

## Höhenbestimmung im westlichen Randbereich des grönländischen Inlandeises

Von Manfred Stober\*

**Zusammenfassung:** Im Rahmen der Grönlandexpedition 1990 des Instituts für Vermessungskunde der TU Braunschweig wurden aus Marcographenaufzeichnungen der Jahre 1989 und 1990, terrestrischen Anschlußmessungen und GPS-Messungen an der Westküste sowohl Höhen über dem Meeresniveau als auch ellipsoidische Höhen bestimmt. Die Meß- und Auswertverfahren werden erläutert und die abgeleiteten Geoidundulationen mit einem Geoidmodell verglichen. Es zeigt sich, daß die absolute GPS-Einzelhöhenbestimmung trotz Verwendung präziser Ephemeriden nicht genauer als ca.  $\pm 2$  m möglich ist und daß der gefundene Geoidverlauf gegenüber demjenigen aus einem Geoidmodell eine Kippung um 1 m auf 80 km aufweist.

**Summary:** During the Greenland expedition in 1990 of the Institut für Vermessungskunde of the TU Braunschweig both the author determined heights above sea-level and ellipsoidal ones from tide gauge registrations of the years 1989 and 1990. The methods of measuring and evaluating are explained and the geoid-separations are calculated. The following results were obtained: The GPS-singlepoint solution in height is not more precise than  $\pm 2$  m even when using precise ephemerides. Compared to a geoid model the geoid-separations show a tilt of 1 m on a distance of 80 km.

### ÜBERBLICK UND AUFGABENSTELLUNG

1959 wurde durch die Internationale Glaziologische Grönlandexpedition (EGIG) zwischen ca.  $70^\circ$  und  $71^\circ$  nördlicher Breite ein rund 900 km langes West-Ost-Profil über das grönländische Inlandeis vermarktet und nach Lage und Höhe vermessen (HOFMANN 1964, MÄLZER 1964). Die ersten Wiederholungsmessungen, aus denen Fließbewegungen und Höhenänderungen des Eises abgeleitet wurden, erfolgten 1967/68 (HOFMANN 1986, SECKEL 1977a, b). Um die Veränderungen dieses Profiles nach weiteren 30 Jahren zu erfassen, werden die geodätischen Arbeiten seit 1987 vom Institut für Vermessungskunde der TU Braunschweig (Prof. Dr. D. Möller) im Rahmen eines vom Bundesminister für Forschung und Technologie geförderten Forschungsvorhabens zum Massenhaushalt des grönländischen Inlandeises weitergeführt (MÖLLER 1990).

Das EGIG-Profil (Abb. 1) war ursprünglich höhenmäßig über den Festpunkt A14 im Westen an das Meeresniveau angeschlossen worden (MÄLZER 1964). Seit 1987 werden nun auch aus Satellitenbeobachtungen mit Empfängern des Global Positioning Systems (GPS) ellipsoidische Höhen bestimmt, die sich nicht auf den Meereshorizont sondern auf das Bezugssystem WGS 84 beziehen. Zum Vergleich der „alten“ mit den „neuen“ Höhen bedarf es der Kenntnis des Geoid-Verlaufes über dem Ellipsoid, d.h. der Geoidundulationen (Abb. 2). In Küstenstationen kann die Geoid-Undulation näherungsweise durch Vergleich der Meereshöhe mit der entsprechenden GPS-Höhe bestimmt werden. Zu diesem Zweck werden die zweimonatigen GPS-Messungen in Jakobshavn auf dem im festen Fels vermarkten Referenzpunkt für die Arbeiten auf dem Inlandeis herangezogen, die der Verfasser bei der Teilnahme an der Grönlandexpedition 1990 des Instituts für Vermessungskunde der TU Braunschweig ausführen konnte. Zusätzlich wird das mittlere Meeresniveau näherungsweise aus Mareographenaufzeichnungen der Jahre 1989 und 1990 abgeleitet und trigonometrisch auf den GPS-Punkt übertragen und die ellipsoidische Höhe des A14 bestimmt.

### HÖHENBESTIMMUNG DES PUNKTES A14 (ALT)

Der Höhenfestpunkt A14 befindet sich auf einem Hügel auf festem Gestein am Westrand des Inlandeises etwa 80 km nördlich von Jakobshavn. Er wurde schon vor Beginn der EGIG-Campagnen durch die Expéditions Polaires Françaises (EPF) erkundet und höhenmäßig bestimmt (BAUER et al. 1953). Für die Bestimmung des mittleren Meeresniveaus wurden die Gezeiten 1948 an nur drei Tagen beobachtet, von denen für die Höhenfestlegung des Randpunktes A1 sogar nur je ein Hoch- und Tiefpunkt verwendet wurden mit dem Ergebnis

$H(A1) = 51,5$  m ü. Meer.

\* Prof. Dr.-Ing. Manfred Stober, Fachhochschule für Technik Stuttgart, Fachbereich Vermessungswesen, Postfach 10 14 52, D-W-7000 Stuttgart 10. Manuskript eingegangen: 17. März 1992, angenommen: 16. April 1992.

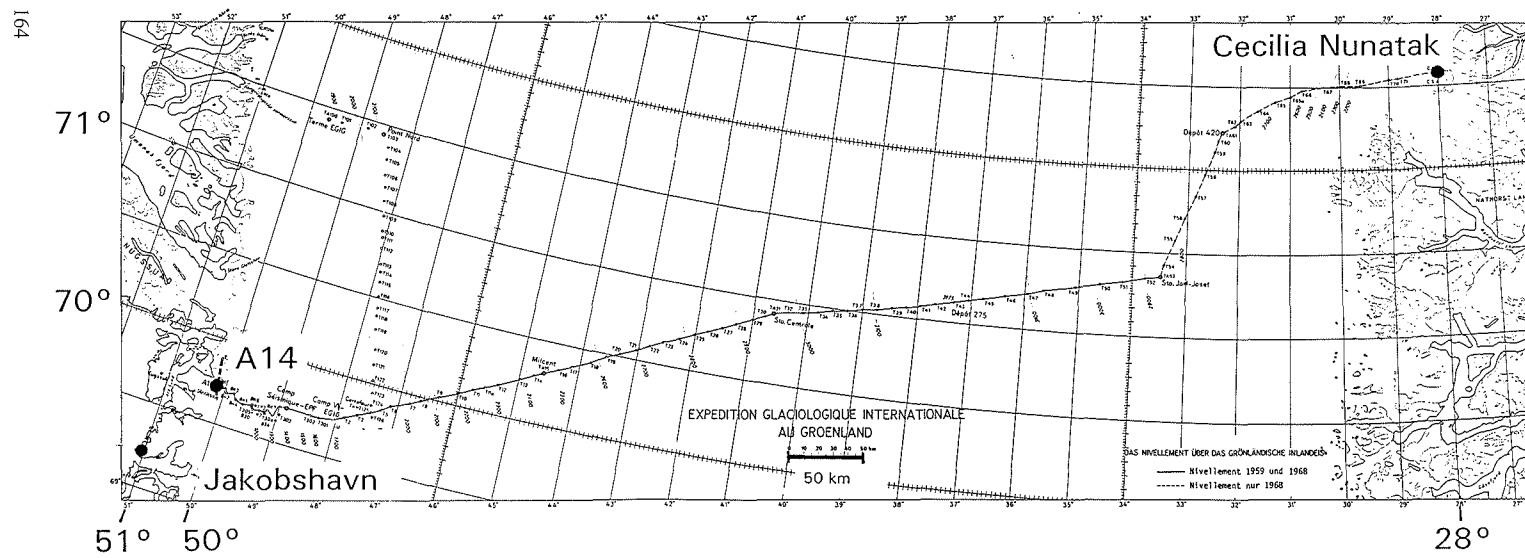


Abb. 1: Übersicht über den Verlauf des EGIG-Profiles mit den ursprünglichen Festpunkten A14 an der grönländischen Westküste und Cecilia Nunatak im Osten, sowie dem neuen Festpunkt in Jakobshavn.

Fig. 1: Geographic situation of the EGIG line showing old fix points A14 (west coast of Greenland) and Cecilia Nunatak (east coast) and the new fix point at Jakobshavn.

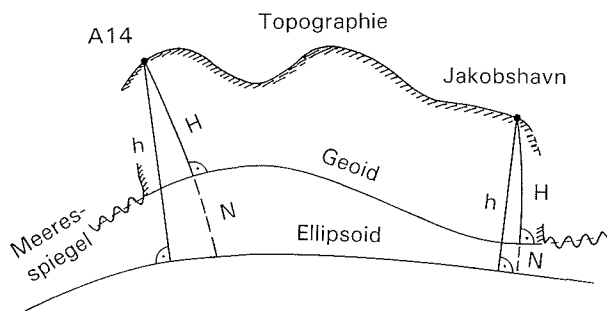


Abb. 2: Vereinfachte Darstellung der unterschiedlichen Höhensysteme. Die ursprünglichen Höhen im EGIG-Profil sind orthometrische Höhen („Meereshöhen“) bezogen auf das Meeresniveau bei A14. Meereshöhen (H) unterscheiden sich von ellipsoidischen GPS-Höhen (h) um die Geoid-Undulation (N), die von Ort zu Ort verschieden ist.

Fig. 2: Simplified presentation of different height systems: The old heights of the EGIG line represent orthometric heights related to sea level at A14. Heights above sea level (H) and ellipsoidal heights from GPS (h) differ by the geoid separation (N) which is different at every point.

Die Wiederholung 1952 über fünf Tage mit Auswertung über 96 Stunden ergab für denselben Punkt A1

$$H(A1) = 51,65 \pm 0,10 \text{ m.}$$

Von A1 nach A14 wurde bereits 1948 der Höhenunterschied trigonometrisch zu

$$DH(A1 - A14) = 508,9 \text{ m}$$

bestimmt, so daß sich damit für A14 die Meereshöhe

$$H(A14) = 560,4 \text{ m} \pm 0,2 \text{ m}$$

ergab, die auch nach 1952 beibehalten wurde.

#### BESTIMMUNG DES MITTLEREN MEERESNIVEAUS IN JAKOBSHAVN

##### *Instrumentarium und Daten*

In Jakobshavn war ein Gezeitenschreiber der Firma NEYRPIEC (Frankreich) installiert und in den Sommermonaten in Betrieb. Die graphischen Protokolle, die dem Verfasser zugänglich waren, umfaßten die Zeiträume 11.08.89-19.10.89 und 20.05.90-26.07.90, insgesamt 138 Tage.

Der Mareograph arbeitete nach dem pneumatischen System, bei dem die Höhenänderung des Wasserstandes als Druckdifferenz an einer Druckkapsel gemessen wird. Ein Schreiber registriert die Wasserhöhen, so daß die Daten in Form von graphischen Kurven vorliegen.

Zur Überprüfung der Daten waren folgende Kontrollen erforderlich: (1) Maßstabkontrolle der Amplitude (Wasserstand) und der Zeit, (2) Übertragung des Skalennullpunktes in die Natur. Beides erfolgte mit Hilfe einer Hafenerleiter, an deren Sprossen der aktuelle Wasserstand sporadisch abgelesen wurde. Der graphische Vergleich mit den Registrierkurven zeigt gute Übereinstimmung, Abbildung 3 gibt hierfür ein Beispiel.

##### *Das mittlere Meeresniveau*

Die Definition des „Mittleren Meeresniveaus“ ist im Prinzip einfach und als der mittlere Wasserstand nach Abspaltung aller Störeinflüsse, wie kurzperiodische und langperiodische Tiden, meteorologische Effekte (Druckvariation, Windstau), Strömungseffekte (Küstenkonfiguration, Seichtwassertiden) definiert.

In der Praxis gestaltet sich die Berechnung jedoch problematisch. So gibt es allein schon 505 astronomische Tiden unterschiedlicher Perioden und Amplituden (vgl. PUGH 1987), deren Elimination eine Zeitreihe von mindestens 18,6 Jahren (Nodal tide) erfordern würde. Während der Einfluß der Luftdruckvariation noch relativ einfach zu ermitteln ist (Faustregel: +1 hPa = -1 cm Meereshöhe), so entzieht sich der Einfluß der Küstenkonfiguration und

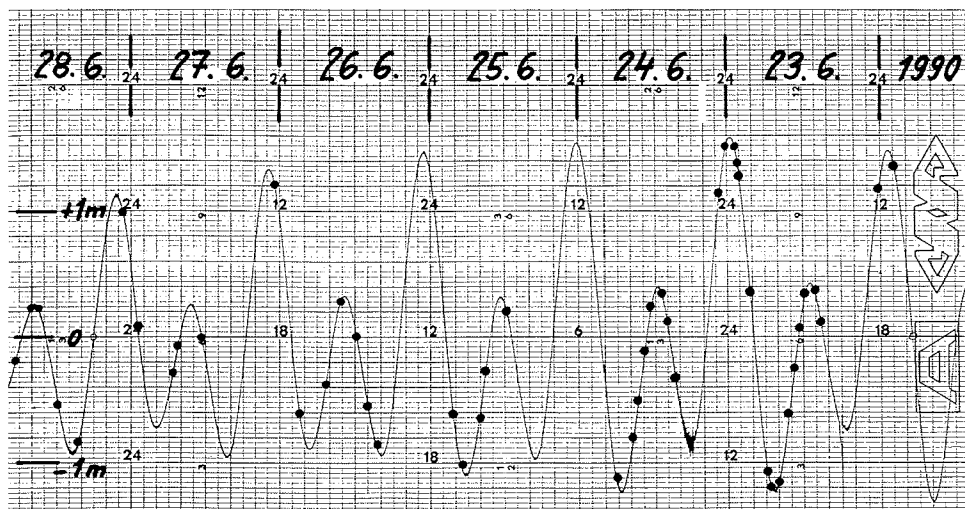


Abb. 3: Wasserstandskurven in Jakobshavn. Das mittlere Meeresniveau wurde mit Hilfe von Pegelregistrierungen (Linien) über 138 Tage bestimmt. Zur Kontrolle erfolgten einige visuelle Wasserstandsablesungen (Punkte) an einer Leiter der Hafenummauer.

Fig 3: Waterlevel in Jakobshavn: Mean sea level was determined from tide gauge recordings (line) over a period of 138 days verified by a number of visual readings (dots).

auch der des Windstaus weitgehend einer mathematischen Modellierung. Zusätzlich können Fehler des Registrierungssystems (Maßstäbe der Zeit- und Wasserstandsachsen, Wellengang) die aufgezeichneten Kurven verfälschen.

Da außerdem beim vorliegenden Datenmaterial nur kurze Zeitreihen zur Verfügung stehen, wurde auf jegliche Korrektur an den rohen Registrierungen verzichtet.

Aber auch die Rechenvorschrift „Mittel“ ist nicht eindeutig. Die Form der Tidenkurve hat Auswirkungen auf den mittleren Wasserstand, je nach dem wie dieses „Mittel“ berechnet wird (LAUKART 1981). Man unterscheidet:

- (1) Tidenmittelwasser (TmW). Dies ist der integrale Mittelwert (entspricht Flächengleichheit) zwischen zwei Niedrigwassern und dem dazwischenliegenden Hochwasser,
- (2) Tidenhalbwasser (ThW). Dies ist das Mittel aus den Extremwerten (Hoch- und Niedrigwasserwerte), wobei jeweils drei Werte einbezogen werden, deren Gewichte  $p$  für den Zentralwert  $p = 1$  und für die beiden Randwerte  $p = 0,5$  gesetzt werden,
- (3) Arithmetisches Mittel. Das Mittel aus den stündlichen Wasserstandswerten.

Das Datenmaterial wurde nach den beiden erstgenannten Methoden ausgewertet, wobei für die ausgleichende Linie zur Flächengleichheit (TmW) ein Planimeter eingesetzt wurde. Zum besseren Einblick in die Homogenität der errechneten Mittelwerte erfolgte noch eine Unterteilung in vier Epochen zu durchschnittlich 35 Tagen. Aus den Ergebnissen ist zu erkennen (Tab. 1), daß die Unterschiede im Berechnungsverfahren klein sind (maximal 16 mm), daß aber von Epoche zu Epoche sehr große Differenzen auftreten können (maximal 151 mm). Dennoch ist der Mittelwert aus allen vier Epochen mit einer Genauigkeit von  $\pm 38$  mm für unsere Zwecke ausreichend genau. Für die weiteren Berechnungen wird der mittlere Wasserstand mit

$$TmW = +73 \pm 38 \text{ mm}$$

über dem Skalennullpunkt angehalten.

	Epoche	Tidenhalbwasser ThW (mm)	Tidenmittelwasser TmW (mm)	Differenz (mm)
I	11.08.-14.09.89	+ 134	+ 126	+ 8
II	15.09.-19.10.89	+ 125	+ 135	- 11
III	20.05.-22.06.90	- 26	- 10	- 16
IV	23.06.-26.07.90	+ 31	+ 45	- 14
Gesamt	138 Tage	+ 65	+ 73	- 8

Tab. 1: Mittleres Meeressniveau in Jakobshavn, Werte relativ zum Nullpunkt der Registrierung. Zum besseren Einblick in die erreichte Genauigkeit wurde die gesamte Meßzeit von 138 Tagen in vier Epochen unterteilt.

Tab. 1: Mean sea-level in Jakobshavn. Values in relation to the zeroline of recording chart. For better information about the achieved accuracy total recording time of 138 days is subdivided into four periods.

#### HÖHENANSCHLUSS DES GPS-PUNKTES JAKOBHAVN (EUREF-NO 0112)

Zur Übertragung der Meereshöhe von der Hafenerleiter und zur Kontrolle von einem weiteren Wandpunkt auf den GPS-Punkt (identisch mit Punkt 0112 der EUREF-NO-Campagne 1990) wurde ein einfaches trigonometrisches Netz angelegt (Abb. 4). Es basiert auf den Punkten Nr. 5123, 1578 und 2272 des örtlichen Netzes der Greenland Technical Organisation (GTO), deren Lagekoordinaten zur Maßstabsbestimmung dienen. Gemessen wurden alle Horizontal- und Vertikalwinkel auf den Standpunkten 5123 und 2272. Das Netz erlaubt die Bildung von vier Höhengschleifen, deren Schleifenschlußfehler mit +4, +5, -3 und -8 mm einen mittleren zufälligen Fehler eines Höhenunterschiedes von besser als  $\pm 1$  cm erwarten lassen. Der Einfluß der Refraktion bleibt auch bei der langen Strecke von 480 m mit 2,3 mm gering, so daß auch bei fehlerhafter Annahme des Refraktionskoeffizienten ( $k = 0,13$ ) der Fehler unter 2 cm bleiben wird. Die Genauigkeit der Höhenübertragung kann somit auf etwa  $\pm 2$  cm abgeschätzt werden. Damit folgt für die Meereshöhe des GPS-Punktes

$$\text{EUREF-NO 0112: Höhe} = 47,32 \pm 0,04 \text{ m.}$$

Ein Vergleich mit den bekannten örtlichen GTO-Höhen (Tab. 2), deren Höhenbezugspunkt nicht eindeutig geklärt werden konnte, ergibt einen durchschnittlichen Niveaunterschied von 8 cm und zeigt, daß die Höhenunterschiede zwischen den Punkten mit cm-Genauigkeit übereinstimmen.

#### GPS-Messungen

Zur Bestimmung der ellipsoidischen Höhe des Punktes Jakobshavn stehen die nachfolgenden Messungen zur Verfügung:

*Grönland-Campagne 1990 des Instituts für Vermessungskunde der TU Braunschweig.*

In der Zeit von 1. Juni bis 23. Juli 1990 diente der Punkt als Referenzstation für die Traversengruppe auf dem Inlandeis. Zum Einsatz kamen Zweifrequenz-Code-Empfänger Wild-Magnavox WM 102. In 36 Sessions wurden die Daten in Minuten-Intervallen aufgezeichnet, bei einer durchschnittlichen Sessionlänge von drei Stunden. Sie weisen die für Grönland typischen starken Störungen auf, besonders auf der L2-Frequenz, die vermutlich auf die extremen Störeinflüsse durch die Ionosphäre zurückzuführen sind.

Für die Einzelpunkt-Auswertung standen Broadcast Ephemeriden zur Verfügung, mit denen üblicherweise nur eine Punktgenauigkeit von ca. 10 m erreicht werden kann. Für einen Teil des Datenmaterials (Stichprobe von 18 Sessions) war auch eine Auswertung mit präzisen Ephemeriden möglich, für die eine höhere Genauigkeit erwartet wird. Alle Satellitenbahnen verlaufen in der Arktis in niederen Höhenwinkeln, so daß die Geometrie besonders für die Höhenkomponente durch schleifende Schnitte nie günstig ist.

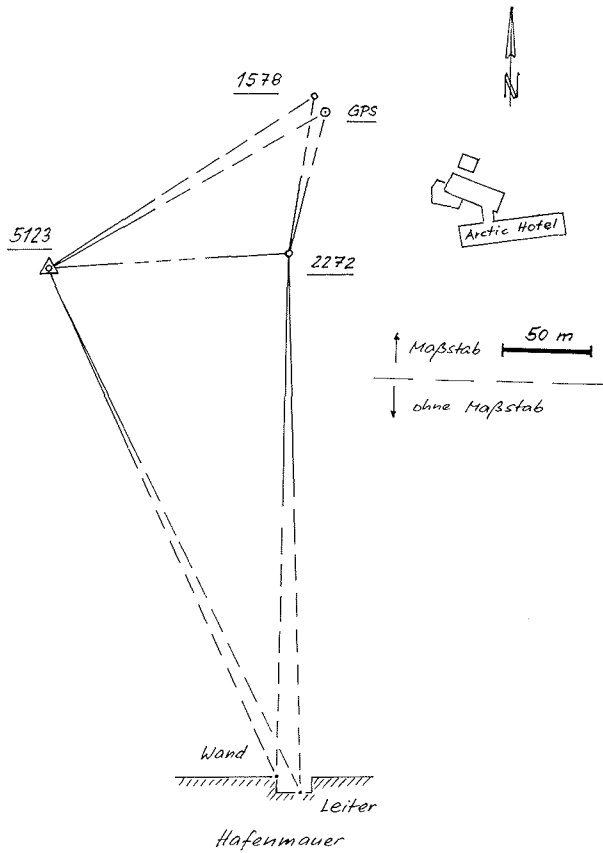


Abb. 4: Trigonometrisches Netz zum Höhenanschluß des GPS-Punktes Jakobshavn an den mittleren Meeresspiegel.

Fig. 4: Trigonometric net for height attachment of the GPS point Jakobshavn to mean sea level.

Punkt	Höhenmessungen 1990 (1) m	GTO-Höhe (2) m	Differenz (2)-(1) m
2272	39,12	39,20	+0,08
5123	32,69	32,78	+0,09
1578	47,98	48,05	+0,07

Tab. 2: Vergleich der Höhen bei GTO-Punkten. Zwischen bisher bekannten und Neubestimmten Höhen besteht ein Niveauunterschied von 0,08 m.

Tab. 2: Height comparison at GTO-points. A systematic difference of 0.08 m occurs between old and new measurements.

Unter diesen Umständen wurden die in Tabelle 3 zusammengefaßten Ergebnisse erzielt. Wie daraus zu entnehmen ist, unterscheidet sich die ellipsoidische Höhe um 3,33 m (jedoch nicht signifikant), je nachdem welche Ephemeriden benutzt werden. Im Gegensatz zu den Erwartungen läßt sich auch die Genauigkeit der Einzelpunkt-lösung durch die präzisen Ephemeriden nicht wesentlich steigern; durch den verminderten Stichprobenumfang ist das Mittel sogar geringfügig ungenauer. Wegen der prinzipiellen Vorteile präziser Ephemeriden zur Absolutbestimmung soll hier dennoch deren Wert angehalten werden, so daß sich für die ellipsoidische Höhe des GPS-Punktes Jakobshavn (Felsöhe)

$$h = 75,98 \pm 2,28 \text{ m ergibt.}$$

	ellipsoidische Koordinaten (m), WGS 84 Broadcast Ephemeriden			ellipsoidische Höhe h (m)	
	X	Y	Z	Broadcast Ephemer.	Präzise Ephemer.
Mittel	1424827,38	-1765535,54	5941079,67	72,65	75,98
Maximal	1424853,66	-1765579,14	5941104,63	101,91	86,33
Minimal	1424797,55	-1765524,63	5941057,34	54,23	54,78
Standard- abweichung (1 Wert)	± 12,65	9,95	11,19	12,43	9,68
(Mittel)	± 2,08	1,64	1,86	2,07	2,28

Tab. 3: GPS-Einzelpunktlösungen für Jakobshavn, EUREF-NO 0112. Die Genauigkeit in jeder Koordinatenrichtung beträgt  $\pm 2$  m. Die ellipsoidische Höhe unterscheidet sich um 3,33 m, wenn anstatt der Broadcast die präzisen Ephemeriden verwendet werden.

Tab. 3: GPS-singlepoint-solutions for Jakobshavn, EUREF-NO 0112. Accuracy of coordinates is  $\pm 2$  m. Ellipsoidal height varies by 3.33 m depending on calculations based on broadcast or precise ephemerides.

Zur Verbindung von Jakobshavn mit dem Nivellementanschlußpunkt A14 der EGIG diente eine am 30. Juli 1990 gemessene GPS-Session, die nach Bereinigung eines Datenfehlers (durch Firma Leica/Heerbrugg) als relative Basislinie auswertbar war. Dabei ergab sich der ellipsoidische Höhenunterschied zu

$$\text{JAV} - \text{A14} : \Delta h = 516,88 \pm 0,06 \text{ m}$$

und daraus die ellipsoidische Höhe für A14

$$h = 592,86 \pm 2,28 \text{ m.}$$

#### *EUREF-NO-Campagne 1990*

Direkt anschließend fand vom 23. Juli 1990 bis 1. August 1990 eine GPS-Campagne zur Bestimmung von Punkten im Europäischen Referenzsystem (EUREF) statt, bei welcher der GPS-Punkt Jakobshavn (EUREF-NO 0112) ebenfalls beobachtet wurde. Die Auswertung dieses großen nordeuropäischen Netzes erfolgt am Astronomischen Institut der Universität Bern und wird noch einige Zeit andauern; danach können eventuell bessere Höhen erwartet werden.

#### VERGLEICH ZWISCHEN GPS- UND MEERESHÖHEN (GEOID-UNDULATIONEN)

Wenn auch die absoluten Höhen wegen der ungenauen GPS-Höhe in Jakobshavn noch keine sichere Berechnung der Geoidundulationen zulassen, so ist doch schon der Vergleich mit den Verhältnissen bei A14 interessant.

Die Geoid-Undulation (N) ist bekanntlich definiert als Differenz zwischen ellipsoidischer Höhe (h) und Meereshöhe (H, vgl. Abb. 2), also gilt

$$N = h - H.$$

Wir erhalten mit den Beobachtungen 1990 die in Tabelle 4 zusammengestellten Werte. Der Unterschied in den Geoid-Undulationen an beiden Orten, die ca. 80 km von einander entfernt liegen, beträgt somit

$$\Delta N = N(A14) - N(JAV) = +3,8 \text{ m.}$$

In diesem Zusammenhang lohnt auch ein Blick auf die Ergebnisse eines Geoid-Modelles, welches sich allerdings in dieser Gegend auf nur geringes Datenmaterial stützt. Das Modell GPM-2/101, berechnet bis zu Grad und Ordnung 200, liefert die Geoid-Undulationen (WENZEL pers. Mitt. 1991)

$$N_M(JAV) = 28,96 \text{ m} \quad \text{und} \quad N_M(A14) = 31,76 \text{ m}$$

und deren Unterschied zwischen beiden Orten

$$\Delta N_M = N_M(A14) - N_M(JAV) = +2,8 \text{ m.}$$

Im Vergleich zu den Werten der Tabelle 4 ergibt sich bei den Absolutwerten der Geoid-Undulationen eine relativ gute Übereinstimmung (-0,3 m bzw. +0,7 m). Dieses Ergebnis zeigt aber auch, daß bei Verwendung von Modell-Geoidhöhen in Verbindung mit ellipsoidischem GPS-Höhenunterschied bei der Höhenübertragung von Jakobshavn nach A14 ein Fehler in der Meereshöhe von 1 m entstehen würde, der kaum durch Fehler in den Meeresspiegelbestimmungen erklärbar ist, sondern überwiegend durch die Unsicherheiten des Geoid-Modelles begründet ist. Weitere terrestrische und Satelliten-Beobachtungen werden zur Klärung dieser Frage beitragen.

	Jakobshavn, EUREF-NO 0112	EGIG, A14
ellipsoidische Höhe (h)	75,98 m	592,86 m
Meereshöhe (H)	47,32 m	560,4 m
Geoid-Undulation (N)	28,66 m	32,5 m

Tab. 4: Geoid-Undulationen aus direkten Messungen. Der Unterschied in den Geoid-Undulationen an beiden Orten beträgt 3,8 m.

Tab. 4: Geoid separations from direct measurements. The difference between the geoid separations in both points is 3.8 m.

#### Literatur

- Bauer, A., Geyer, J.-P., Nevière, J. & Perroud, P. (1953): Campagne au Groenland de 1948. Triangulation côtière de la région de l'Eqc. Rapports scientifiques des Expéditions Polaires Françaises N III 1.- Annales Geophys. 9: 44-81.
- Hofmann, W. (1964): Die geodätische Lagemessung über das grönländische Inlandeis der Internationalen Glaziologischen Grönlandexpedition (EGIG) 1959.- Medd. Grönland 173 (6, EGIG-Publ. 2 (4)), Kopenhagen.
- Hofmann, W. (1986): Bewegung des Inlandeises im West-Ost-Profil von 1959 bis 1967.- Deutsche Geodät. Komm. R. B. 281: 43-62.
- Laukart, W. (1981): Ermittlung langfristiger Wasserstandsänderungen aus Pegelregistrierungen.- Wiss. Arb. Fachrichtung Verm. Uni. Hannover 104.
- Mälzer, H. (1964): Das Nivellement über das Grönländische Inlandeis der Internationalen Glaziologischen Grönland-Expedition 1959.- Medd. Grönland 173 (7, EGIG-Publ. 3 (1)), Kopenhagen.
- Möller, D. (1990): Geodätische Beiträge zum Massenhaushalt und zur Dynamik des grönländischen Inlandeises (Zusammenfassung).- Jb. Braunschweigische Wiss. Ges.
- Pugh, D. T. (1987): Tides, Surges and Mean Sea-Level.- John Wiley & Sons.
- Seckel, H. (1977): Das geometrische Nivellement über das Grönländische Inlandeis der Gruppe Nivellement A der Internationalen Glaziologischen Grönland Expedition 1967-68.- Medd. Grönland 187 (3, EGIG-Publ. 3 (3)), Kopenhagen.
- Seckel, H. (1977): Höhenänderungen im grönländischen Inlandeis zwischen 1959 und 1968.- Medd. Grönland 187 (4, EGIG-Publ. 3 (5)), Kopenhagen.