder Auswertung weitere Daten generiert werden und weiterer Speicherplatz benötigt wird. Die NGS Files können allesamt vom Server der TU Wien heruntergeladen werden oder von der Homepage des IVS [Kap. 5.2.1.]

Um VieVS zu erwerben benötigt es eine Registrierung am Department for Geodesy and Geoinformation (Research Group for Advanced Geodesy) der Technischen Universität Wien. Die Anmeldung und das Programm sind kostenlos. Hierbei handelt es sich nur um eine rechtliche Absicherung sowie für die Entwickler eine Übersicht der Nutzer zu bekommen. Dies ermöglicht die Abgabe eines Feedbacks und bietet eine Basis Bugs und Fehler zu melden sowie Updates zu verbreiten. Des Weiteren besteht die Möglichkeit für andere Institutionen und Nutzer neue Module für die Vienna VLBI-Software zu erstellen. Weitere Details zum Erhalt und Download sind auf der Homepage „<http://views.geo.tuwien.ac.at/views>“ nachzulesen.

4.2.1. NGS-Files

Um die Auswertungen von Kapitel [5] durchführen zu können werden originale Messdaten der VLBI-Station Warkworth benötigt. Die Daten dieser VLBI Sessions werden in sogenannten NGS Master Files als ASCII Files gespeichert und können kostenlos von der Homepage des Internationalen VLBI Services (<http://ivscc.gsfc.nasa.gov/>) heruntergeladen

werden. Auf dieser Homepage kann man sich im Menü *Observing Program* und mit Klick auf *Master Files* einen Überblick über vergangene und geplante VLBI-Sessions verschaffen. Um jedoch eine gesonderte Auswahl zu erhalten, wird unter *Search Master Files* ein Suchalgorithmus zum Auffinden der Sessions eines bestimmten Typ oder einer bestimmten Station in einem angegebenen Jahr angeboten [Abb. 24]. Das Suchergebnis für die Station Warkworth im Jahr 2012 ergibt zum Beispiel folgende 12 Sessions [Abb. 25]. Warkworth wird in der Liste der teilnehmenden Stationen mit Ww abgekürzt. Eine Liste der Stationsabkürzungen findet man auf der Homepage des IVS.

Search A Master File

This form lets you search a master file to select a subset of lines to be displayed. Selection may be done by station name and/or session type. If more than one station is selected, the selected lines may be displayed in either station mode or baseline mode (see the choices for explanation).

Master file year: 2012 (select the master file year)

All types

APT

APSG

AUSTRAL

CDP

C-OHIG

CORE

CORE-A

CORE-B

CORE-1

WESTFORD

WHTHORSE

WETZELL

WETTZ13N

WETTZ13S

WARK12M

VLA

YAKATAGA

YEBES

YARRA12M

Types of sessions to include: Station(s) to include:

Station mode (Default. Include sessions that have *any* of the marked stations.)
 Baseline mode (Include only sessions that have *all* of the marked stations.)

Specify the type of master file and whether to list all participating stations:

display lines from master file (default)
 display lines from master media file
 display the media for the single selected station

Abbildung 24: Search Master Files

SESSION NAME	SESSION CODE	DATE mondd	DOY ddd	TIME hh:mm	DUR hr	STATIONS	SKED	CORR	STATUS	PF	DBC CODE	SUBM	DEL days	MK4 NUM
IVS-CRDS56	CRDS56	JAN16	16	16:00	24	HbHhWw	USNO	WASH	12MAR21	1.0	XN	USNO	64	7885
IVS-CRDS57	CRDS57	FEB01	32	18:00	24	HbHhWw	USNO	WASH	12MAR22	1.0	XN	USNO	49	7886
IVS-R4519	R4519	FEB09	40	18:30	24	FtHbKkMaNyTcWwWzYg -Zc	USNO	WASH	12FEB28	1.0	XE	USNO	18	4519
IVS-R4524	R4524	MAR15	75	18:30	24	FtHbKkMaTcWwWzYg	USNO	WASH	12MAR26	1.0	XE	USNO	10	4524
AUSTRAL-04	AUST04	MAR21	81	01:00	24	HbKeWwYg	UTAS	WASH	12APR26	1.0	XA	NASA	35	7888
IVS-R4526	R4526	MAR29	89	18:30	24	FtHbKkMaNyTcWwWzYgZc	USNO	WASH	12MAY04	1.0	XE	USNO	35	4526
IVS-R1527	R1527	APR02	93	17:00	24	FtHhNyOnTcTsWfWwWz	NASA	BONN	12APR24	1.0	XA	NASA	21	1527
IVS-CRDS59	CRDS59	MAY22	143	17:30	24	HbHhWw	USNO	WASH	12JUN14	1.0	XN	USNO	22	7895
AUSTRAL-05	AUST05	MAY28	149	01:00	24	HbKeWwYg	UTAS	WASH	Cleanup		XA	NASA	295	
IVS-R4537	R4537	JUN14	166	18:30	24	FtKkMaNyTcWwWz -Zc	USNO	WASH	12JUN25	1.0	XE	USNO	10	4537
IVS-R1538	R1538	JUN18	170	17:00	24	FtHbHoKeNyTcTsWwWz -KKWF	NASA	BONN	12JUL06	1.0	XA	NASA	17	1538
AUSTRAL-06	AUST06	JUL03	185	01:00	24	HbKeWwYg	UTAS	WASH	13MAR15	1.0	XB	NASA	254	7894

Abbildung 25: Auswahlergebnis für die Station Warkworth im Jahr 2012

Um anschließend die passenden NGS Master Files downloaden zu können, klickt man im Menü *Data&Products* auf *Data* und wählt die *Data base files* eines der drei Datenzentren (CDDIS/USA, BKG/Deutschland und OPAR/Frankreich) aus. Im nun geöffneten Index kann dann das Jahr und danach die gesuchten Master Files angeklickt und so heruntergeladen werden. Stehen für einen Tag mehrere Master Files zur Verfügung sollte überprüft werden, ob eine zweite Session zur selben Zeit stattgefunden hat, um so danach die Richtige auszuwählen. Ein Beispiel für einen Dateinamen eines NGS Files ist 12APR02XA_V004.gz. Die ersten sieben Zeichen geben dabei das Datum an, in diesem Fall den 2. April 2012. XA beschreibt in welchem Band das File aufgenommen wurde. In unserem Fall X-Band. (Zumeist gibt es auch ein passendes S-Band File dazu.) Gibt es verschiedene X-Band Files (XA, XU, XN, XE), so sind für unsere Auswertung XA und XN zu bevorzugen.

Möchte man mehr über einzelne NGS Files in Erfahrung bringen, so kann man wieder im Menü *Observing Program*, mit einem Klick auf *Master Files* und Auswahl des HTML Files für das bestimmte Jahr die explizite Session heraussuchen und anschließend Details über die Stationen, den Messablauf und die akquirierten Daten nachlesen. Die „*Analyst comments*“ können dabei eine Übersicht über den Ablauf und den Erfolg der Session geben. So werden zu Beginn des Files Probleme während der Sessions sowie bei der Auswertung erwähnt. So wird zum Beispiel für die oben genannten Messungen vom 2. April 2012 folgender Kommentar angeführt: „*Problems: Fortleza stopped after only ~9 hrs due to elevation drive problems. Tsukuba stopped after only ~9.5 hrs due to bad weather. Warkworth had only a few hours of data and was not correlated.*“³ Bei diesen Messungen ist laut Scheduling die Station Warkworth für diese Session zwar vorgesehen gewesen und hat auch daran teilgenommen, doch aus Gründen, die aus dem genannten Kommentar nicht hervorgehen, gab es nur wenig brauchbare Daten und es konnte daher keine

³ <http://lupus.gsfc.nasa.gov/data10/sessions/2012/r1527/r1527-analyst.txt>

Korrelation und Auswertung für Warkworth vorgenommen werden. Diese Session kann also auch nicht mit VieVS ausgewertet werden und liefert daher keine brauchbaren Daten für diese Arbeit. Die einzige Kenntnis daraus ist, dass Warkworth an einigen Messsessions laut Scheduling teilgenommen hat, aber oft durch Probleme keine oder nur wenige Daten liefern konnte. Diese Probleme werden in Kapitel 6 näher behandelt.

Ein NGS File besteht aus dem header und den data cards. Im Header sind die genäherten Koordinaten der Stationen (x, y, z) und der Radioquellen (Rektaszension, Deklination) der Session aufgelistet. In den data cards sind die aufgenommenen Beobachtungen und Informationen gespeichert. Auf den genauen Aufbau und Inhalt der NGS Master Files wird im Zuge dieser Arbeit nicht konkret eingegangen. Informationen dazu sind unter <http://lupus.gsfc.nasa.gov/global/ngs-doc.html> oder alternativ unter http://lacerta.gsfc.nasa.gov/mk5/help/dbngs_format.txt nachzulesen.

Hat man seine gesuchten NGS Files auf den Computer heruntergeladen so müssen diese nur noch mit einem Zip Programm (z.B.: 7Zip) entpackt und in den richtigen Dateiondner (C:\...\VIEVS\DATA\NGS\YEAR\ [Kap. 5.2.2.] kopiert werden um mit VieVS eine Auswertung durchführen zu können.

4.2.2. Aufbau der Vienna VLBI Software

Zum besseren Verständnis des Programmes ist es von Vorteil einen Überblick über den Aufbau beziehungsweise das Dateienverzeichnis zu bekommen [Abb. 28]. Dies ist nicht nur wichtig um das Programm besser zu verstehen, sondern auch um neue NGS Files in den richtigen Dateiondner zu laden, die Ergebnisse der Ausgleichung zu kontrollieren oder Änderungen an den Stationsfiles vorzunehmen, um nur wenige Möglichkeiten zu nennen.

Die Vienna VLBI Software besteht aus mehreren großen Bausteinen, die ineinander greifen. VIE_SETUP bildet die graphische Benutzeroberfläche mit der entschieden werden kann, was mit der Software berechnet werden soll. Hierbei werden zum Beispiel auch Prozesslisten zur Auswertung mehrerer Sessions erstellt und alle Parameter, die vom Nutzer zur Berechnung eingestellt worden sind, gespeichert. Für jede Session wird ein eigenes File (SESSIONNAME_parameter.mat) unter DATA/LEVEL0 angelegt.

VIE_SCHED ist der Scheduling Teil der Software, der zur Planung von VLBI Sessions dient. Im VIE_SIM Segment können Sessions für die ein Scheduling geplant worden ist, simuliert und danach bei Interesse mit der ausgewerteten Originalsession verglichen werden. VIE_GLOB ist jenes Programmelement, mit dem eine globale Ausgleichung aller teilnehmenden Stationen vorgenommen werden kann. Zur Auswertung von normalen Sessions, wie sie auch im Zuge dieser Arbeit vorgenommen worden sind, werden die drei Programmteile VIE_INIT, VIE_MOD und VIE_LSM ausgeführt. VIE_INIT liest das Parameterfile aus DATA/LEVEL0, das Outlier- und OPT- File ein und erstellt daraus ein Stationsfile (SESSIONNAME_antenna.mat), ein Radioquellenfile (SESSIONNAME_sources.mat) und ein File aller Scans (SESSIONNAME_scan.mat), die wieder in DATA/LEVEL0 abgespeichert werden. VIE_MOD bedient sich dieser Files und berechnet die theoretische Laufzeitverzögerung und die partiellen Ableitungen. Die Ergebnisse werden in DATA/LEVEL1 unter dem gleichen Filenamen wie zuvor gespeichert. Schließlich zieht VIE_LSM wiederum diese Files und die OPT Files her und berechnet mittels Kleinsten Quadrate Ausgleichung die Ergebnisse. Unter DATA/LEVEL3 können die geschätzten Parameter (x_SESSIONNAME.mat), die Einstellungen der Kleinsten Quadrate Ausgleichung (opt_SESSIONNAME.mat), die Normalgleichungsmatrizen (apta_ und atpl_SESSIONNAME.mat) und die Residuen (res_SESSIONNAME.mat) begutachtet werden. Weiters werden diese Daten auch in DATA/LEVEL2 gespeichert, die zur Berechnung der globalen Ausgleichung herangezogen werden. Außerdem erstellt VieVS ein Ausreißer File, in dem alle aufgedeckten Ausreißer gespeichert werden und bei einem wiederholten Durchlauf der Session a priori eliminiert werden können.

Vor den jeweiligen Berechnungen und Auswertungen kann in VIE_SETUP mittels Häkchen ausgewählt werden, welche Programmteile VieVS verwenden soll um den Rechenaufwand zu minimieren. So genügt es bei einer gewöhnlichen Sessionauswertung unter „Run“ und „Run options“ VIE_INIT, VIE_MOD und VIE_LSM anzukreuzen [Abb. 26].

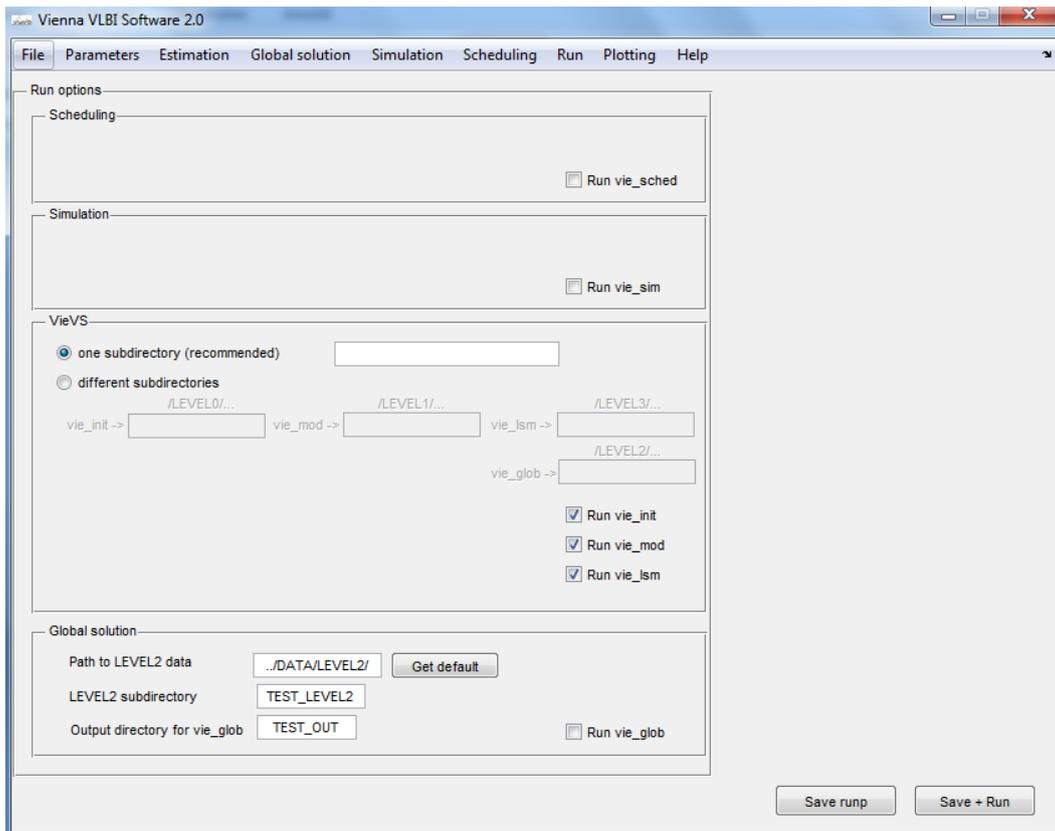


Abbildung 26: VieVS Ausführungsmenü

Im folgenden Abschnitt wird auf die Unterordner und deren Verwendung eingegangen. Abbildung 27 illustriert die Unterteilung der Vienna VLBI Software, ausgeführt unter Windows 7. Der Ordner „Data“ und dessen Unterordner werden anschließend in diesem Teil näher erklärt [Abb. 28].

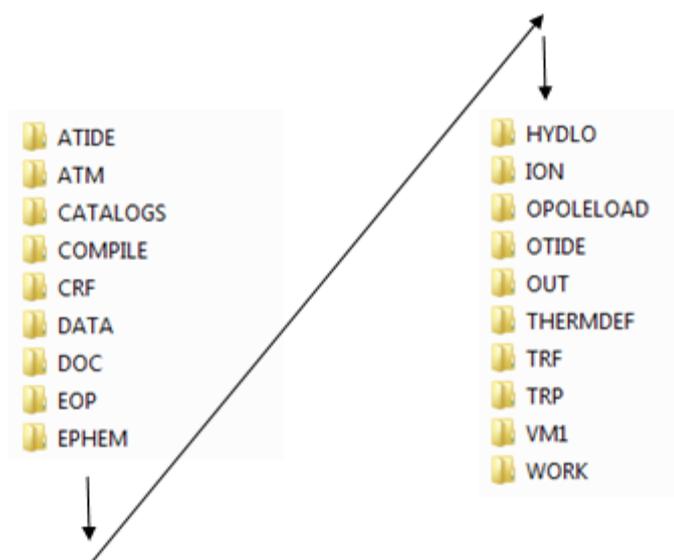


Abbildung 27: Datenverzeichnis VieVS

- ATIDE: Tidal Atmospheric loading coefficients
- ATM: Non-tidal atmospheric loading (Goddard Space Flight Center / Vienna)
- CATALOGS: Informationen über alle VLBI Stationen (Antennenparameter, Horizon Mask, ...)
- COMPILE: Quellcode des Programmes unterteilt in VIE_GLOB_V20, VIE_INIT_V20, VIE_LSM_V20, VIE_MOD_V20, VIE_SCHED_V20, VIE_SETUP_V20 und VIE_SIM_V20
- CRF: Koordinaten der Radioquellen im ICRF
- DATA: besteht aus mehreren Unterordnern, die später in diesem Kapitel beschrieben werden [Abb. 28]
- DOC: einige Dateien zur Hilfe und mit Informationen über die Software
- EOP: Erdorientierungsparameterfiles (1962,2000)
- EPHEM: Ephemeriden der Planeten und der Sonne
- HYDLO: Hydrological loading (Goddard Space Flight Center)
- ION: Dateien und Funktionen um ionosphärische Information zu verarbeiten (z.B.: von GPS TEC Karten)
- OPOLELOAD: Ocean tide pole loading
- OTIDE: 5 Modelle des ocean loadings
- OUT: Programme für weitere Berechnung der Erdorientierungsparameter, Basislinien etc.
- THERMDEF: Thermal deformation
- TRF: Daten des terrestrischen Referenzrahmens (Stationskoordinaten, Stationsgeschwindigkeit, weitere Daten der Stationen)
- TRP: Dateien und Funktionen um troposphärische Informationen (vgl. ION) zu verarbeiten (z.B.: von ray tracing)
- VMF: Koeffizienten der Vienna mapping function
- WORK: Arbeitsverzeichnis von VieVS; aus diesem Ordner wird das Programm gestartet und dieser muss während des Gebrauchs auch immer im Current Folder in MATLAB geöffnet sein um eine reibungslose Nutzung des Programmes zu sichern. [Kap. 4.1.; Abb. 22]

Im Datenordner „Data“ sind alle Inputfiles für die Berechnungen und die dazugehörigen Ergebnisse in den Outputfiles gespeichert. Aufpassen sollte man bei der Benennung von Berechnungen in VieVS, da Files mit gleichem Namen überschrieben werden. Ein überlegtes Konzept zur Benennung der zu bearbeitenden Daten in VieVS ist zu empfehlen.

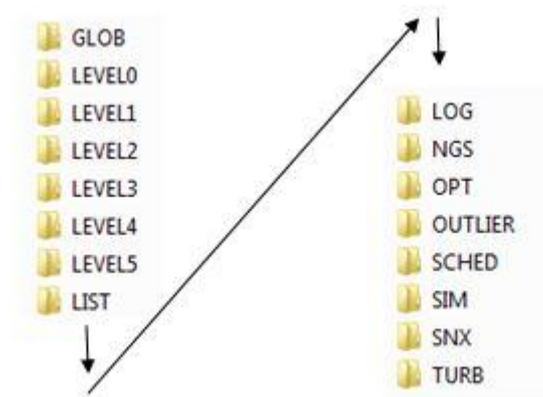


Abbildung 28: Datenverzeichnis Data

Unter den jeweiligen Unterordnern des Data Ordners verbergen sich folgende Daten:

- GLOB: Daten für VIE_GLOB
- LEVEL0: VIE_INIT Files
- LEVEL1: VIE_MOD Files
- LEVEL2: Daten für VIE_GLOB
- LEVEL3: Ergebnisse von VIE_LSM
- LEVEL4: Daten für VIE_SIM
- LEVEL5: Daten für VIE_SCHED
- NGS: NGS Files der Sessions
- OUTLIER: Ausreißer File
- OPT: OPT Files
- SCHED: Ergebnisse des Scheduling
- SIM: Daten für VIE_SIM
- SNX: Sinex Files
- TURB: Daten für VIE_SIM

4.2.3. Benutzeroberfläche (Graphical User Interface)

Nachdem im Kapitel [4.2.2.] ein erster Einblick über den Aufbau der Software gegeben wurde, wird in diesem Kapitel die graphische Benutzeroberfläche näher beschrieben. Wie schon erwähnt bietet VieVS als erste VLBI Auswertesoftware ein GUI (Graphical User Interface). Dies soll Neueinsteigern einen einfacheren und schnelleren Start im Umgang mit dem Programm ermöglichen. In diesem Abschnitt werden die einzelnen Menüs kurz vorgestellt und beleuchtet. Für nähere Informationen kann das VieVS Manual herangezogen werden.

(<http://vievs.geo.tuwien.ac.at/fileadmin/editors/VieVS/documents/vievsDoc.pdf>)

Zum Starten der Software muss zuerst Matlab hochgefahren und anschließend im VieVS-Ordner „Works“ die Datei vievs.m ausgeführt werden [Abb. 23]. Es erscheint das GUI mit grauem Hintergrund und den Dropdown Menüs „File“, „Parameters“, „Estimations“, „Global Solution“, „Simulation“, „Scheduling“, „Run“, „Plotting“ und „Help“.

- **File:** Unter „Set input files“ können die zu prozessierenden VLBI Sessions geladen werden. Das Programm greift unter „Browse for sessions“ auf den Ordner C:\...\VIEVS\DATA\NGS zu in dem die heruntergeladenen NGS-Files liegen [Kap. 4.2.1.]. Es kann ein oder mehrere Files gleichzeitig zur Auswertung geladen werden. Gibt es mehrere Sessions mit denen öfters gearbeitet wird, so kann man im Unterpunkt „Parameter Files“ die gerade verwendete Prozessliste speichern. So müssen bei einem neuerlichen Start von VieVS nicht alle Sessions wieder einzeln hinzugefügt werden, sondern können als Prozessliste geladen werden. Dieses nützliche Feature gibt es auch für die eingestellten Parameter, die gespeichert und beim der nächsten Auswertung exakt gleich wieder geladen werden können. Eine Zeitersparnis und Fehlervermeidung beim Einstellen der Parameter wird dadurch gewährleistet. Damit die Ergebnisse dieser Arbeit vergleichbar sind und weil mit immer den gleichen Sessions gearbeitet wurde, ist auch bei dieser Arbeit eine Prozessliste und ein Parameterfile abgespeichert worden. Zu den jeweiligen Einstellungen wird in Kapitel 5 Stellung genommen. Unter „Set input files“ können außerdem noch OPT- und Outlier Files geladen werden.

OPT Files beinhalten spezielle Informationen zu individuellen VLBI Sessions. Diese können unter C:\...\VIEVS\DATA\OPT mittels eines Texteditors (z.B.: WordPad)

bearbeitet werden. Wie in Abbildung 29 zu erkennen, lassen sich einige Parameter a priori bestimmen, beziehungsweise ausschließen, auf die im Zuge der Auswertung geachtet werden soll.

```
CLOCK REFERENCE
WETTZELL

CLOCK BREAKS: 2
BADARY 55454.4
WETTZELL 55372.369

STATIONS TO BE EXCLUDED: 1
CHICHI10

BASELINES TO BE EXCLUDED: 4
BADARY WETTZELL
BADARY MATERA
BADARY ZELENCHK
BADARY WARK12M

SOURCES TO BE EXCLUDED: 2
1451-375
0800+618
```

Abbildung 29: OPT File

Es kann für jede Session eine Referenzuhr bestimmt werden. Diese hat allerdings keinen Einfluss auf die Ergebnisse. Es sollte aber verhindert werden, dass eine Station mit einem clock break als Referenz verwendet wird. Ist keine Station bestimmt, so wird automatisch die erste Station in der Antennenanordnung als Referenzuhr bestimmt. In Abbildung 29 ist Wettzell die Referenzuhr.

Sind nach einer Auswertung große Residuen zu erkennen, können diese von einem clock break stammen. Durch spezielle Methoden können diese für eine Station in einer bestimmten Epoche bestimmt und im Zuge des OPT Files berücksichtigt werden. Das Ergebnis wird dadurch beträchtlich verbessert. In unserem Beispiel gibt es zwei clock breaks jeweils an der Station Badary in der Epoche 55454.4 und an der Station Wettzell in der Epoche 55372.369.

Der dritte Punkt in den OPT Files behandelt Stationen, die zwar im Zuge einer Session gemessen haben, also Daten in den NGS Files gespeichert wurden, aber an der Auswertung nicht teilnehmen sollen. Die Ausgrenzung einer oder mehrerer Station kann vorgenommen werden, wenn Ergebnisse mit dieser/n Station(en)

entscheidend schlechter sind, als ohne der/n Station(en), oder auch wenn zu wenig brauchbare Daten einer Station zur Verfügung stehen. Die Option des Ausschlusses einer Station ist im Zuge dieser Arbeit einer der wichtigsten Punkte, da es die Möglichkeit bietet, Sessions auszuwerten, an denen die Station Warkworth (WARK12M) regulär teilgenommen hat und anschließend die idente Session erneut auszuwerten und dabei WARK12M auszugrenzen. In den Ergebnissen sollen dabei Unterschiede in der Genauigkeit der Erdorientierungsparameter sowie eine Verringerung der beobachteten Quellen untersucht werden [Kap. 5].

Es können jedoch nicht nur Stationen ausgeschlossen werden, sondern auch Baselines oder Quellen, die aus verschiedenen Gründen nicht in den Ergebnissen zu berücksichtigen sind. In Abbildung 29 wird die Station CHICHI10, die Baseline BADARY – WETTZELL, BADARY – MATERA, BADARY – ZELENCHK und BADARY – WARK12M sowie die Quellen 1451-375 und 0800+618 vom Auswerteprozess ausgeschlossen.

Die Outlier Files sind gleich wie die OPT Files simple ASCII Files die mit einem Texteditor bearbeitbar sind. Sie beinhalten line-per-line Beobachtungen, die als Ausreißer deklariert wurden [Abb. 30]. Ausreißer sind die Beobachtungen mit den größten Residuen. Eine Baseline umfasst zwei teilnehmende Stationen und das modifizierte Julianische Datum der Beobachtung (mjd) [Abb. 30]. In den meisten Fällen wird die Ausreißersuche automatisch durchgeführt indem man unter „File“, „Set input files“ das Kästchen „Eliminate outliers“ aktiviert. Eine andere Methode wäre manuell die Ausreißer im *Plotting Tool* zu kennzeichnen und so dem Outlier File hinzuzufügen. Ist bereits eine Session ausgewertet und ein dazugehöriges Outlier File angelegt worden, so fließen bei einer erneuten Auswertung die Ausreißer des Outlier Files nicht mehr in das Ergebnis ein. Sind bei dieser Auswertung weitere Ausreißer aufgetaucht, so werden diese dem File hinzugefügt. Um also eine Session frei von groben Fehlern zu generieren, sollte nach dem erstmaligen Durchlauf und dem Deklarieren von Ausreißern die Session unter Berücksichtigung des Outlier Files erneut ausgewertet werden. Dieser Vorgang wiederholt man so oft, bis keine Ausreißer mehr aufgefunden werden können. Auch im Falle dieser Arbeit sind die einzelnen Sessions mit der Berücksichtigung der eliminierten Ausreißer mehrmals ausgewertet worden.

Unter C:\...\VIEVSDATA\OUTLIER können die Beobachtungen mit den größten Residuen, die als Ausreißer deklariert worden sind, inspiziert werden.

```

KOKEE      WETTZELL 56420.775694444441
KOKEE      WETTZELL 56420.780416666668
KOKEE      WETTZELL 56420.782129629632
KOKEE      WETTZELL 56420.783912037034
KOKEE      WETTZELL 56420.785925925928

```

Abbildung 30: Outlier File

- **Parameters:** In diesem Menü können die Parameter für den Referenzrahmen (terrestrial und celestial), die Ephemeriden, die Troposphärenparameter (troposphärische Laufzeitverzögerung, mapping function, gradients), die Ionosphärenparameter (ionosphärische Laufzeitverzögerung), die Korrekturen an der Station (Gezeiten der festen Erde, thermale Antennenverformung, etc.), die Erdorientierungsparameter (A priori Zeitreihen, Modelle und Interpolationsmethoden) und die Beobachtungsbegrenzungen bestimmt werden.

Die in den Auswertungen verwendeten Parameter sind in Kapitel [5.2.1.] aufgelistet.

- **Estimation:** Im Menüpunkt „Least squares“ können die Intervalle, in welchen die Troposphären-, Uhren-, EOP-, Stationskoordinaten- und Radioquellenkoordinatenparameter in der kleinsten Quadrate Ausgleichung geschätzt werden sollen, bestimmt werden. Der folgende Absatz über die kleinste Quadrate Ausgleichung in der VLBI folgt Schuh und Böhm (2011).

Die kleinste Quadrate Ausgleichung folgt dem klassischen Gauß-Markov Modell (Ausgleich vermittelter Beobachtungen). Dabei werden unbekannte Parameter in einem überbestimmten Gleichungssystem geschätzt. Da mehr Gleichungen als Unbekannte vorhanden sind, existiert keine exakte Lösung, jedoch eine Lösung (dx), die die Quadratsumme der gewichteten Residuen minimiert, basierend auf linearisierten Beobachtungsgleichungen. Die Verbesserungsgleichung lautet wie folgt:

$$v = A * x - l \quad (2)$$

übertragen auf die VLBI

$$\begin{bmatrix} v_{ro} \\ v_{po} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{ro} \\ A_{po} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} dx_1 \\ dx_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} l_{ro} \\ l_{po} \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad P = \begin{bmatrix} P_{ro} & 0 \\ 0 & P_{po} \end{bmatrix} \quad (3)$$

mit

A_{ro} Designmatrix mit den 1. Ableitungen der Funktion der realen Beobachtungen nach den geschätzten Parametern

A_{po} Pseudobeobachtungsmatrix, welche die Schwankungsbreite (Grenzen) der Parameter entweder der absoluten Werte (für Troposphärengradienten) oder der relativen Werte der piecewise linear Funktion beschränkt.

l_{ro} beobachteter – berechneter Beobachtungsvektor (reale Beobachtungen)

l_{po} Pseudobeobachtungsvektor (0-Vektor)

P Gewichtsmatrix

Die Normalgleichung der Ausgleichung sieht wie folgt aus:

$$N * dx = b \quad (4)$$

mit

$$N = A^T P A$$

$$b = A^T P l$$

Für die Normalgleichungsmatrix N müssen Bedingungen eingeführt werden, damit sie nicht singulär wird. In einem dreidimensionalen VLBI Netz ist der Rangdefekt 6 (der Maßstab wird durch die Beobachtungen bestimmt). Um den Rangdefekt zu beheben benötigt man 6 Bedingungen, deshalb werden für ausgewählte Stationen 3 no-net-translation (NNT) und 3 no-net-rotation (NNR) Bedingungen eingeführt. Dabei ist es wichtig stabile Stationen für die Datumsbestimmung zu verwenden, um eine hohe Qualität und Genauigkeit des ITRF und ICRF zu gewährleisten.

Durch Inversion der Gleichung (5) gelangt man schließlich zur Lösung:

$$dx = N^{-1} * b \quad (5)$$

Die gewichtete Varianz a posteriori lautet somit

$$\sigma_0^2 = \frac{v^T P v}{k-u+d} \quad (6)$$

mit

- k der Anzahl der Beobachtungen
- u der Anzahl der geschätzten und reduzierten Parameter
- d der Anzahl der zusätzlichen Bedingungen

Die Kovarianzmatrix Q mit den Varianzen als Diagonalelementen ist die gewichtete Varianz a posteriori multipliziert mit der inversen Normalgleichungsmatrix (Gleichung (7)).

$$Q = \sigma_0^2 * N^{-1} \quad (7)$$

Zieht man die Wurzel eines Diagonalelements, so erhält man die Standardabweichung. Die Standardabweichung σ (formaler Fehler) wird in VieVS mit mx ausgegeben.

Für die Troposphäre kann der Intervall [min] in der der Zenith Wet Delay (ZWD) sowie der Nord- und Ostgradienten geschätzt werden sollen, voreingestellt werden. Zusätzlich können relative Grenzen [ps²/s] zwischen den piecewise linear (pwl) ZWD offsets bestimmt werden. Auch für den Nord- und Ostgradienten (NGR und EGR) können relative Grenzen [mm/day] zwischen den pwl NGR/EGR offsets angegeben werden. Die Funktion für die Laufzeitverzögerung, die sich aus einem hydrostatischen Term und einem feuchten Term (ZWD) zusammensetzt, sieht wie folgt aus (Böhm; 2004):

$$\Delta L(e) = \Delta L_h^z * mf_h(e) + \Delta L_w^z * mf_w(e) \quad (8)$$

mit

$\Delta L(e)$ totale Laufzeitverzögerung der neutralen Atmosphäre mit dem Elevationswinkel (e) zur Radioquelle,

ΔL_h^z a priori Zenith Hydrostatic Delay

$mf_h(e)$ Mapping Funktion für den hydrostatischen Anteil

ΔL_w^z a priori Zenith Wet Delay

$mf_w(e)$ Mapping Funktion für den feucht Anteil

Der hydrostatische Anteil beträgt dabei etwa 90% und kann modelliert werden, nur der Feuchtanteil muss geschätzt werden.

Gleichung (8) geht allerdings von einer azimuthalen Symmetrie der neutralen Atmosphäre rund um die Station aus. Da die Atmosphäre rund um eine Station aufgrund von klimatischen- und Wettereinflüssen nicht immer gleich ist, müssen Gradienten für die Nord(und Süd)- und Ost(und West)richtung eingeführt werden. Diese Änderung führt zu folgender Funktion (Böhm, Schuh; 2007)

$$\Delta L(a, e) = \Delta L_0(e) + mf_0(e) * \cot(e) * [1 - 10^{-6} N_s \csc^2(e)] * [G_n \cos(a) + G_e \sin(a)] \quad (9)$$

mit

$\Delta L(a, e)$ totale Laufzeitverzögerung der neutralen Atmosphäre mit dem Azimut (a) und dem Elevationswinkel (e)

$\Delta L_0(e)$ Laufzeitverzögerung ohne Gradienten

$mf_0(e)$ Mapping Funktion

N_s Refraktion an der Erdoberfläche

G_n Nordgradient

G_e Ostgradient

Bei der Schätzung der Uhrenparameter besteht die Möglichkeit clock breaks (aus den OPT-Files) zu laden. Der Schätzintervall [min] kann entweder nur für die pwl offsets pro Uhr oder die pwl offsets und einem linearen Term pro Uhr oder die pwl offsets, einen linearen und einen quadratischen Term pro Uhr bestimmt werden. Ebenfalls besteht die Möglichkeit relative Grenzen [ps²/s] zwischen den pwl clock offsets einzuführen.

Für die Erdorientierungsparameter (xpol, ypol, dUT1, nutdx, nutdy) können jeweils der Intervall der Schätzung [min] sowie die Grenzwerte [mas/day bzw. ms/day für dUT1] bestimmt werden.

Bei der Schätzung der Stationskoordinaten können die Bedingungen No Net Translation, No Net Rotation und No Net Scale in die Ausgleichung eingeführt werden.

Schließlich kann noch das Intervall [min] und die Grenzen [mas/day] in welchen die Koordinaten der Radioquellen geschätzt werden sollen, eingestellt werden. Dabei ist zu beachten, dass nur Radioquellen die nicht im CRF sind, geschätzt werden.

Die in der Auswertung verwendeten Schätzintervalle und Grenzen sind in Kapitel [5.2.2.] angeführt.

Auf den Menüpunkt **Global Solution** wird hier nicht näher eingegangen, da dieser im Rahmen dieser Arbeit nicht verwendet wird. Aufgrund ihrer Bedeutung werden die Menüpunkte **Scheduling** und **Simulation** kurz erläutert.

- **Scheduling:** Das Scheduling Menü bietet die Möglichkeit einen Ablaufplan einer zukünftigen VLBI Session zu erstellen. Dies kann nicht nur für die Planung realer Sessions genutzt werden, sondern auch für experimentelle Zwecke. So können bereits durchgeführte VLBI Sessions und deren wahre Ergebnisse mit den theoretischen Ergebnissen der Planung verglichen werden. Um die theoretische Planung auszuwerten, kann in VieVS die Simulation verwendet werden. Näheres dazu findet sich im nächsten Bullet Point. In Abbildung 31 sind alle einzustellenden Parameter für die Sessionplanung abgebildet.

Zuerst werden die teilnehmenden Stationen ausgewählt (für experimentelle Zwecke, die Stationen aus den NGS Master Files herauslesen). Dabei genügt ein Mausklick auf die Station in der Spalte *Available*. Soll wiederum eine bereits gewählte Station entfernt werden, so kann dies durch Klick auf die Station im Bereich *Selected* und anschließend auf *Clear selected* durchgeführt werden. Es stehen auch vordefinierte Netzwerke wie VLBI2010 oder IVSR1 zur Verfügung.

Der Zeitspanne der Session wird mittels Startzeitpunkt (Tag und Uhrzeit) sowie der Zeitdauer festgelegt.

Des Weiteren werden das SNR (Signal-to-Noise Ratio) Werte für X- und S- Band, der Beobachtungsmodus für Twin Teleskope (Beobachtung der gleichen Radioquelle, stete Beobachtung und multidirektionale Beobachtung) und die Parameter für den minimalen Winkelabstand einer Beobachtung zur Sonne, den Cut off Elevationswinkel und die minimale spektrale Flussdichte eingestellt. Abschließend kann noch über die Beobachtungsstrategie entschieden werden. Hier stehen die Quellen- und die Stationen-basierte Strategie zur Auswahl. Die gewählten Parameter können für spätere VLBI Planungen gespeichert werden. Bevor man das Scheduling startet, sollte auch noch das gewünschte Output File (NGS und/oder SKD) angeklickt werden.

Unter *Run* -> *Run Options* und klick auf *Run vie_sched* kann die Session Planung gestartet werden. Die geplante Session wird in `C:\...\VIEVSDATA\SCHEd` abgespeichert.

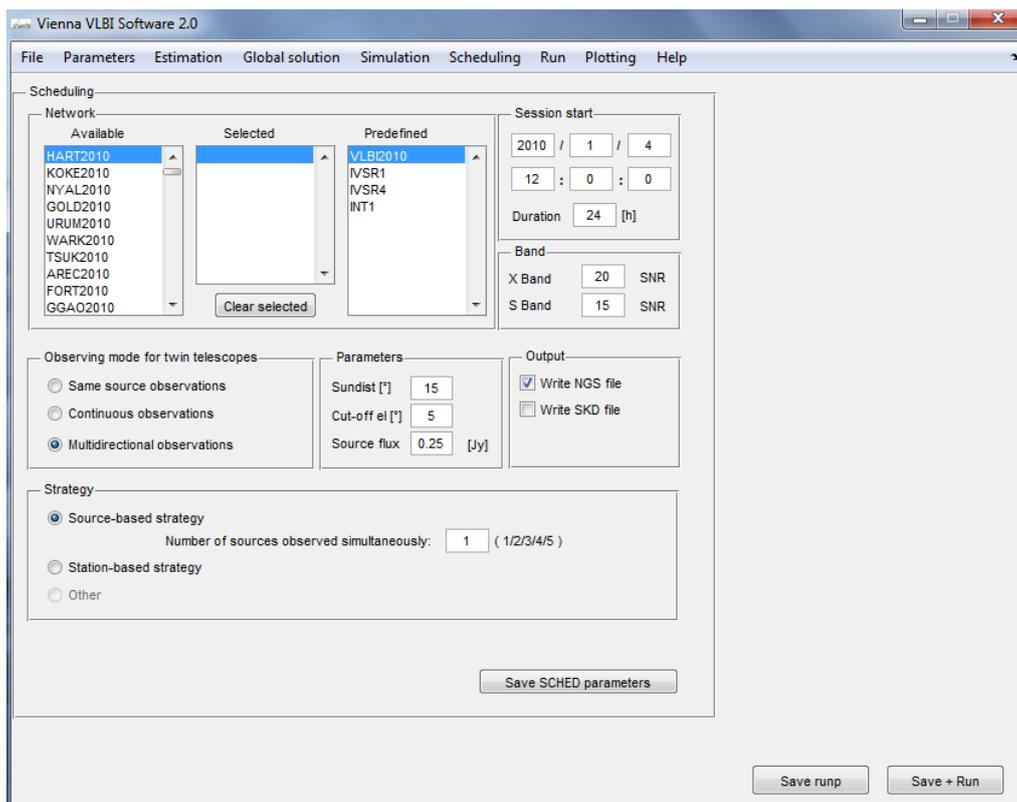


Abbildung 31: VieVS Scheduling

- **Simulation:** VieVS bietet die Option VLBI Sessions zu simulieren. Dabei werden die drei wichtigsten stochastischen Fehlerquellen berücksichtigt, der Feuchtanteil der troposphärischen Laufzeitverzögerung, Fehler der Stationsuhr und Messfehler [Abb. 32]. Vor der Auswertung muss allerdings die richtige Session in *File, Set input files* geladen werden. Es können sowohl reale Beobachtungen (C:\...\VIEVS\DATA\WGS), als auch mit VieVS Scheduling erstellte Beobachtungspläne (C:\...\VIEVS\DATA\SCHED) zur Simulation herangezogen werden. Allerdings muss darauf geachtet werden, dass kein Outlier File erstellt wird, da keine Ausreißer simuliert werden. Unter *Run -> Run Options* und klick auf *Run vie_init, vie_mod und vie_sim* kann die Simulation gestartet werden. Diese erzeugt nun künstlich simulierte Beobachtungen.

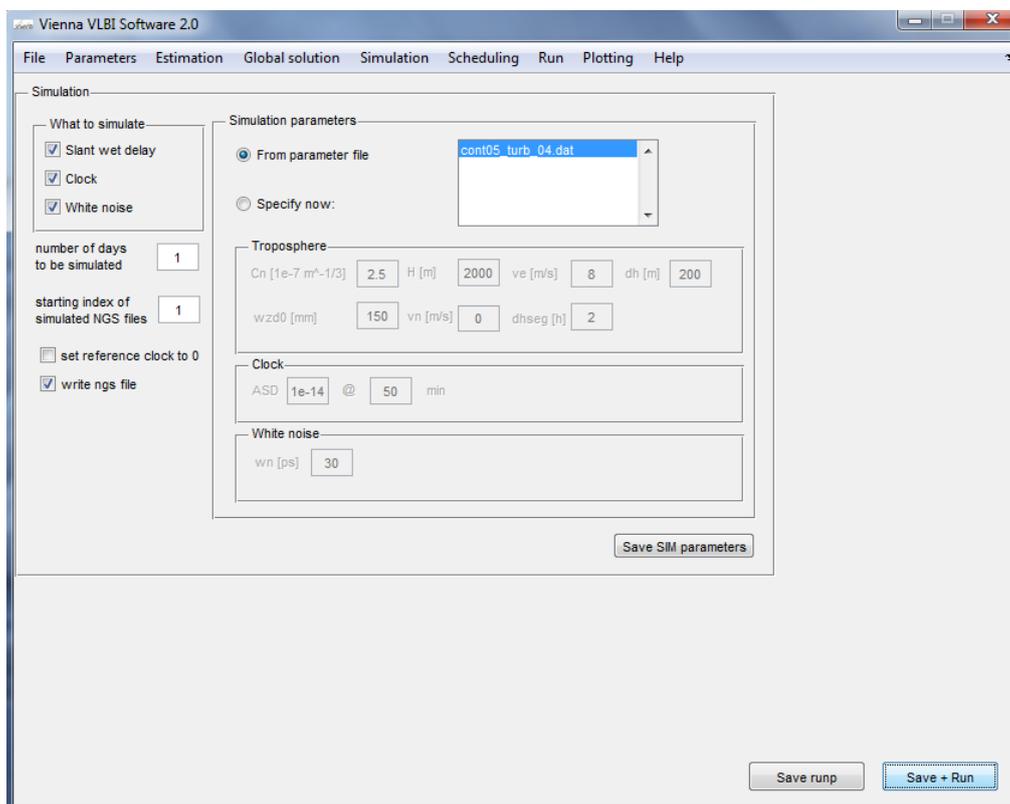


Abbildung 32: VieVS Simulation

- **Run:** In diesem Menü befindet sich der Punkt *Sinex Output*. Das Sinex File ist ein standardisiertes ASCII Format, welches vom IERS (International Earth Rotation and Reference System Service) verwendet wird. Es kann gewählt werden welche Parameter in dieses File geschrieben werden. Da die Normalgleichungsmatrix sehr groß werden kann, besteht die Möglichkeit ausgewählte Parameter (z.B.: zenith wet

delay, der stündlich geschätzt wird) aus der Matrix zu entfernen. Dadurch kann die Dateigröße verringert werden.

In *VieVS estimation settings* kann gewählt werden, ob die Uhren Parametrisierung der ersten Lösung und der Ausreißer Test der Hauptlösung durchgeführt werden soll.

Schließlich kann man unter *Run options* die Programmteile auswählen, die für die Auswertung verwendet werden sollen. Wie schon unter den Bullet Points zuvor beschrieben, kann zwischen *Run vie_sched*, *Run vie_sim*, *Run vie_init*, *Run vie_mod*, *Run vie_ism* und *Run vie_glob* entschieden werden. Zur Auswertung von wahren Sessions, wie im Falle dieser Arbeit, benötigt der User *Run vie_init*, *Run vie_mod* und *Run vie_ism*, damit VieVS die gewünschten Ergebnisse liefert [Abb. 27]. Es sollte darauf geachtet werden mit welchem Namen man die Ergebnisse speichert um die Übersicht zu wahren. Es erwies sich als praktikabel nach dem System *JJMONTTX?_N00?* (z.B.: 12FEB09XE_N004) zu verfahren.

- **Plotting:** Hier wird die Gelegenheit geboten die Ergebnisse graphisch anzuzeigen, zu analysieren und, wenn erforderlich Ausreißer manuell zu kennzeichnen und dem Outlier File hinzuzufügen.

In Abbildung 33 sind am linken Rand alle Anzeigeeoptionen verzeichnet. Zuerst muss der ordnungsgemäße Ordner und die gewünschte Datei geöffnet werden. Weiters lässt sich zwischen der Erst- und der Hauptlösung differenzieren. Nun können die Residuen der einzelnen Stationen, Baselines oder Radioquellen analysiert werden. In kommenden VieVS Versionen wird es möglich sein clock breaks zu kennzeichnen und dem OPT File einzuschreiben (*Add clock break*). Ausreißer manuell zu deklarieren und dem Outlier File hinzuzufügen ist hingegen schon mit dem Button *Select Outlier* und Mausklick auf den jeweiligen Ausreißer möglich. Hier besteht allerdings auch die Gelegenheit dies von VieVS automatisch durchführen zu lassen (siehe *Bullet Point File*).

Es lassen sich jedoch nicht nur die Residuen der Stationen, Baselines und Radioquellen analysieren, sondern auch die geschätzten Parameter. Unter

Parameters können die Erdorientierungsparameter sowie die Stationsuhr und der zenith wet delay dargestellt werden. Es lassen sich auch mehrere Sessions gleichzeitig anzeigen und dadurch vergleichen.

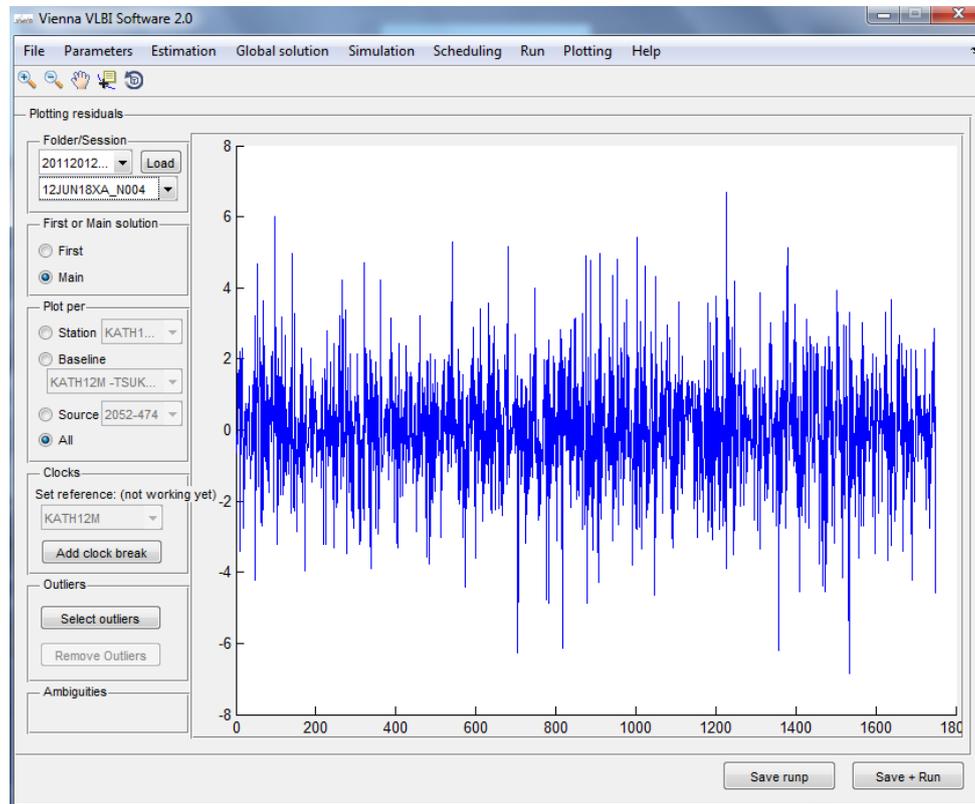


Abbildung 33: VieVS Plotting Tool - Residuals

- **Help:** Hier findet sich ein Link auf die VieVS Homepage, beziehungsweise ein Verweis auf ein FAQ PDF-File. Weitere nützliche Hilfestellungen sind auch unter `C:\...\VIEVS\DATA\DOC` zu finden.

4.2.4. Ergebnisse der Auswertungen mittels VieVS

Anhand des Plotting Tools lassen sich die Ergebnisse (Residuen) der Auswertung mittels VieVS graphisch darstellen, jedoch können nicht alle interessanten Werte visualisiert werden. Durch die einfache Auswertung einer Session lassen sich folgende Parameter bestimmen:

- Stationskoordinaten
- Koordinaten der Radioquellen

- Erdorientierungsparameter
- Uhrenparameter
- Troposphärische Parameter, etc.

Mittels einer globalen Ausgleichung lassen sich allerdings weitere, für die Geodäsie sehr wichtige, Parameter bestimmen.

- Terrestrische Referenzrahmen (ITRF)
- Himmelsfeste Referenzrahmen (ICRF)
- Geodynamische Parameter
- Astronomische Parameter, etc.

All diese Parameter [vgl. Kap. 2.3.] lassen sich direkt oder auf Umwegen unter der Verwendung der Vienna VLBI Software berechnen.

4.3. Microsoft Excel

Microsoft Excel ist ein Tabellenkalkulationsprogramm, das Berechnungen mit Formeln und Funktionen durchführen kann. Mittels Zeilen und Spalten ermöglicht es eine übersichtliche Darstellung von Tabellen und Aufzählungen zur Bearbeitung großer Datenmengen. Außerdem bietet Microsoft Excel eine graphische Ausgabe von einer oder mehreren Tabellen.

Anlässlich der Auswertungen zu dieser Arbeit wurden die großen Datenmengen der einzelnen VLBI Sessions aus Matlab ausgespielt und in Excel übersichtlich dargestellt. Dies erleichtert die Analyse der Ergebnisse, beziehungsweise den Vergleich der Auswertungen mit der Station Warkworth und ohne Warkworth. Außerdem wurden die Werte der Horizon Masks [Kap. 4.5.4.] in Excel bearbeitet und graphisch dargestellt.

4.4. Google Earth

Google Earth ist eine Freeware und stellt virtuell den Globus dar. Die Oberfläche bilden Satelliten- und Luftbilder, die zu einer nahtlosen Oberfläche verbunden sind. Der Benutzer kann bis auf wenige hundert Meter über die Land- oder Meeresoberfläche zoomen ohne

große Verluste in der Bildauflösung zu erhalten. Je nach Aufnahme ist die Qualität besser (z.B.: Großstädte) oder schlechter (z.B.: nicht besiedelte Landschaften). Die Luftbilder können zusätzlich mit enormen Mengen an Geodaten und dazugehörigen Bildlayern überlagert werden. Darüber hinaus bietet Google Earth eine Menge an Funktionen, wie 3D Modus in Städten, Google Street View, Niederschlagsfunktionen und vieles mehr, auf die hier nicht näher eingegangen wird.

Zwei Funktionen waren jedoch zur Erstellung der Horizon Masks von großem Nutzen. Durch einen einfachen Mausklick lässt sich jederzeit das Ansichtsfenster einnorden und die Perspektive Normal zur Erdoberfläche ausrichten. Das Google Earth Measurement Tool ermöglicht es gerade Linien in den Bildern zu zeichnen und sowohl Distanz zwischen Anfangs- und Endpunkt sowie den Winkel zur Nordrichtung ausgeben.

Bei der Messung der Horizon Mask war es nicht möglich Koordinaten im Landeskoordinatensystem einzumessen und daraus die Nordrichtung zu berechnen. Da es aber wichtig ist die Nordrichtung auf wenige Grad genau zu ermitteln, wurde ein Kompass eingesetzt, der jedoch zu ungenau arbeitete. Hier war das Google Earth Measurement Tool eine große Hilfe. Die Azimutwinkel wurden erst nach den eigentlichen Messungen im Büro berechnet. Der Vorgang wird im nächsten Absatz detailliert erläutert.

Das Tachymeter wird möglichst nahe der Antenne aufgestellt und horizontiert. Teilkreis 0 des Horizontalkreises zielt dabei in einer beliebigen Richtung. Danach wird ein Fernziel (in Abb. 37 ein Haus in 300m Entfernung) gesucht, dass von beiden Standpunkten, von denen gemessen wird (auf jeder Seite der Antenne) sichtbar ist. Der Azimutwinkel zu diesem Fernziel wird notiert und alle Elevationswinkel gemessen. Vor der eigentlichen Auswertung am Computer wird dann mittels Google Earth die Abweichung des Teilkreises 0 von der Nordrichtung (in Abb. 34 rund 24°) berechnet und rechnerisch korrigiert. Zur Kontrolle sind Überlappungsbereiche der 2 Standpunkte zu messen. Die korrekte Einstellung des Winkelmaßes am Tachymeter ist von großer Signifikanz. Misst man, wie zumeist bei Geodäten üblich, in Gon [^g] (Neugrad) so ist der Arbeitsaufwand bei der Auswertung größer und es besteht die Gefahr Fehler zu begehen. Daher sollte vor Beginn der Messungen das Gerät auf Grad [[°]] umgestellt werden.

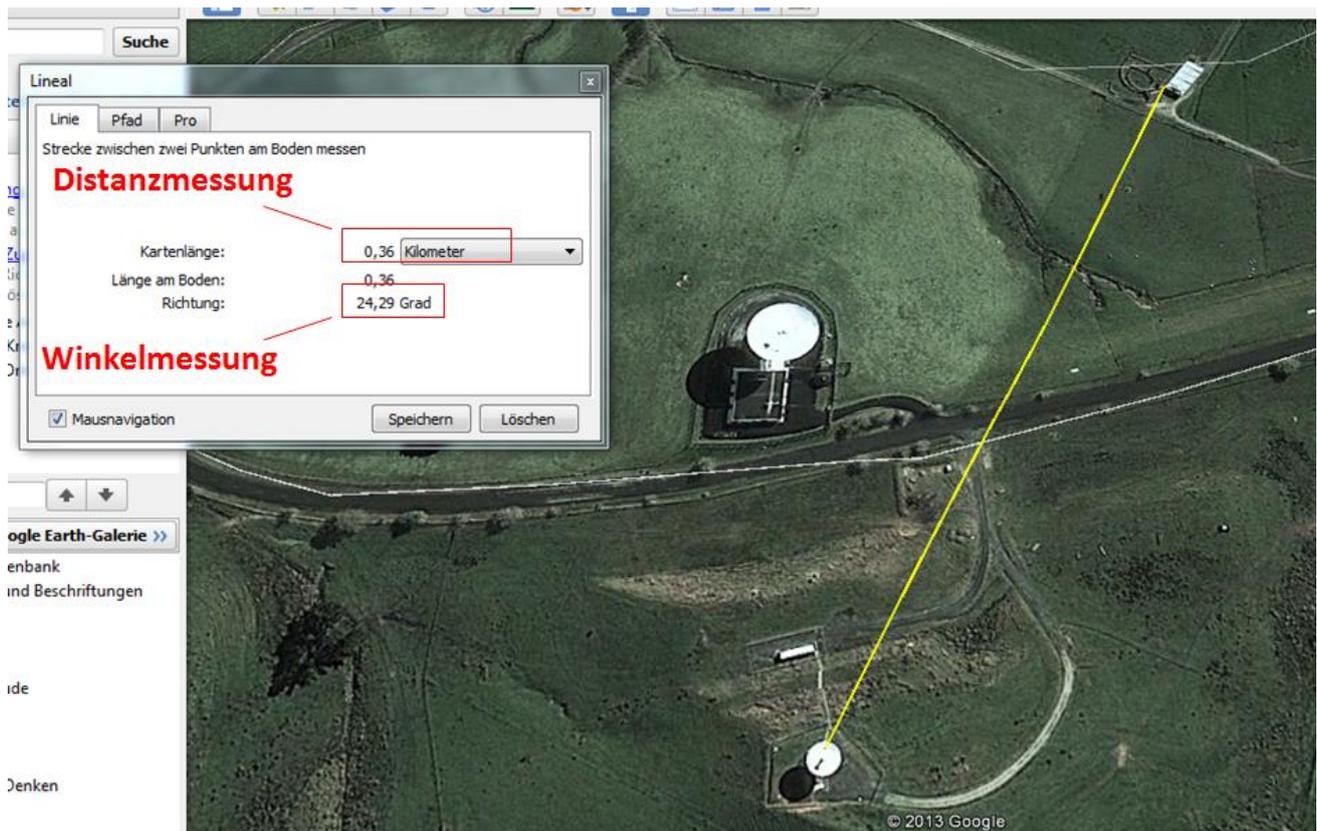


Abbildung 34: Google Earth Winkel- und Distanzmessung

Wie schon in Kapitel 4.5.4 beschrieben beruhen die Horizon Masks auf der Tatsache, dass man im Antennenzentrum mit einem Tachymeter nicht messen kann und somit rund 6 und 15 Meter tiefer auf festem Untergrund messen muss [Abb. 18]. Daher müssen die Elevationswinkelwerte in das Antennenzentrum verschoben werden um die tatsächlichen Azimutwinkel zu bekommen. Wie in Abbildung 19 zu erkennen ist benötigt man dafür auch den Abstand zum Hindernis. Dieser wurde auf 10 Meter genau wiederum mittels Google Earth Measurement Tool geschätzt. Je weiter entfernt ein Hindernis also ist, desto weniger stark spielt der Höhenunterschied zwischen Antennenzentrum und Tachymeter eine Rolle. In Tabelle 4 wird sehr gut ersichtlich wie sich die Winkel mit größer werdender Entfernung dem Ausgangswinkel annähern. Hierbei wird von einem Höhenunterschied von 6 Metern Unterschied (12m Antenne) zwischen Antennenzentrum und Tachymeter ausgegangen. Bei einem Hindernis in 100 Metern Entfernung bei einem Elevationswinkel von 5° auf Tachymeterniveau beträgt der Elevationswinkel im Antennenzentrum nur $1,6^\circ$. Bei einem Hindernis in 500 Metern ist der Unterschied schon viel geringer. Hier beträgt der Elevationswinkel im Antennenzentrum $4,3^\circ$

h = 6

Wark12m	100	200	300	400	500	[m]
5	1,6	3,3	3,9	4,1	4,3	[°]
6	2,6	4,3	4,9	5,1	5,3	[°]
7	3,6	5,3	5,9	6,2	6,3	[°]
8	4,6	6,3	6,9	7,2	7,3	[°]
9	5,6	7,3	7,9	8,2	8,3	[°]
10	6,6	8,3	8,9	9,2	9,3	[°]

Tabelle 4: Elevationswinkeländerung mit größer werdender Entfernung

5. Auswertung der Daten und Ergebnisse

Nach ausführlicher Beschreibung der Grundlagen der VLBI sowie deren Ziele in naher Zukunft, der noch jungen Station Warkworth und schließlich den Auswertesoftwareprogrammen befasst sich dieses Kapitel nun mit den Berechnungen und Ergebnissen der Station Warkworth im globalen geodätischen VLBI Netzwerk. Um den Nutzen der Station zu überprüfen werden reale bereits durchgeführte VLBI Sessions mittels der Vienna VLBI Software ausgewertet. Wie in Kapitel [4.2.3.] angeführt wird anschließend in den OPT Files die Station WARK12M ausgeschlossen und die Sessions erneut berechnet. Aus dem Fehlen der Antenne in Warkworth in den Auswertungen ergeben sich somit neue Ergebnisse, die mit den alten verglichen und analysiert werden können. Bei diesem Vergleich liegt der Fokus auf den Differenzen in der Anzahl der beobachteten Radioquellen sowie den Abweichungen der formalen Fehler der Ausgleichung der Erdorientierungsparameter. Durch den Ausschluss von WARK12M sollten weniger Radioquellen (auf der südlichen Hemisphäre) beobachtet werden können und gleichzeitig der formale Fehler der Ausgleichung der EOP's größer werden. Diese beiden Kriterien können den Nutzen dieser neuen Antenne auf der südlichen Halbkugel erweisen.

5.1. Sessions

Die erste Aufgabe ist Sessions zu finden an denen Warkworth teilgenommen hat. Dazu wird das Master File Search Tool des Internationalen VLBI Services verwendet [Kap. 4.2.1.]. Die Sessions werden immer für ein Jahr im Voraus geplant. Das bedeutet, dass mögliche Ausfälle und Störungen auftreten können und Stationen, die grundsätzlich im Scheduling für eine Session vorgesehen werden, von vornherein nicht an der Session teilnehmen können. Die NGS Files werden im Nachhinein so korrigiert, dass diese Stationen mit einem Minus im Master File berücksichtigt werden. In Abbildung 35 ist das zum Beispiel die Station Yarragadee (Yg) am 6. Februar 2012 oder Syowa (Sy) am 28. und 29. Februar 2012.

```

|IVS-CRDS57|CRDS57|FEB01| 32|18:00|24|HbHhWw|USNO|WASH|12MAR22|1.0|XN|USNO| 49|7886|
|IVS-R4518|R4518|FEB02| 33|18:30|24|BdFcKeKkMcNySvTcWzYg|USNO|WASH|12FEB16|1.0|XE|USNO| 13|4518|
|IVS-R1519|R1519|FEB06| 37|17:00|24|FcKeKkNyTcTsWfWz -Yg|NASA|BONN|12FEB17|1.0|XA|NASA| 10|1519|
|VLBA91|RDV91|FEB08| 39|18:00|24|FcMcNyTsVaWz -Wf|NASA|VLBA|12FEB29|0.9|XA|NASA| 20| |
|IVS-R4519|R4519|FEB09| 40|18:30|24|FcHbKkMaNyTcWwWzYg -Zc|USNO|WASH|12FEB28|1.0|XE|USNO| 18|4519|
|IVS-R1520|R1520|FEB13| 44|17:00|24|FcHhMaNyOnTcTsWz -Wf|NASA|BONN|12FEB22|1.0|XA|NASA| 8|1520|
|IVS-T2081|T2081|FEB14| 45|17:30|24|AiBdCcFcHhK1RgKkKMcNyOhOnTcTsUcUrVmVsWz -13|BONN|BONN|12JUN19|1.0|XH|BKG| 125|2743|
|IVS-OHIG76|OHIG76|FEB15| 46|18:00|24|FcHhKkOhSyTc|BONN|BONN|12JUL16|1.0|XA|BKG| 151|2744|
|IVS-R4520|R4520|FEB16| 47|18:30|24|BdFcKkNySvTcWzYsZc|USNO|WASH|12MAR01|1.0|XE|USNO| 13|4520|
|IVS-R1521|R1521|FEB21| 52|17:00|24|HbHcKeKkNyTcWz -TsWfWw|NASA|BONN|12MAR02|1.0|XA|NASA| 9|1521|
|IVS-R4521|R4521|FEB23| 54|18:30|24|FcKeKkMaNyTcWzYg -Ts|USNO|WASH|12MAR12|1.0|XE|USNO| 17|4521|
|IVS-R1522|R1522|FEB27| 58|17:00|24|FcHbKkMaNyTcWfWzYg|NASA|BONN|12MAR09|1.0|XA|NASA| 10|1522|
|IVS-OHIG77|OHIG77|FEB28| 59|17:30|24|FcKkOhTc -Sy|BONN|BONN|12APR26|1.0|XA|BKG| 57|2745|
|IVS-OHIG78|OHIG78|FEB29| 60|18:00|24|FcHhKkOhTc -Sy|BONN|BONN|13JUN25|1.0|XA|BKG| 481|2746|

```

Abbildung 35: Master Files für Februar 2012

Alle anderen Antennen nehmen an der Session teil. Es kann jedoch vorkommen, dass während der Beobachtungen Probleme an den Stationen auftreten und dadurch nur wenige Daten gesammelt werden. Im Analyst Report werden Auffälligkeiten oder Ausfälle der Antennen vermerkt (Homepage des IVS). Je nach Datenmenge und -güte entscheidet die Person des Auswerte-Centers ob die Station an der Auswertung teilnehmen darf oder nicht. Es gibt eine Vielzahl an Problemen, die auftreten können, angefangen von clock breaks über Probleme der Aufzeichnungseinheit bis zu mechanischen Missständen der Antennen. Der Analyst Report bietet in einem Unterpunkt auch die Gelegenheit die Anzahl der geplanten mit den tatsächlich durchgeführten Beobachtungen zu vergleichen. Dabei werden die Beobachtungen der einzelnen Stationen, die Beobachtungen zu den jeweiligen Radioquellen und die Beobachtungen zweier Stationen (also einer Baseline) angeführt. Für die Station Warkworth ergibt sich für die Jahre 2010 bis 2014 folgendes Scheduling:

Sessions	Insgesamt	Ww geplant	Ww nicht teilgenommen	Ww teilgenommen	Ww auswertbar
2010	151	10	10	0	0
2011	171	36	21	15	5
2012	170	37	25	12	5
2013	188	56	8	48	k.A.
2014	217	74	k.A.	k.A.	k.A.

Tabelle 5: Session Planung und Durchführung WARK12M

In der ersten Spalte ist die Summe aller vom IVS geplanten Sessions für das jeweilige Jahr angeführt. Der Spalte zwei kann die Anzahl der Sessions entnommen werden, für die eine Teilnahme der Station Warkworth geplant wurde. Hierbei ist klar zu sehen, dass von 2010 (erste Session wurde geplant für den 18. Mai 2010) bis heute 2014 die Beobachtungstage der Station Warkworth trotz Berücksichtigung der gesamten Sessions pro Jahr steigen. Dies unterstreicht die Bedeutung der Station für den IVS. 2014 soll die Station an jeder

dritten Beobachtung teilnehmen. Wie viele davon tatsächlich durchgeführt werden und brauchbare Daten liefern wird Ende des Jahres feststehen.

Die nächsten beiden Spalten beinhalten die effektive Teilnahme der Antenne an Beobachtungen. Das bedeutet, wie am Beispiel Yarragadee zu erkennen ist, ob Warkworth überhaupt beobachtet hat oder aufgrund von Problemen vor dem Start der Session schon die Teilnahme absagen musste.

Nach der Errichtung der Antenne 2008 wurde 2009 davon ausgegangen, dass Mitte 2010 an den ersten IVS Sessions teilgenommen werden kann. Allerdings konnten nur kleinere VLBI Messungen durchgeführt werden wie zum Beispiel zur Bestimmung der Antennenkoordinaten [Kap. 4.2.1.].

Die erste brauchbare IVS Session fand am 28. Februar 2011 statt. Von den geplanten 36 Sessions nahm Warkworth nur an 15 überhaupt teil. Wie die Erfahrung bei Erstversuchen von komplexen Vorgängen zeigt, gab es während der Beobachtungen viele Probleme und so konnten schließlich nur 5 Sessions im Jahr 2011 ausgewertet werden. Unter anderem gab es Schwierigkeiten, indem die Antenne in den ersten Monaten nur wenige Daten akquirierte und diese nur in S-Band. Darüber hinaus hatte Warkworth in diesem Jahr Probleme mit der Stabilität der Stationsuhr und dem Elevationsantrieb.

2012 setzten sich die Schwierigkeiten fort, doch bis Mitte des Jahres lieferten wiederum 5 Sessions brauchbare Daten. Im Juli 2012 wurde dann ein Fehler im Wasserstoffmaser der Station entdeckt. Dieser musste zum Hersteller retourniert und dort neu kalibriert werden. Ende März 2013 nahm Warkworth schließlich wieder erfolgreich an den Sessions des IVS teil.

Über das ganze Jahr 2013 betrachtet musste die Antenne WARK12M lediglich bei 8 Sessions von Beginn an passen. Wie viele davon tatsächlich brauchbare Daten lieferten, beantwortet diese Arbeit nicht, da zur Zeit der Berechnungen noch keine Daten der Sessions von 2013 vorhanden waren.

Im Zuge der Auswertung mittels VieVS wurden folgende 10 Sessions und VLBI Stationen berücksichtigt:

- **11FEB28XA:** FORTLEZA – HOBART12 – HOBART26 – KOKEE – NYALES20 – TIGOCONC – WARK12M – WESTFORD – WETTZELL
- **11MAR15XA:** FORTLEZA – HOBART12 – HOBART26 – KOKEE – TIGOCONC – TSUKUB32 – WARK12M – WESTFORD – WETTZELL
- **11APR13XA:** BADARY – FORTLEZA – KOKEE – MATERA – NYALES20 – TIGOCONC – TSUKUB32 – WARK12M – WESTFORD – WETTZELL – ZELENCHK
- **11AUG29XA:** HARTRAO – HOBART12 – HOBART26 – KATH12M – NYALES20 – ONSALA60 – TIGOCONC – TSUKUB32 – WARK12M – WETTZELL
- **11NOV01XA:** FORTLEZA – KOKEE – OHIGGINS – SYOWA – WARK12M
- **12FEB09XE:** FORTLEZA – HOBART12 – KOKEE – MATERA – NYALES20 – TIGOCONC – WARK12M – WETTZELL – YARRA12M – ZELENCHK
- **12MAR15XE:** FORTLEZA – HOBART12 – KOKEE – MATERA – TIGOCONC – WARK12M – WETTZELL – YARRA12M
- **12MAR29XE:** FORTLEZA – HOBART12 – KOKEE – MATERA – NYALES20 – TIGOCONC – WARK12M – WETTZELL – YARRA12M – ZELENCHK
- **12JUN14XE:** FORTLEZA – KOKEE – MATERA – NYALES20 – TIGOCONC – WARK12M – WETTZELL
- **12JUN18XA:** FORTLEZA – HOBART12 – HOBART26 – KATH12M – KOKEE – NYALES20 – TIGOCONC – TSUKUB32 – WARK12M – WETTZELL

In Abbildung 36 ist die globale Verteilung der Stationen, die an einer der zehn ausgewerteten VLBI Sessions teilgenommen haben, graphisch dargestellt. Die Stationen sind quer über den Globus verteilt. Am häufigsten nahmen die Stationen FORTLEZA, KOKEE, TIGOCONC und WETTZELL an gemeinsamen Sessions mit WARK12M teil. Dies bedeutet aber gleichzeitig nicht, dass die meisten Beobachtungen während einer Session zwischen diesen Stationen und der Antenne in Warkworth stattgefunden haben. So sind zum Beispiel für WETTZELL und WARK12M bei jeder Session ein paar wenige gemeinsame Beobachtungen geplant gewesen, doch kam es während dieser zehn angeführten Sessions nie zu einer gemeinsamen Messung (Baseline). Dies ist jedoch auch nicht verwunderlich, da diese beiden Orte beinahe Antipoden bilden und so kaum dieselbe Radioquelle zur selben Zeit anzielen können. In diesem speziellen Fall müssten beide Antennen in einem sehr kleinen Elevationswinkel beobachten, was meist zu unbrauchbaren Messungen führt.

So ist es nicht überraschend, dass die meisten Baselines mit Stationen in der globalen Umgebung durchgeführt wurden und auch das relative Verhältnis zwischen geplanten und durchgeführten gemeinsamen Beobachtungen bei diesen Stationen höher ist. Die vier Stationen am australischen Kontinent (YARRA12M, KATH12M, HOBART12 und HOBART26), die Station TSUKUB32 in Japan, die Antenne KOKEE auf Hawaii sowie TIGOCONC sind hier hervorzuheben. Eine ausführliche Übersicht zu den Beobachtungen findet man unter den Analyst Reports der jeweiligen Session auf der Homepage des IVS.

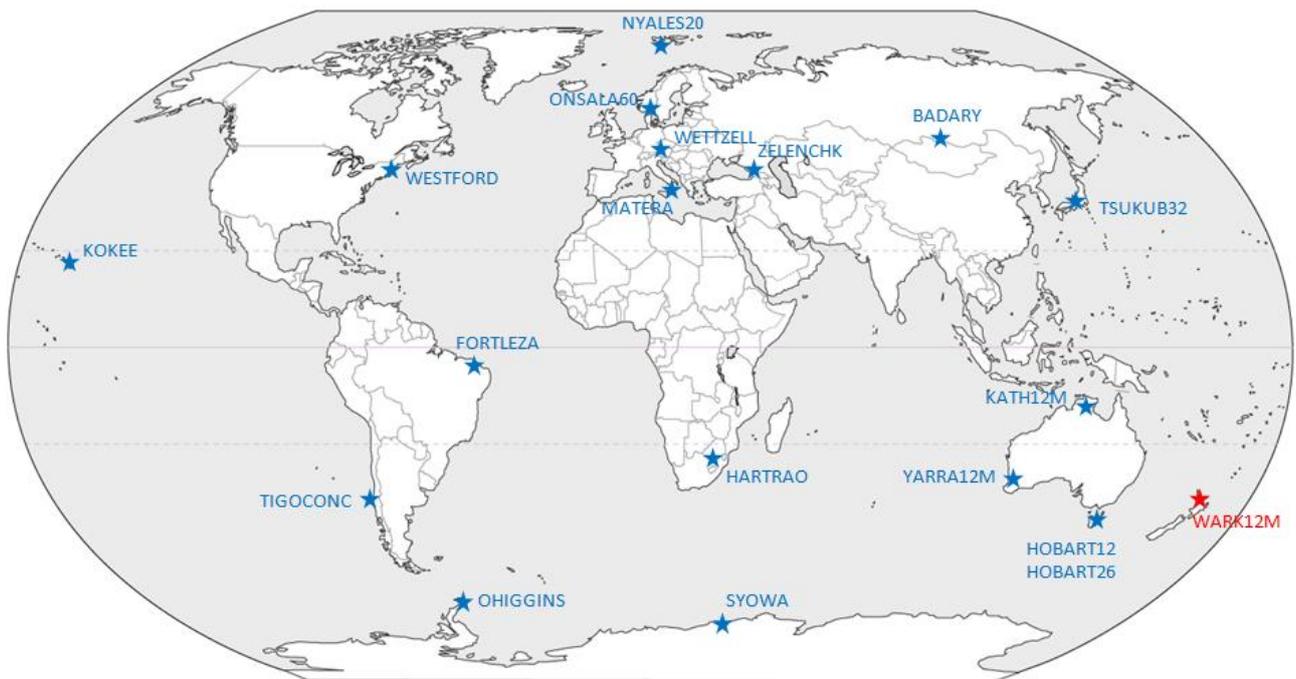


Abbildung 36: VLBI Stationen in gemeinsamen Sessions mit WARK12M

5.2. Ablauf der Auswertung

Die VLBI Sessions werden gänzlich mit der Vienna VLBI Software ausgewertet. Die anschließende statistische Auswertung wird mit Excel durchgeführt. Die Funktionalität von VieVS und Excel ist bereits in Kapitel [4] beschrieben. Hier soll nur mehr ein kurzer Überblick zur Auswertung der zehn Sessions gegeben und auf Probleme hingewiesen werden.

5.2.1. Process List und Parameter

Um die richtigen Sessions auszuwerten müssen zuerst die NGS-Files von der Homepage heruntergeladen werden. Nach der Suche in den Master files und den anschließenden Downloads werden die Dateien im richtigen Ordner abgespeichert [Kap. 4.2.1.]. Um die Auswertungen zu vereinfachen wird eine process list mit allen 27 möglichen Sessions, an denen die Station Warkworth im Jahr 2011 und 2012 teilgenommen hat, angelegt [vgl. Tab. 5]. Im selben Menü müssen auch noch das richtige OPT- und Outlier File ausgewählt werden.

Die im nächsten Menüpunkt angeführten Parameter zur Auswertung folgen den IERS Conventions (2010)⁴ (G. Petit, B. Luzum; 2010) und wurden wie folgt gewählt:

- **Refernce Frames**
 - *Terrestrial Reference Frame*: superstation file "vtrf2008"
 - *Celestial Reference Frame*: ICRF 2⁵
- **Ephemerides**
 - *Ephemerides*: JPL 421⁶
- **Troposphere**
 - *Tropospheric delay*: Pressure from NGS (GPT backup)
 - *Mapping function*: VMF1⁷
 - *Gradients*: No Gradients
- **Ionosphere**
 - *Ionospheric delay*: From NGS
- **Station corrections**
 - *Solid Earth tides*⁸

⁴http://www.iers.org/sid_D1530C91E7F874BD4A908AD989E4DA32/IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/tn36.html

⁵ IERS Technical Note 35, \The Second Realization of the International Celestial Reference Frame by Very Long Baseline Interferometry, "Presented on behalf of the IERS / IVS Working Group, Fey A. L., Gordon, D., and Jacobs, C. S. (eds.).Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2009. 204 p., 2009

⁶ W. M. Folkner, J. G. Williams, D. H. Boggs; The Planetary and Lunar Ephemeris DE 421," IPN Progress Report 42-178, August 15, 2009

⁷ Boehm, J., Werl, B., and Schuh, H., 2006a, \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; 2006

- *Tidal ocean loading*: FES2004.mat ⁹
- *Tidal atmosphere loading*: s12_cm_noib_leonid.mat
- *Non-tidal atmosphere loading*: GSFC
- *Pole tide* ¹⁰
- *Ocean pole tide* ¹¹
- *Mean pole model*: cubic (IERS 2010)
- *Thermal antenna deformation*¹²
- **EOP**
 - *A priori time series*: 08 C04; Include a priori celestial pole offset
 - *Include high frequency*: Ocean tides “interpf (Conventions)”; Libration (xp, yp) 10 terms; Libration (UT1) 11 terms
 - *Precession/Nutation model*: IAU 2006/2000A ¹³
 - *Interpolation*: lagrange; Tidal UT variations (Defraigne & Smith) ¹⁴
- **Observation restrictions**
 - *Quality code limit*: 0
 - *Cut-off elevation angle*: 0

5.2.2. Schätzwerte für die kleinste Quadrate Ausgleichung

Wie in Kapitel [4.2.3.] unter „Estimation“ beschrieben, können Intervalle in denen gewisse Parameter in der kleinsten Quadrate Ausgleichung geschätzt werden sollen, bestimmt

⁸ Mathews, P. M., Herring T. A., and Buffett, B. A; Modeling of nutation and precession: New nutation series for nonrigid Earth, and insights into the Earth's interior,"; J. Geophys. Res., 107(B4), 10.1029/2001JB000390; 2002

⁹ Lyard, F., Lefevre, F., Letellier, T., Francis, O.; Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004," Ocean Dyn., 56(5-6), pp. 394{415}, doi: 10.1007/s10236-006-0086-x; 2006

¹⁰ Desai, S. D.; Observing the pole tide with satellite altimetry; J. Geophys. Res., 107(C11), 3186, doi:10.1029/2001JC001224; 2002

¹² Nothnagel, A.; Conventions on thermal expansion modelling of radio telescopes for geodetic and astrometric VLBI; J. Geod., 83(8), pp. 787-792, doi: 10.1007/s00190-008-0284-z; 2009

¹³ Capitaine, N., Guinot, B., and McCarthy, D. D; Definition of the Celestial Ephemeris origin and of UT1 in the International Celestial Reference Frame; Astron. Astrophys., 355(1), pp. 398-405; 2000

¹⁴ Defraigne P, Smits I; Length of day variations due to zonal tides for an elastic Earth in non-hydrostatic equilibrium; Geophys J Int139(2): 563–572 DOI: 10.1046/j.1365-246x.1999.00966.x; 1999

werden. Folgende Schätzwerte wurden für die Berechnung der kleinsten Quadrate Ausgleichung im Zuge dieser Arbeit verwendet:

Troposphärenparameter

- ZWD interval [min] = 30
- ZWD constraints [ps^2/s] = 0,7

Gradienten

- NGR interval [min] = 360
- NGR constraints [mm/day] = 2
- EGR interval [min] = 360
- EGR constraints [mm/day] = 2

Uhrenparameter

- Use clock breaks (from OPT file) ✓
- Clock interval [min] = 60
pwl offset, one rate & one quadratic term per clock ✓
- Clock constraints [ps^2/s] = 0,5

Erdorientierungsparameter

- Estimate Xpol (inter. Pole coor. In TRF) estimation interval [min] = 1440
constraints [mas/day] = $1.0\text{e-}4$
- Estimate Ypol (inter. Pole coor. In TRF) estimation interval [min] = 1440
constraints [mas/day] = $1.0\text{e-}4$
- Estimate dUT1 (rotation angle) estimation interval [min] = 1440
constraints [mas/day] = $1.0\text{e-}4$
- Estimate nutdx (CIP coor. in celes. long.) estimation interval [min] = 1440
constraints [mas/day] = $1.0\text{e-}4$
- Estimate nutdy (CIP coor. in obliquity) estimation interval [min] = 1440
constraints [mas/day] = $1.0\text{e-}4$

Stationskoordinatenparameter

- No Net Translation (NNT) ✓
- No Net Rotation (NNR) ✓

Schließlich müssen noch Run vie_init, Run vie_mod und Run vie_lsm ausgewählt werden und die Berechnung der Sessions kann gestartet werden.

5.2.3. Aussortieren der problematischen Sessions

Bei der ersten Auswertung der 37 Sessions treten kleine Fehler auf, die untersucht werden müssen. Die Behebung fällt nicht schwer, problematischer ist jedoch, dass WARK12M nicht wie angegeben und erwartet bei jeder Auswertung teilgenommen hat. Um einen detaillierten Überblick zu bekommen wird ein Schritt zurück gegangen und die Sessions nur mittels Run vie_init [vgl. Kap. 4.2.2.] ausgeführt.

Das Ergebnis der Initialisierung jeder Session ist die Auflistung der beobachtenden Stationen. An 17 der 27 Tage ist die Station Warkworth nicht in der Auswertung vertreten [z.B.: Abb. 37]. Ein Blick in die Analyst Reports (Homepage des IVS) der Session vom 27. Dezember 2011 gibt Aufschluss, dass die Station nicht teilnehmen konnte, da sie Probleme mit dem Elevationsantrieb hatte. Weitere häufige Gründe sind, dass zu wenige Daten von der Station gesammelt wurden oder ein mechanisches Problem vorlag und so keine Beobachtungen im gegebenen Zeitraum zuließ [Kap. 6.1.]. Daher werden diese 17 Sessions aus der process list entfernt und es verblieben lediglich 10 Sessions zum Auswerten.

```
current file: ../DATA/LEVEL0/Testwvdabei/11DEC27XA_N004
-----
|                               welcome to VIE_INIT!!!!                               |
-----

Stations to be excluded: 0
Sources to be excluded: 0
Baselines to be excluded: 0

Start reading c:/Users/Alex.Medion-PC/Documents/Uni (TU wien)/10. Semester/Neuseeland/VLBI/warkworth,
[antenna,sources,scan]=read_ngs(ngsfile,trffile,infofile,crffile,ini_opt)
No vtrf2008 coordinates for TSUKUB32 in ../TRF/superstation.mat ... get vieTrf coordinates
Asterisk(s) found in NGS file!!! value(s) treated as zero!
No vtrf2008 coordinates for TIGOCONC in ../TRF/superstation.mat ... get vieTrf coordinates
Done reading the file!
A total of 6 stations, 47 sources and 651 scans were found
The following stations were found:
SESHAN25
TSUKUB32
WETTZELL
FORTLEZA
TIGOCONC
NYALES20
VIE_INIT finished!!! You can now continue with VIE_MOD
```

Abbildung 37: Session Überprüfung mittels Vie_Init

5.2.4. Auswertung

Die Auswertung der übrig geblieben Sessions wird mit der verkleinerten process list, den aufgelisteten Parametern und Run vie_init, Run vie_mod und Run vie_lsm durchgeführt. Durch Anhängen des Eliminate Outlier Buttons werden beim ersten Durchlauf vorhandene Ausreißer detektiert und in das ausgewählte File abgespeichert. Die Ausreißer werden beim neuerlichen Durchlauf der 10 Sessions bereits berücksichtigt und im Vorhinein ausgeschlossen. Dieses Prozedere wird viermal durchgeführt, sodass die Ergebnisse der letzten Berechnung frei von Ausreißern sind. Alle Auswertung enthalten nun Beobachtungen der Antenne in Warkworth.

Eine Auswertung ohne Elimination der Ausreißer kann zu großen Residuen und daher auch zu falschen Ergebnissen führen. In Abbildung 38 kann die Größe der Ausreißer sehr gut erkannt werden. Ohne Ausreißerelimination sind die Residuen der Session 11FEB28XA (mit der Station Warkworth) bis zu 2 Meter groß. Nach mehrmaligem durchlaufen der Ausreißerelimination sind die größten Residuen bei 6 Zentimetern. Insgesamt wurden bei dieser Session 71 Ausreißer gefunden und eliminiert (C:\...\VIEVS\DATA\OUTLIER\2011\11FEB28XA_N004.OUT). Alle Sessions mit der Anzahl der eliminierten Ausreißer sind in Tabelle 6 aufgelistet

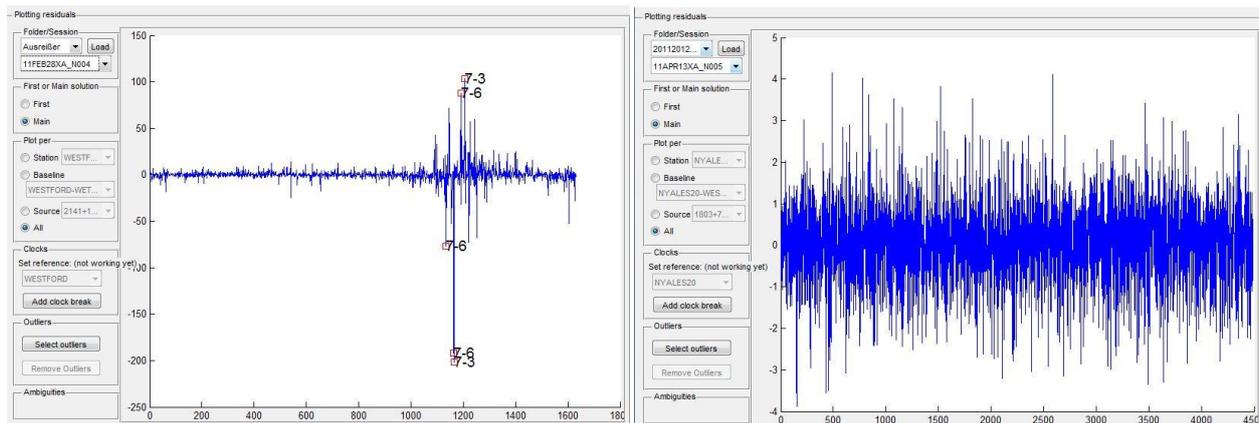


Abbildung 38: Session 11FEB28XA ausgewertet ohne und mit Ausreißerelimination

Session	11FEB28XA	11MAR15XA	11APR13XA	11AUG29XA	11NOV01XA
Ausreißer	71	40	7	25	15
Session	12FEB09XE	12MAR15XE	12MAR29XE	12JUN14XE	12JUN18XA
Ausreißer	10	18	3	23	30

Tabelle 6: Eliminierte Ausreißer

Um Vergleiche anstellen zu können wird nun jedes OPT File so geändert, dass WARK12M von der Auswertung ausgeschlossen wird [Kap. 5.2.2.]. Danach werden die Sessions wie bereits erklärt erneut ausgewertet, allerdings mit dem Unterschied, dass nun die Beobachtungen der Antenne in Warkworth nicht berücksichtigt werden. Damit die alten Auswertungen nicht überschrieben werden, empfiehlt es sich den Ausgabeordner zu ändern. Nach einem ersten Durchlauf und der Überprüfung, ob die Auswertung ohne Warkworth ebenso geklappt hat, werden wiederum neue Durchläufe gestartet um die Ausreißer zu eliminieren.

Das Resultat sind die Ergebnisse der zehn Sessions, einmal mit und einmal ohne die Station Warkworth, die in den folgenden Seiten analysiert werden.

5.3. Ergebnisse

5.3.1. Ausgabe der Ergebnisse aus Matlab

Um die Ergebnisse vergleichen zu können, müssen diese zuerst aus den abgespeicherten Matlab Files ausgelesen werden.

Das File, welches die Daten zu den Radioquellen der jeweiligen Session beinhaltet ist in C:\...\VIEVS\DATA\LEVEL0 gespeichert. Je nach Benennung der Session muss die Datei mit der Endung „_sources.mat“ in Matlab geladen werden. Dabei kann im Workspace Window die Anzahl der Radioquellen schon abgelesen werden, da die Datei als Matrix in der Form <1 x n struct> dargestellt wird. Beim Öffnen der Datei „_source.mat“ erscheint im Variablen Editor die 1 x n Matrix. Durch Doppelklick auf ein ausgewähltes Matrizenelement werden der Name, Rektaszension, Deklination und einige Informationen mehr ausgegeben. Um Vergleiche der Radioquellenanzahl anzustellen, würde ein simples Notieren der Spaltenanzahl der Matrix ausreichen. Wenn aber die Namen der Radioquellen zusätzlich ausgegeben werden, so kann daraus geschlossen werden, welcher Stern ohne Warkworth nicht mehr mitbeobachtet wird. Jede einzelne Radioquelle zu öffnen und den Namen zu notieren ist allerdings sehr aufwendig. Mit einer trivialen Programmierung [Abb. 39] lassen sich alle Namen in Matlab für eine Session auf einmal auslesen. N gibt dabei die Anzahl der Spalten, beziehungsweise der Quellen an.

```
for x=1:1:N
disp(sources(1,x).name)
end
```

Abbildung 39: Matlabcode zum Auslesen der Radioquellennamen

Nach Auslesen der Radioquellennamen können diese, entsprechend angeordnet, in Excel aufgelistet und so der Name der fehlenden Quelle ermittelt werden. Taucht bei mehreren Sessions eine Quelle auf, die ohne die Antenne in Warkworth nicht mehr beobachtet wird, kann diese je nach Verteilung den anderen Stationen der südlichen Hemisphäre zugewiesen werden. Die Resultate werden in Kap. [5.3.2.] diskutiert

Das Auslesen der Werte für die Abweichungen des formalen Fehlers der Ausgleichung der Erdorientierungsparameter erfolgt ähnlich der Radioquellen. Zuerst muss die richtige Datei im Verzeichnis der Vienna VLBI Software in Matlab aufgerufen werden. Diese befindet sich unter C:\...\VIEVS\DATA\LEVEL3. Die Datei mit dem Anfang „x_“ und den jeweiligen Speichernamen der Session beinhaltet die gesuchten Parameter. Nach Aufrufen der Datei in Matlab und Öffnen erscheinen im Variable Editor 16 Variable und ihre Matrizenstruktur. Die für die Erdorientierungsparameter interessanten sind xpol, ypol, dut1, nutdx und nutdy.

- xpol: Polbewegung in x-Richtung
- ypol: Polbewegung in y-Richtung
- dut1: Unterschied zwischen UT1 – UTC
- nutdx: Nutationszuschläge in x-Richtung
- nutdy: Nutationszuschläge in y-Richtung

Durch Doppelklick auf einen Parameter gelangt man in ein Untermenü, in dem der Parameter mx aufgelistet ist. Dies ist der formale Fehler des Erdorientierungsparameters aus der Ausgleichung. Der Wert ist in Millibogensekunden [mas] angegeben. 0,1 Millibogensekunde entspricht etwa 3 Millimeter [mm] auf der Erdoberfläche. Die Werte für die einzelnen EOP's werden in Excel gegenübergestellt und die Differenz gebildet. Die Resultate werden in Kapitel [5.3.3.] diskutiert.

5.3.2. Anzahl der beobachteten Radioquellen

In Abbildung 43 sind alle Beobachtungstage und die Anzahl der in der Session beobachteten Radioquellen aufgelistet. Bei 6 der 10 Sessions gab es Veränderungen in der Menge der Quasare zwischen Auswertungen mit und ohne die Station Warkworth. Bei den fehlenden Quellen handelt es sich logischerweise um Quasare die immer nur von WARK12M und einer anderen Antenne beobachtet worden sind, ansonsten würden diese Stationen bei der Auswertung weiterhin für andere Baselines mitverwendet werden.

Die Veränderung der Anzahl unterstreicht grundsätzlich die Annahme, dass die Station Warkworth einen entscheidenden Beitrag aufgrund seiner geographischen Lage beitragen kann.

Anhand Abbildung 7 kann man gut erkennen, dass kaum Stationen auf der südlichen Hemisphäre vorhanden sind (auch angesichts der großen Meeresflächen). So ist jede Station von Bedeutung um eine bessere globale Verteilung der Stationen zu erreichen und so ebenso auch mehr Radioquellen beobachten zu können.

Wenn man die Sessions im Detail betrachtet, so ist der 1. November 2011 hervorzuheben. Der Unterschied einer Teilnahme in der Auswertung und keiner Teilnahme schlägt sich mit 17 Radioquellen nieder. Es werden nur 59% der Quasare beobachtet, wenn WARK12M nicht an der Auswertung teilnimmt. Das ist beinahe die Hälfte aller beobachteten Quasare (41). Ein genaueres Hinsehen lässt erkennen, dass an dieser Session, nach Ausfall der Station OHIGGINS, nur 4 Stationen beobachtet haben. WARK12M hat mit 281 Beobachtungen die höchste Anzahl dieser. Ein Weglassen der Stationen in den Auswertungen (einem Ausfall gleichzusetzen) schlägt sich also enorm nieder. Es bleiben lediglich 3 Stationen übrig und die Geometrie des Netzes verschlechtert sich ebenfalls. Diese Unterschiede schlagen sich auch in der Genauigkeit der Erdorientierungsparameter nieder [Kap. 5.3.3.].

Grundsätzlich fallen bei Sessions mit einer größeren Anzahl an beobachteten Radioquellen eher welche aus, als bei kleinerer Anzahl. Der 1. November 2011 ist eine Ausnahme aufgrund seiner beträchtlichen Verschlechterung der Geometrie.

Wie zu Beginn des Kapitels schon erwähnt, handelt es sich bei den fehlenden Quellen logischerweise um Quasare, die immer nur von WARK12M und einer anderen Antenne beobachtet worden sind. Da die Radioquellen 0332-403, 0104-408 an zwei Tagen aus der Auswertung herausgefallen sind und 2052-474 sogar dreimal, kann mittels des Analyst Reports versucht werden, die Station herauszufinden mit der WARK12M gemeinsam beobachtet hat. Im Falle der Quelle 0332_403 (11APR13XA/12MAR29XE) ist dies die Station KOKEE, da die Baseline mit dieser Station die einzige ist, die bei beiden Beobachtungstagen brauchbare Daten liefert. Bei dem Quasar 0104-408 könnte es sich wiederum die Baseline zur Station KOKEE handeln, oder auch um die Station NYALES20.

Bei 2052-474 handelt es sich ebenfalls um die Antenne KOKEE, beziehungsweise HOBART12. An Abbildung 36 lässt sich erkennen, dass sich die Baselines KOKEE, HOBART12 und NYALES20 zu WARK12M weitab von weiteren Stationen sich befinden. Bei der Planung der Sessions wird darauf geachtet, dass die Beobachtungen von beiden Stationen möglichst in einem steilen Elevationswinkel stattfinden, damit die Fehlerquellen gering gehalten werden. In einer zweidimensionalen Darstellung wäre die ein gleichschenkeliges Dreieck. So ist aufgrund der exponierten Lage der Baselines und der geforderten Position der Radioquelle klar, dass beobachtete Quellen bei nicht Berücksichtigung von Warkworth wegfallen.

Sessions		mit WARK12M	ohne WARK12M		fehlende Quellen
11FEB28XA	1	41	41	100%	
11MAR15XA	2	38	38	100%	
11APR13XA	3	114	113	99%	0332-403
11AUG29XA	4	50	49	98%	1255-316
11NOV01XA	5	41	24	59%	1144-379 0552+398 4C39.25 0454-234 1124-186 1424-418 1622-253 1611+343 NRAO512 1920-211 2052-474 2145+067 1726+455 0229+131 1610-771 0235+164 0133+476
12FEB09XE	6	74	73	99%	2052-474
12MAR15XE	7	61	61	100%	
12MAR29XE	8	74	70	95%	0104-408 0332-403 0308-611 2052-474
12JUN14XE	9	65	64	98%	0104-408
12JUN18XA	10	50	50	100%	

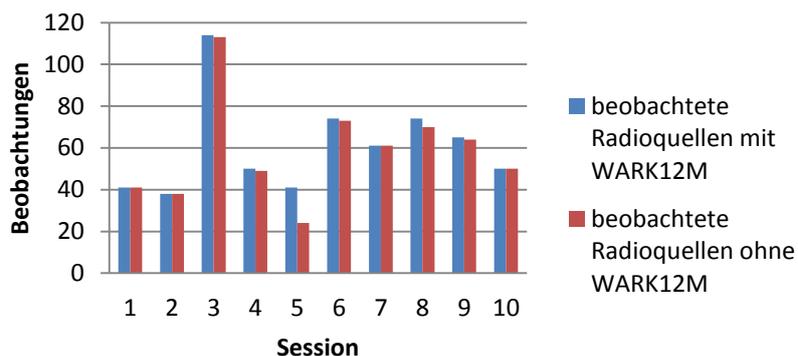


Abbildung 40: Vergleich der beobachteten Quellen

Bei Betrachtung der Skyplots aus Abbildung 41 kann eine eindeutige Tendenz erkannt werden, dass ohne der Teilnahme der Station Warkworth an den Auswertungen der VLBI Sessions, zumeist Quellen mit einer Deklination im höheren Minusbereich nicht mehr in die Berechnungen miteinbezogen werden. Nehmen wir nun die Radioquellen 0332-403, 0104-408 und 2052-474 her, welche bei mehr als einer Auswertung herausfallen, so sieht man (Abb. 41 links unten), dass diese genau im angesprochenen Deklinationsbereich liegen. Dies kann jedoch auch ohne Skyplots herausgefunden werden, da die Radioquellen ihre Namen ihrer Position nach erhalten. Die ersten 4 Ziffern beschreiben die Rektaszension [h], beginnend von 0001 bis 2359 und die letzten 3 Ziffern plus Vorzeichen geben die Deklination [°] im Bereich von -900 bis +900 an. Um die genauen Position der Quasare zu erhalten, müssen die exakten Koordinaten inklusiver ihrer Positionsgenauigkeit in der „IERS Technical Note No.35“¹⁵ nachgelesen werden.

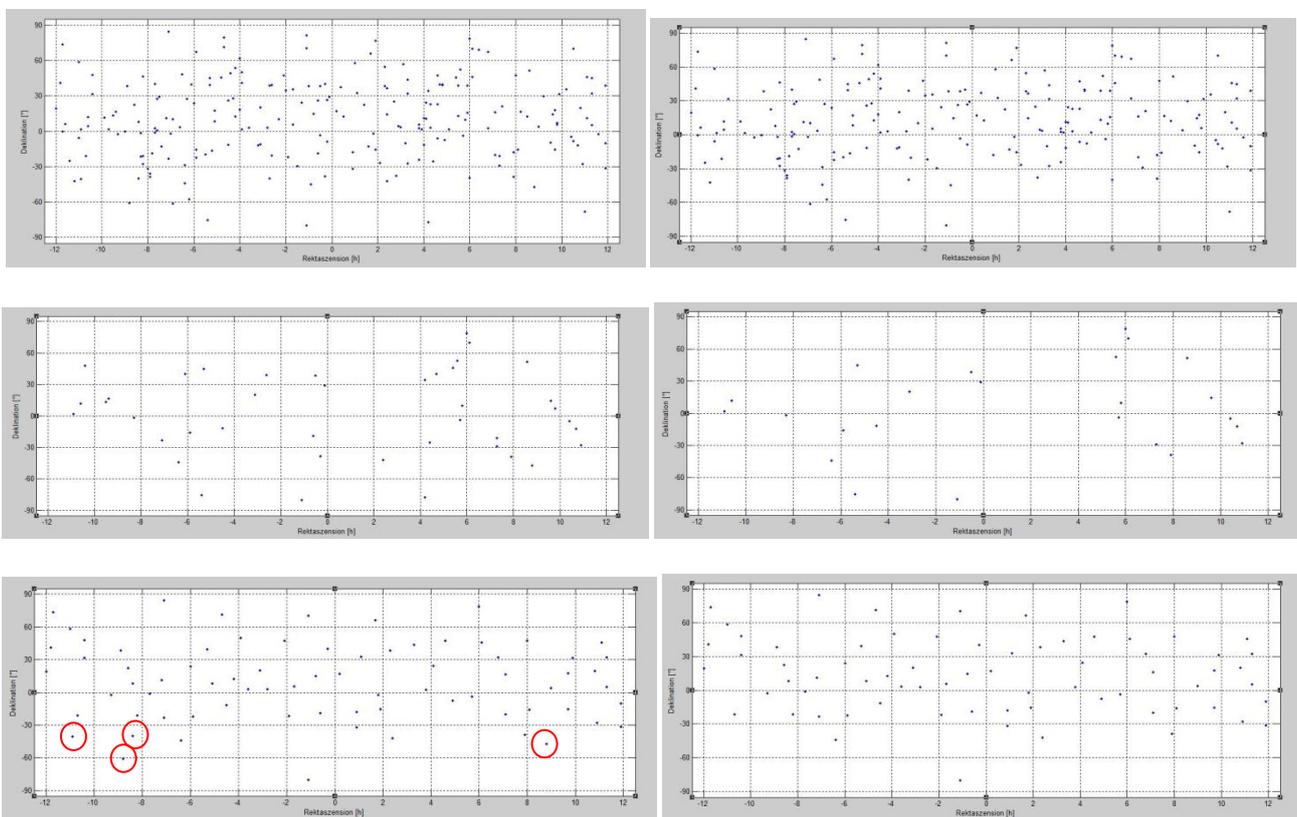


Abbildung 41: Skyplots (o.I. Quellen aller Sessions mit WARK12M; o.r. Quellen aller Sessions ohne WARK12M; m.I. 11NOV01XA mit WARK12M; m.r. 11NOV01XA ohne WARK12M; u.I. 12MAR29XE mit WARK12M; u.r. 12MAR29XE ohne WARK12M)

¹⁵http://www.iers.org/nn_11216/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/Publications/tn/TechnNote35/tn35,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/tn35.pdf

5.3.3. Unterschied in den Erdorientierungsparametern

Die Polbewegung (x_p, y_p), dUT1 (Unterschied zwischen UT1 – UTC) und die Nutation und Präzession sind wesentliche Ergebnisse aus VLBI-Messungen. Um den Nutzen der Station Warkworth zu untersuchen, werden, wie bei der Quellenanzahl, die Ergebnisse des formalen Fehlers der EOP's in der Ausgleichung einmal mit der Auswertung der Station Warkworth und einmal ohne diese verglichen. Dieser formale Fehler wird in Millibogensekunden angegeben. 0,1 Millibogensekunde [mas] entspricht etwa 3 Millimeter [mm] auf der Erdoberfläche. Sind die Unterschiede der Ergebnisse also rund 0,1 mas also 3 mm groß, so sind sie über der Vorgabe des IVS [Kap. 2.1.3].

Bei 31 von 50 Werten in den EOP's gab es eine Verschlechterung bei Weglassen von WARK12M aus der Auswertung. Bei den restlichen Werten handelt es sich meist um marginale Verschlechterungen im 0,1 Millimeterbereich, die aber in der Rechenunschärfe enthalten sind und bei einer Nicht-Teilnahme an der Auswertung von Warkworth nicht auf bessere Ergebnisse schließen lassen. Einzig am 15. März 2012 waren die Differenzen in der Polbewegung mit 1 und 3 Millimetern etwas größer [Abb. 42]. Bei dieser Session gab es auch keinen Unterschied in der Anzahl der Radioquellen. Der Analyst Report zeigt, dass diese Session problemlos und mit einer hohen Anzahl an Beobachtungen aller 8 Stationen durchgeführt wurde. Die Verteilung der Stationen ist ebenfalls sehr homogen und ein Eliminieren der Antenne in Warkworth ändert die Geometrie des VLBI Netzwerkes kaum. So ist es möglich, dass die Auswertung ohne Warkworth ein besseres Ergebnis erzielt, wenn Beobachtungen der Station Warkworth mit größeren Fehlern behaftet sind, als die anderer Stationen.

Wie auch schon bei den Unterschieden in der Anzahl der Radioquellen [Kap. 5.3.2.] sind in der Session vom 1. November 2011 große Unterschiede zwischen den beiden Auswertungen zu erkennen. Die Polbewegung variiert um mehr als 10 Millimeter, dUT1 um 21 Millimeter und die Nutationszuschläge betragen 4 und 6 Millimeter. Diese Werte entsprechen einer signifikanten Verschlechterung bei der Auswertung der Session ohne Warkworth. Die Werte der Erdorientierungsparameter sind bedeutend ungenauer als jene mit Warkworth. In den Abbildungen 43 bis 45 ist dies beim fünften Wert auf der x-Achse zu erkennen. Beim Vergleich der Erdorientierungsparameter weist dieser Wert bei den Plots ohne WARK12M erheblich größere Abweichungen auf, als mit WARK12M. Wie im

vorherigen Kapitel erläutert, ergibt sich diese Verschlechterung aus der ungünstigen Geometrie und den wenigen Stationen die an der Session teilnehmen. Nichtsdestotrotz sind diese Beobachtungen offizielle vom IVS geplante Beobachtungen und tragen ihre Ergebnisse zu den Erdorientierungsparametern bei. Gäbe es die Station Warkworth nicht, wäre diese Session, meiner Meinung nach, so nicht geplant worden. Es würde weniger Beobachtungen zwischen Stationen auf der südlichen Hemisphäre geben.

Am 15. März 2011 sind die Werte der Polbewegung bei rund 3 Millimetern Unterschied im formalen Fehler. Dies ist ebenfalls höher als die Vorgabe des IVS, welcher das Ziel ausgibt, eine Positionsgenauigkeit von 1mm im Zuge des Projekts VLBI 2010 zu erreichen.

Auch die Unterschiede in den Erdorientierungsparametern lassen darauf schließen, dass die Station Warkworth seit ihrem Bau einen bedeutenden Teil im globalen geodätischen VLBI Netz beiträgt.

EOP's	formaler Fehler mx [mas]	11FEB28XA (1)		11MAR15XA (2)		11APR13XA (3)			
		Ww	ohne Ww	Ww	ohne Ww	Ww	ohne Ww		
Polbewegung	xpol	0,2044	0,2257	0,3855	0,4905	0,0627	0,0628		
	ypol	0,1535	0,1731	0,3286	0,4191	0,0746	0,0741		
	dut1	0,1110	0,1230	0,2340	0,2940	0,0180	0,0180		
Nutzuschläge	nutdx	0,0820	0,0885	0,1426	0,1550	0,0292	0,0298		
	nutdy	0,0811	0,0872	0,1485	0,1625	0,0305	0,0314		
Differenzen (1mas ~ 3cm) (1ms~15mas)		[mas]	[mm]	[mas]	[mm]	[mas]	[mm]		
	xpol	0,0213	0,6390	0,1050	3,1500	0,0001	0,0030		
	ypol	0,0196	0,5880	0,0905	2,7150	-0,0005	-0,0150		
	dut1	0,0120	0,3600	0,0600	1,8000	0,0000	0,0000		
	nutdx	0,0065	0,1950	0,0124	0,3720	0,0006	0,0180		
	nutdy	0,0061	0,1830	0,0140	0,4200	0,0009	0,0270		
		11AUG29XA (4)		11NOV01XA (5)		12FEB09XE (6)		12MAR15XE (7)	
		Ww	ohne Ww						
		0,1717	0,1700	0,2511	0,5851	0,1116	0,1043	0,2554	0,2180
		0,1500	0,1490	0,2770	0,6481	0,1927	0,1775	0,6293	0,5238
		0,1800	0,1770	0,2400	0,9630	0,0885	0,0825	0,1470	0,1230
		0,0336	0,0342	0,1040	0,2580	0,0410	0,0386	0,0469	0,0422
		0,0315	0,0327	0,1000	0,3273	0,0476	0,0444	0,0435	0,0382
		[mas]	[mm]	[mas]	[mm]	[mas]	[mm]	[mas]	[mm]
		-0,0017	-0,0510	0,3340	10,0200	-0,0073	-0,2190	-0,0374	-1,1220
		-0,0010	-0,0300	0,3711	11,1330	-0,0152	-0,4560	-0,1055	-3,1650
		-0,0030	-0,0900	0,7230	21,6900	-0,0060	-0,1800	-0,0240	-0,7200
		0,0006	0,0180	0,1540	4,6200	-0,0024	-0,0720	-0,0047	-0,1410
		0,0012	0,0360	0,2273	6,8190	-0,0032	-0,0960	-0,0053	-0,1590

12MAR29XE (8)

12JUN14XE (9)

12JUN18XA (10)

Ww	ohne Ww	Ww	ohne Ww	Ww	ohne Ww
0,2420	0,3019	0,1037	0,1333	0,0957	0,0937
0,2753	0,2807	0,1565	0,1567	0,1123	0,1103
0,1095	0,1380	0,0720	0,0870	0,1560	0,1560
0,0861	0,0890	0,0427	0,0447	0,0575	0,0564
0,0941	0,0950	0,0406	0,0453	0,0556	0,0551
[mas]	[mm]	[mas]	[mm]	[mas]	[mm]
0,0599	1,7970	0,0296	0,8880	-0,0020	-0,0600
0,0054	0,1620	0,0002	0,0060	-0,0020	-0,0600
0,0285	0,8550	0,0150	0,4500	0,0000	0,0000
0,0029	0,0870	0,0020	0,0600	-0,0011	-0,0330
0,0009	0,0270	0,0047	0,1410	-0,0005	-0,0150

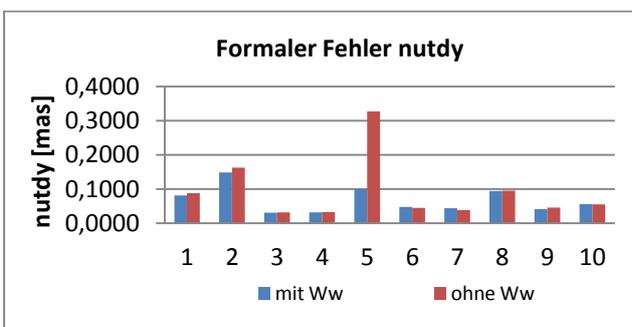
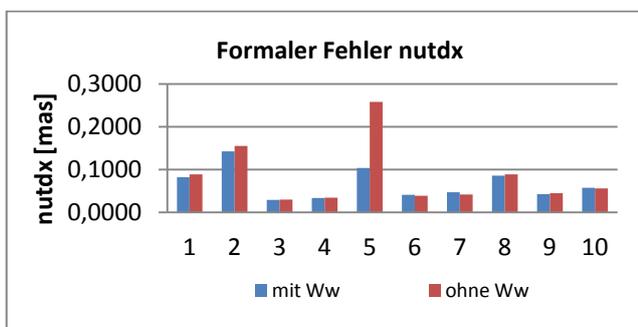
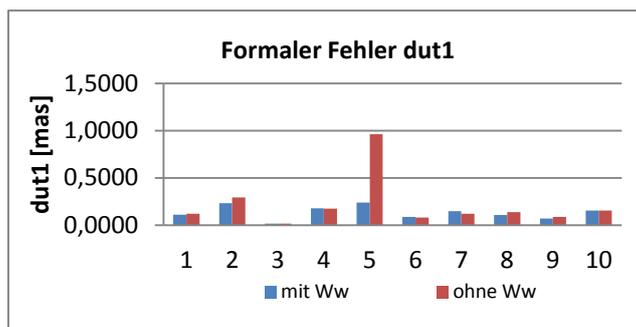
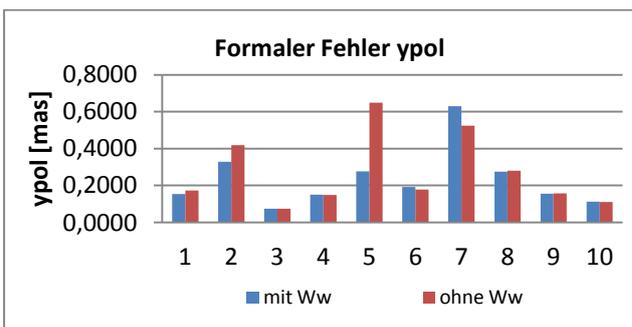
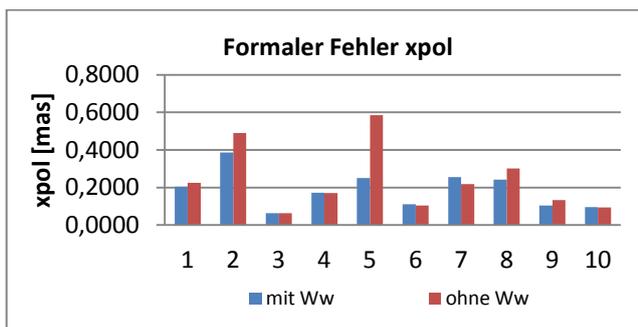


Abbildung 42: Vergleich der Erdorientierungsparameter

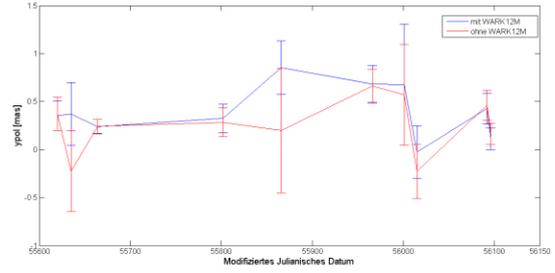
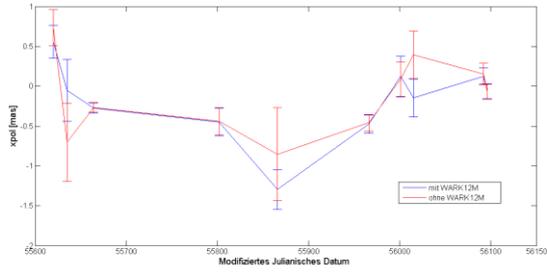


Abbildung 43: links: Abweichung xpol; rechts: Abweichung ypol

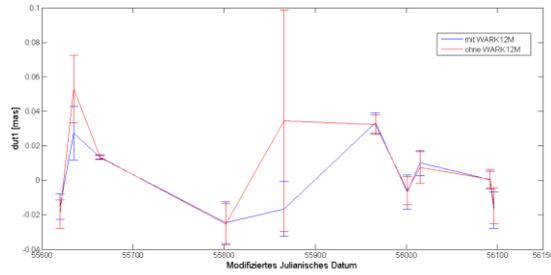


Abbildung 44: Abweichung dut1

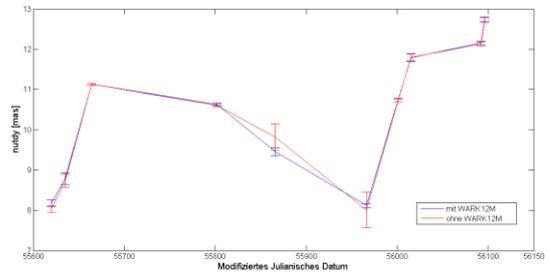
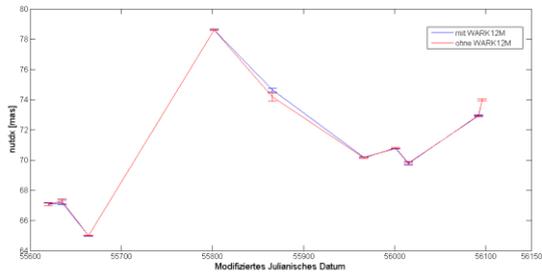


Abbildung 45: links: Abweichung nutdx; links: Abweichung nutdy

6. Zusammenfassung

Die VLBI ist eines der jüngsten geodätischen Weltraumverfahren und ist für die Messung von UT1 (Length of Day) sowie Nutation und Präzession unverzichtbar. Die Innovation und Weiterentwicklung der VLBI schreitet rasant voran und hat mit dem Großprojekt VLBI 2010 ambitionierte Ziele wie kontinuierliche Messungen der Erdorientierungsparameter, einer Positionsgenauigkeit von 1mm, etc. Zur Erfüllung der Vorgaben ist ein globales homogenes Netz von hochmodernen, kleinen und schnellen VLBI-Antennen geplant, welche einen Highspeed-Internetanschluss besitzen und so den Datentransfer auf dem schnellsten Wege zu den Korrelatoren durchführen können.

Um diesen Ansprüchen gerecht zu werden, ließ die „Auckland University of Technology“ (AUT) im Auftrag des „Institute for Radio Astronomy and Space Research“ (IRASR) eine hochmoderne 12m Antenne mitsamt Ausstattung und Highspeed-Internetanschluss um etwa 1 Million Euro im Sommer 2008 im Norden Neuseelands in Warkworth errichten.

In den ersten Jahren hatte die Station Warkworth mit diversen Problemen, wie Ausfall des Masers oder Elevationsantriebsproblemen, zu kämpfen. Nichtsdestotrotz konnten 10 Sessions in den Jahren 2011 und 2012 ausgewertet werden. Im Zuge dieser Arbeit wurden Unterschiede in der Anzahl der Radioquellen und den Erdorientierungsparametern anhand des Ausschlusses der Station Warkworth von den Sessions untersucht.

Aus den Daten geht hervor, dass die Station einen Nutzen im globalen geodätischen VLBI-Netz mit sich bringt. Vor allem bei Sessions die zwischen Stationen auf der südlichen Halbkugel durchgeführt werden, erweist sich Warkworth als sehr nützlich. Eine größere Anzahl an auswertbaren Beobachtungen würde dies mit großer Wahrscheinlichkeit belegen. Es wäre interessant in fünf Jahren eine ähnliche Auswertung mit einer viel größeren Datenmenge vorzunehmen und so diese ersten Auswertungen zu bestätigen.

Über diesen Zeitraum könnte auch ein Wegdriften Neuseelands von Australien untersucht werden. Eine Zeitreihe von Baselines zwischen Hobart und Warkworth, sowohl mittels VLBI als auch mit GNSS, könnten diese Vermutung bestätigen.

So ist zu hoffen, dass die Antenne in Warkworth die nächsten Jahre beständig Daten liefern kann und so zu einer wichtigen Station im globalen geodätischen VLBI-Netz wird.

Literaturverzeichnis

- (1) Blick G., Gulyaev S.; VLBI – A new tool for geodesy in New Zealand; Survey Quarterly, 23–24; 2009
- (2) Böhm J.; Troposphärische Laufzeitverzögerungen in der VLBI; Geowissenschaftliche Mitteilungen, Heft Nr. 68, Schriftenreihe der Studienrichtung Vermessung und Geoinformation, Technische Universität Wien, ISSN 1811–8380; 2004
- (3) Boehm, J., Werl, B., and Schuh, H.; 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; 2006
- (4) Böhm J., Schuh H.; Troposphere gradients from the ECMWF in VLBI analysis. J Geodesy, 81(6–8):403–408. doi:10.1007/s00190-007-0144-2; 2007
- (5) Capitaine, N., Guinot, B., and McCarthy, D. D.; Definition of the Celestial Ephemeris origin and of UT1 in the International Celestial Reference Frame; Astron. Astrophys., 355(1), pp. 398-405; 2000
- (6) Defraigne P, Smits I.; Length of day variations due to zonal tides for an elastic Earth in non-hydrostatic equilibrium; Geophys J Int139(2): 563–572 DOI: 10.1046/j.1365-246x.1999.00966.x; 1999
- (7) Department für Geodäsie und Geoinformation, Research Group Advanced Geodesy, Vienna University of Technology; VieVS Manual, 2012
- (8) Desai, S. D.; Observing the pole tide with satellite altimetry; J. Geophys. Res., 107(C11), 3186, doi:10.1029/2001JC001224; 2002
- (9) Folkner W. M., Williams J. G., Boggs D. H.; The Planetary and Lunar Ephemeris DE 421;IPN Progress Report 42-178; August 2009

- (10) Gulyaev S., Natusch T.; New Zealand 12-m VLBI Station for Geodesy and Astronomy; IVS 2008 Annual Report, 68–73; 2009
- (11) Gulyaev S., Natusch T.; New Zealand 12-m VLBI Station; IVS 2009 Annual Report, 138–141; 2010a
- (12) Gulyaev S., Natusch T., Wilson D.; Characterization and Calibration of the 12-m Antenna in Warkworth, New Zealand; IVS 2010 General Meeting Proceedings, 113–117; 2010b
- (13) Gulyaev S., Natusch T., Weston S., Palmer N., Collett D.; Warkworth 12-m VLBI Station: WARK12M; IVS 2010 Annual Report, 105–108; 2011
- (14) Gulyaev S., Takiguchi H., Natusch T., Weston S.; Warkworth 12-m VLBI Station: WARK12M; IVS 2011 Annual Report, 119–122; 2012
- (15) Gulyaev S., Takiguchi H., Natusch T., Woodburn L., Weston S.; Warkworth 12-m VLBI Station: WARK12M; IVS 2012 Annual Report; 2013
- (16) Hase H. et. al.; The future global VLBI 2010 network of the IVS; 20th EVGA Meeting Bonn; 2011
- (17) Heinkelmann R.; Bestimmung des atmosphärischen Wasserdampfes mittels VLBI als Beitrag zur Klimaforschung; Heft Nr. 82, Schriftenreihe der Studienrichtung Vermessung und Geoinformation, Technische Universität Wien, ISSN 1811-8380 (in German); 2008
- (18) IERS Technical Note 35; The Second Realization of the International Celestial Reference Frame by Very Long Baseline Interferometry, "Presented on behalf of the IERS / IVS Working Group, Fey A. L., Gordon, D., and Jacobs, C. S. (eds.). Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2009. 204 p.; 2009
- (19) Lyard, F., Lefevre, F., Letellier, T., Francis, O.; Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004; Ocean Dyn., 56(5-6), pp. 394{415}, doi: 10.1007/s10236-006-0086-x; 2006

- (20) Mathews, P. M., Herring T. A., and Buffett, B. A.; Modeling of nutation and precession: New nutation series for nonrigid Earth, and insights into the Earth's interior; J. Geophys. Res., 107(B4), 10.1029/2001JB000390; 2002
- (21) Navratil G.; Skriptum Ausgleichungsrechnung I + II; TU Wien; 2006
- (22) Neidhardt A., Ettl M., Mühlbauer M., Himwich E., Beaudoin C., Lovell J., Plötz C., Szomoru A., Alef W.; Monitoring and Control of new VLBI2010 Telescopes; Deutschland; März 2010
- (23) Neill A., Whitney A., Petrachenko B., Schlüter W., Vandenberg N., Hase H., Koyama Y., Ma C., Schuh H., Tuccari G.; VLBI2010: Current and Future Requirements for Geodetic VLBI Systems; Report of Working Group 3; 2005
- (24) Nilsson T.; VieVS Introduction; VieVS User Workshop 11 – 13 September, 2012 Vienna; 2012
- (25) Nothnagel, A.; Conventions on thermal expansion modelling of radio telescopes for geodetic and astrometric VLBI; J. Geod., 83(8), pp. 787-792, doi: 10.1007/s00190-008-0284-z; 2009
- (26) Petit G., Luzum B. (eds); IERS Conventions 2010. IERS Technical Note no. 36. Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main; 2010
- (27) Petrachenko B., Niell A., Behrend D., Corey B., Böhm J., Charlot P., Collioud A., Gipson J., Haas R., Hobiger T., Koyama Y., MacMillan D., Malkin Z., Nilsson T., Pany A., Tuccari G., Whitney A., Wresnik J.; Design Aspects of the VLBI2010 System; Progress Report; April 2009
- (28) Schuh H., Plank L.; Radiointerferometrie auf langen Basen (VLBI – Very Long Baseline Interferometry); Moderne geodätische Weltraumverfahren TU Wien; 2011
- (29) Schuh H., Böhm J.; Very Long Baseline Interferometry (VLBI) -a fascinating technique to measure Earth and universe; UNESP, Presidente Prudente; 2011

- (30) Schuh H., Böhm J.; Very Long Baseline Interferometry for Geodesy and Astronomy, Sciences of Geodesy II, Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2013
- (31) Sekido M., Takiguchi H., Koyama Y., Kondo T., Haas R., Wagner J., Ritakari J., Kurihara S., Kokado K.; Ultra-rapid UT1 measurement by e-VLBI; Earth Planets Space 60(8): 865-870; 2008
- (32) Takiguchi H., Gulyaev S., Natusch T., Weston S., Woodburn L.; Towards synergy of VLBI and GNSS geodetic techniques in geologically dynamic New Zealand; Solid Earth Science Vol. 31, 33–42; 2011
- (33) Takiguchi H., Natusch T., Weston S., Gulyaev S.; Warkworth geodetic station as a potential GGOS core site in New Zealand; 2012
- (34) Teke K., Böhm J., Madzak M.; VIE_LSM_V20, VieVS User Workshop 11 – 13 September, 2012 Vienna; 2012
- (35) Internet
- a. <http://de.wikipedia.org>
 - b. <http://www.irasr.aut.ac.nz>
 - c. <http://www.fs.wetzell.de/veranstaltungen/vlbi/tecspec2012/index.html>
 - d. <http://ivscc.gsfc.nasa.gov/>
 - e. <http://www.mathworks.de>

Anhang

Horizon Mask

Wark30m; a=Azimut; e=Elevation

*+85°, +14m				14							
a [°]	e [°]	d [m]	e dish [°]	a [°]	e [°]	d [m]	e dish [°]	a [°]	e [°]	d [m]	e dish [°]
0	5		5								
1	5		5	41	5		5	81	5		5
2	5		5	42	5		5	82	5		5
3	5		5	43	5		5	83	5		5
4	5		5	44	5		5	84	5		5
5	5		5	45	5		5	85	5		5
6	5		5	46	5		5	86	5		5
7	5		5	47	5		5	87	5		5
8	5		5	48	5		5	88	5		5
9	5		5	49	5		5	89	5		5
10	5		5	50	5		5	90	5		5
11	5		5	51	5		5	91	5		5
12	5		5	52	5		5	92	5		5
13	5		5	53	5		5	93	5		5
14	5		5	54	5		5	94	5		5
15	5		5	55	5		5	95	5		5
16	5		5	56	5		5	96	5		5
17	5		5	57	5		5	97	5		5
18	5		5	58	5		5	98	5		5
19	5		5	59	5		5	99	5		5
20	5		5	60	5		5	100	5		5
21	5		5	61	5		5	101	5		5
22	5		5	62	5		5	102	5		5
23	5		5	63	5		5	103	5		5
24	5		5	64	5		5	104	5		5
25	5		5	65	5		5	105	5		5
26	5		5	66	5		5	106	5		5
27	5		5	67	5		5	107	5		5
28	5		5	68	5		5	108	5		5
29	5		5	69	5		5	109	5		5
30	5		5	70	5		5	110	5		5
31	5		5	71	5		5	111	5		5
32	5		5	72	5		5	112	5		5
33	5		5	73	5		5	113	5		5
34	5		5	74	5		5	114	5		5
35	5		5	75	5		5	115	5		5
36	5		5	76	5		5	116	5		5
37	5		5	77	5		5	117	5		5
38	5		5	78	5		5	118	5		5

39	5	5	79	5	5	119	5	5
40	5	5	80	5	5	120	5	5

121	5	5	161	6,2	400	4,2	201	6	500	4,4	
122	5,2	750	4,1	162	6,2	400	4,2	202	6	500	4,4
123	5,4	750	4,3	163	6,2	400	4,2	203	6	500	4,4
124	5,4	750	4,3	164	6,6	400	4,6	204	6	500	4,4
125	5	5	165	6,6	400	4,6	205	6	500	4,4	
126	5	5	166	7,3	330	4,9	206	6	500	4,4	
127	5	5	167	7,3	330	4,9	207	6	500	4,4	
128	5	5	168	7,3	330	4,9	208	6	500	4,4	
129	5	5	169	7,3	330	4,9	209	6	500	4,4	
130	5,3	720	4,2	170	7,6	330	5,2	210	6	500	4,4
131	5,3	720	4,2	171	7,6	330	5,2	211	6	500	4,4
132	5,3	720	4,2	172	8,1	330	5,7	212	6	500	4,4
133	5	5	173	8,1	330	5,7	213	6	500	4,4	
134	5	5	174	7,7	330	5,3	214	6	500	4,4	
135	5	5	175	7,7	330	5,3	215	6	500	4,4	
136	5	5	176	7,4	330	5	216	6	500	4,4	
137	5	5	177	7,4	330	5	217	6	500	4,4	
138	5	5	178	7,4	330	5	218	6	500	4,4	
139	5	5	179	7,4	330	5	219	6	500	4,4	
140	5	5	180	7	330	4,6	220	6	500	4,4	
141	5	5	181	7	330	4,6	221	6	500	4,4	
142	5	5	182	7	330	4,6	222	6	500	4,4	
143	5	5	183	7	330	4,6	223	6	500	4,4	
144	5	5	184	7	330	4,6	224	6	500	4,4	
145	5	5	185	7	330	4,6	225	6	500	4,4	
146	5	5	186	7	330	4,6	226	6	500	4,4	
147	5	5	187	7	330	4,6	227	6	500	4,4	
148	5	5	188	5,8	500	4,2	228	6	500	4,4	
149	5	5	189	5,8	500	4,2	229	6	500	4,4	
150	5	5	190	5,5	500	3,9	230	6	500	4,4	
151	5	5	191	5,5	500	3,9	231	6	500	4,4	
152	5	5	192	6	500	4,4	232	6	500	4,4	
153	5,3	260	2,2	193	6	500	4,4	233	6	500	4,4
154	5	5	194	6	500	4,4	234	6	500	4,4	
155	5,2	400	3,2	195	6	500	4,4	235	5	5	
156	5,7	400	3,7	196	6	500	4,4	236	5	5	
157	5,9	400	3,9	197	6	500	4,4	237	5	5	
158	5,9	400	3,9	198	6	500	4,4	238	5	5	
159	5,9	400	3,9	199	6	500	4,4	239	5	5	
160	5,9	400	3,9	200	6	500	4,4	240	5	5	

241	5	5	281	5	5	321	5	5
242	5	5	282	5	5	322	5	5
243	5	5	283	5	5	323	5	5

244	5	5	284	5	5	324	5	5
245	5	5	285	5	5	325	5	5
246	5	5	286	5	5	326	5	5
247	5	5	287	5	5	327	5	5
248	5	5	288	5	5	328	5	5
249	5	5	289	5	5	329	5	5
250	5	5	290	5	5	330	5	5
251	5	5	291	5	5	331	5	5
252	5	5	292	5	5	332	5	5
253	5	5	293	5	5	333	5	5
254	5	5	294	5	5	334	5	5
255	5	5	295	5	5	335	5	5
256	5	5	296	5	5	336	5	5
257	5	5	297	5	5	337	5	5
258	5	5	298	5	5	338	5	5
259	5	5	299	5	5	339	5	5
260	5	5	300	5	5	340	5	5
261	5	5	301	5	5	341	5	5
262	5	5	302	5	5	342	5	5
263	5	5	303	5	5	343	5	5
264	5	5	304	5	5	344	5	5
265	5	5	305	5	5	345	5	5
266	5	5	306	5	5	346	5	5
267	5	5	307	5	5	347	5	5
268	5	5	308	5	5	348	5	5
269	5	5	309	5	5	349	5	5
270	5	5	310	5	5	350	5	5
271	5	5	311	5	5	351	5	5
272	5	5	312	5	5	352	5	5
273	5	5	313	5	5	353	5	5
274	5	5	314	5	5	354	5	5
275	5	5	315	5	5	355	5	5
276	5	5	316	5	5	356	5	5
277	5	5	317	5	5	357	5	5
278	5	5	318	5	5	358	5	5
279	5	5	319	5	5	359	5	5
280	5	5	320	5	5	360	5	5

Wark12m; a=Azimut; e=Elevation

*+85°, +14m				14							
a [°]	e [°]	d [m]	e dish [°]	a [°]	e [°]	d [m]	e dish [°]	a [°]	e [°]	d [m]	e dish [°]
0	5		5								
1	5		5	41	5		5	81	5		5
2	5		5	42	5		5	82	5		5
3	5		5	43	5		5	83	5		5
4	5		5	44	5		5	84	5		5

5	5	5	45	5	5	85	5	5
6	5	5	46	5	5	86	5	5
7	5	5	47	5	5	87	5	5
8	5	5	48	5	5	88	5	5
9	5	5	49	5	5	89	5	5
10	5	5	50	5	5	90	5	5
11	5	5	51	5	5	91	5	5
12	5	5	52	5	5	92	5	5
13	5	5	53	5	5	93	5	5
14	5	5	54	5	5	94	5	5
15	5	5	55	5	5	95	5	5
16	5	5	56	5	5	96	5	5
17	5	5	57	5	5	97	5	5
18	5	5	58	5	5	98	5	5
19	5	5	59	5	5	99	5	5
20	5	5	60	5	5	100	5	5
21	5	5	61	5	5	101	5	5
22	5	5	62	5	5	102	5	5
23	5	5	63	5	5	103	5	5
24	5	5	64	5	5	104	5	5
25	5	5	65	5	5	105	5	5
26	5	5	66	5	5	106	5	5
27	5	5	67	5	5	107	5	5
28	5	5	68	5	5	108	5	5
29	5	5	69	5	5	109	5	5
30	5	5	70	5	5	110	5	5
31	5	5	71	5	5	111	5	5
32	5	5	72	5	5	112	5	5
33	5	5	73	5	5	113	5	5
34	5	5	74	5	5	114	5	5
35	5	5	75	5	5	115	5	5
36	5	5	76	5	5	116	5	5
37	5	5	77	5	5	117	5	5
38	5	5	78	5	5	118	5	5
39	5	5	79	5	5	119	5	5
40	5	5	80	5	5	120	5	5

121	5	5	161	7,8	150	5,5	201	6,7	150	4,4
122	5	5	162	7,8	150	5,5	202	6,7	150	4,4
123	5	5	163	7,8	150	5,5	203	6,7	150	4,4
124	5	5	164	8,3	150	6	204	6,7	150	4,4
125	5	5	165	8,3	150	6	205	6,7	150	4,4
126	5	5	166	8,3	150	6	206	7	150	4,7
127	6	100	167	8,3	150	6	207	7	150	4,7
128	6	100	168	8,3	150	6	208	7	150	4,7
129	6	100	169	9,4	150	7,2	209	7	150	4,7

130	6	100	2,6	170	9,4	150	7,2	210	7	150	4,7
131	6	100	2,6	171	8,8	150	6,5	211	7	150	4,7
132	7	150	4,7	172	8,8	150	6,5	212	7	150	4,7
133	7	150	4,7	173	8,8	150	6,5	213	7	150	4,7
134	7	150	4,7	174	8,2	150	5,9	214	7	150	4,7
135	7	150	4,7	175	8,2	150	5,9	215	7	150	4,7
136	6,5	150	4,2	176	8,2	150	5,9	216	7	150	4,7
137	6,5	150	4,2	177	8,2	150	5,9	217	7	150	4,7
138	6,5	150	4,2	178	8,2	150	5,9	218	7	150	4,7
139	8,2	150	5,9	179	7,8	150	5,5	219	7	150	4,7
140	8,2	150	5,9	180	7,8	150	5,5	220	7	150	4,7
141	8,2	150	5,9	181	7,8	150	5,5	221	7	150	4,7
142	8,2	150	5,9	182	7,8	150	5,5	222	7	150	4,7
143	8,2	150	5,9	183	7,8	150	5,5	223	7	150	4,7
144	8,2	150	5,9	184	7,8	150	5,5	224	5,8	150	3,5
145	7,5	150	5,2	185	7,8	150	5,5	225	5	150	2,7
146	7,5	150	5,2	186	7,8	150	5,5	226	5	150	2,7
147	6,4	150	4,1	187	7,8	150	5,5	227	5	150	2,7
148	6,4	150	4,1	188	7,8	150	5,5	228	5	150	2,7
149	7	150	4,7	189	7,8	150	5,5	229	5	150	2,7
150	7	150	4,7	190	6,7	150	4,4	230	6,8	150	4,5
151	7,8	150	5,5	191	6,7	150	4,4	231	6,8	150	4,5
152	7,8	150	5,5	192	6,7	150	4,4	232	5		5
153	7,8	150	5,5	193	6,7	150	4,4	233	6	340	5
154	7,8	150	5,5	194	6,7	150	4,4	234	6	340	5
155	7,8	150	5,5	195	6,7	150	4,4	235	6	340	5
156	7,8	150	5,5	196	6,7	150	4,4	236	6	340	5
157	7,8	150	5,5	197	6,7	150	4,4	237	5		5
158	7,8	150	5,5	198	6,7	150	4,4	238	5		5
159	7,8	150	5,5	199	6,7	150	4,4	239	5		5
160	7,8	150	5,5	200	6,7	150	4,4	240	5		5

241	5		5	281	5		5	321	5		5
242	5		5	282	5		5	322	5		5
243	5		5	283	5		5	323	5		5
244	5		5	284	5		5	324	5		5
245	5		5	285	5		5	325	5		5
246	5		5	286	5		5	326	5		5
247	5		5	287	5		5	327	5		5
248	5		5	288	5		5	328	5		5
249	5		5	289	5		5	329	5		5
250	5		5	290	5		5	330	5		5
251	5		5	291	5		5	331	5		5
252	5		5	292	5		5	332	5		5
253	5		5	293	5		5	333	5		5
254	5		5	294	5		5	334	5		5

255	5	5	295	5	5	335	5	5
256	5	5	296	5	5	336	5	5
257	5	5	297	5	5	337	5	5
258	5	5	298	5	5	338	5	5
259	5	5	299	5	5	339	5	5
260	5	5	300	5	5	340	5	5
261	5	5	301	5	5	341	5	5
262	5	5	302	5	5	342	5	5
263	5	5	303	5	5	343	5	5
264	5	5	304	5	5	344	5	5
265	5	5	305	5	5	345	5	5
266	5	5	306	5	5	346	5	5
267	5	5	307	5	5	347	5	5
268	5	5	308	5	5	348	5	5
269	5	5	309	5	5	349	5	5
270	5	5	310	5	5	350	5	5
271	5	5	311	5	5	351	5	5
272	5	5	312	5	5	352	5	5
273	5	5	313	5	5	353	5	5
274	5	5	314	5	5	354	5	5
275	5	5	315	5	5	355	5	5
276	5	5	316	5	5	356	5	5
277	5	5	317	5	5	357	5	5
278	5	5	318	5	5	358	5	5
279	5	5	319	5	5	359	5	5
280	5	5	320	5	5	360	5	5