

Geodätische Arbeiten auf den Filchner-Ronne- und Ekström-Schelfeisen 1979 bis 1982

Von Klaus Lindner und Bernhard Ritter*

Zusammenfassung: Zur Bestimmung des Verformungs- und Geschwindigkeitsverhaltens der Schelfeisoberflächen in der Nähe zweier deutscher Forschungsstationen auf dem Filchner-Ronne- und dem Ekström-Schelfeis wurden verschiedene geodätische Beobachtungsverfahren eingesetzt. Die relativen Lagen und Höhen von Objektpunkten für einen Bezugszeitpunkt wurden durch terrestrische Beobachtungen (Horizontal- und Vertikalwinkel, elektrooptische Strecken) erhalten und dienten nach Wiederholungsmessungen in Jahresabstand als Grundlage für die Analyse der Deformationen. Doppler-Satellitenmessungen (Navy Navigation Satellite System) ergaben die absolute Positionierung (B, L, H) ausgewählter Objektpunkte. Diese Dopplerbeobachtungen ermöglichten, gestützt durch Azimutmessungen (Theodolitkreisel, Sonnenbeobachtungen), die Lagerung und Orientierung der Objektpunktfelder. Nach einer Wiederholung dieser Beobachtungen konnten die Bewegungen der Objektpunkte (Driftrate, Azimut der Drift) und die Drehung von Flächenelementen (Rotationsrate) angegeben werden.

Aus Zenitwinkeln und Entfernungen wurden Höhenunterschiede und Refraktionskoeffizienten berechnet. Der Refraktionskoeffizient kann an Strahlungstagen Werte bis 3.0 (in extremen Fällen bis 5.0) annehmen. Strecken über 1 km Länge müssen für die trigonometrische Höhenübertragung unterteilt werden, wenn sich die durchschnittliche Standardabweichung für einen Höhenunterschied kleiner als 0.05 m ergeben soll. Zur Erfassung der räumlichen Heterogenität der Refraktion sollten in geeigneten Abständen Höhenunterschiede erhöhter Genauigkeit durch Streckenunterteilung und Mehrfachbeobachtung bestimmt werden.

Summary: The determination of the strain and velocity behaviour of the ice surface near the two German Antarctic Stations on Filchner/Ronne and Ekström ice shelves was performed by the use of various geodetic measuring techniques. The relative positions and heights of control points valid for reference data were deduced from terrestrial observations (horizontal and vertical angles electrooptical distances). After a second sampling of data, these values served as the basis for the deformation analyses. Doppler-Satellite-observations (Navy Navigation Satellite System) made absolute positioning (latitude, longitude, height) of special points possible. These Doppler-observations, supported by azimuth measurements (gyro-theodolite and sun observations) provided the datum of control networks (translations and orientation). After the repetition of these observations, the drift rates and azimuths of the control points as well as the rotation rates of the surface elements could be given.

From vertical angles and horizontal distances differences in height and refraction coefficients were calculated. On days without clouds the refraction coefficients increased by amounts of up to 3.0 (in extreme cases up to 5.0). Distances over 1 km have to be subdivided to reach a standard deviation level of a height difference better than 0.05 m. In order to determine the heterogeneity of refraction, some height differences should be measured with higher accuracy and by subdivision of distances.

Im Rahmen der Aufbauphase der deutschen Antarktisstationen auf dem Filchner-Ronne- und dem Ekström-Schelfeis von 1979 bis 1982 wurden die geodätischen Messungen in erster Linie zur Gewinnung folgender grundlegender Informationen angelegt:

- Verformung der Eisoberfläche zur Abschätzung der auf die Stationskonstruktionen einwirkenden Belastungen,
- Fließgeschwindigkeit und Fließrichtung des Schelfeises zur Festlegung des erforderlichen Abstandes der Stationen von der Eiskante,
- Verlauf und Höhe der Schelfeiskante als Beitrag zur Massenbilanz.

Die zur Erlangung dieser Informationen notwendigen Messungen eignen sich aber ebenfalls als ein Pilotprojekt zur

- Erprobung des erforderlichen Instrumentariums und der angewandten Meßverfahren unter polaren Bedingungen,
- Entwicklung von Modellen zur Bestimmung lokalen strains,
- Planung der Anlage großräumiger Messungen zur Erfassung der Dynamik und des Massenhaushaltes von Schelfeisen.

Für die in gewissen Zeitabständen zu wiederholenden Beobachtungen ist die dauerhafte Anlage von Objektpunktfeldern für den Geodäten unerlässlich. Bei dem Entwurf dieser Punktfelder, die gleichzeitig die

* Dr.-Ing. Klaus Lindner, Geodätisches Institut der Universität (TH), Englerstr. 7, 7500 Karlsruhe 1.
Dr.-Ing. Bernhard Ritter, Institut für Vermessungskunde der Technischen Universität, Pockelsstr. 4, 3300 Braunschweig.

Lage- und Höheninformationen tragen, unterliegt der Ingenieur auf Schelfeisen im allgemeinen keinen Beschränkungen, da die Eisoberfläche im ungestörten Fließbereich nahezu eben ist. Deformationsfiguren (z. B. Dreiecke, Vierecke, Pentagone), die keine allzu große Entfernung voneinander haben, können durch langgestreckte Polygonzüge (Traversen) verbunden werden. Es wird versucht, die Lagerung und Orientierung eines jeden Objektpunktfeldes so genau festzulegen, daß die signifikante Ableitung der o. a. Informationen möglich wird.

1. GEODÄTISCHE VERFORMUNGSMESSUNGEN AUF SCHELFEISEN

Objektpunkte auf Schelfeisen können durch möglichst gut senkrecht stehende Aluminiumrohre (Balisen) unterschiedlicher Länge vermarktet werden. Diese Balisen werden bei der Anlage eines Feldes oberflächengleich eingebracht und durch Anker stabilisiert. Alle folgenden terrestrisch-geodätischen Beobachtungen werden in Zwangszentrierung von Stativen vorgenommen. Ein Einfrieren der Stativfüße über Nacht in verdichtetem Schnee erhöht die Standsicherheit.

Die wichtigsten Meßverfahren werden nachstehend skizziert:

- Elektronische Entfernungsmessungen werden für Strecken im Entfernungsbereich bis rd. 2500 m mit elektrooptischem Entfernungsmesser oder einer Totalstation (elektron. Tachymeter) mit Standardabweichungen von $5 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$ durchgeführt. Bei längeren Strecken werden LASER-Entfernungsmesser oder auch Mikrowellenausrüstungen (MÖLLER & GERDAU 1981) eingesetzt, wobei bei Messungen mit Mikrowelle die Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit nicht so präzise möglich ist wie bei Lichtwelle. Maßstabsfrequenzkontrollen sollten bei allen Entfernungsmessern unter Temperaturen ausgeführt werden, die im Einsatzgebiet vorherrschen.
- Für Richtungsbeobachtungen werden in der Regel Feinmeßtheodolite verwendet, die die Bestimmung einer horizontalen Richtung aus z. B. drei Sätzen mit einer Standardabweichung von 0.4 mgon ermöglichen. Beim Einsatz von Totalstationen kann diese Standardabweichung im allgemeinen nicht erreicht werden.
- Zenitwinkelmessungen werden mit denselben Theodoliten und auch mit vergleichbaren Genauigkeiten durchgeführt. Zenitwinkel werden benötigt für die Höhenübertragung (s. Abschnitt 3) und für die Reduktion der gemessenen Schrägstrecken auf Horizontalstrecken. Totalstationen enthalten auch Reduktionsprogramme, die aus gemessenen Schrägstrecken und Zenitwinkeln Horizontalstrecken und Höhenunterschiede berechnen. Aus verschiedenen Gründen werden bei hohen Genauigkeitsanforderungen die Originaldaten protokolliert.
- Orientierungsmessungen werden entweder mit Theodolitaufsatzkreiseln oder durch astronomische Beobachtungen vorgenommen; darüber wird im Abschnitt 2 ausführlich berichtet. Magnetische Orientierungsmessungen in den Objektpunktfeldern wurden von 1979—1983 nicht ausgeführt.
- Sondermessungen führen zur Festlegung spezieller Punkte (z. B. Antennenstandpunkte der Doppler-Satellitenmessungen) und der topographischen Gegenstände im System des Objektpunktfeldes.

Die Balisen werden nach Beendigung der Messungsarbeiten durch Rohrstücke verlängert, damit sie infolge des zu erwartenden Schneeauftrages nicht verloren gehen.

Bei Messungen auf sich verformenden Eisoberflächen sind zwei Korrekturen an Beobachtungen anzubringen, die auf dem Lande in dieser Form nicht existieren:

- Verformungen der Schelfeisoberfläche müssen in Rechnung gestellt werden, wenn die Messungsdauer einen bestimmten Zeitraum übersteigt. Bei der realisierten Meßgenauigkeit und den Verformungsverhältnissen auf dem Ekström-Schelfeis (maximal $\dot{\epsilon}_1 = +15 \text{ ppm/Tag}$ und $\dot{\epsilon}_2 = -9 \text{ ppm/Tag}$) ist diese Zeitreduktion schon bei einer Messungsdauer von mehr als 4 Stunden erforderlich, um zuverlässige Angaben über die Meßgenauigkeit und die ausgewerteten Punktlagen treffen zu können. Möglichkeiten für die Bestimmung der Zeitreduktionsgrößen aus wiederholten Beobachtungen und aus der Interpolation von Strain-Parametern werden von KÖHLER (1982) angegeben.
- Beim Vergleich von Beobachtungselementen oder Koordinaten verschiedener Kampagnen, die auf

Balisen unterschiedlicher Höhe zentriert wurden, sind die Schiefstellungen der Balisen zu berücksichtigen. Am zweckmäßigsten werden in zwei zueinander rechtwinkligen Richtungen, die im Objektpunktfeld festgelegt sind, die Neigungskomponenten mit einem Klinometer (KÖHLER & RITTER 1984) gemessen. Zusammen mit der Länge des Rohrstückes lassen sich daraus die Zentrierungselemente Δy und Δx im Koordinatensystem des Punktfeldes berechnen. Die Standardabweichungen der Zentrierungselemente liegen bei einer Balisenverlängerung von 1 m bei 1 mm und damit innerhalb der Standardabweichungen der Strecken- und Richtungsmessungen. Durch einmalige Klinometermessungen werden allerdings Rohrkrümmungen und Änderungen der Baliseneigungen durch Windeinflüsse oder tiefenabhängige Geschwindigkeitsdifferenzen nicht erfaßt.

Nach Anbringung der Zeitreduktionen an Strecken- und Richtungsbeobachtungen können die Lagekoordinaten der Objektpunkte und ihre Fehler für einen Bezugszeitpunkt zwangsfrei ausgeglichen werden, wenn über Lagerung und Orientierung des Punktfeldes verfügt wird. Ebenso lassen sich innere Koordinaten und innere Koordinatenfehler durch eine freie Ausgleichung ermitteln, die den Vorzug hat, von der (willkürlichen) Lagerung und Orientierung des Netzes unabhängig zu sein. Bei der Ausgleichung von Netzteilen liegen die Halbachsen der mittleren Fehlerellipsen im Bereich einiger Millimeter, bei der Ausgleichung größerer Objektpunktfelder jedoch können die großen Halbachsen der Ellipsen von Punkten mit ungünstiger Netzgeometrie (z. B. Polygonzug) schnell anwachsen.

Die elastischen Verformungen, die ein Körper unter dem Einfluß äußerer Kräfte erleidet, bezeichnet man als Strain (WELSCH 1982). In randfernen Bereichen der Schelfeise sind dies hauptsächlich allseitige Dilatationen infolge des eigenen Gewichts, an den Rändern und bei einem Aufliegen auf dem Untergrund Scherverformungen. Zur Bestimmung des Strain-Tensors wird hier die Affintransformation herangezogen, die keine speziellen Anforderungen an eine Punktconfiguration stellt (KÖHLER 1981). Aus den ausgeglichenen Lagekoordinaten der mit Zeitabstand beobachteten Objektpunktfelder können — bei zwischenzeitlicher Verlängerung der Balisen nach Anbringung der Zentrierungselemente, bzw. nach der Ausgleichung zentrierter Beobachtungen — Straintensoren in ebenen Figuren berechnet und dargestellt

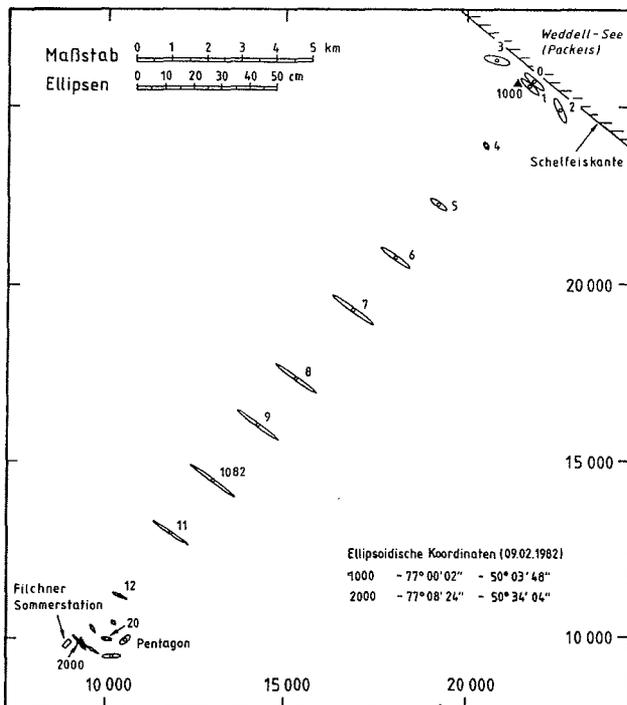


Abb. 1: Objektpunktfeld 1982 auf dem Filchner-Ronne-Schelfeis mit mittleren Fehlerellipsen.

Fig. 1: Geodetic network 1982 on Filchner/Ronne Ice Shelf with error ellipses.

werden. Der zeitliche Abstand sollte bei hohen Verformungsraten (1.2) einige Wochen, bei niedrigen Raten (1.1) ein Jahr betragen.

1.1 Filchner-Ronne-Schelfeis

1.1.1 Filchner-Sommerstation

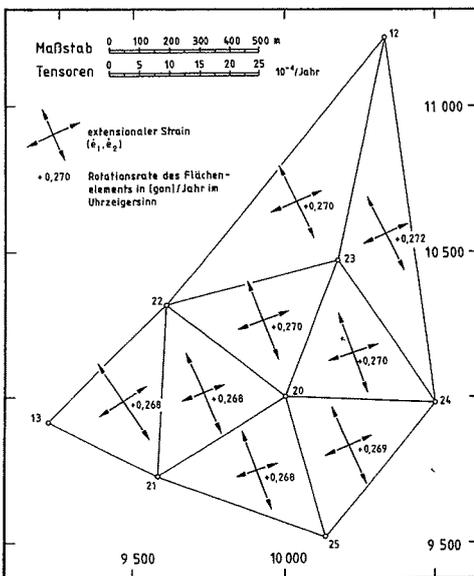
Das Objektpunktfeld wurde 1979/1980 angelegt und erstmals von MÖLLER & GERDAU (1981) vermessen. Die erste Wiederholungsmessung konnte 1981/82 ausgeführt werden (LINDNER & RITTER 1982). Das Objektpunktfeld 1982 und die mittleren Fehlerellipsen einer freien Netzausgleichung zeigt die Abb. 1. Die beiden Deformationsfiguren — in der Nähe der Filchner-Sommerstation und unmittelbar an der Eiskante — sind durch einen Polygonzug mit Seitenlängen von rd. 2000 m (Traverse) verbunden. Diese langen Seiten und z. T. mit dem elektronischen Tachymeter mit einer Standardabweichung $s_w = 2$ mgon ausgeführte Horizontalwinkelmessungen haben hohe Querfehler zur Folge, während die Längsfehler durch eine gute Streckenmeßgenauigkeit gering bleiben. Die ungünstige Fehlerfortpflanzung der Richtungsübertragung zeigt sich deutlich in den großen Halbachsen der Fehlerellipsen im mittleren Abschnitt des Polygonzuges. Die durchschnittlichen inneren Punktlagefehler von weniger als 5 mm bei getrennten Auswertungen der beiden Deformationsfiguren erlauben eine sehr gute Bestimmung der Straintensoren aus dem Zweijahresintervall 1980—82. Das ebenfalls für diese Berechnungen erforderliche Objektpunktfeld 1980 weist vergleichbare Genauigkeiten auf und ist bis auf einen Punkt (1082) identisch mit dem Feld 1982. Die Abb. 2 und 3 zeigen die Strainfelder an der Sommerstation und an der Eiskante. Die Straintensoren werden dargestellt durch die beiden Hauptverzerrungen. In den Abb. 2, 3, 6 und 7 ist zu beachten, daß die Pfeilspitzen nicht in der maßstäblichen Darstellung der Verzerrungsraten enthalten sind, sondern lediglich als Symbol für Dehnung oder Stauchung gelten. Dabei handelt es sich um extensionalen Strain, also die auf frei schwimmendem Schelfeis übliche allseitige Dehnung. Während die Hauptverzerrungen im Pentagon durchschnittlich

$$\dot{\epsilon}_1 = +5.1 \cdot 10^{-4}/\text{Jahr} \quad \dot{\epsilon}_2 = +2.2 \cdot 10^{-4}/\text{Jahr}$$

betragen, ergeben sich an der Eiskante für $\dot{\epsilon}_1$ signifikant geringere Werte

$$\dot{\epsilon}_1 = +2.8 \cdot 10^{-4}/\text{Jahr} \quad \dot{\epsilon}_2 = +2.2 \cdot 10^{-4}/\text{Jahr}.$$

Die Hauptverzerrungsrichtungen variieren im Pentagon zwischen 162 und 178 gon und an der Eiskante zwischen 179 und 201 gon. Diese Richtungen sind an der Eiskante wegen der Annäherung der Parameter $\dot{\epsilon}_1$ und $\dot{\epsilon}_2$ und der z. T. ungünstigen Geometrie der Flächenelemente nicht mehr so genau anzugeben wie im Pentagon.



Die Abnahme der Deformationswerte längs der Traverse verläuft nicht linear, auf den letzten 4 km vor der Eiskante ist die Änderung am größten. Funktionen der Straintensoren, wie Flächenverzerrung ($\dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2$) und die ohnehin geringe maximale Scherung ($\dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_2$), nehmen ebenfalls deutlich zur Eiskante hin ab.

Abb. 2: Deformationsfigur auf dem Filchner-Ronne-Schelfeis (Zentralpunkt 20), Straintensoren und Rotationsraten aus der Zweijahresperiode 1980—1982.

Fig. 2: Deformation figure on Filchner/Ronne Ice Shelf (Central-point 20), strain and rotation rates from the two year period 1980—1982.

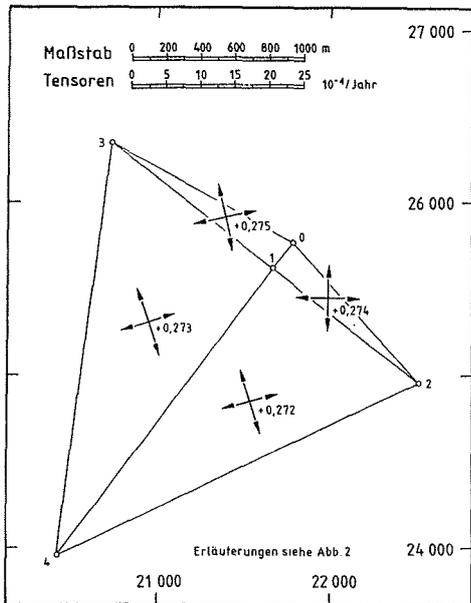


Abb. 3: Deformationsviereck auf dem Filchner-Ronne-Schelfeis (Eiskante), Straintensoren und Rotationsraten aus der Zweijahresperiode 1980—1982.

Fig. 3: Deformation quadrangle on Filchner/Ronne Ice Shelf (ice front), strain and rotation rates from the two year period 1980—1982.

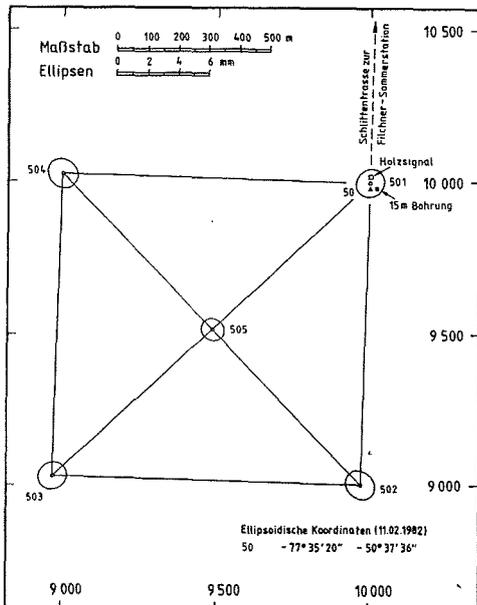
1.1.2 Außenstation Filchner-Paradies

50 km südlich der Filchner-Sommerstation wurde 1982 eine Deformationsfigur in der Form eines Quadrats mit 1000 m Seitenlänge und Zentralpunkt abgesteckt und vermessen. Der durchschnittliche innere Punktlagefehler für die Bestimmung des Objektpunktfeldes liegt bei 1.6 mm und bietet die Gewähr einer guten Grundlage für spätere Wiederholungsmessungen zum Zwecke der Strainbestimmung (Abb. 4). Die Schlittentrasse von der Filchner-Sommerstation zum Punkt 501 wurde als Gerade abgesteckt und in Kilometerabständen ausgeflaggt.

1.2 Ekström-Schelfeis

Die ersten Balisen dieses Objektpunktfeldes wurden 1980 als Dreieck 51, 52, 53 mit Zentralpunkt

50 eingebracht und vermessen (MÖLLER & GERDAU 1981). 1981 erhielt das Objektpunktfeld während der Aufbauphase der Georg von Neumayer-Station die in der Abb. 5 dargestellte Form. Für die Wiederholungsmessung 1982 standen nur wenige Beobachtungstage zur Verfügung; trotzdem konnte eine zufriedenstellende Punktgenauigkeit erreicht werden. Die mittleren Fehlerellipsen — hauptsächlich der Traversenpunkte — sind deutlich kleiner als bei dem Lagenetz 1982 auf dem Filchner-Ronne-Schelfeis. Dieses Ergebnis ist vor allen Dingen auf den zusätzlichen Einsatz eines Feinmeßtheodolits, die günstigere Netzkonfiguration und die geringere Ausdehnung des Objektpunktfeldes zurückzuführen.



In zwei Gebieten lassen sich die Strainverhältnisse aus den im Jahresabstand beobachteten Objektpunktfeldern herleiten. Einmal in der Nähe der Georg von Neumayer-Station in dem Deformationspentagon (Abb. 6), und zum anderen 3 km nordöstlich um den Zentralpunkt 50 (Abb. 7). In beiden Arealen zeigen sich deutlich Scherverformungen mit extensionalem Strain unter dem Azimut der Traverse 120 — 121 — 110 — 50 und kompressionalem Strain rechtwinklig dazu. Ursache hierfür ist die Existenz eines „Ice-Rise“ (Bereich mit großflächigem Aufliegen des Schelfeises auf dem Untergrund), etwa 9 km nordwestlich der Station (KÖHLER & RITTER 1984). Im Bereich des Pentagons betragen die durchschnittlichen

Abb. 4: Objektpunktfeld 1982 der Außenstation „Filchner-Paradies“ mit mittleren Fehlerellipsen.

Fig. 4: Geodetic network 1982, field station „Filchner-Paradies“ with error ellipses.

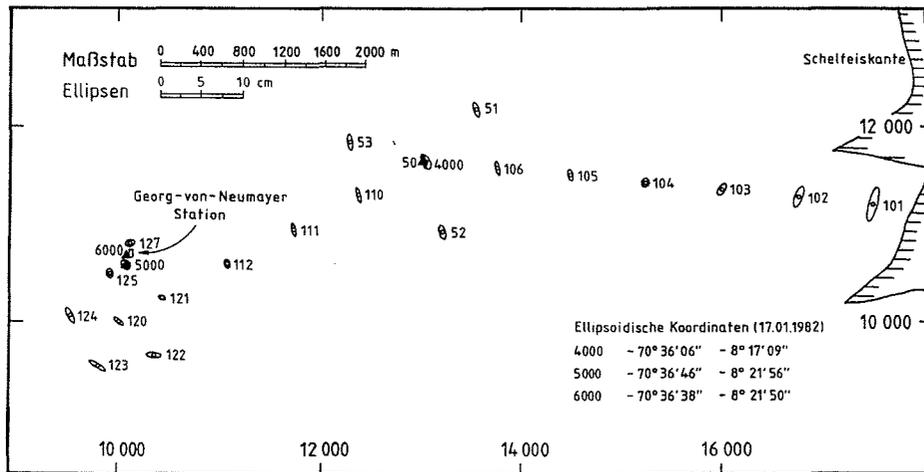


Abb. 5: Objektpunktfeld 1982 auf dem Ekström-Schelfeis mit mittleren Fehlerellipsen.

Fig. 5: Geodetic network 1982 on Ekström Ice Shelf with error ellipses.

Werte für die Hauptverzerrung

$$\dot{\epsilon}_1 = +5.4 \cdot 10^{-3}/\text{Jahr} \quad \dot{\epsilon}_2 = -3.3 \cdot 10^{-3}/\text{Jahr}.$$

Die Abnahme bis zum Zentralpunkt 50 ist bemerkenswert

$$\dot{\epsilon}_1 = +2.9 \cdot 10^{-3}/\text{Jahr} \quad \dot{\epsilon}_2 = -2.5 \cdot 10^{-3}/\text{Jahr}.$$

Die Dehnungen sind also um eine Zehnerpotenz größer als die extremen Dehnungen im Bereich des Feldes auf dem Filchner-Ronne-Schelfeis. Die Kompressionen nehmen mit $-3 \cdot 10^{-3}/\text{Jahr}$ ebenfalls eine beträchtliche Größenordnung an. Die Hauptverzerrungsrichtungen verlaufen beinahe parallel unter 61—63 gon im Pentagon und 65—68 gon im Gebiet des Punktes 50. Die Flächenverzerrungen ($\dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2$) variieren stark zwischen $+1.9 \cdot 10^{-3}/\text{Jahr}$ und $+0.4 \cdot 10^{-3}/\text{Jahr}$. Die maximale Scherung ($\dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_2$) beträgt mit

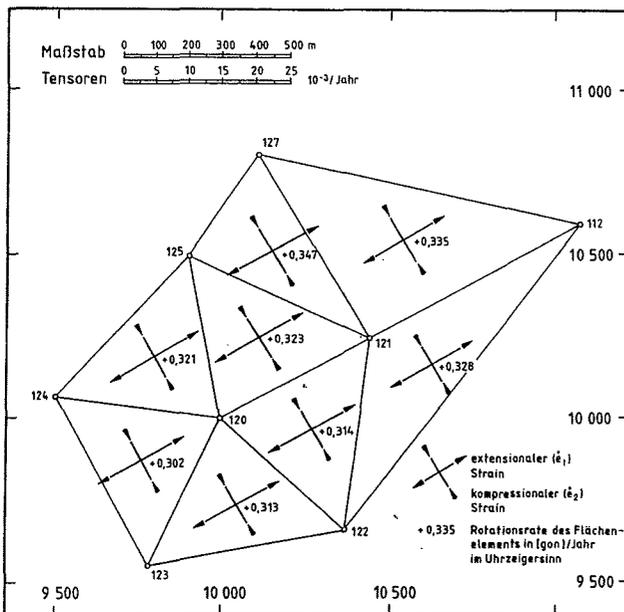


Abb. 6: Deformationsfigur auf dem Ekström-Schelfeis (Zentralpunkt 120), Straintensoren und Rotationsraten aus der Jahresperiode 1981—1982.

Fig. 6: Deformation figure on Ekström Ice Shelf (central stake 120), strain and rotation rates from period 1981—1982

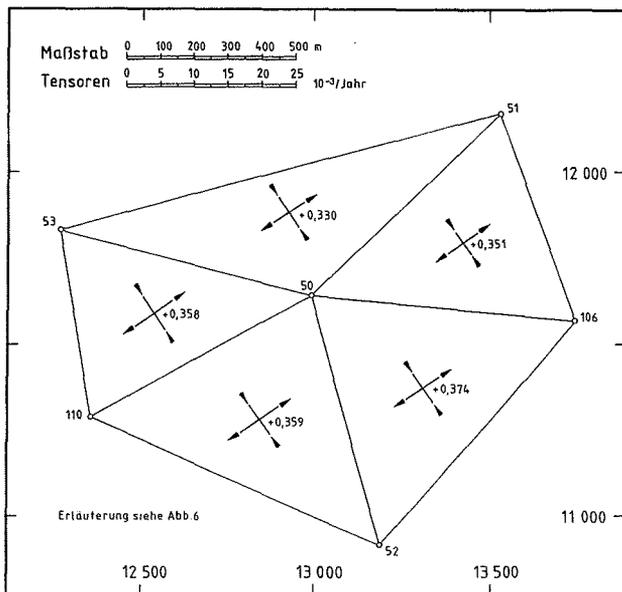


Abb. 7: Deformationsfigur auf dem Ekström-Schelfeis (Zentralpunkt 50), Straintensoren und Rotationsraten aus der Jahresperiode 1981—1982.

Fig. 7: Deformation figure on Ekström Ice Shelf (central stake 50), strain and rotation rates from period 1981—1982.

$8.7 \cdot 10^{-3}/\text{Jahr}$ bzw. $5.4 \cdot 10^{-3}/\text{Jahr}$ sogar das Einhundertfache der Scherung an der Eiskante des Filchner-Ronne-Schelfeises.

2. BESTIMMUNG ABSOLUTER BEWEGUNGEN AUF SCHELFEISEN

Nachdem im ersten Abschnitt über Verformungsmessungen auf Schelfeisen unter Einsatz terrestrisch-geodätischer Techniken berichtet wurde, sollen hier Möglichkeiten zur Bestimmung von Fließgeschwindigkeiten und Fließrichtungen aufgezeigt werden.

Für die Objektpunktfelder auf den beiden bearbeiteten Schelfeisgebieten besteht nicht die Möglichkeit eines unmittelbaren Anschlusses an unveränderliche Festpunkte. Die Entfernung zu eisfreiem Fels beträgt mehrere hundert Kilometer. Astronomische Verfahren, die in diesen Gebieten bis vor etwa zwei Jahrzehnten die einzige Möglichkeit zur absoluten Lagebestimmung boten, sind hier mit Schwierigkeiten behaftet, die nur schwer überwunden werden können:

- Während der Sommermonate steht die Sonne stetig über dem Horizont und bei Tageslicht beschränken sich geodätisch-astronomische Ortsbestimmungen daher im allgemeinen auf die Sonne. Sternbeobachtungen bei Tage erfordern nicht nur einen klaren Himmel; sie sind nur an wenigen besonders hellen Sternen in größerem Sonnenabstand möglich, wobei der Aufwand des Aufsuchens des Sternes nicht unerheblich ist (STAIGER & ZICK 1984).
- Sicht- und Wetterbedingungen lassen oft über Zeiträume von vielen Tagen keinerlei astronomische Messungen zu.
- Die Genauigkeit, die durch Sonnenbeobachtungen allenfalls erreichbar ist, liegt im Bereich von 0.1 Bogenminute in Breite und Länge und ist daher zur Bestimmung absoluter Bewegungen — auch mit Wiederholungsmessungen nach Jahresfrist — nicht ausreichend geeignet.

Von Anfang an wurde daher die Positionsbestimmung unter Einsatz von Doppler-Satellitenverfahren durchgeführt, wobei zwei Empfangsanlagen Magnavox MX-1502 zur Verfügung standen (GERDAU & SCHENKE 1984, GERDAU et al. 1981). Dieses Beobachtungsverfahren verwendet z. Zt. fünf Satelliten des Navy Navigation Satellite System (NNSS), die auf polnahen Bahnen die Erde in etwa 1100 km Höhe

in rund 110 Minuten umkreisen. Meß- und Auswertverfahren wurden u. a. von STANSELL (1968) beschrieben. Erhebliche Genauigkeitssteigerungen in den letzten 15 Jahren und die Entwicklung von speziellen Empfängern für geodätische Aufgaben ermöglichten Positionsgenauigkeiten, die schon nach relativ kurzer Meßzeit in den Meterbereich fallen. Die Empfänger arbeiten sicht- und wetterunabhängig; der Zeitbedarf für Aufstellung und Wartung ist niedrig im Vergleich mit astronomischen Meßverfahren. Koordinaten (B, L, H) und deren Standardabweichungen werden bereits während des Empfanges von dem internen Mikroprozessor berechnet und angezeigt; die spätere Auswertung der registrierten Signale (post-processing) — eventuell mit verbesserten Satellitenbahndaten — erfordert einen vergleichsweise hohen Aufwand (GERDAU & SCHENKE 1984).

Die Lagerung von terrestrisch bestimmten Punktfeldern wird hier ermöglicht durch die zusätzliche Koordinatenbestimmung von Objektpunkten nach dem Doppler-Satellitenverfahren. Dabei besteht ein erheblicher Genauigkeitsunterschied zwischen den relativen und absoluten Messungen. Eine Zeitabhängigkeit der relativen terrestrischen Messungen, die durch die Verformung der Schelfeisoberfläche verursacht wird, ist natürlich auch bei den absoluten Beobachtungsverfahren zu beachten. Deshalb sind auch die Koordinaten auf denselben Bezugszeitpunkt zu reduzieren. Wenn ein Objektpunktfeld mindestens zwei Stationen enthält, deren absolute Koordinaten für den Bezugszeitpunkt bestimmt wurden, kann auch die Orientierung des gesamten Feldes angegeben werden. Die Standardabweichung der Orientierungsrichtung ist außer von den Genauigkeiten der Koordinaten der Punkte auch von deren Entfernung und von der Qualität der Richtungsübertragung zwischen den beiden Punkten abhängig.

Kleine Punktfelder (Deformationsfiguren) haben in der Regel nur eine absolut bestimmte Station; die Orientierung dieser Netze muß also mit anderen Methoden erfolgen.

Eine relativ wetterunabhängige Möglichkeit, um Azimute zu bestimmen, bieten Vermessungskreisel. Die Richtkraft dieser nordsuchenden Kreisel beträgt nach SCHWENDENER (1966)

$$R_E = \Theta \cdot \omega_K \cdot \omega_E \cdot \cos \Phi \cdot \sin A$$

mit Θ = Drehmasse des Kreiselrotors

ω_K = Rotationsgeschwindigkeit des Kreiselrotors

ω_E = Rotationsgeschwindigkeit der Erde

Φ = geographische Breite

A = Winkel zwischen Kreiselimpulsachse und der Meridianebene.

Sie ist abhängig vom Kosinus der Breite und beträgt daher in den antarktischen Arbeitsgebieten nur noch etwa die Hälfte der Richtkraft unter mittleren Breiten. Die Frage war, ob mit diesem reduzierten Richtmoment noch befriedigende Ergebnisse zu erzielen sind.

Eine Verlängerung der Schwingungszeit

$$T \approx \frac{T_0}{\sqrt{\cos \Phi}}$$

(T_0 = Schwingungszeit am Äquator) in hohen Breiten führt zu einer deutlichen Ausdehnung der Messungszeiten.

In Alaska wurden von MENDENHALL (1981) verschiedene Aufsatzkreisel eingesetzt. Seine Auswertungen zeigten eine starke Zunahme der Standardabweichungen von 0.005 gon unter 61° N auf 0.009 gon unter 71° N. Zwei Fragen zum Einsatz von Vermessungskreiseln auf Schelfeisen waren vor dem ersten Einsatz 1980 völlig offen:

- Ist eine Beobachtung bei den beinahe ständig herrschenden hohen Windgeschwindigkeiten überhaupt sinnvoll möglich?
- Hat der vor und nach einer Forschungsreise auf einer Verbindung mit bekanntem Azimut bestimmbarer Eichwert des Systems Theodolit und Aufsatzkreisel eine ausreichende Konstanz?

Nach drei Kampagnen mit Kreismessungen und den Vergleichen mit auf anderen Wegen erzielten Azimuten kann die Genauigkeit der durch Kreismessungen bestimmten Azimute abgeschätzt werden (2.1).

Als brauchbares Meßverfahren mit Aufsatzkreislern hat sich die Beobachtung der Zeiten von Durchgängen der Kreiselmarke durch die Skalenmitte bei gut nach Norden orientiertem Fernrohr ($\pm 0.2^\circ$) bewährt.

Ergänzend wurde ab 1981/82 durch die Beobachtung von Richtungen und Zenitwinkeln zur Sonne eine weitere, von den beiden vorhergehend angesprochenen Verfahren unabhängige Meßmethode herangezogen. Diese Methode kann in Verbindung mit simultanen Dopplersatellitenmessungen besonders dadurch erfolgreich angewendet werden, daß Breite, Länge und Uhrzeit als Eingangswerte für die Auswertung der Sonnenbeobachtungen ausreichend genau zur Verfügung stehen. Die Beobachtung des Sonnenrandes geschieht mit dem für die Lagemessung eingesetzten Feinmeßtheodoliten, wobei im allgemeinen ein Sonnenfilter und Steilsichtprismen als Zubehör eingesetzt werden müssen. Nach Beobachtung von Richtungen und Zenitwinkeln zur Sonne und den dazugehörigen Uhrzeiten kann das Azimut zur Sonne entweder aus Sonnenhöhen berechnet werden

$$\cos a = \frac{\sin \phi \cdot \cos z - \sin \delta}{\cos \phi \cdot \sin z}$$

mit ϕ = Breite, z = Zenitwinkel, δ = Deklination der Sonne

oder als Zeitazimut

$$\cot a = \frac{\sin \phi \cdot \cos t - \cos \phi \cdot \tan \delta}{\sin t}$$

mit t = Stundenwinkel der Sonne

Die gleichzeitige Messung der horizontalen Richtung zu einer Mire des Objektpunktfeldes ermöglicht die Azimutübertragung in das Netz.

Eine Fehlerbetrachtung (JORDAN et al. 1970: 661—672) zeigt in einer Abschätzung, daß die Genauigkeiten beider Verfahren bei zunehmender Breite abnehmen. Der Genauigkeitsverlust ist im allgemeinen wesentlich deutlicher im ersten Verfahren; bei der zweiten Methode ist eine präzise Zeitmessung außerordentlich wichtig.

Eine weitere Methode zur Bestimmung der Orientierung, die Ende Februar 1982 nach Einsetzen der Dunkelheit benutzt wurde, ist die Beobachtung von Almukantaratdurchgängen (gleichen Höhenwinkeln) eines Gestirns vor und nach dem Durchgang durch den Meridian bei gleichzeitiger Notierung der Horizontalkreisablesungen. Der Mittelwert dieser beiden Ablesungen bezeichnet den Meridian. Dieses sehr einfache Verfahren, bei dem weder Länge, Breite, Zeit noch Gestirn bekannt sein müssen, ist allerdings zeitaufwendig, da in der Nähe des Meridians die scheinbare Bahn sehr flach verläuft. Um brauchbare Ergebnisse zu erzielen, sollte der zeitliche Abstand vom Meridiandurchgang mehr als eine Stunde betragen. Die Genauigkeit dieser Näherungsmethode läßt sich steigern, indem nicht nur an einem Almukantarat, sondern an mehreren gemessen wird.

Für alle Orientierungsmessungen auf dem fließenden Eis gilt es, wie schon zuvor für relative und absolute Lagemessungen, die Änderungen mit der Zeit durch eine Zeitreduktion in Rechnung zu stellen.

2.1 Filchner-Ronne-Schelfeis

Für die Bestimmung der absoluten Bewegungen im Objektpunktfeld auf dem Filchner-Ronne-Schelfeis wurden 1980 und 1982 auf den Punkten 1000 und 2000 jeweils während eines längeren Zeitraumes (5—22 Tage) Dopplerbeobachtungen registriert. Über diese Beobachtungen, sowie deren Auswertungen, berich-

Messungsgebiet Epoche	Bezugs- zeitpunkt	Bezugs- meridian durch Punkt	zeitinterpolierte Dopplerkoordinaten				terr. Lagenetz Strecke ΔS	Strecke aus Trans- lokations- lösung ΔS
			A E	B B	L L	Ellips. Strecke Ellips. Azimut		
Filchner- Ronne 1980	30. 1. 1980 0h	1000	1000	-77°00'38"76	-50°08'09"43	20 036.75 m	20 035.95 m	20 036.18 m
			2000	-77°09'04"51	-50°38'07"46	242.4948 gon	-0.80 m	-0.23 m
Filchner- Ronne 1982	9. 2. 1982 0h	1000	1000	-77°00'01"77	-50°03'47"90	20 042.07 m	20 046.74 m	20 046.57 m
			2000	-77°08'24"20	-50°34'04"18	243.0358 gon	+4.67 m	-0.17 m
Ekström 1981	14. 2. 1981 6h	4000	4000	-70°36'10"79	8°17'11"36	3 123.38 m	3 123.37 m	
			5000	-70°36'44"67	8°21'57"00	278.1299 gon	-0.01 m	
Ekström 1982	17. 1. 1982 0h	4000	4000	-70°36'06"49	8°17'09"21	3 134.40 m	3 134.69 m	
			5000	-70°36'40"16	8°21'56"21	278.3558 gon	+0.29 m	

Tab. 1: Vergleiche der aus terrestrischen und Doppler-Satellitenbeobachtungen abgeleiteten ellipsoidischen Strecken.

Tab. 1: Comparison of ellipsoidic distances derived from terrestrial and Doppler-satellite-measurements.

ten GERDAU & SCHENKE (1984). Ausgehend von den dort und den in GERDAU et al. (1981) mitgeteilten Positionen aus Gruppenlösungen und weiteren direkt übergebenen Koordinaten, konnten die in Tab. 1 zeitinterpolierten Dopplerkoordinaten berechnet werden. Als Bezugszeitpunkte wurden dabei die Daten der terrestrischen Lagenetzgleichungen gewählt. Im post-processing wurden die Broadcast-Ephemeriden (vom Satelliten ausgesandte Informationen über die jeweilige Bahn) für die Gruppenlösungen im Einzelstationsmodus und für Translokationslösungen verwendet. In einigen Ausnahmefällen konnten im post-processing zusätzlich die Präzisen Ephemeriden (nachträglich verbesserte Bahndaten) verwendet werden (z. B. in der Translokationslösung Filchner 1982). Die Tab. 1 läßt einen Vergleich der ellipsoidischen Strecken zwischen absolut bestimmten Objektpunkten aus Dopplerkoordinaten und terrestrischen Messungen zu. Die maximalen Streckendifferenzen betragen 4,7 m, sind jedoch mit 0,23 m erheblich geringer, wenn Translokationslösungen zum Vergleich benutzt werden. Aus den zeitinterpolierten Dopplerkoordinaten wurden die ellipsoidischen Azimute berechnet, die bei der Orientierung des Festpunktfeldes mit eingeführt wurden. Tab. 2 enthält die Größen der absoluten Punktbewegungen, die Driftgeschwindigkeit pro Jahr und das Azimut der Drift. Die Standardabweichung für die Geschwindigkeit kann mit 1 bis 2 m/Jahr abgeschätzt werden, für die Azimute ist bei den vergleichsweise hohen Geschwindigkeitsraten 0,05 bis 0,10 gon/Jahr als Fehlermaß anzunehmen.

Seit 1980 wird ein Aufsatzkreisel Wild GAK-1 zur Bestimmung von Azimuten in den Objektpunktfeldern eingesetzt. Die ersten Eichwertbestimmungen für diesen Kreisel konnten erst in den Monaten Juni bis November 1980 in Braunschweig vorgenommen werden (Abb. 8). Vorher waren auf dem Filchner-Ronne-Schelfeis (an 2 Tagen) und auf dem Ekström-Schelfeis (1 Tag) Kreismessungen ausgeführt worden. Der

Messungsgebiet Zeitraum	Punkt	Gesamtdrift Drift/Jahr	Azimut [gon]
Filchner	1000	2155.0 m	64.30
		1061.4 m	
1980—1982	2000	2093.2 m	59.29
		1031.0 m	
Ekström	4000	135.1 m	10.48
		146.4 m	
1981—1982	5000	140.0 m	3.70
		151.7 m	
Ekström	6000	147.9 m	2.22
		160.2 m	

Tab. 2: Absolute Punktbewegungen aus Doppler-Satellitenbeobachtungen.

Tab. 2: Movements of control-points derived from Doppler-satellite-measurements.

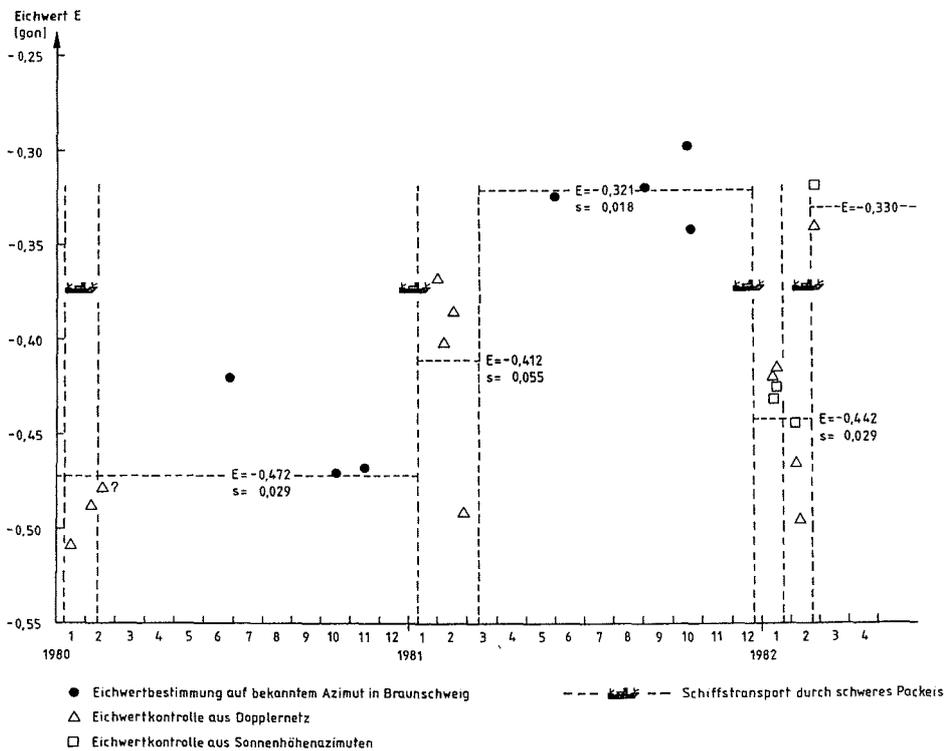


Abb. 8: Eichwertdiagramm Aufsatzkreisel Wild GAK-1 Nr. 25 424, 1980–1982.

Fig. 8: Diagram of calibration values Gyro-Theodolite Wild GAK-1 Nr. 25 424, 1980–1982.

erste Eichwert, bestimmt aus 3 Messungen auf einem bekanntem Azimut und 3 Messungen in der Antarktis, für den Vergleichsazimute aus Dopplerkoordinaten bestimmt wurden, beträgt $E = -0.472$ gon mit der Standardabweichung s_A einer Messung von 0.029 gon. Im folgenden Einsatz auf dem Ekströmschelfeis wurde aus Vergleichsazimuten der Wert $E = -0.412$ gon bestimmt mit einem $s_A = 0.055$ gon. Auch die folgenden Eichwertkontrollen zeigen, daß die in Braunschweig bestimmten Eichwerte keine Gültigkeit für die zeitlich vorhergegangenen oder nachfolgenden Messungen auf dem Eis besitzen. Der Schwankungsbreite aus den beiden in Braunschweig bestimmten Eichwerten -0.472 und -0.321 gon entspricht auch die Variation der Eichwertkontrollen in der Antarktis. Nach den Kreismessungen 1982 wurde der Aufsatzkreisel nicht mit zurückgebracht, sondern verblieb zur Stützung geophysikalischer Untersuchungen in der Georg-von-Neumayer-Station. Es ist jedoch ersichtlich, daß Messungen, die während eines Aufenthaltes auf dem Eis ausgeführt wurden, im allgemeinen eine geringere Varianz aufweisen. Die Vermutung liegt nahe, daß die starken Veränderungen des Eichwertes durch den harten Schiffstransport durch schweres Packeis, die Ent- bzw. Beladearbeiten an der Eiskante oder durch rauhe Schlittentransporte hervorgerufen wurden. Aus den Werten, denen die Abb. 8 zugrunde liegt, kann abgeleitet werden, daß die Standardabweichung für die Angabe eines Azimuts durch eine Kreismessung ohne häufige Kontrolle des Eichwertes in der Größenordnung von 0.06 gon liegt, während durch die Ausführung von Vergleichsmessungen eine Standardabweichung im Bereich von 0.03 – 0.05 gon realistisch erscheint. Für manche Aufgaben mag die erstgenannte Genauigkeit durchaus ausreichend sein (z. B. für die Angabe der Hauptverzerrungsrichtungen), für die präzise Orientierung eines Festpunktfeldes, die Berechnung der Richtungsänderung einer bestimmten Punktverbindung oder die Angabe von Rotationsraten von Flächenelementen ist diese Standardabweichung jedoch nicht zufriedenstellend.

Im Februar 1982 wurde im Objektpunktfeld des Filchner-Ronne-Schelfeises eine Sonnenbeobachtung zum Zwecke der Azimutbestimmung durchgeführt. Das Ergebnis dieser Messung enthält die Tab. 3, in der alle Auswertungen, die zur Orientierung der Objektpunktfelder 1980 und 1982 geführt haben, zusammengestellt wurden. Die Auswertungen sind jeweils auf den Bezugszeitpunkt zeitreduziert und durch Anbringung der Meridiankonvergenz auf den Bezugsmeridian durch den Punkt 1000 gebracht, um als Richtungswinkel in einem ebenen Lagenetz verwendet werden zu können. Die Standardabweichungen in Tab. 3 führten zu den Gewichtsfestlegungen für die Ausgleichungen. Die Varianzkomponenten der Azimutmessungen nach den Ausgleichungen lassen die Schätzungen der Varianzen plausibel erscheinen (a priori $s_A = 1.0$; 1980: $s_A = 0.7$; 1982: $s_A = 0.6$).

Nach den endgültigen Orientierungen der Lagenetze Filchner kann aus dem Unterschied der Richtungswinkel zweier in beiden Epochen beobachteten Objektpunkte die Richtungsänderung bestimmt werden, oder anschaulicher durch Affintransformation für jedes Flächenelement die Rotation/Jahr. Die Winkelwerte der Rotationsraten sind zusätzlich in den Abb. 2 und 3 für die Bereiche Pentagon und Eiskante enthalten. Dabei ergibt sich ein sehr homogenes Rotationsverhalten für diese Bereiche mit jeweils 0.27 gon/Jahr im Uhrzeigersinn für alle untersuchten Flächenelemente.

2.2 Ekström-Schelfeis

Absolute Bewegungen im Objektpunktfeld auf dem Ekström-Schelfeis wurden durch Doppler-Satellitenmessungen auf den Punkten 4000, 5000 und 6000 erfasst (Abb. 5). GERDAU & SCHENKE (1984) berichten über die Beobachtungen auf 4000 und 5000 während der Expedition 1979/80, 1980/81 und 1981/82, ihre Feldauswertungen und das post-processing. Aus den dort veröffentlichten Ergebnissen und weiteren Resultaten konnten die zeitinterpolierten Dopplerkoordinaten der Tab. 1 berechnet werden. Bei einem Vergleich der ellipsoidischen Strecken aus Satelliten- und terrestrischen Messungen fallen die außergewöhnlich geringen Streckendifferenzen (1981: -0.01 m; 1982: 0.29 m) der beiden etwa 3.1 km voneinander entfernten Objektpunkte auf. Diese gute Übereinstimmung ist als zufällig einzustufen. Translokationslösungen sind entweder nicht möglich, da nur ein Empfänger im Einsatz war (1981) oder wurden nicht berechnet. Tab. 2 enthält die Angaben über die absoluten Punktbewegungen. Auch hier ist die Standardabweichung für die Geschwindigkeit mit 1 bis 2 m/Jahr abschätzbar, die Standardabweichung s_A für das Azimut der Drift dagegen ist verhältnismäßig groß (ca. 0.5 gon), da die zurückgelegte Distanz pro Jahr nur 0.15 km beträgt.

Alle bisher diskutierten Doppler-Satellitenmessungen zur absoluten Punktbestimmung wurden in den

Epoche Bezugszeitpunkt	Azimut von	Azimut nach	Methode	Datum	beobacht. Azimut [gon]	Meridian- konvergenz [gon]	Zeitreduktion [gon]	Azimut/Rich- tungswinkel [gon]	Standard- abweichung [gon]	Bemerkungen
1980 30. 1.; 0h	1000	2000	Doppl.-Sat. MX 1502	30. 1. 80	242.4948	0	0	242.4948	0.005	
Bezugsmeridian durch Punkt	20	12	Kreisel GAK 1	19. 1. 80	17.2955	-0.5084	+0.0076	16.7947	0.05	E = -0.472
	1000	01	Kreisel GAK 1	9. 2. 80	240.3804	-0.0003	-0.0081	240.3720	0.05	E = -0.472
1982 9. 2.; 0h	1000	2000	Doppl. Sat. MX 1502	9. 2. 82	243.0358	0	0	243.0358	0.005	
Bezugsmeridian durch Punkt	13	12	Kreisel GAK 1	6. 2. 82	45.7836	-0.5482	+0.0024	45.2378	0.05	E = -0.442
	1000	13	Sonnenhöhen DKM 2	7. 2. 82	45.7815	-0.5482	+0.0016	45.2349	0.025	

Tab. 3: Endgültige Orientierung der Objektpunktfelder auf dem Filchner-Ronne-Schelfeis.

Tab. 3: Final orientation of the geodetic-networks on Filchner/Ronne Ice Shelf.

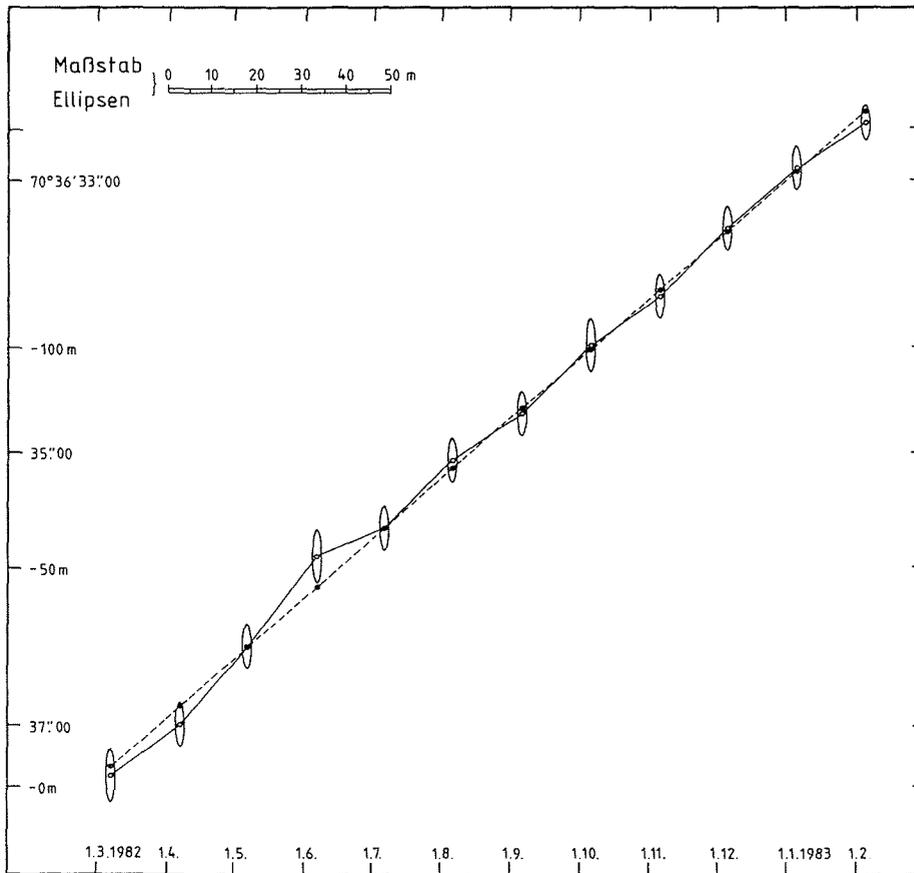


Abb. 9: Beobachtete Breiten auf Punkt 6000 in Monatsabständen.

Fig. 9: Observed latitudes at point 6000 in monthly intervals.

Monaten Januar und Februar der verschiedenen Jahre ausgeführt. Die Frage, ob die Punktbewegungen gleichmäßig ablaufen oder eventuell jahreszeitlichen Schwankungen unterliegen, kann damit nicht beantwortet werden. Um die Frage zu klären, ob solche jahreszeitlichen Schwankungen existieren, wurden von März 1982 bis Februar 1983 in der ersten Dekade eines jeden Monats von der Überwinterungsmannschaft der Georg von Neumayer-Station Doppler-Satellitenmessungen über eine auf dem meteorologischen Mast fest installierte Antenne (6000) vorgenommen. Die Ergebnisse der Feldauswertungen über die zwölf Dekaden bilden die Grundlage der Abb. 9, 10 und 11. In Abb. 9 sind die in Monatsabständen beobachteten Breiten über einer Zeitskala aufgetragen. Die Achse der Breiten enthält zusätzlich einen metrischen Maßstab. Jeder Breitenwert ist von einer Fehlerellipse umgeben, deren große Halbachse der Standardabweichung der ausgewerteten Breite ($4 \leq s_B \leq 6$ m) entspricht; der kleinen Halbachse entspricht die Standardabweichung s_T für die Zentrierung der Zeitangabe innerhalb jeder Dekade. Durch verspätete Inbetriebnahme, Geräteausfälle und ungleichmäßige Verteilung der akzeptierten Satellitendurchgänge während einer Dekade kann s_T mit etwa 2 Tagen angenommen werden. Eine Regressionsgerade für die Breitenänderung über der Zeit (gestrichelte Linie) verläuft durch elf der zwölf Fehlerellipsen, lediglich die Juni-messung liegt außerhalb des Bereiches der Standardabweichung. Ein zweiter Ansatz für eine Regressionsgerade unter Berücksichtigung der Standardabweichungen für die Breiten- bzw. Zeitangaben jeder Dekade ergab nur unwesentlich veränderte Parameter. In der Abb. 10 sind ellipsoidische Höhenwerte

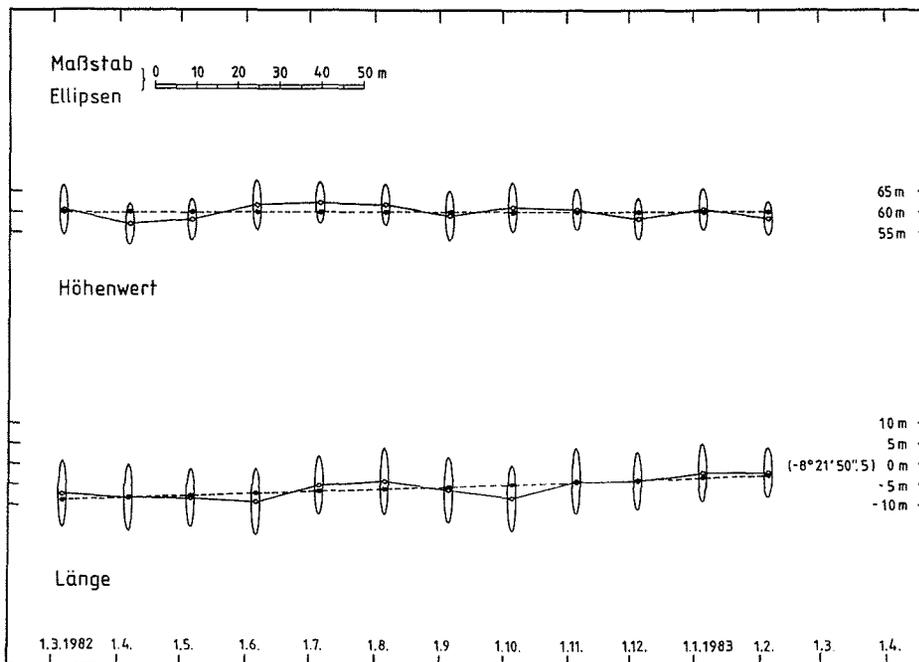


Abb. 10: Beobachtete ellipsoidische Höhenwerte und Längen auf Punkt 6000 in Monatsabständen.

Fig. 10: Observed heights above ellipsoid and longitudes at point 6000 in monthly intervals.

und die Längen entsprechend dargestellt. Für die Höhenwerte liegen alle Standardabweichungen im Intervall 4—6 m; die Regressionsgerade weist keine signifikante Steigung auf. Bei den Längen sind die Standardabweichungen größer ($6 \text{ m} \leq s_L \leq 8 \text{ m}$) und es wird durch die Regressionsgerade eine geringe Längenänderung von etwa 0.5 ($\sim 5 \text{ m}$) deutlich. Sowohl für die Höhen als auch für die Längen verlaufen die Regressionsgeraden im allgemeinen durch die zentrischen Bereiche der Fehlerellipsen.

Eine gemeinsame Darstellung der ausgewerteten Breiten und Längen der zwölf Dekaden und ihrer Standardabweichungen zeigt Abb. 11. Ein Linienzug verbindet diese Punktlagen; die gestrichelte Linie enthält die für eine gleichmäßige Bewegung berechneten Positionen, die aus den Regressionsgeraden abgeleitet wurden. Auch hierbei zeigt lediglich die Juniposition eine deutliche Abweichung. Aus den Feldauswertungen ist eine Ablehnung der Hypothese — gleichmäßige Geschwindigkeit — daher nicht möglich.

Für die Orientierung des Objektpunktfeldes auf dem Ekström-Schelfeis in den verschiedenen Epochen standen ebenfalls Doppler-Satellitenmessungen auf zwei Punkten (4000, 5000), Kreismessungen und Sonnenbeobachtungen zur Verfügung. Durch einige Wiederholungsmessungen in dem Lagenetz 1982 wurde die Abschätzung eines Genauigkeitsmaßes für ein ausgewertetes Azimut aus Sonnenhöhen möglich. Tab. 4 enthält fünf Azimute des Objektpunktfeldes, die an drei Tagen von zwei Beobachtern gemessen wurden. Erneut ist eine Reduktion auf einen Zeitpunkt und auf einen Bezugspunkt (4000) erforderlich, um schließlich mit der Geometrie des ausgeglichenen terrestrischen Netzes das Azimut einer ausgewählten Seite (4000-5000) angeben zu können. Die Standardabweichung einer Messung beträgt danach 0.027 gon und ist deutlich größer als erwartet. Allerdings sollten bei einer Beurteilung folgende Punkte nicht unberücksichtigt bleiben:

- Sonnenbeobachtungen fanden auch zu ungünstigen Tageszeiten statt, z. B. an späten Vormittags- und frühen Nachmittagsstunden;
- horizontaler und vertikaler Faden wurden gleichzeitig an den Sonnenrand gebracht.

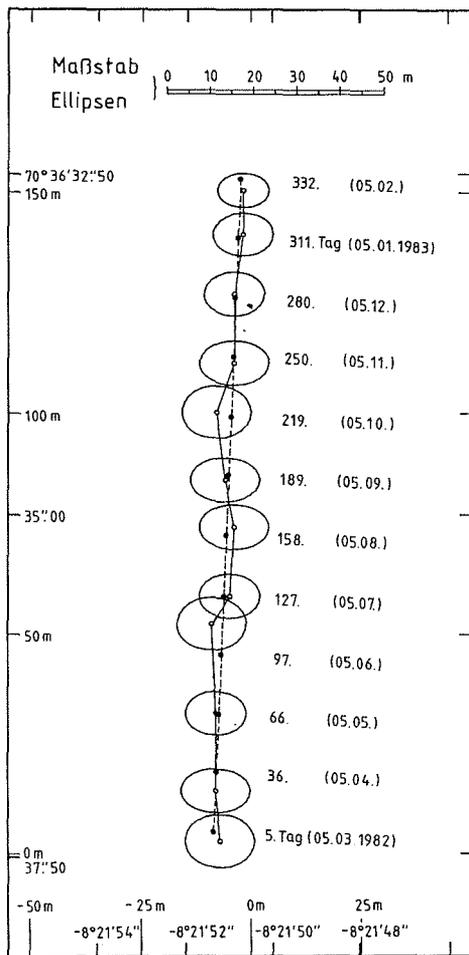


Abb. 11: Beobachtete Breiten und Längen auf Punkt 6000 von 1982—1983.

Fig. 11: Observed latitudes and longitudes at point 6000 from 1982—1983.

Dennoch liegt die Standardabweichung deutlich unter der einer Kreismessung ohne kontrollierten Eichwert (0.06 gon). Die Standardabweichung des aus fünf Messungen gemittelten Azimuts aus Sonnenhöhen beträgt 0.012 gon und dürfte damit etwas geringer sein als die des Azimuts aus Doppler-Satellitenmessungen bei Festpunkten, die nur wenige km voneinander entfernt liegen. Die Differenz zwischen den beiden Azimuten beträgt 0.006 gon.

Tab. 5 zeigt die endgültige Orientierung der Objektpunktfelder Ekström, wie sie in der Netzausgleichung verwendet wurde. Die Varianzkomponenten der Azimutmessungen sind dabei 1.0 für 1981 und 0.6 für 1982.

Nach den endgültigen Orientierungen der Objektpunktfelder wurden die Rotationen von Flächenelementen pro Jahr berechnet und in die Abb. 6 und 7 eingetragen. Es handelt sich erneut um Richtungsänderungen im Uhrzeigersinn, deren Werte sich bei benachbarten Flächenelementen stärker ändern als auf dem Filchner-Ronne-Schelfeis. Das Rotationsverhalten im erfaßten Gebiet (Pentagon-Dreieck) ist nicht homogen. Im Bereich der Georg von Neumayer-Station nehmen die Rotationsraten von Süden nach Norden zu, im Gebiet des Dreiecks ist eine Zunahme von Norden nach Süden ersichtlich.

Durch Doppler-Satellitenmessungen in Verbindung mit Orientierungsmessungen durch Theodolitkreis und Sonnenbeobachtungen konnten die Objektpunktfelder orientiert werden. Eine Lagerung der Netze durch Verwendung der Ergebnisse der Doppler-Satellitenmessungen ist möglich, dabei besteht allerdings

von Punkt	nach Punkt	Beobachtungsdatum	ausgewertetes Azimut [gon]	Meridiankonvergenz γ [gon]	Zeitreduktion aus Jahresintervall [gon]	Reduktionsgröße für $\Delta 4000$	Azimut 4000—5000 [gon]	v [gon]	
125	120	9. 1. 1982	188.6402	-0.0889	+ 8	+0.0113	89.7796	278.3422	+0.0077
125	120	12. 1. 1982	188.6330	-0.0889	+ 5	+0.0070	89.7796	278.3307	+0.0192
125	120	12. 1. 1982	188.6243	-0.0889	+ 5	+0.0070	89.7796	278.3220	+0.0279
120	124	28. 2. 1982	308.2178	-0.0861	-42	-0.0039	370.2592	278.3870	-0.0371
120	124	28. 2. 1982	308.1982	-0.0861	-42	-0.0039	370.2592	278.3674	-0.0175

Messungsgebiet: Ekström
Epoche: 1982

Bezugszeitpunkt: 17. 1. 1982
Bezugsmeridian durch Punkt 4000

Vergleichsazimut: 4000 → 5000

Tab. 4: Zusammenstellung von fünf Azimuten aus Sonnenbeobachtungen im Objektpunktfeld Ekström 1982 und Vergleiche mit dem Azimut aus Doppler-Satellitenbeobachtungen.

Tab. 4: Compilation of five azimuths derived from observations of the sun in the geodetic network Ekström 1982 and comparison with an azimuth from Doppler-satellite-measurements.

Epoche Bezugszeitpunkt	Azimut von nach		Methode	Datum	beobacht. Azimut [gon]	Meridian- konvergenz [gon]	Zeitreduktion [gon]	Azimut/Rich- tungswinkel [gon]	Standard- abweichung [gon]	Bemerkungen
1981 14. 2.; 6h	4000	5000	Doppl.-Sat. MX 1502	14. 2. 81	278.1299	0	0	278.1299	0.02	
Bezugsmeridian durch Punkt 4000	120	121	Kreisel GAK 1	30. 1. 81	68.1287	-0.0855	+0.0126	68.0558	0.05	E = -0.412
	120	121	Kreisel GAK 1	5. 2. 81	68.1286	-0.0855	+0.0076	68.0507	0.05	E = -0.412
	120	121	Kreisel GAK 1	27. 2. 81	68.2767	-0.0855	-0.0109	68.1803	0.05	E = -0.412
	50	51	Kreisel GAK 1	16. 2. 81	50.0288	-0.0006	-0.0022	50.0260	0.05	E = -0.412
1982 17. 1.; 0h	4000	5000	Doppl. Sat. MX 1502	17. 1. 82	278.3558	0	0	278.3558	0.02	
Bezugsmeridian durch Punkt 4000	125	120	Kreisel GAK 1	12. 1. 82	188.6398	-0.0889	+0.0070	188.5579	0.05	E = -0.442
	120	125	Kreisel GAK 1	12. 1. 82	388.6300	-0.0861	+0.0070	388.5509	0.05	E = -0.442
	120	121	Kreisel GAK 1	19. 1. 82	68.4398	-0.0861	-0.0017	68.3520	0.05	E = -0.442
	120	124	Kreisel GAK 1	27. 2. 82	308.1973	-0.0861	-0.0038	308.1074	0.05	E = -0.330
	125	120	Sonnenhöhen DKM 2	9. 1. 82	188.6402	-0.0889	+0.0113	188.5626	0.025	
	125	120	Sonnenhöhen DKM 2	12. 1. 82	188.6287	-0.0889	+0.0070	188.5468	0.025	
	120	124	Sonnenhöhen DKM 2	28. 2. 82	308.2080	-0.0861	-0.0039	308.1180	0.025	
	120	124	Almukantarat DKM 2	25. 2. 82	308.1681	-0.0861	-0.0036	308.0784	0.05	

Tab. 5: Endgültige Orientierung der Objektpunktfelder auf dem Ekström-Schelfeis.

Tab. 5: Final orientation of the geodetic networks on Ekström Ice Shelf.

ein erheblicher Unterschied in der Punktlagegenauigkeit der Netze (innere Genauigkeit) und der Genauigkeit in der Angabe der absoluten Positionen.

3. HÖHENBESTIMMUNGEN UND REFRAKTIONSUNTERSUCHUNGEN

3.1 Einleitung

Über Höhenbestimmungen sowohl nivellistischer als auch trigonometrischer Art in Polarregionen bzw. über Schnee und Eis sind in den letzten drei Jahrzehnten zahlreiche Arbeiten veröffentlicht worden (DITTRICH & HELBIG 1981, DITTRICH & SCHWARZ 1966, LICHTÉ 1957, MÄLZER 1964, SECKEL 1971). Weitere Arbeiten haben statistische Untersuchungen über räumliche und zeitliche Verteilung von Refraktionskoeffizienten und deren Modellierung mit Hilfe meteorologisch-physikalischer Parameter zum Gegenstand (EGER 1976, MEIER 1967, MEIER 1970, STÖBER 1974, THIELE & ZICK 1972). LICHTÉ (1957) wägt Vor- und Nachteile trigonometrischer und nivellistischer Höhenbestimmung bei der Traversierung des Grönländischen Inlandeises gegeneinander ab. MÄLZER (1964) und SECKEL (1971) berichten über die während der Grönlandexpeditionen EGIG I (1959) und EGIG II (1968) durchgeführten geometrischen Nivellements und die dabei erreichten Genauigkeiten. Als Refraktionseinflüsse beim EGIG I-Nivellement nennt MÄLZER (1964) Flimmern, Schwebungen und Verbiegungen des Zielstrahles bis ± 1 cm auf 100 m Zielweite. Ganz ähnliche Erfahrungen machten DITTRICH & SCHWARZ (1966) bei speziell angelegten Versuchsmessungen in Mirny (Ostantarktis).

Die Entscheidung, ob man bei Höhenbestimmungen in Polargebieten, insbesondere in dauerhaft verschneiten oder vereisten Regionen, dem trigonometrischen oder dem nivellistischen Verfahren den Vorzug geben soll, hängt von mehreren Faktoren ab. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben, seien folgende Aspekte genannt:

- Beachtung der gesamten geodätischen Aufgabenstellung (Bestimmung nur von vertikalen oder auch von horizontalen Verformungen);
- Anpassung des Meßverfahrens an die Topographie des Meßgebietes (eben, flach oder alpin gegliedert);
- Gestaltung des Punktfeldes und Auswahl des Meßverfahrens für die optimale Erfassung des Meßgebietes und die Erfüllung sinnvoller Genauigkeitsforderungen;
- Einpassung des Messungsablaufes in den zur Verfügung stehenden Zeitraum unter Berücksichtigung regional-witterungsbedingter Ausfallzeiten;
- Abstimmung des Personalbedarfs mit der finanziellen Rahmenplanung;
- Koordinierung von Meßverfahren und Logistik.

Das Ziel der in diesem Aufsatz beschriebenen geodätischen Arbeiten besteht in erster Linie in der Bestimmung horizontaler Verformungen im Bereich der jeweiligen Bearbeitungsgebiete. Die aus diesem Grunde angelegten geodätischen Traversen und Deformationsfiguren schlossen die Höhenbestimmung durch geometrisches Nivellement aus ökonomischen Gründen aus. Alle Höhenbestimmungen erfolgten trigonometrisch. Die Beobachtungen zur Höhenübertragung sind nicht optimal auf dieses Ziel ausgerichtet, sondern den Erfordernissen der bestmöglichen Bestimmung horizontaler Verformungen untergeordnet.

Trotz dieses Mangels ist das vorliegende Beobachtungsmaterial geeignet, neben Höhenunterschieden insbesondere einen Beitrag zur Problematik der terrestrischen Refraktion über Schelfeis zu liefern.

3.2 Bereich der Filchner-Sommerstation auf dem Filchner-Ronne-Schelfeis

3.2.1 Vorbemerkungen

Auf dem Filchner-Ronne-Schelfeis, im Bereich der Filchner-Station, erfolgte im Zeitraum Januar/Februar 1980 die erste Beobachtungskampagne der geodätischen Traverse von der Schelfeiskante zur Station und des Deformationspentagons bei der Station (s. Abb. 1). Die zweite Beobachtungskampagne kam erst zwei Jahre später, im Februar 1982, zustande. 1980 wurden die Beobachtungen des Pentagons an zwei Terminen vollständig ausgeführt (15. Januar und 6. Februar), und zwar mit der Absicht, aus den Veränderungen der Deformationsfigur über 22 Tage erste rohe Parameter für die relative Bewegung dieses Schelfeisgebietes abzuleiten. Die Traverse wurde dagegen nur einmal, am 29. Januar, einschließlich trigonometrischer Höhenübertragung, beobachtet. Die Genauigkeit der Höhen hängt bei trigonometrischer Bestimmung wesentlich von der Erfassung und Eliminierung des Refraktionseinflusses ab. Bei den auf der Filchner-Traverse gegebenen Entfernungen zwischen den Traversenpunkten von rund 2,0 km bedeutet eine Standardabweichung für einen Höhenunterschied von $s_{dh,2\text{ km}} \leq 45\text{ mm}$, daß der Refraktionskoeffizient mit einer Genauigkeit von $s_k \leq 0,1$ bekannt sein muß. Das ist jedoch über Schnee- und Eisflächen, insbesondere bei Strahlungswetter, eine nur schwer erfüllbare Forderung.

Aus diesem Grunde erfolgte die Höhenbestimmung auf der Traverse von der Schelfeiskante zur Station Filchner im Jahre 1980 durch MÖLLER & GERDAU (1981) zusätzlich zu der Traversenbeobachtung als Polygonzug auch noch durch trigonometrisches Nivellement von Standpunkten aus, die jeweils zwischen den Hauptpunkten ausgewählt wurden. Während die Zeitdifferenz zwischen Hin- und Rückbeobachtung der Zenitwinkel für denselben Höhenunterschied bei der Polygonzugmessung rund 1 Stunde betrug, überschritt der Zeitunterschied zwischen Rückwärts- und Vorwärtsbeobachtung der Zenitwinkel beim trigonometrischen Nivellement nicht 5 Minuten.

Aufgrund einschlägiger Untersuchungen der terrestrischen Refraktion bei geringen Zielhöhen ($< 10\text{ m}$) über Schnee- und Eisflächen erweist sich der Zeitraum zwischen 10 Uhr und 15 Uhr mittlerer Ortszeit als am besten geeignet für trigonometrische Höhenübertragungen (DITTRICH & HELBIG 1981, DITTRICH & SCHWARZ 1966, EGER 1976, THIELE & ZICK 1972, ZICK 1980). In dieser Zeit ist sowohl der Betrag des Refraktionskoeffizienten relativ konstant als auch seine Streuung relativ gering (Mittagsminimum im Tagesgang). Will man optimale Genauigkeiten bei trigonometrischen Höhenübertragungen über Schnee und Eis erzielen, so sollten die Messungen, insbesondere bei Strahlungswetter, innerhalb des

genannten Zeitraumes ausgeführt werden.

Die meteorologischen und logistischen Bedingungen, unter denen im Expeditionsalltag geodätische Messungen ausgeführt werden müssen, lassen es oft nicht zu, daß für diese Messungen nur günstigste Zeit- und Wetterkonditionen ausgewählt werden können. Dennoch sollte ein Figurenkomplex, der zur Bestimmung von Deformationen angelegt worden ist, in einem möglichst kurzen Zeitraum vollständig beobachtet werden.

Hier widersprechen sich also die Bedingungen, die optimale Ergebnisse einmal für die Lage und zum anderen für die Höhe der Punkte erwarten lassen. Die Genauigkeit von trigonometrischen Höhenübertragungen vor 10 Uhr und nach 15 Uhr Ortszeit fällt infolge der größeren Streuung des Refraktionskoeffizienten mehr oder weniger deutlich, je nach dem Grad der Bewölkung, gegen die Genauigkeit der Mittagsbeobachtungen ab.

Diese größere Streuung des Refraktionskoeffizienten läßt mit ihren zeitlichen und räumlichen Variationen erkennen, daß das Modell eines für Hin- und Rückbeobachtung identischen kreisbogenförmig verlaufenden Zielstrahles, das bei zeitlich-räumlich überwiegend einheitlichen Refraktionsverhältnissen (in den Mittagsstunden) weitgehend zutrifft, dann nicht mehr gültig ist. Auch gleichzeitig-gegenseitige Beobachtungen in den Abend- und Nachtstunden liefern nur unbefriedigende Ergebnisse. Die Messungen der Filchner-Traverse sind sowohl 1980 als auch 1982 jeweils in einem Zuge etwa von Mittag bis Mitternacht, ausgeführt worden. Damit wird im wesentlichen die Forderung nach einer hohen Lagegenauigkeit erfüllt und eine größere Unsicherheit der Höhen in Kauf genommen. Zur Verbesserung der Höhen Genauigkeit erfolgte 1980 zusätzlich das o. g. trigonometrische Nivellement. 1982 mußte aus zeitlichen und logistischen Gründen auf ein trigonometrisches Nivellement verzichtet werden

3.2.2 Höhen und Refraktion im Bereich der Traverse

Die Berechnung der Höhenunterschiede und Refraktionskoeffizienten der Traversenmessung 1980 erfolgte alternierend iterativ. In einem ersten Schritt wurden nach dem Modell eines identischen kreisbogenförmigen Zielstrahlverlaufs für Hin- und Rückbeobachtung aus gegenseitigen Beobachtungen sowohl Höhenunterschiede Δh als auch Refraktionskoeffizienten k nach (1) bzw. (2) berechnet.

$$\Delta h = \frac{s}{2} (\cot \zeta_{12} - \cot \zeta_{21}) + \frac{1}{2} (i_1 - i_2 - t_2 + t_1) \quad (1)$$

$$k = 1 + \frac{R}{s} (\cot \zeta_{12} + \cot \zeta_{21}) + \frac{R}{s^2} (i_1 + i_2 - t_2 - t_1) \quad (2)$$

s . . . horizontale Entfernung
 R . . . Erdradius
 i, t . . . Instrumenten- bzw. Zielhöhe
 ζ . . . Zenitwinkel

Danach folgte eine zweite Berechnung der Höhenunterschiede aus den Meßwerten des trigonometrischen Nivellements unter der Annahme homogener Refraktionsverhältnisse pro Instrumentenstandpunkt ($k_r = k_v$) nach (3).

$$\Delta h_{r,v} = s_v \cot \zeta_v - s_r \cot \zeta_r + \frac{1-k}{2R} (s_v^2 - s_r^2) + t_r - t_v \quad (3)$$

(Die Indizes r und v deuten die Richtungen „rückwärts“ bzw. „vorwärts“ an.) In einem Approximationsprozeß wurden nun Höhenunterschiede und Refraktionskoeffizienten solange variiert, bis die Differenzen der Höhenunterschiede aus gegenseitigen Beobachtungen und dem trigonometrischen Nivellement minimale Beträge annahmen. Der zeitabhängige Gang des Refraktionskoeffizienten für die Tage 29. und 31. 1. 1980 ist in Abb. 12 dargestellt.

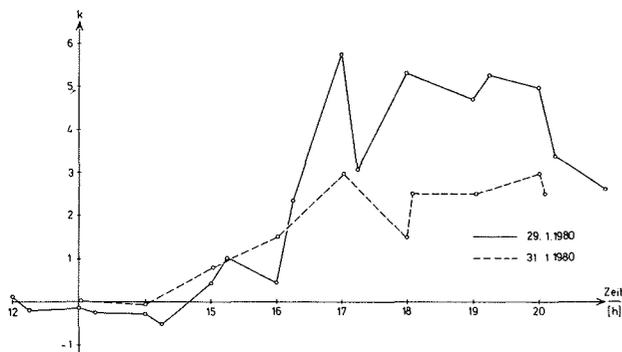


Abb. 12: Zeitlicher Verlauf des Refraktionskoeffizienten k über dem Filchner-Ronne-Schelfeis an zwei Tagen mit Strahlungswetter.

Fig. 12: Variations of the refraction coefficient k on the Filchner/Ronne Ice Shelf on two days without clouds.

Betrachtet man die Darstellung des Refraktionskoeffizienten an diesen beiden Strahlungstagen so erkennt man das für die gegebenen meteorologischen Verhältnisse typische steile Ansteigen des Refraktionskoeffizienten nach 15 Uhr Ortszeit. Für die Darstellung der auf dem Schelfeis an Strahlungstagen nach etwa 15 Uhr herrschenden heterogenen Refraktionsverhältnisse sei das folgende Beispiel herausgegriffen. Am 29. 1. 1980 wurden gegen 17 Uhr auf dem Traversenpunkt 6 die trigonometrischen Höhenbestimmungen nach den Punkten 5 und 7 vorgenommen. Der Punkt 6 liegt bei Entfernungen nach den Punkten 5 und 7 von jeweils rund 1,87 km auf 2 m genau in der Mitte zwischen diesen beiden Punkten. Der Höhenunterschied zwischen den Punkten 5 und 7 ergibt sich bei gleichgroßen Zielweiten und unter der Voraussetzung homogener Refraktionsverhältnisse nach Gleichung (3) unabhängig vom Betrag der Refraktion. Aus den genannten Beobachtungen ergibt sich für den Höhenunterschied „aus der Mitte“ ein Wert von $h_{5,7} = + 2.53$ m. Andererseits ergeben sich die beiden Einzelhöhenunterschiede aus dem trigonometrischen Nivellement (am 31. 1. 1980), bei ebenfalls jeweils gut zentrischen Instrumentenaufstellungen auf jeder Einzelstrecke (Zielweiten jeweils rund 1.0 km) zu

$$\Delta h_{5,6} = + 0.96 \text{ m und}$$

$$\Delta h_{6,7} = + 0.83 \text{ m,}$$

wobei refraktionsbedingte Unsicherheiten in beiden Fällen den Betrag von 0.10 m mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht übersteigen. Hieraus berechnet sich $\Delta h_{5,7} = + 1.79$ m mit einer Standardabweichung von 0.15 m. Um aus den Beobachtungen auf Punkt 6 zu diesem Wert zu gelangen, muß das Modell „identischer kreisbogenförmiger Zielstrahl“ aufgegeben werden. Die sich nun für die rund 15 Minuten zeitlich auseinander liegenden Beobachtungen ergebenden Refraktionskoeffizienten $k_{6,7} = 5.7$ und $k_{6,5} = 3.1$ zeigen eindrucksvoll die zeitliche und räumliche Heterogenität der zur Beobachtungszeit 17 Uhr an einem Strahlungstag auf dem Schelfeis vorliegenden Refraktionsverhältnisse. Wegen der kürzeren Zielweiten beim trigonometrischen Nivellement werden diese Beobachtungen den Höhenbestimmungen auf der Traverse zugrunde gelegt. Setzt man für die Standardabweichung des Refraktionskoeffizienten am Beobachtungstag des trigonometrischen Nivellements (Strahlungswetter) durchschnittlich $s_k = 0.5$ an, so beträgt die Standardabweichung eines Höhenunterschiedes bei einer Entfernung von 1000 m rund 43 mm (s. Abb. 13). Die Standardabweichung für den gesamten Höhenunterschied der 20 km langen Traverse ergibt sich damit zu

$$s_{\Delta h, 20 \text{ km}} = 43 \text{ mm } \sqrt{20} = 192 \text{ mm}$$

also rund 0.20 m.

Der Höhenanschluß an das Meeresniveau erfolgte am 29. Januar 1980 durch direkte Bestimmung der Höhe eines Hilfspunktes an der Schelfeiskante mit Hilfe einer vertikalen Meßbandmessung. Aus der an-

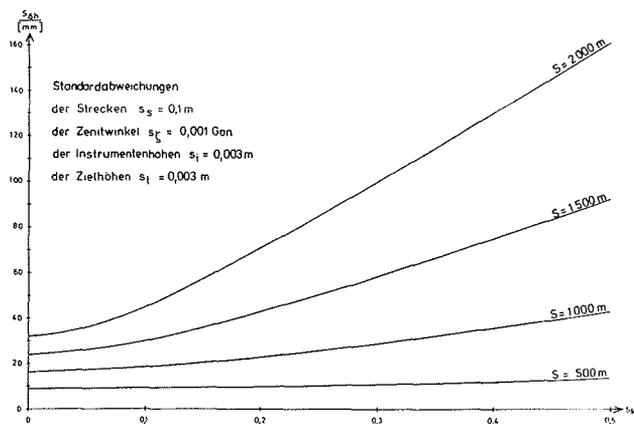


Abb. 13: Standardabweichung $s_{\Delta h}$ der Höhenunterschiede als Funktion der Standardabweichung s_k des Refraktionskoeffizienten für verschieden lange Strecken und horizontale Zielungen.

Fig. 13: Standard deviation $s_{\Delta h}$ of differences of altitudes as a function of standard deviation s_k of the refraction coefficient at various distances and horizontal observations.

schließenden trigonometrischen Höhenübertragung ergab sich die Höhe des Traversenpunktes 1 über dem Meeresniveau zu 28.46 m. Diese Höhenreferenz liegt den Höhen der Meßkampagne 1980 zugrunde.

Wie bereits oben erwähnt, erfolgte die Höhenübertragung im Jahre 1982 nur im Zuge der Traversenmessung und nicht zusätzlich durch trigonometrisches Nivellement. Dieser für die Höhengenaugigkeit nachteilige Umstand wird jedoch weitgehend durch die 1982 durchgängig vorherrschende bedeckte Wetterlage kompensiert. Die Unsicherheit der Höhenübertragung resultiert bei längeren Strecken überwiegend aus der Unsicherheit der Refraktion, deren Einfluß mit dem Quadrat der Entfernung anwächst (s. Abb. 13). Für eine Genauigkeitsabschätzung bei der Höhenübertragung auf der Traverse im Jahre 1982 erhält man unter der Annahme einer Standardabweichung des Refraktionkoeffizienten von $s_k = 0.15$ (für bedeckten Himmel) eine Standardabweichung für einen Höhenunterschied über eine Entfernung von 2.0 km von $s_{\Delta h} = 57$ mm und für die gesamte Traverse von

$$s_{\Delta h, 20 \text{ km}} = 57 \text{ mm} \sqrt{10} = 180 \text{ mm}.$$

Damit sind die Höhengenaugigkeiten der Traverse von 1980 und 1982 etwa gleichwertig.

Im Januar und Februar 1982 war das Meer bis zu rund 3 km vor der Schelfeiskante zugefroren, und es gab in dem kurzen für die geodätischen Beobachtungen zur Verfügung stehenden Zeitraum keine Möglichkeit eines Höhenanschlusses an das Meeresniveau. Um einen überschlägigen Vergleich der Höhen aller Meßpunkte über den Zeitraum zwischen der Meßkampagne 1980 und der von 1982 zu erhalten, wurde die mittlere Meereshöhe aller Punkte des Deformationspentagons von 1980 gebildet und der mittleren Meereshöhe derselben Punkte von 1982 gleichgesetzt. Eine Aussage über Höhenänderungen einzelner Punkte aufgrund von NN-Höhen beider Meßkampagnen ist folglich nicht möglich. Reduziert man jedoch alle diese Höhenänderungen ΔH_i pro Punkt auf einen Referenzpunkt, z. B. auf den Punkt 1 der Traverse, so hat man den unbekanntes Höhenunterschied zwischen den Bezugsniveaus von 1980 und 1982 eliminiert und die Werte $\delta_i = \Delta H_i - \Delta H_1$ liefern Höhenänderungen aller Punkte bezogen auf Punkt 1 (s. Tab. 6). Berücksichtigt man die Standardabweichung für einen beobachteten Höhenunterschied auf der Traverse von rund 60 mm und die daraus folgende Standardabweichung für einen δ -Wert von rund 85 mm so bleibt als Interpretation der δ -Werte außer der deutlichen Absenkung des Punktes 100 um rund 0.5 m nur eine Trendandeutung für das Herausheben des Punktes 1 gegenüber der anderen Traversen- und Pentagonpunkte um rund 90 mm.

3.2.3 Höhen und Refraktion im Bereich des Deformationspentagons

Die Höhenberechnungen und Bestimmungen der Refraktionskoeffizienten im Pentagon lieferten infolge der großen Anzahl von Überbestimmungen befriedigendere Ergebnisse als auf der Traverse. Es existieren

zwar auch hier keine gleichzeitig gegenseitigen Beobachtungen, aber sie sind pro Standpunkt zeitlich dicht gestaffelt und gestatten die Berechnung von Höhenunterschieden und Refraktionskoeffizienten über verschiedene geometrische Konfigurationen. Wie im Abschnitt 3.2.1 erwähnt, erfolgte nach der ersten Beobachtungsepoche des Pentagons im Zeitabstand von 22 Tagen bereits eine zweite. Dieser kurze Zeitraum war ausreichend, um erste rohe Parameter der horizontalen Verformungen zu gewinnen. Es gibt jedoch keinen Anlaß, für diesen kurzen Zeitraum für ein frei schwimmendes Schelfeis mit einer Mächtigkeit von rund 200 m (s. KOHNEN 1985) im Abstand von 20 km von der Abbruchkante signifikante relative Höhenänderungen anzunehmen. Eher ist es zulässig, die höhenrelevanten Ergebnisse beider Messungstage als voneinander unabhängige Doppelbeobachtungen zu betrachten und aus ihnen eine Abschätzung der Genauigkeit für die Höhenunterschiede zu gewinnen. Man erhält in diesem Fall für die Standardabweichung des Mittelwertes einer Punkthöhe den Wert $s_{\Delta h, DB} = 11$ mm. Für die Abschätzung der Höhengenaugkeit aus der Unsicherheit der Refraktion ergibt sich

— für die Ergebnisse der Beobachtungen am 15. 1. 1980

$$s_{\Delta h, k} = 16 \text{ mm (für eine mittlere Streckenlänge von } s = 590 \text{ m und eine Standardabweichung des Refraktionskoeffizienten von } s_k = 0.45)$$

— für die Ergebnisse der Beobachtungen am 6. 2. 1980

$$s_{\Delta h, k} = 15 \text{ mm (} s = 590 \text{ m, } s_k = 0.40)$$

Die Standardabweichung für die aus beiden Beobachtungstagen gemittelten Höhen ergibt sich somit ebenfalls zu

$$s_{\Delta h, 1980} = 11 \text{ mm.}$$

Die gute Übereinstimmung der beiden Werte für $s_{\Delta h}$ kann als Bestätigung der realistischen Abschätzung der Refraktionsunsicherheiten betrachtet werden. Infolge der geschlossenen Bewölkung während der Beobachtungen 1982 (5. Februar) verläuft die Refraktion sehr ruhig bei einem Tagesmittelwert von rund 0.5 und einer Standardabweichung für den Einzelwert von 0.16 (s. Abb. 14). Daraus resultiert eine Standardabweichung eines Höhenunterschiedes bei einer durchschnittlichen Entfernung von 590 m von

$$s_{\Delta h, 1982} = 11 \text{ mm.}$$

Punkt	H_{1980} [m]	H_{1982} [m]	$H_{1982}-H_{1980}$ [m]	$\delta_1 =$ $\Delta H_i - \Delta H_1$ [m]	Punkt	H_{1981} [m]	H_{1982} [m]	$H_{1982}-H_{1981}$ [m]	$\delta_1 =$ $\Delta H_i - \Delta H_{101}$ [m]
100	23.600	23.159	-0.441	-0.523	101	13.824	14.000	+0.176	0
1	28.460	28.542	+0.082	0	102	20.461	20.705	+0.244	+0.068
2	28.452	28.842	+0.390	+0.308	103	25.369	25.359	-0.010	-0.186
3	28.400	28.691	+0.291	+0.209	104	28.055	27.970	-0.085	-0.261
4	33.480	33.516	+0.036	-0.046	105	30.088	29.980	-0.108	-0.284
5	35.060	35.079	+0.019	-0.063	106	31.553	31.442	-0.111	-0.287
6	36.020	36.039	+0.019	-0.063	50	32.566	32.373	-0.193	-0.369
7	36.850	36.882	+0.032	-0.050	110	34.086	33.911	-0.175	-0.351
8	37.860	37.799	-0.061	-0.143	111	35.192	34.985	-0.207	-0.383
9	38.405	38.398	+0.007	-0.089	112	36.268	36.020	-0.248	-0.424
10(1082)	38.935	39.299	—	—	121	37.196	36.867	-0.329	-0.505
11	39.650	39.579	-0.071	-0.153	120	37.956	37.642	-0.314	-0.490
12	40.300	40.275	-0.025	-0.107	51	31.256	31.117	-0.139	-0.315
13	40.945	40.849	-0.096	-0.178	52	32.831	32.725	-0.106	-0.282
20	40.778	40.766	-0.012	-0.094	53	33.446	33.234	-0.212	-0.388
21	41.002	41.003	+0.001	-0.081	122	37.914	37.586	-0.328	-0.504
22	40.890	40.880	-0.010	-0.092	123	38.610	38.252	-0.358	-0.534
23	40.640	40.622	-0.018	-0.100	124	38.114	37.761	-0.353	-0.529
24	40.732	40.745	+0.013	-0.069	125	37.362	37.009	-0.353	-0.529
25	40.870	40.900	+0.030	-0.052	5000	37.056	36.690	-0.366	-0.542
1000	28.220	28.259	+0.039	-0.043					
2000	41.133	41.120	-0.013	-0.095					

Tab. 6: Höhen und Höhenänderungen im Bereich der Filchner-Station.

Tab. 6: Altitudes and variations of altitudes in the area of the Filchner Station.

Tab. 7: Höhen und Höhenänderungen im Bereich der Georg von Neumayer-Station.

Tab. 7: Altitudes and variations of altitudes in the area of the Georg von Neumayer Station.

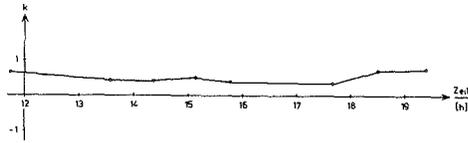


Abb. 14: Zeitlicher Verlauf des Refraktionskoeffizienten k über dem Filchner-Ronne-Schelfeis an einem Tag mit bedecktem Himmel (5. Febr. 1982).

Fig. 14: Variations of the refraction coefficient k on the Filchner/Ronne Ice Shelf on a day with total cloud cover (Febr. 5, 1982).

Damit sind auch die Ergebnisse der Höhenbestimmungen der Punkte des Deformationspentagons für die Beobachtungsepochen 1980 und 1982 (s. Tab. 6) in ihrer Genauigkeit äquivalent.

3.3 Bereich der Georg von Neumayer-Station auf dem Ekström-Schelfeis

3.3.1 Vorbemerkungen

Im Gegensatz zu dem Zeitabstand der Beobachtungsepochen von zwei Jahren im Bereich der Filchner-Station beträgt er für den Bereich der Georg-von-Neumayer-Station nur rund ein Jahr (Februar 1981 bis Januar 1982). In Abb. 5 ist das Feld der Beobachtungs- oder Objektpunkte dargestellt. Eine von der Schelfeiskante zur Georg von Neumayer-Station verlaufende Traverse verbindet zwei Deformationsfiguren. Die Figur mit dem Punkt 50 als Zentralpunkt wird als „erweitertes Dreieck“ und die Figur mit dem Zentralpunkt 120 als „Pentagon“ bezeichnet. Auch hier ergeben sich die Höhenunterschiede in den Deformationsfiguren erwartungsgemäß mit einer deutlich höheren Genauigkeit als die Höhenunterschiede in den beiden Traversenteilen.

3.3.2 Höhen und Refraktion im Bereich der Traverse

Infolge überwiegend gemischter Wetterlagen während der Beobachtungen im Jahre 1981 fielen keine derart spektakulären Refraktionsverhältnisse in die Beobachtungszeit wie das an den Tagen 29. und 31. Januar 1980 im Bereich der Filchner-Station der Fall war. In Ermangelung zusätzlicher überschüssiger Beobachtungen in den Traversenteilen konnten die entsprechenden Höhenunterschiede nur nach dem Modell „identischer kreisbogenförmiger Zielstrahl“ berechnet werden. Allerdings trägt die mit durchschnittlich rund 750 m hier gegenüber der Filchner-Traverse erheblich kürzere Streckenlänge zu einer insgesamt höheren Höhengenaugigkeit bei.

Für die Beobachtungen am 13. und 14. Februar 1981 liegt die Standardabweichung für den Refraktionskoeffizienten bei $s_k = 0.30$ und daraus resultiert eine Standardabweichung für einen Höhenunterschied von $s_{\Delta h} = 18$ mm (Streckenlänge 750 m).

Bei den Auswertungen der Beobachtungen von 1982 trat eine bemerkenswerte Richtungscharakteristik der Refraktion auf. Für drei Höhenunterschiede standen quasi Sollwerte zur Verfügung, die aus den Deformationsfiguren abgeleitet waren (einer am Pentagon und zwei am erweiterten Dreieck). Von den Refraktionskoeffizienten, die sich aus diesen drei Sollhöhenunterschieden ergeben, liegen diejenigen, deren zugehörige Beobachtung in Richtung Meer weist systematisch niedriger als die aus Beobachtungen in Richtung Inland. Der Abstand zwischen diesen k -Werten aus Hin- und Rückbeobachtung beträgt gegen 15^h30 fast zwei Einheiten, nimmt danach ab und verschwindet gegen 20^h00 ganz (s. Abb. 15).

Eine solche Systematik findet sich auch in der Arbeit von DITTRICH & HELBIG (1981) für das Gebiet bei Molodeshnaja in der Ostantarktis. Systematische Unterschiede von Refraktionskoeffizienten aus

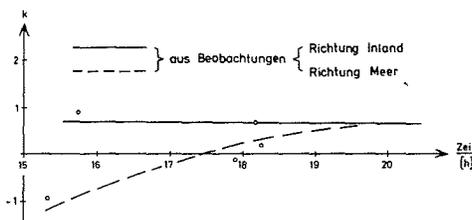


Abb. 15: Systematische Unterschiede der Refraktionskoeffizienten zwischen Hin- und Rückbeobachtungen auf der Traverse bei der Georg von Neumayer-Station (16. Jan. 1982).

Fig. 15: Systematic differences of refraction coefficients between forward and backward observations of measurements of vertical angles on the traverse near the Georg von Neumayer Station (Jan. 16, 1982).

Hin- und Rückbeobachtung zeigen an, daß beide Zielstrahlen mehr oder weniger stark voneinander abweichen und daß insbesondere die Annahme eines einheitlichen Refraktionskoeffizienten den Höhenunterschied verfälscht. Nach der Eliminierung dieser Systematik durch den Ansatz unterschiedlicher Refraktionskoeffizienten für Hin- und Rückbeobachtungen, entsprechend der Ergebnisse aus den Sollhöhenunterschieden, ergibt sich für die 1982 beobachtete Traverse eine Standardabweichung des Refraktionskoeffizienten von $s_k = 0.20$. Die Genauigkeit eines Höhenunterschiedes bei der mittleren Streckenlänge von 750 m ist dann durch die Standardabweichung von $s_{\Delta h} = 15$ mm charakterisiert. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse der Höhenberechnungen erfolgt in Tab. 7.

Die Meereshöhen beider Beobachtungsepochen resultieren jeweils aus direkten Anschlüssen an den Meeresspiegel. 1981 wurde wiederum direkt mit an der Schelfeiskante herabhängendem Meßband und anschließender trigonometrischer Bestimmung des Niveau des Meeresspiegels auf den ersten Traversenpunkt übertragen. 1982 erfolgte die Übertragung des Meeresspiegelniveaus durch direkte trigonometrische Beobachtung eines Hilfspunktes auf dem Meereis vom ersten Traversenpunkt aus. Dieser Hilfspunkt war derart über eine Meereisspalte positioniert, daß die Höhe der Zieltafel direkt über der Meeresoberfläche gemessen werden konnte. Trotz dieser beiden Direktanschlüsse an das Meeresniveau liegt die Genauigkeit für jeden von ihnen nur im Dezimeterbereich. Entsprechend ungenau wäre ein Vergleich der Höhen pro Punkt aus beiden Meßepochen.

Der Vergleich der Höhen von 1981 und 1982 geschieht deshalb auch hier wie in Abschnitt 3.2.2 mit Hilfe der Reduktion aller Höhenänderungen auf die Höhenänderung eines Referenzpunktes. Die in Tab. 7 angegebenen Werte δ_i stellen hier die auf Punkt 101 reduzierten Höhenänderungen pro Punkt dar und sind in Abb. 16 graphisch dargestellt. Der von der Georg von Neumayer-Station zur Schelfeiskante bei Punkt 101 erkennbare Anstieg der Schelfeisoberfläche ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf das Aufschieben des Schelfeises auf einen unter der Meeresoberfläche befindlichen „Seeberg“ (engl. seamount) zu erklären, was an der Schelfeisoberfläche als Ice-Rise zu erkennen ist.

3.3.3 Höhen und Refraktion im Bereich der beiden Deformationsfiguren

Das erweiterte Dreieck unterscheidet sich vom Pentagon nur durch die Unregelmäßigkeit seiner Gestalt. Im Grunde handelt es sich beim erweiterten Dreieck um ein unregelmäßiges Fünfeck, das ebenso wie das Pentagon, einen Zentralpunkt besitzt. Da in beiden Figuren außer den radialen und peripheren auch alle diagonalen Verbindungen beobachtet wurden, lassen sich die Höhenunterschiede infolge der Überbestimmungen mit höherer Genauigkeit ermitteln als auf der Traverse. Die Berechnung der Höhenunterschiede erfolgte, wie schon bei der Bearbeitung des Filchner-Pentagons, approximativ wechselseitig mit der Berechnung der Refraktionskoeffizienten unter Berücksichtigung von Schleifenschlüssen der Höhen. Die Höhenunterschiede resultieren dabei im wesentlichen aus den kürzeren radialen und tangentialen Punktverbindungen, die Refraktionskoeffizienten aus den längeren Diagonalen. Der Grad der Bewölkung war an den Beobachtungstagen 1981 im Durchschnitt geringer als im Jahre 1982. Diese Tatsache spiegelt sich in den Standardabweichungen des Refraktionskoeffizienten aller Beobachtungstage wider.

Die Ergebnisse der Höhenberechnungen und die durch die Werte δ dargestellten Höhenänderungen rela-

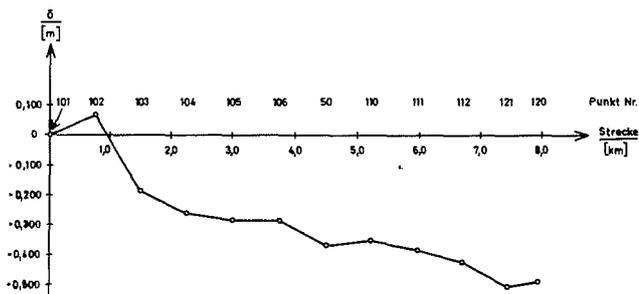


Abb. 16: Höhenänderungen der Traversenpunkte im Bereich der Georg von Neumayer-Station, auf Punkt 101 reduziert.

Fig. 16: Variations of altitudes in the area of the Georg von Neumayer Station, reduced to site 101.

Beob. epoche	Figur	erweit. Dreieck	Pentagon	Traverse
		$s_{\phi} = 900 \text{ m}$	$s_{\phi} = 590 \text{ m}$	$s_{\phi} = 750 \text{ m}$
Febr. 1981	s_k	0.45	0.20	0.30
	$s_{\Delta h}$	32 mm	12 mm	18 mm
Jan. 1982	s_k	0.10	0.10	0.20
	$s_{\Delta h}$	16 mm	11 mm	15 mm
1981/1982	s_{δ}	36 mm	16 mm	23 mm

Tab. 8: Standardabweichungen in den Deformationsfiguren im Bereich der Georg von Neumayer-Station.

Tab. 8: Standard deviations in the deformation figures in the area of the Georg von Neumayer Station.

tiv zu Punkt 101 sind ebenfalls der Tab. 7 zu entnehmen. Die Genauigkeiten, ausgedrückt in Standardabweichungen s , sind für beide Deformationsfiguren, und zur Übersicht auch für die Traverse, in Tab. 8 zusammengestellt.

Vergleicht man die Beträge δ der Höhenänderungen mit ihrer durchschnittlichen Standardabweichung s_{δ} , so erkennt man sofort die Signifikanz der Höhenverformung mit dem bereits oben genannten Herausheben der Schelfeisfront.

3.4 Schlußbemerkungen

Hauptgegenstand des vorliegenden Arbeitsberichtes ist die geodätische Bestimmung von horizontalen Schelfeisverformungen und Absolutbewegungen von Schelfeisgebieten. Die vertikale Komponente der Verformung tritt wegen ihres geringen Betrages in ihrer Bedeutung hinter der horizontalen Komponente zurück. Ganz bedeutungslos ist die vertikale Komponente jedoch nicht, denn sie ermöglicht eine Abschätzung der vertikalen Verzerrungsrate $\dot{\epsilon}_3$, die zusammen mit den beiden horizontalen Hauptverzerrungsraten $\dot{\epsilon}_1$ und $\dot{\epsilon}_2$ die Kontinuitätsgleichung für ein inkompressibles Medium erfüllen muß (KÖHLER & RITTER 1984).

Die in den Tab. 6 und 7 angegebenen Höhenänderungen δ sind allerdings nur relativer Natur, bezogen jeweils auf einen Referenzpunkt, für den die Höhenänderung willkürlich Null gesetzt ist. Sie sind damit nicht geeignet, die vertikale Verzerrungsrate $\dot{\epsilon}_3$ zu bestimmen. Aus den δ -Werten ist nur eine Veränderung der Oberflächenform des Schelfeises erkennbar, der Bezug zur Meeresoberfläche im Sinne absoluter Höhenänderungen existiert nicht oder zumindest nicht in einem Genauigkeitsniveau, das dem der horizontalen Komponenten äquivalent ist. Erschwerend für die direkte Bestimmung von $\dot{\epsilon}_3$ wirken sich auch die weitgehend unbekanntenen Massenveränderungen an der Unterseite des Schelfeises aus. Solange also das Problem noch offen ist, Absoluthöhen auf Schelfeis zu verschiedenen Meßepochen genügend genau miteinander in Verbindung zu bringen, solange wird auch $\dot{\epsilon}_3$ besser aus der Kontinuitätsgleichung als aus Höhenbeobachtungen bestimmt werden.

Auch zum Problemkreis der Refraktion über Schnee- und Eisflächen konnten Untersuchungen angestellt werden. Zwei Aspekte der Refraktion sollen hier hervorgehoben werden. Der eine Aspekt betrifft den Tagesgang der Refraktion. Es hat sich bei der Bearbeitung des vorliegenden Datenmaterials wieder bestätigt, daß der Refraktionskoeffizient an Strahlungstagen ab etwa 15 Uhr bis gegen 20 Uhr Ortszeit Beträge bis zur Größe von 3 (in Extremfällen bis 5) annehmen kann. Infolge der diesen Beträgen anhaftenden erheblichen Unsicherheiten kann die Genauigkeit einer trigonometrischen Höhenmessung bei einer Strecke von 1 km leicht in den Dezimeterbereich abgleiten. Die genauesten Ergebnisse bei trigonometrischen Höhenübertragungen über Schnee- und Eisflächen erzielt man an Strahlungstagen im Zeitraum 10 Uhr bis 15 Uhr Ortszeit. Entfernungen, die größer als 1 km sind, sollten unterteilt werden. Der zweite Aspekt betrifft die räumliche Heterogenität der Refraktion. Man kann unterschiedlicher Meinung darüber sein, ob man für trigonometrische Höhenübertragungen über Schnee und Eis dem Verfahren des trigonometrischen Nivellements oder der gleichzeitig gegenseitigen trigonometrischen Höhenbestimmung den Vorzug geben soll. Der geringe Zeitunterschied von rund 5 Minuten zwischen den Beobachtungen rückwärts und vorwärts beim trigonometrischen Nivellement ist kein entscheidender Nachteil dieses Verfahrens. Auf-

grund der in der vorliegenden Arbeit gefundenen und auch bei DITTRICH & HELBIG (1981) beschriebenen, zum Teil recht erheblichen systematischen Unterschiede der Refraktionsverhältnisse für Hin- und Rückrichtung ist es viel entscheidender, Kenntnisse über die aktuellen Refraktionsverhältnisse in den verschiedenen Richtungen zu erlangen. Diese Informationen gewinnt man jedoch nur durch Beobachtungen bei gegebenen Sollhöhenunterschieden. Es empfiehlt sich, im Meßgebiet einige Höhenunterschiede durch weitere Unterteilung und öftere Beobachtung so sicher zu bestimmen, daß ihnen der Rang von Sollhöhenunterschieden zuerkannt werden kann. In diesem Sinne haben MÖLLER & GERDAU (1981) auf der Filchner-Traverse Versuche unternommen, die sich als sehr hilfreich bei der Refraktionsbestimmung erwiesen haben. Solche Sollhöhenunterschiede sollten derart über das Meßgebiet verteilt sein, daß für die dazwischen liegenden Höhenunterschiede der Refraktionskoeffizient ausreichend genau interpoliert werden kann. Auch unter Expeditionsbedingungen sollte es möglich sein, mindestens am Anfang, am Ende und u. U. in der Mitte einer Traverse einen solchen Sollhöhenunterschied zu bestimmen.

Schließlich soll an dieser Stelle noch auf die Wichtigkeit der Erfassung von meteorologischen Daten bei geodätischen Beobachtungen für die Interpretation von Meßergebnissen hingewiesen werden. Das gilt insbesondere für Beobachtungen in extremen Klimabereichen wie in Antarktika. Angaben über Temperatur, Bedeckungsgrad, Windstärke und Windrichtung gehören als integraler Bestandteil zu jedem Beobachtungsprotokoll.

Literatur

- Dittrich, G. & A. Helbig (1981): Geodätische und meteorologische Untersuchungen der terrestrischen Refraktion über dem Inlandeis des Enderby-Landes (Ostantarktis). — Geod. Geoph. Veröff. d. NKGG d. DDR III, 48.
- Dittrich, G. & G. Schwarz (1966): Die geodätischen Arbeiten der deutschen Gruppe während der 7. Sowjetischen Antarktisexpedition 1962. — Geod. Geoph. Veröff. d. NKGG d. DDR III, 5.
- Dorrer, E., Hofmann, W. & W. Seufert (1962): Geodetic results of the Ross Ice Shelf survey expedition 1962—63 and 1965—66. — J. Glaciol. 8: 67—90.
- Eger, R. (1976): Refraktionsbeobachtungen (am Hays-Gletscher, Enderby-Land, Ostantarktis, während der 17. Sowjet. Antarktisexpedition 1972). — Geod. Geoph. Veröff. d. NKGG d. DDR III, 37: 111—120.
- Gerda u, H. & H. W. Schenke (1984): Doppler-Satellitenbeobachtungen zur Positions- und Bewegungsbestimmung Deutscher Forschungsstationen. — Z. f. Vermessungswesen 109: 161—175.
- Gerda u, H., Möller, D., Schenke, H. W. & G. Seeber (1981): Ice motion determination on the Antarctic Filchner/Ronne Ice Shelf by means of MX-1502 Doppler Satellite measurements. — Workshop on Satellite Doppler Surveying with MX-1502, Norrköping.
- Hofmann, W. & K. Nottarp (1964): Die geodätische Lagemessung über das Grönländische Inlandeis der Intern. Glaziol. Grönland-Expedition (EGIG) 1959. — Medd. Grönland 173: 1—145.
- Jordan, W., Eggert, O. & M. Kneißel (1970): Handbuch der Vermessungskunde, B. IIa: Geodätische Astronomie. — Stuttgart.
- Köhler, M. (1981): Das Verformungsverhalten des Ekström-Schelfeises in der Nähe der deutschen Antarktis-Forschungsstation „Georg von Neumayer“. — Polarforschung 51 (2): 113—127.
- Köhler, M. (1982): Zeitreduktion geodätischer Beobachtungen auf fließendem Eis durch Interpolation von Strain-Parametern. — Polarforschung 52 (1/2): 65—79.
- Köhler, M. & B. Ritter (1984): Geodätische Verformungsmessungen auf dem Ekström- und Filchner-Ronne-Schelfeis. — Z. f. Vermessungswesen 109: 154—161.
- Köhnen, H. (1985): Filchner Ronne Ice Shelf Programme 1 (1984). — A.-Wegener-Inst. f. Polarforschung, Bremerhaven.
- Lichte, H. (1957): Geodätische Messungen auf dem grönländischen Inlandeis. — Z. f. Vermessungswesen 82: 46—50, 65—73.
- Lindner, K. & B. Ritter (1982): Wissenschaftliche Arbeiten und vorläufige Ergebnisse der Gruppe Geodäsie des Unternehmens Eiswarte 1981/82. — Ber. z. Polarforschung 6/82: 32—37.
- Mülzer, H. (1964): Das Nivellement über das grönländische Inlandeis, EGIG 1959. — Medd. Grönland 173 (7): 1—122.
- Meyer, S. (1967): Die terrestrische Refraktion im Kongsfjord (Westspitzbergen). — Geod. Geoph. Veröff. d. NKGG d. DDR III, 9: 32—51.
- Meyer, S. (1970): Beiträge zur Refraktion in hohen Breiten. — Geod. Geoph. Veröff. d. NKGG d. DDR III, 17.
- Mendenhall, W. W. (1981): Gyro-Theodolite performance at high latitudes. — The Northern Engineer 13 (3): 8—10.
- Möller, D. & H. Gerda u (1981): Geodetic surveying on the Filchner/Ronne Ice Shelf and in the Atka Bay 1979/80. — Polarforschung 51 (1): 43—53.
- Nehwendener, H. R. (1966): Verfahren und Erfahrungen bei Nordbestimmungen mit dem Aufsatzkreis. — Allg. Vermessungsnachr. 73: 133—140.
- Neckel, H. (1977): Das geometrische Nivellement über das grönländische Inlandeis der Gruppe Nivellement A, EGIG 1967/68. — Medd. Grönland 187 (3).
- Niainer, R. & W. Zick (1984): Geodätisch-astronomische Ortsbestimmung durch Sternbeobachtung bei Tage. — Allg. Vermessungsnachr. 91: 366—373.
- Niainell, T. A. (1968): The Navy navigation satellite system; description and status. — Navigation 24 (3):
- Niobert, M. (1974): Zur Refraktion in Grönland. — Polarforschung 44 (2): 127—136.

- Thiele, P. & W. Zick (1972): Studien zur Trigonometrischen Höhenmessung über Meereis. — Polarforschung 42 (2): 90—96.
- Welsh, W. (1982): Zur Beschreibung homogenen Strains oder einige Betrachtungen zur affinen Transformation. — Z. f. Vermessungswesen 107: 173—182.
- Zick, W. (1980): Zur trigonometrischen Höhenmessung über extrem kalten Schneeflächen. — Polarforschung 50 (1/2): 23—28.