

GEODÄTISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT HANNOVER

in Kooperation mit dem

ALFRED-WEGENER-INSTITUT FÜR POLAR- UND MEERESFORSCHUNG
BREMERHAVEN

Diplomarbeit

DEFORMATIONSANALYSEN AUF DER BASIS
WIEDERHOLTER GPS-MESSUNGEN AUF EINEM
SCHELFEIS

cand. geod. Tobias Krömer

Hannover, im Juni 2006

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig angefertigt habe. Bei der Erstellung dieser Arbeit habe ich lediglich die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet.

Hannover, 16. Juni 2006

Tobias Krömer

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist für mich persönlich der Abschluss meiner Teilnahme an Expedition ANT-Land 2004/2005 zur Standortplanung der neuen deutschen Antarktisstation Neumayer-III.

Verbunden bin ich besonders Herrn Dr. Hans-Werner Schenke vom Alfred-Wegener-Institut (AWI) in Bremerhaven, der mir durch das in mich gesetzte Vertrauen die Teilnahme an der Messkampagne ermöglicht und das Entstehen dieser Arbeit durch zahlreiche wertvolle Hinweise wesentlich gefördert hat. Ihm verdanke ich wertvolle Einblicke in die glaziologische Forschung und unvergessliche Erlebnisse in der Antarktis.

Herrn Daniel Schulte (AWI) danke ich besonders für seine stete Hilfsbereitschaft zur Lösung von sich in der Praxis ergebenden Problemen.

Danke sage ich auch der Fa. Geo++, die mir das Programm GEONAP zur Verfügung stellte und mir durch die Herren Dr. Martin Schmitz und Gerald Böttcher wertvolle Hilfe bei der Anwendung der Software leisteten.

Hilfreich waren des Weiteren die Herren Hans Neuner und Florian Dilßner (Universität Hannover), mit denen ich jederzeit aufkommende Probleme diskutieren und so schneller einer Lösung zuführen konnte.

Mein Dank gilt auch den Alt- und Neuüberwinterern der Sommerkampagne ANT – Land 2004/2005 auf der Neumayer-III-Station für deren vielfältige Unterstützung vor Ort.

Schließlich möchte ich mich hiermit bei meinen Eltern, Geschwistern und Freunden für die Begleitung während meines gesamten Studiums bedanken.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Schelfeise in der Antarktis	4
2.1 Das Ekström-Schelfeis.....	5
3 Beitrag zu glaziologischen Forschungsarbeiten mit Hilfe geodätischer Messverfahren	7
3.1 Referenzrahmen.....	11
4 GPS-Kampagnen im Punktfeld der Neumayer-III-Station	13
4.1 Organisation und Modifikation des wissenschaftlichen Equipments.....	14
4.2 Vorbereitende Planung des Messablaufs.....	15
4.2 Praktische Durchführung der Messkampagne.....	16
4.3 Klinometermessung.....	17
4.4 Datencheck.....	18
5 Kalibrierung des Klinometers	21
5.1 Bestimmung von Maßstab und Nullpunkt des Klinometers.....	23
5.2 Untersuchung: Müssen die ermittelten Neigungswerte angebracht werden?.....	24
6 Auswertung der GPS-Beobachtungen	27
6.1 Wissenschaftliche GPS-Auswertesoftware.....	28
6.2 Kommerzielle GPS-Auswertesoftware.....	30
6.3 Stationsnetz.....	31
6.4 Datenaufbereitung.....	32

6.5	Auswertansätze.....	38
6.6	GEONAP-Auswertung.....	39
6.7	Genauigkeitsabschätzung für die <i>base</i>	47
6.8	Berechnung des lokalen Punktfeldes.....	49
6.9	Beurteilung der Ergebnisse und deren Genauigkeiten.....	51
7	Bestimmung des Bewegungsfeldes.....	54
7.1	Beobachtungsplot.....	54
7.2	Vorbereitende Formatierung.....	55
7.3	Zeitliche Normierung.....	56
7.4	Azimute und Geschwindigkeiten.....	56
7.5	Grafische Darstellung des Bewegungsfeldes.....	57
8	Deformationsanalysen.....	58
8.1	Strainanalyse.....	59
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	61
	Literatur.....	64
	Anhang.....	67

1 Einleitung

»Man stelle sich ein Land vor, so groß wie Australien und Europa zusammen. Sonniger als Kalifornien und doch kälter als das Gefrierfach eines Kühlschranks. Trockener als Arabien und höher als die bergige Schweiz. Leerer als die Sahara. Es gibt nur einen Ort auf der Welt, auf den diese Beschreibung zutrifft. Die Antarktis – dieser fremde, aber wunderschöne Kontinent im untersten Teil der Erde.« (J. M. Dukert)

Die Antarktis ist von einem Zirkumpolarstrom umgeben, der die drei Ozeane Atlantik, Pazifik und Indischer Ozean verbindet. Fast die gesamten Eismassen unseres Planeten und damit ca. 30 Millionen km³ Süßwasser sind in der Antarktis gebunden. Diese Besonderheiten machen die Antarktis zum stärksten Klimamotor. Alle Veränderungen haben einen entscheidenden Einfluss auf das „System Erde“. Ihre Erfassung und Analyse kann dazu beitragen unseren Planeten zu verstehen und zu schützen.

Der Schutz dieses einmaligen Naturreservoirs stellt eine wichtige Aufgabe für jetzige und kommende Generationen dar. Eisprofiluntersuchungen ermöglichen einen Rückblick in das Klimageschehen vor Jahrtausenden und können auch eine Aussage über zukünftige Entwicklungen geben. Eine Erforschung dieses Kontinents rein zum wissenschaftlichen Zweck ist deshalb unerlässlich.

Seit knapp 25 Jahren betreibt das Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI) in der Antarktis wissenschaftliche Observatorien für Geophysik, Meteorologie und Luftchemie. Die 1992 auf dem Ekström-Schelfeis erbaute Neumayer-Station ist ebenso wie die 1981 erbaute Georg von Neumayer-Station durch den Schneezuwachs ins Eis eingesunken und durch die Bewegungen des Schelfeises in Richtung Schelfeiskante gedriftet. Aus diesem Grunde soll eine neue Station errichtet werden.

Zur Standortplanung der neuen deutschen Antarktisstation Neumayer-III wurde ein 35 km² großes Messfeld eingerichtet in dem die Dehnungs- und Stauchungsdaten von 48 Punkten bestimmt werden sollen.

Die Diplomarbeit beschäftigt sich mit den Wiederholungsmessungen nach einem Jahr in der Sommerkampagne 2004/05. Dafür kann auf eine Diplomarbeit aufgebaut werden in der am AWI in Kooperation mit der Fachhochschule Hamburg mit Hilfe des *Global Positioning System* (GPS) die Nullmessungen des Punktfeldes in der Sommerkampagne 2003/04 durchgeführt und die Koordinaten ermittelt wurden. Beide GPS-Beobachtungsepochen werden mit einem wissenschaftlichen Auswerteprogramm prozessiert und die Datensätze im Hinblick auf die Frage analysiert, wie sich das Punktfeld absolut bewegt und welche Dehnungs- und Stauchungsdaten relativ auftreten.

Zur Begriffsdefinition und Einführung in das Themengebiet gibt Kapitel 2 einen Überblick über Antarktika, die sie umgebenden Schelfeise und die Neumayer-Station.

In Kapitel 3 werden alternative Verfahren zur Bestimmung von Eisgeschwindigkeiten und oberflächennahen Verformungen neben dem GPS gegenübergestellt und deren Wirtschaftlichkeit diskutiert. Des Weiteren wird ein geeignetes Bezugssystem eingeführt; vertiefend wird hierauf jedoch erst in Kapitel 6 eingegangen.

Die Beschreibung der geodätischen Arbeiten vor Ort ist Inhalt des 4. Kapitels. Neben den vorbereitenden Maßnahmen und Überlegungen zur Messkonfiguration, wird der Gang der praktischen Messungen erläutert.

Kapitel 5 widmet sich der Kalibrierung eines Klinometers welches zur Neigungsbestimmung der Vermarktungsbalisen genutzt wurde.

Kapitel 6 soll einen Überblick über das Programmpaket GEONAP geben und dabei schwerpunktmäßig aufzeigen, wie die speziellen in der Antarktis auftretenden Probleme erfasst werden können. Daneben wird auch auf einige andere Aspekte des GPS-Fehlerbudgets eingegangen, ohne sich in den Details zu verlieren, für die ein Blick in weiterführende Literatur empfohlen wird.

Die Gliederung ist der Ablaufplan jeder nicht-automatisierten GPS-Auswertung. Besonders die in der Antarktis auftretenden Probleme werden hier dargestellt und Lösungen gegeben, wie diese im Programm erfasst werden können. Auch auf einige andere Aspekte des GPS-Fehlerbudgets wird hier eingegangen. Neben der Datenaufbereitung ist die Beschaffung konsistenter Lösungen bezüglich der Stationskoordinaten und den Satellitenorbits von entscheidender Bedeutung.

Eine Darstellung des Bewegungsfeldes wird in Kapitel 7 gegeben. Hier wird die Normierung der einzelnen Sessionen erläutert. In diesem Zusammenhang wird auch ein Beobachtungsplot der einzelnen Messtage gezeigt.

Kapitel 8 umfasst die Analyse der umfangreichen GPS-Bestimmungen und zeigt als Endprodukt die auftretenden Strain-Ellipsen aus dem knapp einjährigen Epochenabstand.

Eine kurze Zusammenfassung der vorliegenden Arbeit gibt Kapitel 9. Ein Ausblick enthält Ansätze zu vertieften Untersuchungen einzelner Aspekte und zeigt neue Herausforderungen auf, die in der Analyse gezeitenbedingter und horizontal bewegter Punkte auf einem Schelfeis gegeben sind.

2 Schelfeise in der Antarktis

Die Antarktis ist zum größten Teil von einem schildförmigen, 13 Millionen Quadratkilometer großen Eisspanzer überzogen. Im Zentralbereich weist er eine Stärke von bis zu 4300 m auf. In den Randbereichen fließen die Eismassen in talgletscherartigen Auslassgletschern zu den Ozeanen hin ab. Dieses Abfließen ist mit der Fließbewegung von Gletschern zu vergleichen, wie es auch im europäischen Raum zu beobachten ist. Die Gebirgsgletscher werden seitlich von Höhenzügen begrenzt, die damit die Fließrichtung einschränken und die Hangrichtung vorgeben. Ähnlich verhält es sich mit den Eismassen des antarktischen Inlandeises. Unter dem Eigengewicht bewegt sich das Eisschild zunächst senkrecht nach unten und fließt dann unter dem wachsenden Druck radial auseinander. In den Randbereichen werden die Eismassen durch angrenzende Gebirge abgebremst (Schreiner, 1997 und Strahler, 1999).

Der Bereich des Übergangs vom Grundkontakt zum Kontakt mit den Ozeanen, wo das Eis aufschwimmt und nicht etwa abbricht, wird als *Groundingline* (Kirchner, 2002) bezeichnet. Der dann meist schwimmende Eiskörper heißt Schelfeis und kann sich mehrere 100 km weit auf das offene Meer erstrecken. Das Schelfeis lässt sich mit einem einseitig an der *Groundingline* eingespannten elastischen Balken vergleichen und unterliegt Auflasteffekten und einem immerwährenden Anfrieren und Abschmelzen an dessen Unterseite. Durch diese Anfrier- und Abschmelzvorgänge sowie durch Akkumulation (jährlicher Schneezuwachs) verändert sich der Massenhaushalt eines Schelfeises und damit seine Eigendynamik in Bezug auf die Fließrichtung und die Fließgeschwindigkeit. Letztere ist jedoch in erster Linie auf die Speisung durch das Inlandeis zurückzuführen. Teilweise haben die Schelfeise aber auch noch außerhalb der *Groundingline* Grundkontakt. Kleinere Defekte werden als *ice rises* bezeichnet und verursachen Verwerfungen, während die so genannten *ice rumpels* zu Erhebungen führen, welche radial umflossen werden (Hinze, 1990).

Meerseitig enden die Schelfeise in Form einer durch Abschmelzung und Abbruch (Kalben von Eisbergen) stark variierenden Kante.

Die größten und mächtigsten Schelfeise der Antarktis sind mit einer Fläche von über 450.000 km² die großen Filcher-Ronne- und Ross-Schelfeise. Insgesamt bestehen etwa 40 Prozent der über 30.000 km langen Küste Antarktikas aus Schelfeis.

2.1 Das Ekström-Schelfeis

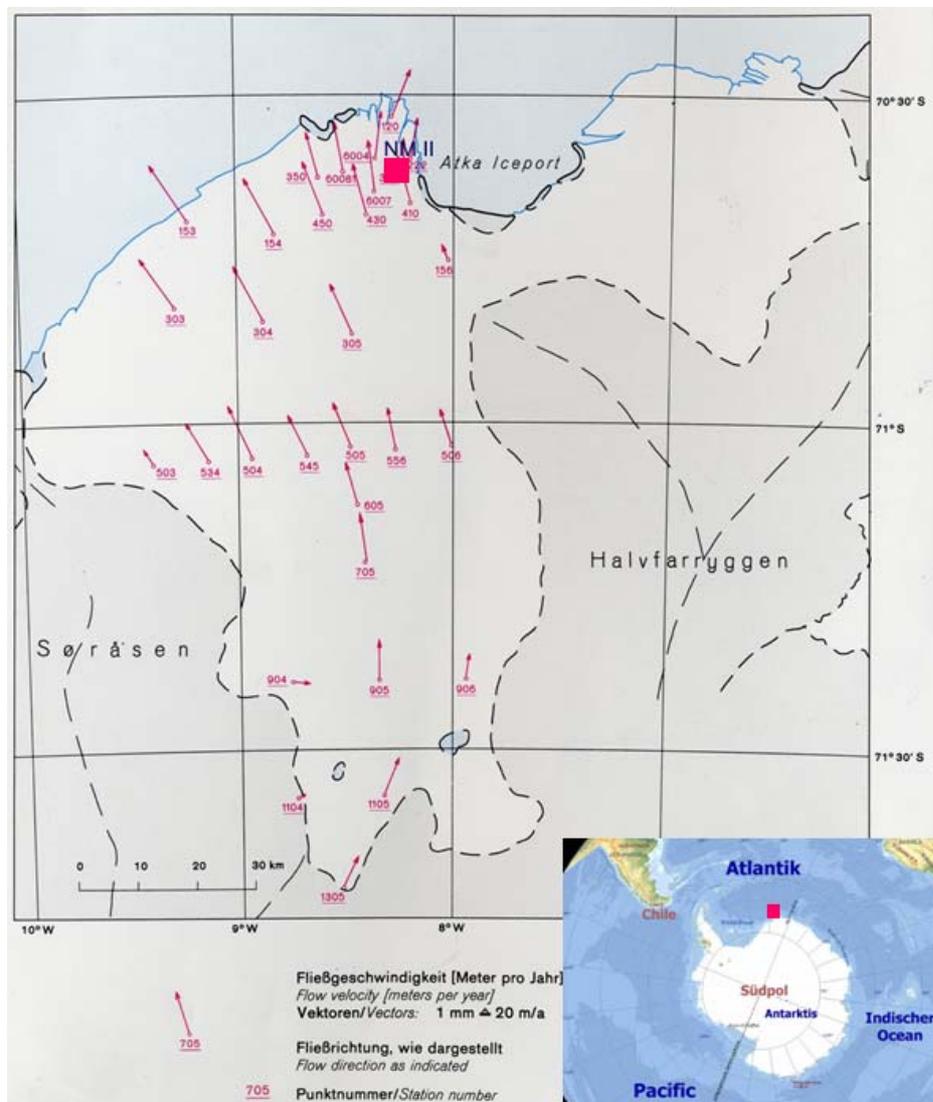


Abb. 2.1: Geografische Übersicht des Ekström-Schelfeises, 9° W, 70°-72° S, Fließgeschwindigkeiten und Fließrichtungen (Nixdorf, 1999)

Mit etwa 6350 km² Ausdehnung gehört das Ekström-Schelfeis eher zu den kleineren Eisplatten (Hinze, 1988). Es erstreckt sich am nord-westlichen Rand des Weddelmeeres an der Küste des *Dronning Maud Land* zwischen *Søråsen* im Westen und *Halvfarryggen* im Osten. Von dem südlichsten Punkt der *Groundingline* bis zur Schelfeisfront ist es etwa 130 km lang und zwischen den beiden genannten Erhebungen gut 40 bis 60 km breit (Abb. 2.1).

Von der *Groundingline* bis zur Schelfeisfront nimmt die Mächtigkeit des Ekström-Schelfeises von etwa 900 m bis auf etwa 200 m ab (Nixdorf, 1999). Die Mächtigkeit der Wasserschicht ist in diesem Bereich ebenfalls nicht gleich bleibend. Im zentralen Bereich der Schelfeisplatte beträgt sie bis zu 600 m, wohingegen im Bereich der Schelfeiskante lediglich ein Wert von 100 m ermittelt wurde (Kobarg, 1988). Der mittlere jährliche Schneezuwachs und die mittlere jährliche Schmelzrate halten sich im Bereich der Neumayer-Station mit etwa 75 pro Jahr ungefähr das Gleichgewicht.

Die Fließrichtung wird durch die benachbarten unter dem Eispanzer liegenden Höhenzüge *Søråsen* und *Halvarryggen* und der Schwerkraft vorgegeben. Von der *Groundingline* bis zur Schelfeisfront nehmen die Fließgeschwindigkeiten zu. Im Bereich der Neumayer-Station und des Punktfeldes der Neumayer-III-Station beträgt sie etwa 160 m/a (Gerdau, 1984). *Ice rises* im nordwestlichen Bereich des Ekström-Schelfeises führen zu Grundberührungen, die einen Rückstau verursachen. Ähnliche Effekte verursacht der auf dem Satellitenbild (Kapitel 4, Abb. 4.1) erkennbare „Eisrüssel“ im südwestlichen Bereich der Neumayer-Station, so dass dort eine Stauchung zu erwarten ist.

3 Beitrag zu glaziologischen Forschungsarbeiten mit Hilfe geodätischer Messverfahren

Veränderungen der Eismassenbilanzen haben einen entscheidenden Einfluss auf das Klimasystem der Erde. Die Erforschung der durch die verschiedensten Formen von Eis und Schnee bedeckten Oberflächen unseres Planeten – der so genannten Kryosphäre - ist das Aufgabengebiet der Glaziologen. Die Forschungsarbeiten sind dabei eng mit vielen weiteren Disziplinen wie z. B. der Geodäsie verknüpft.

In diesem Kapitel sollen verschieden geodätische Messverfahren mit ihren Vor- und Nachteilen vorgestellt werden. Schwerpunkt der Zusammenstellung ist insbesondere ein Vergleich der Wirtschaftlichkeit mit dem *Global Positioning System* (GPS), das sich in den vergangenen Jahren in der antarktischen Region als geodätisches Messverfahren zur Bestimmung von Fließgeschwindigkeiten und zur Analyse oberflächennaher Verformungen der Kryosphäre etabliert hat. Ferner wird auf ein geeignetes Bezugssystem für die Analyse von relativen und absoluten Deformationen eingegangen.

Von 1964 an wurde das bewährte - anfangs als Navigationssystem für die US Marine entwickelte - TRANSIT-Navigationssystem zur Ableitung von Betrag und Richtung von Eisbewegungen aus mehrfachen Positionsbestimmungen genutzt. Bei bekannten Satellitenpositionen zu verschiedenen Zeitpunkten konnten die gesendeten Frequenzen dopplerverschoben aufgezeichnet werden. Anhand eines Vergleichs mit der im Doppler-Empfänger gespeicherten Referenzfrequenz ließen sich die Daten auswerten und eine Position ermitteln (Seeber, 1989 und Torge, 2003).

Heute werden Koordinaten durch Beobachtungen mit dem GPS bestimmt, welches aus dem NAVSTAR (*NAVigation Satellite Time And Range*) *Global Positioning System* – einer Weiterentwicklung des TRANSIT - hervorging. Die TRANSIT-Messungen wurden seit Ende der neunziger Jahre nahezu verdrängt. Langen Beobachtungszeiten

zur exakten Positionierung und die global schlechte Satellitenabdeckung, durch welche nur während begrenzter Zeitfenster beobachtet werden konnte, waren die entscheidenden Nachteile dieses Systems. Dagegen ist das heutige GPS schnell, hinreichend genau und überall nutzbar (Remondi, 1991).

In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass neben dem GPS auch das russische Satellitennavigationssystem *Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya* (GLONASS) für Positionierungen genutzt werden kann und auch genutzt wird. Um alle Systeme mit einem Oberbegriff abzudecken, hat sich die Bezeichnung *Globale Navigation Satellite Systems* (GNSS) in der Fachliteratur durchgesetzt. Die Datenaufzeichnung für diese Arbeit erfolgte jedoch größtenteils mit Trimble-Empfängern vom Typ 4000 SSi/SSe, die zwar zur Aufzeichnung und Speicherung von GPS-Beobachtungen nicht aber von GLONASS-Daten geeignet sind. Aus diesem Grunde wird im Folgenden nur noch auf das GPS Bezug genommen.

Eine andere Möglichkeit zur Bestimmung von Bewegungen der Eisschilde und Auslassgletscher stellt die flugzeug- oder vorwiegend satellitengestützte *Interferometric Synthetic Aperture Radar* (INSAR) dar. Die in einer breiten Keule ausgestrahlten Mikrowellenimpulse einer kurzen Antenne bestrahlen während des Fluges mehrfach die gleichen Geländepunkte. Die stark korrelierten Reflexionssignale werden wiederholt empfangen aber bei der Auswertung den Abschnitten eines scheinbar sehr langen Antennensystems zugeordnet. Dadurch wird die geometrische Auflösung verbessert und es lassen sich horizontale und vertikale Bewegungskomponenten ableiten. Durch Überlagerung mehrerer Satellitenbilder werden eine flächendeckende Untersuchung zeitlicher und räumlicher Eisbewegungen ermöglicht und gleichzeitig Erkenntnisse bezüglich der Massenbilanz gewonnen. Die Zeitreihen reichen von 1978 (SEASAT) bis heute (ENVISAT) und werden voraussichtlich durch Folgemissionen (ICESat und eventuell CryoSat) fortgesetzt (Albertz, 2001).

Die Luftbildphotogrammetrie stellt ein weiteres geodätisches Messverfahren zur Ableitung von Bewegungsfeldern dar. Durch die Verknüpfung eines inertialen Messsystems (IMS) mit einer kreiselstabilisierten Kamera im Rumpf eines Flugzeugs können sich mehrfach überlappende Bilder aufgenommen werden. Über den durch GPS und IMS bekannten Aufnahmepunkt und terrestrische Passpunkte am Rande eines Blockverbandes aus mehreren Flugstreifen lassen sich damit in Abhängigkeit von Flughöhe, Kammerkonstante und Fluggeschwindigkeit Geländemodelle und Koordinaten von signalisierten Punkten ableiten. Anhand wiederholter Aufnahmen zu verschiedenen Zeitpunkten können daraus oberflächennahe Verformungen bestimmt werden (Wiggenhagen, 2006).

Mit der klassischen Methode der terrestrischen Vermessung von im Eis vermarkten Punkten können die verschiedensten Beobachtungen durchgeführt werden. Durch den Einsatz von Theodoliten und Tachymetern lassen sich Polygonzüge oder geometrische Figuren wiederholt bestimmen. Zur Orientierung dieser Netze sind Sonnen- oder Kreiselazimute zu beobachten.

Alle vorgestellten verschiedenen Messverfahren bedürfen einer umfangreichen Datenaufbereitung im Postprocessing. Bei der klassischen terrestrischen Methode dürfte der Aufwand für die Nachbearbeitung am geringsten ausfallen. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich mit dieser im Verhältnis zu anderen Verfahren nur eine wesentlich kleinere Fläche in einer vergleichbaren Zeit erfassen lässt und sie damit eher für kleinräumige Untersuchungen sinnvoll ist. Zudem sind Sonnenazimutbeobachtungen extrem wetterabhängig und Kreiselorientierungen aufgrund ihrer geringeren Genauigkeit nur bedingt anzuwenden (Miller, 1990). Die Hauptschwierigkeit zur Ableitung einer absoluten Bewegung ist hier die Positionierung über den benötigten Anschluss an Festpunkte. Solche sind auf dem Ekström-Schelfeis, welches für diese Abwägungen als Beispiel dienen mag, in der näheren Umgebung (50 km²) nicht vorhanden. Hier bleibt nur der Einsatz eines absolut oder besser relativ über umliegende Festpunkte positionierten GPS-Referenzpunktes.

Auch die Luftbildphotogrammetrie ist auf terrestrische Passpunkte angewiesen. Verknüpfungspunkte für die einzelnen Bilder können durch einfache Vermarkungen im Untersuchungsgebiet geschaffen werden. Vollpasspunkte dürfen durchaus etwas weiter entfernt sein und müssen nicht unbedingt mittig im Aufnahmegebiet liegen, trotzdem aber hochgenau bestimmt werden. Auch hier ist eine Positionierung unabdingbar und damit wiederum der Einsatz des GPS von Vorteil. Hierzu würden sich die etwa 60-100 km entfernten geophysikalischen Außenstationen der Neumayer-Station auf den umliegenden Höhenzügen des Ekström-Schelfeises anbieten. Zu beachten ist, dass die dort zu installierenden Signalisierungen von Driftschnee freigehalten werden müssen und dies eine kostenintensive Aufgabe darstellt, da zusätzliche Helikopterflüge einzuplanen sind. Neben den ohnehin schon sehr hohen Kosten für die Flugzeugkampagnen stellt dies einen erheblichen wirtschaftlichen Nachteil dar.

Die Geocodierung von Satellitenmissionen bedarf bis auf die Kalibrier- und Validierungsphase keiner weiteren terrestrischen Passpunkte. Zur Fließbestimmung eignen sich vor allem Satelliten, welche kohärente Bilder liefern. Zurzeit ist solch ein System nicht verfügbar. ENVISAT hat beispielsweise eine Wiederholrate von 35 Tagen. Doch gerade während der Sommermonate verändert sich die Oberflächenstruktur des Schelfeises durch Drift und Schmelzvorgänge so stark, dass es zu erheblichen Dekorrelationseffekten kommt, welches die Auswertung sehr erschwert.

Mit Daten der ERS-1 (*European Remote-Sensing Satellite*, Start 1994) und ERS-2 (Start 1996) und zusätzlichen GPS-Passpunkten wurde jedoch am AWI durch diverse Anpassungen und Glättungen ein Bewegungsfeld des Ekström-Schelfeises mit 2-km-Abstand berechnet (Abb. 3.1).

Der große Vorteil satellitengestützter Verfahren ist die vergleichsweise großflächige Erfassung gegenüber einer terrestrischen GPS-Kampagne. Für absolute Bewegungsraten ist es durchaus sinnvoll, satellitengestützte und damit wohl auch umweltschonendere Beobachtungsmethoden vorzuziehen. Für die Ableitung von Dehnungsraten sind die Daten jedoch zu sehr verrauscht und das GPS ist hier der INSAR-Methode überlegen (Rack, 2006).

Eine konkrete Aussage bezüglich der zu veranschlagenden Kosten für die Aufnahme, Bereitstellung und Auswertung von Satellitenbildern ist im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Doch es sei darauf hingewiesen, dass die entsprechenden Aufnahmeeinrichtungen im Satelliten nur dann eingeschaltet werden, wenn auch ein entsprechendes Projekt zum Beispiel bei der ESA (*European Space Agency*) eingereicht wurde.

Bei fast allen geodätischen Messverfahren für glaziologische Forschungsarbeiten ist die Bestimmung von Passpunkten oder die Kenntnis hochgenauer Festpunkte unerlässlich. Hierfür stellt die Positionsbestimmung über die GPS-Satelliten die effizienteste und teilweise auch einzige Methode dar.

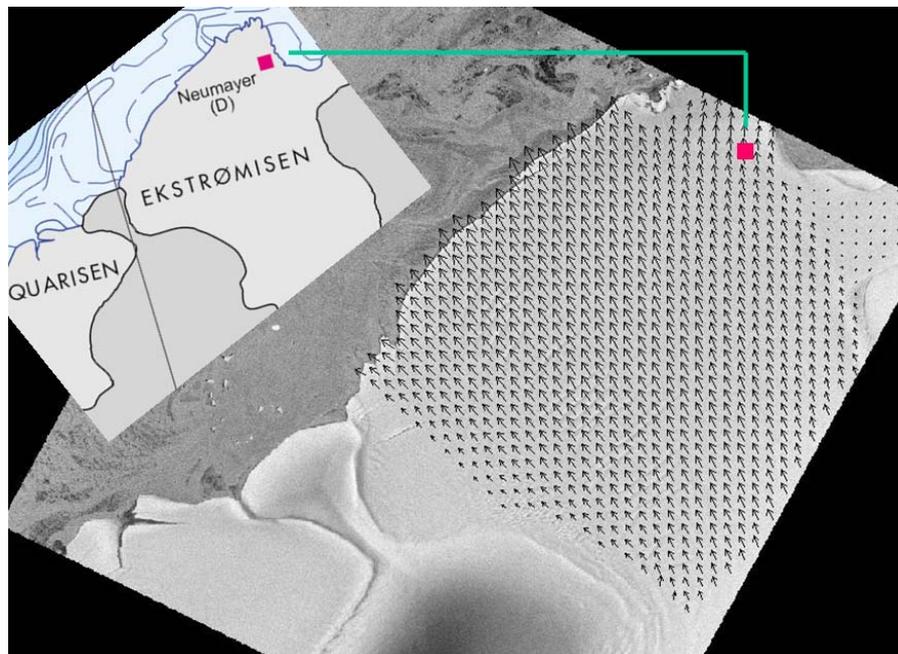


Abb. 3.1: Übersicht Ekstrømissen und Satellitenbild ERS-1/-2 mit Bewegungsvektoren (Rack, 2005)

Durch den Einsatz satellitengestützter Positionierungsverfahren kann relativ wetterunabhängig – von starken Stürmen, Drift und Polarnacht einmal abgesehen - ein mittelgroßes Untersuchungsgebiet wirtschaftlich beobachtet werden. Der geringe Personalaufwand mit nur ein bis zwei Geodäten bei der GPS-Vermessung ist kaum zu unterbieten. Für größere Kampagnen ist der Einsatz mehrerer selbständig operierender 2-Mann-Trupps möglich, so dass auch Flächen von bis zu 10.000 km² problemlos erfasst werden können (Miller, 1990).

Zur hochgenauen Punktbestimmung ist eine Einzelpositionierung mit GPS bekanntlich nicht ausreichend (Seeber, 2003). Auch hier sind über DGPS (*Differential GPS*) mit weiteren GPS-Anlagen bestückte Festpunkte nötig. Diese sind in der Antarktis und vor allem im Bereich des Ekström-Schelfeises nur bedingt vorhanden. Für jede Kampagne müssten sie mit einer autark arbeitenden Anlage ausgerüstet werden, was sich – von den hohen Kosten für die dazu erforderlichen Helikopterflüge einmal abgesehen – als schwierig erweist, weil eine Stromversorgung ausschließlich über Solarpanel häufig wegen unzureichender Sonneneinstrahlung nicht gewährleistet ist.

3.1 Referenzrahmen

Seit 1994 stellt der *International GPS Service* (IGS) hochgenaue Orbit- und Zeitinformationen bereit, die auf Grundlage eines mehr als 300 permanent registrierenden global verteilten GPS-Stations-Netzwerks berechnet werden. Wie bereits angesprochen kann durch relative Positionsbestimmung mit mindestens zwei GPS-Empfängern die Genauigkeit gesteigert werden. Ein Empfänger muss hierfür auf einem koordinatenmäßig bekannten Punkt installiert sein und zeitgleich Daten aufzeichnen. Hierfür bieten sich die permanent registrierenden Stationen des IGS an, deren Daten ebenso wie die präzisen Orbitinformationen online und frei zugänglich zur Verfügung gestellt werden. Allerdings ist die von dem Untersuchungsgebiet auf dem Ekström-Schelfeis nächstgelegene Referenzstation des IGS über 200 km entfernt. Weitere Stationen liegen in bis zu 4000 km Entfernung. Hieraus ergeben sich für die exakte Positionsbestimmung im Postprocessing erhebliche Schwierigkeiten, auf die im Verlauf dieser Arbeit näher eingegangen wird. Trotzdem ist eine hochpräzise Positionierung damit möglich (Kapitel 6). Die globale präzise Berechnung der Zeit und Orbits mit einer Genauigkeit im cm-Bereich durch den IGS beinhaltet eine direkte Verbindung mit einem globalen Referenzrahmen durch Position, Orientierung und Maßstab. Dieser ist konsistent zum gegenwärtigen *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF) (Kouba, 2003).

Und damit schließt sich der Kreis im Bezug auf die Forderung nach identischen Punkten in Überwachungsmessungen in jeder Epoche. Denn alle mit GPS beobachteten Punkte im Felde und die Koordinaten der Referenzstationen des IGS beziehen sich auf diese Weise auf ein gemeinsames Datum. Die Anforderung zeitlich unabhängiger Untersuchungen mit einem ortsfesten Bezug wird damit erfüllt. Vertiefend wird hierauf bei der Auswertung der Messungen eingegangen (Kapitel 6).

4 GPS-Kampagnen im Punktfeld der Neumayer-III-Station

Zur Standortplanung der neuen deutschen Antarktisstation Neumayer-III wurde in der Sommerkampagne 2003/2004 auf dem Ekström-Schelfeis ein Messfeld eingerichtet. Durch jährlich wiederkehrende GPS-Messungen sollten die absoluten Bewegungs- und Stauchungsdaten ermittelt werden, um einen geeigneten neuen Standort für die zukünftige Neumayer-III-Station zu finden. Dafür wurde südlich der heutigen Neumayer-Station ein 35 km² großes Punktfeld vermarktet (Abb. 4.1). Rasterförmig mit einem Abstand von einem Kilometer wurden 2 m lange Balisen in das Eis eingebracht. Als Balisen werden die aus dem Gerüstbau bekannten Aluminiumrohre mit etwa 3-4 cm Durchmesser bezeichnet, welche sich für diese und ähnliche Baumaßnahmen auf Gletschern und Schelfeisen bewährt haben. Um die zu erwartende Stauchung des Messfeldes in Nord-Süd-Richtung aufdecken zu können, wurde das Punktfeld rechteckig nach Norden hin ausgerichtet: 7 km Nord-Süd-Ausdehnung und 5 km Ost-West-Ausdehnung. Nähere Ausführungen hierzu enthält die Diplomarbeit von Weidt, (2005).

Im Folgenden wird auf die GPS-Wiederholungsmessungen nach einem Jahr in der Sommerkampagne 2004/2005 näher eingegangen. Erst anhand dieses zweiten Datensatzes können aussagekräftige Deformationsanalysen durchgeführt und damit Rückschlüsse auf die zu erwartenden oberflächennahen Verformungen gezogen werden. Inwieweit diese Erkenntnisse dann allerdings Aussagen bezüglich eines Stationsstandortes in zehn bis zwanzig Jahren zulassen, ist anhand des kurzen Erfassungszeitraumes und nur zweier Messeperioden eher fragwürdig und kritisch zu betrachten.

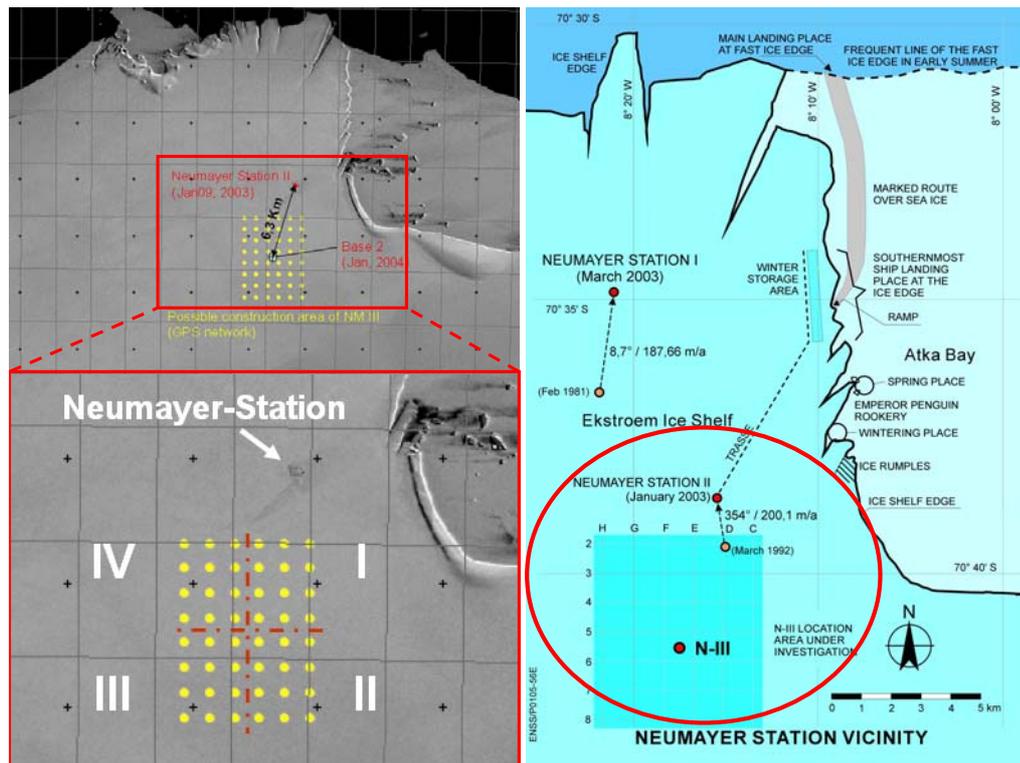


Abb. 4.1: Satellitenbild und Umgebungskarte der Neumayer-Station

4.1 Organisation und Modifikation des wissenschaftlichen Equipments

Unter wissenschaftlichen Institutionen ist es üblich, dass Messgeräte für größere Kampagnen einzelner Institute untereinander ausgeliehen werden. Für die GPS-Wiederholungsmessungen der Saison 2004/2005 konnten vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) aus Frankfurt/Main sowie vom GeoForschungsZentrum (GFZ) Potsdam insgesamt sieben GPS-Empfänger vom Typ Trimble 4000 SSi/SSe bereitgestellt werden.

Da die wissenschaftliche Ausrüstung sowohl beim Transport als auch bei den extremen Witterungsbedingungen in der Antarktis besonderen Belastungen ausgesetzt ist, müssen die GPS-Anlagen zusätzlich in gedämmte Zarges-Kisten verpackt werden. Zarges-Kisten haben sich seit Jahren für den sicheren Transport empfindlicher Geräte unter extremen Bedingungen bewährt. Die für diese Expedition verwendeten Kisten wurden mit einer bis zu minus zwanzig Grad Celsius resistenten Isolierschicht ausgekleidet. Des Weiteren wurden für die externe Batterieversorgung und die GPS-Antenne

Kabeldurchführungen geschaffen, durch die neben dem Kabel keinerlei Driftschnee eindringen konnte. Eindringener Schnee würde durch die Abwärme des Gerätes geschmolzen, was eine Beschädigung der hochempfindlichen Messinstrumente zur Folge hätte.

Eines der größten Probleme bei mobilen Messungen in der Antarktis stellt die Stromversorgung dar. Die Abteilung Geophysik der Neumayer-Station arbeitet bereits seit Jahren erfolgreich mit 12-Volt-LKW-Batterien, welche in stabilen Styropor-Boxen gegen Kälte geschützt sind. Dazu mussten noch die entsprechenden Batteriekabel angefertigt werden, die dann in der Klimakammer des Alfred-Wegener-Institutes einem Temperatur-Belastungstest bei minus zwanzig Grad Celsius unterzogen wurden.

Zur Untersuchung der oberflächennahen Verformungen war es nötig, neben der Bestimmung der absoluten und relativen Koordinaten der einzelnen Balisen auch eine mögliche Abweichung aus der Vertikalen messtechnisch zu erfassen. Wie auch schon in der Nullmessung der Sommerkampagne 03/04 wurde hierfür ein vom Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der Technischen Universität Braunschweig (igp) genutztes Klinometer zur Verfügung gestellt. Messinstrumente weisen in aller Regel Ungenauigkeiten auf und es obliegt der Verantwortung des Geodäten, mögliche Abweichungen festzustellen. Die Untersuchung und Kalibrierung des verwendeten Klinometers unter geodätischen Aspekten wird in Kapitel 4 erläutert.

Zu den vorbereitenden Tätigkeiten gehörten auch Testmessungen mit den zur Verfügung gestellten Messgeräten, die Zusammenstellung der notwendigen Unterlagen und des umfangreichen Zubehörs sowie die komplette Frachtabwicklung, die durch die Logistik des AWI unterstützt wurde.

Für Expeditionen in entlegene Gebiete jenseits der Zivilisation darf nichts dem Zufall überlassen werden und nach Möglichkeit sollte sämtliches Material zweifach angefertigt und mitgeführt werden.

4.2 Vorbereitende Planung des Messablaufs

Das zu untersuchende Punktfeld besteht aus $6 \times 8 = 48$ Punkten und erstreckt sich über eine Fläche von 35 km² mit 7 km Nord-Süd-Ausdehnung und 5 km Ost-West-Ausdehnung. Bereits im Vorfeld der Expedition wurden verschiedene Messkonfigurationen unter Berücksichtigung des zur Verfügung stehenden Equipments diskutiert. In Zusammenarbeit mit Dr. Hans-Werner Schenke, Daniel Schulte und Maik Weidt (alle aus der Arbeitsgruppe Bathymetrie und Geodäsie des AWI) ist dabei folgendes Messkonzept entstanden. Das Feld wird in vier Viertel gemäß Abb. 2.1 eingeteilt

Das Punktfeld mit soll zeitnah an vier Tagen komplett beobachtet werden, jeden Tag ein Viertel mit 12 Punkten und einer Beobachtungszeit von jeweils mindestens zwei Stunden. Zur Verdeutlichung des Verfahrens wird - exemplarisch für das erste Viertel - auf Abb. 4.2 verwiesen. Nach dem Aufbau und dem Start der ersten GPS-Anlage an der *base* sollen alle übrigen sechs GPS-Anlagen der Reihe nach in zwei Dreierreihen nacheinander installiert werden (Punkte 4 bis 9). Aufgrund von Erfahrungswerten hinsichtlich der Fahrgeschwindigkeit mit dem Schlittenzug im Messgebiet und eigener zeitlicher Einschätzungen zum Aufbau der GPS-Anlagen. Dies bedeute, dass der sechste Mobilempfänger gestartet wird, wenn der erste bereits eine Stunde lang Daten registriert. Simultan werden auf den Punkten 4 bis 6 und den Punkten 7 bis 9 eine weitere Stunde Messungen durchgeführt. Dann sind nach dem Messkonzept die drei Anlagen aus der ersten Reihe nacheinander abzubauen und in der dritten Reihe zu installieren. Es erfolgt eine Stunde simultaner Beobachtungen auf den Punkten 7 bis 9 und den Punkten 16 bis 18 und usw. Jeder Punkt wird also für sich mindestens zwei Stunden lang beobachtet, wobei simultan mit benachbarten Punkten mindestens eine Stunde lang Daten registriert werden. Der Mittelpunkt des gesamten Punktfeldes *base* wird den ganzen Tag über beobachtet.

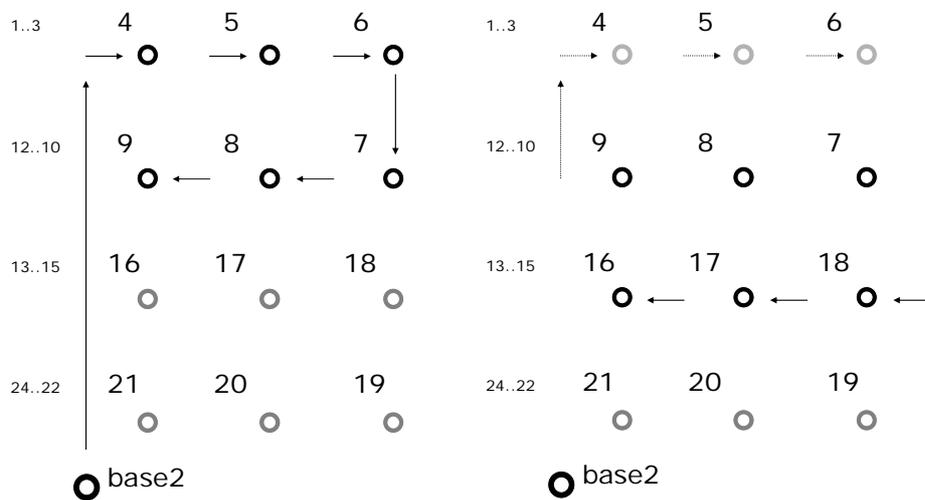


Abb. 4.2: Exemplarischer Messablauf für das Viertel I

Nach diesem Schema erfolgte die Beobachtung eines Viertels des Messfeldes pro Tag. Inklusive der 15 km langen Anfahrt, welche aufgrund eines luftchemischen wissenschaftlichen Observatoriums nicht direkt erfolgen kann, ergibt sich ein Außendiensttag von 10 bis 12 Stunden. Um das gesamte Messfeld möglichst zeitnah beobachten zu können, hat eine Abstimmung mit der Meteorologie der Neumayer Station und dem dort arbeitenden Wetterdienst zu erfolgen, so dass möglichst nur dann mit einer Messkampagne begonnen wird, wenn für mindesten vier Tage messtechnisch gutes Wetter in Aussicht ist (möglichst schwach windig, keine Drift).

Sowohl die Vorüberlegungen zur Messkonfiguration als auch die Schätzung des Zeitbedarfs haben sich in der praktischen Durchführung als sinnvoll und richtig erwiesen.

4.3 Praktische Durchführung der Messkampagne

Während der Sommerkampagne ANT-Land 04/05 erfolgte die praktische Umsetzung des Messkonzeptes durch den Autor. Für die Durchführung der Wiederholungsmessungen war wie auch schon in der vorangegangenen Saison nur ein Geodät vorgesehen. Dadurch ergab sich eine höhere Anforderung bezüglich der Sicherheit. Nach einer allgemeinen Einweisung auf der Neumayer-Station wurden mit Unterstützung des Wissenschaftlerteams der Geophysik der Anfahrtsweg und das Punktfeld erkundet. Zur Überbrückung plötzlich auftretender Schlechtwetterphasen oder auch zum Aufwärmen während der Beobachtungszeit wurde nahe des Mittelpunktes des Messfeldes ein Scott-Zelt errichtet.

An den Messtagen war mindestens zweimal täglich zu festgesetzten Uhrzeiten über Funk eine Lagemeldung und der aktuelle Standort durchzugeben. Die Vermessung erfolgte mit nachstehend aufgeführter Messausrüstung:

- 1 Skidoo (Motorschlitten) mit GPS-Navigation
- 3 Nansenschlitten zum Transport der wissenschaftlichen Ausrüstung, der Batterien und einer Survival-Box (für den Notfall)
- 3 12-V-LKW-Batterien in Styroporboxen
- 4 12-V-PistenBully-Batterien (da nicht genügend LKW-Batterien zur Verfügung standen) in einer passgenauen selbstgefertigten Halterung zum sicheren Transport in dem unwegsamen Gelände
- 7 GPS-Anlagen:
 - Trimble 4000 SSi/SSe-Empfänger
 - L1/12 microcentered-Antennen (mit groundplate)

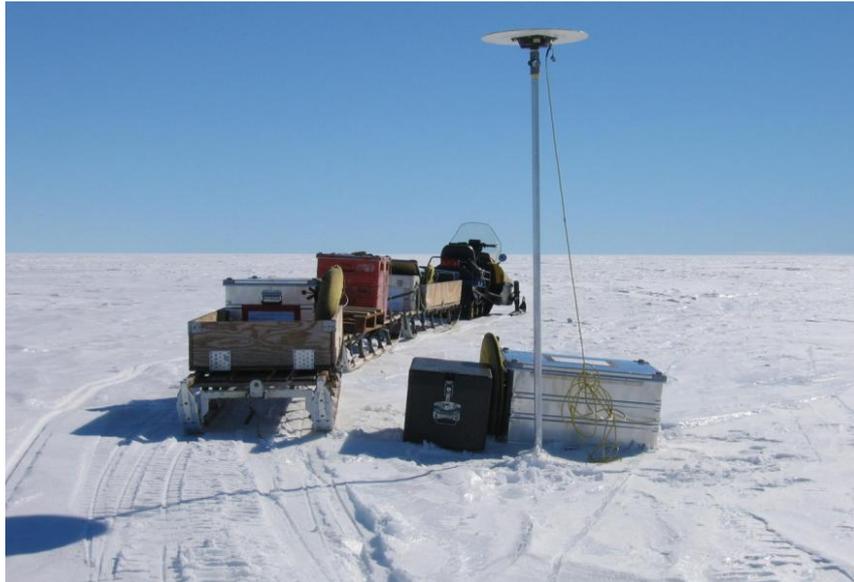


Bild 4.1: Schlittengespann an einem Netzpunkt

- 7 m –Antennenkabel
- 7 m –Batteriekabel
- 1 Kompass zur Ausrichtung der Antennen
- 1 Klinometer zur Neigungsbestimmung der Balisen
- 1 Spaten (zum evtl. Freischaufeln des Messzuges)
- 1 Funkgerät mit Ersatzakku

Die ausgezeichnete meteorologische Beratung der Neumayer-Station und einige mehrtägige Schönwetterperioden trugen wesentlich dazu bei, dass drei Messkampagnen mit je zwei Wochen Abstand erfolgreich durchgeführt werden konnten. Das über zwölf Meter lange Schlittengespann (Bild 4.1) war in dem schwierigen Gelände mit bis zu 80 cm hohen Sastrugi (Schneeverwehungen) nicht einfach zu manövrieren. Es erforderte eine hohe Konzentration, um die Belastungen für Mensch und Material auf den täglichen Streckenlängen von 60 – 100 km gering zu halten. Nach besonderer Abstimmung mit der Logistik und dem Funker wurde Viertel III und Viertel IV in der zweiten und dritten Messkampagne an nur einem Tag beobachtet.

Die Taktrate der Datenaufzeichnung lag in der ersten und am Anfang der zweiten Messkampagne bei 15 Sekunden, sie wurde dann jedoch auf 5 Sekunden erhöht. Wie bereits erwähnt, kamen ausschließlich Antennen des gleichen Typs (L1/L2 microcentered with groundplate) zum Einsatz und zudem wurde darauf geachtet, dass sie alle nach Norden hin ausgerichtet waren.

Zu erwähnen ist hier, dass sich die Balisen bei Sonneneinstrahlung geringfügig erwärmen. Dies hat zwar keine relevante Auswirkung auf die Balisenlänge und somit auch nicht auf die Antennenhöhen beziehungsweise auf eine einseitige Verformung,

doch sehr wohl auf den Bereich, in dem die Aluminiumrohre im Schnee beziehungsweise im Eis stecken. Denn dort schmilzt ein wenig das sie umgebende Eis und lässt damit ein geringfügiges Wackeln der Balisen zu. Das bedeutete, dass auch die aufgesetzten Antennen, die in dieser Wiederholungsmessung alle eine große Grundplatte hatten, vor allem bei Wind etwas schwankten.

4.3.1 Klinometermessung

Um die Bewegung und Deformation des Punktfeldes nach einem Jahr genau analysieren zu können, ist ein gemeinsamer Bezugspunkt in beiden Epochen für alle Netzpunkte von entscheidender Bedeutung. Da die Schneeoberfläche und damit die Höhe über Grund (=Antennenhöhe) durch die jährliche Akkumulation (ca. 70 cm) und lokale Veränderungen innerhalb des Punktfeldes durch starken Wind und Drift variiert, wurden als identische Punkte für beide Messepochen jeweils die gemessenen Antennenhöhen der Nullmessung herangezogen.

Am Ende der Messkampagnen erfolgte die Bestimmung der Neigungswerte der Balisen gegenüber der Vertikalen mit dem Klinometer (Bild 4.2) mit jeweils einer Ablesung in östlicher und südlicher Richtung. Hierbei dürfte das oben beschriebene Wackeln der Balisen zu einer geringfügigen Verfälschung der Messergebnisse geführt haben. Ähnliche Auswirkungen sind durch das Gewicht des massiven Klinometers zu erwarten, da es nur einseitig angeklemt war und damit die Bestimmung der Neigungswerte verfälscht. Eine ausführlichere Beschreibung mit Abbildungen ist in Kapitel 4 zu finden.



Bild 4.2: Klinometer an einer Balise

4.3.2 Datencheck

Eine erste Sichtung der Daten erfolgte jeweils nach den drei- bis viertägigen Messkampagnen in der Neumayer-Station. Dafür mussten mittels serieller Schnittstelle die GPS-Empfänger einzeln beim Funker ausgelesen werden, da das dienstliche Notebook versagte. Dieser Vorgang nahm erhebliche Zeit in Anspruch.

Mit der frei verfügbaren Software TEQC (Translate/Edit/Quality Check) des University NAVSTAR Consortium (UNAVCO) – einer gemeinnützigen Vereinigung zur Förderung der Erdsystemforschung – wurde das herstellereigene Rohdatenformat in das empfängerunabhängige, international akzeptierte ASCII-Austauschformat RINEX (Receiver Independent Exchange Format) konvertiert und die Beobachtungsdaten wurden analysiert. Die Quality Check-Option lässt einfach und schnell eine erste Beurteilung der Datenqualität zu. Diese war durchweg sehr zufriedenstellend. Die Sicherung sämtlicher Daten erfolgte auf einer externen Festplatte, auf CD und auf einem privaten Notebook.

5 Kalibrierung des Klinometers

Voraussetzung für die Analyse von Deformationen in einem Überwachungsnetz ist ein Bezug auf identische Punkte in allen Messepochen. Als gemeinsamer Bezugspunkt der Nullmessung und der Wiederholungsmessung im vermarkten Punktfeld der Neumayer-III-Station wurden die Antennenhöhen der Nullmessung als Referenz herangezogen. Die Referenzpunkte liegen zwischen dem Fußpunkt der Balisen und dem Balisenkopf. Bei den Wiederholungsmessungen wurde für die Befestigung der GPS-Antennen auf dem Balisenkopf ein Offset von einem Zentimeter bei einem Großteil der Punkte bereits berücksichtigt.

Die Balisen selbst werden zwischen ihrem Fußpunkt und dem Balisenkopf als geradlinig angenommen. Die Referenzpunkte der Nullmessung liegen im Bereich der Schneeoberfläche (Antennenhöhe), während sie bei der zweiten Messepoche aufgrund der jährlichen Akkumulation größtenteils darunter liegen.

Die in das Eis eingebrachten Balisen sind durch oberflächennahe unterschiedliche Bewegungen der Eisschichten, An- und Abschmelzvorgänge und starke Winde einer Verschwenkung gegenüber der Vertikalen ausgesetzt.

Hat eine solche Verschwenkung des Balisenkopfes zwischen der Nullmessung und der Wiederholungsmessung in Bezug auf die Lage des Referenzpunktes stattgefunden, so muss diese ermittelt und rechnerisch bei der endgültigen Koordinatenbestimmung angebracht werden. Die hierfür notwendigen Messungen wurden wie in Kapitel 3 beschrieben mit einem Klinometer durchgeführt. Es erfolgte jeweils eine Bestimmung der Neigungswerte in östlicher und in südlicher Richtung. Diese Messungen erfolgten für das gesamte Punktfeld nur einmal zum Ende der Messkampagne.

Während der Nullmessung in der Saison 03/04 wurden mehrfache Klinometermessungen des Punktfeldes durchgeführt. Eine Auswertung dieser Daten ergab keine signifikanten Änderungen während der Messepoche (Weidt, 2005), so dass bei der Wiederholungsmessung in der Saison 04/05 nur eine einfache Bestimmung der Neigungswerte durchgeführt wurde.

Im Vorfeld der Expedition konnten keine Testmessungen mit dem Klinometer durchgeführt werden. Des Weiteren konnte das Institut für Photogrammetrie und Geodäsie aus Braunschweig, welches das Messinstrument zur Verfügung gestellt hatte, auch keine Aussage bezüglich der Genauigkeit oder eventuell anzubringender Maßstabs- oder Nullpunktkorrekturen machen. Die für die rechnerische Berücksichtigung der Neigungen benötigten Kalibrierwerte des Messinstruments sollen im Folgenden bestimmt werden.

Das verwendete Klinometer hat folgenden Aufbau (Abb. 5.1, links):

Ein stabiler rechteckiger Eisenrahmen dient als Grundkörper. Entlang einer der längeren Seiten des Gerätes sind zwei Anschläge geschaffen worden. Mittels einer kleinen Schraube an einem nach außen ragenden Steg kann das Klinometer direkt an eine Balise angeklemt werden. Ein einzelner in das Rahmeninnere ragender Steg trägt einen beweglich angebrachten und durch eine Rückstellfeder auf Zug gehaltenen Messarm in T-Form, auf dessen Kopfende eine Röhrenlibelle angebracht ist. Mit Hilfe einer seitlich am Rahmen befindlichen Mikrometerschraube, deren Spitze auf den unteren Teil des Messarms trifft sowie durch Beobachtung der Libelle wird dieser Messarm in die Lotrechte gebracht. Nun kann die Abweichung der Balise aus der Lotrechten heraus auf einer Skala in Mikrometereinheiten (im Folgenden mit Klinometereinheit [KE] bezeichnet) abgelesen werden.

Die Mikrometerschraube hat einen Messbereich von 0-40 KE, so dass bei lotrechten Balisen die (Nullpunkts-) Ablesung bei ca. 20 KE liegt. Eine Umdrehung bewirkt eine Längenänderung der Schraube von einem Millimeter, dies entspricht einer Klinometereinheit von 0,320 gon.

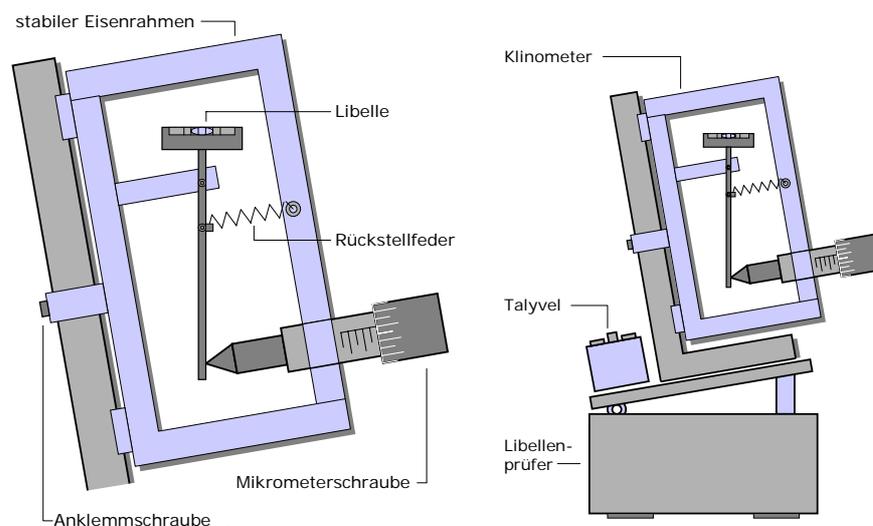


Abb. 5.1: Klinometer an Balise (links) und Versuchsaufbau zur Kalibrierung (rechts)

5.1 Bestimmung von Maßstab und Nullpunkt des Klinometers

Die Kalibrierung des Klinometers wurde im Messkeller des geodätischen Instituts der Universität Hannover durchgeführt. Der Versuchaufbau ist aus Abb. 5.1 (rechts) ersichtlich. Zur Verfügung standen:

- Ein Libellenprüfer
- Eine Hilfsapparatur zur Befestigung des Klinometers auf dem Libellenprüfer
- Eine Talyvel-Libelle zur Erweiterung des Arbeitsbereichs
- Ein Zeiss-Dreifuß mit optischem Lot (für die Nullpunktsbestimmung)

Mit dem Libellenprüfer und der Hilfsapparatur, die auf dessen Schlitten befestigt war und das Klinometer trug, konnten verschiedene Sollneigungen eingestellt und die entsprechenden Klinometereinheiten an der Mikrometerschraube nach Einspielen der Libelle abgelesen werden. Da der vorhandene Libellenprüfer nur einen Arbeitsbereich von 300'' zur Verfügung hatte, jedoch ein weitaus größerer Bereich zur Bestimmung der Neigungswerte erforderlich war, musste dieser erweitert werden. Dafür wurde hinter der Hilfsapparatur auf dem Libellenprüferschlitten eine elektronische Talyvel-Libelle aufgesetzt, mit der die Verstellung des Schlittens kontrolliert und erweitert werden konnte. Da beide Libellenachsen nicht streng parallel zueinander, sondern vielmehr windschief gegeneinander verkippt waren, wurden zusätzlich die Talyvel-Neigungen notiert (siehe Anhang: DVD). Es erfolgte:

1. Anhebung des Libellenprüferschlittens mit dem Feintrieb von der untersten Position um 300''; dabei alle 50'' eine Ablesung der elektronischen Talyvel-Libelle und alle 100'' ein Klinometerwert.
2. Absenkung des Libellenprüferschlittens um 300'' mit dem Feintrieb und Verstellung der Talyvel auf null.
3. Anhebung des Schlittens um 100'' bis 3' mittels der Schlittenverstellungsschraube des Libellenprüfers (über die Anzeige der Talyvel).

Dieser Ablauf wurde 20-mal durchgeführt. Um den wahren Verstellwinkel des Libellenprüferschlittens über die Schlittenverstellungsschraube zu ermitteln – der aufgrund der oben genannten windschiefen Libellenachsen nicht gleich der Ablesung der Talyvel-Libelle entsprach – musste für jeden einzelnen der 20 Verstellbereiche mit Hilfe einer Regression der Maßstab zwischen dem Libellenprüfer und der Talyvel

ermittelt und damit der Verstellwinkel der Talyvel verbessert werden. Für diese Anwendung wurde davon ausgegangen, dass ein linearer Zusammenhang zwischen den beiden Einflussgrößen besteht. Damit kann der geschätzte Parametervektor $\hat{\underline{b}}$ der linearen Regression wie folgt angegeben werden (Niemeier, 2001)

$$\hat{\underline{b}} = (\underline{X}^T \underline{X})^{-1} \underline{X}^T \underline{y}. \quad (5.1)$$

Mit der Designmatrix \underline{X} zur Modellierung des funktionalen Zusammenhangs zwischen

den Beobachtungen und den Unbekannten:

$$\underline{X} = \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 1 & l_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & l_n \end{bmatrix}$$

und den Beobachtungen (abgelesene Werte der Talyvel-Libelle):

$$\underline{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}$$

sowie und den Parametern $\underline{b} = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \end{bmatrix}$.

Mit der Berechnung der Güte des Modells, wurden für alle 20 Teilregressionen die Bestimmtheitsmaße \hat{B} (Niemeier, 2002) berechnet:

$$B = \frac{\underline{b}^T \underline{n}}{\underline{y}^T \underline{y}} \quad (5.2)$$

Die Auswertung zeigte, dass aufgrund der Bestimmtheitsmaße von jeweils mindestens 0.999... auf weitere Tests bezüglich der Güte der Regression verzichtet werden konnte.

Nun erfolgte die eigentliche Berechnung des Maßstabs des Klinometers. Dafür wurde zunächst die Anzahl der Libellenprüferwerte auf die Anzahl der Klinometerwerte reduziert und nun auch wieder mit Hilfe einer Regression nach obigen Formeln der Maßstab des Klinometers berechnet. Dieser liegt bei einem Wert von 0.0001. Auch hier wurde die Güte der Regression anhand des oben genannten Bestimmtheitsmaßes geprüft und anhand eines Wertes von 0.9999 für zutreffend befunden.

Des Weiteren hatte eine Bestimmung des Nullpunktes zu erfolgen. Dafür wurde auf einen der Messpfeiler ein Zeiss-Dreifuß mit eingesetzter lotrechter Stange (als

Balisenersatz) aufgeschraubt und über eine Spielpunktbestimmung streng lotrecht gestellt. Das angeklebte Klinometer wurde nun in zwei Lagen und in zwei zueinander senkrecht stehenden Richtungen jeweils 10-mal abgelesen. Durch arithmetische Mittelbildungen ergab sich ein Nullpunkt von 19,756 KE. Sämtliche Messdaten sind im Anhang (DVD) zusammengestellt.

Die berechneten Maßstäbe und Neigungen wurden nun an allen Antennenhöhen angebracht. Mit Hilfe des Maßstabes wurden zunächst die im Felde ermittelten KE verbessert. Die Berechnung der neuen Antennenhöhen erfolgte über bekannte Winkelfunktionen.

5.2 Untersuchung: Müssen die ermittelten Neigungswerte angebracht werden?

Dieser Abschnitt befasst sich mit der Untersuchung, ob die ermittelten Neigungen überhaupt einen relevanten Einfluss auf die Koordinatenbestimmung des Referenzpunktes haben oder ob sie im Rahmen der Genauigkeiten der Punktlage vernachlässigbar sind. Die Balisenneigungen haben Auswirkungen auf die horizontale Lage und die Höhe des Balisenkopfes gegenüber dem Referenzpunkt.

Die Auswirkung der Balisenneigung auf die Höhe lag im Sub-mm-Bereich und konnte bei der Auswertung unberücksichtigt bleiben. Die horizontalen Differenzen zwischen dem Balisenkopf und dem Balisenreferenzpunkt betragen jedoch in den Nullmessungen zwischen 0.7 cm und 2.5 cm und in der Saison 04/05 sogar 4.9 cm bis 5.9 cm. Deshalb sind die horizontalen Abweichungen beider Kampagnen unbedingt zu berücksichtigen.

Aus den Klinometerablesungen in Nord-Süd und Ost-West wurden die resultierenden Neigungsrichtungen ermittelt. In Abb. 5.2 sind die Lagedifferenzen zwischen Bezugs- und Beobachtungspunkt für beide Epochen dargestellt.

Die grafische Darstellung zeigt, dass bei über 90 Prozent der in der Saison 03/04 vermarkten Punkte die Balisen im Rahmen der zu erwartenden Genauigkeit lotrecht standen. Im Verlauf eines Jahres konnten hingegen in der Wiederholungsmessung 04/05 sehr wohl starke Abweichungen festgestellt werden. Diese sind in dem süd-westlichen Bereich des Punktfeldes wesentlich stärker ausgeprägt und scheinen die in diesem Bereich erwartete Stauchung allein durch die Neigungsrichtung der Balisen anzudeuten. Doch es können keine großräumigen Effekte aus diesem einjährigen Abstand festgestellt werden. Vielmehr ist davon auszugehen, dass die oberflächennahen Einflüsse auf die widrigen Witterungsbedingungen zurückzuführen sind.

Durch häufige und starke Stürme türmen sich immer wieder neue Sastrugi auf, die lokal zu zahlreichen Variationen führen. Auch Schmelzvorgänge – vor allem während des antarktischen Sommers – im Übergang der Balisen ins Eis beziehungsweise in den Schnee können ein Grund für die unterschiedlichen Neigungsrichtungen oder auch die scheinbare Systematik im Südwesten sein (vgl. Abb. 5.2). Ebenso dürfte die Sorgfalt bei der Vermarkung eine Rolle spielen.

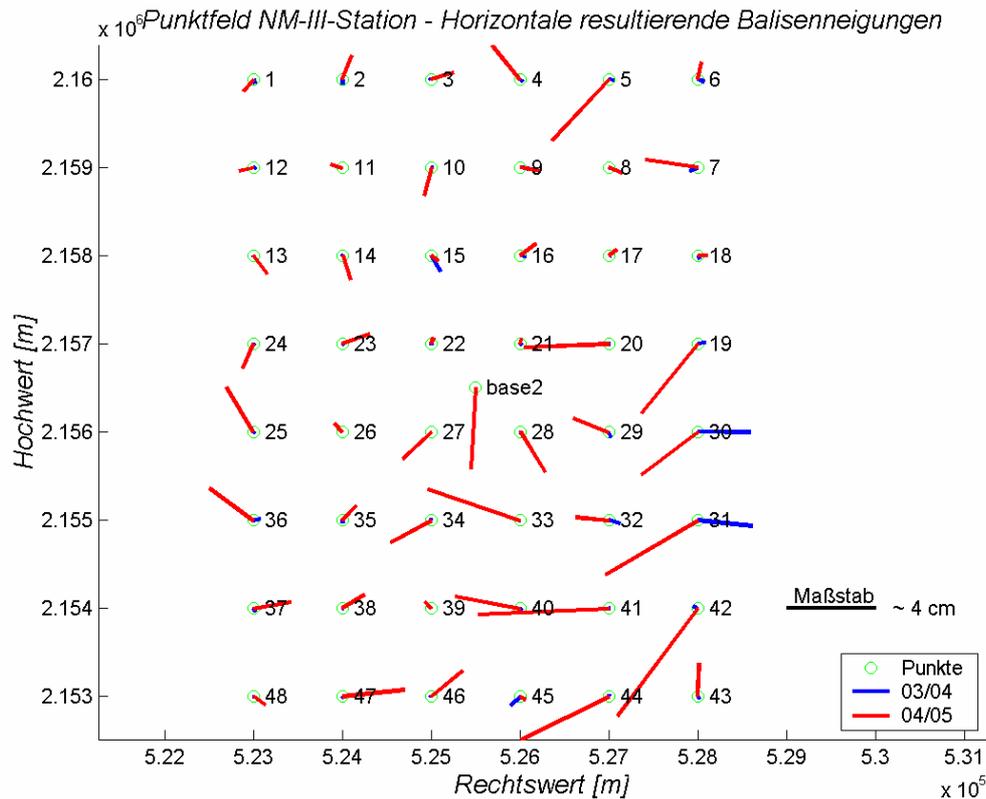


Abb. 5.2: Grafische Darstellung der horizontalen Balisenneigungen

6 Auswertung der GPS-Beobachtungen

Die GPS-Auswertung geodätisch-glaziologischer Feldarbeiten in der Antarktis stellt nach wie vor hohe Anforderungen an das Expertenwissen und an die eingesetzte Auswertesoftware. Es kann nicht oder nur sehr eingeschränkt auf automatisierte Auswertelgorithmen zurückgegriffen werden. Vor allem der übergroße Abstand der IGS-Referenzstationen erschwert die Koordinatenbestimmung erheblich. Um eine hochpräzise Positionsbestimmung zu gewährleisten, muss das Fließverhalten des Schelfeises und der Gezeiteneinfluss besonders berücksichtigt werden.

Die besonderen Einflüsse werden in diesem Kapitel vertieft betrachtet und deren Auswirkungen analysiert sowie Möglichkeiten zu deren Behebung aufgezeigt. Natürlich existieren über die genannten Faktoren hinaus weitere Fehlereinflüsse, wie sie auch in weniger exponierten Gebieten als der Antarktis zu finden sind und auf die daher bei den folgenden Betrachtungen nicht eingegangen werden soll. Stattdessen sei hier auf die einschlägige Literatur verwiesen (Seeber, 2003). Grundlegende Kenntnisse über das Funktionsprinzip des GPS werden in diesem Kapitel vorausgesetzt.

Neben einer allgemeinen Einführung in die verwendete Auswertesoftware sollen die verschiedenen Schritte für den kompletten Vorgang der umfangreichen GPS-Auswertung sowie der dafür nötigen vorherigen Datenaufbereitung aufgezeigt werden. Im Rahmen einer Erläuterung des Programmpakets GEONAP werden auftretende Schwierigkeiten in der Datenprozessierung aufgegriffen und spezielle Aspekte des GPS-Fehlerbudgets diskutiert. Eine Auflistung aller verwendeten Parameter der verschiedenen Module ist dem Anhang zu entnehmen. Eine detaillierte Programmbeschreibung ist nicht das Ziel dieser Arbeit, für weitergehende Informationen wird daher auf das GEONAP-Tutorial verwiesen.

6.1 Wissenschaftliche GPS-Auswertesoftware

Zur zuverlässigen und auf den jeweiligen Einsatz bestmöglich abgestimmten Auswertung von GPS-Beobachtungen sind verschiedene wissenschaftliche Softwarepakete entwickelt worden. Alle zeichnen sich durch die Möglichkeit aus, dass nahezu sämtliche je auftretende Effekte über eine Kombination verschiedener Operatoren kompensiert werden.

Im Folgenden sollen nun die bekanntesten Programme genannt und teilweise beschrieben werden, verbunden mit entsprechenden Hinweisen auf weiterführende Literatur. So wurden zum Beispiel zur Einbindung von Antarktika in das ITRF und zur Abschätzung der Kinematik der Antarktischen Platte unter der Schirmherrschaft des Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR) von 1995 bis 1998 GPS-Kampagnen durchgeführt. Die Beobachtungen wurden mit den vier wissenschaftlichen Software-Paketen Bernese GPS Software, GIPSY/OASIS II, GAMIT/GLOBK und GEONAP ausgewertet (Dietrich, 2001).

Am AWI wird seit mehreren Jahren erfolgreich mit dem Softwarepaket GAMIT gearbeitet, das auch zur Auswertung der Nullmessung im Punktfeld der Neumayer-III-Station durch Herrn Weidt (Diplomand am AWI 2005) und Herrn Schulte (AWI) genutzt wurde. Informationen hierzu finden sich in Weidt (2005).

Mit der Berner Software wird nach dem Prinzip der Parameterelimination gearbeitet, wobei Doppeldifferenzen der Beobachtungen ausgewertet werden. Sie eignet sich sowohl für kleinräumige schnelle Auswertungen von Ein- und Zweifrequenzmessungen als auch zur Mehrdeutigkeitslösung von sehr langen Basislinien mit mehr als 2000 km. Des Weiteren wird die Bernese GPS Software zur Orbitbestimmung und zur Schätzung von Erdorientierungsparametern genutzt. Die Anwendung wird mit einer Uhrschätzung und Zeitübertragung sowie einem Monitoring von Ionosphäre und Troposphäre komplettiert (Bernese GPS Software, 2006).

Informationen zu den Paketen GAMIT/GLOBK und GIPSY/OASIS II sind Weidt (2005) zu entnehmen.

Die vorliegende Arbeit ist eine Kooperation des AWI mit dem Geodätischen Institut der Universität Hannover (GIH). Für die GPS-Auswertungen wurde das Software-Paket GEONAP der Geo++ GmbH aus Garbsen gewählt, das sich in zahlreichen wissenschaftlichen Fragestellungen gut bewährt hat.

Das Auswerteprogramm GEONAP zeichnet sich durch seine strenge Multistationsauswertung und Parameterschätzung aus. Die Anzahl der Referenz- und Mobilstationen sowie der Sessionen ist nur durch die Rechnerkapazität begrenzt. Das Programmsystem setzt sich aus einer Vielzahl verschiedener Module zusammen. Das Hauptmodul *geonap* basiert auf dem Prinzip der gemeinsamen Schätzung von Stationskoordinaten, Satellitenbahnparameter, Empfänger- und Uhrparameter, Atmosphärenparameter und Trägerphasen-Mehrdeutigkeiten. In diese auf einem Gauß-Markov-Modell basierende Parameterschätzung fließen undifferenzierte Beobachtungen ein, so dass etwaige Korrelationen zwischen den Beobachtungen mit berücksichtigt werden. Mit der optimierten mehrstufigen Mehrdeutigkeitsbestimmung können auch bei nur kurzen Beobachtungszeiten die Mehrdeutigkeiten gelöst werden. Weitere im GEONAP-Paket enthaltene Zusatzprogramme runden das Software-Paket ab. (GEONAP, Tutorial 2003)

Die Bearbeitung erfolgt kommandozeilenorientiert auf DOS-Ebene. Eine Umstellung auf eine benutzerfreundlichere grafische Oberfläche, die vor kurzem fertig gestellt wurde, schied wegen der bereits abgeschlossenen Einarbeitung in den Umgang mit Befehlszeilen aus.

Wenn die entsprechenden Module mit den diversen Steuerparametern kombiniert sind, können diese in Form eines batch-jobs im Hintergrund ablaufen. Durch die große Anzahl der zu schätzenden Parameter und die Unsumme an Mehrdeutigkeiten, die ihre Ursache in der sich auf dem Schelfeis bewegendem Mobilstation haben, beläuft sich jedoch ein Durchlauf in Abhängigkeit von der Rechenleistung auf mehrere Stunden bis hin zu drei Tagen.

Eine etwaige Fehlersuche gestaltet sich als äußerst schwierig, da der unerfahrene Benutzer keinerlei Hinweise bekommt, an welcher Stelle das Programm aus welchem Grunde abbricht.

Alle vier Programmpakete können präzise Ephemeriden sowie GPS- und GLONASS-Beobachtungen verarbeiten. Die Verwendung diverser Linearkombinationen von Zweifrequenzmessungen gehört ebenso zu ihren Merkmalen wie die Lösung der gängigsten Beobachtungsverfahren.

Die Einarbeitung in diese überaus komplexen Programme erfordert jahrelange Erfahrung und ist während der kurzen Zeit einer Diplomarbeit – in der neben der reinen Koordinatenberechnung meist noch weitere Analysen gefordert sind – nahezu unmöglich (siehe auch Weidt (2005)). Aus diesem Grunde basiert ein Großteil des in dieser Arbeit entwickelten batch-jobs zur GPS-Auswertung auf Hinweisen und Erfahrungen von Experten des IfE in Hannover, der Geo++ GmbH in Garbsen und des AWI in Bremerhaven (Dilßner, Schmitz, Schulte, 2005/2006).

6.2 Kommerzielle GPS-Auswertesoftware

Von der Firma S+H Systemtechnik wurde freundlicherweise die Software Trimble Total Control (TTC) von Trimble Navigation Limited zur Verfügung gestellt. Eine grafische windowsbasierte Oberfläche erleichtert den Umgang erheblich. Nahezu intuitiv findet sich auch der ungeübte Anwender zurecht. Durch die Verarbeitung diverser Rohdatenformate und den integrierten Datendownload aus dem Internet entfällt die sonst notwendige Konvertierung in herstellereigene Formate. Die schnellen Algorithmen ermöglichen auch für sehr große Netze und Datensätze eine Basislinienprozessierung innerhalb weniger Minuten. Zusätzlich werden Projektberichte erstellt. Mit Hilfe der grafischen und numerischen Analysefunktion der Satellitendaten können fehlerhafte Rohdaten einfach und schnell berichtigt werden. Des Weiteren umfasst das Programmpaket eine 1D-, 2D- und 3D-Netzausgleichung sowie ein Transformationsmodul (Trimble, 2001).

Zur Auswahl der verwendeten Antennen steht die TTC-Datenbank zur Verfügung. Diese ist leider nicht durch externe Daten zu ergänzen. Eine direkte Einbindung absolut kalibrierter Antennendateien ist deshalb nicht möglich. Da der Quellcode nur bedingt zugänglich ist wird eine manuelle Modifizierung enorm erschwert.

Die äußerst kurzen Bearbeitungszeiten und die umfangreiche Datenanalyse und Netzausgleichung verleiten dazu, dem Programm des namhaften Herstellers zu vertrauen. Eine nähere Betrachtung der erzielten Ergebnisse sollte den Geodäten jedoch dazu veranlassen, diese kritisch zu hinterfragen. Die im mm-Bereich liegende Genauigkeit einer mehreren tausend Kilometer langen und unter besonders extremen Einflüssen berechneten Basislinie ist unrealistisch. Gerade zur Beurteilung geodätisch-glaziologischer Forschungsvorhaben ist auf eine aussagekräftige und unter den gegebenen Umständen möglichst realistischen Genauigkeitsbetrachtung größter Wert zu legen.

Ein weiterer Nachteil liegt in der Tatsache, dass ein Export der Varianz-Kovarianz-Matrizen für weitere Analysen nicht möglich ist. Die Auswertesoftware TTC wurde deshalb im Verlauf dieser Arbeit lediglich zu Vergleichen herangezogen und soll vor diesem Hintergrund nicht Gegenstand näherer Betrachtungen sein.

6.3 Stationsnetz

Zur absoluten Positionierung des Punktfeldes der Neumayer-III-Station wird mindestens ein stabiler Referenzpunkt mit hochpräzise bestimmten Koordinaten benötigt, auf dem simultan Beobachtungen durchgeführt werden. Hierfür bieten sich die Stationen des IGS auf der Antarktischen Platte an. Permanent werden dort Daten registriert und über den IGS frei zur Verfügung gestellt (vgl. Kap. 3). Hierzu zählen neben den Stationskoordinaten auch die Geschwindigkeiten und Standardabweichungen der jeweiligen Punkte. In der vorliegenden Arbeit wurden die in Abb. 6.1 dargestellten IGS-Stationen zur absoluten Positionierung der Basisstation (*base*) im Punktfeld der Neumayer-III-Station verwendet. Dabei treten Stationsentfernungen von über 4000 km auf.

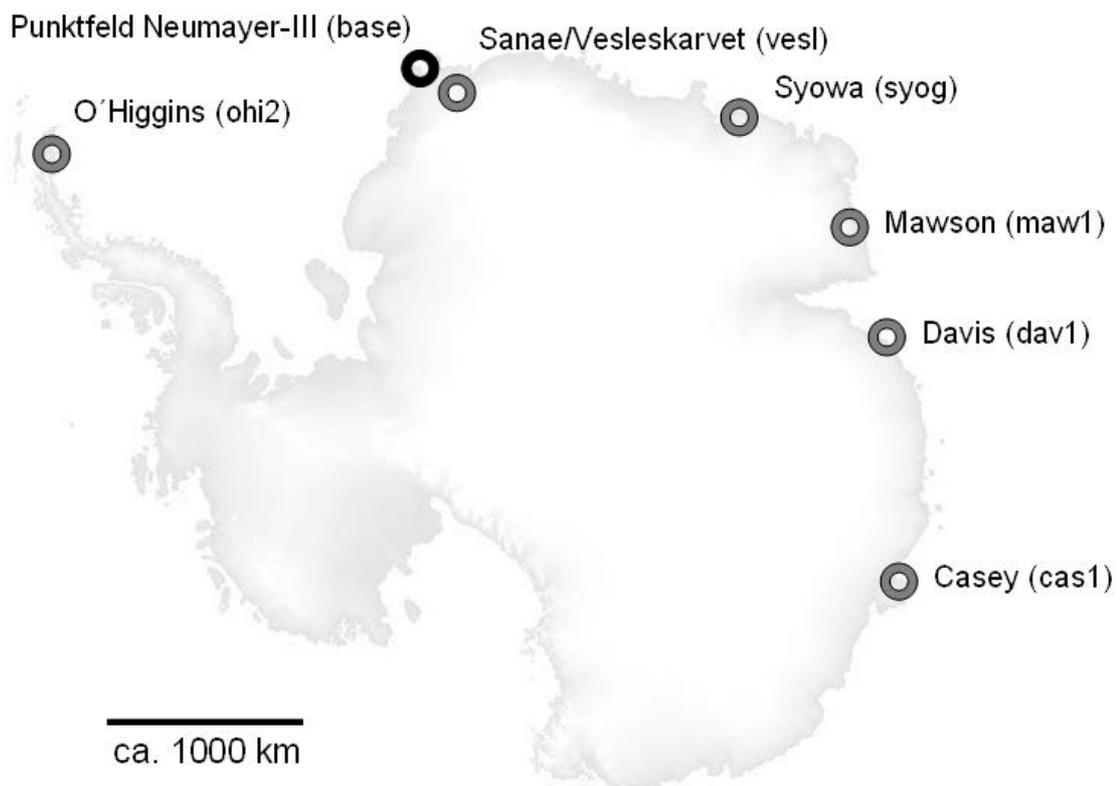


Abb. 6.1: IGS-Stationsnetz zur absoluten Positionierung des Punktfeldes der Neumayer-III-Station

6.4 Datenaufbereitung

Um die angesprochene hochpräzise Positionsbestimmung zu gewährleisten, müssen möglichst alle Einflussgrößen in die weitere Berechnung einfließen. Im vorliegenden Fall sind das:

- die Ephemeriden der GPS-Satelliten,
- die Koordinaten der verwendeten IGS-Stationen,
- Angaben zu Phasenzentrumsvariationen aller verwendeten Antennen.

Weitere Eingangsgrößen sind alle im Felde aufgezeichneten Beobachtungen sowie die täglichen Datensätze der verwendeten IGS-Stationen. Zusätzlich müssen von jedem Empfänger die Navigationsdateien berücksichtigt werden.

6.4.1 Präzise Ephemeriden

Voraussetzung für die hochgenaue Positionsbestimmung sind präzise Satellitenbahnen im cm-Bereich. Denn selbst nach der pessimistischen Faustformel (Seeber, 2003)

$$\frac{db}{b} = \frac{dr}{\rho} \quad (6.1)$$

mit einer Basislinienlänge von $b = 4000\text{km}$, einer maximalen Entfernung zu den GPS-Satelliten von $\rho = 25000\text{km}$ und einer Basisliniengenauigkeit von mindestens $db = 1\text{cm}$ sollte der Bahnfehler dr höchstens im Bereich von sechs Zentimetern liegen. Damit müssen für diese Anwendung die so genannten *Final Orbits* des IGS verwendet werden. Sie können über den folgenden Server heruntergeladen werden: <http://igs.cb.jpl.nasa.gov/index.html> (Stand Mai 2006): *Data&Products > IGS Products Table >* unter *,GPS Satellite Ephemerides/Satellite & Station Clocks'* und *,Final Orbits' > IGN*. Dieser Link führt auf den ftp-Server des IGN (*Institut géographique national*): <ftp://igs.ensg.ign.fr/>. Über: *pub > igs > products* wird ein Verzeichnis mit Ordnern sortiert nach GPS-Wochen geöffnet.

Die kontinuierliche Zeitskala der GPS-Systemzeit startete am 5. Januar 1980 um 00:00:00 UTC und ist als ein gewichtetes Mittel der Atomuhren aller Monitor-Stationen definiert. Es werden GPS-Wochen, -Tage und -Sekunden gezählt. Eine Woche ist 604800 GPS-Sekunden lang und startet jeweils um 00:00:00 UT von Samstag auf Sonntag (Seeber, 2003). Die GPS-Wochentage beginnen jeweils am Sonntag mit GPS-Tag 0 und enden am Samstag mit GPS-Tag 6. Zur Zeitumrechnung zwischen der GPS-Zeit und UT steht ein Zusatzprogramm im GEONAP-Paket zur Verfügung (*GTIMES*). Nach Auswahl des entsprechenden Wochenordners werden Produkte von verschiedenen Analysezentren aufgelistet. Die gewünschten präzisen Ephemeriden sind in einer Zip-

Datei mit dem Namen *igs'GPS-Woche''GPS-Tag'.sp3.Z* abgespeichert. Nach dem Entpacken lässt sie sich im Editor öffnen. In der obersten Zeile des *Headers* ist der Referenzrahmen mit den berechneten Bahndaten eingetragen: IGb00.

Um eine konsistente Lösung der endgültigen Koordinaten zu erreichen, ist es wichtig, dass alle verwendeten Produkte sich auf ein gemeinsames Datum beziehen. Da die sp3-Dateien im IGb00 berechnet wurden, müssen auch die Stationskoordinaten im gleichen Referenzrahmen vorliegen (siehe 6.4.2).

6.4.2 Referenzrahmen und IGS-Stationskoordinaten

Neben den zälestischen Referenzsystemen (siehe Seeber, 2003) gibt es ein erdgebundenes Referenzsystem: Das *International Terrestrial Reference System* (ITRS). Es ist geozentrisch, d.h. der Ursprung liegt im Massenmittelpunkt der Erde, Ozeane und Atmosphäre eingeschlossen. Die Längeneinheit ist die SI-Einheit Meter. Entsprechend dem System des BIH (*Bureau International de l'Heure*) zur Epoche 1984.0 ist es durch den IRP (*IERS Reference Pole*) und IRM (*IERS Reference Meridian*) orientiert. Die Summe aller Bewegungsvektoren der Stationskoordinaten ist Null, so dass keine globalen Rotationen des Referenzsystems vorliegen.

Das ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*) ist eine Realisierung des ITRS und umfasst zum einen durch VLBI-, SLR-, LLR-, GPS- und DORIS-Technik beobachtete Kernstationen. Zum anderen stellt es durch die Bereitstellung regionaler GPS-Netze sowie weiterer hilfreicher geodätischer Punkte eine wesentliche Erweiterung dar (Altamimi, 1999). Im ITRF werden kartesische Koordinaten und lineare Geschwindigkeiten ausgewählter Stationen durch den IERS (*International Earth Rotation Service*) zur Verfügung gestellt. Regelmäßig werden neue Realisierungen veröffentlicht (Montenbruck und Gill, 2001). Der aktuelle Rahmen mit Daten aus dem Jahre 2000 heißt ITRF2000 (oder auch ITRF00).

Da die Präzisen Ephemeriden natürlich auf Grundlage der GPS-Beobachtungen der IGS-Stationen berechnet und nun aber auf Koordinaten bezogen werden, die nicht nur mit GPS sondern auch mit Hilfe weiterer Raumtechniken bestimmt wurden, treten gewisse Spannungen auf. Aus diesem Grunde wurde eine neue unabhängige Lösung berechnet, die den Namen IGb00 trägt (Schmitz, 2006). Deshalb liegen die sp3-Dateien im IGb00 beim IGS vor (siehe auch 6.4.1).

Für die GPS-Auswertung werden die Koordinaten und Standardabweichungen der verwendeten IGS-Stationen benötigt, die ebenfalls auf der genannten Homepage des IGS zum Download bereitstehen (vgl. Kap. 6.4.1).

Leider sind dort nur Wochenlösungen verfügbar. Zudem wird im *Header* der *SINEX*-Dateien nicht der Referenzrahmen genannt. Die Angabe eines in Ottawa (Ontario/Canada) beheimateten Analysezentrams namens NRC (Natural Resources Canada) trägt zur weiteren Verwirrung bei und wirft die Frage auf, ob es sich bei dem vorliegenden Datensatz nun tatsächlich um die offizielle Lösung des IGS handelt. Eine Anfrage beim LAREG/IGN-ENSG in Frankreich ergibt, dass das IGB00 abgesehen von gewissen Differenzen äquivalent zum ITRF00 ist und es wird auf weitere Analysezentren (zum Beispiel SOPAC-Scripps Orbit and Permanent Array Center) verwiesen (Collilieux, 2006). Doch gesucht ist die offizielle Lösung der Koordinaten im IGB00 oder ITRF00 und nicht ein aufbereiteter Datensatz aus verschiedenen Analysezentren. Klarheit bringt erst eine Information vom Deutschen Geodätischen Forschungsinstitut (DGFI) aus München: IGS03P33_RS106.snx ist die offizielle IGS-Lösung, die äquivalent zum IGB00 ist. Hierbei handelt es sich um einen Subsatz der Lösung IGS03P33.snx (GPS-Woche 1231). Auch hier wird im *Header* wieder das NRC genannt. Eine Nachfrage ergibt, dass der Analyse-Koordinator vom IGS Remy Ferland vom NRC ist, der die offiziellen IGS-Lösungen liefert (Seemüller, 2006).

Es handelt sich also bei der Wochenlösung vom IGS doch um ein offizielles Produkt. Da jedoch die Tageslösungen mit den entsprechenden Genauigkeitsinformationen nötig sind, wird das zugesendete *SINEX*-file vom DGFI verwendet. Die Referenzepoche dieser Lösung IGS03P33_RS106.snx ist 1998.0. Mit Hilfe der angegebenen Geschwindigkeiten und den zugehörigen Standardabweichungen ist dieser Datensatz auf die entsprechenden Epochen der Null- und Wiederholungsmessung zu präzisieren. Über das Weg-Zeit-Gesetz

$$s = v \cdot t \quad (6.2)$$

können die Translationen (s) in X, Y und Z aus den jeweils angegebenen Geschwindigkeiten (v) und dem entsprechenden Epochenabstand (t) berechnet werden. Von 1998 bis 2004/ 2005 ist jeweils ein Schaltjahr zu berücksichtigen. Die neuen Stationskoordinaten $\underline{X}_{04/05}$ ergeben sich zu

$$\underline{X}_{04/05} = \underline{X}_{98} + v \cdot t \quad (6.3)$$

Zur Genauigkeitsabschätzung für die jeweiligen Tage in den beiden Epochen sind die Standardabweichungen der Stationskoordinaten mit dem Varianzfortpflanzungsgesetz zu berechnen (Niemeier, 2002). Dafür ist das Weg-Zeit-Gesetz nach den Beobachtungen zu differenzieren

$$\frac{\partial \underline{X}_{04/05}}{\partial \underline{X}_{98}} = 1 \quad (6.4)$$

$$\frac{\partial \underline{X}_{04/05}}{\partial v} = t \quad (6.5)$$

Damit kann die Designmatrix \underline{A} aufgestellt werden:

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} \underline{1} & \underline{t} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & \underline{1} & \underline{t} & 0 & 0 \\ & & & & \underline{1} & \underline{t} \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

Die Kovarianzmatrix der Referenzepeche berechnet sich aus den gegebenen Standardabweichungen für die Stationskoordinaten und Standardabweichungen der Bewegungsvektoren:

$$\underline{\Sigma}_{98} = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & 0 & \dots & 0 \\ & \sigma_{v_x}^2 & & \\ & & \sigma_y^2 & \\ & & & \sigma_{v_y}^2 & \\ & & & & \sigma_z^2 & 0 \\ & & & & & \sigma_{v_z}^2 \end{bmatrix}_{98} \quad (6.7)$$

Damit kann die Kovarianzmatrix der Epochen 04/05 mit dem Kovarianzfortpflanzungsgesetz berechnet werden:

$$\underline{\Sigma}_{04/05} = \underline{A} \cdot \underline{\Sigma}_{98} \cdot \underline{A}^T. \quad (6.8)$$

Die Ergebnisse der Prädiktion und die zugehörigen Standardabweichungen sind für den ersten Tag der Wiederholungsmessung 2005 in Tab. 6.1 aufgelistet. Die weiteren Ergebnisse sind dem Anhang (A) zu entnehmen. Die maximalen Abweichungen zwischen den jeweiligen Kampagnen liegen höchstens im Sub-mm-Bereich. Die hohen Standardabweichungen der Station O'Higgins (ohi2) in den Epochen 04/05 sind durch die hohen Standardabweichungen der Bezugsepeche 98 begründet.

Tab. 6.1: IGS-Stationskoordinaten für Tag 002 in 2005

STAT	X[m]	Y[m]	Z[m]	sx[m]	sy[m]	sz[m]
cas1	-901776.1587	2409383.3548	-5816748.4772	0.004	0.006	0.009
dav1	486854.5532	2285099.2681	-5914955.7210	0.004	0.006	0.011
maw1	1111287.1770	2168911.2532	-5874493.6163	0.010	0.014	0.028
ohi2	1525811.8703	-2432478.2168	-5676165.6107	0.043	0.053	0.099
syog	1766207.8748	1460290.3455	-5932297.7033	0.018	0.017	0.048
ves1	2009329.7905	-99741.4733	-6033158.4564	0.015	0.011	0.034

Dies ist auf die instabilere Lage dieser Station zurückzuführen, da sie sich im auslaufenden Bereich der Antarktischen Halbinsel befindet, der sowohl stärkeren tektonisch Bewegungen ausgesetzt ist als auch durch häufige starke Stürme heimgesucht wird, welche einen negativen Einfluss auf die Empfangsqualität der Antenne haben.

Auf diese IGS-Stationskoordinaten werden mit den entsprechenden Standardabweichungen später die Ergebnisse des GEONAP-Laufes transformiert, um die neu einzubindende Basisstation des Punktfeldes (*base*) zu verbessern.

6.4.3 Antennenkorrekturen

Ein weiterer entscheidender Einflussfaktor auf die hochpräzise Positionsbestimmung sind die Variationen der Antennenphasenzentren, da das bauliche Zentrum nicht nur von dem tatsächlichen elektronischen um einen konstanten Wert (Offset) abweicht, sondern zusätzlich in Abhängigkeit von der Höhenwinkelmaske und dem Azimut variiert. Diese Phasenzentrumsvariationen (PCV) hängen von Form und Durchmesser der Antennen, den Grundplatten, Domes und Choke Ringen ab. (Boettcher, 2003)

Die so genannte Choke Ring Antenne (auch Dorne-Margolin) wird als geodätisch hochwertig bezeichnet. Auf fast allen verwendeten IGS-Stationen in der Antarktis werden Choke Ring Antennen vom Typ AOAD/M_T (*Allen Osborne Association – Dorne Margolin*) eingesetzt.



Bild 6.1: IGS-Antennen-Domes, links: Sanae mit TCWD; rechts: Casey mit AOAD/M_T (IGS, 2006)

Einzige Ausnahme bildet die IGS-Station Sanae/Vesleskarvet. Dort kommt eine Trimble Choke Ring Antenne TCWD (*Trimble Choke Ring with Dome*) mit einem kegelförmigen Dome zum Einsatz. Domes schützen die Antennen vor Witterungseinflüssen. Die Allen Osborne Antennen besitzen einen halbkugelförmigen Plexiglasdome. Bild 6.1 zeigt die beiden Dome-Varianten.

Die Kalibrierung der Antennen erfolgt sowohl absolut (zum Beispiel über einen Roboter) als auch relativ (zu einer anderen Antenne). Da in dem vorliegenden Netz unterschiedliche Antennentypen zum Einsatz kommen und nicht alle streng gleich orientiert sind (Forderung zur Nutzung relativer PCV), werden absolute PCV verwendet. Diese können autorisierte Nutzer bei der Geo++ GmbH herunterladen.

Elevationsabhängig können Fehler in der Größenordnung von 1– 30 mm entstehen, während azimutale Fehler von 0.1– 20 mm zu erwarten sind. Die Domes haben noch einen zusätzlichen Einfluss, insbesondere der kegelförmige Trimble Dome muss aufgrund seiner starken Variationen unbedingt berücksichtigt werden. Der Dome der AOAD/M_T ist auf dem Geo++-Server nicht vorhanden, hat aber keine nennenswerten Einflüsse (Schmitz, 2006).

Neben den PCV der Empfänger-Antennen sind auch die Sende-Antennen der Satelliten einer Kalibrierung zu unterziehen. Das Anbringen dieser Korrekturen ist komplizierter als für die Bodenantennen. Alternativ werden sie in der weiteren Berechnung vorerst ignoriert, denn bei der Transformation der GEONAP-Lösung auf die IGS-Stations-Koordinaten wird dieser Fehler eliminiert. Es handelt sich nur um einen Maßstabsfehler.

6.4.4 RINEX- und Navigationsdateien

Die Broadcast-Ephemeriden der IGS-Stationen sind auch über den ftp-Server des IGS verfügbar (Homepage, siehe 6.4.1). Die Sortierung erfolgt über das jeweilige Jahr und den entsprechenden GPS-Tag. Die Beschreibung zur Aufbereitung der Beobachtungsdateien der Feldkampagnen ist in Kapitel 4 bereits erfolgt.

Für die Navigationsdateien kann anstatt einer Datei für jeden Empfänger auch eine Gesamtdatei für alle Stationen herunter geladen werden. Diese globale kombinierte Tageslösung ist unter der Abkürzung ‚*brdc*‘ zu finden (anstatt der *rxn*-Dateien).

6.5 Auswertansätze

Die hohen Bewegungsraten des Ekström-Schelfeises sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung legen einen kinematischen Auswertansatz nahe. Doch Untersuchungen ergaben, dass dafür die Basislinien zu den Referenzstationen 5-100 km Länge nicht überschreiten sollten. Weiter ist es schwierig die starken Variationen der Ionosphäre während der sehr kurzen Beobachtungsintervalle eines kinematischen Ansatzes zu kompensieren. Nur mit den statischen Ansätzen können die erforderlichen Genauigkeiten für die Analyse von Deformationen gewährleistet werden. Die extrem langen Basislinien von 250- 4000 km Länge und die eben genannten Effekte lassen eine statische Auswertung weitaus geeigneter erscheinen. Über die Zeit eines gewissen Beobachtungsintervalls kann die bewegte Station als statisch betrachtet werden. Eine Segmentierung in 2 h-Blöcke ist ein möglicher Ansatz (King, 2000).

Dieser wird in der vorliegenden Arbeit weiter untermauert. Die genaue Einteilung der einzelnen Sessionen erfolgt in Kapitel 6.7 (Tab. 6.2). Dafür ist an gegebener Stelle abzuschätzen, wie viel sich die Station horizontal und vertikal über ein bestimmtes Intervall hinweg bewegt.

Die Auswertung beruht auf dem Ordnungs- und Nachbarschaftsprinzip. Es wird „vom Großen ins Kleine“ vorgegangen, d. h. die Auswertung der Beobachtungen des Punktfeldes wird nach der Einpassung in das vorhandene IGS-Netz durchgeführt:

Zunächst erfolgt die Bestimmung der in der Mitte des Punktfeldes installierten Basisstation (*base*) über die sechs IGS-Stationen. Wenn diese hinreichend genau bestimmt ist und das Bewegungsverhalten in den verschiedenen Sessionen abgeschätzt werden kann, wird nur noch das örtliche Messfeld ausgewertet und der Punkt *base* dient als neue und einzige Referenz.

6.6 GEONAP-Auswertung

6.6.1 Einleitung

Nachdem nun sämtliche notwendige Daten aufbereitet wurden, kann GEONAP die ins unabhängige RINEX-Format umgewandelten Beobachtungsdateien und die brdc-Navigations-Dateien direkt weiterverarbeiten. Lediglich die im sp3-Format vorliegenden Präzisen Ephemeriden müssen noch in ein GEONAP-internes *mSP*-Format umgewandelt werden. Dies geschieht mit dem zum Programmpaket gehörenden Zusatzmodul *PE2MSP*.

Das in dieser Arbeit verwendete GEONAP-Programm wurde von der Geo++ GmbH für die Dauer der Diplomarbeit kostenlos zur Verfügung gestellt. Zur Nutzung des eigenen Rechners beziehungsweise Notebooks erfolgten die befristete Übergabe eines USB-Dongels und einer CD-ROM inklusive aller Unterprogramme und eines Tutorials. Um die einzelnen Module und Zusatzprogramme nutzen zu können, sind in der Systemsteuerung des Rechners zunächst die Umgebungsvariablen zu setzen. Des Weiteren ist eine Freischaltungsdatei einzubinden, die die Lizenz zur Verwendung des Dongels enthält.

6.6.2 Allgemeines

Die Verwendung der einzelnen Module gleicht einem „Iterieren von Hand“. Immer wieder sind einzelne Optionen zur Verbesserung zu setzen. Und die Aufeinanderfolge der einzelnen Module ist gut abzustimmen. Da nicht bei jedem neuen Lauf mehrere einflussreiche Parameter zugleich geändert und getestet werden sollten, investiert der ungeübte Anwender ein nicht zu unterschätzendes Zeitvolumen. Für jedes Modul gibt es durchschnittlich knapp 40 Optionen zuzüglich diverser Zusatz-Optionen, die zwar im Tutorial in chronologischer Reihenfolge ihrer Aktualität sortiert sind, für den Einsteiger dennoch eine hohe Anfangshürde darstellen. Bis zur vollständigen Optimierung des nun endgültig vorliegenden batch-jobs waren für die Auswertungen der Wiederholungsmessung über 30 Läufe mit einer durchschnittlichen Rechenzeit von jeweils etwa 10 Stunden notwendig.

Die Auswertungen der von Maik Weidt beobachteten Daten der Nullmessung wurden mit dem gleichen batch-job versucht zu lösen. Hier traten jedoch trotz des Einsatzes zweier 3-GHz-Rechner des CAD-Pools im Geodätischen Institut Hannover Prozessierungszeiten von bis zu 75 Stunden auf. Dies ist auf fehlerhafte Satellitensignale zurückzuführen, die im Rahmen dieser Arbeit aufgrund schwerwiegender Fehler in den Rohdaten nicht vollständig eliminiert werden konnten. Aus diesem Grund konnte das Punktfeld der Nullmessung nur von Punkt 13 bis Punkt 48 bestimmt werden. Dies hat natürlich auch einen Einfluss auf die weitere Analyse, da nur Koordinaten der Wiederholungsmessung in diesem Bereich vorliegen. Zur Bestimmung des Bewegungsfeldes aus beiden Messepochen und zur weiteren Deformationsanalyse werden die Punkte 13 bis 48 herangezogen.

Zum besseren Verständnis der folgenden Erläuterungen zu den einzelnen Modulen sei auf die GEONAP-Programmübersicht aus Abb. 6.2 verwiesen.

6.6.3 Anlegen einer Datenbank

Bevor mit der eigentlichen Auswertung begonnen werden kann, ist eine korrekte Datenbank anzulegen. Diese gliedert sich in einen globalen und einen lokalen Bereich. In dem globalen Bereich müssen die eingesetzten Empfänger (*gps.rcv*) und Antennen (*gps.ant*) definiert werden:

- Name des Empfängers/der Antenne
- Hersteller
- Anzahl der Kanäle und Frequenzen
- Verweis über eine Abkürzung auf die entsprechende Antenne/den Empfänger
- Phasenzentrumsoffsets: Werden in dieser Datenbank auf null gesetzt, da die PCV Dateien diese Informationen bereits enthalten und am Ende der jeweiligen Antennendefinitionen über einen Verweis aufgerufen werden

Der lokale Bereich enthält zunächst Ordner der entsprechenden Projekte. In diesem Falle einen für die Nullmessung (*NM04*, NM steht für Neumayer) und einen für die Wiederholungsmessung (*NM05*). Der Ordner der Nullmessung enthält Unterordner für die Beobachtungstage im Jahr 2004, die nach dem Julianischen Datum (day of year: doy) mit 026 und 027 bezeichnet werden.

Für die Wiederholungsmessung sind Ordner für die Tage 002, 003 und 004 des Jahres 2005 anzulegen.

Die Tagesordner enthalten (exemplarisch für doy 002 in 2005):

- *pcv* -Ordner mit den PCV
- *pe* -Ordner mit den Präzisen Ephemeriden (*mep*-Dateien)
- *rinex* -Ordner mit den RINEX- und *brdc*-Dateien
- *0021.bat*: Stapelverarbeitungsdatei für MS-DOS (den so genannten batch-job)
- *NM05.ant*: Eine projektbezogene Antennendatenbank, in der die Mobil- und Referenzstationsantennen definiert sind und Verweise auf die Empfänger und die PCV-Dateien enthalten sind
- *NM05.rcv*: Eine Empfängerdatenbank (receiver) analog zur Antennendatenbank
- *NM05.obs*: Eine Datenbank für die Beobachtungsparameter für jede Einzelmessung (Jahr, doy, Session, Punktnummer, Antennenhöhe, Verweise auf Empfänger und Antennen)
- *NM05.sta*: Enthält die Näherungskordinaten sämtlicher Stationen (hier wurden die Broadcast-Lösungen verwendet)
- *optsng*: Optionen für das Modul *GNSNGL*, um nicht alle Optionen immer wieder über die Kommando-Zeile eingeben zu müssen
- *staf* -Datei mit allen Stationsnamen; Aufgabe: Wie bei *optsng*.

Der gesamte Batch-job ist dem Anhang (B) zu entnehmen. Im Folgenden werden die einzelnen Module getrennt voneinander beschrieben. Zum Aufruf des batch-jobs (*bat*) müssen über die MS-DOS-Eingabeaufforderung für die Platzhalter im batch-job und zur Bezeichnung der verwendeten Station(en) folgende Angaben gemacht werden (hier exemplarisch für den 2. Januar 2005):

- *batch*-Name
- Projekt (*NM05*)
- doy (002), Session (1)
- verwendete Station(en) (*@staf*)
- Zeitfenster in GPS-Sekunden (Start mit *-b* und Ende mit *-f*)
- Name eines Ordners zur Abspeicherung aller Ergebnisdateien

Alle Ausgabedateien der einzelnen Module werden in einem gemeinsamen *lst*-file (*list*) abgespeichert. Dieses *lst*-file ist unter dem gleichen Namen zu finden wie der hierarchisch übergeordnete Ordner aller Ergebnisdateien.

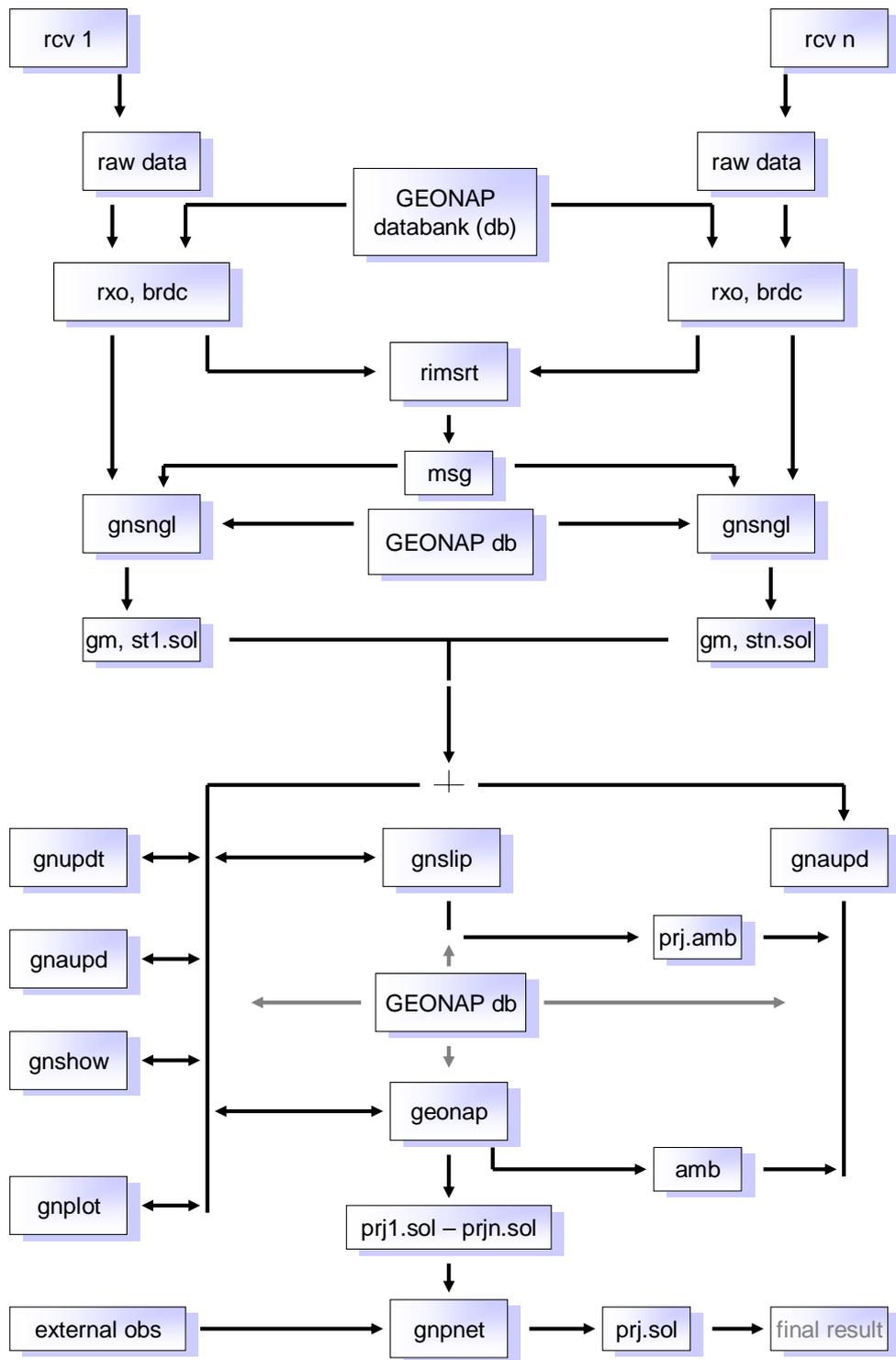


Abb. 6.2: Programmübersicht GEONAP

6.6.4 RMSRT: Vorverarbeitung der RINEX-Observations-Files

Mit dem Modul *RMSRT* werden die Ephemeriden-Daten aller Stationen für eine oder mehrere Sessions erfasst. Die rxo-files werden nach doppelten und vollständigen Daten durchsucht und nach einer Überprüfung in das GEONAP-Message-File (*msg*) chronologisch abgespeichert.

6.6.5 GNSNGL: Einzelstationslösung

Hier erfolgt die Konvertierung von RINEX-Observations-Files in GEONAP-Observations-Files (*gm*) und es wird eine erste Ergebnisdatei (solution – *sol*-file) jeder Station angelegt. Durch die Wahl der Elevationsmaske können einige Beobachtungen bereits aus der weiteren Prozessierung gestrichen werden. Der Erfahrungswert für die Elevationsmaske liegt bei 8° und wird deshalb auch hier eingesetzt (Projektseminar 2004). Damit fließen die durch den Einfluss der Troposphäre sehr stark verfälschten Signale im Bereich eines Elevationswinkels von 0° gar nicht erst mit in die weitere Auswertung ein. Trotzdem enthalten die Beobachtungen genügend Informationen um einem sonst durch eine sehr groß gewählte Elevation entstehenden schleifenden Schnitt vorzubeugen. Hierbei ist zu beachten, dass durch das Polarloch nur Satellitensignale bis zu einem Elevationswinkel von 75° empfangen werden können.

Weitere Optionen im Modul *GNSNGL*:

- Angaben zum Signal-Rausch-Verhältnis,
- Ausschließliche Verarbeitung von Beobachtungen wenn beide Trägerfrequenzen vorliegen
- Taktrate,
- Verwendung eines Slip-Blocks, der angibt, wie viel aufeinander folgende Epochen keinen Cycle-Slip aufweisen dürfen.

Des Weiteren werden ein erster Koordinatensatz, Mehrdeutigkeiten und Uhrfehler geschätzt sowie die Beobachtungen überprüft.

Für jede Epoche wird ein Uhrparameter geschätzt: Die hochpräzise Bestimmung der Zeit ist die fundamentale Einflussgröße jeder GPS-Messung. Im Wesentlichen handelt es sich bei GPS-Messungen um Zeitmessungen. In der grundlegenden Beobachtungsgleichung für Trägerphasenmessungen (Seeber, 2003)

$$\Phi_{B_i} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_B \mid - N_{B_i} \lambda + cdt_u \right) \quad (6.9)$$

ist neben der Phasenmehrdeutigkeit N_{B_i} der Uhrsynchronisationsfehler dt_u die entscheidende Einflussgröße. Letzterer entsteht aufgrund relativistischer Effekte, da sich die Empfängeruhr und die Satellitenuhr an Orten unterschiedlicher Gravitationspotentiale befinden.

Die weiteren Größen der Gleichung (6.9) lauten:

- \mathbf{X}_i Vektor vom Geozentrum zur Satellitenposition
- \mathbf{X}_B Vektor vom Geozentrum zur Empfangsantenne
- c Signalausbreitungsgeschwindigkeit
- λ Trägerwelle

Während die Satellitenuhren von sehr hoher Genauigkeit und Zuverlässigkeit sind, weisen die Empfängeruhren diese Eigenschaften nicht auf, da hier meist nur einfache Quarze zum Einsatz kommen.

6.6.6 GNUPDT: GEONAP-Update

Mit diesem Modul werden die *gm*-files aufdatiert: Die Phasenzentrumsvariationen aus der Kalibrierdatei (*ant*-file) werden eingelesen und es wird von den Broadcast-Ephemeriden zu Präzisen Ephemeriden gewechselt (*msp*-file). Zusätzlich können hier die Korrekturen von Erdgezeiten aus einem globalen Modell berücksichtigt werden, die aufgrund der riesigen Stationsabstände unverzichtbar sind.

Wie Eingangs erwähnt haben auch die Meeresgezeiten einen Einfluss auf die Punktkoordinaten im Messfeld. Ausgehend von der Groundingline bis hin zur Kante beschreibt das Schelfeis eine stark gedämpfte sinusförmige Kurve. Im Bereich des geplanten Baugebietes der Neumayer-III-Station ist diese jedoch bereits vollständig an den Gezeitenhub angeglichen, so dass die Meeresgezeiten ungedämpft auf das Ekström-Schelfeis wirken. Diese verursachen Bewegungen von bis zu 2 m in wenigen Stunden. (Kirchner, 2002)

Die Verwendung eines globalen Meeresgezeitenmodells wäre also sehr sinnvoll. Leider ist in dem Programmpaket GEONAP kein Modell verfügbar. Da jedoch die Bestimmung der *base* im IGS-Netz in kürzeren Sessionen erfolgt, kann der Einfluss gering gehalten werden. Eine weitere Möglichkeit wurde im Hauptmodul *GEONAP* getestet. Es handelt sich um eine Option mit dem Namen „Wackelturm“, die bereits zur Pegelauswertung angewandt wurde. Einer frei zu wählenden Station werden hierbei gewisse Vertikalbewegungen zugestanden und über die Wahl einer

Standardabweichung kann die horizontale Verschiebung berücksichtigt werden. Da die Anwendung dieser Option in einer Phase stattfand, in der die Optimierung anderer Einstellungen absolute Priorität hatte, konnte diese mangels Zeit nicht weiter verfolgt werden. Für die in der weiteren Auswertung zu bestimmenden relativen Verschiebungsraten ist der Einfluss auf die horizontalen Bewegungen gering, da sich die gesamte Schelfeisplatte gleichmäßig hebt und senkt.

Eine weitere Option im *GNUPDT*-Modul nach dem letzten *GEONAP*-Lauf ist die Zählung und Auflistung der nicht festgesetzten Mehrdeutigkeiten in dem *lst*-file.

6.6.7 *GNSHOW*: Auflistung der Inhalte der *gm*-files

Über *GNSHOW* lassen sich die *gm*-files kontrollieren. Globale Parameter wie Beobachtungszeit, Uhrpolynome, Anfangsposition, Exzentrizitäten und weitere Parameter und Einstellungen können angezeigt werden.

6.6.8 *GNSLIP*: Festsetzung von Cycle Slips

Cycle Slips treten auf, wenn der Empfänger das Signal verliert. Werden sie nicht aus den Daten eliminiert, dann muss eine weitere Mehrdeutigkeit für sie festgesetzt werden. Standardmäßig werden in *GNSLIP* deshalb die *gm*-files eingelesen und der Algorithmus versucht, die markierten Cycle Slips festzusetzen.

Eine weitere Möglichkeit entsteht durch die Bildung von Dreifachdifferenzen, ergänzt um die Option einer Schranke. Tritt eine Dreifachdifferenz über dem Maximalwert der Schranke auf und liegen alle anderen Differenzen unter einem Minimalwert, so wird davon ausgegangen, dass diese Differenz einen Cycle Slip enthält. Dieser wird nur detektiert aber noch nicht festgesetzt. Die räumliche Ausdehnung des Bereiches in dem die Differenzen gebildet werden kann ebenso angegeben werden wie die Schätzung eines Driftmodells über eine bestimmte Anzahl von Epochen sowie eine Nutzung eines ionosphärischen Signals L_1 für die Detektierung von Slips auf L_2 .

Festgesetzte Cycle Slips werden in ein *amb*-file (*ambiguity*: Mehrdeutigkeit) geschrieben. Damit reduziert sich der Rechenaufwand in dem Hauptmodul *GEONAP*.

Cycle Slips sind oftmals ein Effekt ungünstiger Umgebungsbedingungen wie Multipath (Mehrwegeeffekte) und starke ionosphärische Störungen. Die Scheeoberfläche des Untersuchungsgebietes reflektiert zwar sehr gut, doch durch den Einsatz von Antennen mit großer Grundplatte sind diese Einflüsse eher als sehr gering einzuschätzen. Die auf den umliegenden IGS-Stationen verwendeten Antennenstandpunkte sind ebenfalls

unbeeinflusst. Die Cycle Slips dieser Auswertung sind in erster Linie auf die starken Variationen in der Ionosphäre zurückzuführen. Die gesamte Antarktis gehört zum Bereich der Polarlichtzone in der starke elektromagnetische Störungen auftreten (King, 2000). Zusätzlich wirkt sich vor allem die Nähe der IGS-Stationen *Casey (cas1)* und *Davis (dav1)* zum geomagnetischen Pol negativ aus (Kutterer, 2006).

6.6.9 GNAUPD:Mehrdeutigkeits-Aufdatierung

GNAUPD steht für *GEONAP* Ambiguity Update. Gelöste Mehrdeutigkeiten können hiermit in den *amb*-files aufdatiert werden.

6.6.10 GEONAP: Multistations-Parameterschätzung

GEONAP ist das Hauptmodul des gleichnamigen Softwarepaketes und berechnet die endgültigen Stationskoordinaten inklusive ihrer Varianz-Kovarianz-Matrizen (*prj.sol: Projekt-Solution*). Hier werden Ionosphäre und Troposphäre geschätzt. Über ein Gauß-Markov-Modell und einen Kalman-Filter werden neben den Koordinaten auch Uhrparameter, Mehrdeutigkeiten, Cycle Slips und Laufzeitverzögerungen berechnet.

In einem *Preparation-run* können zuerst alle singulären *Cycle Slips* beseitigt werden; das sind Cycle Slips, die zu allen Satelliten oder auf allen Stationen vorhanden sind. Dieser Lauf wird meist noch vor dem *GNSLIP*-Lauf angesetzt.

Das Modul *GEONAP* greift auf die *gm*-files zu und datiert diese auf. Um verschiedene Optionen zu setzen, kann die Aufdatierung bis zum Schluss unterdrückt werden.

Zunächst wird eine Float-Lösung vor und nach dem *GNSLIP*-Lauf gestartet. Dann erst folgt die Mehrdeutigkeitslösung. Die Float-Lösung beinhaltet die Erzeugung eines Ionosphären-Option-files auf der Grundlage des funktionalen Modells nach *Klobuchar*. Mit einem Parameter für die Breite und zwei Parametern für die Länge sowie eines stochastischen Modells mit einer Standardabweichung von 0,5 Metern und einer vertikalen Korrelationslänge von 250 km. Diese Einstellungen beruhen auf Erfahrungswerten aus Japan, wo die ionosphärischen Einflüsse ähnlich wie im Untersuchungsgebiet sein sollen (Schmitz, 2006).

In dem *GEONAP*-Lauf für die Mehrdeutigkeitslösung wird das geschätzte Ionosphären-Option-file eingelesen. In Verbindung mit diesem wird eine automatische Verknüpfung aller Linearkombinationen der L1 und L2 Originalbeobachtungen zur Festsetzung der Mehrdeutigkeiten durchgeführt. Diese Kombination aus dem LX-Signal (effektive Wellenlänge von 1,72 m) und der ionosphärischen Schätzung eignet sich besonders für lange Basislinien und zeichnet sich durch geringes Rauschen aus. Die Mehrdeutigkeitssuche läuft über statistische Tests ab. Eine Kontrastschranke als

Quotient der besten und zweitbesten Lösung verringert den Suchumfang. Übliche Werte liegen zwischen 3 und 5. In diesem Fall wurde aufgrund entsprechender Erfahrungen mit einem Wert von 40 gearbeitet (Schmitz, 2006). Weiter kann der Suchalgorithmus durch eine vorgegebene minimale Anzahl von Satelliten für die optimale Suche und eine maximale Anzahl von zu löschenden Satelliten optimiert werden. Auch die Anzahl der zu durchlaufenden Koeffizienten des Algorithmus werden festgelegt.

Pro Empfänger wird ein stochastisches Troposphären-Modell (0,5 % Standardabweichung) über zwei Stunden geschätzt, mit einer räumlichen horizontalen Korrelationslänge von 2000 km und einer räumlichen vertikalen Korrelationslänge von 20 km.

Eine zusätzliche Option ermöglicht für jede Epoche, dass die absoluten Positionierungen in ein *pos*-file geschrieben werden, welches für kinematische Untersuchungen genutzt werden kann. Eine diesbezügliche Auswertung ergibt jedoch keine signifikanten Bewegungen. Hier besteht noch Untersuchungsbedarf.

6.6.11 Ergebnisse

Die *sol*-files der GEONAP-Läufe sind mit den Koordinaten der IGS-Referenzstationen (siehe 6.4.2) als zusätzliche Beobachtungen über eine Ausgleichung mit dem Zusatzmodul *GNPNET* verbessert worden. Die Ergebnisse sind dem Anhang (C) zu entnehmen. In 2004 doy 027 fehlt die Station Sanae (*vesl*) und in 2005 doy 003 die Station Syowa (*syog*), da beim IGS keine Daten verfügbar waren. Die kompletten Varianz-Kovarianz-Matrizen aller Beobachtungstage sind der beiliegenden DVD zu entnehmen.

6.7 Genauigkeitsabschätzung für die *base*

Die GPS-Auswertung mit GEONAP umfasst verschiedene Beobachtungszeiträume. Zum einen erfolgt für beide Kampagnen eine jeweilige Tageslösung (7- 14 h), zum anderen die Bestimmung der *base* in kürzeren Sessionen (1- 3 h). Während die langen Zeiträume eine unter 6.6.2 bereits genannte Auswertezeit von einigen Stunden bis hin zu mehreren Tagen in Anspruch nehmen, sind die kürzeren Blöcke innerhalb weniger Minuten oder in wenigen Stunden berechnet.

Die Einteilung der einzelnen Sessionen ist Tab. 6.2 und Tab. 6.3 zu entnehmen (in Anlehnung der in Kapitel 4 beschriebenen Punktfeldbeobachtungen).

Um für den Gang der weiteren Auswertung eine möglichst realistische Genauigkeitsaussage bezüglich der *base* treffen zu können, werden aus den

Genauigkeiten der Tageslösungen die Genauigkeiten der einzelnen Sessionen interpoliert und mit den direkt berechneten Sessions-Genauigkeiten verglichen.

Tab. 6.2: Einteilung der Sessionen

	Start[UT]	End[UT]	Start[GPS-sec]	End[GPS-sec]
2004 DOY 026 Sessions: Points 31 - 48				
s1:	10:15	12:45	123300	132300
s2:	13:00	15:30	133200	142200
s3:	15:30	18:00	142300	151200
s4:	18:30	21:00	153000	162000
s5:	21:15	22:30	162900	167400

2004 DOY 027 Sessions: Points 13 - 30				
s1:	11:45	14:30	215100	225000
s2:	15:15	18:00	227700	237600
s3:	18:45	21:15	240300	249300

2005 DOY 002 Sessions: Viertel I				
s1:	12:00	14:00	43200	50400
s2:	13:45	15:45	49500	56700
s3:	15:30	17:30	55800	63000

2005 DOY 003 Sessions: Viertel II				
s1:	10:45	12:45	125100	132300
s2:	12:45	14:45	132300	139500
s3:	14:45	16:45	139500	146700

2005 DOY 004 Sessions: Viertel III+IV				
s1:	09:15	11:15	206100	213300
s2:	11:15	13:15	213300	220500
s3:	13:15	15:15	220500	227700
s4:	15:00	17:00	226800	234000
s5:	16:30	18:30	232200	239400
s6:	18:00	20:00	237600	244800
s7:	20:00	22:00	244800	252000

Tab. 6.3: Gesamtintervall der Tageslösungen

Year	DOY	Start[UT]	End[UT]	Start[GPS-sec]	End[GPS-sec]
2004	026	10:00	22:33	122400	167580

2004	027	11:00	21:40	212400	250800

2005	002	11:11	18:00	40260	64800

2005	003	09:34	17:05	120840	147900

2005 004 08:42 22:59 204120 255540

Unter der Annahme eines linearen Bewegungsverhaltens des Schelfeises in solch einem beobachteten Zeitraum (Nixdorf, 1999), lässt sich für einen Punkt \mathbf{X}_{S_n} zu einem Zeitpunkt t_{S_n} zwischen zwei Tageslösungen folgender Zusammenhang herleiten:

$$\frac{\mathbf{X}_{S_n} - \mathbf{X}_i}{\mathbf{X}_{i+1} - \mathbf{X}_i} = \frac{t_{S_n} - t_i}{t_{i+1} - t_i}. \quad (6.10)$$

Mit

\mathbf{X} Koordinatentripel des jeweiligen Punktes

t mittlerer Zeitpunkt des Tagesintervalls beziehungsweise der jeweiligen Session

n = 1.. 7 Anzahl der Sessions

i = 002.. 004 und 026, 027 GPS-Tage.

Zur Koordinatenberechnung eines Punktes sind alle Zeitpunkte bekannt. Damit lässt sich der rechte Teil der Formel (6.10) zusammenfassen und sei im Folgenden mit a bezeichnet. Nach der Umstellung ergibt sich:

$$\mathbf{X}_{S_n} = \mathbf{X}_i + a \cdot (\mathbf{X}_{i+1} - \mathbf{X}_i) \quad (6.11)$$

Das Differenzieren von (6.11) nach den Beobachtungen ergibt:

$$\frac{\partial \mathbf{X}_{S_n}}{\partial \mathbf{X}_i} = 1 - a \quad (6.12)$$

und

$$\frac{\partial \mathbf{X}_{S_n}}{\partial \mathbf{X}_{i+1}} = a \quad (6.13)$$

Damit kann die Designmatrix \mathbf{A} aufgestellt werden:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1-a & a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & 1-a & a & 0 & 0 \\ & & & & 1-a & a \end{bmatrix}. \quad (6.14)$$

Die Kovarianzmatrix lautet:

$$\Sigma_{X_{i,i+1}} = \begin{bmatrix} \sigma_{x_i}^2 & 0 & \dots & 0 \\ & \sigma_{x_{i+1}}^2 & & \\ & & \sigma_{y_i}^2 & \\ & & & \sigma_{y_{i+1}}^2 & \\ & & & & \sigma_{z_i}^2 & 0 \\ & & & & & \sigma_{z_{i+1}}^2 \end{bmatrix}. \quad (6.15)$$

Nach dem Varianz-Fortpflanzungsgesetz (Niemeier, 2002) lassen sich die gewünschten Genauigkeiten berechnen:

$$\Sigma_{X_{S_n}} = A \cdot \Sigma_{X_{i,i+1}} \cdot A^T. \quad (6.16)$$

Entsprechend den einzelnen Sessionen aus Tab. 6.2 ergeben sich die Genauigkeitsabschätzungen für die *base* gemäß Anhang (D).

Aus den recht kurzen Ergebnis-Sessionen des IGS-Netzes ist zu erkennen, dass diese in der Standardabweichung meist etwas schlechter sind. Lediglich in den Bereichen, in denen die aus den 24-h-Abständen und über das Varianz-Fortpflanzungsgesetz prädierten Sessionen außerhalb der mittleren Tagesbezugszeitpunkte liegen, ist eine Verschlechterung gegenüber den IGS-Lösungen erkennbar. Alles in allem erscheinen die aus den 24-h-Abständen berechneten Genauigkeiten für die einzelnen Sessionen realistischer. Für die endgültige Berechnung der Netzknoten des lokalen Feldes werden sie neben den Koordinaten der Ergebnis-Sessionen des IGS-Netzes als à-priori Werte in die Ausgleichung mit *GNPNET* einfließen, mit der nach der GEONAP-Berechnung des Punktfeldes die einzelnen Punktkoordinaten verbessert werden.

6.8 Berechnung des lokalen Punktfeldes

Die Auswertung der GPS-Beobachtungen für das lokale Punktfeld werden mit dem unter 6.6.3 bis 6.6.10 entwickelten batch-job durchgeführt. Dafür muss die Datenbank um die einzelnen Netzknoten erweitert werden. Den neu zu erstellenden Unterordnern müssen die entsprechenden PCV-Dateien der verwendeten Antennen zugewiesen werden. Auch die batch-jobs der jeweiligen Beobachtungstage sind entsprechend den einzelnen Sessionen anzupassen.

Zur weiteren Berechnung ist es notwendig die geozentrischen Koordinaten mit einer geeigneten Projektion in verebene Koordinaten abzubilden. Mit den Transformationsroutinen des GEONAP-Pakets sind diverse Projektionen möglich. In

diesem Fall wird auf eine *Universale Transversale Merkatorprojektion* (UTM) zurückgegriffen. Das Untersuchungsgebiet befindet sich in Zone 29.

Weitere Einzelheiten zur Bestimmung der lokalen Punktfelder sind dem nachfolgenden Kapitel zu entnehmen.

6.9 Beurteilung der Ergebnisse und deren Genauigkeiten

Zur Beurteilung der Qualität der Ergebnisse der GEONAP-Prozessierung liegen eine parallel am AWI gerechnete GAMIT-Auswertung und die in dieser Arbeit verwendete TTC-Lösung vor. Die Koordinatenunterschiede aus der Wiederholungsmessung für die Tage 002, 003, 004 sind Tab. 6.4 zu entnehmen. Diese Tageslösung ist das endgültige Ergebnis der *base* nach der Ausgleichung mit den IGS-Koordinaten.

Während die GAMIT-Lösung und die GEONAP-Lösung kaum voneinander abweichen und etwa im Rahmen der Messgenauigkeit liegen (vgl. Anhang C, DOY 002, 003, 004) sind die TTC-Lösungen erheblich schlechter. Vor allem die Höhenkomponente weicht bis zu 6 m ab. Hingegen betragen die Differenzen der wissenschaftlichen Softwarelösungen maximal 2,7 cm in der Höhe.

Tab. 6.4: Vergleich der Softwarelösungen GAMIT/ GEONAP/ TTC in UTM-Koordinaten

Software	Punkt	e [m]	n [m]	h [m]
2005 DOY 002				
GAMIT	base	29525451.4730	-7843337.9358	56.3693
GEONAP	base	29525451.4628	-7843337.9410	56.3546
TTC	base	29525450.9058	-7843340.5755	50.5422

Differenz (GAMIT-GEONAP)		0.0402	0.0052	0.0147
Differenz (GAMIT-TTC)		-0.4328	0.3603	5.8271
Differenz (GEONAP-TTC)		-0.4430	0.3655	5.8124

2005 DOY 003				
GAMIT	base	29525451.3756	-7843337.5431	56.6283
GEONAP	base	29525451.3557	-7843337.5513	56.6012

Differenz		0.0199	0.0082	0.0271

2005 DOY 004				
GAMIT	base	29525451.2600	-7843337.0957	56.6569
GEONAP	base	29525451.2459	-7843337.0590	56.6369

Differenz		0.0141	0.0367	0.0200

Tab. 6.5: Vergleich der Softwarelösungen GAMIT/ GEONAP in XYZ-Koordinaten

Punkt	X [m]	Y [m]	Z [m]	sx [m]	sy [m]	sz [m]
026						
GAMIT						
base	2092762.1691	-305638.6468	-5997157.8538	0.0120	0.0135	0.0450
GEONAP						
base	2092762.2489	-305638.7624	-5997157.5802	0.0478	0.0475	0.1099

Diff.	-0.0798	-0.1156	0.2736			
027						
GAMIT						
base	2092762.5246	-305638.8263	-5997157.6754	0.0111	0.0129	0.0425
GEONAP						
base	2092762.6903	-305638.9044	-5997157.6694	0.0235	0.0234	0.0549

Diff.	-0.1657	-0.0781	-0.0200			

Ein Vergleich der einzelnen Sessions und lokalen Punktfelder ist nicht möglich, da bei den verschiedenen Auswertungen unterschiedliche Blöcke gebildet wurden. Damit ist auch das lokale Punktfeld nicht vergleichbar.

Zum Vergleich der Nullmessung liegen in GAMIT nur geozentrische Koordinaten vor (Tab. 6.5). Die Unterschiede in den Standardabweichungen sind auf die unterschiedlich gewählten à-priori Werte zurückzuführen. Die Differenzen betragen für Tag 026 bis zu 27 cm. Hier werden die in der Auswertung auftretenden Probleme deutlich (siehe 6.6.2). Verwunderlich sind die gegensätzlichen Differenzen zwischen den beiden Tagen. Besonders die geringe Differenz in der Z-Komponente von DOY 027 von nur 2 cm, jedoch in der x-Komponente mehr als dem achtfachen. Bereits die hohen Standardabweichungen (Anhang C) zur Bestimmung der *base* verdeutlichen die Schwierigkeiten bei den Punktbestimmungen der Nullmessung.

Diese Unsicherheiten wirken sich auch erheblich auf die Koordinatengenauigkeiten des lokalen Punktfeldes aus (siehe Anhang E). Hier sind Standardabweichungen von bis zu 86 cm zu verzeichnen (DOY 026, Session 3).

In jeder Session treten für alle Netzpunkte nahezu gleiche Standardabweichungen auf. Diese Ergebnisse sind nach eingehenden Untersuchungen auf die kurzen Basislinien und damit nahezu keinen Auswirkungen durch die Ionosphäre zurückzuführen.

Entsprechend den deutlich besseren Standardabweichungen der Wiederholungsmessung für die Referenzbestimmung der *base*, liegen auch die Genauigkeiten der Punktkoordinaten für die lokale Auswertung in einem zufrieden stellenden Bereich (Anhang E). Einige Ausreißer sind in den Auflistungen dennoch zu verzeichnen. Diese sind jedoch auf die zum Teil äußerst geringen Beobachtungszeiten einzelner Punkte zurückzuführen, welche eigentlich zu anderen Sessionen gehören. Für die weitere Analyse sind diese Punkte inklusive ihrer Varianz-Kovarianz-Matrizen fachgerecht aus den Daten zu eliminieren (siehe Kapitel 8).

Zusammenfassend können die GEONAP-Auswertung und die Abschätzung der Genauigkeiten als zuverlässig und realistisch betrachtet werden. Im Falle der Nullmessung besteht noch Handlungsbedarf. Eine umfassende Analyse der Satellitensignalgüte dürfte dem gerecht werden.

7 Bestimmung des Bewegungsfeldes

Dieses Kapitel enthält den Gang der Berechnungen zu einem zeitnormierten Bewegungsfeld. Einleitend wird auf einen Beobachtungsplot der beiden Messepochen verwiesen. Sodann wird auf die notwendige Formatierung der GEONAP-*sol*-files eingegangen. Nach der Wahl geeigneter Bezugspunkte in beiden Epochen, erfolgt die Normierung aller Punktkoordinaten. Aufgrund der Kenntnis des genauen zeitlichen Abstandes der beiden GPS-Kampagnen können Azimute und Geschwindigkeiten aus dem fast einjährigen Abstand bestimmt werden.

7.1 Beobachtungsplot

Wie in Kapitel 4 dargestellt, liegen den beiden GPS-Messkampagnen zur Standortplanung der Neumayer-III-Station völlig unterschiedliche Beobachtungskonzepte zu Grunde. Dies ist darauf zurückzuführen, dass für die Wiederholungsmessung wesentlich mehr GPS-Empfangsanlagen zur Verfügung standen. Während in der Nullmessung nur mit einem oder höchstens zwei Rovern die einzelnen Punkte beobachtet werden konnten, wurden in der Wiederholungsmessung sechs Rover eingesetzt. Um möglichst zeitnah alle Punkte beobachten zu können, entstand in der zweiten Messung das in Kapitel 4 beschriebene Messkonzept.

Zur Veranschaulichung der verschiedenen Beobachtungen wird auf Anhang F verwiesen. Neben der Beobachtungsdauer der jeweiligen Punkte werden auch die einzelnen Sessionen dargestellt. Deshalb kann die Punktbeschriftung der Ordinate für die Beobachtungstage der Wiederholungsmessung auch nicht fortführend gestaltet werden.

7.2 Vorbereitende Formatierung

Im den *sol*-files der GEONAP-Auswertung werden zunächst die jeweiligen Stationen mit ihren Koordinaten und dann direkt darunter die Varianz-Kovarianz-Matrizen ausgegeben. Letztere sind jedoch nicht quadratisch sondern zeilenweise nacheinander in einzelnen Submatrizen \mathbf{Q}_{ii} (mit $i = 1, \dots, n$) gespeichert, wobei nur die obere Dreiecksmatrix ausgegeben wird:

$$\mathbf{Q}_{xx} = [\mathbf{Q}_{11} \quad \mathbf{Q}_{12} \quad \mathbf{Q}_{13} \quad \cdots \quad \mathbf{Q}_{1n} \quad \mathbf{Q}_{22} \quad \mathbf{Q}_{23} \quad \cdots \quad \mathbf{Q}_{2n} \quad \mathbf{Q}_{33} \quad \cdots \quad \mathbf{Q}_{3n}]^T.$$

Nach der Formatierung in eine symmetrisch-quadratisch vollbesetzte Varianz-Kovarianz-Matrix, können die notwendigen weiteren Berechnungen durchgeführt werden. Teilweise überlappen sich die Sessionen. Entsprechend dem exemplarischen Messablauf in Kapitel 4 ist neben den gewünschten Koordinaten der Punkte 4 bis 9 der Session 1 auch Punkt 18 mit in dem Beobachtungszeitraum enthalten. Während die entsprechenden Koordinaten einfach manuell gestrichen werden können, ist dies mit den entsprechenden Zeilen und Spalten der Varianz-Kovarianz-Matrix nicht möglich. Hier ist auf das Verfahren der *Gauß'schen Elimination* zurückzugreifen. Dieses besagt, dass eine Matrix \mathbf{P}_{FF} aus einer Matrix

$$\mathbf{P}_{dd} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{FF} & \mathbf{P}_{FB} \\ \mathbf{P}_{BF} & \mathbf{P}_{BB} \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

folgendermaßen freigestellt werden kann (Pelzer, 1985):

$$\bar{\mathbf{P}}_{FF} = \mathbf{P}_{FF} - \mathbf{P}_{FB} \cdot \mathbf{P}_{BB}^{-1} \cdot \mathbf{P}_{BF}. \quad (7.2)$$

Entsprechend wird mit allen doppelten Beobachtungen in den verschiedenen Sessionen verfahren. Dazu gehören alle Sessionen der Nullmessung und alle ungeraden Sessionen der Wiederholungsmessung, mit denen das Messfeld vollständig abgedeckt ist. Die Ergebnis-Dateien mit den vollständigen Varianz-Kovarianz-Matrizen sind der beiliegenden DVD zu entnehmen. Sie gliedern sich in eine reine Koordinatendatei mit *Punkname, easting, northing, height* und eine dazugehörige Varianz-Kovarianz-Matrix in einer separaten Datei.

7.3 Zeitliche Normierung

Neben einer konsistenten Lösung bezüglich der GPS-Beobachtungen und dem zugehörigen Referenzrahmen, ist in allen Epochen jeweils ein Bezugsdatum festzulegen.

Für die Wiederholungsmessung wurde dafür der mittlere Zeitpunkt über alle Beobachtungstage berechnet. Dieser fällt mit dem mittleren Bezugszeitpunkt der ersten Session des Tages 004 nahezu zusammen. Es tritt lediglich eine Differenz von 15 Minuten auf, bei der ein Netzkpunkt entsprechend den zu erwartenden Geschwindigkeiten maximal um 5 mm wandert. Da dies zu vernachlässigen ist, wird die 1. Session des 4. Januar 2005 um 10:15 UT als Zeitpunkt festgesetzt. Leider fällt die Session 1 des Tages 026 aus dem Jahre 2004 nicht exakt mit eben genannter Uhrzeit zusammen. Hier wird der mittlere Bezugszeitpunkt dieser Session gewählt: 1. Session des 26. Januar 2004 um 11:30 UT. Die Differenz beträgt damit 343,967 Tage.

Nun müssen die entsprechenden Differenzen zwischen den *base*-Koordinaten der Normierungszeitpunkte und den anderen *base*-Lösungen der einzelnen Sessionen bestimmt werden. Diese werden dann an den einzelnen Netzkpunkte der jeweiligen Sessionen angebracht. Damit stehen zwei Punktfeldlösungen zu jeweils einem Bezugszeitpunkt zur Verfügung, deren Koordinaten weiteren Untersuchungen unterzogen werden können.

7.4 Azimute und Geschwindigkeiten

Für die Bestimmung von Azimuten und der Ableitung von Geschwindigkeiten aus dem jährlichen Abstand der beiden Messepochen werden im Folgenden nur ebene zweidimensionale Koordinaten verwendet. Mit der Richtungswinkelbeziehung lassen sich die Azimute zwischen den Punktkoordinaten nach einem Jahr ableiten:

$$t = \arctan \frac{\Delta y}{\Delta x}. \quad (7.3)$$

Die Bestimmung der Längenänderung erfolgt nach dem Satz des Pythagoras:

$$s = \sqrt{\Delta y^2 + \Delta x^2}. \quad (7.4)$$

Die Geschwindigkeiten berechnen sich nach dem Weg-Zeit-Gesetz:

$$s = v \cdot t$$

$$v = \frac{s}{t} \quad (7.5)$$

Im Anhang G sind die entsprechenden numerischen Werte aufgeführt. An dieser Stelle soll lediglich eine entsprechende Grafik den Zusammenhang darstellen.

7.5 Grafische Darstellung des Bewegungsfeldes

Abb. 7.1 zeigt die Hauptfließrichtung des beobachteten Punktfeldes nach Nord-Nordwest, wobei Feinheiten nicht zu erkennen sind. Die erwarteten Spannungen im südwestlichen Bereich können mit dieser Analyse nicht aufgedeckt werden. Dazu bedarf es der im nachfolgenden Kapitel zu berechnenden Strainparameter.

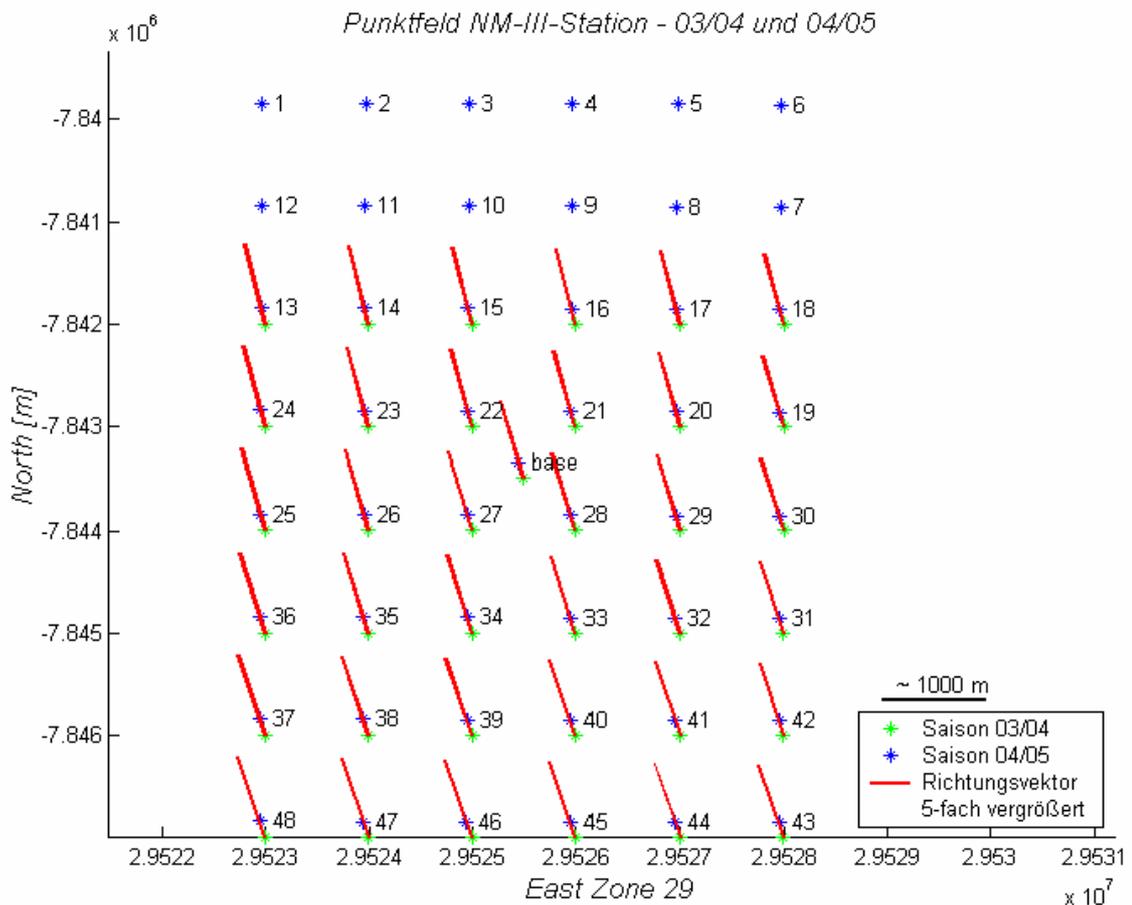


Abb. 7.1: Bewegungsvektoren im Punktfeld der NM-III-Station

8 Deformationsanalysen

Das Bewegungsfeld als Ganzes wird in Kapitel 7 berechnet und dargestellt. Mögliche Deformationen sind dort nicht zu erkennen. Der Einfluss äußerer Kräfte auf einen Körper und seine daraus resultierenden Verformungen sind Inhalt dieses Kapitels und können nur durch eine vertiefte Analyse verdeutlicht werden.

Deformationen zwischen den Punkten eines Objektes zu unterschiedlichen Zeitpunkten lassen sich durch Abbildungen beschreiben. Eine Abbildung überführt im Allgemeinen die Punktkoordinaten des einen Koordinatensystems in die Punktkoordinaten eines anderen Koordinatensystems. Diese durch Transformationen geprägte Vorgehensweise lässt sich in der Deformationsanalyse zu Nutzen machen. Dabei wird das beobachtete Objekt zu verschiedenen Zeitpunkten geometrisch beschrieben und über Translationen, Rotationen und Maßstabsänderungen oder auch Scherung ineinander überführt (Welsch, 2000).

Mit Hilfe der auf dem Hookschen Gesetz beruhenden Elastizitätstheorie wird eine Affintransformation gerechnet. Die Untersuchung ist auf den zweidimensionalen Fall beschränkt.

8.1 Strainanalyse

Als *Strain* wird die elastische Verformung eines Körpers bezeichnet, die er unter dem Einfluss äußerer Kräfte (*stress*) erleidet (Welsch, 2000). Die Bewegungen der Schelfeisoberfläche verformen die Lage der Netzpunkte des errichteten Punktfelds zueinander. Es wird von einer linearen Eisbewegung ausgegangen, da die Verformungen im Hinblick auf die Ausdehnung des Untersuchungsgebietes infinitesimal klein sind. In der affinen Transformation wird ein kartesisches

Koordinatensystem x, y in ein neues System x', y' mit Hilfe von sechs Parametern (a_i, b_i (reell) mit $i = 0, 1, 2$) überführt. In analytischer Darstellung lautet der Ansatz (Wolfrum, 1978):

$$\begin{aligned}x' &= a_0 + a_1x + a_2y \\y' &= b_0 + b_1x + b_2y\end{aligned}\quad (8.1)$$

Geometrisch ist die affine Transformation als schräge Parallelprojektion zweier verschieden geneigter Ebenen aufeinander definiert. Diese Abbildung hat die Eigenschaften, dass der Parallelismus von Geraden erhalten bleibt und dass Streckenverhältnisse längs einer Geraden invariant sind. (Wolfrum, 1978)

Verzerrung, Scherung und Starrkörperbewegung sind in den sechs Parametern enthalten. Die Verzerrungsmatrix \mathbf{E} kann nach Welsch et al. (2000) angegeben werden mit:

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} e_{xx} & e_{xy} \\ e_{yx} & e_{yy} \end{bmatrix}\quad (8.2)$$

Die Elemente der Hauptdiagonalen enthalten die Hauptverzerrung, die Elemente auf der Nebendiagonalen die Scherung. Herleitungen sind der Literatur zu entnehmen (Welsch et al., 2000).

Die Strain-Ellipse – auch als Tissotsche Indikatrix bezeichnet – wird mit den Halbachsen e_1 und e_2 festgelegt. Sie sind gleichzeitig als die Hauptachsen der Verzerrung definiert. Liegt eine Dehnung vor, so treten positive Werte auf, eine Stauchung ist anhand negativer Werte zu erkennen; es handelt sich um dimensionslose Größen. (Carosio, 1995) Die Parameter können direkt aus der Verzerrungsmatrix \mathbf{E} abgeleitet werden:

$$\begin{aligned}e_1 &= \frac{1}{2}(e_{xx} + e_{yy} + ee) \\e_2 &= \frac{1}{2}(e_{xx} + e_{yy} - ee) \\ee^2 &= (e_{xx} - e_{yy})^2 + 4e_{xy}^2 \\ \tan 2\vartheta &= \frac{2e_{xy}}{(e_{xx} - e_{yy})}\end{aligned}\quad (8.3)$$

(Welsch et al., 2000)

Die Strain-Ellipse wird im Schwerpunkt der verformten Figur eingetragen. Zur Berechnung der Strain-Parameter im Punktfeld der Neumayer-III-Station werden

Delauny-Dreiecke gebildet. Mit einem Strainberechnungsprogramm auf DOS-Ebene des igp Braunschweig erfolgt die Bestimmung der Parameter. Als Eingabedatei müssen aus zwei Epochen die zeitnormierten verebneten Koordinaten (UTM) eingelesen werden. Dann erfolgt die Einteilung der gewünschten Strainfiguren, in diesem Fall Dreiecke. Außerdem ist der zeitliche Abstand anzugeben (343.967 Tage). Neben den Schwerpunktkoordinaten der *Delauny*-Dreiecke werden unter anderem die Ellipsenparameter (8.3) angegeben. Für das erste Dreieck des Punktfeldes ist exemplarisch ohne Maßstab und ohne die richtige Orientierung die Situation in Abb. 8.1 skizziert.

Ein Plot des gesamten Punktfeldes mit den 2D-Strainellipsen ist dem Anhang zu entnehmen (Anhang H).

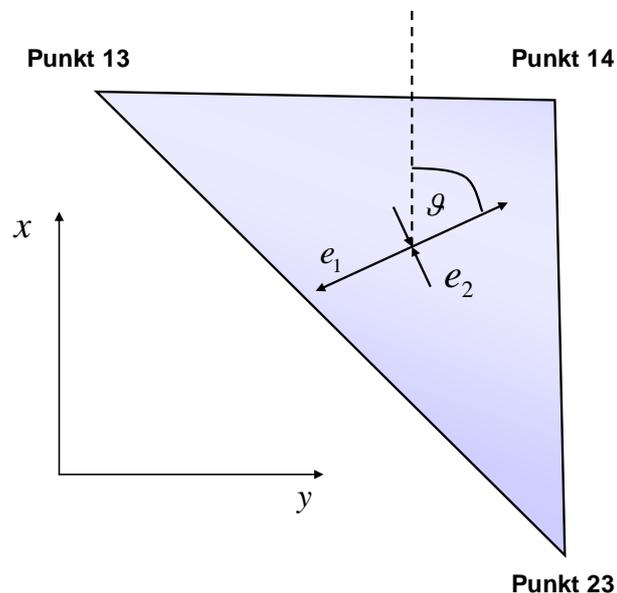


Abb. 8.1: Exemplarische Darstellung der Strain-Parameter im Dreieck der Punkte 13, 14, 23

9 Zusammenfassung und Ausblick

Seit jeher zählt die Überwachung tektonisch bewegten Gebieten und von Hangrutschungen sowie die Bestimmung der Fließraten von Gebirgsgletschern zu den Aufgaben der Ingenieurvermessung. In Zusammenarbeit mit Glaziologen helfen Geodäten, Eisbewegungen zu bestimmen und zu analysieren und damit zur Erforschung unseres Klimasystems beizutragen. Mit der Entwicklung der *Global Satellite Navigation Systems* (GNSS) wurde es möglich, unabhängig vom Wetter und ohne einen direkten Anschluss an umliegende Festpunkte hochgenaue Positionierungen präzise und wirtschaftlich durchzuführen. Durch die Einbeziehung einer mehrere Kilometer entfernten GPS-Station auf einem Referenzpunkt können verschiedene Fehleranteile der GNSS-Beobachtungen eliminiert werden, so dass eine Nutzung auch in so entlegenen Gebieten wie der Antarktis möglich ist.

Das Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in Bremerhaven (AWI) stellt seit Jahrzehnten das Zentrum der deutschen Polarforschung dar. Die auf dem Ekström-Schelfeis errichtete antarktische Überwinterungsstation *Neumayer* ist durch den jährlichen Schneezuwachs tief ins Eis eingesunken. Durch die Bewegung des Schelfeises ist sie in Richtung der Schelfeiskante gedriftet, so dass ein Neubau erforderlich wird. Zur Standortplanung wurde ein 35 km² großes Punktfeld eingerichtet und rasterförmig vermarktet, so dass nach wiederholten GPS-Messungen die für den Bau relevanten Dehnungs- und Spannungsdaten sowie Fließraten abgeleitet werden können. Automatisierte Auswertalgorithmen sind für derartige spezielle Anwendungen nach wie vor nicht verfügbar. Ziel dieser Diplomarbeit ist es, mit Hilfe des wissenschaftlichen Softwarepaketes GEONAP einen geeigneten Algorithmus zu entwickeln und die Koordinaten bezüglich ihrer Bewegungen zueinander, aber auch als Ganzes zu analysieren.

Im Rahmen einer früheren Diplomarbeit (Weidt, 2005), wurde das Punktfeld vermarktet und beobachtet. Die selbständige Durchführung der Wiederholungsmessungen stellt eine weitere Grundlage dieser Arbeit dar.

Nach einer kurzen Einführung in die Thematik und einer Darstellung weiterer möglicher geodätischer Messverfahren im glaziologischen Forschungsbereich werden die vor Ort durchgeführten Arbeiten näher erläutert. Als Grundvoraussetzung zur weiteren Analyse der GPS-Beobachtungen ist das Messpunktfeld möglichst zeitnah zu beobachten und eine geeignete Referenzstation zu betreiben. Für die Realisierung wurde bereits im Vorfeld in Zusammenarbeit mit der Abteilung Bathymetrie und Geodäsie des AWI ein Messkonzept erarbeitet.

Entsprechend dem geodätischen Grundsatz, sich auf gleiche Bezugspunkte in allen Messepochen zu beziehen, sind für die Wiederholungsmessung dieselben Antennenhöhen verwendet worden wie für die Nullmessung. Da Neigungen der Vermarktungsbalisen aufgrund oberflächennaher Verformungen über die Dauer eines Jahres nicht ausgeschlossen werden konnten, mussten diese ermittelt und berücksichtigt werden. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde das verwendete Klinometer kalibriert, und es wurde untersucht, ob die ermittelten Abweichungen rechnerisch berücksichtigt werden müssen.

Den Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit bildet die umfangreiche GPS-Auswertung. Dazu gehört in erster Linie eine umfassende Datenaufbereitung. Neben präzisen Ephemeriden zur hochgenauen Orbitbestimmung ist die Wahl eines geeigneten Bezugsrahmens essentieller Bestandteil der Lösung. Beide Datensätze müssen konsistent sein. Die Beschaffung dieser Daten stellte sich als schwierig heraus, da diverse Analysezentren ihre eigenen Lösungen präsentieren und die offizielle Lösung des *International GPS Service* (IGS) nicht eindeutig zugeordnet werden konnte. Die entsprechenden IGS-Stationskoordinaten mit den zugehörigen Standardabweichungen müssen auf die entsprechenden Beobachtungstage prädiert werden und finden Eingang in die weitere Genauigkeitsabschätzung. Zur hochpräzisen Positionierung der Referenzstation in der Mitte des Untersuchungsgebietes werden bis zu 4000 km entfernte IGS-Stationen der Antarktis genutzt. Weiterhin sind absolutkalibrierte Antennen eine Grundvoraussetzung.

Die vollständige Einarbeitung in das wissenschaftliche Softwarepaket GEONAP ist über die Dauer einer Diplomarbeit nahezu unmöglich.

Auf die Besonderheiten einer bewegten Referenzstation wird vertieft eingegangen. Unsicherheiten durch ionosphärische und troposphärische Störungen müssen speziell berücksichtigt werden. Auch die Nähe einiger IGS-Stationen zum geomagnetischen Südpol ist ein schwer zu kompensierendes Problem.

Da das Schelfeis nicht nur horizontalen Bewegungen durch die Speisung des Inlandeises, sondern auch den Ozeangezeiten bedingten vertikalen Veränderungen unterliegt, wird durch die Wahl einer geeigneten Länge einer Beobachtungssession sichergestellt, dass eine ausreichende Genauigkeit der Positionsbestimmung gewährleistet werden kann. Die Möglichkeit eines kinematischen Ansatzes musste aufgrund des extrem hohen Rauschanteils verworfen werden. An dieser Stelle besteht Untersuchungsbedarf für weitergehende Arbeiten. Zusätzlich wäre zu untersuchen, ob die Option „Wackelturm“ des GEONAP-Programmpakets auch den Einfluss der Ozeangezeiten erfassen könnte. Daneben wirken sich aufgrund der sehr langen Basislinien auch die Erdzeiten auf die Messgenauigkeit aus. Diese werden durch ein Modell in GEONAP erfasst.

Nachdem die Basisstation *base* in das IGS-Netz eingebunden wurde, erfolgte die lokale Punktfeldauswertung nur noch mit der *base* als neuer Referenzstation. Neben den Lösungen aller Sessionen wurde auch jeweils eine Tageslösung gerechnet, mit deren Bewegungsverhalten die Genauigkeiten der einzelnen Sessionen für die *base* abgeschätzt werden konnten. Anschließend erfolgten eine zeitliche Normierung aller Netzpunkte und die Darstellung des Bewegungsbildes mit Richtungsvektoren. Die kompletten Varianz-Kovarianz-Matrizen sind dafür teilweise angepasst worden und stehen für weitere Berechnungen zur Verfügung.

Somit stehen zwei Datensätze mit jeweils einem Bezugsdatum für weitere Analysen, z. B. eine Punktfelduntersuchung nach der Theorie der Starrkörperbewegung oder die Strainanalyse zur Verfügung.

Aus den Schwerpunktkoordinaten des gesamten Punktfeldes lassen sich über beide Epochen ein Richtungswinkel und zwei Translationen ableiten. Sowohl die Verschiebung als auch die Rotation sind signifikant. Für die Strainanalyse wurden die einzelnen Netzpunkte zu Dreiecken nach Delaunay zusammengefasst. In jedem einzelnen Dreieck wurden die Schwerpunktkoordinaten und mittels Strainanalyse die Dehnungs- und Stauchungsdaten ermittelt.

Literaturverzeichnis

Albertz, Jörg : Einführung in die Fernerkundung, Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 2001

Altamimi, Zuheir : The International Terrestrial Reference Frame, IGS Annual Report, Institut Géographique National, ITRF Section, International Earth Rotation Service, France, 1999

Bernese GPS Software : <http://www.bernese.unibe.ch/index.html>, zuletzt besucht am 01.06.2006

Boettcher, Gerald et al.: Analyse umfangreicher Messreihen von GPS Antennen PCV aus absoluten Roboter-Feldkalibrierungen seit Januar 2000, 5. GPS-Antennen Workshop, Frankfurt/Main, 2003

Carosio, A., Plazibat, M. : Lineare Transformation mit finiten Elementen, Eine anpassungsfähige Verbindung zwischen alter und neuer Landesvermessung, Systèmes d'information géographique et théorie des erreurs, Vermessungswesen, Photogrammetrie, Kulturtechnik, 1995

Collilieux, Xavier : Persönliche Mitteilungen, LAREG/IGN-ENSG, Champs sur Marne, 77455 Marne la Vallee Cedex 2, France, 2006

Dietrich, R. et al. : ITRF coordinates and plate velocities from repeated GPS campaigns in Antarctica – an analysis based on different individual solutions, Journal of Geodesy: Springer-Verlag, 2001

Dilßner, Florian : Persönliche Mitteilungen zur Software GEONAP, Hannover, Dezember 2005 und Januar bis März 2006

GEONAP Tutorial : 2003

IGS : <http://igsceb.jpl.nasa.gov/network/site/cas1.html> , Site Info Casey, Januar 2006

- King, Matt et al.** : Strategies for High Precision Processing of GPS Measurements with Application to the Amery Ice Shelf, East Antarctica, GPS Solutions Volume 4, Number1, John Wiley & Sons, 2000
- Kirchner, Michael** : Kinematische Modellierung von GPS-Referenzstationen auf Eis für flugzeuggestützte Messvorhaben, unveröffentlichte Diplomarbeit, TU Dresden, 2002
- Kouba, Jan** : A Guide to using International GPS Service (IGS) Products, Geodetic Survey Division Natural Resources Canada, February 2003
- Miller, Heinz, Oerter, Hans** : Berichte zur Polarforschung, Bremerhaven, 1990
- Montenbruck, Oliver und Gill, Eberhard** : Satellite Orbits, Models, Methods and Applications, Springer-Verlag, 2001
- Niemeier, Wolfgang** : Ausgleichsrechnung, de Gruyter, Berlin/New York, 2002
- Nixdorf, Uwe** : Dehnungsbeben an einer Störungszone im Ekström-Schelfeis nördlich der Georg-von-Neumayer-Station, Antarktis. – Eine Untersuchung mit seismologischen und geodätischen Methoden, Berichte zur Polarforschung, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven, 1992
- Projektseminar, Institut für Erdmessung** : Präzise Höhenbestimmung mit GPS, 2004
- Rack, Wolfgang** : Telefonische und persönliche Mitteilungen, Neumayer-Station, Januar 2005 und Bremerhaven, Mai 2006
- Remondi, B, W.** : The Global Positioning System, in: The Military Engineer, 1991
- Schmitz, Martin und Boettcher, Gerald** : Persönliche Mitteilungen zur Optimierung von Einstellungen in GEONAP und weiteren Modulen, Geo++ GmbH Garbsen, Januar bis Mai 2006
- Schulte, Daniel** : Persönliche Mitteilungen zur GPS-Auswertung der Beobachtungen im Punktfeld der Neumayer-III-Station, AWI Bremerhaven, Januar bis Juni 2006
- Seeber, Günter** : Satellite Geodesy, Berlin/New York: de Gruyter, 2003
- Seeber, Günter** : Satellitengeodäsie, Berlin/New York: de Gruyter, 1989

- Seemüller, Wolfgang** : Persönliche Mitteilungen, Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, München, 2006
- Torge, Wolfgang** : Geodäsie, Berlin/New York: de Gruyter, 2003
- Trimble** : Trimble Total Control - Hilfe ©2001 Trimble Navigation Ltd.
- Weidt, Maik** : Bestimmung von Fließgeschwindigkeiten und oberflächennahen Verformungen im Baugebiet der geplanten deutschen Forschungsstation Neumayer-III in der Antarktis aus GPS-Beobachtungen, unveröffentlichte Diplomarbeit, HAW Hamburg, 2005
- Wiggenhagen, Manfred** : Persönliche Mitteilungen, Mai 2006
- Pelzer, Hans** : Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung II, Konrad Wittwer Verlag, Stuttgart, 1985
- Welsch, Walter et al.** : Handbuch der Ingenieurvermessung, Band 3 - Auswertung geodätischer Überwachungs-messungen, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2000
- Wolfrum, O.** : Die Verzerrungseigenschaften der affinen Transformation, in: Allgemeine Vermessungsnachrichten, Ausg. 85, 1978

Anhang

A

IGS-Stationskoordinaten inklusive prädizierter Standardabweichungen

STAT	X[m]	Y[m]	Z[m]	sx[m]	sy[m]	sz[m]

026						
cas1	-901776.1590	2409383.3625	-5816748.4710	0.004	0.005	0.008
dav1	486854.5526	2285099.2723	-5914955.7168	0.004	0.005	0.010
maw1	1111287.1757	2168911.2566	-5874493.6144	0.009	0.012	0.026
ohi2	1525811.8522	-2432478.2176	-5676165.6064	0.040	0.049	0.091
syog	1766207.8704	1460290.3457	-5932297.6999	0.016	0.015	0.043
ves1	2009329.7813	-99741.4657	-6033158.4554	0.013	0.010	0.031

027						
cas1	-901776.1590	2409383.3625	-5816748.4710	0.004	0.005	0.008
dav1	486854.5526	2285099.2723	-5914955.7168	0.004	0.005	0.010
maw1	1111287.1757	2168911.2566	-5874493.6144	0.009	0.012	0.026
ohi2	1525811.8523	-2432478.2176	-5676165.6064	0.040	0.049	0.091
syog	1766207.8705	1460290.3457	-5932297.6999	0.016	0.015	0.043
ves1	2009329.7813	-99741.4657	-6033158.4554	0.013	0.010	0.031

002						
cas1	-901776.1587	2409383.3548	-5816748.4772	0.004	0.006	0.009
dav1	486854.5532	2285099.2681	-5914955.7210	0.004	0.006	0.011
maw1	1111287.1770	2168911.2532	-5874493.6163	0.010	0.014	0.028
ohi2	1525811.8703	-2432478.2168	-5676165.6107	0.043	0.053	0.099
syog	1766207.8748	1460290.3455	-5932297.7033	0.018	0.017	0.048
ves1	2009329.7905	-99741.4733	-6033158.4564	0.015	0.011	0.034

003						
cas1	-901776.1587	2409383.3548	-5816748.4772	0.004	0.006	0.009
dav1	486854.5532	2285099.2681	-5914955.7210	0.004	0.006	0.011
maw1	1111287.1770	2168911.2532	-5874493.6163	0.010	0.014	0.028
ohi2	1525811.8704	-2432478.2168	-5676165.6107	0.043	0.053	0.099
syog	1766207.8748	1460290.3455	-5932297.7033	0.018	0.017	0.048
ves1	2009329.7905	-99741.4733	-6033158.4564	0.015	0.011	0.034

004						
cas1	-901776.1587	2409383.3548	-5816748.4772	0.004	0.006	0.009
dav1	486854.5532	2285099.2681	-5914955.7210	0.005	0.006	0.011
maw1	1111287.1770	2168911.2532	-5874493.6164	0.010	0.014	0.028
ohi2	1525811.8704	-2432478.2168	-5676165.6107	0.043	0.053	0.099
syog	1766207.8748	1460290.3455	-5932297.7033	0.018	0.017	0.048
ves1	2009329.7905	-99741.4733	-6033158.4564	0.015	0.011	0.034

GEONAP-batch-job:

Platzhalter

%1 GPS-Tag
%2 Ordnername
%3 Startzeitpunkt der Session in GPS-Sekunden
%4 Endzeitpunkt der Session in GPS-Sekunden

rem rinex-files kopieren

COPY rinex*.rx?

rem _____

rem Bahndaten, Überprüfung auf vollständige/doppelte Daten, msg-file

rimsrt NM05 %1 1 brdc -s0-9,a-z,A-Z >%2%11.lst 2>>&1

rem _____

rem Einzelstationslösungen, gm-files, einlesen von Optionen aus optsng

gnsngl NM05 %1 1 base @optsng -b%3 -f%4 >>%2%11.lst 2>>&1

gnsngl NM05 %1 1 cas1 @optsng -b%3 -f%4 >>%2%11.lst 2>>&1

gnsngl NM05 %1 1 dav1 @optsng -b%3 -f%4 >>%2%11.lst 2>>&1

gnsngl NM05 %1 1 maw1 @optsng -b%3 -f%4 >>%2%11.lst 2>>&1

gnsngl NM05 %1 1 ohi2 @optsng -b%3 -f%4 >>%2%11.lst 2>>&1

gnsngl NM05 %1 1 syog @optsng -b%3 -f%4 >>%2%11.lst 2>>&1

gnsngl NM05 %1 1 ves1 @optsng -b%3 -f%4 >>%2%11.lst 2>>&1

rem präzise Ephemeriden (msp-file, pe) kopieren

copy pe\NM05%1.msp

rem _____

rem Aufdatieren der pe

gnupdt NM05 %1 1 @staf%2 +p >>%2%11.lst 2>>&1

rem Antennenkorrektionsdateien (ant-files, pcv) kopieren

copy pcv*.ant

rem _____

rem Aufdatieren der pcv und Erdgezeiten

gnupdt NM05 %1 1 @staf%2 -XON >>%2%11.lst 2>>&1

gnupdt NM05 %1 1 @staf%2 +g >>%2%11.lst 2>>&1

rem _____

rem anzeigen globaler parameter

gnshow NM05 %1 1 @staf%2 -gx >>%2%11.lst 2>>&1

```
rem _____
rem -P = vorbereitungslauf singuläre cycleslips
geonap NM05 %1 1 @staf%2 -P >>%2%11.lst 2>>&1

rem _____
rem erste float solution vor GNSLIP
geonap NM05 %1 1 @staf%2 -r -a +t2 >>%2%11.lst 2>>&1

rem _____
rem cycleslips detektieren (eingestellte parameter übernehmen)
rem +d = nur detektieren, nicht festsetzen
gnslip NM05 %1 1 @staf%2 +d5 -d2500 -n4 >>%2%11.lst 2>>&1

rem _____
rem gnpudt +c = aufdatieren der anzahl der ambiguities im gm-file
gnpudt NM05 %1 1 @staf%2 +c >>%2%11.lst 2>>&1

rem _____
rem GNSLIP corrector
gnslip NM05 %1 1 @staf%2 >>%2%11.lst 2>>&1

gnaupd NM05 %1 1 @staf%2 -g >>%2%11.lst 2>>&1
gnslip NM05 %1 1 @staf%2 -2 -i -n4 >>%2%11.lst 2>>&1

gnaupd NM05 %1 1 @staf%2 -g >>%2%11.lst 2>>&1

rem _____
rem GEONAP Float Solution nach GNSLIP
geonap NM05 %1 1 @staf%2 -r -a +t2 >>%2%11.lst 2>>&1
geonap NM05 %1 1 @staf%2 -r -IO -I -a -i2,1,0.5,250 >>%2%11.lst 2>>&1
geonap NM05 %1 1 @staf%2 -r -IO -I -a @NM05%11.iop >>%2%11.lst 2>>&1

rem _____
rem ambiguity resolution
geonap NM05 %1 1 @staf%2 -r -R,0 +X @NM05%11.iop -Lsng,slp,vdd
-k40 -m5,1 +t2,0.5,2000,20 -C1,2 -E8 +p >>%2%11.lst 2>>&1
gnaupd NM05 %1 1 @staf%2 >>%2%11.lst 2>>&1

gnpudt NM05 %1 1 @staf%2 +C >>%2%11.lst 2>>&1

DEL *.rx?
DEL FOR*

DEL trgp.ant
DEL tcwd.ant
DEL aoad.ant
```

MD back%2

COPY %2%11.lst back%2

DEL %2%11.lst

COPY *.amb back%2

DEL *.amb

COPY *1.gm back%2

DEL *1.gm

COPY NM05%11.sol back%2

DEL NM05%11.sol

COPY NM05%11.msg back%2

DEL NM05%11.msg

COPY *.pos back%2

DEL *.pos

DEL NM05%1.msp

C

**Ergebnisse nach der Transformation (GNPNET) der GEONAP-so/-files auf die IGS-
Stationskoordinaten. Tageslösungen.**

Nullmessung 2004, doy 026:

Geocentric Cartesian Coordinates WGS84 [meters]

P	X	Y	Z	
base	2092762.2489	-305638.7624	-5997157.5802	1
+/-	0.0479	0.0476	0.1099	
cas1	-901776.1958	2409383.3910	-5816748.4352	1
+/-	0.0340	0.0399	0.0717	
dav1	486854.5853	2285099.3178	-5914955.7563	1
+/-	0.0333	0.0393	0.0771	
maw1	1111287.1537	2168911.2383	-5874493.5279	1
+/-	0.0425	0.0502	0.1036	
ohi2	1525811.9030	-2432478.3657	-5676165.5736	1
+/-	0.0471	0.0532	0.1000	
syog	1766207.9017	1460290.2806	-5932297.5556	1
+/-	0.0506	0.0511	0.1177	
ves1	2009329.8213	-99741.5539	-6033158.3361	1
+/-	0.0434	0.0457	0.0984	

Nullmessung 2004, doy 027:

Geocentric Cartesian Coordinates WGS84 [meters]

P	X	Y	Z	
base	2092762.6903	-305638.9044	-5997157.6694	1
+/-	0.0236	0.0234	0.0549	
cas1	-901776.1632	2409383.3552	-5816748.4727	1
+/-	0.0127	0.0148	0.0260	
dav1	486854.5472	2285099.2874	-5914955.7126	1
+/-	0.0122	0.0145	0.0293	
maw1	1111287.2274	2168911.2462	-5874493.6057	1
+/-	0.0166	0.0197	0.0411	
ohi2	1525811.9700	-2432478.2628	-5676165.6951	1
+/-	0.0261	0.0320	0.0570	
syog	1766207.9436	1460290.3133	-5932297.6970	1
+/-	0.0201	0.0207	0.0471	

Wiederholungsmessung 2005, doy 002:

Geocentric Cartesian Coordinates WGS84 [meters]

P	X	Y	Z	
base	2092892.9810	-305702.5624	-5997108.4240	1
+/-	0.0122	0.0130	0.0265	
cas1	-901776.1756	2409383.3664	-5816748.4763	1
+/-	0.0085	0.0122	0.0202	
dav1	486854.5575	2285099.2686	-5914955.7325	1
+/-	0.0085	0.0117	0.0216	
maw1	1111287.1961	2168911.2699	-5874493.6577	1
+/-	0.0115	0.0140	0.0251	
ohi2	1525811.8548	-2432478.2372	-5676165.6289	1
+/-	0.0129	0.0155	0.0269	
syog	1766207.8927	1460290.3341	-5932297.7291	1
+/-	0.0128	0.0143	0.0281	
ves1	2009329.7909	-99741.4807	-6033158.4981	1
+/-	0.0119	0.0128	0.0262	

Wiederholungsmessung 2005, doy 003:

Geocentric Cartesian Coordinates WGS84 [meters]

P	X	Y	Z	
base	2092893.4085	-305702.7376	-5997108.5282	1
+/-	0.0171	0.0186	0.0378	
cas1	-901776.1767	2409383.3551	-5816748.4740	1
+/-	0.0127	0.0171	0.0295	
dav1	486854.5592	2285099.2657	-5914955.7219	1
+/-	0.0122	0.0170	0.0319	
maw1	1111287.1891	2168911.2651	-5874493.6534	1
+/-	0.0147	0.0191	0.0346	
ohi2	1525811.8323	-2432478.2593	-5676165.6208	1
+/-	0.0179	0.0217	0.0383	
ves1	2009329.7761	-99741.4880	-6033158.4610	1
+/-	0.0166	0.0186	0.0374	

Wiederholungsmessung 2005, doy 003:

Geocentric Cartesian Coordinates WGS84 [meters]

P	X	Y	Z	
base	2092893.8621	-305702.9206	-5997108.3995	1
+/-	0.0171	0.0199	0.0396	
cas1	-901776.1644	2409383.3869	-5816748.4519	1
+/-	0.0146	0.0185	0.0336	
dav1	486854.5531	2285099.2983	-5914955.7192	1
+/-	0.0157	0.0189	0.0357	
maw1	1111287.2044	2168911.2744	-5874493.5997	1
+/-	0.0158	0.0199	0.0379	
ohi2	1525811.8895	-2432478.2627	-5676165.6191	1
+/-	0.0175	0.0213	0.0390	
syog	1766207.9119	1460290.3443	-5932297.6756	1
+/-	0.0169	0.0205	0.0401	
ves1	2009329.8250	-99741.4914	-6033158.4298	1
+/-	0.0170	0.0198	0.0395	

Wiederholungsmessung 2005, doy 004:

Gesamtbeobachtungszeitraum und -intervall:

08:42 - 22:59 --> 204120 - 255540 = 51420 = 14:17 (229830)

Bezugszeitpunkt der Saison 04/05

(exaktes Mittel wäre 208800 = 15 min Differenz = max. ca. 5 mm)

s1:					
09:15 - 11:15	--> s1m: 209700	->	sx = 0.0137	sx = 0.0238	
			sy = 0.0149	sy = 0.0240	
			sz = 0.0303	sz = 0.0481	
s2:					
11:15 - 13:15	--> s2m: 216900	->	sx = 0.0148	sx = 0.0238	
			sy = 0.0162	sy = 0.0232	
			sz = 0.0329	sz = 0.0393	
s3:					
13:15 - 15:15	--> s3m: 224100	->	sx = 0.0160	sx = 0.0193	
			sy = 0.0175	sy = 0.0169	
			sz = 0.0356	sz = 0.0301	
s4:					
15:00 - 17:00	--> s4m: 230400	->	sx = 0.0172	sx = 0.0220	
			sy = 0.0187	sy = 0.0181	
			sz = 0.0380	sz = 0.0359	
s5:					
16:30 - 18:30	--> s5m: 235800	->	sx = 0.0181	sx = 0.0207	
			sy = 0.0198	sy = 0.0308	
			sz = 0.0402	sz = 0.0418	
s6:					
18:00 - 20:00	--> s6m: 241299	->	sx = 0.0192	sx = 0.0381	
			sy = 0.0209	sy = 0.0395	
			sz = 0.0425	sz = 0.0736	
s7:					
20:00 - 22:00	--> s7m: 248400	->	sx = 0.0205	sx = 0.0295	
			sy = 0.0223	sy = 0.0245	
			sz = 0.0454	sz = 0.0599	

E

Ergebnisse der lokalen Transformation (GNPNET) der GEONAP-so-files auf die base-Referenzkoordinaten. Sessionslösungen.

Nullmessung 2004, doy 026, Session 1:

Geocentric Cartesian Coordinates WGS84 [meters]

P	X	Y	Z	
base	2092762.1566	-305638.7593	-5997157.9341	1
+/-	0.1844	0.1831	0.4233	
0045	2089569.9652	-304622.7672	-5998314.0415	1
+/-	0.1844	0.1831	0.4233	
0046	2089412.7692	-305611.8613	-5998318.8955	1
+/-	0.1844	0.1831	0.4233	
0047	2089257.8078	-306600.2335	-5998322.8301	1
+/-	0.1844	0.1831	0.4233	
0048	2089102.7452	-307588.5902	-5998326.5190	1
+/-	0.1844	0.1831	0.4233	

Nullmessung 2004, doy 026, Session 2:

Geocentric Cartesian Coordinates WGS84 [meters]

P	X	Y	Z	
base	2092761.8271	-305638.6950	-5997157.2463	1
+/-	0.2808	0.2786	0.6443	
0041	2090654.8504	-303782.7669	-5997979.9018	1
+/-	0.2808	0.2786	0.6443	
0042	2090809.8243	-302794.3254	-5997975.8213	1
+/-	0.2808	0.2786	0.6443	
0043	2089877.0176	-302646.6913	-5998305.9088	1
+/-	0.2808	0.2786	0.6444	
0044	2089722.2847	-303635.1285	-5998310.1704	1
+/-	0.2808	0.2786	0.6444	

Nullmessung 2004, doy 026, Session 3:

Geocentric Cartesian Coordinates WGS84 [meters]

P	X	Y	Z	
base	2092762.1625	-305638.7046	-5997157.4589	1
+/-	0.3753	0.3730	0.8620	
0037	2090035.4215	-307736.1633	-5997995.6697	1

+/-	0.3753	0.3730	0.8621	
0038	2090190.5021	-306747.8009	-5997992.0438	1
+/-	0.3753	0.3730	0.8621	
0039	2090345.4428	-305759.5364	-5997988.2090	1
+/-	0.3754	0.3730	0.8622	
0040	2090500.3781	-304771.1453	-5997984.3255	1
+/-	0.3754	0.3730	0.8622	
0041	2090654.6486	-303782.7309	-5997980.5701	1
+/-	0.3783	0.3734	0.8671	

Nullmessung 2004, doy 026, Session 4:

Geocentric Cartesian Coordinates WGS84 [meters]

P	X	Y	Z	
base	2092762.4917	-305638.7592	-5997157.9714	1
+/-	0.1006	0.1001	0.2310	
0033	2091433.3920	-304918.7781	-5997654.5393	1
+/-	0.1006	0.1001	0.2310	
0034	2091278.4314	-305907.1859	-5997658.3571	1
+/-	0.1006	0.1001	0.2310	
0035	2091123.4934	-306895.4422	-5997662.2735	1
+/-	0.1006	0.1001	0.2310	
0036	2090968.3875	-307883.7621	-5997665.9092	1
+/-	0.1006	0.1001	0.2310	

Nullmessung 2004, doy 026, Session 5:

Geocentric Cartesian Coordinates WGS84 [meters]

P	X	Y	Z	
base	2092762.5209	-305638.8494	-5997158.1792	1
+/-	0.1631	0.1618	0.3740	
0031	2091743.0532	-302942.0925	-5997646.4742	1
+/-	0.1631	0.1618	0.3740	
0032	2091588.3304	-303930.4680	-5997650.7244	1
+/-	0.1631	0.1618	0.3740	

Nullmessung 2004, doy 027, Session 1:

Geocentric Cartesian Coordinates WGS84 [meters]

P	X	Y	Z	
base	2092762.5947	-305639.0118	-5997157.6234	1
+/-	0.0929	0.0921	0.2163	
0025	2091901.1233	-308031.5658	-5997335.0561	1
+/-	0.0930	0.0921	0.2163	
0026	2092056.1868	-307043.2755	-5997331.2975	1
+/-	0.0930	0.0921	0.2163	

0027	2092211.2042	-306054.9058	-5997327.5971	1
+/-	0.0930	0.0921	0.2163	
0028	2092366.1197	-305066.5591	-5997323.5686	1
+/-	0.0930	0.0921	0.2163	
0029	2092520.8922	-304078.1749	-5997319.4065	1
+/-	0.0930	0.0921	0.2163	
0030	2092675.6822	-303089.8624	-5997315.3425	1
+/-	0.0930	0.0921	0.2163	

Nullmessung 2004, doy 027, Session 2:

Geocentric Cartesian Coordinates WGS84 [meters]

P	X	Y	Z	
base	2092762.5613	-305638.9164	-5997157.3684	1
+/-	0.1244	0.1234	0.2895	
0019	2093608.2133	-303237.2433	-5996984.4419	1
+/-	0.1244	0.1234	0.2896	
0020	2093453.4399	-304225.6528	-5996988.5417	1
+/-	0.1244	0.1234	0.2896	
0021	2093298.5416	-305213.9300	-5996992.4447	1
+/-	0.1244	0.1234	0.2895	
0022	2093143.6483	-306202.2847	-5996996.5294	1
+/-	0.1244	0.1234	0.2895	
0023	2092988.6697	-307190.6270	-5997000.2753	1
+/-	0.1245	0.1234	0.2896	
0024	2092833.6509	-308179.0184	-5997003.9720	1
+/-	0.1245	0.1234	0.2896	

Nullmessung 2004, doy 027, Session 3:

Geocentric Cartesian Coordinates WGS84 [meters]

P	X	Y	Z	
base	2092762.7923	-305638.9562	-5997157.7875	1
+/-	0.0874	0.0868	0.2036	
0013	2093766.3246	-308326.4701	-5996673.3597	1
+/-	0.0874	0.0868	0.2036	
0014	2093921.3645	-307338.1282	-5996669.6232	1
+/-	0.0874	0.0868	0.2036	
0015	2094076.3289	-306349.7757	-5996665.7690	1
+/-	0.0874	0.0868	0.2036	
0016	2094231.2435	-305361.4108	-5996661.9362	1
+/-	0.0874	0.0868	0.2036	
0017	2094386.0717	-304373.0515	-5996657.8785	1
+/-	0.0874	0.0868	0.2036	
0018	2094540.7433	-303384.6536	-5996653.4711	1
+/-	0.0874	0.0868	0.2036	

Wiederholungsmessung 2005, doy 002, Session 1:

Geocentric Cartesian Coordinates WGS84 [meters]

P	X	Y	Z	
base	2092893.0813	-305702.6774	-5997108.5277	1
+/-	0.0307	0.0326	0.0663	
0204	2096226.2430	-305704.6274	-5995949.7251	1
+/-	0.0308	0.0326	0.0666	
0205	2096377.1395	-304715.2469	-5995947.0440	1
+/-	0.0308	0.0326	0.0666	
0206	2096527.1513	-303725.7652	-5995943.8064	1
+/-	0.0308	0.0326	0.0666	
0207	2095594.4859	-303583.7058	-5996276.1651	1
+/-	0.0308	0.0326	0.0666	
0208	2095444.3978	-304572.9787	-5996279.0909	1
+/-	0.0308	0.0326	0.0666	
0209	2095293.4583	-305562.2187	-5996281.9438	1
+/-	0.0308	0.0326	0.0666	
0218	2094661.9285	-303440.5631	-5996607.7110	1
+/-	0.0312	0.0352	0.0876	

Wiederholungsmessung 2005, doy 002, Session 2:

Geocentric Cartesian Coordinates WGS84 [meters]

P	X	Y	Z	
base	2092892.9119	-305702.5706	-5997108.2693	1
+/-	0.0439	0.0464	0.0946	
0207	2095594.3173	-303583.5962	-5996275.9153	1
+/-	0.0440	0.0465	0.0951	
0208	2095444.2286	-304572.8701	-5996278.8414	1
+/-	0.0441	0.0465	0.0951	
0209	2095293.2908	-305562.1101	-5996281.6904	1
+/-	0.0441	0.0465	0.0952	
0216	2094360.2843	-305419.0758	-5996613.0889	1
+/-	0.0440	0.0465	0.0950	
0217	2094511.3253	-304429.8462	-5996610.4149	1
+/-	0.0440	0.0465	0.0951	
0218	2094661.7518	-303440.4681	-5996607.5247	1
+/-	0.0440	0.0465	0.0951	
0219	2093729.2851	-303296.8547	-5996938.8471	1
+/-	0.0868	0.1427	0.2501	

Wiederholungsmessung 2005, doy 002, Session 3:

Geocentric Cartesian Coordinates WGS84 [meters]

P	X	Y	Z
---	---	---	---

base	2092893.0315	-305702.6312	-5997108.2573	1
+/-	0.0343	0.0365	0.0745	
0216	2094360.4066	-305419.1349	-5996613.0825	1
+/-	0.0345	0.0365	0.0750	
0217	2094511.4460	-304429.9041	-5996610.4122	1
+/-	0.0345	0.0365	0.0751	
0218	2094661.8728	-303440.5268	-5996607.5195	1
+/-	0.0345	0.0365	0.0752	
0219	2093729.4525	-303296.8178	-5996938.7641	1
+/-	0.0345	0.0365	0.0752	
0220	2093578.7132	-304286.3114	-5996941.4192	1
+/-	0.0345	0.0365	0.0751	
0221	2093427.4770	-305275.5050	-5996943.9874	1
+/-	0.0345	0.0365	0.0749	

Wiederholungsmessung 2005, doy 003, Session 1:

Geocentric Cartesian Coordinates WGS84 [meters]

P	X	Y	Z	
base	2092893.4357	-305702.7525	-5997108.5800	1
+/-	0.0706	0.0768	0.1563	
0328	2092495.1450	-305131.3932	-5997275.1336	1
+/-	0.0707	0.0769	0.1568	
0329	2092646.4368	-304141.9856	-5997272.2614	1
+/-	0.0708	0.0769	0.1568	
0330	2092797.4310	-303152.4813	-5997269.5601	1
+/-	0.0708	0.0769	0.1569	
0331	2091865.2499	-303007.3117	-5997599.9325	1
+/-	0.0708	0.0769	0.1568	
0332	2091714.0767	-303996.9857	-5997602.8811	1
+/-	0.0708	0.0769	0.1568	
0333	2091562.4908	-304986.5650	-5997605.6985	1
+/-	0.0707	0.0769	0.1568	
0340	2090629.9608	-304841.1050	-5997935.8614	1
+/-	0.0714	0.0778	0.1593	
0341	2090781.6446	-303851.4470	-5997932.8273	1
+/-	0.0711	0.0770	0.1579	
0342	2090933.2716	-302861.5910	-5997929.9864	1
+/-	0.0710	0.0769	0.1575	

Wiederholungsmessung 2005, doy 003, Session 2:

Geocentric Cartesian Coordinates WGS84 [meters]

P	X	Y	Z	
base	2092893.4520	-305702.8050	-5997108.5420	1
+/-	0.0673	0.0731	0.1489	

0331	2091865.2663	-303007.3643	-5997599.9000	1
+/-	0.0674	0.0731	0.1493	
0332	2091714.0908	-303997.0396	-5997602.8459	1
+/-	0.0674	0.0731	0.1493	
0333	2091562.5071	-304986.6186	-5997605.6660	1
+/-	0.0674	0.0731	0.1493	
0340	2090629.9818	-304841.1539	-5997935.8333	1
+/-	0.0674	0.0731	0.1492	
0341	2090781.6555	-303851.4987	-5997932.7901	1
+/-	0.0674	0.0731	0.1492	
0342	2090933.2864	-302861.6445	-5997929.9512	1
+/-	0.0674	0.0731	0.1492	
0343	2090001.2414	-302715.3780	-5998259.7461	1
+/-	0.0675	0.0731	0.1496	
0344	2089849.6365	-303705.3846	-5998262.8374	1
+/-	0.0676	0.0732	0.1497	
0345	2089699.9480	-304694.3902	-5998264.9065	1
+/-	0.0678	0.0732	0.1501	

Wiederholungsmessung 2005, doy 003, Session 3:

Geocentric Cartesian Coordinates WGS84 [meters]

P	X	Y	Z	
base	2092893.4955	-305702.7750	-5997108.5159	1
+/-	0.0942	0.1026	0.2087	
0340	2090630.0248	-304841.1257	-5997935.8105	1
+/-	0.0943	0.1027	0.2092	
0341	2090781.6995	-303851.4708	-5997932.7709	1
+/-	0.0943	0.1027	0.2093	
0342	2090933.3280	-302861.6166	-5997929.9259	1
+/-	0.0943	0.1027	0.2093	
0343	2090001.2833	-302715.3495	-5998259.7238	1
+/-	0.0943	0.1027	0.2093	
0344	2089849.6806	-303705.3575	-5998262.8135	1
+/-	0.0943	0.1027	0.2093	
0345	2089699.9940	-304694.3618	-5998264.8864	1
+/-	0.0943	0.1027	0.2093	

Wiederholungsmessung 2005, doy 004, Session 1:

Geocentric Cartesian Coordinates WGS84 [meters]

P	X	Y	Z	
base	2092893.6901	-305702.8559	-5997108.3655	1
+/-	0.0155	0.0168	0.0342	
0437	2090173.3410	-307809.6124	-5997943.9902	1
+/-	0.0155	0.0168	0.0342	
0438	2090325.9313	-306820.1607	-5997941.3053	1

+/-	0.0155	0.0168	0.0342	
0439	2090478.2261	-305830.8289	-5997938.4430	1
+/-	0.0155	0.0168	0.0342	
0446	2089545.7527	-305684.8872	-5998268.5471	1
+/-	0.0155	0.0168	0.0342	
0447	2089393.2638	-306674.4465	-5998271.5358	1
+/-	0.0155	0.0168	0.0342	
0448	2089240.5897	-307664.0017	-5998274.3208	1
+/-	0.0155	0.0168	0.0342	

Wiederholungsmessung 2005, doy 004, Session 2:

Geocentric Cartesian Coordinates WGS84 [meters]

P	X	Y	Z	
base	2092893.8326	-305702.9047	-5997108.5471	1
+/-	0.0907	0.0992	0.2015	
0434	2091411.0120	-305976.1888	-5997608.3468	1
+/-	0.0907	0.0993	0.2018	
0435	2091258.8957	-306965.4282	-5997611.2303	1
+/-	0.0908	0.0993	0.2019	
0436	2091106.3424	-307954.7615	-5997613.8747	1
+/-	0.0908	0.0993	0.2019	
0437	2090173.4899	-307809.6628	-5997944.1813	1
+/-	0.0907	0.0993	0.2018	
0438	2090326.0800	-306820.2107	-5997941.4991	1
+/-	0.0908	0.0993	0.2019	
0439	2090478.3754	-305830.8781	-5997938.6327	1
+/-	0.0908	0.0993	0.2019	
0448	2089240.7405	-307664.0501	-5998274.5135	1
+/-	0.0914	0.0994	0.2041	

Wiederholungsmessung 2005, doy 004, Session 3:

Geocentric Cartesian Coordinates WGS84 [meters]

P	X	Y	Z	
base	2092893.8065	-305702.9117	-5997108.5489	1
+/-	0.1542	0.1686	0.3431	
0425	2092038.9608	-308098.9832	-5997282.9168	1
+/-	0.7019	0.8656	0.9396	
0426	2092191.7447	-307110.1668	-5997280.5777	1
+/-	0.1543	0.1687	0.3434	
0427	2092343.8393	-306120.8471	-5997277.9458	1
+/-	0.1543	0.1687	0.3434	
0434	2091410.9857	-305976.1960	-5997608.3496	1
+/-	0.1543	0.1687	0.3434	
0435	2091258.8703	-306965.4368	-5997611.2322	1
+/-	0.1543	0.1687	0.3435	

0436	2091106.3162	-307954.7700	-5997613.8712	1
+/-	0.1543	0.1687	0.3435	

Wiederholungsmessung 2005, doy 004, Session 4:

Geocentric Cartesian Coordinates WGS84 [meters]

P	X	Y	Z	
base	2092893.8845	-305702.9565	-5997108.5383	1
+/-	0.1102	0.1198	0.2434	
0413	2093905.2815	-308388.0255	-5996621.8475	1
+/-	3.1251	2.7686	1.8178	
0422	2093276.7614	-306265.0646	-5996947.1352	1
+/-	0.1102	0.1198	0.2437	
0423	2093124.7536	-307254.4068	-5996949.7864	1
+/-	0.1103	0.1198	0.2438	
0424	2092972.3571	-308244.0135	-5996952.5151	1
+/-	0.1103	0.1198	0.2438	
0425	2092039.3458	-308099.5646	-5997283.3417	1
+/-	0.1103	0.1198	0.2438	
0426	2092191.8247	-307110.2122	-5997280.5694	1
+/-	0.1103	0.1198	0.2437	
0427	2092343.9229	-306120.8906	-5997277.9416	1
+/-	0.1102	0.1198	0.2437	
0436	2091106.3982	-307954.8127	-5997613.8683	1
+/-	0.1114	0.1205	0.2485	

Wiederholungsmessung 2005, doy 004, Session 5:

Geocentric Cartesian Coordinates WGS84 [meters]

P	X	Y	Z	
base	2092893.8428	-305702.9413	-5997108.4069	1
+/-	0.1319	0.1443	0.2930	
0413	2093905.2467	-308387.9739	-5996621.3487	1
+/-	0.1321	0.1444	0.2936	
0414	2094057.7006	-307398.2263	-5996618.5715	1
+/-	0.1320	0.1443	0.2936	
0415	2094209.7077	-306408.7212	-5996615.8319	1
+/-	0.1322	0.1444	0.2948	
0422	2093276.7209	-306265.0506	-5996947.0064	1
+/-	0.1320	0.1443	0.2933	
0423	2093124.7157	-307254.3913	-5996949.6587	1
+/-	0.1320	0.1443	0.2935	
0424	2092972.3251	-308244.0033	-5996952.4011	1
+/-	0.1320	0.1443	0.2935	
0425	2092039.3117	-308099.5514	-5997283.2246	1

+/-	0.1325	0.1445	0.2948	
0426	2092191.7868	-307110.1986	-5997280.4484	1
+/-	0.1324	0.1445	0.2943	
0427	2092343.8889	-306120.8790	-5997277.8201	1
+/-	0.1330	0.1449	0.2961	

Wiederholungsmessung 2005, doy 004, Session 6:

Geocentric Cartesian Coordinates WGS84 [meters]

P	X	Y	Z	
base	2092893.8908	-305702.9033	-5997108.3836	1
+/-	0.0843	0.0918	0.1866	
0410	2095142.6780	-306551.8822	-5996284.4644	1
+/-	0.0844	0.0918	0.1868	
0411	2094990.6879	-307541.5832	-5996287.1792	1
+/-	0.0844	0.0918	0.1868	
0412	2094838.0955	-308531.6446	-5996289.8243	1
+/-	0.0844	0.0918	0.1868	
0413	2093905.2954	-308387.9359	-5996621.3278	1
+/-	0.0843	0.0918	0.1868	
0414	2094057.7488	-307398.1901	-5996618.5510	1
+/-	0.0843	0.0918	0.1868	
0415	2094209.7529	-306408.6844	-5996615.8169	1
+/-	0.0844	0.0918	0.1869	
0422	2093276.7667	-306265.0144	-5996946.9920	1
+/-	0.0844	0.0918	0.1870	
0423	2093124.7608	-307254.3510	-5996949.6229	1
+/-	0.0844	0.0918	0.1873	
0424	2092972.3720	-308243.9642	-5996952.3523	1
+/-	0.0844	0.0918	0.1873	

Wiederholungsmessung 2005, doy 004, Session 7:

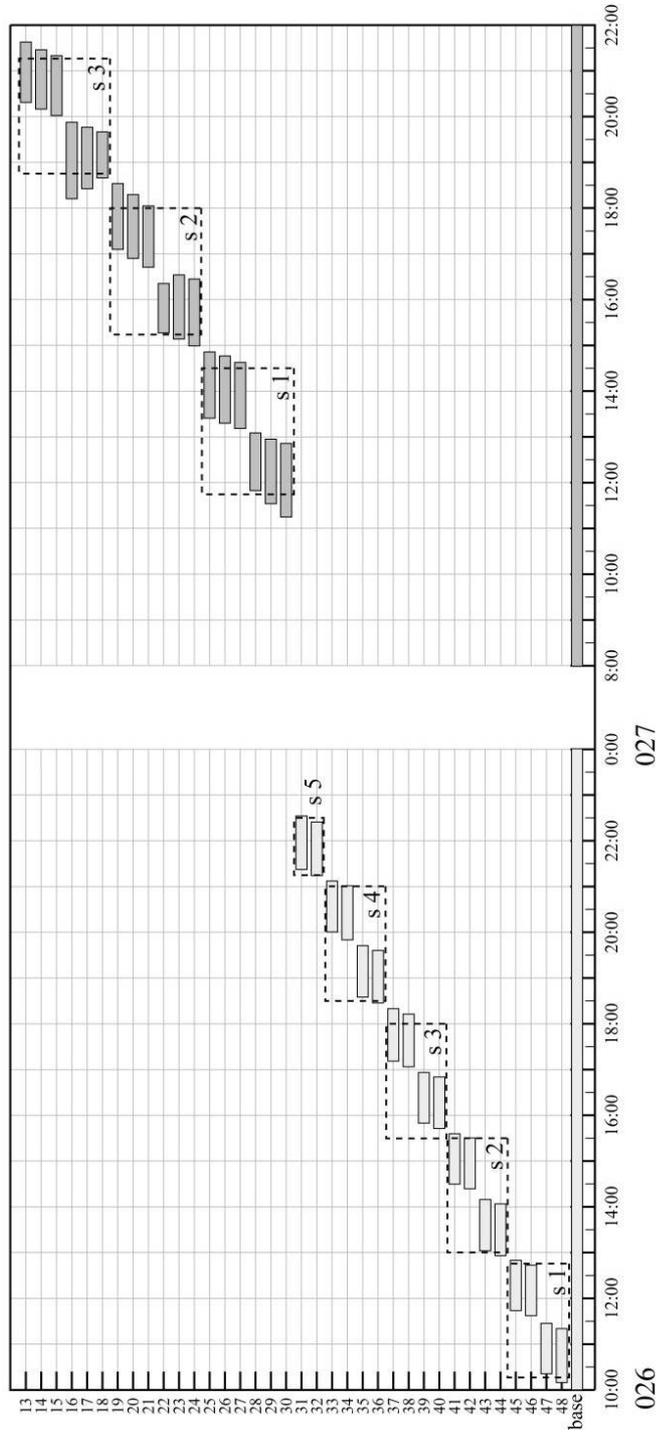
Geocentric Cartesian Coordinates WGS84 [meters]

P	X	Y	Z	
base	2092893.9653	-305702.9301	-5997108.4295	1
+/-	0.0861	0.0936	0.1906	
0401	2095770.9387	-308674.7884	-5995957.9581	1
+/-	0.0861	0.0936	0.1907	
0402	2095923.6782	-307684.4486	-5995955.4490	1
+/-	0.0861	0.0936	0.1907	
0403	2096075.7262	-306694.5185	-5995952.6851	1
+/-	0.0861	0.0936	0.1908	
0410	2095142.7475	-306551.9074	-5996284.4936	1
+/-	0.0861	0.0936	0.1907	
0411	2094990.7566	-307541.6068	-5996287.1998	1
+/-	0.0861	0.0936	0.1907	

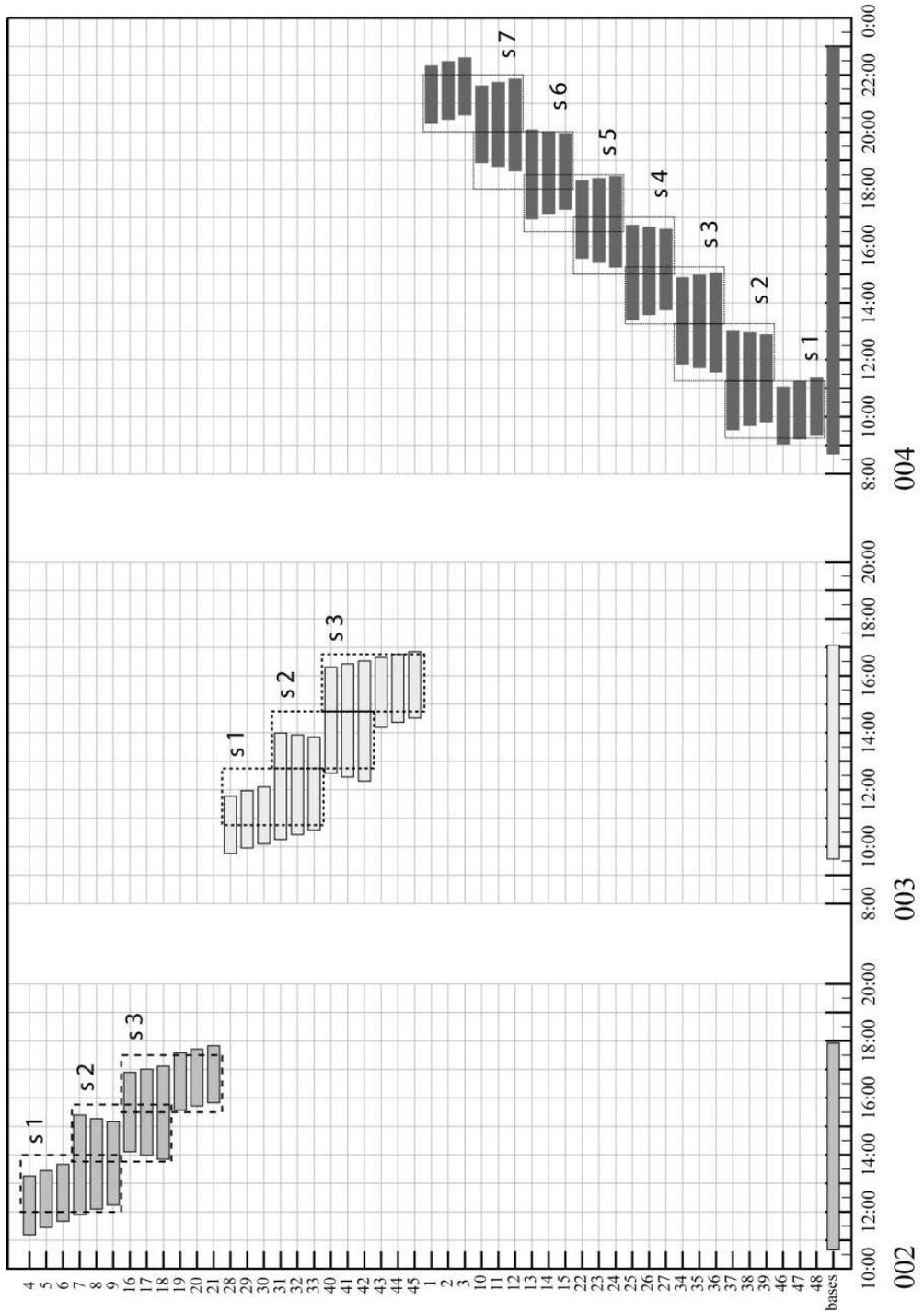
0412	2094838.1594	-308531.6702	-5996289.8406	1
+/-	0.0861	0.0936	0.1907	
0413	2093905.3639	-308387.9623	-5996621.3464	1
+/-	0.0863	0.0937	0.1918	

F

Beobachtungsplot der Nullmessung 2004 und Sessionseinteilung



Beobachtungsplot der Wiederholungsmessung 2005 und Sessioneinteilung



**Translationen in east [m] und north [m] sowie
durchschnittliche Geschwindigkeiten aus jahreszeitlichem Abstand (343.967 Tage) [m/d]**

Point	delta east [m]	delta north [m]	velocity [m/d]
base	42.7137	-148.3632	0.4488
0013	39.0251	-156.2299	0.4682
0014	38.0437	-153.2923	0.4592
0015	37.3731	-150.0144	0.4495
0016	36.9998	-146.3017	0.4387
0017	36.7341	-142.1811	0.4269
0018	36.4295	-137.5798	0.4138
0019	40.0963	-138.0219	0.4179
0020	40.5455	-142.4486	0.4306
0021	40.8390	-146.4413	0.4420
0022	41.1876	-150.0723	0.4524
0023	41.6976	-153.3528	0.4620
0024	42.5088	-156.2820	0.4709
0025	45.1589	-156.1266	0.4725
0026	44.9890	-153.4388	0.4649
0027	44.5173	-150.2057	0.4555
0028	44.0638	-146.6504	0.4452
0029	43.6255	-142.8568	0.4343
0030	43.0750	-138.6660	0.4221
0031	45.4403	-139.4383	0.4264
0032	46.1210	-143.3928	0.4379
0033	46.7869	-147.0725	0.4487
0034	47.3323	-150.4543	0.4585
0035	47.8384	-153.5894	0.4677
0036	48.4686	-156.4525	0.4762
0037	50.8759	-156.5867	0.4787
0038	50.1966	-153.7969	0.4703
0039	49.5688	-150.8491	0.4616
0040	48.8401	-147.5661	0.4519
0041	48.0904	-144.0612	0.4415
0042	47.1935	-140.2801	0.4303
0043	48.3899	-141.3535	0.4344
0044	49.4908	-144.8524	0.4450
0045	50.3928	-148.2134	0.4551
0046	51.2866	-151.3374	0.4646
0047	52.0590	-154.1218	0.4729
0048	52.8906	-156.8149	0.4811

H

2D-Strainellipsen im Punktfeld der Neumyer-III-Station

