

Das Verformungsverhalten des Ekström-Schelfeises in der Nähe der deutschen Antarktis-Forschungsstation „Georg von Neumayer“

Von Martin Köhler*

Zusammenfassung: Im Verlauf der deutschen Antarktis-Expeditionen 1979/80 und 1980/81 wurden geodätische Messungen zur Bestimmung des Verformungsverhaltens des Ekström-Schelfeises durchgeführt. Die Messungen in den in der Nähe der Georg von Neumayer-Station liegenden Deformationsfiguren werden beschrieben und daraus mit Hilfe der Affintransformation maximale Verzerrungsraten aus kurz- und langfristigen Wiederholungsmessungen abgeleitet.

Summary: During the German Antarctic Expeditions 1979/80 and 1980/81 geodetic measurements on the Ekström Ice Shelf were carried out. From measurements in deformation figures, which were established near the German Antarctic Station „Georg von Neumayer“, the strain behaviour of the ice surface is deduced. Maximum strain rates for a few days' time and for one year are calculated by an affine transformation.

1. FILCHNER-SCHELFEIS-EXPEDITION 1980/81

Im Südsommer 1980/81 fand die Filchner-Schelfeis-Expedition der Bundesrepublik Deutschland statt mit der Hauptaufgabe, die erste deutsche Überwinterungsstation in der Antarktis zu errichten (KOH-NEN 1982). Insgesamt 113 Wissenschaftler, Monteure und Seeleute waren auf drei Schiffen unterwegs zum Filchner-Schelfeis. Dort war bei $77^{\circ}09'S$ und $50^{\circ}30'W$ (Abb. 1) ein günstiger Standort im Rahmen der vorausgegangenen Expedition 1979/80 festgelegt worden (DFG 1980). Ca. 180 km vor der geplanten Anlandestelle wurde die Expedition durch die äußerst ungünstigen Packeisverhältnisse des Weddell-Meeres gestoppt. Lediglich durch zwei Hubschrauberflüge konnte die Filchner-Feldstation des Vorjahres erreicht werden, um die wichtigsten Messungen zur Bestimmung der Fließgeschwindigkeit des Schelfeises wiederholen zu können.

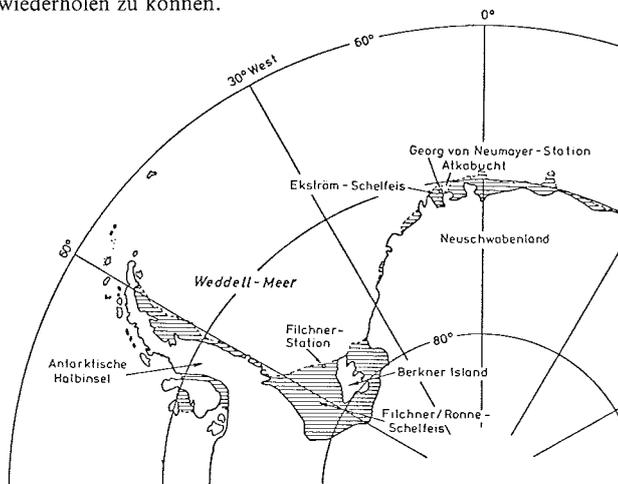


Abb. 1: Atlantischer Sektor der Antarktis.

Fig. 1: Atlantic sector of Antarctica.

* Dipl.-Ing. Martin Köhler, Institut für Vermessungskunde der Techn. Universität, Pockelstr. 4, 3300 Braunschweig.

Angesichts des Risikos, daß die Schiffe vom Packeis eingeschlossen werden, trat die Expedition auf Anweisung des Bundesministers für Forschung und Technologie die Rückfahrt durch die Weddell-See in nordöstlicher Richtung an und erreichte am 19. Januar das Ekström-Schelfeis an der Atka-Bucht bei $70^{\circ}36'S$ und $8^{\circ}17'W$. Dieser Bereich war von der Expedition des Vorjahres als Standort für den Bau einer Sommerstation vorgeschlagen worden.

Trotz ungünstiger Witterungsverhältnisse mit mehrtägigen Schneestürmen und Windstärken bis 12 konnte die Station bis zum 3. März 1981 fertiggestellt werden. An diesem Tage wurde die Bundesrepublik Deutschland als 13. Mitglied in die Konsultativrunde des Antarktisvertrages aufgenommen, nachdem mit dem Stationsbau, der Einrichtung eines Polarforschungsinstitutes und dem im Bau befindlichen eisbrechenden Forschungs- und Versorgungsschiff die wesentlichen logistischen Voraussetzungen für die kontinuierliche wissenschaftliche Arbeit in der Antarktis und durch die erfolgreichen deutschen Antarktis-Expeditionen der letzten Jahre die im Antarktisvertrag geforderten „erheblichen wissenschaftlichen Forschungsarbeiten“ als erbracht angesehen wurden.

2. GEODÄTISCHE ARBEITEN

Für den Bau einer Forschungsstation auf einer schwimmenden Eisplatte sind u. a. Vorausinformationen über die Fließgeschwindigkeit, Fließrichtung und die Verformungseigenschaften des Eises notwendig. Von der Geschwindigkeit und Richtung hängt es ab, wie groß der Abstand des Stationsstandortes von der Eiskante gewählt werden muß; denn es soll sichergestellt werden, daß die Station mindestens 10 Jahre genutzt werden kann, bevor die äußere Hülle durch Abbrechen des Schelfeisrandes verloren geht. Infolge der plastischen Eigenschaften des Eises treten Verformungen im Eisgefüge in Form von Dehnungen und Kontraktionen auf, woraus sich erhebliche Belastungen für die Stationskonstruktion ergeben können. Geodäten des Instituts für Vermessungskunde der Technischen Universität Braunschweig waren an den Expeditionen zur Standorterkundung (D. Möller und H. Gerdau) und zum Stationsbau (H. Gerdau und der Verfasser) beteiligt, um erste Antworten auf diese Fragestellungen zu liefern (MÖLLER 1982).

Die Bestimmung der Eisgeschwindigkeit und Fließrichtung wurde durch Positionsbestimmung mit Hilfe des Doppler-Satelliten-Verfahrens vorgenommen. Für das Filchner-Schelfeis im Bereich der Filchner-Station ermittelten GERDAU u. a. (1981) in einem Punkt an der Eiskante eine Geschwindigkeit von 1062 m/Jahr unter einem Azimut von $56^{\circ}56'$ und 1022 m/Jahr in einem Punkt 20 km eisenwärts bei einer Fließrichtung von $53^{\circ}11'$. Nach vorläufigen Auswertungen ergibt sich für das Ekström-Schelfeis in der Nähe der Georg von Neumayer Station ein Wert von 160 m/Jahr unter einem Azimut von 15° (GERDAU & KÖHLER 1982). Relative Deformationen der Eisoberfläche und die Lage und Größe der Hauptverformungen wurden durch wiederholte Beobachtungen von Deformationsfiguren bestimmt.

Der Schwerpunkt der geodätischen Arbeiten bei der Erkundungsexpedition lag auf dem Filchner-Schelfeis (MÖLLER GERDAU 1981). Im Laufe der Filchner-Expedition sollten die Messungen wiederholt werden (MÖLLER 1980). Mit dem Beschluß, die Station auf dem Ekström-Schelfeis zu bauen, mußte das geodätische Programm modifiziert werden, da 1979/80 aus Zeitgründen hier nur einige Nullmessungen vorgenommen werden konnten und nun versucht werden mußte, auch im Stationsbereich aus kurzfristigen Wiederholungsmessungen signifikante Aussagen zum Verformungsverhalten zu erhalten.

2.1 Deformationsfiguren

Bei Messungen auf dem Schelfeis besteht i. a. von der Topographie her kein Zwang für die Lage der Festpunkte. Die Netzkonfiguration kann also so gewählt werden, daß alle Punkte geometrisch gleich gut bestimmt sind. Allzu spitze Winkel, insbesondere bei der Bestimmung von Randpunkten, können bei Verwendung regelmäßiger Figuren weitgehend vermieden werden. Zur Bestimmung der Hauptverformungen ist es günstig, daß Verzerrungen in möglichst vielen Richtungen erfaßt werden und dabei immer jeweils

zwei dieser Richtungen senkrecht aufeinander stehen. Wenn man keinen allzu hohen Messungsaufwand treiben will, stehen unter diesen Gesichtspunkten drei Möglichkeiten zur Verfügung: Dreieck, Viereck und Fünfeck, jeweils mit Zentralpunkt. Das Viereck mit nur vier unterschiedlichen Richtungen ist davon am wenigsten geeignet. Wenn nur ein kurzer Messungszeitraum zur Verfügung steht, bietet sich das Dreieck an. Es hat sechs Richtungen. Die Teildreiecke sind jedoch stumpfwinklig und deshalb nicht sehr günstig für die Bestimmung der Hauptverformungen. In der Konfiguration optimal ist das Pentagon mit zehn unterschiedlichen Richtungen bei 15 geometrischen Strecken. Absteckung, Vermarkung und Messung erfordern jedoch einen etwas höheren Zeitaufwand. Die Größe der Figur hängt von verschiedenen Faktoren ab. Sie muß dem Meßbereich und der Meßgenauigkeit des zur Verfügung stehenden Instrumentariums angepaßt sein. Die überdeckte Fläche sollte so klein gewählt werden, daß man zumindest innerhalb von Teilfiguren von der Homogenität des Eises ausgehen kann. Andererseits muß sie so groß sein, daß auch bei kurzfristigen Wiederholungen Verzerrungen erfaßt werden können.

Während der Standorterkundung 1979/80 wurde auf dem Ekström-Schelfeis im Bereich der Atka-Bucht ca. 5 km von der Eiskante entfernt ein Deformationsdreieck mit Zentralpunkt angelegt (Punkte 50 — 53). Die Seitenlängen betragen für die zentralen Strecken 750 m und für die äußeren Strecken 1300 m (Abb. 2). Aus Sicherheitsgründen wurde 1980/81 trotz der geringen Fließgeschwindigkeit der Stationsstandort noch ca. 3 km ins Eisinnere verlegt. Im Bereich unmittelbar südlich der Station wurde zur näheren Untersuchung des Verformungsverhaltens des Eises ein Deformationspentagon vermarkt (Punkte 120 — 125). Die zentralen Strecken sind 500 m lang. Nach Fertigstellung der Station wurde die Deformationsfigur um zwei Punkte auf der Nordseite der Station (126, 127) erweitert, so daß bei Wiederholungsmessungen auch direkte Aussagen über Eisdeformationen im gesamten Stationsbereich gemacht werden können. Dabei konnte die Station selbst aus zeitlichen Gründen nur durch Richtungsmessung zu zwei Eckpunkten in die Deformationsfigur eingehängt werden. Deformationspentagon, -dreieck und Eiskante wurden durch eine geodätische Traverse miteinander verbunden. Sie besteht aus 12 Punkten (einschließlich der Zentralpunkte von Dreieck und Pentagon); die Seitenlängen sind ca. 750 m. Auf den zentralen Strecken des Dreiecks und auf den Seiten 121 — 122 und 120 — 124 (ungefähr in bzw. quer zur Fließrichtung) des Pentagons wurden Alignementslinien eingerichtet.

Die Vermarkung besteht aus 1.5 m langen Aluminiumrohren (Balisen) mit 33 mm Ø, die bodengleich in das Eis eingebracht wurden. Als Zentrierungshilfsmittel kann eine Zentriermarke eingesetzt werden. Die Stativbeine wurden eingegraben und festgestampft und mit Schnee alle Metallteile der Stativspitzen abgedeckt, so daß nach einer Nacht die Stativbeine so fest eingefroren sind, daß Stativbewegungen ausge-

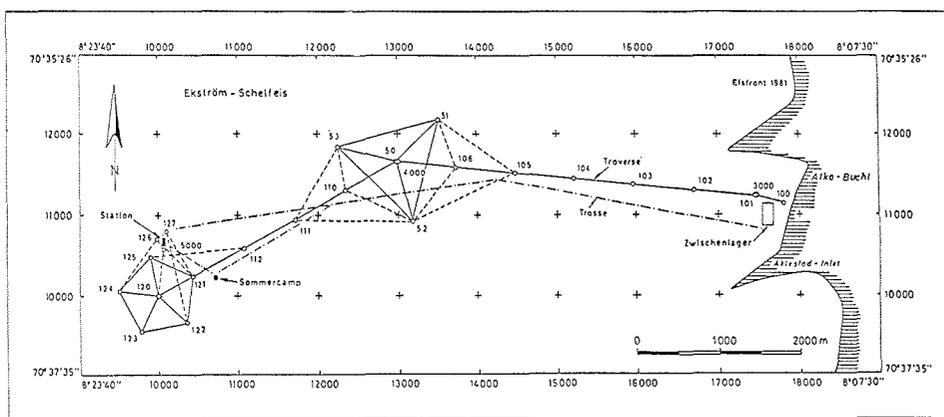


Abb. 2: Trassenverlauf und geodätische Traverse von der Eiskante bis zur Georg von Neumayer-Station mit Deformationsfiguren.

Fig. 2: Transport route and geodetic traverse from ice front to Neumayer Station with deformation figures.

geschlossen werden können. Da der Schneeauftrag im Bereich des Dreiecks nur ca. 30 cm/Jahr betrug, wurden die 1979/80 angeflanschten Verlängerungsstücke abgenommen. Die Messungen beziehen sich damit auf die alten Zentren. Eine Ablotung der Balisen war deshalb nicht notwendig.

2.2 Messungen

Für die Streckenmessung wurde das elektronische Reduktionstachymeter Wild TC-1 und der Laserentfernungsmesser Rangemaster II eingesetzt. Mit dem TC-1 sollten die Nahbereichsstrecken gemessen werden, der RM-II diente zum Maßstabsvergleich und für die Messung längerer Strecken, wie z. B. übergreifender Strecken in der Traverse.

Im gesamten Messungszeitraum konnte mit Temperaturen zwischen 0° und -20°C gerechnet werden. Zur Kontrolle des Temperaturverhaltens der Feinmaßstäbe wurden deshalb während der Kampagne Frequenzmessungen durchgeführt. Da am TC-1 kein Frequenzabgriff serienmäßig vorhanden ist, mußte die Frequenzkontrolle im Zielstrahl erfolgen. Hierzu wurde von der Firma Wild freundlicherweise eine entsprechende Diode zur Verfügung gestellt. Es zeigte sich eine leichte Temperaturabhängigkeit von -0.3 ppm/1°C im negativen Temperaturbereich. Der Rangemaster II ist mit einer Heizdecke zur Thermostatisierung des Oszillators ausgestattet. Die Frequenzstabilität liegt bei ± 0.1 Hz. Hinweise darauf lieferten schon Klimakammerversuche vor der Expedition im Temperaturbereich von -20° bis +10°C.

Erste Messungen in den Deformationsfiguren ließen eine maximale Verformungsgeschwindigkeit von ca. +15 ppm/Tag erwarten, d. h. eine 1 km lange Strecke wird sich unter einem bestimmten Richtungswinkel um 15 mm/Tag ausdehnen. Demgegenüber war aus den Erfahrungen des Vorjahres mit einer Streckenmeßgenauigkeit von ± 5 mm zu rechnen. Das Meßprogramm in einer Deformationsfigur mußte deshalb so aufgestellt werden, daß die maximalen Verzerrungen im Zeitraum der Messungen höchstens in der Größenordnung der Meßgenauigkeit liegen. Dies ist bei 8 Stunden Meßzeit erreicht. In dieser Zeit können in einem Pentagon der vorgegebenen Größenordnung sämtliche Strecken im Hin- und Rückweg und zusätzlich die Richtungen auf dem Zentralpunkt gemessen werden.

Aus den Doppelmessungen vom gleichen Tage lassen sich die Streckenfehler abschätzen. Für das TC-1 ergab sich aus 65 Doppelmessungen $m_s = \pm 4$ mm, für den Rangemaster II $m_s = \pm 5$ mm bei 30 Doppelmessungen. Ein Maßstabsunterschied zwischen RM II und TC-1 war aus einer Gegenüberstellung von 64 jeweils am gleichen Tage gemessenen Strecken nicht signifikant festzustellen.

Für die Richtungsbeobachtungen standen Präzisionstheodolite vom Typ Wild T3 und Kern DKM 2A zur Verfügung. Trotz der zum Teil ungünstigen Bedingungen — wie starkes Flimmern und Schwebungen bei Sonnenschein und die bei Wind schnell einsetzende Schneedrift — genügten in der Regel 3 Sätze um einen mittleren Richtungsfehler, berechnet aus Stationsausgleichungen, von durchschnittlich ± 0.25 mgon zu erreichen.

Zur Höhenbestimmung aller Punkte wurden Zenitwinkel mit dem TC-1 parallel zur Streckenmessung beobachtet. Da wegen der geringen Höhenunterschiede alle Strecken nahezu horizontal verlaufen, reicht zur Streckenreduktion eine Genauigkeit der Δh im dm-Bereich vollkommen aus. Höhere Genauigkeitsansprüche werden auch von anderer Seite (z. B. Geophysik) nicht gestellt. Im Gegensatz zur Längenmessung wirken sich bei der Höhenmessung die Verzerrungsverhältnisse nicht merkbar aus. Deshalb können alle 144 Höhenunterschiede einer Gesamtausgleichung zugeführt werden. Eine erste freie Ausgleichung zeigt die gute Bestimmung aller Punkte. Die mittleren Höhenfehler liegen zwischen ± 4 und ± 9 cm. Zur Festlegung der endgültigen Höhen wurde anschließend eine zweite Ausgleichung mit festgehaltener Eiskantenhöhe gerechnet. Die für den Zweck nicht wichtige absolute Genauigkeit hängt im wesentlichen vom Wasserstand zur Zeit der Messung der Eiskantenhöhe ab. Der von der ozeanographischen Gruppe in der Atkabucht verankerte Druckpegel (Auflösung des Sensors ca. 4 dm) zeigte zu dieser Zeit mittleren Wasserstand bei konstanter Anzeige über mehrere Stunden vor und nach der Messung (WEGNER 1981 pers. Mitteilung). Mit einer absoluten Genauigkeit der Höhen über dem mittleren Meeresspiegel von ≤ 1

Figur	TC-1	RM-II
Pentagon	04.02.81 26.02.81	04.02.81
Dreieck	17.02.80 12.02.81 ¹⁾ 15.02.81 ²⁾	15.02.81 ³⁾

¹⁾ ohne Punkt 53, mit 106 und 110
²⁾ mit 106 und 110
³⁾ mit 105, 106, 110, 111

Tab. 1: Beobachtungstage in den Deformationsfiguren.

Tab. 1: Dates of observations in the deformation figures.

m kann somit gerechnet werden.

3. AUSGLEICHUNGEN UND DEFORMATIONSANALYSEN

Der Messungszeitraum im Bereich der Neumayer-Station erstreckt sich vom 30. 1. bis zum 27. 2. 1981. Für die an einem Tag beobachteten Teilfiguren lassen sich freie Netze ohne Zeitkorrektion rechnen (Tab. 1).

Die hohe Genauigkeit der Messungen wird aus den mittleren Punktlagefehlern, die zwischen ± 2 und ± 3 mm liegen, deutlich. Es lassen sich deshalb bereits aus kurzfristigen Wiederholungsmessungen signifikante Deformationen errechnen. Abb. 3 zeigt die Deformationen des Pentagons zwischen dem 4. und 26. 2., berechnet aus TC-1 Messungen. Schon aus diesem Bild zeigt sich die Gleichmäßigkeit des Verformungsverhaltens innerhalb der Figur. Auch lassen sich schon gut die Hauptverzerrungsrichtungen (Dehnung in Richtung der Seite 120—121, Pressung senkrecht dazu) erkennen. Näheres hierzu wird unter 4.3. ausgeführt.

Ähnliche Verhältnisse trifft man im ca. 3 km entfernten Dreieck an. In Abb. 4 sind die Deformationen über einen Zeitraum von einem Jahr (17. 2. 1980 — 15. 2. 1981) dargestellt. Um die räumliche Gleichförmigkeit längs der zentralen Strecken auch hier deutlich zu machen, wurden die auf ihnen liegenden Alig-nementspunkte mit einbezogen. Auf kleinere Verzerrungsunterschiede wird später noch eingegangen (4.3.4).

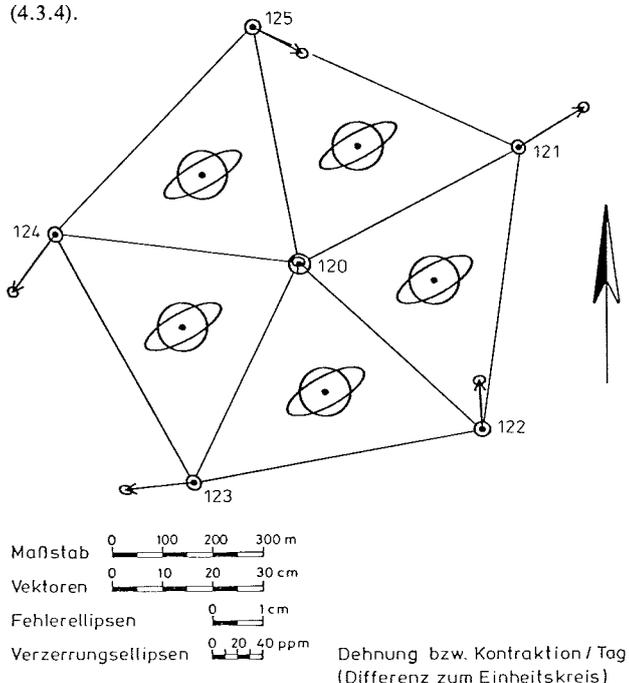


Abb. 3: Deformationen und Verzerrungsra-ten im Pentagon 04. 02.—26. 02. 81.

Fig. 3: Deformation vectors and strain rates in the pentagon 04. 02.—26. 02. 81.

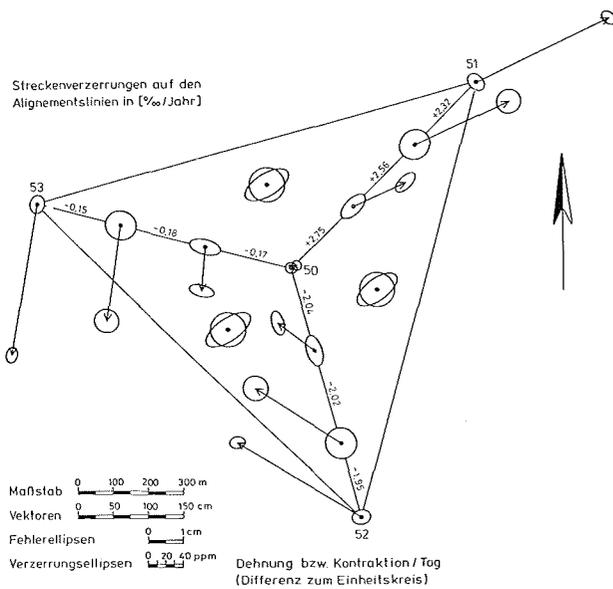


Abb. 4: Deformationen und Verzerrungsra-ten im Dreieck 1980—1981.

Fig. 4: Deformation vectors and strain rates in the triangle 1980—1981.

Wie aus Abb. 5 zu sehen ist, ist auch aus dem sehr kurzen Zeitraum von drei Tagen das gleiche Verformungsverhalten zu erkennen. In dieser Analyse sind die Punkte der Traverse 106 und 110 mit berücksichtigt worden; der Dreieckspunkt 53 fehlt.

Neben dem Vergleich aus Parallelmessungen (s. 2.2) läßt sich eine mögliche Maßstabsdifferenz zwischen TC-1 und RM II auch aus Netzvergleichen im Pentagon vom 4. 2. und im Dreieck vom 15. 2. bestimmen. Ein Maßstabsunterschied kann bei 5% Irrtumswahrscheinlichkeit auch hier nicht signifikant nachgewiesen werden.

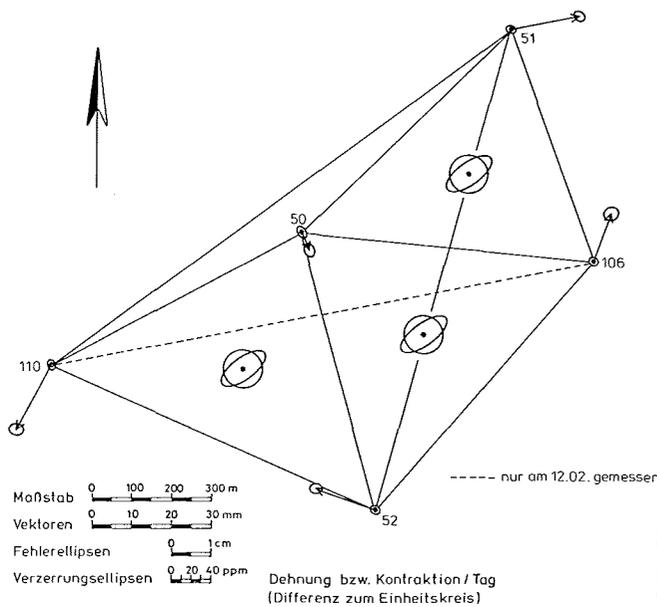


Abb. 5: Deformationen und Verzerrungsra-ten im Dreieck 12. 02.—15. 02. 81.

Fig. 5: Deformation vectors and strain rates in the triangle 12. 02.—15. 02. 81.

4. VERFORMUNGSVERHALTEN DES EISES

4.1 Grundlagen

Für glaziologische Untersuchungen sind die Bestimmung der Hauptachsen der Eisverformung und die Verformungsgeschwindigkeiten in Richtung dieser Achsen von Interesse. Zur Ermittlung der Parameter sind unabhängig voneinander elastizitätstheoretische (Strain-Analyse) und geodätische (Theorie der affinen Abbildung) Lösungen gefunden worden.

Ohne Anspruch auf Vollständigkeit seien einige Lösungsansätze vorgestellt:

- a) Die in der glaziologischen Literatur übliche Rechenweise geht auf ZUMBERGE (1964) zurück. Er bestimmt die Deformationsraten in einem Punkt der Eisoberfläche aus Seitendehformationen $\Delta s/s$ nach drei in Form einer Rosette symmetrisch über den Horizont verteilten Punkten.
- b) Daneben entwickelten HAEFELI und BRANDENBERGER (1968) ein kinematisches Verfahren, durch das die Verzerrungsparameter aus der Verformung eines rechtwinkligen Dreiecks abgeleitet werden können.
- c) KARSTEN und STÖBER (1975, 1976) leiteten aus den Streckenänderungen in einem Pentagon zwischen zwei Meßepochen die Verzerrungsellipse eines durch den herrschenden Spannungszustand affinformten Kreises ab.
- d) In der geodätischen Literatur werden Transformationen verschiedener Art dazu benutzt, um aus unterschiedlichen Messungen berechnete Lagenetze, die identische Punkte aufweisen, vergleichen zu können. Gegenüber der Ähnlichkeitstransformation mit in allen Richtungen gleicher Maßstabsdifferenz hat die Affintransformation den Vorteil, zwei in senkrecht aufeinander stehenden Richtungen liegende Maßstabsverzerrungen zuzulassen.

Ausgehend von der Anwendung der Strain-Analyse beim Nachweis von Erdkrustenbewegungen zeigt WELSCH (1981), daß einerseits die Parameter der Strain-Analyse und die der Affintransformation identisch sind und andererseits die Berechnung aus Beobachtungsdifferenzen und aus Koordinatendifferenzen zum gleichen Ergebnis führt, wenn die gleiche Information zugrunde liegt. RITTER (1982) benutzt die Affintransformation, um aus Deformationsanalysen gefundene Lageveränderungen zwischen identischen Punkten zweier Netze durch die Berechnungen extremer Verzerrungen in Teilfiguren besser interpretieren zu können.

Der Vorteil der „geodätischen“ Verfahren c) und d) liegt in der Unabhängigkeit von einer bestimmten Netzform. Es lassen sich Lösungen für beliebige Dreiecke (nicht überbestimmt) als auch für überbestimmte Figuren (regelmäßige oder auch unregelmäßige) finden. Während bei den „glaziologischen“ Verfahren a) und b) nur auf Streckenmessungen zurückgegriffen wird, können bei den Verfahren c) und d) auch Richtungsmessungen Berücksichtigung finden, da ausgeglichene Strecken (c) bzw. ausgeglichene Koordinaten (d) als Eingangsgrößen benutzt werden. Beim Verfahren d) stehen noch als zusätzliches Beurteilungskriterium für die Modellanpassung die Restklaffungen zur Verfügung.

4.2 Affintransformation

Die Affintransformation soll zur Berechnung der Hauptverzerrungen benutzt werden. Eine Zusammenfassung der Verzerrungseigenschaften dieser Transformation findet sich bei WOLFRUM (1978). Auf die Theorie soll deshalb an dieser Stelle nicht ausführlich eingegangen werden.

Geometrisch gedeutet ist die Affinationsformation eine schräge Parallelprojektion zweier beliebig geneigter Ebenen aufeinander. Ein Kreis wird in eine Ellipse abgebildet. In den Hauptachsen der Ellipse, die senkrecht aufeinander stehen, treten die maximalen Streckenverzerrungen auf.

Eine Deformationsfigur sei in zwei Epochen ausgemessen. Durch die Transformationsfunktionen

$$\begin{aligned}x'_i &= a_0 + a_1 x_i + a_2 y_i \\y'_i &= b_0 + b_1 x_i + b_2 y_i\end{aligned}\quad (1)$$

wird die lineare Affinität zwischen den Koordinaten x_i, y_i der ersten Epoche und x'_i, y'_i der zweiten Epoche beschrieben. Mit den Koeffizienten der perspektiven Affinität

$$\begin{aligned}r &= a_1 \cos \delta - b_1 \sin \delta \\s &= a_1 \sin \delta + b_1 \cos \delta = a_2 \cos \delta - b_2 \sin \delta \\t &= a_2 \sin \delta + b_2 \cos \delta\end{aligned}\quad (2)$$

und dem Drehwinkel

$$\delta = \arctan \frac{a_2 - b_1}{a_1 + b_2}\quad (3)$$

werden die maximalen Maßstabsverzerrungen

$$\begin{aligned}m_1 &= \frac{r+t}{2} + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(r-t)^2 + 4s^2} \\m_2 &= \frac{r+t}{2} - \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(r-t)^2 + 4s^2}\end{aligned}\quad (4)$$

und ihre Richtungen

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= \frac{1}{2} \arctan \frac{2s}{r-t} \\ \varphi_2 &= \varphi_1 \pm 100 \text{ gon.}\end{aligned}\quad (5)$$

Durch m_1, m_2 und φ_1 wird im Netz 2 die Verzerrungsellipse beschrieben. Ihr entspricht im Netz 1 ein Einheitskreis.

Nur im Falle eines Dreiecks ist das Problem nicht überbestimmt. Bei Figuren mit größerer Punktzahl sind aus (1) Verbesserungsgleichungen zu bilden:

$$\begin{aligned}v_{x'_i} &= a_0 + a_1 x_i + a_2 y_i - x'_i \\v_{y'_i} &= b_0 + b_1 x_i + b_2 y_i - y'_i\end{aligned}\quad (1a)$$

Die Transformation wird mit der Nebenbedingung, daß die Quadratsumme der Verbesserungen (Koordinatenklaffungen) zum Minimum gemacht wird, mit Hilfe der Ausgleichsrechnung durchgeführt (z. B. WOLF 1968), wodurch auch Genauigkeitsangaben zu den Verzerrungen gewonnen werden können. Außerdem lassen sich unter Beachtung der zugrunde liegenden Meßgenauigkeit aus der Größe der Restklaffungen nach der Affintransformation Aussagen über die Homogenität des Eises im Bereich der Deformationsfigur treffen, denn die affinen Beziehungen gelten streng nur im homogenen Medium. Unterschiedliche Verzerrungsverhältnisse in Teilbereichen der Figur bewirken größere Klaffungen.

Die in der glaziologischen Literatur üblichen Bezeichnungen ϵ_1 bzw. ϵ_2 für die relativen Längenänderungen im Zeitraum zwischen zwei Meßkampagnen hängen mit m_1 und m_2 über

$$\begin{aligned}\epsilon_1 &= m_1 - 1 \text{ und} \\ \epsilon_2 &= m_2 - 1 \text{ zusammen.}\end{aligned}\quad (6)$$

Positive Vorzeichen deuten auf Dehnungen (Längsdilatationen), negative Vorzeichen auf Pressungen (Querkontraktionen) hin. Bezieht man ϵ_1 und ϵ_2 auf eine Zeiteinheit, üblich ein Jahr, so kommt man zu den Deformationsraten oder Verformungsgeschwindigkeiten $\dot{\epsilon}_1$ und $\dot{\epsilon}_2$. Sie werden meist in (%/Jahr) angegeben.

Bei der Genauigkeitsbetrachtung zur Affintransformation wirken zwei Komponenten zusammen. Die Meßgenauigkeit spiegelt sich in den Punktlagefehlern beider Netze nach der freien Ausgleichung bzw. in den Kofaktoren der Koordinatenklaffungen wider, aus denen die Varianz-Kovarianzmatrix für die Affin-

transformation gebildet wird. Hinzu kommt die Modellunsicherheit der Affintransformation. Liegen homogene Verzerrungsverhältnisse im Eis vor, so sind die Klaffungen nach der Transformation gleich Null, d. h. das Modell trifft zu, die Fehler der Verzerrungsparameter sind weitgehend durch die Meßgenauigkeit bestimmt. Bei inhomogenen Verhältnissen werden die Klaffungen durch die Modellunsicherheit größer und damit auch die Fehlerwerte.

Bei einer Beschränkung auf Teilauswertung in einzelnen Dreiecken werden homogene Verhältnisse in jeder Teilfläche vorausgesetzt. Wegen der fehlenden Überbestimmung muß dann zur Fehlerrechnung der Gewichtseinheitsfehler m_0 empirisch festgelegt werden. Da die Meßgenauigkeit ausschlaggebend ist, wurde m_0 aus den durchschnittlichen inneren Punktlagefehlern der vorausgegangenen freien Ausgleichung mit

$$m_0 = \pm \sqrt{m_{p_1}^2 + m_{p_2}^2} \quad (7)$$

zu ± 3 mm abgeschätzt. Dieser Wert ist für alle untersuchten Teilflächen gültig. Die daraus abgeleiteten Fehlerwerte sind noch abhängig von der Geometrie des Dreiecks. In schlanken Dreiecken können z. B. beide Komponenten nicht mit gleicher Genauigkeit bestimmt werden. Große Unsicherheiten bekommen dann auch die Richtungen der Hauptverformungsachsen. Als Beurteilungskriterium berechnet deshalb RITTER (1981) noch die Fehlerellipse der Verzerrungsparameter, deren Form und Richtung von der Geometrie des Flächenelements und deren Größe vom Gewichtseinheitsfehler abhängt.

4.3 Ergebnisse

Um die in den verschiedenen Deformationsfiguren aus unterschiedlichen Zeitdifferenzen berechneten Verformungsparameter vergleichbar zu machen, müssen sie zuerst auf eine einheitliche Zeitdifferenz ΔT nominiert werden. Da auch kurzfristige Wiederholungsmessungen mit hoher Genauigkeit vorliegen und die Verformungsgeschwindigkeit relativ groß ist, bietet sich $\Delta T = 1$ Tag an.

Sämtlichen Auswertungen liegt ein rechtwinkliges örtliches, nach Norden orientiertes Koordinatensystem zugrunde. Die Richtungen der Hauptachsen der Verformung werden deshalb durch den geodätischen Richtungswinkel — hier mit φ bezeichnet — angegeben, der in diesem Fall mit dem Azimut quasi identisch ist.

4.3.1 Deformationsdreieck

In Tab. 2 sind links die Klaffungen nach der Affintransformation für eine Wiederholungsmessung nach 363 Tagen aufgelistet. Durch ihre Größe wird deutlich, daß in Teilbereichen der Gesamtfigur ein merkbar unterschiedliches Verformungsverhalten des Eises vorliegen muß.

Die Verzerrungsparameter der Gesamtfigur stellen ein räumliches Mittel in diesem Gebiet dar und haben daher größere Fehler als die aus Teildreiecken gerechneten (s. u.). Längsdehnung und Querkontraktion liegen bei leicht größerer Dehnung in der gleichen Größenordnung (Tab. 3). Betrachtet man die Teildreiecke, so fällt — bei leicht wechselnder Richtung — die überall konstante Kontraktion auf. Die Differenzen liegen bei max. 0.1 ppm. Die Dehnung variiert dagegen um 2.1 ppm und ist damit die Ursache für die Klaffungen. In Abb. 4 ist zusätzlich zu den Punktverschiebungen die Verformung in Form einer Verzerrungsellipse des zugehörigen Einheitskreises dargestellt. Bedingt durch den Ellipsenmaßstab sind die örtlichen Unterschiede nicht mehr erkennbar. Die hohe Genauigkeit der Verzerrungsparameter bezogen auf

Punkt	Klaffungen (mm)			
	$\Delta T = 363$ Tage		$\Delta T = 3$ Tage	
	v_y	v_x	v_y	v_x
50	-120	-78	0	0
51	+ 33	+16	0	0
52	+ 31	+16	0	0
53	+ 30	+18	—	—
106	—	—	-1	0
110	—	—	0	0

Tab. 2: Klaffungen nach Affintransformation im Dreieck.

Tab. 2: Differences in coordinates out of the affine transformation in the triangle.

Figur	Teildreieck	ΔT	$\varphi_1 \pm m_{\varphi_1}$		$\dot{\epsilon}_1 \pm m(\epsilon_1)$		$\dot{\epsilon}_2 \pm m(\epsilon_2)$	
		(Tage)	(gon)		(ppm)		(ppm)	
Dreieck	Gesamt	363	61.3	0.8	+ 8.1	0.3	-7.4	0.3
	50—51—52		59.03	0.01	+ 7.31	0.00	-7.50	0.00
	50—52—53		60.93	0.01	+ 9.42	0.01	-7.44	0.00
	50—53—51		63.82	0.01	+ 7.72	0.00	-7.40	0.01
erweitertes Dreieck	Gesamt	3	58.3	0.6	+ 7.7	0.2	-8.6	0.2
	50—51—106		59.5	1.2	+ 7.9	0.4	-8.5	0.5
	50—52—106		58.8	1.0	+ 8.2	0.4	-8.6	0.4
	50—52—110		57.9	1.2	+ 7.2	0.5	-8.6	0.3
	50—51—52		58.3	1.3	+ 7.8	0.4	-8.6	0.6
	51—106—52		60.0	1.5	+ 8.4	0.5	-8.5	0.6
Pentagon	Gesamt	22	66.6	0.6	+ 14.6	0.3	-9.0	0.3
	120—121—122		66.6	0.2	+ 14.1	0.1	-8.2	0.1
	120—122—123		66.6	0.2	+ 14.2	0.1	-8.2	0.1
	120—123—124		67.0	0.1	+ 14.9	0.1	-9.1	0.1
	120—124—125		66.5	0.1	+ 15.5	0.1	-9.7	0.1
	120—125—121		66.0	0.2	+ 14.1	0.1	-9.7	0.1

Tab. 3: Durchschnittliche Verzerrungsparameter bezogen auf $\Delta T = 1$ Tag.

Tab. 3: Average strain rates based on $\Delta T = 1$ day.

$\Delta T = 1$ Tag beruht auf der Meßgenauigkeit und dem Zeitabstand $\Delta T = 363$ Tage beider Messungen.

Bemerkenswert ist, daß sich auch aus kurzfristigen Wiederholungsmessungen ($\Delta T = 3$ Tage) ein ähnliches Bild ableiten läßt (Tab. 3, Abb. 5). Die Größenordnung der Verzerrungen bleibt erhalten. Wiederum bleibt die Größe der Kontraktion räumlich konstant, während die Dilatation um nur 1.2 ppm schwankt. Die Kontraktion ist jedoch nunmehr stärker als die Dehnung, wobei zu berücksichtigen ist, daß aufgrund der kurzen Zeitdifferenzen größere mittlere Fehler auftreten und die Vertrauensbereiche für die angegebenen Parameter sich vergrößern. Klaffungen gibt es wegen der geringeren Zeitdifferenz nicht (Tab. 2 rechts). Die hohe Meßgenauigkeit wird dadurch eindrucksvoll bestätigt.

4.3.2 Deformationspentagon

Die Transformation der im Abstand von 22 Tagen beobachteten Netze bringt die in Tab. 4 aufgeführten Restklaffungen von max. 7 mm. Im Gegensatz zum Dreieck sind Dehnung und Kontraktion von deutlich unterschiedlicher Größenordnung (Tab. 3, Abb. 3). Die Längsdehnung in der Gesamtfigur beträgt + 14.6 ppm \pm 0.3 ppm unter einem Azimut von 66.6 gon, die Querkontraktion -9.0 ppm \pm 0.3 ppm senkrecht dazu. In den fünf Teildreiecken schwanken die entsprechenden Angaben um 1.4 ppm für die Dehnung und um 1.6 ppm für die Kontraktion. Die Genauigkeit aller Parameter ist besser als \pm 0.1 ppm.

4.3.3 Zeitliche Änderung des Verformungsverhaltens

Über die jahreszeitlich bedingte Variation der Verzerrungsparameter im Dreieck lassen sich anhand des vorliegenden Messungsmaterials nur sehr vage Aussagen treffen. Wie schon angesprochen, sind die aus kurzfristigen Wiederholungsmessungen berechneten Parameter denen aus Jahresfrist abgeleiteten ähnlich. Zum besseren Vergleich sind in Tab. 5 neben den auf $\Delta T = 1$ Tag bezogenen auch die auf $\Delta T = 365$ Tage extrapolierten Werte aufgeführt. Da sich im Dreieck keine wesentlichen zeitlichen Unterschiede

Punkt	Klaffungen (mm) $\Delta T = 22$ Tage	
	v_y	v_x
120	+1	-5
121	+4	-1
122	-2	+4
123	-3	-3
124	+5	+4
125	-7	0

Tab. 4: Klaffungen nach Affintransformation im Pentagon.

Tab. 4: Differences in coordinates out of the affine transformation in the pentagon.

ergeben hatten, sei auch im Pentagon die Extrapolation erlaubt. Die Differenzen zwischen den aus lang- und kurzfristigen Wiederholungsmessungen extrapolierten Werten liegen im Dreieck bei 0.2 ‰ für die Dehnung und 0.4 ‰ für die Kontraktion. Hilfreich zur weiteren Beurteilung sind die zeitlichen Änderungen der Strecken selbst. Einige mehrfach gemessene Strecken sind in Abb. 6 in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Sehr deutlich kann daraus das lineare Verzerrungsverhalten des Eises in einem Zeitraum von 5—27 Tagen entnommen werden. In den Diagrammen der Strecken 50—51, 50—52 und 50—53 ist zusätzlich das durchschnittliche Jahresverhalten eingezeichnet. Diese Geraden weisen nur geringe Neigungen gegenüber denen aus kurzfristigen Messungen auf. Mit allen Vorbehalten wegen des geringen Zeitabstandes läßt sich folgende Schlußfolgerung ziehen. Entweder ist das Verformungsverhalten im Jahr über relativ konstant, oder aber es entspricht im Februar in etwa dem Jahresmittel, während es in anderen Monaten variiert.

	Dreieck	erw. Dreieck	Pentagon
ΔT (Tage)	363	3	22
φ_1 (gon)	61.3 \pm 0.8	58.3 \pm 0.6	66.6 \pm 0.6
ϵ_1 (ppm)	+2954 \pm 106	+23.0 \pm 0.5	+320 \pm 6
ϵ_2 (ppm)	-2696 \pm 106	-25.7 \pm 0.7	-197 \pm 7
<hr/>			
$\Delta T = 1$ Tag			
$\dot{\epsilon}_1$ (ppm/Tag)	+8.1 \pm 0.3	+7.7 \pm 0.2	+14.6 \pm 0.3
$\dot{\epsilon}_2$ (ppm/Tag)	-7.4 \pm 0.3	-8.6 \pm 0.2	-9.0 \pm 0.3
<hr/>			
$\Delta T = 365$ Tage			
$\dot{\epsilon}_1$ (‰/Jahr)	+3.0 \pm 0.1	+2.9 —	+5.3 —
$\dot{\epsilon}_2$ (‰/Jahr)	-2.7 \pm 0.1	-3.1 —	-3.3 —

Tab. 5: Übersicht über Deformationsgeschwindigkeiten.

Tab. 5: Survey of the deformation rates.

4.3.4 Räumliche Änderung des Verformungsverhaltens

Schon die Auswertung einzelner Teilfiguren zeigte eine Änderung der Verformungsparameter mit dem Ort. Noch deutlicher wird dies durch einen Vergleich der Ergebnisse von Pentagon und Dreieck. Während die Kontraktionen von ungefähr gleicher Größenordnung sind (-2.7 ‰/Jahr im Dreieck gegenüber -3.3 ‰/Jahr im Pentagon), sind die Dehnungen im 3 km weiter im Eisinneren gelegenen Pentagon mit +5.3 ‰/Jahr deutlich höher als im Dreieck mit +3.0 ‰/Jahr.

Weitere Informationen über die Variation des Verformungsverhaltens erhält man aus den Alignementmessungen, die im Dreieck mit Jahresabstand vorliegen. Mit Beschränkung auf die Verformung in Längsrichtung sind in Abb. 4 die Verzerrungen der Strecken zwischen den auf den zentralen Seiten liegenden Alignementpunkten angeschrieben. Die Genauigkeit aller Werte ist besser als 0.03 ‰. Es wird deutlich, daß die Abnahme der Verzerrungen nach Nordwesten sich auch innerhalb des Dreiecks signifikant fortsetzt (Seite 50—51). Auf den Seiten 50—52 bzw. 50—53 bleiben dagegen die Verzerrungen konstant, entsprechend der gleichmäßigen Kontraktion im Untersuchungsgebiet.

4.3.5 Flächenverzerrungen

Neben den linearen Verformungsgeschwindigkeiten ist die Verzerrung der von der Deformationsfigur eingeschlossenen Fläche von Interesse. Diese läßt sich auf leichte Weise durch Flächenberechnung aus Koordinaten, mit Hilfe der Maßstabsverhältnisse m_1 und m_2 oder genau genug — wie in der Glaziologie üblich — aus der relativen Änderung ϵ_1 und ϵ_2 berechnen:

$$\frac{\Delta F}{F} = m_1 \cdot m_2 - 1 \approx \epsilon_1 + \epsilon_2 \quad (8)$$

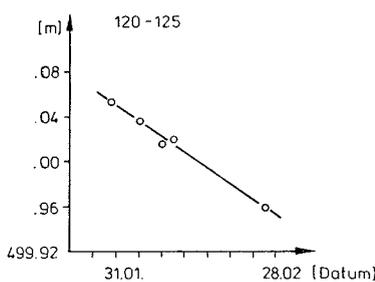
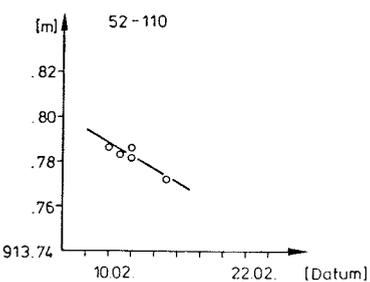
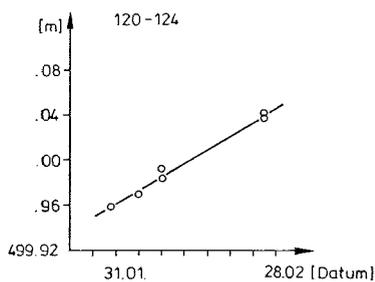
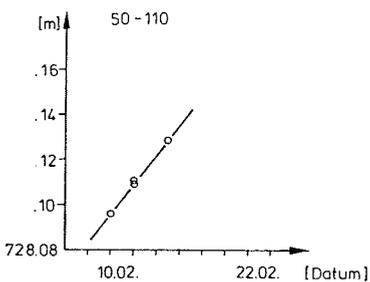
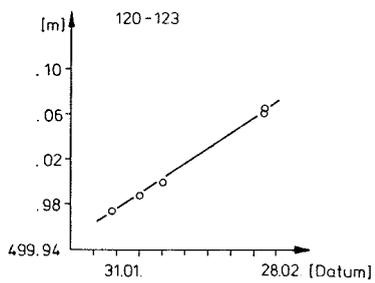
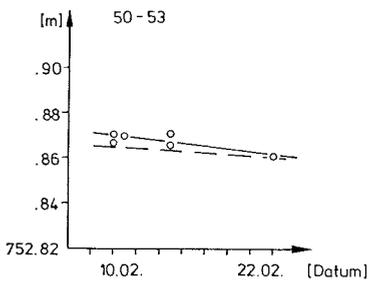
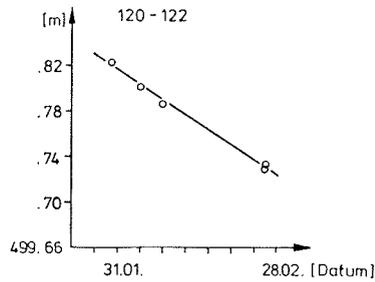
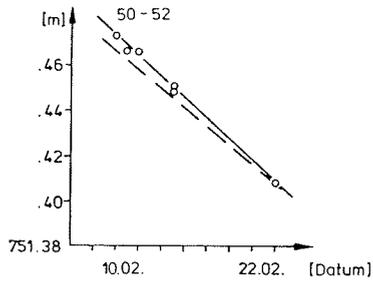
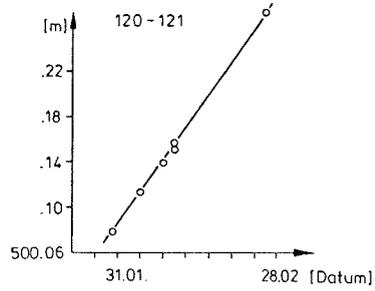
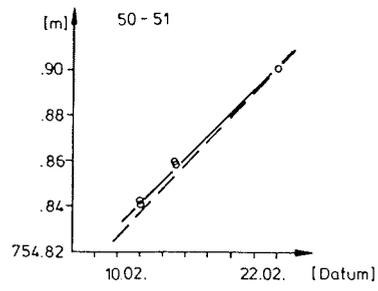


Abb. 6: Streckenverzerrungen im Dreieck und Pentagon.

Fig. 6: Changes of distances in the triangle and the pentagon.

Figur	ΔT (Tage)	Flächenverzerrung	
		pro ΔT (‰)	pro Jahr (‰)
Dreieck	363	+0.3 ±0.1	+0.3 ±0.1
Pentagon	22	+0.12 ±0.01	+2.0 —

Tab. 6: Flächenverzerrungen in den Deformationsfiguren.

Tab. 6: Distortion of the area in the deformation figures.

4.3.6 Spezielle Deformationsraten

Streckenverzerrungen m_i in beliebiger Richtung φ_i können aus der Verzerrungsellipse mit

$$m_i^2 = m_1^2 \cdot \cos^2(\varphi_m - \varphi_i) + m_2^2 \cdot \sin^2(\varphi_m - \varphi_i) \quad (9)$$

oder genau genug (MEIER 1977) mit

$$\dot{\epsilon}_i = \frac{1}{2}(\dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2) + \frac{1}{2}(\dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_2) \cdot \cos(2 \cdot (\varphi_m - \varphi_i)) \quad (10)$$

berechnet werden. Insbesondere sind interessant die Komponenten $\dot{\epsilon}_x = \dot{\epsilon}_v$ in Fließrichtung φ_v und $\dot{\epsilon}_y$ senkrecht dazu ($\varphi_v + 100$ gon). Für die Fließrichtung steht aus einer vorläufigen Berechnung der Wert $\varphi_v = 15^\circ \hat{=} 16.7$ gon zur Verfügung. Für die Schwerpunkte von Dreieck und Pentagon erhält man die folgenden Werte:

Figur	$\dot{\epsilon}_x$	$\dot{\epsilon}_y$
	(‰/Jahr)	(‰/Jahr)
Dreieck	+0.6	-0.4
Pentagon	+1.0	+1.0

Tab. 7: Deformationsraten in Fließrichtung und quer dazu.

Tab. 7: Strain rates based on the direction of ice flow.

In gleicher Weise lassen sich die Deformationsraten in bezug auf die Längs- und die Querachse der Neumayer-Station rechnen. Bei einer Orientierung der Station von 393.2 gon (= -6.8) ergeben sich die folgenden Deformationsgeschwindigkeiten:

- a) in Längsrichtung $\dot{\epsilon}_l = -1.8$ ‰/Jahr
- b) in Querrichtung $\dot{\epsilon}_q = +4.0$ ‰/Jahr

Mit den Maßen $L = 50$ m und $B = 24$ m der Station beträgt dann die Eisverformung:

- a) in Längsrichtung: -9.2 cm/Jahr
- b) in Querrichtung: +9.6 cm/Jahr.

4.3.7 Weitere Verzerrungsangaben

Von Interesse können ferner die Richtungen mit maximaler bzw. ohne Richtungsverzerrung und solche ohne Streckenverzerrung sein. Die Berechnung der Richtungsverzerrungen dient aus geodätischer Sicht der vollständigen Darstellung der Verzerrungseigenschaften der Affintransformation, während die Richtungen ohne Streckenverzerrung mehr praktische Bedeutung haben.

Die Richtung maximaler Richtungsverzerrung erhält man aus:

$$\tan(2\varphi_m) = -\frac{r-t}{2s} \quad (11)$$

und die maximalen Verzerrungen selbst aus:

$$(\varphi' - \varphi)_m = \pm \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(r-t)^2 + 4s^2} \quad (12)$$

Daraus ergeben sich folgende Werte:

Figur	φ_{m_1} (gon)	$(\varphi' - \varphi)_{m_1}$ (gon)	φ_{m_2} (gon)	$(\varphi' - \varphi)_{m_2}$ (gon)
Dreieck	11.3	+0.1798	111.3	-0.1798
Pentagon	16.6	+0.0164	116.6	-0.0164

Tab. 8: Maximale Richtungsverzerrungen.

Tab. 8: Maximale distortions of bearings.

Die Richtungen maximaler Richtungsverzerrungen liegen somit auf den Winkelhalbierenden zwischen den Richtungen der Hauptverzerrungen. Zu ersehen ist dies auch aus einem Vergleich der Gleichungen (5) und (11).

Richtungsverzerrungen in beliebiger Richtung φ_i errechnen sich aus:

$$(\varphi'_i - \varphi_i) = \frac{1}{2} \cdot (-r-t) \cdot \sin 2\varphi_i + 2s \cdot \cos 2\varphi_i \quad (13)$$

Für Richtungen ohne Richtungsverzerrung wird $(\varphi'_i - \varphi_i) = 0$ und daraus folgt:

$$\tan 2\varphi_i = \frac{2s}{r-t} \quad (14)$$

Die Richtungen ohne Richtungsverzerrung fallen also, wie sich auch aus der Anschauung ergibt, mit den Richtungen maximaler Streckenverzerrung (Gleichung 5) zusammen.

Im Verlauf der Expedition „Eiswarte 1981/82“ wird ca. 1000 m von der „Georg von Neumayer Station“ entfernt ein geophysikalisches Observatorium aufgebaut, das durch eine Kabelverbindung an die Station angeschlossen werden soll. Um dieses Kabel einer minimalen Zugbeanspruchung auszusetzen, soll das Observatorium in die Richtung von der Station aus gelegt werden, in der mit Streckenverzerrungen nicht zu rechnen ist.

Richtungen φ_i ohne Streckenverzerrung lassen sich mit $m_1 = 1$ aus Gleichung (9) berechnen. Durch Umformen ergibt sich:

$$\sin^2(\varphi_m - \varphi_i) = \frac{1 - m_1^2}{m_2^2 - m_1^2} \quad (15)$$

oder genau genug nach MEIER (1977):

$$\tan^2(\varphi_m - \varphi_i) = -\frac{\dot{\epsilon}_1}{\dot{\epsilon}_2} \quad (16)$$

und damit

$$\varphi_i = \varphi_m \pm (\varphi_m - \varphi_i) \quad (17)$$

Sämtliche Azimute ohne Streckenverzerrung sind in Tab. 9 zusammengestellt.

Figur	1. Richtung (gon)	2. Richtung (gon)
Dreieck	9.8 (209.8)	112.7 (312.7)
Pentagon	8.9 (208.9)	124.2 (324.2)

Tab. 9: Richtungen ohne Streckenverzerrung.

Tab. 9: Directions without distortion of distances.

Literatur

- Deutsche Forschungsgemeinschaft (1980): Protokoll über das Rundgespräch „Geowissenschaftliche Antarktisforschung“, Bonn-Bad Godesberg, 27.–28. März 1980. — Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), Bonn-Bad Godesberg.
- Gerdau, H., Möller, D., Schenke, H. W. & G. Seiber (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.
- Gerdau, H., & M. Köhler (1982): Wissenschaftliche Arbeiten und vorläufige Ergebnisse der Gruppe Geodäsie im Rahmen der Filchner-Schelfeis-Expedition 1980/81. — Ber. z. Polarforschung 1:14–16, Bremerhaven.

- Karsten, A. & M. Stober (1975): Deformationsmessungen auf dem Grönländischen Inlandeis während der Intern. Glaziologischen Grönlandexpedition 1974. — *Polarforschung* 45 (1): 45—50.
- Köhnen, H. (1982): Die Filchner-Schelfeis-Expedition 1980/81. Eine Einführung — *Ber. z. Polarforschung* 1:8—13, Bremerhaven.
- Meier, S. (1977): Die küstennahe Eisdecke des westlichen Enderby-Landes. — Gotha/Leipzig.
- Möller, D. (1980): Geodätische Arbeiten auf dem Filchner/Ronne-Schelfeis und in der Atkabucht in Fortführung der im Rahmen der Deutschen Antarktisexpedition zur Standorterkundung 1979/80 begonnenen Arbeiten. — In: *Antarktis 1980/81, Filchner-Schelfeis-Expedition der Bundesrepublik Deutschland, Programm*. Alfred-Wegener-Institut für Polarforschung, Bremerhaven.
- Möller, D. & H. Gerda (1981): Geodetic surveying on the Filchner/Ronne ice Shelf and in the Atka Bay 1979/80. — *Polarforschung* 51 (1):43—53.
- Möller, D. (1982): Deutsche Antarktisforschung — aus der Sicht eines Geodäten. — *Mitt. d. TU Braunschweig* 1: 5—14.
- Ritter, B. (1982): Untersuchung geodätischer Netze in Island zur Analyse von Deformationen von 1965 bis 1977. — *Deutsche Geod. Komm. Reihe C*, München (im Druck).
- Stober, M. (1976): Zur Bestimmung der Deformation des grönländischen Inlandeises bei Crête. — *Polarforschung* 46 (1): 60—61.
- Welsch, W. (1981): Description of homogeneous horizontal strains and some remarks to their analysis. — *IUGG-Symposium of Geodetic networks and Computations*, München.
- Wolf, H. (1968): Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate. — Bonn.
- Wolfrum, O. (1978): Die Verzerrungseigenschaften der affinen Transformation. — *Allgem. Vermessungs-Nachr.* 85: 367—374.
- Zumberge, J. H. (1964): Horizontal strain and absolute movement of the Ross Ice Shelf between Ross Island and Roosevelt Island, Antarctica, 1958—1963. — In: *Antarctic snow and ice studies, Antarctic Res. Ser.* 2: 65—81, Washington.