BEITRÄGE ZUR GEOLOGIE DER SCHWEIZ – HYDROLOGIE

Nr. 20

Herausgegeben von der Schweizerischen Geotechnischen Kommission und der Hydrologischen Kommission der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft

Methoden der Massenbilanzmessung bei grossen Schneehöhen, untersucht im Firngebiet des Grossen Aletschgletschers

Von

P. Föhn

Kommissionsverlag: Geographischer Verlag Kümmerly & Frey, Bern

Druck: Offsetdruck P. Schmidberger, Zürich
1971

VORWORT

der Hydrologischen Kommission und der
Schweizerischen Geotechnischen Kommission

Die Hydrologische Kommission und die Schweizerische Geotechnische Kommission der SNG freuen sich, die Arbeit von Herrn Paul Föhn "Methoden der Massenbilanzmessung bei grossen Schneehöhen, untersucht im Firngebiet des Grossen Aletschgletschers" als Nr. 20 in die Reihe "Beiträge zur Geologie der Schweiz - Hydrologie" aufnehmen zu können. Die Arbeit wurde an der Abteilung für Hydrologie und Glaziologie der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau an der ETHZ ausgeführt und von der Abteilung für Naturwissenschaften der ETHZ als Dissertation angenommen, wobei die Herren Prof. Dr. H. Gutersohn und Dr. H. Röthlisberger die Referenten waren.

Die Druckkosten für diese Publikation wurden zu einem grossen Teil von den beiden genannten Kommissionen und der Gletscherkommission der SNG getragen.

Die Arbeit hätte dem Thema nach auch in der Reihe "Geophysik" der "Beiträge zur Geologie der Schweiz" erscheinen können. Sie wurde aber wegen der spezifischen Anwendung geophysikalischer Methoden auf die Massenbilanzmessung im Firngebiet, die vornehmlich hydrologische Bedeutung hat, in die Reihe "Hydrologie" aufgenommen. Es werden moderne und zum Teil für die Anwendung in der Glaziologie neue Messmethoden beschrieben. Zudem stellen die im Feld gewonnenen Messresultate einen wertvollen Beitrag zur Hydrologie des Hochgebirges dar.

Für den Inhalt von Text, Figuren und Tabellen ist der Verfasser allein verantwortlich.

Zürich, den 30. April 1971

Für die Schweizerische
Geotechnische Kommission

Der Präsident:

Prof. Dr. F. de Quervain

Für die Hydrologische
Kommission

Der Präsident:

Prof. Dr. M. de Quervain

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. Einleitung	7
2. Ausgewählte Begriffe	8
3. Problemstellung	9
4. Beschreibung des Untersuchungsgebietes	10
5. Uebersicht und Beschreibung der Messmethoden zur Bestimmung der Massenbilanz von Firnpunkten	12
5.1. Einleitung	12
5.2. Schneehöhenmessung	13
5.2.1. Schneehöhenmessung in einem Punkt	13
5.2.1.a. Firnpegel	13
5.2.1.b. Drahtnetze	15
5.2.1.c. Ocker	16
5.2.1.d. Magnetisierte Körper	16
5.2.2. Schneehöhenmessung mit Hilfe von linienförmigen Markierungskörpern	17
5.2.2.a. Drähte (Gleichstrommethode)	17
5.2.2.b. Drähte (Wechselstrommethode)	17
5.2.3. Messung der mehrjährigen Firnzuwachsrate ohne Markierungskörper	18
5.2.3.a. Messung der Firnzuwachsrate mit Hilfe von Isotopen	18
5.2.3.b. Schneeschacht- und Pollenanalysen	19
5.3. Messung des mittleren Raumgewichtes bzw. des Wasserwertes einer Gesamt-Schneeschicht	20
5.3.1. Wägeverfahren	20
5.3.2. Messung der Schmelzwassermenge	21
5.3.3. Nuclear-Methoden	21
5.3.3.a. Messung mittels γ-Strahlung	21
5.3.3.b. Messung mit Hilfe der Neutronen-Streuung (Neutronensonde)	22
5.3.4. Messung mit Schnee-Druckkissen	22
6. Entwicklung und Prüfung einiger Methoden zur Bestimmung der Massenbilanz in Firnpunkten	23
6.1. Schneehöhenmessung mit Hilfe von Drähten bei Benützung von Gleichstrom	23
6.1.1. Einleitung	23
6.1.2. Technische Angaben über die Drähte	23
6.1.3. Theoretische Grundlagen	24
6.1.4. Messverfahren	27
6.1.4.a. Position des Drahtes	27
6.1.4.b. Tiefe des Drahtes unter der Firnoberfläche	29
6.1.5. Auswertung von Oberflächenprofilen	30
6.1.6. Abhängigkeit des Draht-Potentialfeldes vom spezifischen Widerstand des Firnuntergrundes	33
6.1.7. Apparatur und Ausrüstung	36
6.1.8. Genauigkeit und Anwendungsbereich der Gleichstrom-Methode	37
6.2. Schneehöhenmessung mit Hilfe von Drähten bei Benützung von Wechselstrom	39
6.2.1. Einleitung	39

6.2.2. Technische Grundlagen 39
6.2.3. Theoretische Grundlagen 41
6.2.4. Messverfahren 46
6.2.4.a. Messung von Oberflächenprofilen 46
6.2.4.b. Messung von Tiefenprofilen 48
6.2.5. Auswerteverfahren 48
6.2.6. Apparaturen und Ausrüstung 52
6.2.6.a. Wechselstrom-Speisegeräte 52
6.2.6.b. Empfangsteil 54
6.2.7. Genauigkeit und Anwendungsbereich 56
6.2.7.a. Genauigkeit bei Oberflächenprofilmessungen 56
6.2.7.b. Genauigkeit von Tiefenprofilen 58
6.3. Bestimmung des mittleren Raumgewichtes bzw. des Wasserwertes mit dem Wägeverfahren 58
6.3.1. Vorgehen 59
6.3.2. Ausrüstung 59
6.3.3. Messgenauigkeit des Instrumentariums und der Methode 59
6.4. Bestimmung des mittleren Raumgewichtes bzw. des Wasserwertes mit der Neutronensonde 62
6.4.1. Einleitung und Problemstellung 62
6.4.2. Prinzip der Neutronen-Streuung 63
6.4.3. Verwendete Apparatur 63
6.4.4. Bestimmung des bei der Messung erfassten Volumens 65
6.4.5. Messeinrichtung und Eichung 67
6.4.6. Eichkurven 71
6.4.7. Genauigkeit und Anwendungsbereich 75
6.5. Bestimmung des mittleren Raumgewichtes bzw. des Wasserwertes mit Hilfe von Druckkissen 78
6.5.1. Problemstellung 78
6.5.2. Messprinzip 79
6.5.3. Vorversuche 80
6.5.4. Versuche im Firngebiet 82
6.5.5. Fehlerquellen 84
6.5.6. Zusammenfassung 84
7. Hydro- glaziologische Resultate 86
7.1. Einleitung 86
7.2. Schneehöhenverteilung im Ewigschneefeld 86
7.3. Jahresbilanz in Firnpunkten im hydrologischen Jahr 1967/68 89
7.4. Mittlere Jahresbilanz $\langle {}^{b}_{a} \rangle$ in Firnpunkten in verschiedenen Referenzperioden 89
7.5. Jahresbilanz 1967/68 und mittlere Jahresbilanz der Referenzperiode 1956/57-1968/69 für das ganze Gebiet des Ewigschneefeldes 94
7.6. Jährliche Akkumulation und mittlere jährliche Akkumulation in Firnpunkten 95
7.7. Jährliche Akkumulation, bzw. mittlere jährliche Akkumulation im Ewigschneefeld im hydrologischen Jahr 1967/68 und in der Referenzperiode 1956/57-1968/69 99
7.8. Bewegungsmessungen im Gebiet des Ewigschneefeldes 102
8. Zusammenfassung 105
Summary 107
9. Literaturnachweis 109

1. EINLEITUNG

Zu Beginn des Jahres 1966 wurde ich an der Versuchsanstalt für Wasser- und Erdbau, im besonderen an der Abteilung für Hydrologie und Glaziologie als Assistent angestellt. Im Rahmen dieser Tätigkeit wurde mir die Möglichkeit gegeben, die vorliegende Arbeit über die verschiedenen Methoden der Massenbilanzmessung auszuführen. Die Feldarbeiten wurden zum grössten Teil auf dem Ewigschneefeld, einem Seitenarm des Grossen Aletschgletschers ausgeführt, während die Laborarbeiten und die Auswertung an der Abteilung für Hydrologie und Glaziologie erfolgten.

Ich möchte hiemit Herrn Prof. G. Schnitter, Direktor der erwähnten Versuchsanstalt und Herrn Dipl. Ing. P. Kasser, Chef der erwähnten Abteilung für die Möglichkeit diese Arbeit auszuführen und für die finanzielle Unterstützung bei der Beschaffung von Instrumenten und Ausrüstung meinen besonderen Dank aussprechen.

Die wissenschaftliche Leitung der Arbeit übernahm Herr Prof. Dr. H. Gutersohn, Vorstand des Geographischen Institutes der ETH zusammen mit Herrn Dr. H. Röthlisberger von der Abteilung für Hydrologie und Glaziologie. Es ist mir ein Bedürfnis an dieser Stelle Herrn Prof. Dr. H. Gutersohn für die vielseitigen Anregungen und die Betreuung dieser Arbeit meinen herzlichsten Dank auszusprechen. Gleichzeitig möchte ich auch Herrn Dr. H. Röthlisberger, auf den das Dissertationsthema zurückgeht, für die wertvollen Ratschläge und die vielen Diskussionen herzlich danken.

Mein Dank gebührt auch den vielen Feldgehilfen, insbesondere R. Gerber, P. Notari und B. Schnyder, die die umfangreichen und oft mühsamen Feldarbeiten überhaupt möglich machten. Gleichzeitig möchte ich auch dem Verwalterehepaar der Hochalpinen Forschungsstation Jungfraujoch, Herrn und Frau Scherz für die allzeit freundliche Aufnahme danken.

Weiterhin richtet sich mein Dank auch an Herrn Prof. Dr. H. Weber, Vorstand des Institutes für Fernmeldetechnik an der ETH, für die verständnisvolle Hilfe bei der Konstruktion und Beschaffung einiger elektrischer Geräte und an Frl. M. Caflisch, Assistentin am genannten Institut, die die bei der Konstruktion auftretenden Probleme bearbeitete.

Für die Möglichkeit auf dem Versuchsgelände der Schnee- und Lawinenforschungsstation, Weissfluhjoch, einige Versuchsmessungen ausführen zu können, möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. M. de Quervain, Direktor dieser Station, bedanken.

Für vielseitige Hilfe gehört auch allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Abteilung für Hydrologie und Glaziologie mein aufrichtiger Dank, insbesondere möchte ich Herrn H. Jensen für die Ausarbeitung einiger Computer-Programme, Herrn W. Nobs für die Ausführung der Zeichnungen und Herrn P. Gnos für die Konstruktion verschiedener Geräte danken.

Die Untersuchungen, insbesondere die Feldarbeiten, sind in verdankenswerter Weise durch die Gletscherkommission der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft unterstützt worden.

2. AUSGEWAEHLTE BEGRIFFE

Die in dieser Arbeit verwendeten "Massenbilanz"-begriffe und -symbole können am ehesten durch ein Diagramm des Artikels "Mass- balance Terms" (Journal of Glaciology, Vol. 8, No. 52, 1969) veranschaulicht werden. Dieses Diagramm ist in Abb. 1 für ein alpines Firngebiet und unter der Annahme, dass das Bilanzjahr vom 1. Okt. - 30. Sept. dauert, aufgezeichnet.

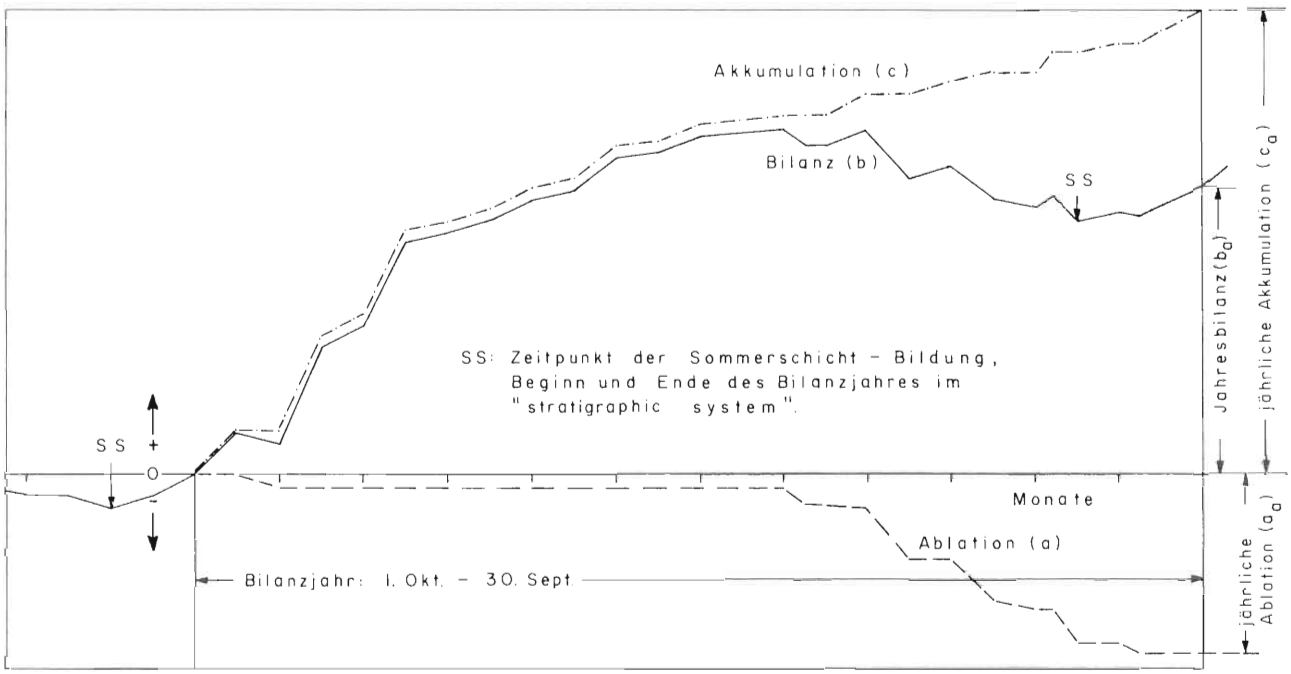

Abb. 1 Schematische Darstellung der Massenbilanz-Begriffe für ein alpines Firngebiet (fixed-date system). (Vgl. "Mass-Balance Terms", Journal of Glaciology, Vol. 8, No. 52, 1969).

Massenbilanz: Algebraische Summe von Akkumulation und Ablation

Akkumulation: Resultat aller Prozesse, die die Masse eines Gletschers vergrössern

Ablation: Resultat aller Prozesse, die die Masse eines Gletschers verkleinern

Albedo: Verhältnis der reflektierten zur auffallenden Strahlungsmenge, die Albedo schwankt im Firngebiet zwischen 0,5 und 0,9.

Firn: Auf dem Gletscher liegende Schneeschicht, die mindestens ein Jahr überdauert hat. Der Ausdruck wird im schweizerischen Sprachgebiet oft auch als Gebietsbezeichnung gebraucht und ist dann in allgemeiner Anwendung ein Synonym für "Gletscher".

Firnlinie: Grenzlinie zwischen schneebedecktem Akkumulationsgebiet und aperem Ablationsgebiet zum Zeitpunkt, wenn die Schneeschicht auf dem Gletscher ihre geringste Ausdehnung erreicht hat.

Firngebiet, -region,
Akkumulationsgebiet,: Teil des Gletschers oberhalb der Firnlinie
(Nährgebiet)

Ablationsgebiet,
(Zehrgebiet) : Teil des Gletschers unterhalb der Firnlinie

Firnpegel: (Pegel)	Lotrecht stehende Stange, die zu Beginn des Bilanzjahres in die Firnoberfläche gesetzt wird. Firnpegel dienen zur Schneehöhenmessung und zur Markierung von Firnoberflächenpunkten.
Schneesonde:	dünne Al-Stange zum Orten von Eisschichten und Markierungskörpern im Firnuntergrund

3. PROBLEMSTELLUNG

Seit Jahrzehnten werden in der Schweiz und anderswo Anstrengungen unternommen, den Wasserhaushalt von Regionen, die sich klimatologisch und morphologisch unterscheiden, besser kennen zu lernen.

Wie man anhand der allgemein gebräuchlichen Bilanzgleichung, vorerst ohne bestimmte örtliche und zeitliche Bezugnahme, sieht:

$$N - A - V - (R - B) = O, \qquad (1a)$$

gilt es verschiedene Grössen zu bestimmen. Dabei bezeichnet N den Niederschlag, A den Abfluss, V die Verdunstung, R die Rücklage und B den Aufbrauch früherer Rücklagen.

In unvergletscherten Einzugsgebieten hat die sogenannte Reservenänderung (R-B) oft untergeordnete Bedeutung, da sie klein ist oder als konstant angesehen werden kann, sodass sich die Gleichung wesentlich vereinfacht. In stark vergletscherten Einzugsgebieten kommt diesem Glied aber ausschlaggebende Bedeutung zu, da gerade diese Grösse das Wesen der Gletscher als natürliche Speicherbecken beschreibt.

Will man also die Wasserbilanz eines teilweise vergletscherten Einzugsgebietes bestimmen, so muss zuerst die Reservenänderung des vergletscherten Gebietes im betrachteten zeitlichen Intervall bekannt sein.

Die Massenbilanz der Gletschermasse kann dabei ebenfalls durch Gleichung (1a) ausgedrückt werden.

Diese Gleichung wird nach der fraglichen Grösse aufgelöst:

$$R - B = N - (A+V) \qquad (1b)$$

und nach internationaler Uebereinkunft*) werden dabei neue Symbole verwendet:

$$B = C - A \qquad (2)$$

B : Massenbilanz innerhalb eines bestimmten Gebietes
C : Akkumulation innerhalb eines bestimmten Gebietes
A : Ablation innerhalb eines bestimmten Gebietes

Die Massenbilanz liesse sich also gemäss Gleichung (2) mit Hilfe von Akkumulations- und Ablationswerten berechnen. Da aber in den in Frage kommenden Hochgebirgsregionen weder gute Akkumulations- noch Ablationswerte zur Verfügung stehen, wird die Massenbilanz sehr oft direkt durch Messungen ermittelt. Dabei wird die Annahme gemacht, dass der Massengewinn oder -verlust auf die den Messungen zugängliche Oberflächenschicht des Gletschers beschränkt bleibt.

*) Die neuerdings verwendeten Symbole und Ausdrücke für Gletscher-Bilanzstudien sind dem Artikel: "Mass-Balance Terms" (Journal of Glaciology, Vol. 8, No. 52, 1969) entnommen und wenn möglich sinngemäss übersetzt worden. In seltenen Fällen, wenn eine adaequate Uebersetzung ins Deutsche nicht möglich war, wurde die englische Bezeichnung in Anführungszeichen übernommen.

Das Hauptziel dieser Arbeit besteht darin, einige neue, zum Teil für andere Zwecke erprobte und hier für die speziellen Belange der Firnregion abgewandelte Massenbilanz-Messmethoden zu entwickeln, die eine Erfassung der jährlichen Massenbilanz (b_a) in Firnpunkten erlauben. Dabei wird die Genauigkeit, die Feldtüchtigkeit und der Anwendungsbereich der Methoden beschrieben und gleichzeitig mit den herkömmlichen Methoden verglichen.

Diese Messmethoden wurden zur Hauptsache auf dem Ewigschneefeld, einem Firn-Seitenarm des Grossen Aletschgletschers erprobt und angewendet. Deshalb können aufgrund der Messdaten auch jährliche Massenbilanzwerte für das ganze Testgebiet (B_a) berechnet werden, doch reichen die Daten für eine schlüssige Beurteilung des Gebietes nicht aus.

4. BESCHREIBUNG DES UNTERSUCHUNGSGEBIETES

Als Untersuchungsgebiet kam aus verschiedenen Gründen die Firnregion des Grossen Aletschgletschers in Frage. Erstens, weil der Grosse Aletschgletscher seit Jahrzehnten Testgletscher der Abteilung für Hydrologie und Glaziologie (AHG) *) ist und somit in diesem Gebiet schon verschiedene Arbeiten durchgeführt wurden, als deren Fortsetzung die vorliegende Arbeit betrachtet werden kann. Zweitens, weil sich fast die gesamte Firnregion dieses Gletschers in annehmbarer Entfernung von der Endstation der Jungfraubahn, dem Jungfraujoch, befindet. Drittens, weil der Grosse Aletschgletscher, der drei grosse Firnarme besitzt, im Ewigschneefeld (nordöstlicher Seitenarm) ein Firnbecken aufweist, das sehr gleichförmig ist und wenig Spalten aufweist, und das sich deshalb für methodische Untersuchungen bestens eignet und folgende Charakteristiken aufweist:

- Die Lage des Ewigschneefeldes ist auf der beigefügten Karte (Abb. 2) ersichtlich. Der zentrale, flache Streifen des Firnbeckens ist bananenförmig gekrümmt, beginnt am Obern Mönchsjoch (3626 m ü.M.) und endet mit einem imposanten Eisfall in Richtung Konkordiaplatz bei rund 3150 m ü.M.
- Die Längsachse des Beckens verläuft von NW nach SE, und die Firnoberfläche hat in dieser Achsenrichtung eine mittlere Neigung von 4°.
- Die Firnlinie ist jährlichen Schwankungen unterworfen; nach Kasser (1959) lag sie am Aletschgletscher in den Jahren 1939-59 ungefähr zwischen 2760 und 3260 m ü.M.. In den letzten vier Jahren (1966-1969) befand sie sich im Ewigschneefeld immer im oder unterhalb des Eisfalls (tiefer als 3150 m ü.M.), sodass für diese Zeitspanne das ganze Becken dem Akkumulationsgebiet zugezählt werden darf.
- Das Jahresmittel der Lufttemperatur im Ewigschneefeld liegt entsprechend der jeweiligen Höhenlage zwischen $-8.3^{o}C$ und $-5^{o}C$; das sind die mittleren Jahrestemperaturen für das Obere Mönchsjoch (3626 m ü.M.) und die obere Kante des Eisfalls am unteren Ende des Ewigschneefeldes (3150 m ü.M.). Die Werte wurden aufgrund des normalen vertikalen Temperatur-Gradienten von $0.65^{o}C$ / 100 m berechnet, wobei vom 22-jährigen Mittelwert des Jungfraujochs (3576 m ü.M.) : $-8^{o}C$ ausgegangen wurde. (vgl. Schüepp, 1960).
- Als hauptsächlichste Windrichtungen kommen aus orographischen Gründen nur die Richtungen N/NW

*) Umständliche Namen und Ausdrücke werden das erstemal, wenn sie auftreten, ausgeschrieben und die gebräuchliche Abkürzung wird in Klammer beigefügt. Bei nochmaligem Auftreten solcher Namen wird später nur noch die Abkürzung ohne Klammer benützt.

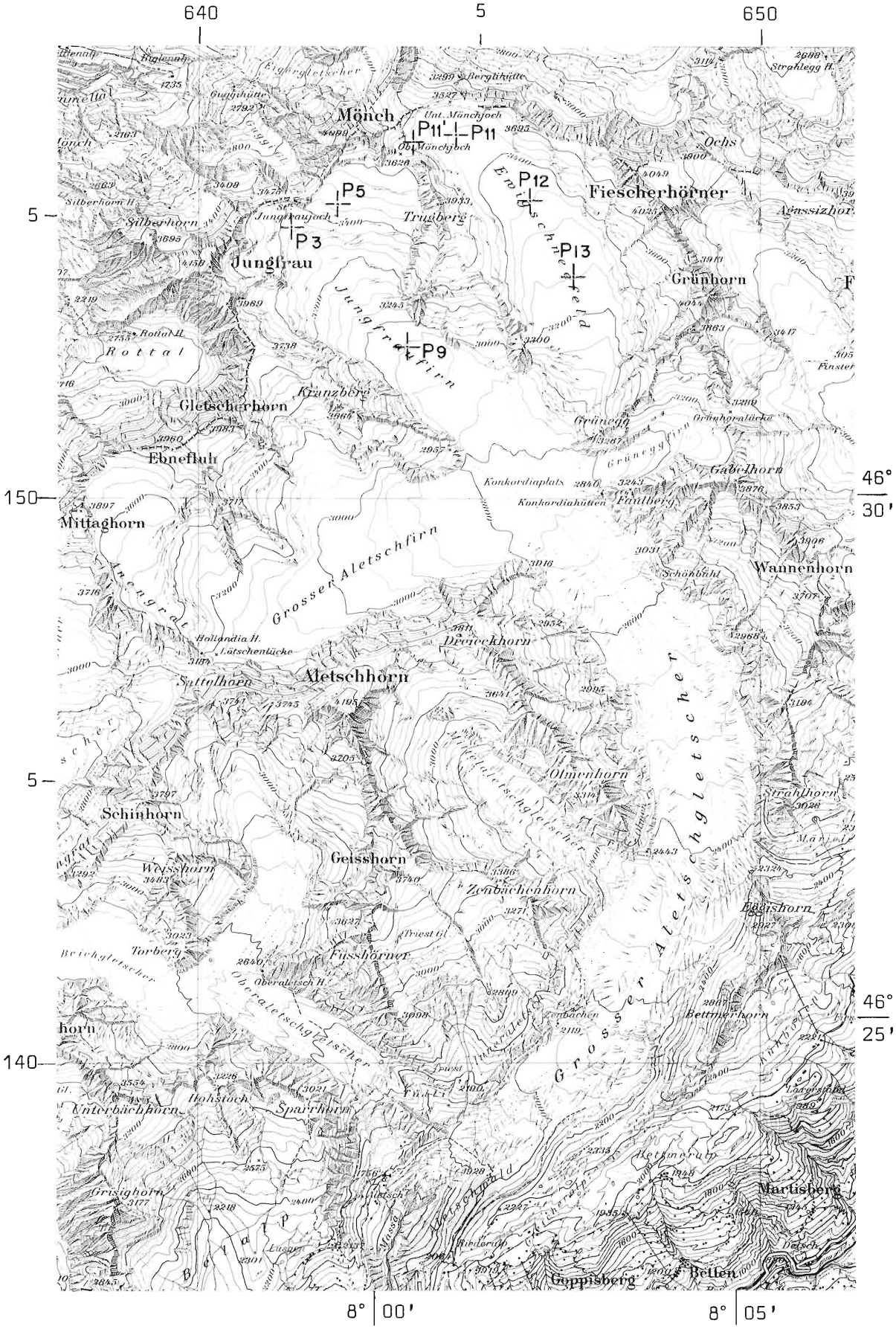

Abb. 2 Karte des Grossen Aletschgletschers mit den drei Firnbecken. Massstab 1 : 100'000. (—|— Firnpegelstandorte). Reproduziert mit Bewilligung der Eidg. Landestopographie vom 11. 1. 1971.

und S/SE in Frage, wobei für die meterologische Station des Jungfraujochs*) während der letzten 30 Jahre die Verteilung ungefähr so war, dass N- und NW -Winde zusammengenommen rund doppelt so oft auftraten, als die S- und SW- Winde zusammen. Die übrigen Windrichtungen traten in der genannten Station und damit sicher auch auf dem noch stärker von NW nach SE kanalisierten Ewigschneefeld nur sehr schwach in Erscheinung.

5. UEBERSICHT UND BESCHREIBUNG DER MESSMETHODEN ZUR BESTIMMUNG DER MASSENBILANZ VON FIRNPUNKTEN

5.1. EINLEITUNG

Entsprechend der in Abschnitt 3 genannten Bilanzgleichungen kann das Wachsen und Schwinden von Gletscher- und Firnmassen durch die Reservenänderung, bzw. den Bilanzwert ausgedrückt werden. Wird die Bilanz direkt durch Messungen der Oberflächenschicht bestimmt, so werden die in bestimmten Punkten gemessenen Werte durch einen kleinen Buchstaben (b) bezeichnet, während der auf eine ganze Fläche bezogene Bilanzwert durch ein grosses (B) bezeichnet wird. Das zeitliche Intervall der Messungen umfasst meistens ein Jahr (Jahresbilanz) und die zeitliche Bezugnahme wird dann durch das Suffix (a) ausgedrückt:
b_a, B_a.

Im übrigen muss noch vorweggenommen werden, dass die Jahresbilanz (b_a) je nach "Schule" für verschiedene Zeitperioden bestimmt wird: Im "stratigraphic system" bestimmen zwei sich folgende, mehr oder weniger ausgeprägte Sommer-Schichten Beginn und Ende der Messperiode, sodass diese meist nicht genau ein Jahr umfasst; im "fixed-date system" erstreckt sich die Messperiode über das hydrologische Jahr, welches bei uns am 1. Oktober beginnt und am 30. September des folgenden Jahres endet. - In der vorliegenden Arbeit kommt das "fixed-date system" zur Anwendung, da dieses für Gletscher, die sich über verschiedene Höhenstufen (Grosser Aletschgletscher: 1500 - 4200 m ü.M.) erstrecken, besser geeignet ist. Zusätzlich erlaubt es als einziges System Vergleiche mit hydrologischen Messreihen. Demgegenüber ist zu erwähnen, dass das "stratigraphic system" gerade messtechnisch verschiedene Vorteile aufweist, welche später noch genannt werden.

In der Firnregion ($c_a > a_a$) beruht die Bestimmung der Jahresbilanz (b_a) auf zwei Messungen:

1. Schneehöhenmessung (Messung von h_s)
2. Messung des mittleren Schnee-Raumgewichtes ($\bar{\gamma}$) über den Bereich dieser Schneehöhe.

$$b_a = c_a - a_a = h_s \cdot \bar{\gamma} \qquad (3)$$

Aus diesem Grunde scheint auch für die folgende Uebersicht der Messmethoden diese Zweiteilung gegeben.

*) Die ungefähre Verteilung wurde auf Grund von Daten aus den "Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt, Jahrgänge 1938-1967" bestimmt.

5.2. SCHNEEHOEHENMESSUNG

Begriff: Unter Schneehöhe h_s soll im Folgenden die lotrechte Höhe der Gesamt-Schneeschicht an einem bestimmten Ort und zu einem bestimmten Zeitpunkt, gemessen ab dem Grundhorizont, d.h. der Firnoberfläche am Anfang des Bilanzjahres, gemeint sein.

Die grundlegende Schwierigkeit bei Schneehöhenmessungen im Firngebiet besteht darin, dass kein fester Grundhorizont vorhanden ist, wie etwa bei Schneehöhenmessungen im Ablationsgebiet eines Gletschers, wo die Tiefe des Grundhorizontes mit Schneesonden (Al-Stangen) gut festgestellt werden kann. Will man in alpinen Firngebieten die Schneehöhe bestimmen, ohne einen Schneeschacht von mehreren Metern Tiefe zu graben, so muss der Grundhorizont am Anfang des Bilanzjahres künstlich markiert werden. Leider stören alle Markierungskörper bis zu einem gewissen Grade die natürlichen Verhältnisse in der näheren Umgebung des Markierungskörpers und die wesentliche Aufgabe bei der Schneehöhenmessung besteht darin, Markierungskörper zu finden, die einerseits die natürlichen Verhältnisse wenig stören, andererseits rasch und mit grosser Genauigkeit bei der Messung lagemässig bestimmt werden können.

5.2.1. Schneehöhenmessung in einem Punkt

5.2.1.a. Firnpegel: Ein Firnpegel besteht aus einer graduierten, lotrecht stehenden Stange, deren Länge bezüglich eines bestimmten Grundhorizontes bekannt ist. An dieser Stange kann die Schneehöhe (h_s) beliebig oft abgelesen werden.

Diese Firnpegel befinden sich im Allgemeinen jedes Jahr an der gleichen, durch Triangulation vermessenen Stelle und müssen jeden Herbst zu Beginn des Bilanzjahres im Fixpunkt neu gesetzt werden. Sie bestehen meistens aus Rundholzstangen, manchmal aus Duraluminium-Stangen und in seltenen Fällen aus Bambusstangen und sind 5 - 8 m lang. Um ihnen zu Beginn des Bilanzjahres einen gewissen Halt gegen starke Stürme zu geben, werden sie oft durch schräge Seitenstützen in Dreiecksform verstärkt, wie dies Abb. 3 darstellt.

Firnpegel werden schon seit mehreren Jahrzehnten zur Messung von grossen Schneehöhen im Firngebiet benützt und ihre Vor- und Nachteile sollen hier kurz besprochen werden.

Vorteile:
- Firnpegel können einfach und schnell aufgestellt und ohne apparativen Aufwand jederzeit abgelesen werden. Mit Hilfe eines Fernrohres können sie auch auf grössere Distanzen abgelesen werden (Ablesegenauigkeit: $\pm$ 20 cm), falls sie bei der Montage in Intervallen von einem Meter mit kurzen Querlatten versehen wurden, wie dies Abb. 3 und 4 illustrieren.
- Firnpegel dienen gleichzeitig als Punktmarkierung für Firn-Bewegungsmessungen und sind als Markierung für Messstellen jeder Art unentbehrlich.

Nachteile:
- Die Schneeoberfläche in unmittelbarer Pegelnähe ist oft in Form eines Schmelztrichters gestört, da die Pegelstange durch erhöhte Wärmeaufnahme die Ablation in Pegelnähe fördert; weiterhin kann die Firnoberfläche im Umkreis von 1 - 2 m vom Pegel durch Winderosion gestört sein, sodass eine genaue Ablesung der Schneehöhe nicht möglich ist.
- Ein Nachteil, der vor allem bei Benützung des "fixed-date system" auftreten kann, wo der Grundhorizont sehr oft schon aus einer Neuschneeschicht gebildet wird, besteht darin, dass sich dieser Grundhorizont im Vergleich zur Pegelstange stärker setzt. Dadurch wird am Pegel im Laufe des Bilanzjahres eine um diesen Setzbetrag zu kleine Schneehöhe abgelesen.
- Ebenfalls zu kleine Schneehöhen werden dann abgelesen, wenn der Grundhorizont zu Beginn des Bilanzjahres durch Ablation abgesenkt wird.

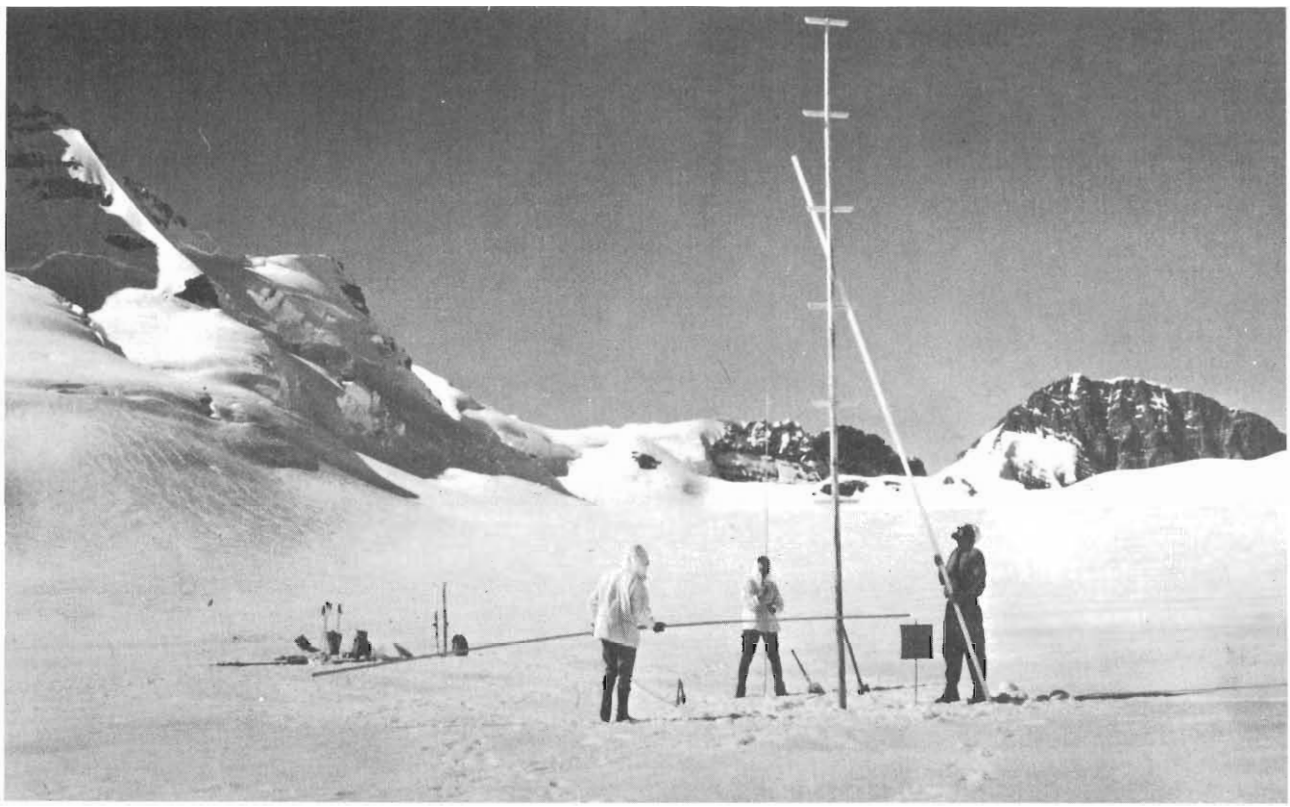

Abb. 3 Montage eines Firnpegels im Fixpunkt P 13 (Ewigschneefeld), Blick firnaufwärts.
Photo H. Röthlisberger

Abb. 4 Markierung und Ablesung eines Firnpegels im Fixpunkt P 11 (Ewigschneefeld) ein Jahr nach der Montage. An der Pegelstange sind die Zuführungsdrähte zu den Markierungsdrähten und die Steigrohre der Druckkissen befestigt. Blick firnaufwärts.
Photo P. Föhn

Diese Fehlerquelle macht sich vor allem bei Pegeln bemerkbar, die in tiefer gelegenen Firnregionen stehen, wo die Ablation in den ersten Monaten des Bilanzjahres (Oktober, November) beträchtliche Ausmasse annehmen kann, falls diese Monate warm und niederschlagsarm sind. So ergibt eine vergleichende Zusammenstellung von Pegelmessungen und parallelen Ockersondierungen auf dem Clariden- und Silvrettagletscher (Messplatzhöhen: 2700 - 3000 m ü.M.) im Mittel über 50 Jahre eine um + 21 cm grössere Schneehöhe für die Ockermessungen, wobei die Extremwerte - 23 cm und +100 cm betragen. Die Ursache der Abweichungen wird in den Veröffentlichungen: "Der Firnzuwachs pro 1920/21 ff. in einigen Schweizerischen Firngebieten", *) woraus die erwähnten Werte stammen, meistens auf Ablation in den Herbstmonaten und teilweise auf Setzung der schon vorhandenen Neuschneeschichten um den Pegel zurückgeführt. Grössere Schneehöhen als die Ockermessungen zeigten die Pegel fast ausnahmslos nur für jene Bilanzjahre an, die mit kaltem, niederschlagsreichem Wetter begannen, was obige Begründung erhärtet.

- Die Pegelstangen sinken infolge ihrer kleinen Auflagefläche unter dem eigenen Gewicht ein (Holzpegel: 4000 kg/m^2), was bei Metallpegeln (Al: 3000 kg/m^2) noch dadurch begünstigt wird, dass sie durch die Strahlungswärme aufgeheizt werden. Auch der Schneedruck auf die Querlatten wirkt in der gleichen Richtung. Durch das Einsinken der Pegel erhält man während des Bilanzjahres zu grosse Beträge für die Schneehöhe. Swithinbank (1954) betont, dass das Einsinken der Pegel verhindert werden könne, wenn das spezifische Flächengewicht der Pegel 3000 kg/m^2 bei Schnee von 500 kg/m^3 nicht übersteige. Auch Østrem und Stanley (1969) machen auf diese Fehlerquelle aufmerksam und schlagen vor, die Pegel auf eine kleine Grundfläche zu stellen.

- Die Messung der Schneehöhe am Pegel kann oft nicht mehr in der üblichen lotrechten Richtung geschehen, da die Pegelstange meist primär durch den Wind und als Folge davon in zunehmendem Masse durch den Kriech-Druck des Firnschnees schief gestellt wird. Dadurch wird in wenig geneigtem Gelände am Pegel meist eine zu grosse Schneehöhe abgelesen.

Trotz der relativ vielen Nachteile, die Pegelmessungen aufweisen können, gehört diese Methode zu den einfachsten und zuverlässigsten, um Schneehöhen im Firngebiet zu ermitteln. Der zu erwartende Fehler schwankt auf Grund des Gesagten zwischen - 30 cm und + 30 cm, d.h. für eine mittlere Schneehöhe von 6 m liegt er bei 5%. Für hochgelegene Firnregionen dürfte nach meinen eigenen Erfahrungen das Einsinken des Pegels einen gewissen systematischen Einfluss haben, während in tiefer gelegenen Firnregionen das Einsinken und das Abschmelzen der Grundhorizont-Schicht von grösserer Bedeutung wird; manchmal werden sich diese beiden Einflüsse auch gegenseitig aufheben. Der genaue Fehlerbetrag wird durch das Zusammenspiel all der genannten Faktoren bestimmt und muss für jeden Pegelstandort und jede Pegelart einzeln abgeschätzt werden.

5.2.1.b. Drahtnetze: Ein verzinktes Drahtgitter von einer Fläche von 2 bis 4 m^2 und einer Maschenweite von einigen Millimetern (1.2 - 13 mm) wird am Anfang des Bilanzjahres auf die Firnoberfläche gelegt. Die relative Lage des Drahtnetzes bezüglich eines benachbarten Firnpegels wird durch Abtragen eines bestimmten Abstandes in bestimmter Richtung festgehalten.

Das Drahtnetz wird dann im Laufe des Bilanzjahres vom Schnee eingedeckt. Soll die Schneehöhe bestimmt werden, so werden an der vorgegebenen Stelle von der Firnoberfläche her zwei Schneesonden aus Aluminium in einem gewissen Abstand in Richtung des Drahtgitters in den Firn gestossen. Dabei sind die Schneesonden durch einen batteriebetriebenen, elektrischen Summer verbunden. Sobald der elektrische Stromkreis: Summer-Schneesonde- Gitter-Schneesonde-Summer geschlossen wird, d.h. sobald die beiden Schneesonden das Draht-

*) In den Jahren 1914 - 1920 unter dem Namen: "Bericht der Gletscher-Kommission der Physikalischen Gesellschaft Zürich" erschienen und im "Ski", dem Jahrbuch des Schweizerischen Skiverbandes, und den "Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt" veröffentlicht.

gitter erreichen, ertönt der Summton. Die Schneehöhe kann dann an den graduierten Schneesonden abgelesen werden.

Das Messverfahren kann noch vereinfacht werden, indem beim Auslegen des Drahtgitters ein mit dem Drahtgitter verbundener Cu-Draht am benachbarten Pegel in die Höhe geführt wird, sodass der Cu-Draht bei der Messung eine Schneesonde ersetzt und der elektrische Kontakt nur noch zwischen einer Schneesonde und dem Drahtgitter gesucht werden muss.

Leider kann der elektrische Kontakt zwischen dem Drahtgitter und der Schneesonde nicht immer hergestellt werden, da sich vermutlich im Laufe des Sommers eine Eisschicht über dem Drahtgitter bildet. Bevor die Schneesonde das Drahtgitter erreichen kann, muss diese Eisschicht durchschlagen werden. Beim ruckartigen Durchstossen der Eisschicht durchstösst die Schneesonde fast gleichzeitig das Drahtgitter, sodass der elektrische Kontakt dabei unvollständig oder überhaupt nicht zustande kommt.

Die Drahtnetz-Sondierung weist einige wesentliche Nachteile der Pegelmessung nicht auf, da das Drahtnetz sozusagen schwimmend auf den Grundhorizont gelegt wird und so einerseits das Absinken der Firnoberfläche infolge von Ablation zu Beginn des Bilanzjahres mitmacht, andererseits unter dem eigenen Gewicht nur geringfügig einsinkt. Um ein Einschmelzen des Drahtgitters zu verhindern, sollte allerdings das Auslegen kurz vor oder während einer Schlechtwetterperiode vorgenommen werden.

Die in den letzten 13 Jahren im Firngebiet des grossen Aletschgletschers mit Hilfe von Drahtnetz-Sondierungen gemessenen Schneehöhen sind im Mittel um 10 cm kleiner als die entsprechenden "Pegel"- Schneehöhen. - Ein mechanisches Erbohren und Auffinden des Drahtnetzes ist nicht möglich, da sein mechanischer Widerstand im Vergleich mit den vielen im Firn vorhandenen Eisschichten klein ist.

5.2.1.c. Ocker: Zu Beginn eines Bilanzjahres wird die Firnoberfläche an verschiedenen Stellen mit gelbem oder rotem, wasserunlöslichem Ocker gefärbt. Damit die gefärbten Stellen bei der Messung wiederum aufgefunden werden, muss diese Färbung, ähnlich wie die Auslage des Drahtnetzes, in bestimmtem Abstand und bestimmter Richtung von einem bekannten Pegelstandort vorgenommen werden. Die Farb-Markierung wird am Ende des Bilanzjahres erbohrt oder ergraben, woraus die Schneehöhe ersichtlich ist. Diese Methode wurde erstmals von Rutgers (1914) erwähnt und von A. de Quervain (1917) ausführlich beschrieben. Nach A. de Quervain braucht es für eine Fläche von 10 m^2 etwa 1 kg Ocker. Die Methode ist der Drahtnetz-Methode ebenbürtig, besitzt ähnliche Vor- und Nachteile, wobei hier die grösste Fehlerquelle darin besteht, dass der Farb-Horizont in grössere Tiefen verschwemmt werden kann. In vielen Fällen kann er auch von der Firnoberfläche her nicht mehr geortet werden. Die Farbschicht vermindert überdies die Albedo der Firnoberfläche, wodurch die Ablation künstlich vergrössert wird. Aus diesem Grunde sollte auch die Ocker-Schicht kurz vor oder während einer Schlechtwetterperiode ausgestreut werden.

5.2.1.d. Magnetisierte Körper: Lliboutry (1961) beschrieb eine Messmethode, bei der eine bestimmte Firnschicht durch einen magnetisierten Körper markiert wird, der sich mit Hilfe des Magnetfeldes später wieder finden lässt. Obwohl die Methode vom Autor zur Messung der Verdichtung und Strömungsgeschwindigkeit im Firn verwendet wurde, wäre es denkbar, diese oder eine ihr ähnliche Methode ebenfalls zur Messung der Schneehöhe heranzuziehen.

Lliboutry benützte zur Markierung ein vormagnetisiertes Stahlrohr (ø = 6 - 7.5 cm, Länge = 2 m) mit bekanntem magnetischem Moment, das er vertikal in die zu markierende Firnschicht einbohrte. In einem späteren Zeitpunkt wurde die Position und Tiefe des Rohres anhand des Dipol-Feldes bei Benützung eines Magnetometers bestimmt. Die Methode ist relativ genau, konnte doch damit die Lage auf $\pm$ 0.5 m, die Tiefe auf 2% genau und die Neigung des Rohres auf $\pm 4^{o}$ genau bestimmt werden.

Leider ist ein 2 m langes Stahlrohr ein sehr ungünstiger Körper, um damit die Firnoberfläche zu Beginn des Bilanzjahres zu markieren, da es die Ablationsverhältnisse in seiner näheren Umgebung in erheblichem Masse verändert. Um die dieser Methode zugrunde liegende Idee, die Dipolvermessung, auch zur Bestimmung der Schneehöhe benützen zu können, müsste wohl eher ein einzelner, starker Elektromagnet verwendet werden. Dieser könnte sehr klein sein und würde deshalb die Ablationsverhältnisse zu Beginn des Bilanzjahres nur wenig beeinflussen. Im übrigen könnte das Dipolfeld eines Elektromagneten durch eine entsprechende Stromzuführung viel stärker und störungsfreier gemacht werden, als das statische Feld eines vormagnetisierten Körpers, sodass die Position und Tiefe des Elektromagneten genau und in kurzer Zeit gefunden werden könnte. Der Elektromagnet müsste dabei durch eine isolierte, verdrillte Zuleitung elektrisch zugänglich gemacht werden, wobei diese Zuleitung entlang einer Pegelstange in die Höhe geführt werden könnte. - Leider wäre bei einer solchen Dipol-Schneehöhen-Messmethode der Aufwand an Zeit und Material im Verhältnis zur Ausbeute gross, da die Schneehöhe mit dieser Methode auch nur in einem einzigen Firnpunkt bestimmt werden könnte.

5.2.2. Schneehöhenmessung mit Hilfe von linienförmigen Markierungskörpern

Sowohl im unvergletscherten wie im vergletscherten Gelände wird die Güte einer Schneehöhen-Messmethode danach beurteilt, wie genau und mit welchem Aufwand es möglich ist, mit Hilfe der Methode ein Flächenmittel der Schneehöhe in einem bestimmten Gebiet zu bestimmen.

Da es im Firngebiet aus ökonomischen Gründen unmöglich ist sehr viele Einzelpunkte zu markieren, kann der Forderung nach einem guten Flächenmittel der Schneehöhe am besten so Rechnung getragen werden, indem man die Firnoberfläche mit linienförmigen Körpern markiert, sodass eine grosse Anzahl von möglichen Messpunkten zur Verfügung steht.

5.2.2.a. Drähte (Gleichstrommethode): Alljährlich zu Beginn des neuen Bilanzjahres wird auf einer ausgesteckten und vermessenen Profillinie quer zum Firnbecken ein blanker Cu-Draht auf die Firnoberfläche ausgelegt. Dieser wird mit Hilfe eines isolierten Zuführungsdrahtes entlang eines Pegels für die Dauer des Bilanzjahres von der Oberfläche her elektrisch zugänglich gemacht. Der Markierungsdraht wird dann im Laufe eines Bilanzjahres eingeschneit und verschiebt sich mit dem Gletscher talwärts.

Zur Messung der Schneehöhe wird der Draht als Linearelektrode benützt, indem von der Firnoberfläche aus mit Hilfe einer Gleichstromquelle und zweier symmetrischer Hilfselektroden ein Stromfluss im Firnuntergrund erzeugt wird. Durch die Ausmessung des so entstandenen Feldes kann die Lage des Drahtes im Firn und damit auch die Tiefe des Drahtes unter der Firnoberfläche bestimmt werden. Die lotrechte Tiefe des Drahtes unter der Firnoberfläche entspricht während des ersten Jahres nach der Drahtauslage der Schneehöhe (h_s).

5.2.2.b. Drähte (Wechselstrommethode): Die Tiefe von eingeschneiten Drähten unter der Firnoberfläche und damit die Schneehöhe kann auch bei Benützung von Wechselstrom gefunden werden. Bei der Einmessung von linearen Einzeldrähten mittels Wechselstrom muss aber der Stromkreis an der Firnoberfläche mit Hilfe von Zuleitungsdrähten geschlossen werden. Dies bedingt, dass man den Draht mindestens an beiden Enden mit Hilfe von zwei Pegelstangen in die Höhe führt, und so für die Dauer des Bilanzjahres elektrisch zugänglich macht. Um bei der Messung das Auslegen von Zuleitungsdrähten an der Firnoberfläche zu vermeiden, wird bei Wechselstrommessungen besser eine spezielle Drahtanordnung verwendet, indem nicht nur ein Draht, sondern zwei parallele Drähte in Form einer langgestreckten Rechteckschleife ausgelegt werden, die an einer einzigen Pegelstange in die Höhe, bzw. an die Firnoberfläche geführt werden.

Bei der Messung wird eine Wechselstromquelle an die Drahtschleife angeschlossen. Das dadurch entstehende elektromagnetische Wechselfeld erlaubt wiederum Rückschlüsse auf die Position und Tiefe der Drahtschleife zu ziehen.

Die Tiefe der Drähte, bzw. die Schneehöhe kann mit beiden Methoden an beliebig vielen Punkten in der Auslagerichtung der Drähte bestimmt werden, sodass es möglich ist, einen Mittelwert der Schneehöhe über diesen Auslagebereich zu bilden. - Die ausführliche Beschreibung der beiden Messmethoden folgt in Abschnitt 6.

5.2.3. Messung der mehrjährigen Firnzuwachsrate ohne Markierungskörper

Wie schon die Ueberschrift sagt, handelt es sich bei den folgenden Methoden nicht um eigentliche Schneehöhen-Messmethoden, sondern um Messverfahren, die die Bestimmung des Firnzuwachses über längere Zeiträume, d.h. eine sogenannte Firnstratifikation aufzustellen erlauben, während sie zur Messung der jährlichen Schneehöhe zu ungenau oder zu aufwendig sind.

5.2.3.a. Messung der Firnzuwachsrate mit Hilfe von Istopen: Ein Tiefenprofil des Firns, das mit Hilfe eines Bohrers oder eines Schachtes gewonnen wurde, kann anschliessend im Labor auf seinen Gehalt an

- stabilen Isotopen ($^{2}H/^{1}H$, $^{18}O/^{16}O$)
- radioaktiven Isotopen (^{3}H, ^{14}C, ^{137}Cs, ^{210}Pb, ^{90}Sr u.a.)

untersucht werden, wobei die Konzentration an stabilen Isotopen meistens massenspektrographisch und diejenige an instabilen Isotopen aufgrund ihrer spezifischen Strahlung gefunden wird.

Zur Bestimmung der jährlichen Schneeschichtdicke können das radioaktive Zerfallgesetz und verschiedene, empirisch gefundene Tatsachen herangezogen werden. So z.B. werden benützt:

- die Abhängigkeit der Konzentration der stabilen Isotope (^{2}H, ^{18}O) von der Kondensationstemperatur des Niederschlages; wenn man als Ordinate das Verhältnis $^{2}H/^{1}H$, bzw. $^{18}O/^{16}O$ und als Abszisse den Abstand der gesammelten Proben von der Firnoberfläche aufträgt, entsteht ein Sommermaximum und ein Winterminimum in der "Konzentrationskurve", woraus eine gute Jahresschichtfolge aufgestellt werden kann (Epstein, 1956).
- die ebenfalls saisonbedingten Schwankungen in der Tritiumkonzentration (^{3}H), welche infolge der zeitweise stärkeren Durchmischung der Stratosphäre mit der Troposphäre zustandekommen. Die Tritiumkonzentration erreicht in den Frühlingsniederschlägen ein Maximum, was die schon genannten Rückschlüsse erlaubt.
- der plötzliche Anstieg der Konzentration verschiedener instabiler Isotope (^{3}H, ^{137}Cs, u.a.) infolge von Bombentests in gewissen Jahren. So fanden Ambach und Eisner (1965) ein plötzliches Ansteigen der α, β, γ-Radioaktivität im Sommerhorizont 1961 eines Firnkerns, sodass diese Sommerschicht auch in Zukunft als Referenzhorizont bei Datierungen gebraucht werden kann (falls sie nicht durch einsickerndes Schmelzwasser verwischt wird).
- der radioaktive Zerfall von instabilen Isotopen (^{3}H, ^{210}Pb, ^{90}Sr), die in den Firnschichten zur Ablagerung gelangten. Tritium wird z.B. hauptsächlich durch die kosmische Strahlung in der Athmosphäre gebildet, gelangt mit dem Niederschlag in die Schneedecke und zerfällt dort mit einer Halb-

wertzeit von 12.3 Jahren. Aehnlich wie bei der bekannten C_{14}-Datierungsmethode, kann nun aus Aktivitätsmessungen die Zeitspanne ermittelt werden, die seit der Kondensation ($\approx$ Ablagerungszeit auf dem Firnfeld) verflossen ist.

Eine Untersuchung, basierend auf dem radioaktiven Zerfall von Tritium, wurde von Oeschger u.a. (1962) an einer 31.5 m langen Firnsäule des Jungfraufirns (Messort: 3400 m ü.M.) vorgenommen. Daraus liess sich für die Jahre 1931 $\pm$ 2 bis 1957 eine mittlere Firnzuwachsrate von 1.34 $\pm$ 0.1 m/Jahr ableiten. Die aufgrund von Firnpegel-Messungen ermittelte Zuwachs-Rate betrug vergleichsweise 2.22 m/Jahr, wobei zur Berechnung dieser Rate ein mittleres Firn-Raumgewicht von $\bar{\gamma}$ = 750 kg/m^3 angenommen wurde.

Die beiden Beträge können aufgrund dieser Annahme und weil der Firnpegelstandort nicht mit dem Entnahmeort der Proben identisch war, nicht streng miteinander verglichen werden.

In den letzten Jahren wurde auf eine mögliche Fehlerquelle der Isotopen-Messung hingewiesen, die Beachtung verdient: Auf temperierten Gletschern kann einsickerndes Schmelzwasser eine Verschleppung der spezifischen Aktivität, bzw. der Isotopen-Konzentration der einzelnen Schichten herbeiführen, ein Umstand, den Sharp u.a. (1960) auf dem Blue Glacier, Washington, (2000 m ü.M.) und Deutsch u.a. (1966) auf dem Kesselwandferner, Oetztal, (3240 m ü.M.) feststellten.

Ganz allgemein kann gesagt werden, dass diese Isotopen-Methoden für temperierte Gletscher solange mit Vorsicht angewandt werden müssen, bis der Wassertransport im Firn und Eis besser bekannt ist und ein daraus entstehender Fehler abgeschätzt werden kann. Für kalte vergletscherte Gebiete, wie Grönland und die Antarktis hingegen, scheinen sich diese Methoden bestens zu bewähren (Langway, 1967). Dies ist umso erfreulicher, als damit gerade für jene riesigen Gebiete, wo Messwerte der Jahresbilanz für die verflossenen Jahrzehnte noch fehlten, zuverlässige Methoden gefunden wurden, mit denen der mittlere jährliche Zuwachs vergangener Jahrzente bestimmt werden kann.

5.2.3.b. Schneeschacht- und Pollenanalysen: Im "stratigraphic system", wo der Grundhorizont durch die Sommerschicht des Vorjahres gebildet wird, kann die Schneehöhe auch durch einen Schneeschacht, der gleichzeitig der Raumgewichtsbestimmung dient, gefunden werden. Falls aber die jährlichen Schneehöhen 3 - 4 m übersteigen, müssen schon beträchtliche Schneemassen bewegt werden, um bis zur Sommerschicht vorzustossen, sodass die Methode auf eher niederschlagsarme Firngebiete beschränkt bleibt. Ueberdies wird nicht jedes Jahr eine gut sichtbare Sommerschicht (nach Hoinkes, 1957: grobkörnige, schmutzige Schicht geringer Schneedichte) ausgebildet, sodass dann eine Schneehöhenmessung unmöglich ist.

Während sich die erwähnte Schneehöhenbestimmung nur auf den makroskopisch sichtbaren Staub stützt, verwendete Vareschi (1935) erstmals die sogenannte mikroskopische Pollenanalyse, mit deren Hilfe die Firnschichtung und damit die Höhe der jährlichen Rücklage über längere Zeiträume verfolgt werden kann.

Die Pollen, die durch den Wind über grosse Strecken transportiert werden, lagern sich in Schichten auf die Firnoberfläche, wobei der Winterschnee ziemlich pollenfrei ist, während die Sommerschichten einen beträchtlichen Pollengehalt aufweisen. Nach Vareschi (1935) ist z.B. am Aletschgletscher (Ablationsgebiet) die mittlere Pollenfrequenz 350 Pollen pro dm^3 Eis.

Wenn man Firnproben, die mit Hilfe eines Schachtes oder unter gewissen Vorsichtsmassnahmen an der Wand einer Gletscherspalte gewonnen wurden, auf ihren quantitativen und qualitativen Pollengehalt untersucht, lassen sich die Schichten nach Jahreszeiten trennen und daraus die jährliche Höhe der Rücklage bestimmen. Ein grosser Vorteil dieser Methode besteht nach Vareschi (1937) und nach Ambach u.a. (1966) darin, dass Pollen (16 - 140 μ) im Gegensatz etwa zum gestreuten Ocker (2 - 3 μ) oder den Isotopen (chemisch gebunden) nicht in tiefere Schichten infiltriert werden, was die Methode vor allem für temperierte Gletscher interessant macht. Eine Neubelebung und Bestätigung erfuhr die Methode neuerdings durch Arbeiten von Ambach und Eisner (1966)

auf dem Kesselwandferner (Oetztaler Alpen), wo Pollenanalysedaten zusammen mit firnstratigraphischen Ergebnissen verglichen werden konnten. Die mit beiden Methoden bestimmten jährlichen Schichthöhen stimmten innerhalb $\pm$ 10 cm überein.

5.3. MESSUNG DES MITTLEREN RAUMGEWICHTES BZW. DES WASSERWERTES EINER GESAMT-SCHNEESCHICHT

Wie im einleitenden Abschnitt 5.1. dargelegt wurde, lässt sich im Firngebiet die jährliche Massenbilanz (ausgedrückt in mm Wasserwert) in einem beliebigen Punkt berechnen, wenn die Schneehöhe (h_s) und das mittlere Raumgewicht ($\bar{\gamma}$) über den Bereich dieser Schneehöhe bekannt sind. Während die Schneehöhe aufgrund eines einzelnen Messvorganges gefunden wird, muss das mittlere Raumgewicht einer Gesamt-Schneeschicht meistens schichtenweise, also durch mehrere Einzelmessungen ermittelt werden.

Im folgenden wird meist nur von der Bestimmung des Raumgewichtes einer einzelnen Schneeschicht, bzw. Schneeprobe (γ_i) gesprochen; das mittlere Raumgewicht der Gesamt-Schneeschicht entspricht dann dem Mittelwert der einzelnen Raumgewichte, solange alle Probestücke gleich lang sind. Weiterhin wird stillschweigend vorausgesetzt, dass bei Kenntnis des Raumgewichtes einer Schneeprobe (γ_i) auch ihr Wasserwert (w_i) bekannt ist.

Das Raumgewicht einer einzelnen Schneeprobe und damit das mittlere Raumgewicht einer Gesamt-Schneeschicht lassen sich auf verschiedene Art bestimmen, wobei Zingg (1964) die Methodik der Messung, die im unvergletscherten Gelände angewandt wird, eingehend behandelt hat. Im Firngebiet können prinzipiell die gleichen Messmethoden benützt werden wie im unvergletscherten Gelände. Da aber im Firngebiet erstens die Schneehöhen meist wesentlich grösser sind und zweitens die Firnschichten oft mit dicken Eislinsen- und -lagen durchsetzt sind, wird vor allem die Probenentnahme schwierig und zeitraubend, sodass hier eher Messmethoden gesucht werden müssen, mit denen das Raumgewicht in situ, z.B. in einem Bohrloch und damit ohne Probenentnahme, bestimmbar ist. Im folgenden werden die verschiedenen, im unvergletscherten Gelände benützten Messmethoden kurz beschrieben und gleichzeitig ihre Verwendbarkeit für Firnmessungen abgeschätzt.

5.3.1. Waegeverfahren

Mit einem Kreiszylinder bestimmten Volumens (mit oder ohne Bohrkranz) wird eine Schneeprobe ausgestochen; je nach seiner Lage bezüglich der Schneeoberfläche kann der gefüllte Zylinder von der Oberfläche herausgezogen oder muss mit Hilfe eines Schneeschachtes ausgegraben werden, damit die Probe nicht hinausfällt. Der Probekörper wird mit oder ohne Zylinder gewogen und das Raumgewicht, bzw. der Wasserwert anhand der Definitionsgleichungen bestimmt:

Raumgewicht einer Probe:

$$\gamma_i = \frac{\text{Probengewicht}}{\text{Probenvolumen}} \quad (\text{kg/m}^3) \qquad (4)$$

(Festsubstanz und Porenfüllung)

Wasserwert einer Probe:

$$w_i = \frac{\text{Probengewicht}}{\text{Grundfläche der Probe}} \quad (\text{kg/m}^2) \; *) \qquad (5)$$

*) Sehr oft wird der Wasserwert auch als Höhe der Wassersäule angegeben:

$$w_i = \frac{(h_s)_i \cdot \gamma_i}{\gamma_{Wasser}} \quad (\text{m oder mm}).$$

Die Methode ist sehr einfach und deshalb feldtüchtig und kann im Firngebiet auch benützt werden, doch ist die Probenentnahme meistens nur durch das zeitraubende Graben eines Firnschachtes zu bewerkstelligen.

5.3.2. Messung der Schmelzwassermenge

Die Schneeprobe wird wie beim Wägeverfahren gewonnen, doch meist mit einem Zylinder von der Grundfläche 200 cm^2, d.h. der gleichen Fläche wie sie die Niederschlagsmesser aufweisen. Die Probe wird anschliessend geschmolzen und mit einem Hellmannschen Messglas mit einer Ablesegenauigkeit von 1/10 mm gemessen. (Diese Genauigkeit entspricht bei Schnee von 100 kg/m^3 1 mm Schneehöhe). Die Methode eignet sich nur für Detailuntersuchungen in der Nähe einer Messhütte, ist also im Firngebiet nicht brauchbar.

5.3.3. Nuclear-Methoden

Die Entwicklung der Kernphysik ermöglichte es, in den letzten Jahren zur Messung des Raumgewichtes von Schnee auch Nuclear-Methoden einzusetzen. Da heute die verschiedensten Anordnungen bezüglich Strahlungsquelle, Messprinzip und Zählvorrichtung ausprobiert und gebraucht werden, können im folgenden nur die wichtigsten Methoden genannt werden.

5.3.3.a. Messung mittels γ-Strahlung: "Transmission"-Technik: die Anwendung beruht auf der gesetzmässigen Intensitätsabnahme der γ-Strahlen beim Durchdringen von Materie. Bei einem parallelen Strahlenbündel lässt sich diese Beziehung durch das Exponentialgesetz:

$$I = I_o \cdot e^{-\nu \cdot d} \qquad (6)$$

beschreiben, wobei I_o die Anfangsintensität
I die Intensität nach Durchdringen einer Schicht von der Dicke d
ν der sog. Absorptionskoeffizient

sind.

Da ν der Dichte der Materie, bzw. dem Raumgewicht des Schnees proportional ist, kann letzteres mit Hilfe dieses Prinzips bestimmt werden.

Diese elegante Messmethode wird seit 1950 (Gerdel, Hansen and Cassidy, 1950) in mehreren Ländern zur kontinuierlichen Bestimmung des Schneeraumgewichtes verwendet. Da aber sowohl die Strahlungsquelle (meist eine ^{60}Co-Quelle) als auch das Zählrohr, das die auftreffende Strahlung misst, mit festem Abstand installiert werden müssen, ist die Methode für Firnmessungen nicht geeignet, da auf dem Firn keine "festen" Installationen möglich sind. Das gleiche gilt auch für die von Smith et al. (1966) entwickelte Methode, bei der die Gamma-Quelle und das Zählrohr in je einem, senkrecht in der Schneedecke stehenden, Führungsrohr synchron verschoben werden, wobei die beiden Rohre ebenfalls immer den gleichen Abstand aufweisen müssen.

"Scatter"-Technik: Dieses System beruht auf der Streuung und Reflexion von γ- und Teilchen-Strahlung durch die umgebende Materie. Durch Ausnützen dieser Eigenschaft kann man nun die strahlende Quelle und den Detektor, die in einem bestimmten Abstand stehen und durch einen starken Absorber (Blei) getrennt sind, in die gleiche Einheit einbauen und erhält dadurch ein vereinfachtes Messverfahren (sogenannte Gammasonde). Vor der Messung wird ein Führungsrohr in ein Bohrloch lotrecht in die Schneedecke eingeführt. Die Sonde wird im Füh-

rungsrohr in die gewünschte Messtiefe abgesenkt. Die Anzahl der rückgestreuten γ-Quanten wird vom Zählrohr erfasst und in einem an der Oberfläche liegenden Zähler zur Anzeige gebracht. Die Theorie zeigt, dass die Strahlung umso tiefer in den Schnee eindringen kann, je geringer das Raumgewicht des Schnees und je grösser der Abstand zwischen Strahlungsquelle und Detektor ist. Nach Gay (1962) ist aber die Eichkurve, die man durch Vergleich mit der Wägemethode erhält, nicht linear, indem bei Raumgewichten bis 500 kg/m^3 der Streuungseffekt grösser ist als die Absorption und somit die Zählrate ansteigt, bei höheren Raumgewichten aber die Absorption vermehrten Einfluss gewinnt und deshalb die Zählrate wieder abfällt. Die Eichkurve besitzt deshalb ein Maximum und ist somit zweideutig. Die Methode wäre, nur vom messtechnischen Standpunkt aus betrachtet, für Firnmessungen geeignet, ist aber wegen der Zweideutigkeit nicht empfehlenswert.

5.3.3.b. Messung mit Hilfe der Neutronen-Streuung (Neutronensonde): Die prinzipielle Messanordnung ist dieselbe wie sie bei der γ-"scatter"-Technik beschrieben wurde. Die schnellen Neutronen werden im Gegensatz zur γ-Strahlung (Streuung an der Elektronen-Hülle) fast nur durch Atomkerne von geringer Masse verlangsamt und gestreut, sodass damit jene Messanordnung gefunden ist, die sozusagen selektiv auf die Verbindung H_2O (der Aggregatzustand ist relativ unwichtig!) anspricht. Ein wichtiger Vorteil des Neutronen-Messprinzips ist weiterhin das geringere Gewicht der Sonde und der Abschirmung (gegenüber dem grossen Gewicht von Gammasonden). Der Grund liegt darin, dass die meisten Neutronenquellen wenig Gammastrahlen aussenden, sodass sie nicht durch Bleihüllen abgeschirmt werden müssen, um den Sicherheitsbestimmungen zu genügen. Die Neutronensonde ist wohl jene Nuclear-Messmethode, die sich am besten für Firnbilanzmessungen eignet. Die mit einer Neutronensonde im Rahmen dieser Arbeit gemachten Erfahrungen (Messeinrichtung, Eichkurven, Messverfahren) werden in Abschnitt 6 besprochen.

5.3.4. Messung mit Schnee-Druckkissen

Ein möglichst flaches Gummi- oder Plastic-Kissen wird auf eine horizontale Unterlage gelegt und mit einer Frostschutz-Lösung gefüllt. Das mit dem Kissen verbundene Steigrohr wird entlang einer lotrechten Stange so in die Höhe geführt, dass auch extreme Schneehöhen das Ende des Steigrohres nicht erreichen können. Mit zunehmendem Schneedruck auf das Kissen wächst der innere Flüssigkeitsdruck und die Flüssigkeit steigt im Steigrohr proportional dem Wasserwert des Schnees an. Mit einem Manometer oder einem Schwimmer kann der Druck, bzw. die Steighöhe der Flüssigkeit, bestimmt und in Wasserwerte umgerechnet werden.

Diese neue Methode wurde erst in den letzten Jahren in den USA (Warnick and Penton, 1963) entwickelt. Für die Methode sind relativ umfangreiche Installationen notwendig. Solche Druckkissen wurden neuerdings auch zur Messung der Jahresbilanz in vergletscherten Gebieten eingesetzt, so z.B. auf dem South Cascade Glacier, USA (vgl. "Ice", Nr. 22, 1966); die Resultate dieser Versuche sind noch nicht veröffentlicht.

Auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden solche Druckkissen-Versuche angestellt, wobei die gemachten Erfahrungen und die erhaltenen Resultate in Abschnitt 6 beschrieben werden.

6. ENTWICKLUNG UND PRUEFUNG EINIGER METHODEN ZUR BESTIMMUNG DER MASSENBILANZ IN FIRNPUNKTEN

6.1. SCHNEEHOEHENMESSUNG MIT HILFE VON DRAEHTEN BEI BENUETZUNG VON GLEICHSTROM

6.1.1. Einleitung

In neuer Zeit werden zur Vermessung von Firn- und Gletschermassen vermehrt auch elektrische Verfahren beigezogen (Radar- und Widerstandsverfahren zur Bestimmung des Felsuntergrundes, dielektrische Messungen zur Bestimmung von Temperatur und freiem Wassergehalt u.a.).

Borovinsky (1965) benützte z.B. eine dem elektrischen Widerstandsverfahren verwandte Methode, um die Bewegung eines Punktes im Firnuntergrund zu verfolgen. Er versenkte, in ähnlicher Weise wie Lliboutry (1961) einen magnetischen Zylinder (vgl. 5.2.1.d.), eine Metallscheibe in ein 25 m tiefes Bohrloch und verfolgte deren Bewegung anhand des elektrischen Feldes, das entsteht, wenn zwischen der Scheibe und einer Hilfselektrode eine Gleichspannung angelegt wird. Eine mehr für die Schneehöhenmessung gedachte Anordnung begann Dr. Röthlisberger, AHG (vgl. "Ice", No. 15, 1964) im Bilanzjahr 1962/63 zu verwenden, indem er alljährlich blanke Kupferdrähte längs einer geraden Profillinie auf die Firnoberfläche auslegte und deren Lage im Firnuntergrund nach einem Jahr unter Verwendung einer zwischen Draht und Hilfselektroden angelegten Gleichspannung fand. In den Jahren 1963 - 1965 machte er mehrere Versuchsmessungen, deren Resultate zu einer Weiterentwicklung der Methode ermutigten. Auf seine Anregung hin führte ich diese Drahtversuche weiter, und die Resultate und Erfahrungen, die im Laufe von zwei Untersuchungsjahren gesammelt wurden, werden in den folgenden Abschnitten besprochen.

6.1.2. Technische Angabe über die Drähte

Die Drähte wurden, wie schon eingangs erwähnt, seit dem Bilanzjahr 1962/63, alljährlich zu Beginn des neuen Bilanzjahres auf der gleichen, vermessenen und ausgesteckten Profillinie von P 11 (vgl. Abb. 35) quer zum Firnbecken auf die Firnoberfläche gelegt. Zu Beginn des Bilanzjahres 1969/70 lagen also acht Drähte in verschiedenen Tiefen im Firnuntergrund. Die Drahtlänge (2ℓ) war nicht jedes Jahr gleich gross und betrug im Mittel 530 m. Die Drähte wurden ungefähr in der Mitte des Firnfeldes mit Hilfe eines Zuleitungsdrahtes entlang eines Pegels an die Firnoberfläche geführt, wobei die Zuleitungsdrähte der "mehrjährigen" Drähte jeweils zu Beginn eines neuen Bilanzjahres zu dem immer im gleichen Standort errichteten neuen Pegel weitergeführt wurden. Für die Markierung wurden blanke Cu-Drähte verwendet, für die Zuleitungen solche mit einer Isolationsschicht aus Kunststoff.

Technische Daten:

Markierungsdrähte:	Kupferlitze, 28 x 0.15 mm, blank, unverzinnt, $F = 0.5\ mm^2$, $R = 3.55\ \Omega$ /100 m
Zuleitungsdrähte, zur Oberfläche führend:	Kupferlitze, 42 x 0.15 mm, isoliert, unverzinnt, $F = 0{,}75\ mm^2$, $R = 2.4\ \Omega$ /100 m

Da die Drähte zur Bestimmung der jährlichen Schneehöhe (h_s) entlang der Querprofillinie benützt werden, sollten sie ihre relative Lage zur Firnoberfläche, auf der sie ausgelegt werden, im Laufe des Bilanzjahres nicht verändern. Deshalb müssen sie während oder kurz vor einer Schlechtwetterperiode ausgelegt werden, sodass sie sofort mit Schnee zugedeckt werden; dadurch können die Metalldrähte nur noch in geringem Masse Strahlungswärme absorbieren, und ihre relative Lage im Firn bleibt erhalten. Erfolgt die Drahtauslage nämlich während einer Schönwetterperiode, so werden die Drähte in einigen Tagen bis in eine Tiefe von 20 - 30 cm unter die Firnoberfläche einsinken, und der Einsinkbetrag muss dann für eine genaue Schneehöhenbestimmung am Ende der Schönwetterperiode durch Aufbrechen der Firnoberfläche über dem Draht gemessen und berücksichtigt werden.

Die einzelnen Drähte werden mit Hilfe einer Jahrzahl bezeichnet, wobei die Jahrzahl dem Beginn des hydrologischen Bilanzjahres entspricht, in welchem der Draht auf die Firnoberfläche ausgelegt wurde. So bedeutet z.B. die Bezeichnung "Draht 1967", dass jener Draht im Herbst 1967, also zu Beginn des Bilanzjahres 1967/68 auf die Firnoberfläche ausgelegt wurde.

6.1.3. Theoretische Grundlagen

Die Gleichstrommethode soll durch die Vermessung des elektrischen Feldes in der Umgebung eines linearen Leiters Rückschlüsse auf dessen Lage im Firnuntergrund erlauben. Zur Beschreibung der Feldverteilung wird ein rechtwinkliges Koordinatensystem gewählt, dessen Ursprung über dem Draht an der Firnoberfläche liegt. Die x-Achse verläuft in der Firnoberfläche und weist firnabwärts, die y-Achse verläuft parallel zum Draht und die z-Achse zeigt in den Firnuntergrund, wie dies Abb. 5 darstellt. Der Draht kommt in die y,z-Ebene zu liegen und verläuft parallel zu y. Aus praktischen Gründen liegt der Koordinatenursprung beim Pegel in der Mitte des Firnfeldes (= ungefähre Drahtmitte).

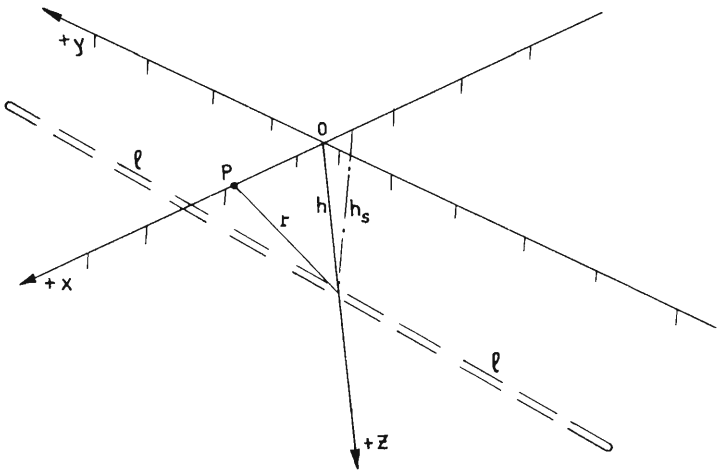

Abb. 5 Lage des Drahtes im Firnuntergrund und entsprechendes Koordinatensystem.

Das elektrische Feld eines langgestreckten, zylindrischen Leiters ist in allen Querschnittebenen das gleiche (von Randeffekten wird vorerst abgesehen), sodass es sich zweidimensional darstellen lässt. Die Vermessung erfolgt am besten längs Profilen in der x,z-Ebene in bestimmter Richtung. Da die Feldverteilung mit Hilfe von elektrischen Sonden gemessen wird, liegt es auf der Hand, dass Profilmessungen in der x-Achse, also an der Firnoberfläche (=Oberflächenprofile) einfacher auszuführen sind als Profilmessungen in z-Richtung (Tiefenprofilmessungen), wo mindestens eine der Sonden in den Firnuntergrund gestossen werden muss.

Im Folgenden soll die theoretische Feldverteilung in der Drahtumgebung kurz beschrieben werden. Wie bei der theoretischen Begründung des elektrischen Widerstandsverfahrens soll auch hier der Firnuntergrund vereinfachend als homogen und isotrop und das elektrische Feld $(\vec{E})$ als stationär angenommen werden, sodass dieses durch eine einzige, richtungsunabhängige Funktion, das Potential (φ) beschrieben werden kann.

$$\vec{E} = - \operatorname{grad} \varphi \tag{7}$$

Der spezifische Widerstand (ϱ) der Firnschichten ist in diesem Fall eine ortsunabhängige Konstante und die Stromdichte $(\vec{i})$ zeitlich unveränderlich:

$$\vec{i} = \frac{1}{\varrho} \cdot \vec{E}. \tag{8}$$

Mit Hilfe der beiden Beziehungen lässt sich das Potential berechnen. An der Oberfläche des homogenen "Firn-Halbraumes" kann dieses z.B. für eine Punktquelle, die im Innern oder an der Oberfläche des Halbraumes liegt, folgendermassen beschrieben werden:

$$\varphi\,(P) = \frac{\varrho \cdot I}{2\pi} \cdot \frac{1}{r}; \tag{9}$$

dabei ist I die Stromstärke der Stromquelle und r bezeichnet den radialen Abstand des Punktes (P) von der Quelle. Das Potential ist dabei so normiert, dass der Wert null bei unendlichem Abstand erreicht wird.

Von Gleichung (9) ausgehend, kann man die Potentialgleichung für eine zylindrische Linearelektrode, wie sie ein im Firnuntergrund liegender gerader Draht darstellt, ableiten. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Stromverteilung im Draht gleichmässig ist.

Bezeichnet ℓ die halbe Drahtlänge und r den Senkrechtabstand eines Firnoberflächenpunktes (P) vom Draht, so lässt sich das Potential schreiben:

$$\varphi\,(P) = \frac{\varrho \cdot I}{2\pi \cdot 2\ell} \cdot \ln \frac{\ell \pm y \left[(\ell \pm y)^2 + r^2\right]^{\frac{1}{2}}}{-\ell \mp y \left[(-\ell \mp y)^2 + r^2\right]^{\frac{1}{2}}} \tag{10}$$

Wenn der Punkt P von der Drahtmitte aus gesehen nicht zu nahe an den Drahtenden liegt ($y \ll \ell$) und wenn der Abstand r dieses Punktes vom Draht nicht zu gross ist ($r \ll \ell$), kann diese Gleichung durch das erste Glied einer Binomialreihe angenähert werden:

$$\varphi\,(P) = \frac{\varrho \cdot I}{2\pi \cdot 2\ell} \ln \frac{\ell + \ell \left[1 + \frac{r^2}{\ell^2}\right]^{\frac{1}{2}}}{-\ell + \ell \left[1 + \frac{r^2}{\ell^2}\right]^{\frac{1}{2}}} \approx \frac{\varrho \cdot I}{\pi \cdot 2\ell} \cdot \ln \frac{2\ell}{r} \tag{11}$$

Bei dieser Näherung wird das Potential null im Abstand $r = 2\ell$ erreicht, während es in unendlicher Entfernung gegen ∞ strebt. Die Näherungsgleichung ist also für grosse Werte von r sicher nicht brauchbar.

Das Potential der Hilfselektroden (B_1, B_2, vgl. Abb. 6 a), die aus Metallstäben bestehen, und an der Firnoberfläche liegen, lässt sich durch Gleichung (9) beschreiben, da man diese Metallstäbe in Distanzen, die gegenüber

ihren Dimensionen gross sind, als Punktquellen betrachten kann. Falls man den Einfluss der Hilfselektroden auf die Gesamt-Potentialverteilung berücksichtigen will, kann man aufgrund der getroffenen Annahmen die geradlinige Drahtquelle und die Punktquellen der Hilfselektroden, bzw. deren Potentiale, algebraisch zum Gesamtpotential addieren. Die entsprechende Gleichung lautet dann, wenn man noch r durch x und die Drahttiefe h ausdrückt:

$$\varphi(P) = \frac{\varrho \cdot I}{4\pi} \cdot \left[\frac{1}{\ell} \ln \frac{\ell - y + \left[(\ell - y)^2 + x^2 + h^2\right]^{\frac{1}{2}}}{-\ell - y + \left[(-\ell - y)^2 + x^2 + h^2\right]^{\frac{1}{2}}} - \left\{ \frac{1}{\left[(b+x)^2 + y^2\right]^{\frac{1}{2}}} + \frac{1}{\left[(b-x)^2 + y^2\right]^{\frac{1}{2}}} \right\} \right] \qquad (12)$$

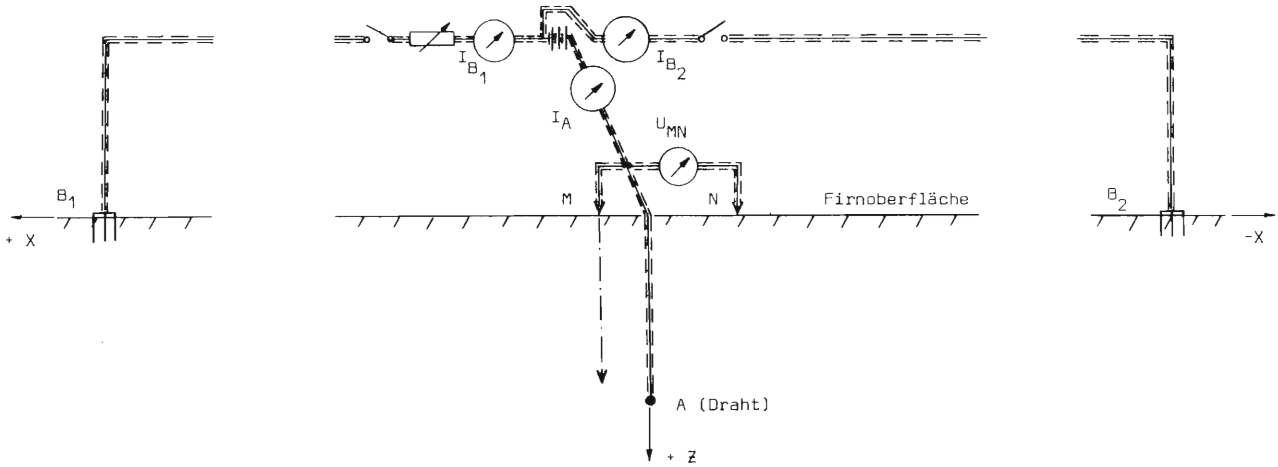

Abb. 6a Schema der Messanordnung

wobei b der konstante, senkrechte Abstand der Hilfselektroden von der Drahtmitte ist. Analog gilt für die Näherungslösung:

$$\varphi(P) = \frac{\varrho \cdot I}{2\pi} \left[\frac{1}{\ell} \cdot \ln \frac{2\ell}{\left[h^2 + x^2\right]^{\frac{1}{2}}} - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{b+x} + \frac{1}{b-x} \right) \right] \qquad (13)$$

In Abb. 6b sind verschiedene Oberflächenprofilkurven des Potentials aufgezeichnet, die anhand der verschiedenen Potentialgleichungen (10 - 13) für einen Draht bestimmter Länge und Tiefe berechnet und entsprechend der benützten Gleichung beschriftet sind. Das Potential an der Firnoberfläche hängt gemäss den Kurven relativ stark davon ab, ob man sich in der Mitte des Drahtes (y = o) oder seitwärts der Drahtmitte befindet und ob die Hilfselektroden bei der Berechnung berücksichtigt werden oder nicht. - Werden hingegen die Potentialkurven so normiert, dass sie einen gemeinsamen Scheitelpunkt besitzen, so zeigt sich, dass sie in der Nähe des Drahtepizentrums (x = o) zusammenfallen. Für die Berechnung der Potentialverteilung (Kurvenform) in diesem Bereich stellt also die einfachste Gleichung (11) eine gute Näherung dar.

Für einen Punkt im Innern des homogenen Halbraumes (Firn) berechnet sich das Potential angenähert aus:

$$\varphi(P_F) = \frac{\varrho \cdot I}{4\pi \cdot 2\ell} \ln\left(\frac{2\ell}{r} + \frac{2\ell}{\bar{r}}\right) \qquad (14)$$

wobei ℓ wiederum die halbe Drahtlänge und r der Senkrechtabstand des Punktes vom Draht ist, während $\bar{r}$ der

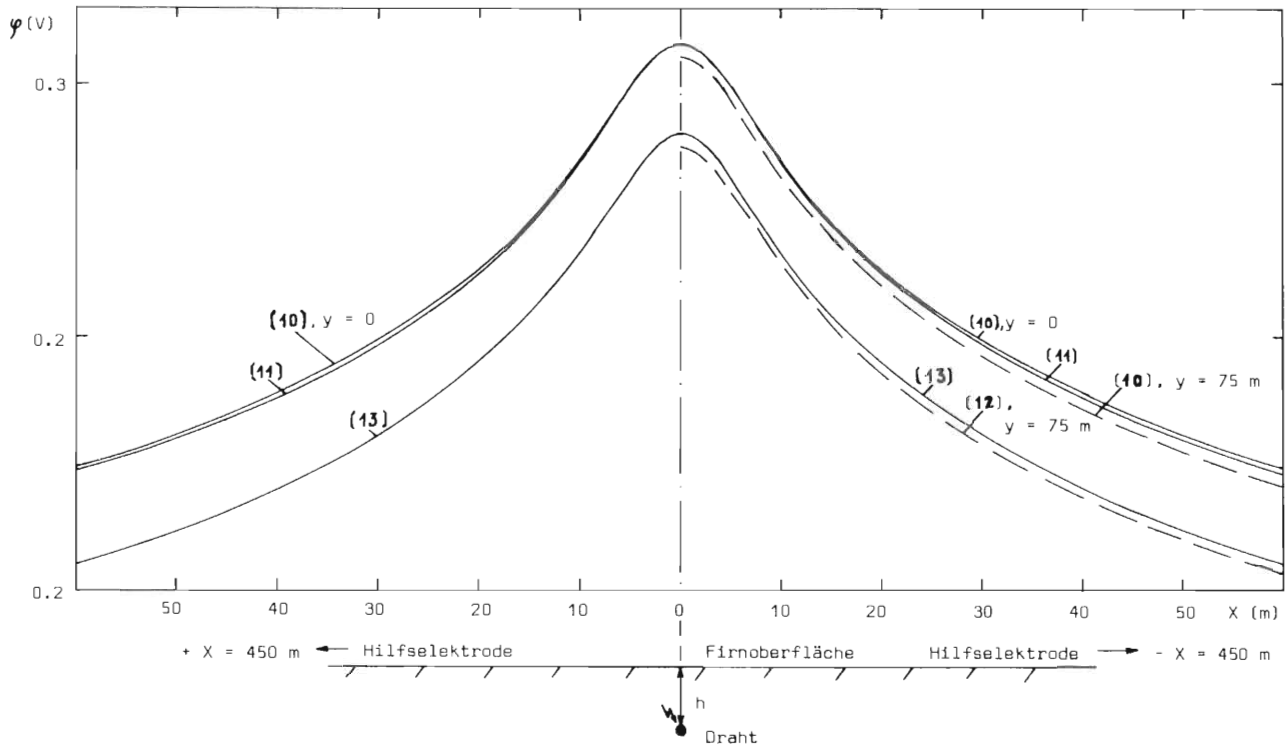

Abb. 6b Berechnete Oberflächenprofilkurven des Potentials; die verschiedenen Kurven wurden anhand verschiedener Gleichungen berechnet (Gleichungen 10 - 13).
Annahmen: $2\ell = 424$ m, $h = 6.35$ m, $I = 10^{-3}$ A, $\varrho = 10^5\ \Omega$ m.

Senkrechtabstand des Punktes vom Draht ist, während r den Senkrechtabstand zu einem virtuellen, durch Spiegelung an der Firnoberfläche erzeugten Draht bedeutet. Mit dieser Formel ist die Kurve von Abb. 7 gerechnet worden, die das Potential eines in geringem Abstand vom Draht vorbeigehenden Tiefenprofils darstellt.

6.1.4. Messverfahren

6.1.4.a. Position des Drahtes: Um den Draht zur Schneehöhenmessung verwenden zu können, muss zuerst die seit der Drahtauslage veränderte Position des Drahtes, d.h. dessen Normalprojektion auf die Firnoberfläche (Epizentrum) in mehreren Punkten entlang des Drahtes (y-Richtung) bestimmt werden.

Der Draht wird dabei als Linearelektrode benützt, indem zwischen dem Draht und zwei symmetrischen Hilfselektroden, die in möglichst grosser Entfernung vom Draht firnabwärts, bzw. firnaufwärts in die Firnoberfläche gestossen werden, eine Gleichspannung von 150 - 300 V angelegt wird.

Der Stromfluss durch die beiden Hilfselektroden und den Firnuntergrund zum Draht muss dabei auf beiden Seiten des Drahtes gleich gross sein, was während der Messung ständig überprüft werden muss. Dadurch wird ein in bezug auf den Draht symmetrisches Feld erzeugt, dessen Aequipotentiallinien (die Aequipotentiallinien sind die Schnittlinien der Aequipotentialflächen mit der Firnoberfläche, die vereinfachend als Ebene betrachtet wird) an der Firnoberfläche annähernd parallel zum Draht verlaufen.

Längs einer Messlinie in x-Richtung wird das entstehende Gleichstromfeld durch Messen der Spannung zwischen zwei Sonden (M, N): $U_{MN} = \varphi(M) - \varphi(N)$ vermessen (vgl. Abb. 6a). Dabei werden die zwei Sonden anfänglich beidseits des vermuteten Epizentrums des Drahtes in einer Entfernung $\pm\ x \approx h$ gesetzt und anschliessend solange gegenseitig verschoben, bis $U_{MN} = o$ wird, d.h. bis die Sonden auf symmetrischen Aequipotentiallinien bezüg-

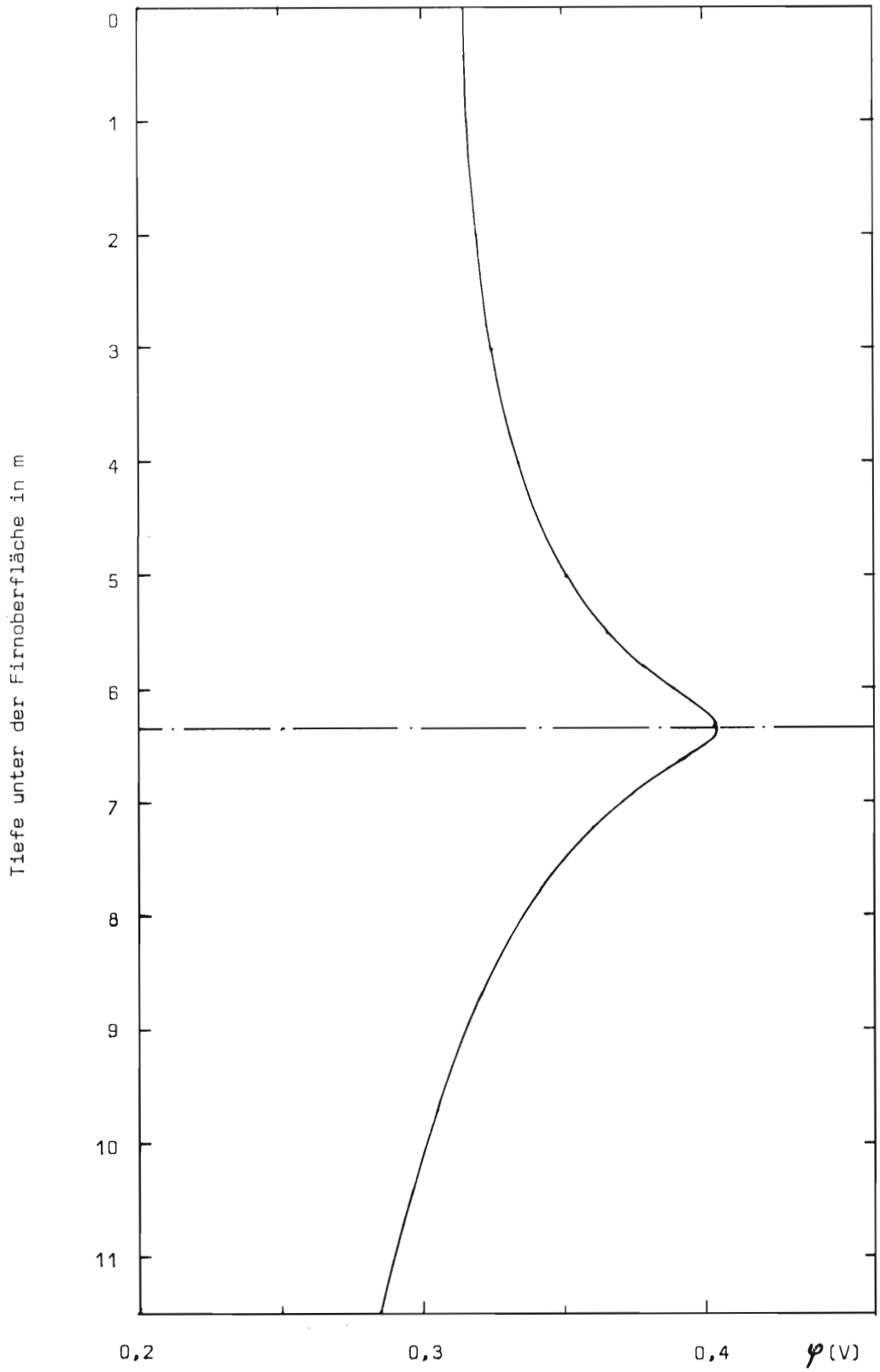

Abb. 7 Berechnete Tiefenprofilkurven des Potentials. Berechnet mit Hilfe von Gleichung (14) mit folgenden Annahmen:
$2\ell = 424$ m, $h = 6.35$ m, $x = 0.3$ m, $I = 10^{-3}$ A, $\varrho = 10^{5}\ \Omega$ m.

lich des Drahtes stehen. Die halbierte Distanz zwischen den beiden Sonden ergibt den Epizentrumspunkt des Drahtes. Um kleinere Geländeunebenheiten auszugleichen, werden beide Sonden um einige Meter in x-Richtung ver-

schoben und das Ganze ein bis zweimal wiederholt, sodass ein Mittelwert für das Epizentrum des Drahtes erhalten werden kann.

6.1.4.b. Tiefe des Drahtes unter der Firnoberfläche: Zur Bestimmung der Drahttiefe kommen zwei verschiedene Messverfahren in Frage.

Das erste Verfahren besteht darin, dass in den verschiedenen bekannten Epizentrumspunkten des Drahtes je ein Tiefenprofil des Potentials gemessen wird, wobei das Maximum der Potentialkurve in der Tiefe auftritt, in der sich der Draht befindet, sodass die Drahttiefe ohne langwierige Auswertemethode angegeben werden kann.*)

Beim zweiten Messverfahren wird das Potential als Oberflächenprofil in x-Richtung gemessen und die Tiefe sollte sich dabei durch Vergleich der normierten gemessenen Kurve mit einer Modellkurve ergeben.

Messung von Tiefenprofilen: Wie beim Bestimmen der Drahtposition an der Firnoberfläche wird auch hier durch Spannungsmessung die Potentialdifferenz zwischen zwei Punkten gemessen. Der eine Punkt mit Sonde N befindet sich als Referenzpunkt an der Firnoberfläche, während der andere Punkt seine Position verändert, indem Sonde M schrittweise in lotrechter Richtung am Draht vorbeigestossen wird. Die Potentialdifferenz wird gegenüber dem Referenzpunkt alle 10 cm abgelesen. Das in Drahttiefe auftretende Potentialmaximum bezeichnet die lotrechte Tiefe des Drahtes unter der Firnoberfläche, die der Schneehöhe (h_s) in jenem Punkt entspricht.

Das beim Bestimmen der Drahtposition gefundene Epizentrum des Drahtes an der Firnoberfläche liegt aber nicht lotrecht über dem Draht, da die Firnoberfläche eine schiefe Ebene ist. Damit die Sondenspitze von M möglichst nahe am Draht vorbeifährt und dabei das Potentialmaximum kräftig wird, muss der Einstichpunkt der Sonde M im lotrechten Epizentrum liegen. Dieser Einstichpunkt kann anhand der geschätzten Drahttiefe (h) und anhand der mittleren, lokalen Neigung der Firnoberfläche (ψ) gefunden werden: er liegt an der Firnoberfläche in $-x = h \cdot \mathrm{tg}\,\psi$ firnaufwärts vom vermessenen Epizentrum.

Die anfänglich verwendete Tiefensonde bestand aus einer Schneesonde aus Aluminium (Modell AHG, ϕ = 15 mm), wobei nur die 5 cm lange Spitze der Schneesonde elektrischen Kontakt mit der Firnumgebung machte, da der Sondenschaft auf der ganzen Länge mit einem übergezogenen PVC-Schlauch (Wandstärke = 2 mm) isoliert war. Da aber im Laufe der Messungen zwischen der Sondenwand und dem PVC-Schlauch Wasser eindrang, wurde die Polarisationsspannung bald so gross, dass ein Messen unmöglich wurde. Zusätzlich wich die Sonde infolge ihrer Biegsamkeit zu sehr vom Lot ab, sodass diese Sondenart aufgegeben wurde. - Für die weiteren Messungen wurde eine Sondenstange aus Al-Hohlrohr (ϕ = 20 x 16 mm) konstruiert, wobei die punktförmige leitende Cu-Spitze durch ein 1 m- langes, glasfasernverstärktes Kunststoffrohr vom Al-Rohr getrennt war, um die Potentialverteilung am Messpunkt (= Cu-Spitze) nicht zu sehr zu stören. Die Zuführung von der Cu-Spitze zum Voltmeter bestand aus einem isolierten Kabel im Innern des Al-Hohlrohres. Die zweite an der Oberfläche bleibende Sonde war ein Cu-Stab. Sie wurde in einem Abstand von $\pm x$ = 10 - 15 m vom Drahtepizentrum ca. 0.5 m tief in die Firnoberfläche gestossen.

Messung von Oberflächenprofilen: Diese Art von Profilmessung wurde vor allem deshalb ausprobiert, weil das Tiefenprofil-Messverfahren bei tiefer liegenden, sogenannten "mehrjährigen" Drähten nicht mehr angewendet werden konnte. Der Grund liegt darin, dass die tieferen Firnschichten in zunehmendem Masse dicke Eisschichten aufweisen, die ein Einstossen der Tiefensonde verunmöglichen.

Die Potentialverteilung an der Firnoberfläche wurde auch bei diesem Verfahren durch Messen der Spannung zwi-

*) Das Potentialmaximum tritt nicht exakt in der Tiefe des Drahtes auf (Einfluss der Firnoberfläche), wie dies auch die leicht unsymmetrische Kurvenform in Abb. 7 andeutet; bei drahtnahen Tiefenprofilen ist die Verschiebung aber unbedeutend.

schen verschiedenen Punkten gefunden. Als Referenzpunkt, bzw. Nullpunkt des Potentials wurde manchmal das Epizentrum des Drahtes, manchmal auch ein in x-Richtung (Profilrichtung) vom Epizentrum um 30 - 90 m entfernter Punkt gewählt. Die Oberflächenprofilkurve des Potentials wurde dann vom gewählten Nullpunkt aus meistens mit wachsendem Abstand (Δ x) zwischen den beiden Sonden gemessen. In gewissen Fällen wurden auch beide Sonden mit konstantem Abstand, Δ x = 1, 5, 10 m miteinander in Profilrichtung verschoben und die einzelnen, gemessenen Potentialdifferenzen algebraisch addiert. (Da der Potentialabfall beidseits des Drahtepizentrums symmetrisch ist, wurde teilweise auch nur die eine Seite der Profilkurve gemessen).

Die gemessenen Spannungen wurden, falls nicht mit unpolarisierbaren Sonden gearbeitet wurde, um die Störspannungen korrigiert, indem das arithmetische Mittel der positiven und negativen Spannungswerte genommen wurde; der schwankende Stromfluss konnte durch die Quotientenbildung:

$$\frac{\pm\ \bar{U}_{MN}}{\pm\ \bar{I}}$$ ausgeglichen werden.

In der Abb. 8 sind mehrere gemessene Oberflächenprofilkurven dargestellt. Beim Aufzeichnen der Kurven wurde dem jeweiligen Epizentrum der Drähte (x = o) das Potential Null zugeordnet, um die Kurven in einheitlichem Masstab aufzeichnen zu können, zugleich wurde der an der Firnoberfläche mit zunehmendem x gemessene Potentialabfall als Potentialanstieg aufgetragen.

6.1.5. Auswertung von Oberflächenprofilen

Will man mit Hilfe von an der Firnoberfläche gemessenen Potentialkurven die Drahttiefe bestimmen, müssen die gemessenen Kurven mit theoretischen Modellkurven verglichen werden. Dies bedingt, dass die bei der Messung im Firnfeld vorhandene Feldverteilung der theoretisch berechneten Feldverteilung entspricht. Wenn dies zutrifft, kann bei Benützung der vereinfachten Gleichung (11) ein graphisches Verfahren verwendet werden, das sehr ökonomisch ist, da nur eine einzige theoretische Verhältniskurve erstellt werden muss, mit der dann alle gemessenen Kurven verglichen werden können. Die unbekannte Drahttiefe kann beim Kurvenvergleich direkt abgelesen werden.

Da bei der Aufnahme von Oberflächenprofilkurven Spannungen, bzw. Potentialdifferenzen entlang der Messlinie (x-Richtung) gemessen wurden, die auf einen willkürlich gewählten Nullpunkt bezogen sind, müssen die gemessenen Kurven als auch die theoretische Modellkurve auf den gleichen Nullpunkt bezogen werden. Aus praktischen Ueberlegungen liegt dieser Nullpunkt, wie erwähnt, im Epizentrum des Drahtes (x = o). Die gewünschten Potentialdifferenzen werden also erhalten, indem vom Potential in einem beliebigen Punkt das Potential des Epizentrums abgezogen wird. Es ergibt sich:

Potential im Epizentrum, x = o $: \varphi_o = \frac{\varrho \cdot I}{\pi \cdot 2\ell} \cdot \ln \frac{2 \cdot \ell}{h}$ (15)

Potential in $\pm$ x = h $: \varphi_h = \frac{\varrho \cdot I}{\pi \cdot 2\ell} \cdot \ln \frac{2 \cdot \ell}{h \cdot [2]^{\frac{1}{2}}}$ (16)

Potential in beliebiger Entfernung $\pm$ x vom Epizentrum $: \varphi_x = \frac{\varrho \cdot I}{\pi \cdot 2\ell} \cdot \ln \frac{2\ell}{\left[x^2 + h^2\right]^{\frac{1}{2}}}$ (17)

Für die Potentialdifferenzen in beliebigen Punkten x und im Punkt $\pm$ x = h kann man demzufolge schreiben:

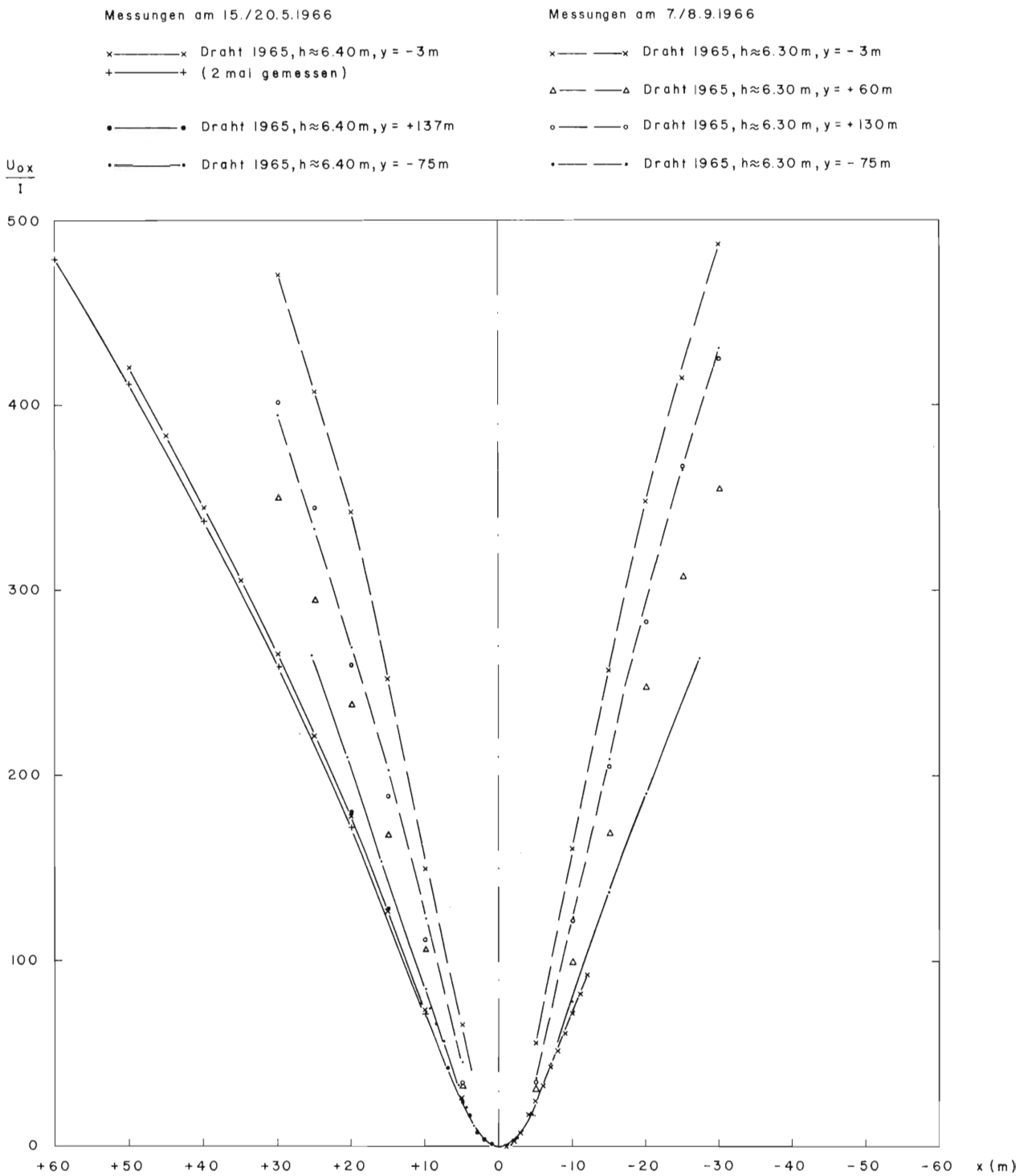

Abb. 8 Gemessene Oberflächenprofilkurven, Draht 1965.

$$U_{ox} = \varphi_x - \varphi_o = \frac{\varrho \cdot I}{\pi \cdot 2\ell} \cdot \ln \frac{h}{\left[(x^2 + h^2)\right]^{\frac{1}{2}}}, \tag{18}$$

$$U_{oh} = \varphi_h - \varphi_o = \frac{\varrho \cdot I}{\pi \cdot 2\ell} \cdot \ln \frac{1}{[2]^{\frac{1}{2}}} \tag{19}$$

Durch Quotientenbildung erhält man das normierte Relativpotential U_{ox}/U_{oh}:

$$\frac{U_{ox}}{U_{oh}} = \frac{\ln\left(\frac{x^2}{h^2} + 1\right)}{\ln 2} \tag{20}$$

Die Verhältniszahl U_{ox}/U_{oh} kann als Funktion von x/h dargestellt werden, wobei ein bilogarithmisches Koordinatensystem gewählt wird, wie dies Abb. 9 darstellt. Die gemessenen Oberflächenprofilkurven $U_{ox} = f(x)$ werden ebenfalls in bilogarithmischem Masstab, und zwar auf Pauspapier, aufgetragen. Die gemessene, aufgezeichnete Kurve wird dann auf die theoretische Verhältniskurvendarstellung gelegt, anhand der Kurvenform eingepasst und solange achsenparallel verschoben, bis sie mit der theoretischen Kurve zur Deckung kommt. In dieser Decklage kann die gesuchte Drahttiefe abgelesen werden. In Abb. 9 ist dieses Vorgehen an einem Beispiel illustriert, wobei als gemessene Kurve eine Oberflächenprofilkurve verwendet wurde, die über dem Draht 1967 im Herbst 1968 (8. 9. 1968) bestimmt wurde, als die Drahttiefe am Messort h = 5.60 m betrug. Wie diese Darstellung zeigt, ist die Kurvenform der gemessenen Kurve von der theoretischen Kurvenform verschieden und als Drahttiefe erhält man demzufolge beim Kurvenvergleich einen unrichtigen Wert von h = 7.5 m. In gleicher Weise wie die genannte

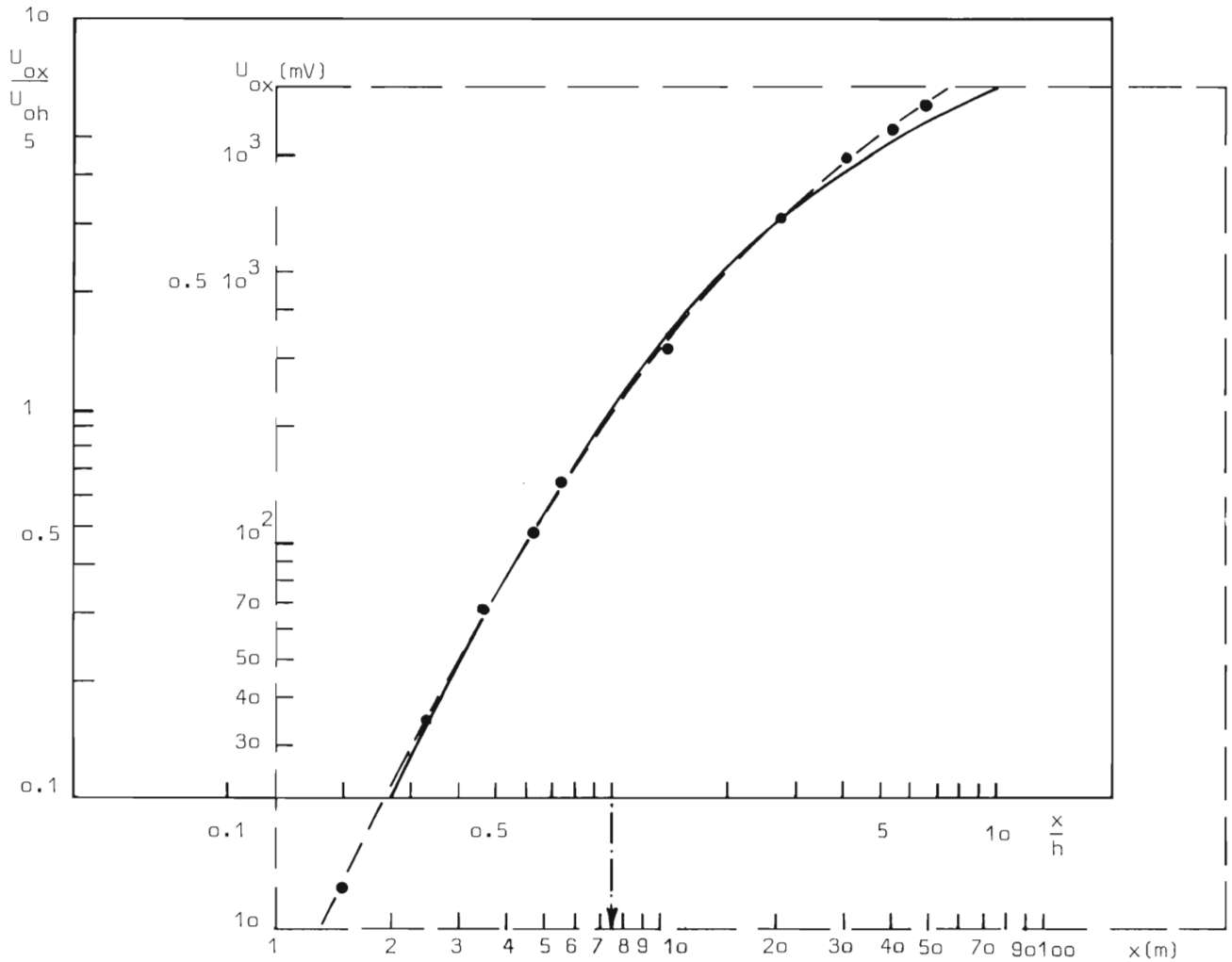

Abb. 9 Logarithmisches Auswerteverfahren für Oberflächenprofilkurven. Ausgezogene Kurve = theoretische Kurve, unterbrochene Kurve = gemessene Kurve; die ermittelte Drahttiefe beträgt 7.6 m.

Messkurve wurden alle andern Messkurven auch mit der theoretischen Modellkurve verglichen und bei fast allen Kurven wurde durch Kurvenvergleich eine zu grosse Drahttiefe erhalten.

Die Drahttiefen können also aufgrund der Form von Oberflächenprofilkurven nicht bestimmt werden, da die Kurvenform der Messkurven zu stark von der theoretischen Kurvenform abweicht. Dieses abweichende Verhalten der Messkurven wird durch Abb. 10 illustriert, wo die theoretische Hilfsfunktion (20) und mehrere gemessene Oberflächenprofilkurven als Verhältniszahlen $U_{ox}/U_{oh} = f(x/h)$ aufgetragen sind. Die Kurven wurden über verschiedenen "ein- und mehrjährigen" Drähten und in verschiedener Entfernung $\pm y$ von der Drahtmitte gemessen. Für die Darstellung der Messkurven in dieser Form ist die Kenntnis der jeweiligen Drahttiefe notwendig. Die Drahttiefen wurden bei "einjährigen" Drähten durch Tiefenprofile bestimmt und bei "mehrjährigen" Drähten anhand der durch Massenbilanzmessungen bekannten, jährlichen Bilanzwerte (b_a) und mit Hilfe der Firn-Dichtekurve von Seligmann und Hughes (1939) als Annäherung berechnet und zur Bildung der Verhältniszahlen x/h benützt. Die gemessenen Verhältniskurven verlaufen am Anfang ähnlich wie die theoretische Verhältniskurve, doch im Gesamten ist die Steigung der gemessenen Verhältniskurven wesentlich grösser als die der theoretischen Kurve. Zu beachten ist weiterhin, dass die im Frühling gemessenen Verhältniskurven noch um einiges steiler ansteigen als die im Herbst gemessenen.

Dieses abweichende Verhalten der gemessenen Kurven kann so interpretiert werden, dass fast der gesamte Strom im Frühling und im Herbst in einer begrenzten, gutleitenden Firnschicht fliesst, wobei dieser Effekt im Frühling noch ausgeprägter ist als im Herbst.

6.1.6. Abhängigkeit des Draht-Potentialfeldes vom spezifischen Widerstand des Firnuntergrundes

Die am Anfang gemachte Annahme, dass der Firnuntergrund homogen und isotrop sei, ist eine zu grobe Annäherung bei der Beschreibung der Leitfähigkeitsverhältnisse im Firnuntergrund. Der spezifische Widerstand müsste aufgrund der vorliegenden Verhältnisse durch ein ganzes System von Gleichungen (Tensoren) beschrieben werden, wodurch allerdings die rechnerische Erfassung des Potentialfeldes sehr schwierig würde.

Um über die verschiedene Form der "Frühlings- und Herbst"-Potentialkurven Aufschluss zu erhalten, wurde sowohl im Frühling wie im Herbst an der gleichen Stelle je ein Widerstandsprofil mit der Wenner-Vierpunktemethode aufgenommen. Die beiden Kurven sind in Abb. 11 im üblichen bilogarithmischen Masstab dargestellt und zeigen sehr schön die verschiedene elektrische Leitfähigkeit der obersten Firnschichten im Frühling und im Herbst. Ohne eine detaillierte Interpretation der Kurven anstreben zu wollen, da eine solche beim 3- und 4-Schichtenfall sowieso mehrdeutig ist, beträgt der mittlere scheinbare spezifische Widerstand ϱs in den obersten Schichten im Frühling $\varrho s \approx 2 \cdot 10^5\ \Omega$ m, während er im Herbst $\varrho s \approx 13 \cdot 10^6\ \Omega$ m beträgt, wobei gilt:

$$\varrho 1 > \varrho s > \varrho 2 \quad \text{falls} \quad \varrho 1 > \varrho 2$$

$$\varrho 1 < \varrho s < \varrho 2 \quad \text{falls} \quad \varrho 1 < \varrho 2.$$

Zusätzlich wurde der spezifische Widerstand noch mit Hilfe der Oberflächen-Profilkurvenwerte, die über dem Draht 1965 gemessen wurden, bestimmt. Dazu wurde die ausführliche Potentialformel (12) nach der Grösse $\varrho = \varrho s$ aufgelöst und ϱs für verschiedene Punktepaare (P_i; P_j) in verschiedenen Oberflächenprofilen errechnet:

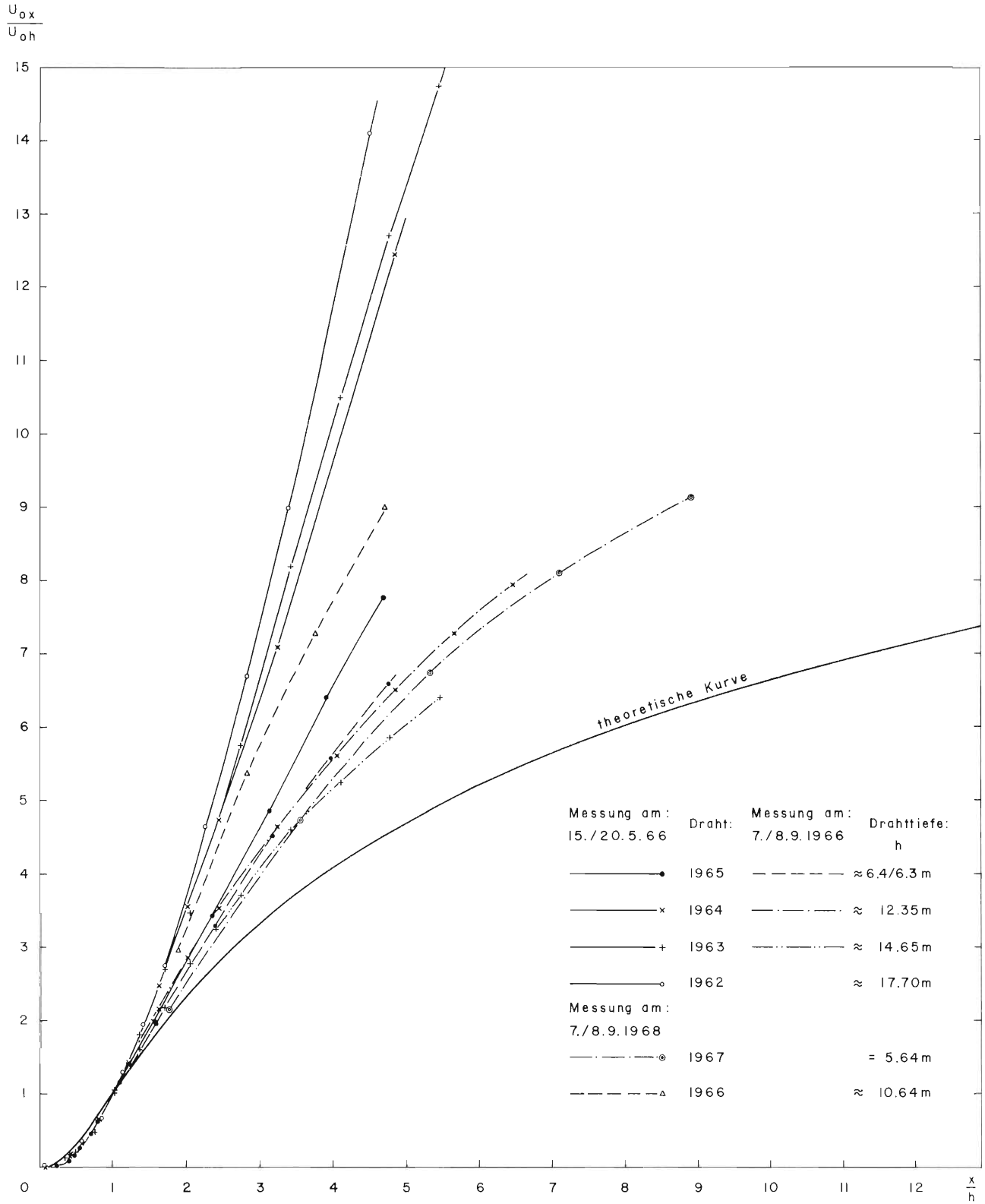

Abb. 10 Gemessene Oberflächenprofilkurven als Verhältniskurven $U_{ox}/U_{oh} = f\,(x/h)$ aufgetragen.

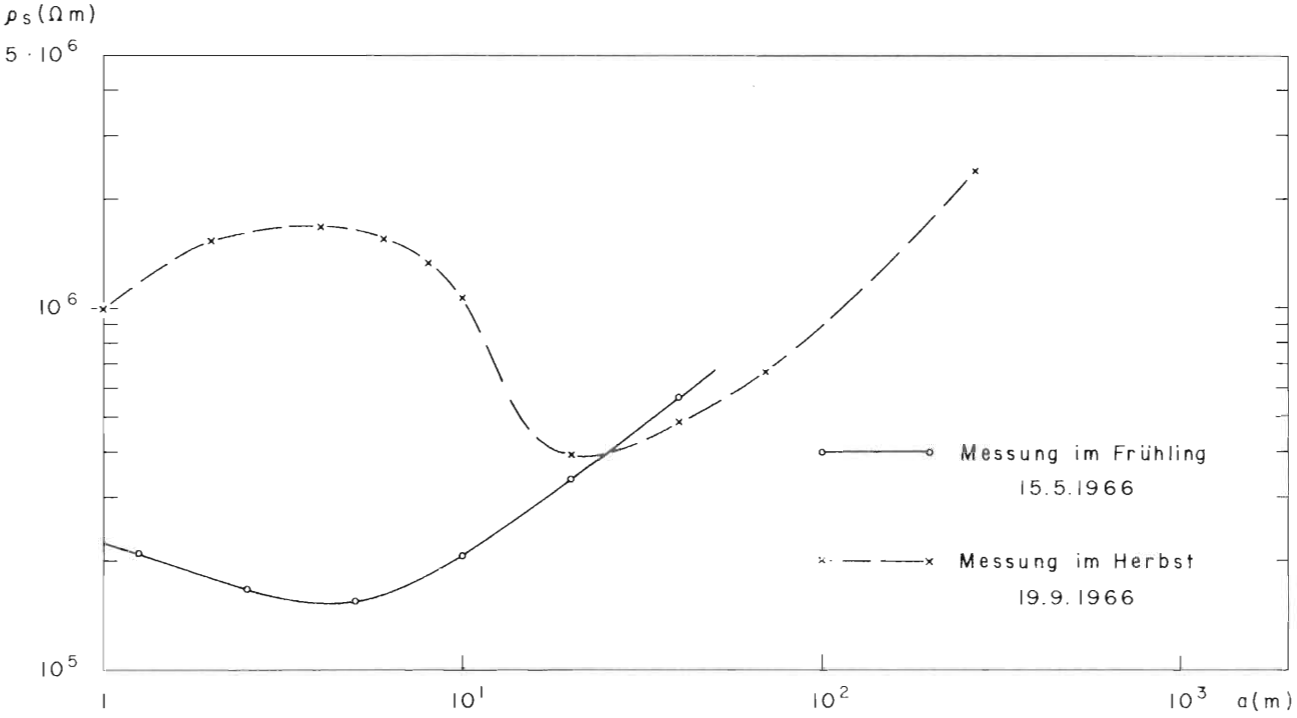

Abb. 11 Zwei Widerstandsprofile, gemessen mit der Wenner-Vierpunktmethode; Profilmitte P 11, Az. 140° E.

$$\varrho_s = 4\pi \cdot \frac{U}{I} \left[\frac{1}{\ell} \ln \frac{\ell - y + \left[r_i^2 + (\ell - y)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{-\ell - y + \left[r_i^2 + (-\ell - y)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} - \left\{ \frac{1}{\left[(b + x_i)^2 + y^2 \right]^{\frac{1}{2}}} + \frac{1}{\left[(b - x_i)^2 + y^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \right\} \right.$$

$$\left. - \frac{1}{\ell} \ln \frac{\ell - y + \left[r_j^2 + (\ell - y)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{-\ell - y + \left[r_j^2 + (-\ell - y)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} + \left\{ \frac{1}{\left[(b + x_j)^2 + y^2 \right]^{\frac{1}{2}}} + \frac{1}{\left[(b - x_j)^2 + y^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \right\} \right] \qquad (21)$$

Resultate:

"Frühlings"-profile: ϱ_s: 1.6 - 2.8 · 10^5 Ω m

"Herbst" -profile: ϱ_s: 5.4 - 9.4 · 10^5 Ω m

Die so erhaltenen Werte stimmen gut mit den Werten überein, die mit der Wenner-Vierpunktmethode für die oberflächennächsten Schichten bestimmt wurden. Der verschiedene Kurvenverlauf der "Frühlings"- und "Herbst"-Oberflächenprofile kann somit nachweisbar auf die verschiedene elektrische Beschaffenheit des Firnuntergrundes im Frühling und Herbst zurückgeführt werden, wobei die gut leitende Firnschicht im Frühling nahe an der Firnoberfläche zu sein scheint (vgl. die Wenner-Profile in Abb. 11 und die aus den Oberflächenprofilkurven errechneten Werte), während sie im Herbst eher tiefer im Firnuntergrund liegt.

6.1.7. Apparatur und Ausrüstung

Ein Schema der Messanordnung zeigt Abb. 6.

Als Spannungsquelle wurden 2 Sätze à 3 Anodenbatterien gebraucht, die wahlweise parallel oder in Serie geschaltet wurden, wobei die Klemmenspannung 150 V, bzw. 300 V betrug.

Die Zuleitung zu den zwei symmetrischen Hilfselektroden (M, N) bestand aus einer doppelt isolierten Kupferlitze, mit 6 Cu-Leitern und einer Stahlseele, wodurch der Draht eine gewisse Zugfestigkeit erhielt. (2 Rollen à ca. 500 m, F = 0.3 mm^2, R = 7 Ω /100 m)

Die Hilfselektroden bestanden aus je 3 Al-Hohlrohren (ø = 2.5 mm, Länge = 1.5 m), die in einem Abstand von 80 cm, in eine Reihe verbunden, 1 m tief in die Firnoberfläche gerammt wurden. Gemäss der genannten Potentialformel für zylindrische Elektroden (11) kann man für den Uebergangswiderstand der Hilfselektroden vom Radius a schreiben:

$$R \approx \frac{\varrho}{2\ell \cdot \pi} \cdot \ln \frac{2\ell}{a},$$ wobei ℓ die mit dem Firnschnee Kontakt machende Länge der Hilfselektrode bezeichnet.

Entsprechend dieser Gleichung sollten die Elektroden möglichst lang und von grossem Durchmesser sein, und der spezifische Widerstand der Umgebung der Hilfselektroden sollte möglichst gering sein. Deshalb wurde meistens in die Hohlrohre und in deren nähere Umgebung NaCl gestreut und hierauf der Firnschnee gut festgetreten.

Zur Bestimmung des fliessenden Stromes wurden zwei verschiedene Ampère-Meter benützt:

- Simson 260 S III, Genauigkeit bei Gleichstrommessungen: ± 3% des Bereich-Endwertes.
- Metrix 202 A, allgemeine Genauigkeit: ± 1.5% des Bereich-Endwertes.

Um die Stromverzweigung, die durch die beidseitigen Hilfselektroden entstand, symmetrisch bezüglich des Markierungsdrahtes zu machen und damit das "Draht"-Feld zentralsymmetrisch, musste auf der Hilfszuleitungs-Seite mit höherem Stromfluss ein Potentiometer (500 K Ω) in Serie geschaltet werden.

Die im Sondenkreis zwischen M und N liegende Spannung U_{MN} wurde mit einem Röhren-Voltmeter mit extrem hohem Eingangswiderstand gemessen ($R_u > 10^{14}$ Ω , parallel 8 μF), sodass eine Störung der Feldverteilung an den Messpunkten ausgeschlossen war. Das verwendete Voltmeter war ein Keithley 200 B, Genauigkeit: ± 2% des jeweiligen Messbereich-Endwertes.

Leider ist dieses Instrument auch sehr empfindlich für statische Ladungen, die ebenfalls Spannungsänderungen verursachen. Da die eine Eingangsklemme mit dem Instrumentengehäuse verbunden ist, wurde das Instrument jeweils auf eine PVC-Platte gestellt, welche ihrerseits noch auf einer PVC-Kiste ruhte, sodass keine Störpotentiale im Messfeld auftreten konnten. Nähere Angaben über das genannte Instrument finden sich bei Meyer und Röthlisberger (1962). Aehnliche Instrumente, die sich bei glaziologischen Untersuchungen ebenfalls bewährt haben, sind von Vögtli (1967) und von Andrieux (1963) beschrieben worden.

Die Zuleitung von den Sonden zum Voltmeter bestand aus dem gleichen Kabeltyp wie die Stromleitung zu den Hilfselektroden.

Als Sonden wurden Elektrolyt-Kupfer-Stäbe benützt, die mit einem Schneeteller versehen waren. Anfänglich wurden auch unpolarisierbare Sondentöpfe gebraucht, die aber ebenfalls eine gewisse Eigenpolarisation zeigten ($\overline{MN}$: 20 m, Polarisation der Töpfe: 10 mV, Polarisation der Cu-Stäbe: 30 - 50 mV). Da einerseits die Polarisation konstant blieb und deshalb für Relativmessungen unwichtig war, andererseits die Grössenordnung der andern

Störpotentiale, hervorgerufen hauptsächlich durch Windeinfluss (Induktions-Spannungen durch Bewegen der Kabel, Aufladung durch bewegte Luft- und Schneeteile) bedeutend grösser war, wurde nach einigen Versuchsmessungen wiederum auf die unpolarisierbaren Sondentöpfe verzichtet.

6.1.8. Genauigkeit und Anwendungsbereich der Gleichstrom-Methode

Die in Abb. 8 dargestellten Oberflächenprofilkurven weisen alle in der näheren Umgebung des Drahtepizentrums eine beachtliche Symmetrie auf und illustrieren damit, dass es möglich ist, aufgrund der symmetrischen Feldverteilung die Drahtposition an der Firnoberfläche zu bestimmen. Kleinere Kurvenunregelmässigkeiten sind auf Geländeunebenheiten und Spannungsschwankungen, die durch Windeinfluss und sprunghaft ändernde Uebergangswiderstände an den Hilfselektroden entstehen, zurückzuführen. Aus diesen Gründen können die Epizentren des "einjährigen" Drahtes (5 - 6 m unter der Firnoberfläche) nur mit einer Genauigkeit von 0.5 m, und jene der tiefer liegenden, "mehrjährigen" Drähte mit einer Genauigkeit von 1 - 2 m gefunden werden.

In Abb. 12 sind einige der gemessenen Tiefenprofile aufgezeichnet. Der Anstieg und Abfall der Potentialkurven ist aus verschiedenen Gründen nicht einheitlich und nicht regelmässig. Bei der Messung von Kurve 1 und 2 wurde zur Messung eine isolierte Schneesonde von der besprochenen Art benützt. Die kontaktmachende Sondenspitze war dabei rund drei mal so lang wie bei der Messung von Kurve 3, wo eine speziell konstruierte Tiefensonde benützt wurde, deren Sondenspitze nahezu punktförmig war. Die verschiedene Form der Kurven lässt sich darauf zurückführen. Im übrigen wird natürlich auch bei Tiefenprofilmessungen das Potential durch den spezifischen Widerstand der Drahtumgebung beeinflusst. Da aber hier, im Gegensatz zur Oberflächenprofil-Messung, nur die Lage des Kurvenmaximums zur Interpretation gebraucht wird, kann diese Tatsache nur in sehr ungünstigen Fällen das Resultat wesentlich beeinflussen.

Die Tiefe des "einjährigen" Drahtes, bzw. die jährliche Schneehöhe (h_s) kann aufgrund der gemessenen Tiefenprofile mit einer Genauigkeit von 20 cm gefunden werden. Die Genauigkeitsangabe beruht auf dem Vergleich mit der genaueren Wechselstromtiefenprofil-Methode, welche später besprochen wird.

Was den Anwendungsbereich der Gleichstrommethode anbetrifft, so kann diese wegen der Notwendigkeit, dass die Drähte möglichst einer Geraden folgen, und weil die Firnoberfläche als Messebene benützt wird, nur auf relativ grossen, gleichmässig geneigten Firnfeldern angewandt werden.

Da weiterhin die Messungen nur bei schönem, windstillem Wetter ausgeführt werden können und da das unkontrollierbare Verhalten des spezifischen Widerstandes die Interpretation von gemessenen Potentialkurven ganz allgemein erschwert, wird der Anwendungsbereich der Gleichstrommethode relativ klein. Die Methode ist deshalb für genaue Schneehöhenmessungen nicht sehr geeignet.

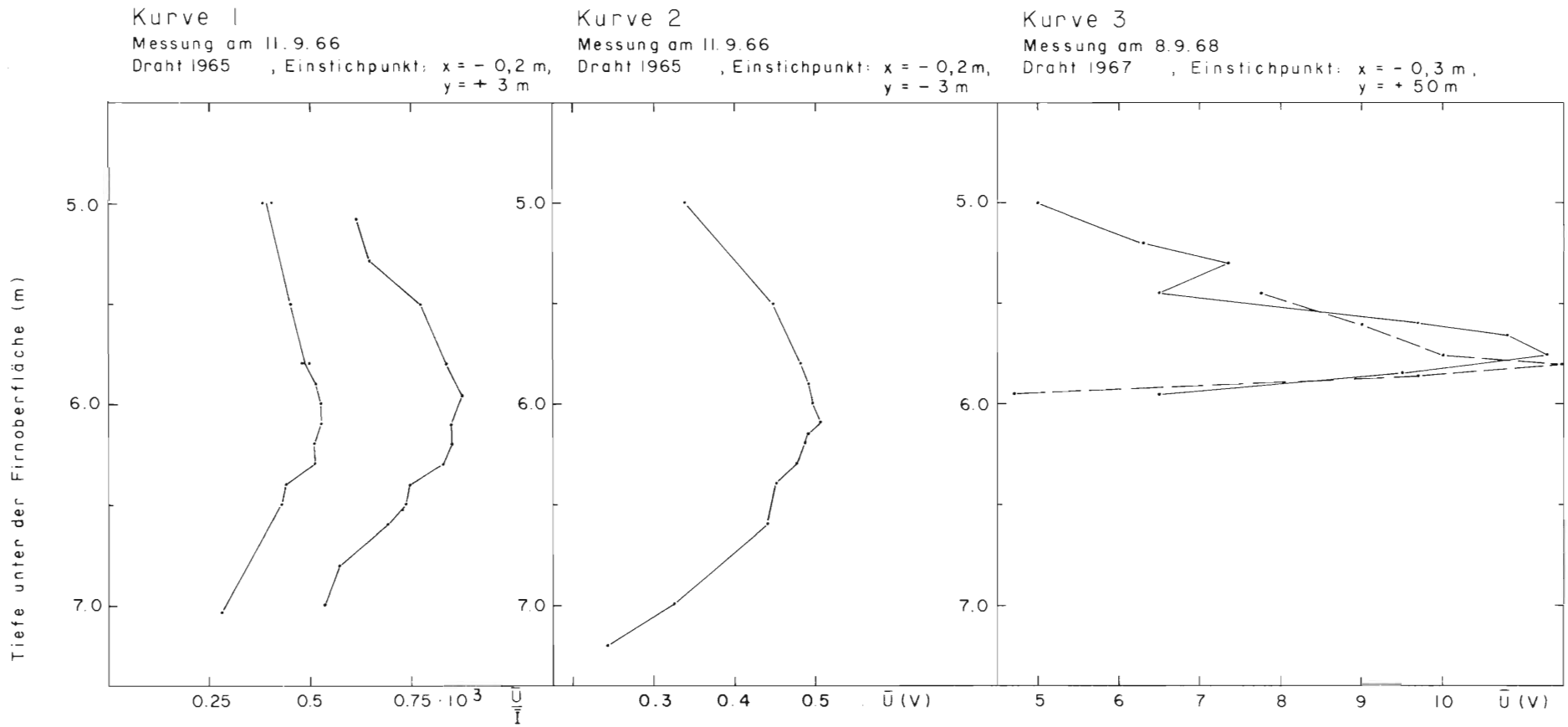

Abb. 12 Gemessene Tiefenprofile, Draht 1965 bzw. 1967, Drahttiefen = 6.00 - 6.10 m, bzw. 5.80 m.

6.2. SCHNEEHOEHENMESSUNG MIT HILFE VON DRAEHTEN BEI BENUETZUNG VON WECHSELSTROM

6.2.1. Einleitung

Die hier zur Sprache kommende Wechselstrommethode soll, wie schon die Gleichstrommethode, von der Firnoberfläche aus die Bestimmung der Lage von Drähten erlauben, die im Firnuntergrund liegen.

Drähte, die von einem Wechselstrom durchflossen werden, sind von einem elektromagnetischen Feld umgeben, das sich in der näheren Umgebung des Drahtes nur dann einfach berechnen lässt, wenn die Drähte gerade und sehr lang sind und wenn die Drahtumgebung in Bezug auf die dielektrischen und magnetischen Eigenschaften homogen und isotrop ist. Aus diesem Grunde gilt auch bei der Wechselstrommethode die Bedingung, dass möglichst lange, gerade Drähte quer zum Firnbecken ausgelegt werden. Da im übrigen vor allem die magnetischen Eigenschaften des Firnuntergrundes als homogen und isotrop angesehen werden können, ($\mu_{Eis} \approx \mu_{Schnee} \approx 1$) wird mit Vorteil das magnetische Feld zur Bestimmung des Drahtes benützt.

Die Wechselstrommethode weist somit den wesentlichsten Nachteil der Gleichstrommethode, welche stark vom variablen elektrischen Widerstand ϱ abhängig ist, nur noch geringfügig auf. Ein messtechnischer Vorteil ergibt sich aufgrund der Induktionswirkung von Wechselstrom. Der Kontakt mit der Firnoberfläche muss bei der Messung nicht mehr hergestellt werden, sodass vorhandene Unregelmässigkeiten in der Firnoberflächenform die Messung nicht mehr beeinflussen. Die Wechselstrommethode hat leider auch Nachteile, indem hier die zur Speisung nötigen Zuleitungen dem gesuchten magnetischen Feld des Drahtes Störfelder überlagern, deren Einfluss messtechnisch eliminiert oder in Rechnung gezogen werden muss.

Für die Erprobung der Wechselstrommethode waren verschiedene Messeinrichtungen und Instrumente nötig, die nicht in der gewünschten Ausführung käuflich waren. Die Entwicklung und der Bau der entsprechenden Instrumente konnten aber nicht im Rahmen der vorliegenden Arbeit ausgeführt werden, weshalb mit dem Institut für Fernmeldetechnik an der ETH (Leitung: Prof. Dr. H. Weber) zusammengearbeitet wurde. Fräulein M. Caflisch, Assistentin am genannten Institut, entwickelte und baute die fehlenden Instrumente und führte die damit verbundenen leitungstheoretischen Berechnungen und Abschätzungen durch. Ausserdem half sie bei der Festlegung der Mess- und Auswerteverfahren mit, wofür ich ihr an dieser Stelle herzlich danken möchte.

6.2.2. Technische Grundlagen

Im Bilanzjahr 1966/67, als die ersten Versuchsmessungen mit Wechselstrom durchgeführt wurden, waren für die Wechselstromversuche nur blanke Cu-Drähte, die bei der Gleichstrommethode als Linearelektroden dienten, im Firnuntergrund vorhanden.

Eine einseitige Speisung dieser Drähte als Linearelektroden mit niederfrequentem Wechselstrom kann nicht in Frage, da die Rückleitungsverhältnisse im Firnschnee aufgrund der bei der Gleichstrommethode gemachten Erfahrungen zu unübersichtlich wären (geschichteter Leiter, Skineffekte) und weil diese Speisung leistungsmässig schwer zu realisieren wäre. Aus den gleichen Gründen schien auch eine einseitige Speisung mit hochfrequentem Wechselstrom (Drähte als Dipolantennen) und dessen Abstrahlung unratsam.

Der Draht 1966 war bei der Auslage im Herbst 1966 vorsorglicherweise an beiden Enden entlang einer Pegelstange in die Höhe geführt worden, sodass bei der Messung der Stromkreis mit Hilfe von Zuleitungen an der Firnoberfläche geschlossen werden konnte. Dadurch traten aber Störfelder (magnetische Felder der Zuleitungen) in Erscheinung, die durch eine symmetrische Auslage der Zuleitungen einigermassen eliminiert wurden, wie dies Abb. 13 darstellt.

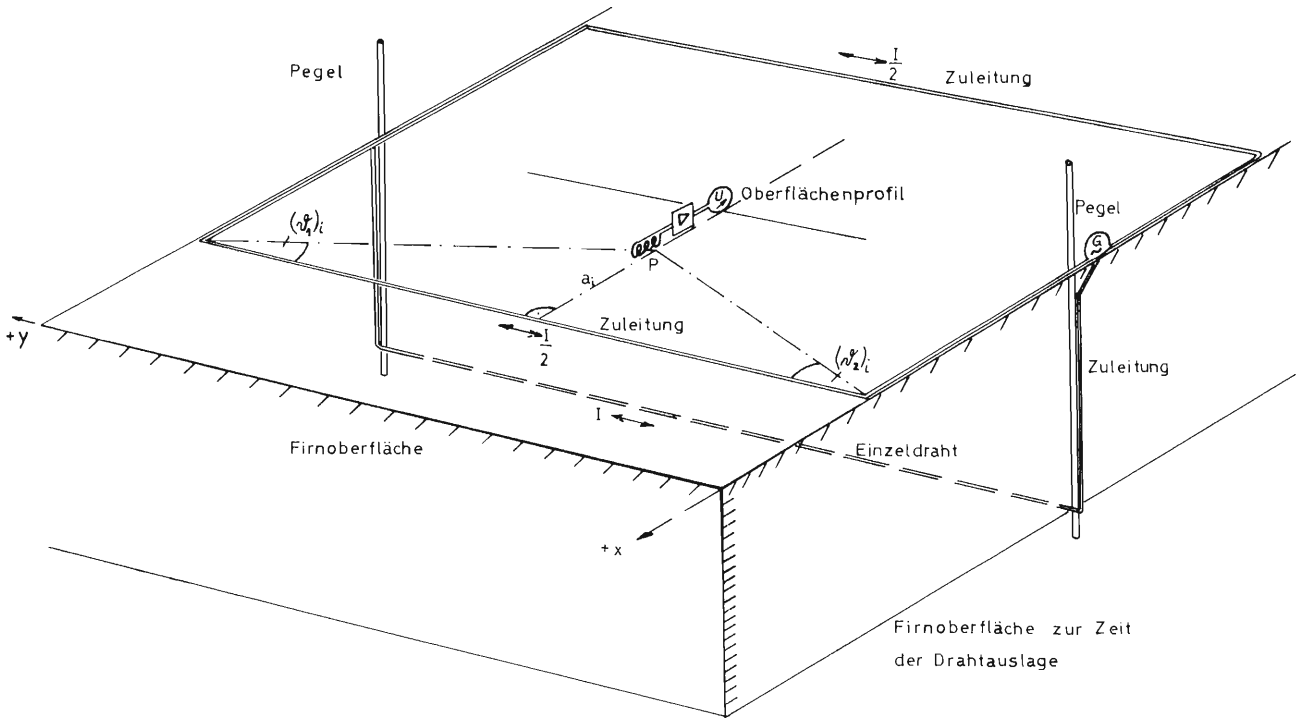

Abb. 13 Messanordnung zur Bestimmung der Position und Tiefe eines linearen, eingeschneiten Einzeldrahtes mit Hilfe von Wechselstrom.

Um den Einfluss von Zuleitungsfeldern auszuschalten und gleichzeitig den Arbeitsaufwand für das Auslegen von Zuleitungen an der Firnoberfläche zu vermeiden, wurde zu Beginn des Bilanzjahres 1967/68 die Firnoberfläche mit zwei parallelen Drähten markiert. Die beiden Drähte bestanden wiederum aus blanker Cu-Litze und wurden quer zum Firnbecken in einem gegenseitigen Abstand von 1.5 m ausgelegt. Dabei wurden beide Drähte an beiden Enden mit Hilfe von Pegelstangen in die Höhe geführt, um jeden Draht für sich allein auch als Linearelektrode für Gleichstromversuche benützen zu können. Beim Arbeiten mit Wechselstrom konnten dann die Drahtenden an der Firnoberfläche auf der einen Seite verbunden werden (geschlossener Stromkreis), auf der andern Seite wurde der Wechselstromgenerator angeschlossen. Im Bilanzjahr 1968/69 wurde die gleiche Drahtauslage benützt wie im Jahr 1967/68, doch betrug diesmal der Abstand zwischen den beiden parallelen Drähten 2 m.

Für das Bilanzjahr 1969/70 wurde dann die gesamte Drahtauslage nur noch für die Wechselstrommethode ausgelegt, indem die beiden parallel laufenden Drähte durch eine sehr lang gestreckte, isolierte Rechteckschleife ersetzt wurden. Durch das Auslegen einer Rechteckschleife müssen die Drahtenden nicht mehr einzeln an je einer Pegelstange in die Höhe geführt werden, sondern es genügt eine Pegelstange in der Mitte der Auslage, wie dies Abb. 14a darstellt. Die Drähte wurden isoliert, weil leitungstheoretische Abschätzungen die Möglichkeit offen liessen, dass bei Benützung von blanken Drähten der Ableitstrom Werte in der gleichen Grössenordnung wie der Leitungsstrom annehmen könnte, wodurch die Feldverteilung unübersichtlich würde.

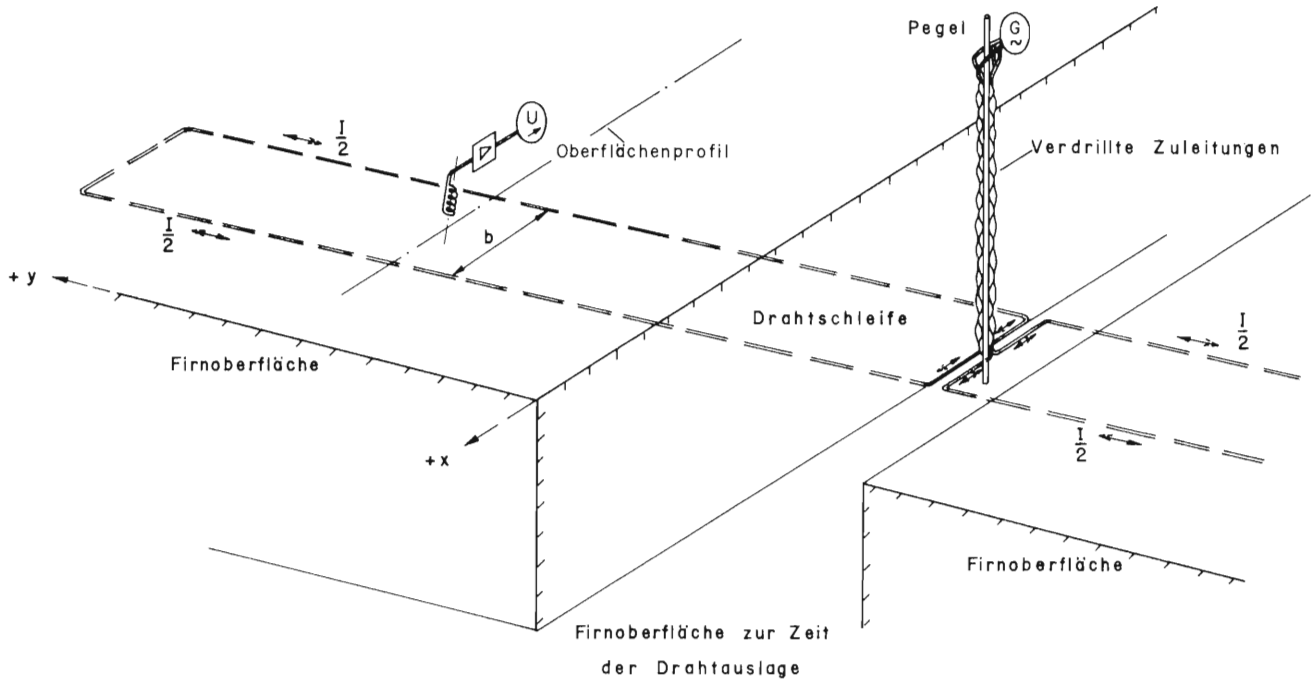

Abb. 14a Messanordnung zur Bestimmung der Position und Tiefe einer langgestreckten Rechteck-Drahtschleife mit Hilfe von Wechselstrom.

6.2.3. Theoretische Grundlagen

Eine vollständige theoretische Begründung und die Beschreibung aller auftretenden Wechselstromeffekte ist im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, da letztlich die Feldverteilung in komplexer Weise sowohl von den zeitlich und örtlich variierenden Firnschneeparametern als auch von den benützten Drahtlängen und der Frequenz abhängt. Für die theoretische Berechnung der Feldverteilung und die praktische Anwendung der Methode wurden deshalb gewisse vereinfachende Annahmen gemacht, deren Berechtigung sich im Laufe der Untersuchung erwies.

Eine Wechselstromquelle bestimmter Frequenz und Stromstärke, die an den geschlossenen Drahtleiter angeschlossen wird, erzeugt im Draht einen Stromfluss und in der Umgebung ein elektromagnetisches Wechselfeld, das durch die erste Maxwell-Gleichung beschrieben werden kann,

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{j} + \varepsilon_o \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \tag{22}$$

wobei $\vec{H}$ das Magnetfeld, $\vec{j}$ den Stromfluss im Leiter, ε_o die Dielektrizitätskonstante und $\vec{E}$ das elektrische Feld in der Leiterumgebung bezeichnet. Da man mit einem geschlossenen Stromkreis arbeitet, kann der Verschiebungsstrom $\partial\vec{E}/\partial t$ gegenüber dem Leitungsstrom in erster Annäherung vernachlässigt werden, d.h. man setzt quasistationäre Verhältnisse voraus und berücksichtigt weder Phasenverschiebungen, noch Wirbelstrom- und Ableitverluste. Das vom Leitungsstrom herrührende magnetische Feld in einem beliebigen Punkte (P) an der Firnoberfläche lässt sich gemäss dem Elementargesetz von Laplace schreiben:

$$\vec{H}\,(P) = \frac{I}{4\pi} \int_{\text{Leiter}} \frac{\left[\vec{d\ell}, \vec{r}\right]}{r^3} \tag{23}$$

wobei I die Stromstärke im Leiter, $d\ell$ ein Linienelement des Leiters (ℓ = Drahtlänge) und r den Abstand eines Messpunktes (P) vom Linienelement $d\ell$ bezeichnen.

Magnetfeld des geraden, ∞ - langen Einzeldrahtes: Die Integration von Gleichung (23) ergibt für die Feldstärke in der Umgebung eines geraden, ∞ - langen Einzeldrahtes die einfache Beziehung:

$$|\vec{H}| \quad (P) = H\,(P) = \frac{I}{2\pi \cdot a} \tag{24}$$

H = magnetische Feldstärke, a = Senkrechtabstand des Messpunktes P vom unendlich langen Drahtleiter.

Die ausgelegten Drähte sind zwar nicht unendlich lang, doch solange sich die Messpunkte nicht an den Drahtenden befinden und der Senkrechtabstand vom Draht nicht gross ist ($a \ll \ell$), beschreibt diese Gleichung auch die Feldverteilung um begrenzte Drähte.

Wenn das gleiche rechtwinklige Koordinatensystem benützt wird, das schon bei der Beschreibung der Gleichstrommethode angewendet wurde (vgl. Abb. 5) lässt sich Gleichung (24) durch x und h ausdrücken:

$$H\,(P) = \frac{I}{2\pi} \cdot \frac{1}{\left[h^2 + x^2\right]^{\frac{1}{2}}} \tag{25}$$

Im ersten Versuchsjahr 1966/67 stand, wie in Abschnitt 6.2.2. erwähnt, nur ein geradliniger, begrenzter Einzeldraht zu Messzwecken zur Verfügung, weshalb hier kurz die theoretischen Möglichkeiten einer Einzeldrahtvermessung besprochen werden sollen.

Wenn im Firnuntergrund ein an beiden Enden an die Firnoberfläche geführter Einzeldraht vorhanden ist, muss der Stromkreis durch Zuleitungen geschlossen werden. Um die Störfelder der Zuleitungen einigermassen zu kompensieren, wird eine symmetrische Anordnung der Zuleitungen in Form eines langgestreckten Rechtecks gewählt, wie dies Abb. 13 zeigte. Unter der Voraussetzung, dass die Firnoberfläche in dem durch die Zuleitungen begrenzten Rechteck als Ebene betrachtet werden kann, die Stromstärke beider Zuleitungsstränge gleich gross ist und die Messung in derselben Ebene vorgenommen wird, werden die x- Komponenten dieser magnetischen Rechteck-Zuleitungsfelder ($\vec{H}'_x$) null. Beachtet man dabei gleichzeitig die Forderung, dass die Messung nicht zu nahe an den Drahtenden vorgenommen wird, so kann an der Firnoberfläche die Feldstärke der ungestörten x-Komponente des Drahtfeldes, die mit H_x bezeichnet wird, gemessen werden:

$$H_x\,(P) = \frac{I}{2\pi} \cdot \frac{h}{h^2 + x^2} \tag{26}$$

Falls man für x verschiedene Werte vorgibt, beschreibt diese Gleichung eine Oberflächenprofilkurve von H_x, welche in x = o ihr Maximum aufweist. Mit Hilfe der Halbwertsbreite (d) der Kurve (das ist die Distanz zweier symmetrischer Profilpunkte für die gilt: $H_x = \frac{1}{2} \cdot H_{x(max)}$), kann die Drahttiefe h berechnet werden, wobei $h = \frac{d}{2}$ beträgt. Durch das Ausmessen von solchen Profilkurven an der Firnoberfläche besteht also die Möglichkeit, sowohl die Position, bzw. das Epizentrum des Drahtes in einem Firnoberflächenpunkt, als auch die Tiefe des Drahtes in diesem Punkt zu bestimmen.

Oberflächenprofilkurven der Feldstärke H oder der Komponente H_z könnten aufgrund ihrer Symmetrie wohl zur Bestimmung des Drahtepizentrums benützt werden (Maximum, bzw. Nulldurchgang = Minimumstelle), doch sind die Absolutbeträge der Felder in beliebigen Profilpunkten durch die Zuleitungsfelder verfälscht, sodass die Kurven nicht zur Bestimmung der Drahttiefe benützt werden können. Prinzipiell bestünde die Möglichkeit, die einzel-

nen Störfelder für jeden Messpunkt zu berechnen, indem die einzelnen Störfeldbeträge mit Hilfe einer Formel von Fritsch (1960) berechnet würden und von der gesuchten Feldstärke des Drahtleiters subtrahiert würden. So könnte man für die H_z-Komponenten in einem Oberflächenprofilpunkt schreiben (vgl. Abb. 13):

$$H_z(P) - H_z'(P) = \frac{I}{2\pi}\left\{\frac{x}{h^2 + x^2} - \sum_{i=1}^{n}\left[\frac{1}{2\,a_i}\left(\cos(\vartheta_1)_i + \cos(\vartheta_2)_i\right)\right]\right\} \tag{27}$$

wobei H_z' die z- Komponenten der Störfeldstärken, a_i der jeweilige senkrechte Abstand eines geradlinigen Zuleitungs-Teilstückes vom Punkt P, und $(\vartheta_1)_i$ und $(\vartheta_2)_i$ die vom Zuleitungs-Teilstück und der Verbindungslinie zu P einbeschriebenen Winkel sind.

Solche Berechnungen haben aber eher theoretischen als praktischen Wert, da sich aufgrund dieser korrigierten Gleichung keine einfache Beziehung für die Drahttiefe h finden lässt, wie dies bei Gleichung (26) der Fall ist.

Die Messung der z- Komponente der Feldstärke (H_z) ist insofern nützlich, als bei Oberflächenprofilmessungen der Null-Durchgang der H_z-Kurve im Epizentrum des Drahtes (x = o) messtechnisch viel genauer bestimmt werden kann als die Maximumstellen von H und H_x.

Magnetisches Feld des Doppeldrahtes: Durch das Auslegen von zwei parallelen Drähten, bzw. einer langgestreckten Draht-Rechteckschleife zu Beginn des Bilanzjahres, wie dies Abb. 14a zeigt, kann man bei der Messung das Auslegen von symmetrischen Zuleitungsdrähten und damit die magnetischen Störfelder an der Firnoberfläche vermeiden.

Zur theoretischen Berechnung des magnetischen Gesamtfeldes der beiden parallelen Drähte werden dieselben vereinfachenden Annahmen gemacht wie bei der Berechnung des Magnetfeldes des Einzeldrahtes. Der Nullpunkt des benützten Koordinatensystems befindet sich senkrecht über der Drahtebene (jene Ebene, die durch die beiden Drähte im Firnuntergrund bestimmt wird), in der Mitte der beiden Drähte und liegt nun aus messtechnischen Gründen nicht mehr in der Firnoberfläche, sondern in einer gewählten Messebene über der Firnoberfläche. Diese x, y-Messebene wird bei der Messung parallel zur Drahtebene gelegt. Der Senkrecht-Abstand der beiden Drähte von der Messebene wird dabei mit h' bezeichnet, im Gegensatz zum Senkrechtabstand von der Firnoberfläche h. Die als Ebene betrachtete Firnoberfläche kann, muss aber nicht parallel zur Messebene liegen.

Die magnetischen Felder der beiden parallel laufenden Drähte werden vektoriell addiert und ergeben das Gesamtfeld ($\vec{H}_\Sigma$) (vgl. Abb. 14b).

$$\vec{H}_1(P) = \frac{I}{2\pi}\left(\frac{-(x+\frac{b}{2})}{(x+\frac{b}{2})^2 + h'^2},\ o,\ \frac{-h'}{(x+\frac{b}{2})^2 + h'^2}\right)$$

$$\vec{H}_2(P) = \frac{I}{2\pi}\left(\frac{x-\frac{b}{2}}{(x-\frac{b}{2})^2 + h'^2},\ o,\ \frac{h'}{(x-\frac{b}{2})^2 + h'^2}\right)$$

$$\left|\vec{H}_\Sigma\right| = H_\Sigma = \left|\vec{H}_1 + \vec{H}_2\right| = \frac{I \cdot b}{2\pi} \cdot \left[\frac{1}{\left[(x+\frac{b}{2})^2 + h'^2\right]\left[(x-\frac{b}{2})^2 + h'^2\right]}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{28}$$

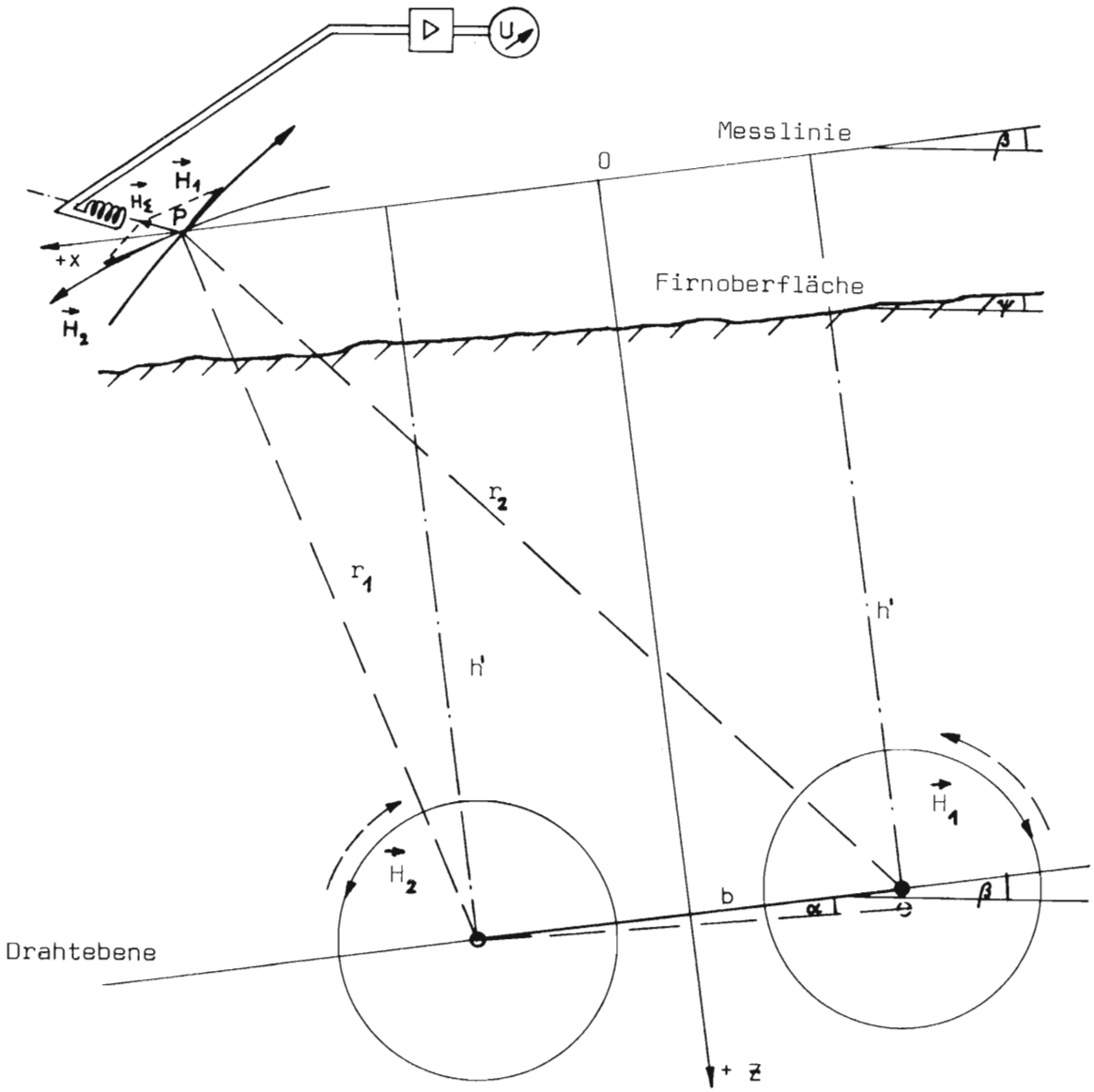

Abb. 14b x, z-Querschnittsebene, Darstellung der geometrischen Messverhältnisse und entsprechende Messanordnung beim Messen einer Oberflächenprofilkurve.

Die Form der Oberflächenprofilkurven hängt vom Verhältnis b/h' ab. Die Kurven weisen in x = o eine Extremstelle auf, wobei diese Extremstelle ein absolutes Maximum ist, falls gilt: $b : h' \leqq 2 : 1$. Wird das Verhältnis b/h' grösser, dann weisen die Oberflächenprofilkurven 2 Maxima auf, wobei das dazwischenliegende, relative Minimum der Kurve die Mitte der beiden Drähte (x = o) markiert. Die Kurvenform von H_Σ in Funktion der verschiedenen Verhältnisse b/h' ist in Abb. 15 dargestellt, wobei die Kurven mit der Annahme berechnet wurden, dass die Stromstärke konstant 1 Amp beträgt und der Drahtabstand in allen Fällen konstant bleibt.

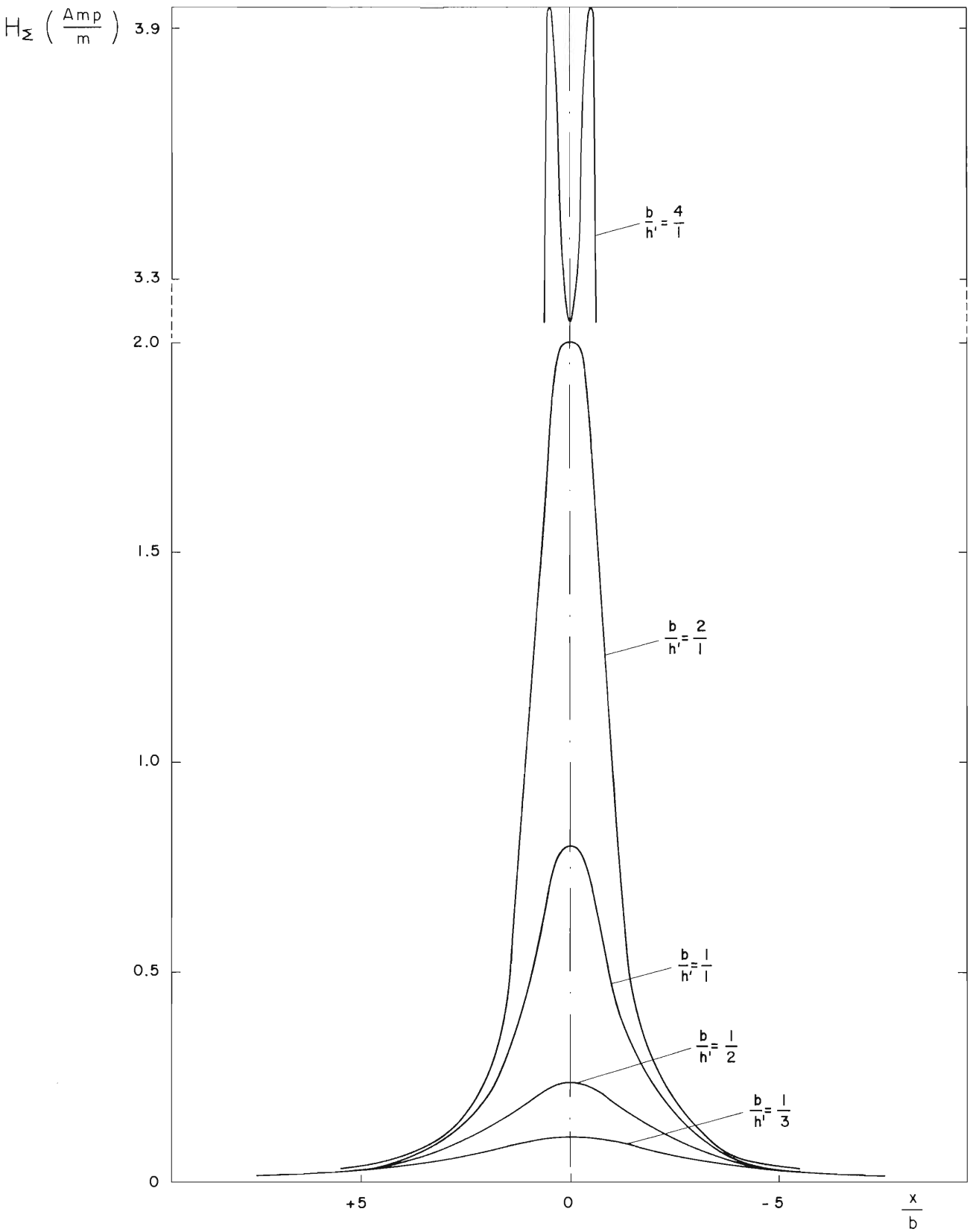

Abb. 15 Oberflächenprofil-Kurvenform in Funktion der Verhältniszahl b/h' (b = konst).

6.2.4. Messverfahren

6.2.4.a. Messung von Oberflächenprofilen: Bei der Aufnahme einer Oberflächenprofilkurve von H_Σ liegen die Messpunkte entsprechend dem vorgegebenen Koordinatensystem auf der Schnittlinie (= Messlinie), die durch die x, z-Ebene und die senkrecht darauf stehende x, y-Messebene definiert wird. Da bei der Wechselstrommethode kein Kontakt mit dem Firn nötig ist, kann eine fiktive Messebene über der Firnoberfläche benützt werden, sodass deren unregelmässige Form die Messungen nicht mehr beeinflussen kann. Aus Bequemlichkeitsgründen wurde die Messebene rund 1 m über der Firnoberfläche mit Hilfe einer gespannten Schnur festgelegt.

Die Messeinrichtung besteht aus einer Induktionsspule, die durch ein Koaxialkabel mit einem selektiven Verstärker und einem Voltmeter verbunden ist. Zur Messung einer Oberflächenprofilkurve wird die Induktionsspule in einer x, z-Ebene auf der Höhe der Messlinie verschoben, wobei die in der Spule induzierte Spannung je nach vorgegebener Neigung der Spulenachse der Feldstärke H_Σ oder den Teilkomponenten $H_{\Sigma\ x}$, $H_{\Sigma\ z}$ proportional

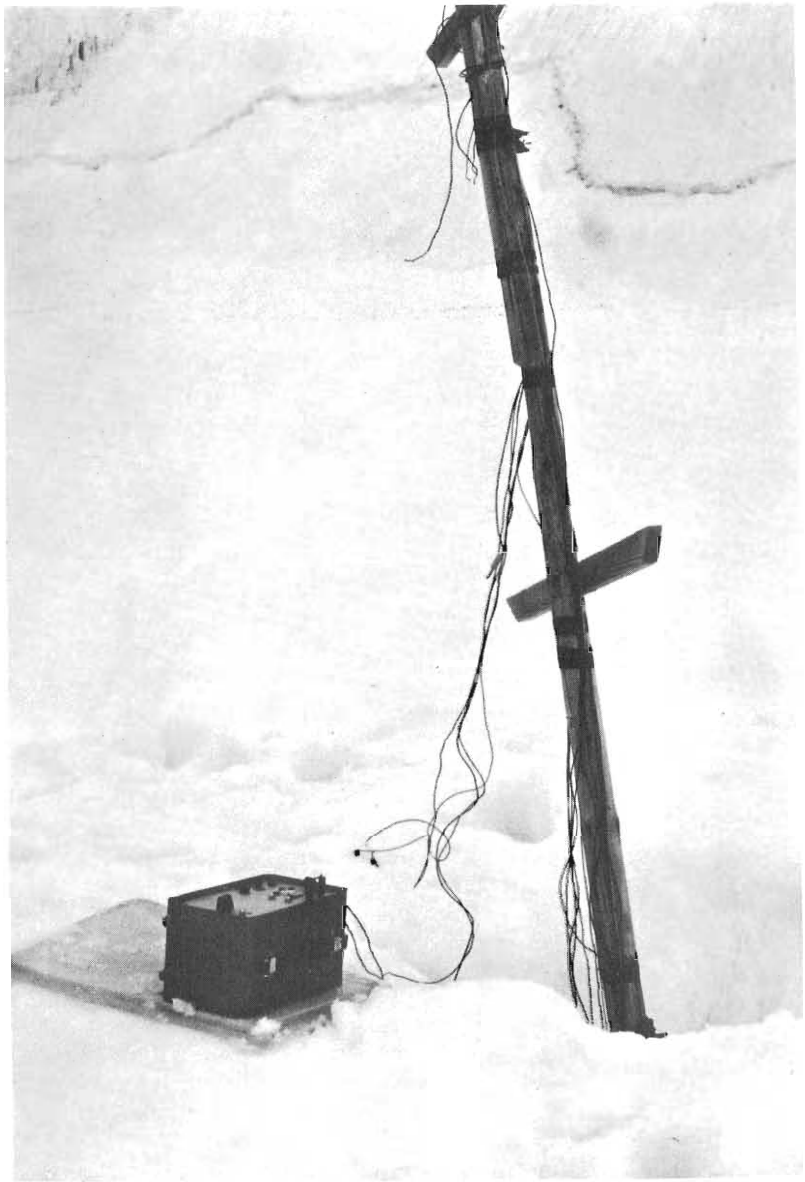

Abb. 16 Wechselstrom-Speisegerät, das an die Zuführungsdrähte, die an der Pegelstange in die Höhe geführt werden, angeschlossen wird. Gut sichtbarer Schmelztrichter um die Pegelstange. Photo P. Föhn.

ist. Durch das Auftragen der gemessenen Werte in Funktion von $\pm$ x entstehen die entsprechenden Oberflächenprofilkurven.

Im Lauf der Untersuchungen erwies sich die Messung des Gesamtfeldes H_{Σ} als am einfachsten und wirkungsvollsten, wobei die Spulenachse an jedem Messpunkt in Höhe der Messlinie und in Richtung des Feldvektors H_{Σ} gehalten wird. Diese Richtung muss in jedem Messpunkt gesucht werden, indem die Spulenachse zuerst in der x, z-Ebene und anschliessend in einer Ebene senkrecht dazu gedreht wird, bis die am Messinstrument ablesbare Spannung ein Maximum erreicht. Die Spule kann dabei von Hand gehalten werden, da sich eventuelle Neigungsänderungen der Spule während der Ablesung auf dem Instrument sofort bemerkbar machen.

Das benützte Messvorgehen soll hier für ein Querprofil von H_{Σ} in seiner zeitlichen Abfolge kurz dargelegt werden:

- Das Speisegerät wird an die Drahtschleife angeschlossen (vgl. Abb. 16), wobei die beste Anpassung über verschiedene Ausgänge mit Hilfe eines geräteinternen Potentiometers und eines zusätzlich mitgeführten Ampèremeters gesucht wird.
- Die empfangsseitigen Geräte werden auf optimalen Empfang abgestimmt.
- Die Messlinie wird zu Beginn der Messung parallel über der mittleren, lokalen Firnoberfläche und senkrecht zur Drahtrichtung festgelegt (durch Spannen einer Schnur in x-Richtung).
- Ueber der vermutlichen Mitte der beiden parallelen Drähte und entlang der Messlinie wird das Maximum (Minimum) von H_{Σ} und damit die Mitte der Drähte, x = o bestimmt. Wenn das Verhältnis b : h $\geqq m \approx 4$ ist, (Mitte = Minimum, vgl. Abb. 15) kann dies direkt durch Messung von H_{Σ} geschehen, falls dieses Verhältnis kleiner ist, kann die Mitte der Drähte durch Messen von H_{Σ_x} im fraglichen Bereich besser bestimmt werden, da H_{Σ_x} in der Mitte der beiden Drähte durch Null geht (sog. Minimum).
- Hierauf wird an einigen Profilpunkten ($\pm$ x$\approx$h') H_{Σ} bestimmt, um festzustellen, ob die Profilkurve von H_{Σ} symmetrisch bezüglich ihres Maximums (Minimums) abfällt. Ist dies nicht der Fall, so wird die Messlinie (gespannte Schnur) auf der einen Seite des Oberflächenprofiles gehoben oder gesenkt und anschliessend wiederum gemessen, bis man symmetrische Werte bezüglich des Maximums erhält. Durch dieses Vorgehen kann erreicht werden, dass die Messlinie bzw. die Messebene an der Firnoberfläche parallel zur Drahtebene liegt.
- Anschliessend wird die endgültige Oberflächenprofilkurve von H_{Σ} entlang der Messlinie gemessen, indem alle 1 - 2 m eine Messung gemacht wird. Die Messungen sollten sich beidseitig von x = o über den Bereich 0.1 - 0.9 $H_{\Sigma_{max}}$ erstrecken.

Der Aufwand für das Suchen von symmetrischen Oberflächenprofilkurven ist deshalb angezeigt, weil die lokale Drahtebene im Firnuntergrund eine leicht andere Neigung aufweisen kann, als die lokale Firnoberfläche bzw. die anfänglich parallel darüber gelegte Messebene. Wenn aber die beiden Ebenen bei der Messung einen Winkel (α) einschlössen, würde die Oberflächenprofilkurve von H_{Σ} unsymmetrisch und Gleichung (28) würde durch zwei zusätzliche Unbekannte (Lage des Kurvenmaximums und α) belastet, was die gesamte Auswertung viel komplizierter machen würde.

Um in jedem Messpunkt auch die Richtung des Feldvektors H_{Σ} bezüglich der Messlinie ablesen zu können, und damit eine zusätzliche Grösse zur Bestimmung der Neigung der Drahtebene zu erhalten, wurde die Spule versuchsweise auf einer Spulenhalterung (mit Kreisteilung) mit Hilfe einer Spulenschablone drehbar befestigt. Die Spulenhalterung wurde auf eine Bodenplatte aus Holz montiert und die Bodenplatte wurde auf die Firnoberfläche gelegt und entlang der Messlinie verschoben.

Schon die ersten Versuchsmessungen zeigten aber, dass mit der genannten Anordnung die Messtellung der Spule

nicht im gewünschten Masse konstant gehalten und somit auch die Richtung des Feldvektors H_{Σ} nicht genau abgelesen werden konnte. Dies ist auf den Umstand zurückzuführen, dass die Spulenhalterung auf der Firnoberfläche auflag. Diese Firnoberfläche ist aber leider kein stabiler Auflagehorizont, wie dies z.B. der feste Boden wäre. Sobald die Spule auf der Schablone gedreht, bzw. darauf festgeschraubt wurde, wirkten geringe Druckkräfte auf die Bodenplatte und damit auf die Firnoberfläche, sodass sich die Firnoberfläche und damit die Messtellung der Spule veränderte. Aus diesem Grunde wurde wiederum auf eine Spulenhalterung verzichtet.

6.2.4.b. Messung von Tiefenprofilen: Wenn die Richtung der Drähte (y-Richtung) entweder durch Messen von H_{Σ} -Oberflächenprofilen oder durch das Bestimmen des H_{Σ_x}-Minimums über der Mitte der Drähte bekannt ist, kann in den Epizentren der beiden parallelen Drähte ($\pm$ x = b/2) ein Tiefenprofil des magnetischen Feldes gemessen werden.

Dabei wird eine Al-Stange (Tiefensonde), in deren Spitze sich eine kleine Induktionsspule befindet, so in den Firnuntergrund gestossen, dass die Spule möglichst nahe an einem der beiden Drähte vorgeigleitet. In der vermutlichen Drahttiefe wird die Tiefensonde schrittweise um 5 cm verschoben und die induzierte Spannung wird abgelesen. Durch Aufzeichnen der Werte in Funktion der Tiefe unter der Firnoberfläche entsteht eine Tiefenprofilkurve des magnetischen Feldes, deren scharfes Maximum je nachdem ob der Abstich in z-Richtung oder lotrecht geschieht, die Drahttiefe h' oder die lotrechte Drahttiefe $h_{\perp} = h'/\cos\beta$ markiert. β ist jener Winkel in der x, z-Ebene, den die Tiefensonde beim Abstich in z-Richtung gegenüber dem Lot aufweist. Da aber ein Abstich in z-Richtung, also unter einem gewissen Winkel, schwierig auszuführen ist, und überdies die Schneehöhe immer lotrecht gemessen wird, wurden die Tiefenprofile lotrecht gemessen. Aus geometrischen Ueberlegungen folgt, dass der Einstichpunkt in diesem Fall nicht im Epizentrum der Drähte gewählt werden kann, sondern in einer Entfernung von $-x = h' \cdot tg\beta$ firnaufwärts (=lotrechtes Epizentrum) liegen muss. Die lotrechte Tiefe des Drahtes unter der Messebene ($h'_{\perp}$) entspricht der gesuchten Schneehöhe (h_s), falls man von ihr noch den lotrechten Abstand der Messebene zur Firnoberfläche in Abzug bringt.

In Abb. 17 sind drei Tiefenprofile aufgezeichnet, wobei die zwei scharfen Maxima-Kurven durch lotrechte Abstiche in den lotrechten Epizentren der beiden parallelen Drähte 1968 und das flache Maximum durch lotrechten Abstich in der Mitte der beiden Drähte erhalten wurden. Abb. 18 zeigt vier Tiefenprofile (Einzeldraht 1967) mit den entsprechenden Einstichpunkten, die zeigen, wie stark die Steilheit der Maxima-Kurven und damit die Genauigkeit der Schneehöhenmessung von der Lage des Einstichpunktes auf der Messebene abhängt. Die Einstichpunkte der Tiefensonde wurden in diesem Fall bewusst nicht ins lotrechte Epizentrum des Drahtes gerückt, um den Einfluss der Verschiebung $\pm$ x des Einstichpunktes beobachten zu können. Wie zu erwarten war, weisen die Tiefenprofilkurven mit den Einstichpunkten -x = 20,30 cm die grössten Maxima auf, da sich das berechnete lotrechte Epizentrum bei einer Tiefe von ca. 6 m und einem Winkel β von 2 - 3° in $-x \approx 25$ cm befindet.

6.2.5. Auswerteverfahren

Das magnetische Feld $\vec{H}_{\Sigma}$, das zwei parallele, sich in + und -y-Richtung erstreckende Drahtleiter umgibt, ist durch Betrag und Richtung in einem einzigen vertikalen Querschnitt parallel zur x, z-Ebene gegeben, falls man von Randeffekten absieht. Oberflächenprofilkurven von H_{Σ}, die in gewissen Abständen über der Draht-Rechteckschleife gemessen wurden, können deshalb relativ einfach durch Vergleich mit allgemein gültigen Modellkurven interpretiert werden. Da als Messwerte nicht die Feldstärken H_{Σ} entlang der Messlinie vorliegen, sondern Spannungswerte, die den Feldstärken proportional sind, werden Relativwerte $H_{\Sigma}/H_{\Sigma\,max}$ gebildet. Solche Relativwerte sind nicht mehr von der Stromstärke und damit von der Ausgangsleistung des Speisegerätes abhängig. - Dass die induzierten Spannungswerte stark vom Stromfluss in den Drähten, welcher von der gewählten Anpassungsstufe, der Batterie-Spannung und bis zu einem gewissen Grade auch von der Temperatur und den Firnschneeparametern abhängig ist, beeinflusst werden, zeigt Abb. 19. Hier sind neun über dem Doppeldraht 1968

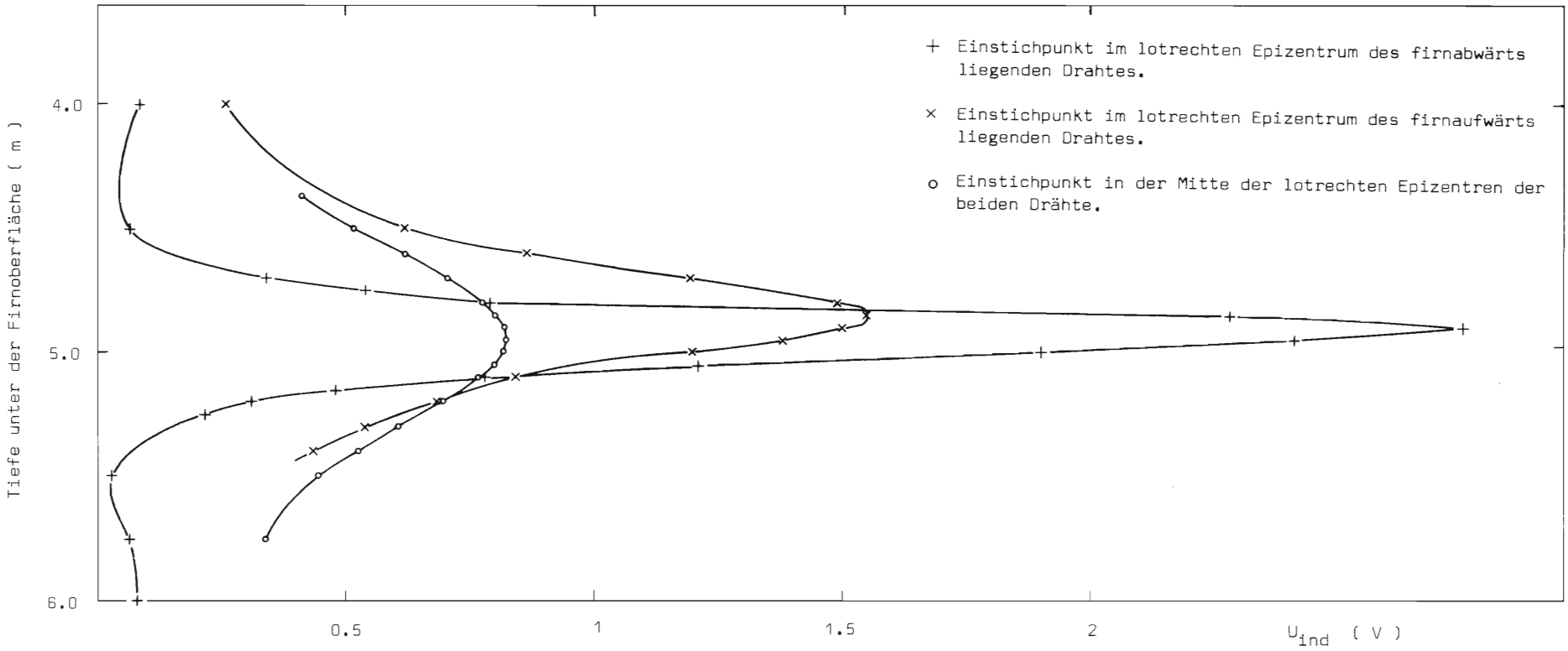

Abb. 17 Tiefenprofile, Doppeldraht 1968; lotrechte Drahttiefen unter der Firnoberfläche = 4.90 m.

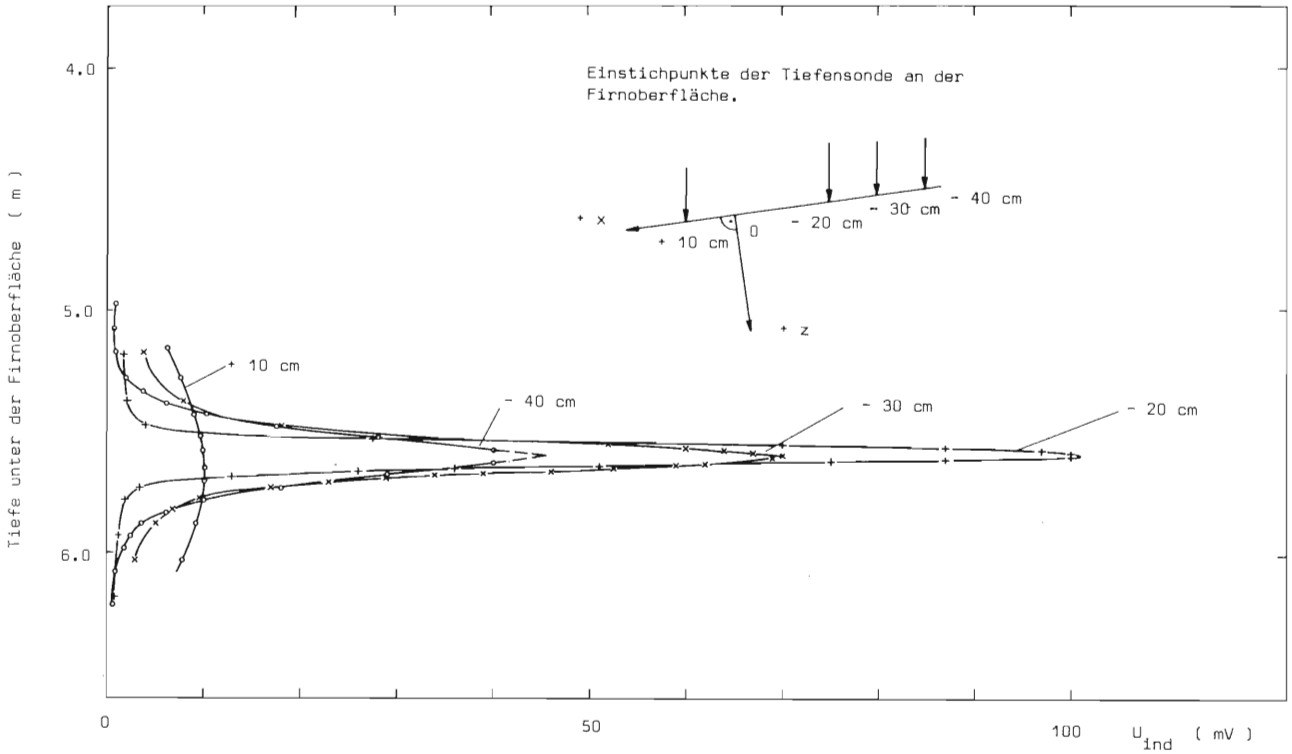

Abb. 18 Tiefenprofile, Einzeldraht 1967; lotrechte Drahttiefen unter der Firnoberfläche = 5.60 m.

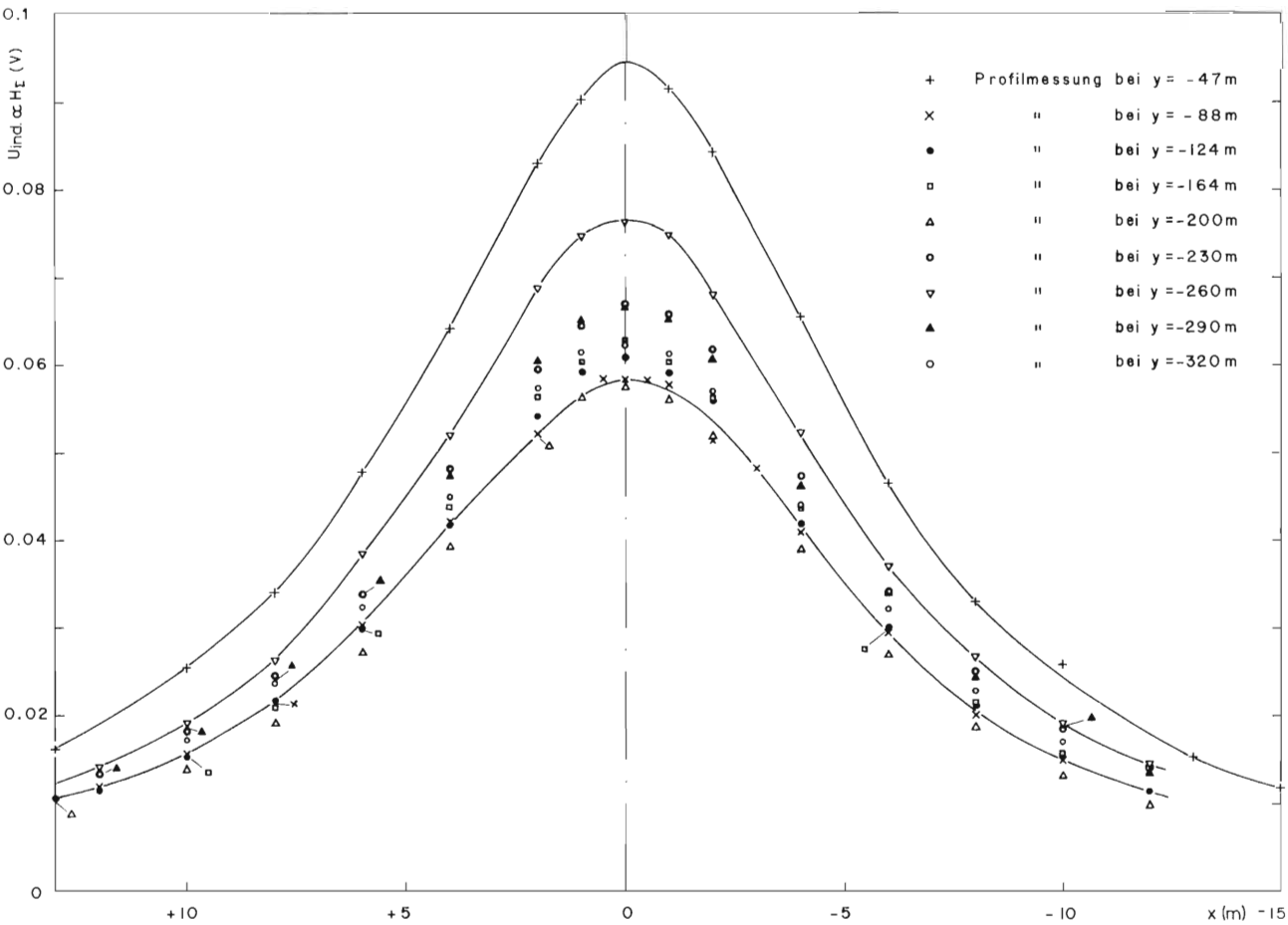

Abb. 19 Oberflächenprofilkurven, gemessen in verschiedener Entfernung von der Drahtmitte über dem Doppeldraht 1968.

gemessene Oberflächenprofilkurven dargestellt, die die Variation der gemessenen Spannungswerte gut sichtbar machen (die Drahttiefen h' an den verschiedenen Messorten in y-Richtung unterscheiden sich wenig, liegen alle im Bereich h' = 5.5 - 6.1 m und kommen als Erklärung für die grosse Variation nicht in Frage).

Die für die Interpretation nötigen Modellkurven werden aufgrund von Gleichung (28) ebenfalls als Relativkurven berechnet:

$$H_{\Sigma\,rel} = \frac{H_{\Sigma}}{H_{\Sigma\,max}} = \frac{\left[\dfrac{1}{\left[(x+\frac{b}{2})^2 + h'^2\right]\left[(x-\frac{b}{2})^2 + h'^2\right]}\right]^{\frac{1}{2}}}{\left[\dfrac{1}{(h'^2 + \frac{b^2}{4})^2}\right]^{\frac{1}{2}}}$$

$$H_{\Sigma\,rel} = \frac{h'^2 + \frac{b^2}{4}}{\left[(x+\frac{b}{2})^2 + h'^2\right]\left[(x-\frac{b}{2})^2 + h'^2\right]^{\frac{1}{2}}} \qquad (29)$$

Die Relativwerte $H_{\Sigma\,rel}$ sind gemäss Gleichung (29) von x, h' und b abhängig. Da der Drahtabstand b bei der Auslage vorgegeben wurde und deshalb annähernd bekannt ist ($\pm$ 5%), und da die Schneehöhe mindestens grössenordnungsmässig aufgrund der Pegel-Schneehöhe oder der Firnverdichtung bekannt ist, müssen die relativen Modellkurven nur für einen beschränkten Bereich von h' und b gerechnet werden. Wenn sich die gemessene, normierte Kurve durch eine der normierten Modellkurven zur Deckung bringen lässt, entspricht die Drahttiefe an der Stelle, wo die Oberflächenprofilkurve gemessen wurde, der vorgegebenen Drahttiefe der Modellkurve. Dieses graphische Vorgehen wird durch Abb. 20 illustriert, wo eine gemessene normierte Oberflächenprofilkurve und die entsprechenden benachbarten Modellkurven dargestellt sind.

Die Auswertung der gemessenen Oberflächenprofilkurven kann auch rein rechnerisch mit Hilfe eines entsprechenden Computer-Programms durchgeführt werden, indem durch Einlesen von zwei gemessenen und normierten Wertepaaren $(H_{\Sigma\,rel})_i$, x_i;$(H_{\Sigma\,rel})_j$, x_j, ein nicht lineares Gleichungssystem für die Unbekannten h' und b gebildet wird. Durch Umformen lässt sich die Beziehung $h'^2 = f(\frac{b}{2})^2$ finden. Jedes eingelesene Wertepaar beschreibt gemäss dieser Beziehung eine Kurve, wobei sich diese Kurven bei 100%-iger Messgenauigkeit alle im gleichen Punkt schneiden würden. Das Programm berechnet den Schnittpunkt von je zwei Kurven, mittelt die verschiedenen resultierenden h' und b und liefert so einen Mittelwert für die unbekannte Tiefe h' und den Abstand b. Da die Schnitte bezüglich b sehr schleifend sind, d.h. die Steigung der Kurven (dh'/db) im fraglichen Gebiet klein ist, liefert das Programm nur für den Mittelwert von h', nicht aber von b, brauchbare Werte. Dies bedeutet aber gleichzeitig, dass die Kurvenwerte durch geringfügige Aenderungen des Drahtabstandes nur wenig beeinflusst werden, eine Tatsache, die in diesem Zusammenhang erwähnenswert ist.

Wesentlich komplizierter würde die Auswertung von gemessenen Oberflächenprofilkurven, wenn die Messebene bei der Messung nicht parallel der Drahtebene läge ($\alpha \neq o$). Die Auswertung müsste in diesem Fall durch iterative Auflösung eines nichtlinearen Gleichungssystems von 4 Unbekannten (h', b, α, Lage des Kurvenmaximums) geschehen und wäre sehr langwierig. Das im Abschnitt "Messverfahren" beschriebene Suchen einer der Drahtebene parallelen Messebene ist somit eine wesentliche Voraussetzung für die einfache Anwendung der Methode.

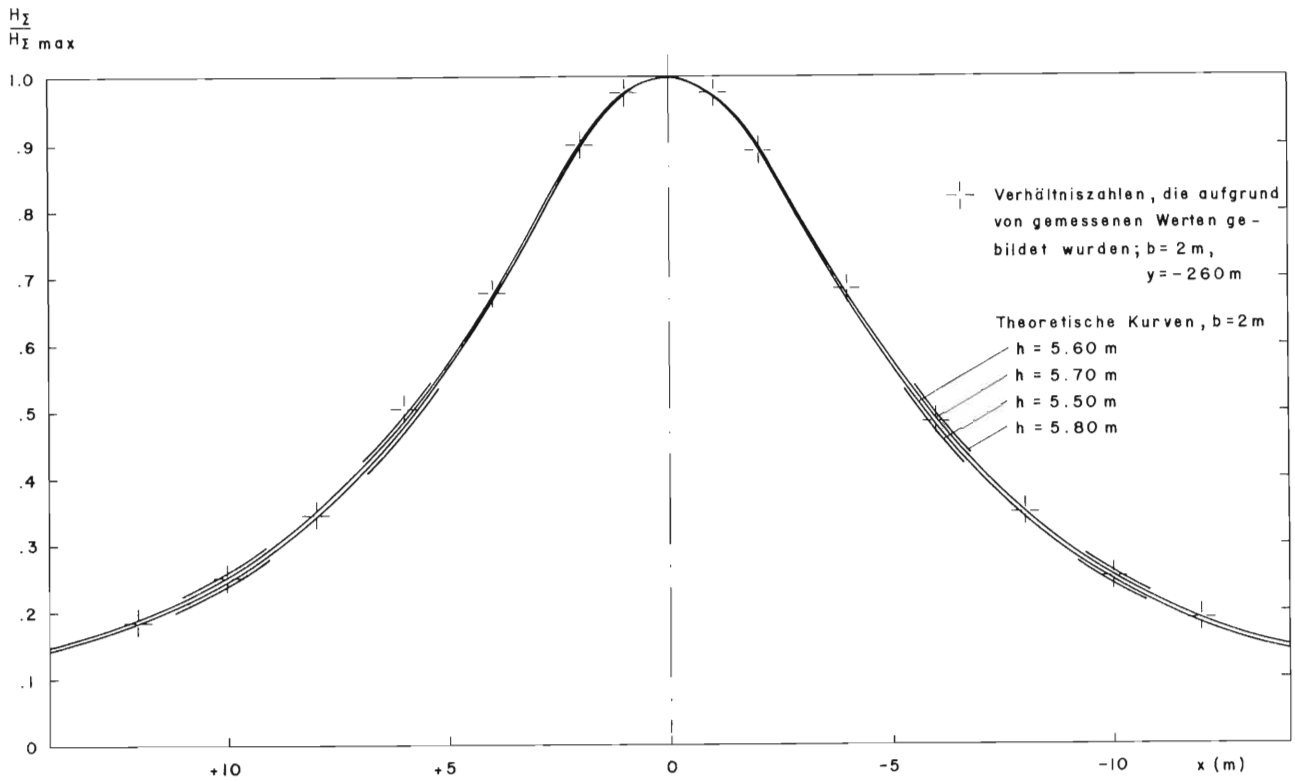

Abb. 20 Graphischer Vergleich zwischen einer gemessenen Oberflächenprofilkurve und den benachbarten theoretischen Kurven.

6.2.6. Apparaturen und Ausrüstung

Zur Messung der magnetischen Feldverteilung an der Firnoberfläche über der Drahtschleife benötigt man folgende Instrumente: Ein Wechselstrom-Speisegerät zur Erzeugung des Stromflusses in der Drahtschleife; eine Induktionsspule (grosse Suchspule), in der das magnetische Feld des Drahtstromes eine messbare Spannung induzieren kann; einen Verstärker, der die induzierte Spannung selektiv verstärkt und ein Wechselstrom-Voltmeter, an dem die Spannung abgelesen werden kann. Zusätzlich braucht man zum Abstecken der Profilmesslinie und zum Befestigen der Messlinien-Schnur 2 Vermessungsjalons.

Beim Messen eines Tiefenprofiles wird die gleiche elektrische Ausrüstung benötigt mit dem Unterschied, dass hier die grosse Suchspule durch eine kleine Spule ersetzt wird, die sich im Spitzenstück der Tiefensonde befindet. - Die Tiefensonde bestand aus 2 m langen Al-Rohrstücken (ø = 20 x 16 mm), die auf beliebige Gesamtlängen zusammengeschraubt werden konnten. Das Spitzenstück der Sonde bestand aus einem 1 m langen Kunstharz-Rohrstück (Kunstharz mit Fiberglas, ø = 20 x 15 mm), in dem die kleine Spule befestigt war. Dieses Material wurde deshalb gewählt, weil es den Feldlinienverlauf am Messort nicht beeinflusst. Dieses Spitzenstück der Tiefensonde wurde den Al-Rohrstücken aufgeschraubt, und das Koaxialkabel, das die Spule mit dem Verstärker verband, konnte im Innern der Rohre an die Firnoberfläche geführt werden.

6.2.6.a. Wechselstrom-Speisegeräte: Anfänglich wurden verschiedene Speisegeräte mit variabler Frequenz und Leistung benützt, um auf experimenteller Basis die geeignete Frequenz und Leistung abschätzen zu können. Von der Abteilung für Forschung und Versuche, PTT, im Speziellen von Dr. Vögtli, konnten leihweise verschiedene Geräte für Versuchsmessungen beschafft werden. Für sein Entgegenkommen möchte ich hiemit Dr. Vögtli gebührend danken.

Bei diesen Versuchsmessungen wurde ein transistorisierter 10 W-Tonsender mit einer Frequenz von 1350 Hz, der durch einen Pb-Akkumulator von 6 V gespiesen wurde, sowie ein kleiner durch Trockenbatterien gespiesener 0.25 W-Tonsender mit variabler Frequenz (800 - 8000 Hz) ausprobiert. Mit Hilfe dieser Geräte und dem entsprechenden Zubehör (Suchspule, Verstärker, Voltmeter) konnten wertvolle Hinweise bezüglich Messtechnik und Dimensionierung von geeigneten Instrumenten gewonnen werden.

Für den Bau der geeigneten Instrumentierung wurde, wie schon eingangs erwähnt, die Hilfe des Institutes für Fernmeldetechnik, ETH, beansprucht. Die Anforderungen für ein geeignetes Speisegerät waren ziemlich einschneidend, sollte doch dieses einerseits die verschieden langen Drähte (Ausgangsanpassung) mit einem möglichst stabilen, ausreichenden Strom versorgen, wobei die gewählte Frequenz möglichst geringe Verluste und Nebeneffekte garantieren sollte; andererseits musste das Gerät mit Trockenbatterien betrieben werden können, damit es klein und handlich blieb.

Die geeignete Frequenz wurde durch die geometrischen Abmessungen der Drahtschleifen, die dielektrischen Eigenschaften des Firnschnees und die Forderung, dass das elektromagnetische Wechselfeld noch als quasistationär betrachtet werden kann, festgelegt.

Was die geometrischen Abmessungen der Drahtschleife anbetrifft, durfte die Frequenz nicht zu hoch sein, um Phasenfehler infolge Reflexion und Brechung zu vermeiden. Die obere Begrenzung für die Frequenz (f) ergibt sich aus:

$$\lambda \gg b, h' \qquad (b, h' \leq 50 \text{ m})$$

$$f \ll \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{\varepsilon'_{Eis}} \cdot \lambda} \qquad (\varepsilon'_{Eis} \leq 80)$$

$$f_{max} \approx 0.6 \text{ MHz}$$

Die dielektrischen Verluste können nach Kuroiwa (1962) abgeschätzt werden. Schnee ist ein gemischtes, polares Dielektrikum, und die Verluste variieren je nach Feuchtigkeit, Temperatur, Raumgewicht und Reinheit des Schnees. Gemäss den Messungen von Kuroiwa sind die dielektrischen Verluste, falls die Leiterumgebung aus kompaktem, unreinem Schnee besteht (= Firnschnee), bei rund 10 KHz am kleinsten. Die Frequenz des Speisegerätes wurde deshalb auf 10 KHz festgelegt.

Aufgrund der Empfindlichkeit der Messinstrumente (Suchspulen, Verstärker, Voltmeter) wurde der minimal nötige Stromfluss in der Drahtschleife berechnet, wobei eine maximale Drahttiefe h' von 50 m, ein minimaler Drahtabstand b von 2 m und eine Eingangsimpedanz der Leitung Z_L von 10^2 - $10^3\,\Omega$ angenommen wurde. Für die Erzeugung der minimal nötigen Stromstärke von I = 30 mA kommen bei den genannten Verhältnissen zwei Anordnungen in Betracht: Ein Sinus-Oszillator mit komplementärer Gegentaktstufe und ein Multivibrator, der Rechteckimpulse erzeugt. Da der Wirkungsgrad eines Multivibrators mit Ausgangstransformator nur geringfügig besser als der eines Oszillators mit komplementärer Gegentaktstufe mit Eingangs- und Ausgangstransformator ist, hingegen der Oszillator frequenzstabiler gebaut werden kann, wurde ein Oszillator gebaut, wie ihn Abb. 21 darstellt.

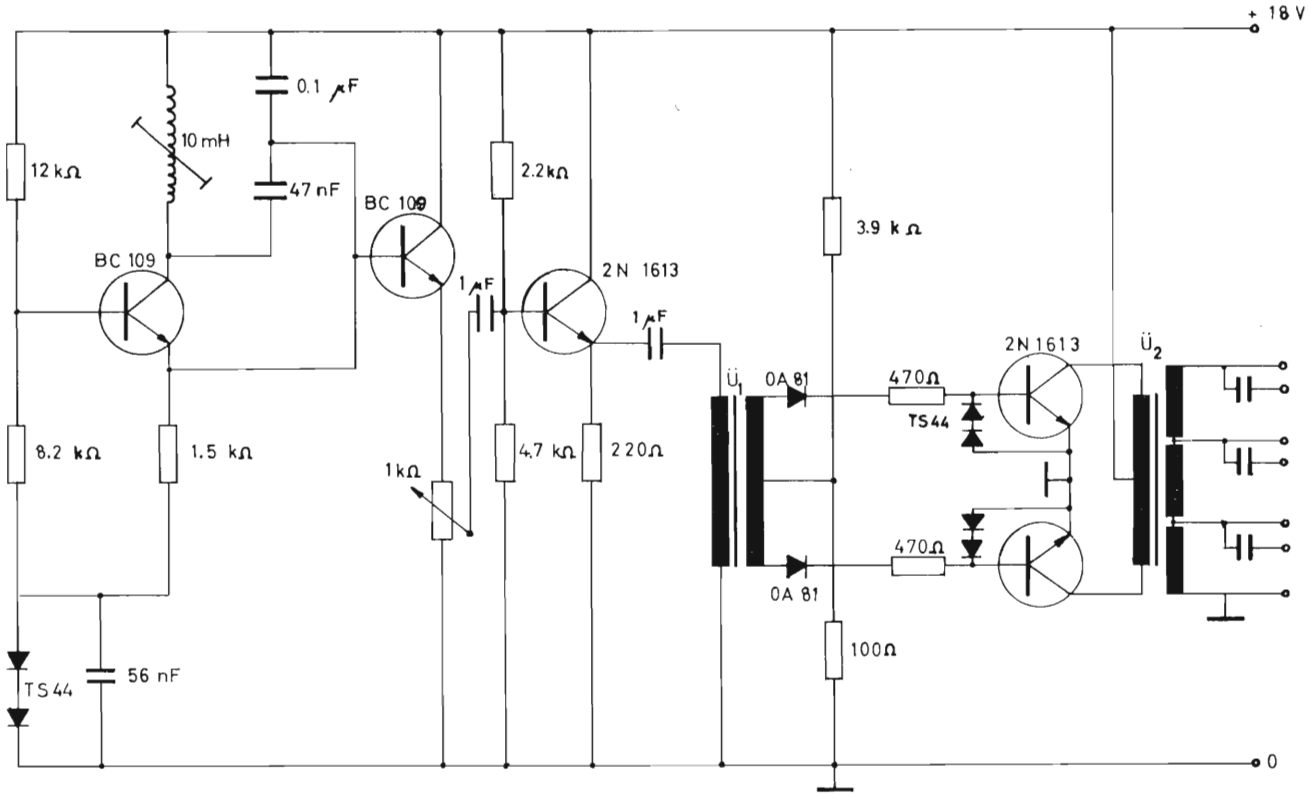

Abb. 21 Schema des Speisegerätes. Daten der Uebertrager: $\ddot{U}_1$ = Schalenkern S 25/16; n_1 = 360 Wdg.;
n_2 = 180 Wdg.
$\ddot{U}_2$ = Schalenkern P 30/19; n_1 = 110 Wdg.;
n_2 = 500, 330, 220 Wdg. ⟶ 1 : 1, 2 : 3, 2 : 5.

Technische Daten:

Frequenz	10 KHz ± 2%
Batteriespannung	2 x 9 V
Ausgangsspannung	0 - 25 V
Maximale Ausgangsleistung ca.	1.5 W
Wirkungsgrad ca.	35%

Damit das Speisegerät optimal an die Drahtleitung angepasst werden konnte, wurde es mit drei Anpassungsstufen versehen. Die optimale Anpassung wurde jeweils durch Messen des Ausgangsstromes gefunden.

6.2.6.b. Empfangsteil Der Empfangsteil besteht aus einer Suchspule, dem selektiven Verstärker und dem Voltmeter. Die Empfangsfrequenz des transistorisierten Verstärkers und die Eigenfrequenz des Eingangskreises (Suchspule) entsprechen der Frequenz des Speisegerätes. Aufgrund dieser doppelten Selektivität kann die Leistung des Speisegerätes im erwähnten bescheidenen Rahmen gehalten werden, hingegen muss infolge der kleinen Bandbreite der Empfangsteile die Sendefrequenz möglichst stabil sein und notfalls die Möglichkeit bestehen, eine Abstimmung bei leicht veränderter Frequenzlage vornehmen zu können. In Abb. 22 ist ein Schema der Empfangsteile aufgezeichnet.

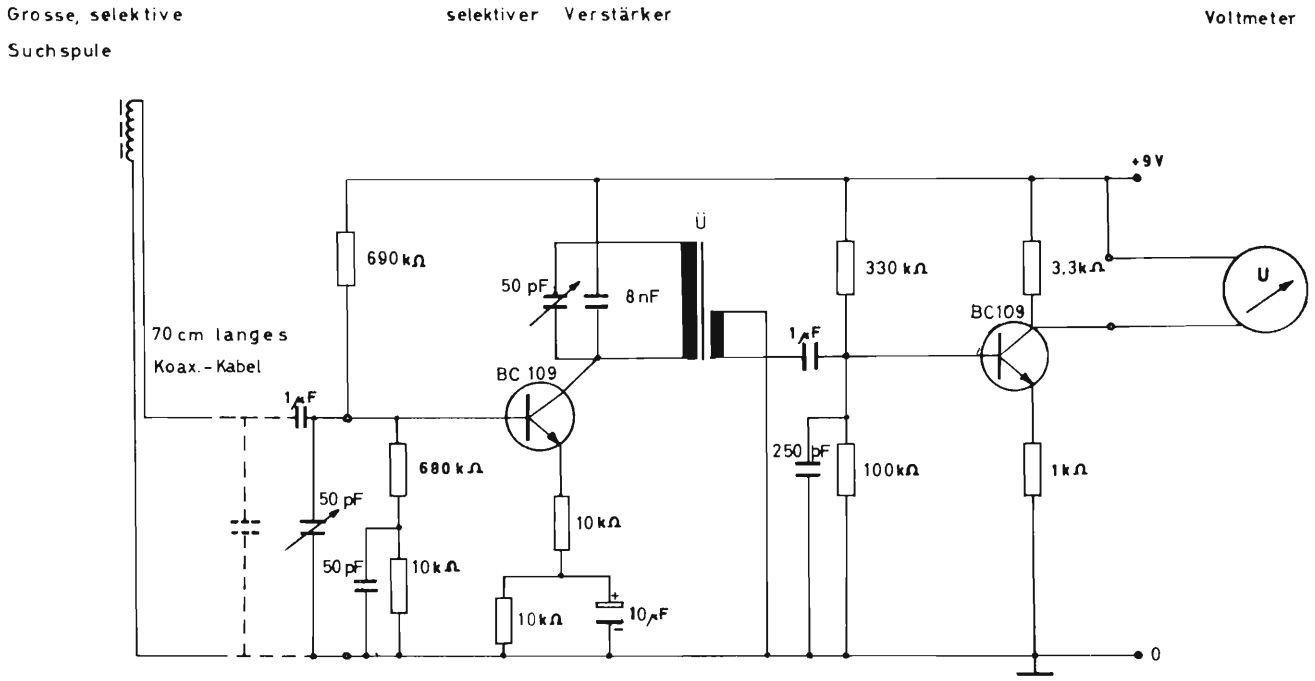

Abb. 22 Schema der Empfangsteile. Daten des Uebertragers: Schalenkern P 26/16, n_1 = 330 Wdg., n_2 = 110 Wdg.

Technische Daten:

Grosse selektive Suchspule:

Die grosse Suchspule wurde für Oberflächenprofilmessungen an der Firnoberfläche benützt und ihre Induktivität musste möglichst gross sein.

Die Eigenfrequenz wurde durch Parallelschalten von Kondensatoren auf die Sendefrequenz abgestimmt. Die Richtwirkung dieser Ferritspule ist gross, weil sie lang und dünn ist.

Spulenlänge	170 mm
Querschnitt	10 mm
Anzahl Wdg.	5400 in 9 Lagen à 600 Wdg.
μ_r	160

Kleine selektive Suchspule:

Die kleine Suchspule, die für Tiefenabstiche benützt wurde, durfte weniger empfindlich sein, da sie bei der Messung in unmittelbare Nähe des Drahtes gebracht wird, wo die Feldstärke des magnetischen Feldes gross ist. Auch diese Spule konnte durch Parallelschalten von Zusatzkapazitäten auf die Sendefrequenz abgestimmt werden.

Spulenlänge	60 mm
Querschnitt	4 mm
Anzahl Wdg.	ca. 200
μ_r	ca. 100

Selektiver Verstärker:

Resonanzfrequenz		10 KHz ± 4%, einregulierbar
Eingangsimpedanz		100 K Ω
Ausgangsimpedanz		3 K Ω
Verstärkung	ca.	75x

Käufliches Voltmeter, 403 A - AC, Hewlett-Packard:

Die in der Suchspule induzierte und verstärkte Wechselspannung wird im Voltmeter gleichgerichtet und mit einem Drehspulinstrument zur Anzeige gebracht.

U - Bereich	0.001 - 300 V (12 Bereiche, Endanschlag beim kleinsten Bereich: 0.001 V)
f - Bereich	1 - 10^6 Hz
Genauigkeit	innerhalb ± 3% des jeweiligen Skalenendwertes, geeicht in Effektivwerten einer Sinusschwingung
Lärmpegel	kleiner als 6% des Skalenendwertes beim 1 m V-Bereich kleiner als 3% des Skalenendwertes bei den übrigen Bereichen
Eingangsimpedanz	2 M Ω ± 5%, geshuntet mit < 40 p F bei den Bereichen von 1 - 100 mV.
Stromversorgung	mit Trockenbatterien

6.2.7. Genauigkeit und Anwendungsbereich

6.2.7.a. Genauigkeit bei Oberflächenprofilmessungen: Die Genauigkeit der Messung hängt ausser von der Güte der Messinstrumente auch von den geometrischen Abmessungen der Drahtschleife, dem Messort über der Drahtschleife und der Drahttiefe ab.

Da somit die Genauigkeit nicht generell angegeben werden kann, sollen die Mess- und Auswertegenauigkeiten an einigen konkreten Beispielen erläutert werden.

Die Drahtposition des Doppeldrahtes 1968, d.h. die Mitte der beiden Drahtepizentren konnte durch Suchen des $H_{\Sigma x}$-Minimums auf 20 cm genau bestimmt werden.

Die Drahttiefen wurden einerseits mit Hilfe der gemessenen Oberflächenprofilkurven ermittelt, andererseits waren sie auch durch gemessene Tiefenprofile bekannt, sodass die beiden Werte verglichen werden konnten. Die Uebereinstimmung war befriedigend, da die Werte nie mehr als 20 cm voneinander abwichen. In Abb. 19 sind mehrere Oberflächenprofilkurven dargestellt, die über dem Doppeldraht 1968 (b = 2 m), in Abständen von Δy = 30 - 40 m gemessen wurden. Der Doppeldraht lag zum Zeitpunkt der Messung rund 6 m tief unter der Messebene. Obwohl vor der eigentlichen Profilmessung die zur Drahtebene parallele Messlinie gesucht wurde (vgl. 6.2.4., Messverfahren), sind nicht alle Oberflächenprofilkurven ideal symmetrisch. Dies ist neben den üblichen Messungenauigkeiten dem Umstand zuzuschreiben, dass die, über eine Länge von rund 30 m gespannte Schnur, in einigen Fällen einen gewissen Durchhang aufwies. Die Messlinie war demzufolge nicht eine Gerade, sondern eine schwach gekrümmte Seilkurve, was leicht unsymmetrische Oberflächenprofilkurven zur Folge hatte.

In Abb. 23 sind noch vier Oberflächenprofilkurven dargestellt, die über dem Doppeldraht 1967 (b = 1.5 m) in Abständen von $\Delta y \approx 50$ m gemessen wurden. Dieser Doppeldraht lag zum Zeitpunkt der Messung rund 11 m tief unter der Messebene, weshalb die Kurven schon ziemlich flach abfallen. Die Drahtposition konnte aber auch hier mit Hilfe des $H_{\Sigma x}$-Minimums auf rund 20 cm genau bestimmt werden.

Zur Bestimmung der Drahttiefen wurden wiederum die gemessenen Oberflächenprofilkurven mit entsprechenden Modellkurven verglichen; gleichzeitig wurde die Tiefe auch mit Hilfe des genannten Programmes errechnet. Die

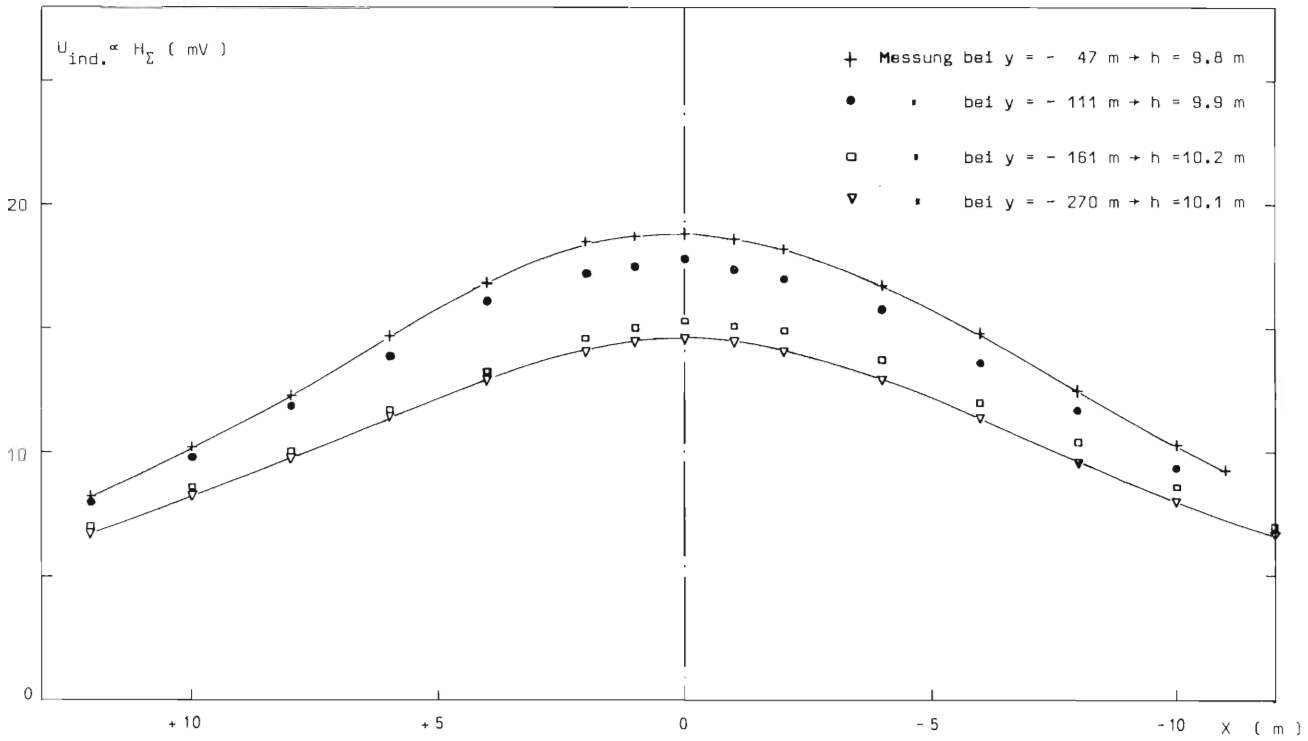

Abb. 23 Oberflächenprofilkurven, die in verschiedener Entfernung von der Drahtmitte über dem Doppeldraht 1967 gemessen wurden. In der Bildlegende die bei der Auswertung errechneten Drahttiefen.

mittlere Tiefe des Doppeldrahtes 1967 betrug zum Zeitpunkt der Messung h = 10.0 m (vgl. Daten in Abb. 23). Die Genauigkeit der Messungen konnte leider nicht mehr mit Hilfe von Tiefenprofil-Werten überprüft werden, da der Doppeldraht 1967 infolge von Eisschichten mit der Tiefensonde durch Rammen nicht mehr erreicht werden konnte. - Um trotzdem gewisse Anhaltspunkte über die Richtigkeit der berechneten mittleren Drahttiefe zu erhalten, wurde die Tiefe des "zweijährigen" Doppeldrahtes 1967 aufgrund der Firndichte-Kurve von Seligmann und Hughes (1939), die ebenfalls im Firngebiet des grossen Aletschgletschers und auf der gleichen Höhe über Meer bestimmt wurde, abgeschätzt.

Zum Zeitpunkt der Messung (1.8.1969) betrug die mittlere Drahttiefe des "einjährigen" Doppeldrahtes 1968, $\bar{h}$ = 5.0 m. Das mittlere Firn-Raumgewicht der tiefer liegenden Schichten zwischen 5 und 10 m beträgt nach Seligmann, $\bar{\gamma}$ = 580 kg/m^3. Da der Wasserwert dieser Vorjahres-Schichten am Ende des Bilanzjahres 1967/68 bestimmt wurde, konnte die Schichthöhe dieser Schneeschichten $(h_s)'$ mit Hilfe der Beziehung $(h_s)' = \bar{h}_w/\gamma$ berechnet werden. Die Berechnung ergab für $(h_s)'$ = 5.1 m. Durch Aufsummieren der beiden Beträge: $\bar{h} + (h_s)'$ = 5.0 + 5.1 = 10.1 m, konnte somit die mittlere Tiefe des "zweijährigen" Doppeldrahtes 1967 ebenfalls gefunden werden.*) Die Uebereinstimmung zwischen dem gemessenen Mittelwert ($\bar{h}$ = 10 m) und dem aufgrund der Verdichtung abgeschätzten Wert (h = 10.1 m) ist gut und erlaubt den Rückschluss, dass die für die Messmethode gemachten Annahmen ($\mu_{Firn} \approx 1$, b = Konst.) auch für tiefer liegende, mehrjährige Drähte gelten.

Da die geometrischen Messverhältnisse bei den besprochenen und in Abb. 19 und Abb. 23 dargestellten Oberflächenprofil-Messungen relativ ungünstig waren: b : h' ≈ 1 : 3 (Doppeldraht 1968) und b : h' ≈ 1 : 7 (Doppeldraht 1967), darf man annehmen, dass sich die dabei erreichten Genauigkeiten (± 20 cm) bei gut gewähltem Drahtabstand b auch bei der Einmessung von tief liegenden, "mehrjährigen" Drähten erreichen lassen. Wie Abb. 15

*) Dabei wird $\bar{h}$, also die mittlere Entfernung des Doppeldrahtes von der Firnoberfläche (normal auf die Fläche gemessen), dem lotrechten Abstand des Drahtes von der Firnoberfläche h_s gleichgesetzt, da die Neigung der Firnoberfläche sehr gering ist ($\psi \approx 3^o$).

zeigt, befindet man sich bei einem geometrischen Messverhältnis $b : h' = 1 : 3$ schon im ungenauen Bereich, d.h. die Oberflächenprofilkurven fallen schon reichlich flach ab. Dadurch wird sowohl die Bestimmung des Drahtepizentrums als auch die Messung einer symmetrischen Oberflächenprofilkurve schwierig, und die daraus resultierende Messgenauigkeit ist nicht sehr hoch.

Die Lage des Messortes über und entlang der Drahtauslage, d.h. die Lage bezüglich der y-Richtung beeinflusst insofern die Genauigkeit der Messung, als am Ende der Drahtauslage Randeffekte auftreten. Die Messorte von Oberflächenprofilkurven sollten deshalb vom Ende der Drahtauslage einen Mindest-Abstand von $\Delta y \approx 5 \cdot h'$ ($b \leq h'$) aufweisen, da sich die Randeffekte gegen das Drahtende zu vergrössern und in dieser Entfernung vom Rand einen Fehler von 2 - 3% verursachen.

Will man die Lage von Drahtschleifen im Firnuntergrund über mehrere Jahre verfolgen und sollte dabei die Genauigkeit im erwähnten Rahmen bleiben, so muss der Drahtabstand beim Auslegen der Drahtschleife entsprechend gewählt werden. Gemäss den Kurven von Abb. 15 und den Bemerkungen über die Randeffekte wird der Drahtabstand bei der Auslage am besten so gewählt, dass das geometrische Messverhältnis $1/2 \leq b/h' \leq 1$ beträgt.

6.2.7.b. Genauigkeit von Tiefenprofilen: Die Genauigkeit, mit der anhand von Tiefenprofilen die Drahttiefe bzw. die Schneehöhe bestimmt werden kann, hängt stark von der richtigen Lage des Einstichpunktes der Tiefensonde ab. Da es mit Hilfe von Oberflächenprofilen oder durch Suchen des H_{Σ_x}-Minimums möglich ist, die Lage der Drahtepizentren und damit die Lage der lotrechten Epizentren (= Einstichpunkt) auf 20 cm genau zu bestimmen, kann die lotrechte Drahttiefe auf 5 cm genau bestimmt werden (vgl. Abb. 17 und 18). Dabei wird vorausgesetzt, dass die Drähte nach der Auslage zu Beginn des Bilanzjahres nicht in die Firnoberfläche eingesunken sind, oder dass man den Einsink-Betrag kennt.

Leider kann die Tiefe der Drähte durch solche Tiefenprofile ohne grösseren Aufwand nur während des ersten Jahres nach der Drahtauslage bestimmt werden; sobald die Drähte in grösserer Tiefe liegen, gelingt es nicht mehr, die Tiefensonde wegen den vielen Eisschichten in die Drahttiefe vorzustossen. - Will man die Tiefe von "mehrjährigen" Drähten ebenfalls mit einer Genauigkeit von 5 cm (Tiefenprofilgenauigkeit) bestimmen, so muss die Tiefensonde mit Hilfe eines Bohrloches abgeteuft werden, was einen entsprechend grösseren zeitlichen Aufwand bedingt.

Die beiden beschriebenen Messverfahren (Oberflächenprofilmessung, Tiefenprofilmessung) ergänzen sich gut. Die genaue Tiefenprofil-Messmethode kann ohne aufwendige Bohrarbeit zur Bestimmung der jährlichen Schneehöhe benützt werden, wo auch eine grosse Genauigkeit erwünscht ist. Die Oberflächenprofilmessung hingegen, deren Genauigkeit geringer ist, ist vor allem zur Bestimmung von tiefer liegenden, "mehrjährigen" Drähten gedacht. Sie sollte bei entsprechender Drahtauslage die Bestimmung der zunehmenden Firnverdichtung bis in grosse Tiefen erlauben, wo auch Messwerte, die mit einem leicht grösseren Fehler behaftet sind, immer noch wertvolle Hinweise liefern.

6.3. BESTIMMUNG DES MITTLEREN RAUMGEWICHTES BZW. DES WASSERWERTES MIT DEM WAEGEVERFAHREN

Schon um die Jahrhundertwende bestimmte Church (vgl. de Quervain, 1917) das mittlere Raumgewicht von Schnee durch Wägen einer Probe von definierter Grösse. Die Methode wird auch heute noch weltweit angewandt, da sie sehr einfach ist, doch hängt die Genauigkeit der Messung stark von den benützten Hilfsmitteln und dem Messvorgehen ab. Für das in den USA übliche Vorgehen und die dabei gebrauchten Hilfsmittel ist von Work et al. (1965) eine Genauigkeits- und Eignungsuntersuchung durchgeführt worden. In Europa, wo andere Stechzylinder und Waagen benützt werden, muss jedoch die Genauigkeit des Verfahrens von Fall zu Fall abgeschätzt werden. Während

in Abschnitt 5.3.1. das Messprinzip des Wägeverfahrens kurz erläutert wurde, sollen in diesem Kapitel das Vorgehen, die Hilfsmittel und die Fehlerquellen besprochen werden, da die Wägemethode zur Eichung aller übrigen Methoden benützt wurde.

6.3.1. Vorgehen

Das hier zur Sprache kommende Vorgehen wird von der AHG schon seit Jahren bei Firnbilanzstudien angewandt und wurde deshalb auch für die Vergleichsmessungen im Rahmen dieser Arbeit benützt.

An verschiedenen ausgewählten Punkten im Firngebiet wird ein Schneeschacht gegraben, dessen Tiefe der Schneehöhe pro Bilanzjahr (h_s) in diesem Punkt entspricht. Auf der Schattenseite der Schneeschachtwand werden nun von der Oberfläche bis zum Schachtboden lotrechte Schneeproben in lückenloser Folge gewonnen. Dabei wird ein geschärftes, zylindrisches Rohr (Schneidekante innen) ungefähr 50 cm tief senkrecht in die jeweilige Schichtoberfläche gestossen. An der Schneidekante wird die Schneeprobe mit Hilfe eines horizontal geführten Stahlblechs abgeschnitten, während die Probenhöhe an der Schneedecke selbst anhand der cm-Einteilung an der Aussenwand des Rohres auf 0.5 cm genau abgelesen wird. Der gefüllte Stechzylinder wird vom umgebenden Schnee befreit, und mit Hilfe einer Federwaage bestimmt man das Gewicht des Probekörpers. Das Volumen des Probekörpers wird aus den Innenmassen des Stechzylinders und mit Hilfe der vorher abgelesenen Probenhöhe errechnet.

Der Wasserwert und das Raumgewicht des Probekörpers werden anhand der Definitionsgleichungen (4; 5) bestimmt, und der Gesamtwasserwert wird als Summe der Einzelwerte errechnet.

Falls die Schneehöhe pro Bilanzjahr 5 - 6 m beträgt, würde das Graben eines Schachtes auf diese Tiefe zu zeitraubend, sodass in diesem Fall nur ein Schacht von 3 - 4 m gegraben wird. Der Wasserwert wird dann bis zur Schachttiefe nach dem besprochenen Verfahren bestimmt und von den noch tiefer liegenden Schichten wird mit Hilfe eines zylindrischen Rohres von 2 oder 4 m Länge (sogenanntes Fe-Rohr, AHG) ein Probekern gewonnen. Der Wasserwert und das mittlere Raumgewicht des Probekerns werden wiederum durch Wägung und Berechnung aufgrund der genannten Gleichungen (4; 5) erhalten.

6.3.2. Ausrüstung

Die Ausrüstung für die Raumgewichtsbestimmung besteht aus geschärften Stechzylindern oder zylindrischen Rohren mit Sägekronen, einer Feder- oder Balkenwaage und einem Stahlblech mit Schneide.

Die im Rahmen dieser Arbeit benutzten Stechzylinder aus verschiedenem Material, das zylindrische Rohr (Fe-Rohr, AHG), sowie die zugehörigen Waagen sind in Tabelle (1) zusammengestellt, wobei aus Vergleichsgründen noch einige andere gebräuchliche Instrumente aufgeführt sind.

6.3.3. Messgenauigkeit des Instrumentariums und der Methode

Fehlerabschätzung für das Raumgewicht γ_i, falls dieses mit Hilfe des Al-Zylinders (AHG) bestimmt wurde: Da die meisten Raumgewichtsbestimmungen im Rahmen dieser Arbeit mit dem Al-Zylinder (AHG) durchgeführt wurden, soll hier eine Fehlerabschätzung für das dabei verwendete Instrumentarium und das Messverfahren gemacht werden.

Das Raumgewicht einer einzelnen Schneeprobe wird aufgrund der Definitionsgleichung (4) durch drei Grössen bestimmt: Das Gewicht der Probe (G), die Grundfläche der Probe (F = innere Grundfläche des Al-Zylinders) und die

Höhe der Probe (h).

Da die mittleren Fehler dieser einzelnen Messgrössen nicht bekannt sind, wurden sie geschätzt und der grösstmögliche relative Fehler mit Hilfe des totalen Differentials berechnet:

$$\frac{\Delta \gamma i}{\gamma_i} = \pm \left\{ \frac{\Delta G}{G} + \frac{\Delta F}{F} + \frac{\Delta h}{h} \right\} \qquad (30)$$

Resultate: $\Delta \gamma_i$ bei Schnee von 200 kg/m^3 = $\pm$ 1.7%
$\Delta \gamma_i$ bei Schnee von 500 kg/m^3 = $\pm$ 1.3%

Da die Empfindlichkeit und Ablesegenauigkeit der Waage gegeben ist (Annahme: $\pm$ 5 g, vgl. Tabelle 1), ist das geringe Gewicht einer Neuschneeprobe immer mit einem grösseren Fehler behaftet, als jenes einer schweren Firnschneeprobe. Bei obiger Fehlerabschätzung wurde angenommen, dass die Grundfläche der benützten Zylinder nach der Messperiode ausgemessen und zur Berechnung verwendet wird und dass die Abstichhöhe (Probenhöhe) bei Firnschnee nicht genauer als auf 5 mm abgelesen werden kann.

Die berechnete Streuung (S) der Einzelmessungen bewegte sich vergleichsweise bei Messungen zu verschiedenen Zeiten im Bereich von 0.6 - 2.7%, Mittelwert = 1.5% (Anzahl Messungen: 32), falls dabei nur relativ homogene Firn-Oberflächenschichten gemessen wurden. Die Streuung wurde aber sofort grösser, wenn die Proben in tieferen Firnschichten, die mit Eisschichten und -linsen durchsetzt waren, gewonnen wurden, und betrug dann bis zu 10%, Mittelwert = 3.2% (Anzahl Messungen: 50).

Um einen eventuell vorhandenen systematischen Fehler des Al-Zylinders (AHG) nachweisen zu können, wurden Vergleichsmessungen mit einem "Federal Sampler" (USA) gemacht, dessen systematischer Fehler durch eine Arbeit von Work et al. (1965) bekannt ist. Er verglich dabei die Resultate von "Federal Sampler"-Messungen mit Daten, die er durch Volumenmessung und Wägung eines ganzen Schneeblocks von einigen m^3 erhielt. Die "Federal Sampler"-Messungen ergaben dabei im Mittel um 7.8% zu hohe Werte (bei w_i = 200 mm). Bei den auf dem Ewigschneefeld durchgeführten Parallelmessungen mit einem Al-Zylinder und einem "Federal Sampler" ergab der "Federal Sampler" im Mittel um 8.4% höhere Werte (bei $w_i \approx$ 200 mm) als der Al-Zylinder, womit auf indirektem Weg gezeigt werden konnte, dass der Al-Zylinder im Rahmen der Streuung den "wahren" Wert ergibt.

Fehlerabschätzung für das mittlere Raumgewicht $\bar{\gamma}$, falls dieses mit Hilfe des Fe-Rohres (AHG) bestimmt wurde: Da man für Bilanzstudien im Firngebiet, wo die Schneehöhe oft 3 - 4 m übersteigt, auch noch das Fe-Rohr (AHG) von 2 oder 4 m Länge zur Bestimmung des Gesamtwasserwertes zu Hilfe nehmen muss, soll auch der zu erwartende Fehler für diese Sondenart kurz abgeschätzt werden. Schneesonden, die an Stelle einer einfachen Schneide eine Sägekrone, bzw. Schneidezähne an der Sondenöffnung besitzen, und die nicht in die Schneedecke gestochen, sondern gedreht werden, nehmen ein anderes Probenvolumen auf als es dem Innendurchmesser entspricht (vgl. Work, 1965). Deshalb wurde das Fe-Rohr (AHG) durch Vergleichsmessungen mit dem Al-Zylinder (AHG) geeicht, wobei die wirksame Grundfläche aus Tabelle (1) ersichtlich ist.

Der Gesamtfehler einer Einzelmessung setzt sich auch hier aus den in Gleichung (30) genannten Gliedern zusammen, wobei das Glied ΔF durch die genannte Eichung eliminiert wurde. Bei der Annahme, dass diese Sondenart zur Ausmessung von tief liegenden, dichten Schichten gebraucht wird, beträgt der Fehler gemäss Gleichung (30): $\pm$ 1.5%. Die aus mehrfach wiederholten Messungen ermittelte Streuung (S) bewegte sich im Bereich von 0.4 - 3.5%, Mittelwert: 1.6%, wobei allerdings einige sehr stark abweichende Resultate nicht mitberücksichtigt wurden. Da der Schneeprobenkörper in die Sonde hineingedreht werden muss, gelten der Korrekturfaktor für die Grundfläche und die gemachten Fehlerabschätzungen nur für den Fall, wo dieses Hineindrehen auch möglich ist. Wenn die

Tabelle 1: Zusammenstellung der verwendeten Stechzylinder und Rohre, zum Vergleich einige andere gebräuchliche Instrumente

Bezeichnung (Herstellungsort)	Verwendungszweck	$\varnothing_i$ mm	Wandstärke mm	wirksame Grundfläche cm^2	bei Probenlänge cm	erfasstes Volumen cm^3	Genauigkeit der gebräuchlichen Waagen g	in mm Wasserwert
Al-Zylinder (AHG)	Einzelabstich: 10-50 cm	94.3	1.5	69.8	50	3490	± 5	< 1
Fe-Zylinder (AHG)	Einzelabstich: 10-50 cm	96.6	1.5	72.3 *)	50	3615 *)	± 5	< 1
Messing-Zylinder (AHG)	Einzelabstich: 10 cm	150	2.5	176	10	1760	± 1	4.2
Fe-Rohr (AHG) mit Sägekrone	Gesamtabstich bis 2 m	74	1.4	47.5 *)	200	9500 *)	± 50	1
zum Vergleich:								
Fe-Zylinder (SLF)	Einzelabstich: 19 cm	58	1	26.4	18.9	500	± 1	< 1
Fe-Zylinder (Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck)	Einzelabstich: 10-50 cm	80	1	50	50	2500	± 5	1
"Federal sampler" (USA) mit Schneidezähnen und aufschraubbaren Verlängerungen	Einzelabstich u. Gesamtabstich bis mehrere Meter	37.6	2	11.1	50	555	± 1.5	1.3

*) Die mit einem Stern bezeichneten Werte wurden auf Grund von Vergleichsmessungen mit dem Al-Zylinder (AHG) erhalten.

Firnschichten mit starken Eislinsen durchsetzt sind, müssen diese mit der Sonde durchschlagen werden, wodurch sich oft wesentlich grössere Fehler ergeben.

Mittlerer Fehler des Wasserwertes einer Gesamtschneeschicht, falls der Al-Zylinder (AHG) und das Fe-Rohr (AHG) benützt wurden: Der mittlere Fehler bei der Messung einer Gesamtschneeschicht von 4 - 6 m beträgt aufgrund von Streuungsberechnung von gemessenen Daten 2.5%, falls die Gesamtschneehöhe, über deren Bereich sich die Wasserwertsbestimmung erstreckt, auf $\pm$ 1 cm bekannt ist. Ist aber z.B. diese Schneehöhe um $\pm$ 10 cm falsch (bei einem Gesamtwasserwert von 2500 mm, γ_i der Grundschicht: 500 kg/m^3), beträgt der Fehler schon $\pm$ 4.5%, woraus die Wichtigkeit einer guten Schneehöhenmessung ersichtlich ist.

6.4. BESTIMMUNG DES MITTLEREN RAUMGEWICHTES BZW. DES WASSERWERTES MIT DER NEUTRONENSONDE

6.4.1. Einleitung und Problemstellung

Neutronensonden werden schon seit rund 20 Jahren zur Messung des Wassergehaltes in Böden benützt, während sie für Schneemessungen erst seit kurzem Verwendung finden. Gay (1962) und Anderson, Mc Donald and Gay (1962) benutzten Gamma- und Neutronensonden für stratigraphische Schneestudien und fanden, dass Gamma-Sonden (γ-"scattering"-Methode) für stratigraphische Studien besser geeignet seien als Neutronensonden, da die Streuung der Gamma-Sonden-Werte bei Vergleichsmessungen geringer war. Ihre für die Neutronensonde berechnete Eichkurve war eine Gerade (Regressionsgerade) mit einer mittleren Streuung von 36 kg/m^3. Danfors, Fleetwood and Schytt (1962) setzten eine Neutronensonde erstmals auf einem Gletscher ein, wobei die Sonde ohne Verrohrung in ein enges Bohrloch von ca. 40 mm Durchmesser abgesenkt wurde. Die Zählrate wurde alle 15 cm gemessen und parallel dazu wurde auch das Raumgewicht mit der Wägemethode bestimmt. Anhand der gemessenen Daten wurde eine Regressionsgerade gerechnet, wobei der Korrelationskoeffizient $r = 0.901$ und die mittlere Streuung $S =$ 20 kg/m^3 betrug. Leighty (1965) machte Versuchsmessungen in Grönland, wobei er ebenfalls ohne Verrohrung arbeitete. Da die Streuung seiner Messwerte sehr gross war, (Variationsbreite, "range", in Raumgewichtseinheiten: 300 kg/m^3) verzichtete er auf das Berechnen einer Regressionskurve. Smith, Willen and Owens (1966) untersuchten verschiedene tragbare Messeinrichtungen (Gamma- und Neutronen-Systeme) bezüglich Messgenauigkeit und Auflösungsvermögen von einzelnen Eis- Schnee-Schichten. Die Streuung der Neutronensonde-Werte war geringer als jene der Gammasonden-Werte und die benützte Neutronensonde zeigte ein grösseres Auflösungsvermögen als die Gamma-Sonde. Die Messungen beschränkten sich auf Schneedeckenstudien in unvergletschertem Gebiet. Cooper (1966) führte in einer Gebirgsschneedecke Vergleichsmessungen mit einer Neutronensonde und einem "Federal Sampler" durch, wobei er zur Umrechnung der Neutronensonde-Zählraten die von der Instrumenten-Firma mitgelieferte Eichkurve für Böden benutzte. Die so erhaltenen Raumgewichte korrelierte er mit den "Federal Sampler"-Raumgewichten, wobei der Korrelationskoeffizient $r = 0.73$ betrug. Er betont, dass die relativ grosse und unkontrollierbare Streuung der Daten beider Messmethoden eine Eichung und damit die Anwendung der Neutronensonde erschwere.

Aufgrund der genannten Arbeiten durfte angenommen werden, dass sich Neutronensonden bei entsprechender Eichung auch für Firnbilanzmessungen eignen würden.

Das Ziel der vorliegenden Untersuchung bestand nun darin, eine käufliche Neutronensonde so zu eichen, dass damit beim Einsatz für Firnbilanzmessungen grosse Schichtpakete in möglichst kurzer Zeit gemessen werden konnten, und dass sich die gemessenen Neutronen-Zählraten mit Hilfe von Eichkurven bequem in Raumgewichte bzw. Wasserwerte umrechnen liessen.

6.4.2. Prinzip der Neutronen-Streuung

Neutronen können auf vielfältige Art mit der umgebenden Materie reagieren, hier sollen aber nur die für die Feuchtigkeitsmessung wesentlichen Effekte betrachtet werden.

Eine Neutronenquelle, bei der verwendeten Neutronensonde eine Mischung aus ^{241}Am-Be, produziert durch die Reaktion

$$^{9}_{4}\mathrm{Be} + ^{4}_{2}\mathrm{He}\ (\text{vom } ^{241}\mathrm{Am}) \longrightarrow ^{1}_{0}\mathrm{n} + ^{12}_{6}\mathrm{C} + \Delta\,\mathrm{E} \qquad (31)$$

schnelle Neutronen ($E > 10^4$ eV). Für eine gute Neutronenquelle wird im allgemeinen gefordert, dass der Neutronenfluss gross, möglichst konstant und monoenergetisch ist, und dass die Quelle wenig schädlich β- und γ-Strahlung aussendet. Diese Forderungen sind bei einer Mischung aus ^{241}Am-Be gut erfüllt, mit der Ausnahme, dass sie ein kontinuierliches Energiespektrum von Neutronen aussendet. - Die schnellen Neutronen verlieren vor allem bei elastischen Stössen mit den Atomkernen der umgebenden Materie den grössten Teil ihrer Anfangsenergie und werden nach einer gewissen Stosszahl thermisch. Die Stosszahl ist umso kleiner, je ähnlicher das Atomgewicht des gestossenen Kerns dem Atomgewicht des Neutrons ($^{1}_{0}$n) ist. In Wasser sind z.B. 18 Stösse*) nötig, um ein schnelles Neutron auf thermische Geschwindigkeit zu verlangsamen.

Wenn sich also im Einflussbereich der schnellen Neutronen Wasser, oder allgemeiner gesagt, H-Kerne in irgend einer chemischen Form befinden, werden diese schnellen Neutronen nach wenigen Stössen schon thermisch, wobei die Dichte an thermischen Neutronen der H-Konzentration bzw. der H_2O-Konzentration in der Nähe der Sonde entspricht. Der Neutronenfluss nimmt exponentiell mit wachsender Quellenentfernung ab, und ein Teil der thermisch gewordenen Neutronen wird zum Zählrohr zurückgestreut, ein Teil wird in der Materie absorbiert.

Im Zählrohr, das bei der verwendeten Neutronensonde mit ^{3}He-Gas gefüllt ist, verläuft dann die Reaktion:

$$2 \cdot ^{3}_{2}\mathrm{He} + ^{1}_{0}\mathrm{n} \longrightarrow ^{3}_{2}\mathrm{He} + ^{1}_{1}\mathrm{H} + ^{3}_{1}\mathrm{H} + \Delta\mathrm{E}. \qquad (32)$$

Die entstehenden Isotope ionisieren das Zählrohrgas, und im Zählrohr entsteht ein elektrischer Entladungsimpuls. Dieser wird im Vorverstärker vergrössert und gelangt durch ein Verbindungskabel zu einem dekadischen Zählgerät, wo die Anzahl Impulse pro Zeiteinheit (counts per minute, cpm) registriert wird.

6.4.3. Verwendete Apparatur

Die verwendete Neutronensonde ist ein Gerät der Firma Nuclear-Chicago und besteht aus zwei Teilen: Der eigentlichen Sonde, die die Neutronenquelle, das Zählrohr und den Vorverstärker enthält, und dem Zählgerät, das durch ein Kabel mit der Sonde verbunden wird (vgl. Abb. 24 und 25).

Sonde, Modell 5810

Der Sondenkörper besteht aus einem kreiszylindrischen Rohr von 380 mm Länge und 38.1 mm Durchmesser. Er befindet sich in Ruhestellung in einem Abschirmungs-Gehäuse aus Paraffin und Cadmium. In dieser Ruheposition kann gleichzeitig eine "Standard"-Messung gemacht werden, die das richtige Funktionieren der Sonde und des Zählgerätes aufzeigt ("Standard"-Zählrate = 57'350 $\pm$ ca. 500 cpm).

*) Anzahl nötiger Stösse, um ein Neutron von 2.10^6 eV auf 0.025 eV (thermisch) zu bremsen.

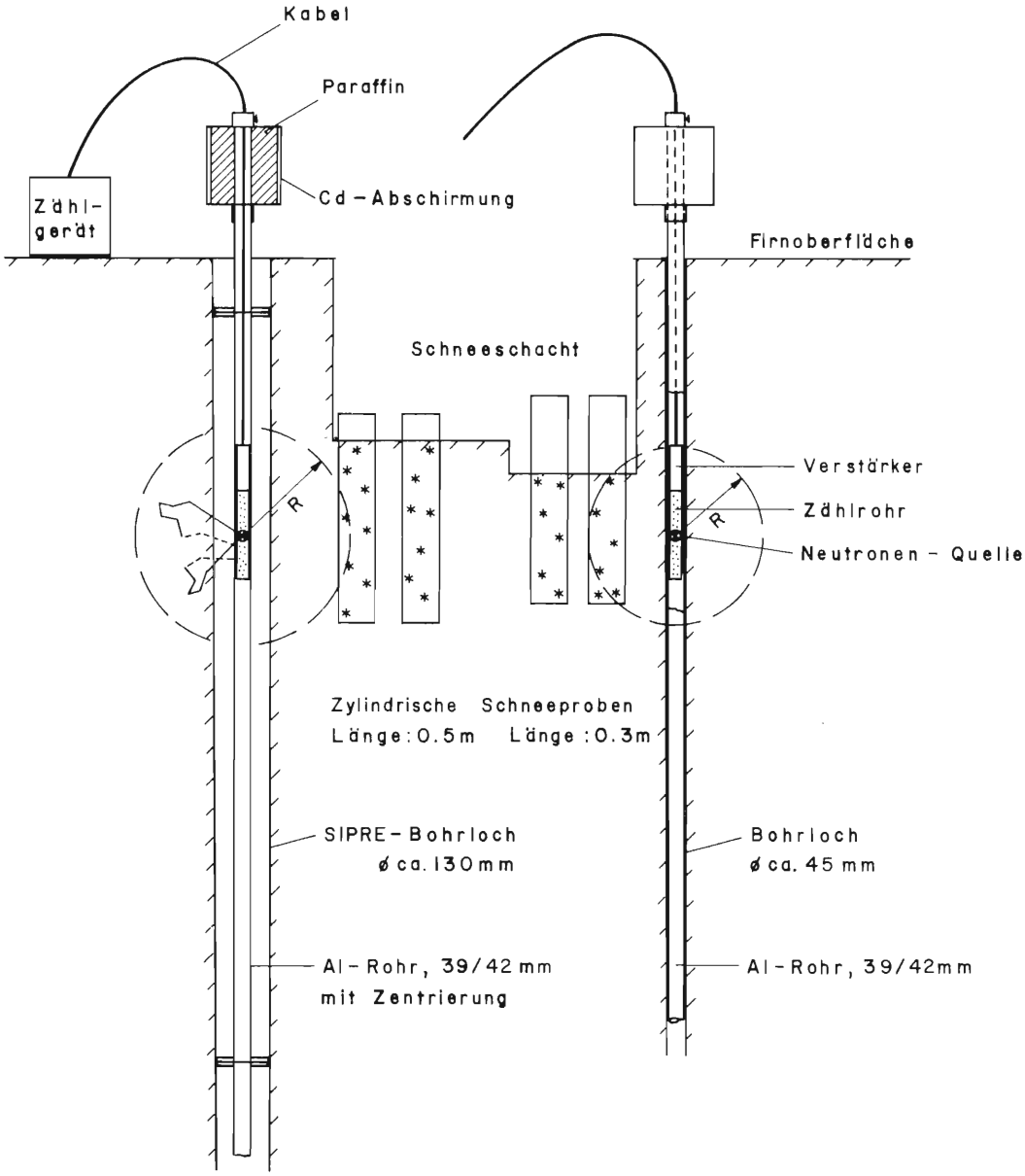

Abb. 24 Messeinrichtung, Verrohrung und Eichtechnik bei Benützung der Neutronensonde; links: Messung im SIPRE-Bohrloch, rechts: Messung im engen Bohrloch.

Sonde und Zählgerät sind von der Firma für den Temperatur-Bereich von -17 bsi +50°C garantiert, und die radiologischen Dosisleistungen an der Aussenwand der Abschirmung überschreiten die nach internationalen Vorschriften bemessenen Grenzen nirgends.

Neutronen-Quelle: Kapsel aus einer Mischung von ^{241}Am-Be, mit einer Aktivität von 30 m Ci, Halbwertszeit: 458 Jahre, was einer Intensitätsabnahme von 1.5% in zehn Jahren entspricht. Die Quelle befindet sich mittelständig und seitwärts des Zählrohres. Neutronenfluss: 6.10^4 Neutronen /s.

Zählrohr: Spitzenzähler von 200 mm Länge, der mit ^{3}He-Gas von 2 bar gefüllt ist. Die Arbeitsspannung muss vor der Messung festgelegt werden und betrug bei allen Messungen 1100 V.

Vorverstärker: Der Vorverstärker vergrössert die Entladungsimpulse des Zählrohres, deren Amplitude nur wenige mV beträgt, um den Faktor 10^2. Der Vorverstärker ist transistorisiert und zusätzlich negativ rückgekoppelt, womit Temperatureinflüsse und Spannungsänderungen ausgeglichen werden.

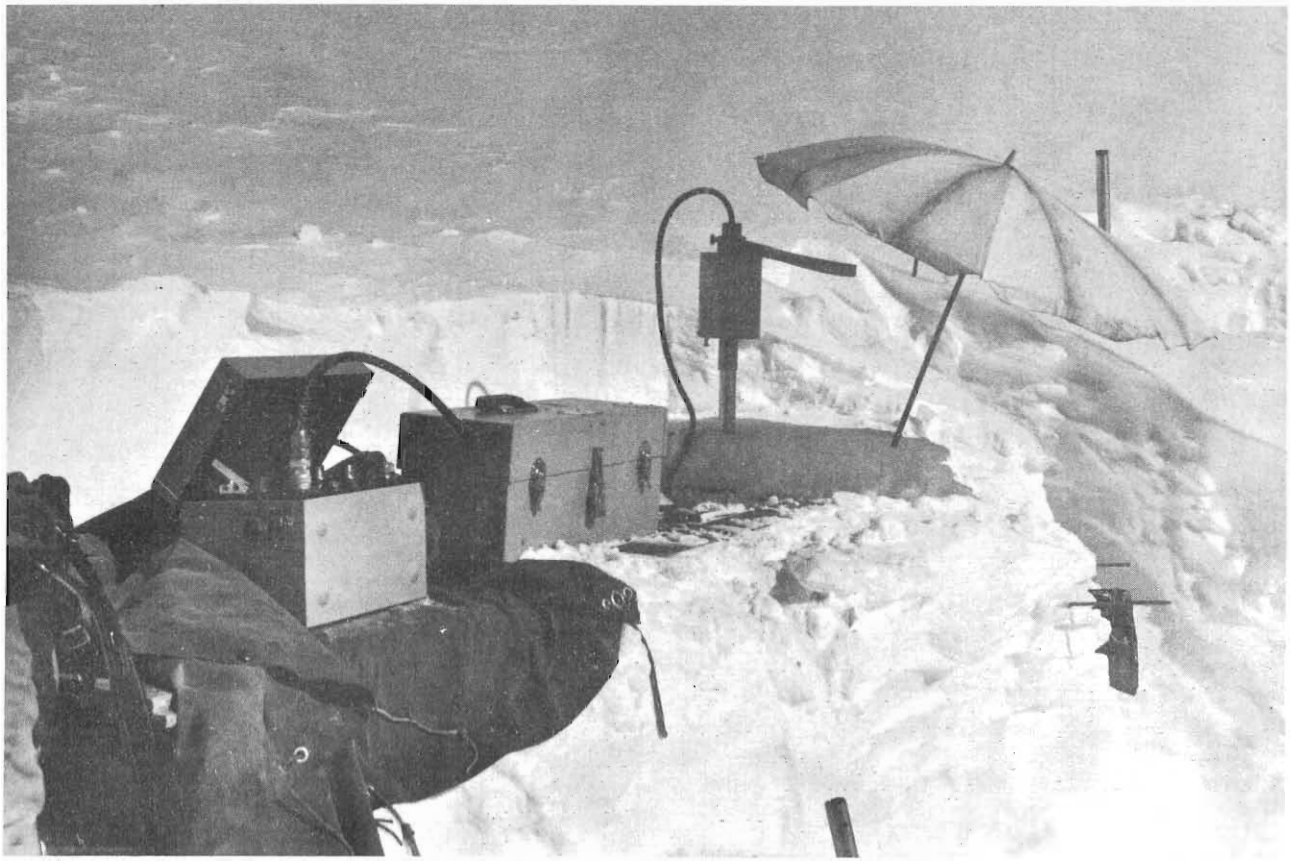

Abb. 25 Neutronensonde im Einsatz bei Versuchsmessungen. Das Zählgerät befindet sich im Vordergrund, die Sondenabschirmung im Hintergrund auf dem Zuführungsrohr und die Sonde im Firnuntergrund. Photo P. Föhn.

Zählgerät, Modell 5920

Das Zählgerät sortiert mit Hilfe eines Diskriminators die ankommenden Impulse, vergrössert sie nochmals und zeigt sie in fünf Dekaden an. Maximale Zählkapazität 99'999 Impulse. Die ankommenden Impulse können wahlweise während 1/4, 1/2, 1, 2 Minuten registriert werden, wobei eine elektronische Uhr den Zähler am Ende der Messzeit automatisch ausschaltet. Die Uhr wurde mit Hilfe einer Stoppuhr bei Feldbedingungen geprüft, und die grösste Abweichung betrug 0.5%. Mit Hilfe einer zusätzlichen Stoppuhr kann beliebig lang registriert werden, da der Zähler auch von Hand ausgeschaltet werden kann. Ein zählerinterner Oszillator kann zur Prüfung der Zählelektronik benützt werden. Die Hochspannung für das Zählrohr und die allgemeine Betriebsspannung wird aus 6 Ni-Cd-Zellen entnommen, die eine Ausgangsspannung von 7.5 V liefern. Die sechs Zellen werden über ein internes Ladegerät am Netz aufgeladen.

6.4.4. Bestimmung des bei der Messung erfassten Volumens

Die Stosszahl, die nötig ist, um schnelle Neutronen auf thermische Geschwindigkeit zu verlangsamen, hängt, wie schon früher erwähnt, von der Konzentration an H-Kernen in der Einflussphäre ab. Der von der Messung erfasste Bereich ist deshalb in lockerem Oberflächenschnee grösser als in dichtem Firnschnee oder gar in reinem Wasser. Eine theoretische Berechnung dieser Einflussphäre würde deshalb schwierig, weil nicht alle schnellen Neutronen

das gleiche Energieniveau besitzen und weil man nicht feststellen kann, wieviele der pro Kugelschale thermisch gewordenen Neutronen zum Zählrohr gelangt und registriert worden wären. Um trotzdem den ungefähren Einflussbereich in Schnee zu kennen, wurde das gleiche Verfahren, wie es Lorch (1963) für festen Boden brauchte, angewandt. Dabei wurde der Neutronenquelle in Messposition eine ebene Grenzfläche (Schnee/Luft) schrittweise nähergebracht, was seitwärts durch Wegschaufeln von Schneescheiben geschah. Auf diese Weise konnte der Radius der Einflussphäre bestimmt werden, innerhalb der 99% der thermischen Neutronen zur Registrierung gelangten. Zur Bestimmung der vertikalen Ausdehnung des Einflussbereiches wurde die Sonde schrittweise gegen die Schneeoberfläche verschoben. Der Einflussradius ist in horizontaler und vertikaler Richtung annähernd gleich gross. Die Bestimmung der Einflussradien mit diesem einfachen Verfahren ist insofern unvollständig, als erstens die experimentellen Daten aus zeitlichen Gründen nicht für den ganzen vorkommenden Bereich der Schneeraumgewichte gewonnen werden konnten, zweitens weil keine Schneeschicht über den vertikalen Einfluss-Bereich von 0.3 - 1 m homogen ist und drittens, weil es unmöglich ist, durch Wegschaufeln von Schneescheiben den kugelförmigen Einflussbereich um 10 - 20 mm dicke Kugelschalen zu verringern.

Für den Raumgewichts-Bereich von 200 - 1000 kg/m^3 kann man den Einflussradius R durch die Gleichung:

$$R = R_o \cdot e^{-r \cdot \gamma_i} \tag{33}$$

beschreiben, wobei R_o und r Konstante sind, die durch Versuche bestimmt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden aus später dargelegten Gründen Messungen in einem engen Bohrloch (ø = ca. 45 mm) und in einem weiten SIPRE-Bohrloch (ø = ca. 130 mm)*) vorgenommen. Beide Bohrlocharten wurden mit Al-Rohrstücken (ø : 39 x 42 mm) verrohrt.

Im engen Bohrloch umschliesst der Schnee die im Zuführungsrohr befindliche Sonde unmittelbar, während im weiten Bohrloch zwischen der Sonde bzw. der Zuführungsrohrwand und der Bohrlochwand ein Luft- Hohlzylinder von einem äusseren Radius von ca. 65 mm und einem inneren Radius von 21 mm bestand.

Damit die Rohrstücke und somit auch die Sonde im weiten Bohrloch zentriert waren, wurde jedem Rohrstück von 2 m Länge an beiden Enden eine tellerartige Querscheibe aufgeschweisst, wie dies Abb. 24 illustriert. Die Querscheiben ermöglichten gleichzeitig mit Hilfe von Schrauben das Zusammenfügen von mehreren Rohrstücken.

Für Messungen in einem engen Bohrloch lautet die experimentell bestimmte Gleichung für den Einflussradius:

$$R = 0.38 \cdot e^{-10^{-3} \cdot \gamma_i} \quad (m) \tag{34}$$

Die entsprechende Gleichung im weiten Bohrloch lautet:

$$R = 0.43 \cdot e^{-1.1 \cdot 10^{-3} \cdot \gamma_i} \quad (m) \tag{35}$$

Der Einflussradius wird also bei Messungen im SIPRE-Bohrloch, ein mittleres Schneeraumgewicht von 400 kg/m^3 vorausgesetzt, um rund 10% grösser sein als bei Messungen im engen Bohrloch.

*) Diese Bohrlochart wird nach dem verwendeten Bohrer benannt, der von "U.S. Army Snow, Ice and Permafrost Research Establishment" (SIPRE), jetzt CRREL benannt, entwickelt wurde.

6.4.5. Messeinrichtung und Eichung

Bei der experimentellen Eichung galt es, einen eindeutigen Zusammenhang zwischen der in einem Punkt gemessenen Neutronenzählrate und dem Schneeraumgewicht in der Umgebung des Messpunktes herzustellen. Dabei musste schon bei der Eichung darauf geachtet werden, dass jede Einzelmessung (Zählrate) einen möglichst grossen vertikalen Schneebereich repräsentierte, sodass auf Grund von einigen wenigen Einzelmessungen in jedem Bohrloch der Gesamtwasserwert bestimmt werden konnte. Dies wurde so erreicht, dass nicht in einem engen Bohrloch gemessen wurde, sondern in einem weiten SIPRE-Bohrloch, wodurch der an und für sich schon integrative Messcharakter der Neutronensonde noch vergrössert werden konnte. Gemäss Gleichung (35) wurde dadurch der Einflussradius der Neutronensonde um rund 10% grösser. Die sondennächste Schneekugelschale, in der der weitaus grösste Teil der Stösse zwischen H-Kernen und Neutronen stattfindet, wird aber dabei noch wesentlich mehr vergrössert.

Ein weiterer Vorteil des weiten SIPRE-Bohrloches war die Tatsache, dass der Einfluss der Lage der Neutronenquelle (die Quelle befindet sich seitwärts neben dem Zählrohr) bezüglich vorhandener Inhomogenitäten (z.B. Hohlräume im Schnee) verkleinert werden konnte. Die einseitige Lage der Quelle im Sondenkörper kann in einem engen Bohrloch bis 5% Schwankung der Zählrate verursachen.

Da im weiten Bohrloch das Zuführungsrohr die Bohrlochwand nirgends berührt, konnte zusätzlich verhindert werden, dass Schnee- und Eisteilchen und Wassertropfen, die sich im engen Bohrloch oft an der Rohraussenwand bilden, einen viel grösseren Einfluss auf die Zählrate gewinnen konnten, als die Schneeschichten der Messpunkt-Umgebung. Maertens u.a. (1965) zeigten, dass die Zählrate durch das Umgeben des Zuführungsrohres mit einer 2 mm dicken Paraffinschicht (ähnliche Wirkung wie Wasser) um 21.5% anstieg.

Bei der Eichung der Neutronensonde im SIPRE-Bohrloch wurde darauf geachtet, dass nicht idealisierte Messbedingungen geschaffen wurden, die sich bei späteren Routinemessungen nicht mehr realisieren lassen würden. Deshalb wurden schon die Eichmessungen nicht in Bohrlöchern durchgeführt, deren Durchmesser auf der ganzen Länge nahezu dem theoretischen Bohrerdurchmesser entsprach, da solche Bohrlöcher nur durch langsames und sehr vorsichtiges Bohren auf eine beschränkte Tiefe erhalten werden können. Die einzelnen Bohrlöcher wurden von verschiedenen Messgehilfen mit dem SIPRE-Bohrer von Hand gebohrt, wobei eine bei Firnbilanzmessungen mögliche Lochtiefenskala von 1 - 6 m Tiefe an verschiedenen Firnpunkten sowohl im Frühling wie im Herbst untersucht wurde. Zusätzlich wurden einige Vergleichsmessungen in unvergletschertem Gelände gemacht und miteinbezogen, wobei dort jede Messtelle ein anderes Raumgewichts-Tiefenprofil aufwies.

Bei all diesen Messungen ergab sich die für die Eichung und Anwendung wichtige Tatsache, dass der Bohrlochdurchmesser und damit die Neutronenzählrate beträchtlich von der Bohrlochtiefe, der Messtiefe im Bohrloch und in geringem Masse auch von der Bohrtechnik abhängt.

Um die im weiten Bohrloch erreichte Messgenauigkeit und die spezifischen Vor- und Nachteile dieser Bohrlochart mit denen des üblichen engen Bohrloches vergleichen zu können, wurde die Eichung auch im engen Bohrloch vorgenommen. Diese Eichung blieb aber insofern unvollständig, als aus zeitlichen Gründen nur Schneeschichten von rund 2 m Tiefe (Bohrlochtiefen: 1 - 2.5 m) ausgemessen werden konnten, sodass der Einfluss der Bohrlochtiefe, der Messtiefe und der Bohrtechnik auf die Zählrate zu wenig in Erscheinung trat.

Die Messeinrichtung, die Verrohrung und die Eichtechnik für beide Bohrlocharten illustriert Abb. 24. Die zur Eichung nötigen Raumgewichtsbestimmungen wurden mit der Wägemethode mit Hilfe des Al-Zylinders (AHG) vorgenommen. Dazu wurde ein Schneeschacht möglichst nahe neben dem Bohrloch ausgehoben, und in der Tiefe von jeder Neutronensondenmessung wurden meistens zwei parallele, senkrechte Schneezylinder ausgestochen und gewogen. Die Zentren der Schneezylinder und der Neutronensondemessung befanden sich in der gleichen Tiefe unter der Schneeoberfläche. Entsprechend der ungefähren mittleren Einflusssphäre der Neutronensonde im SIPRE-Loch

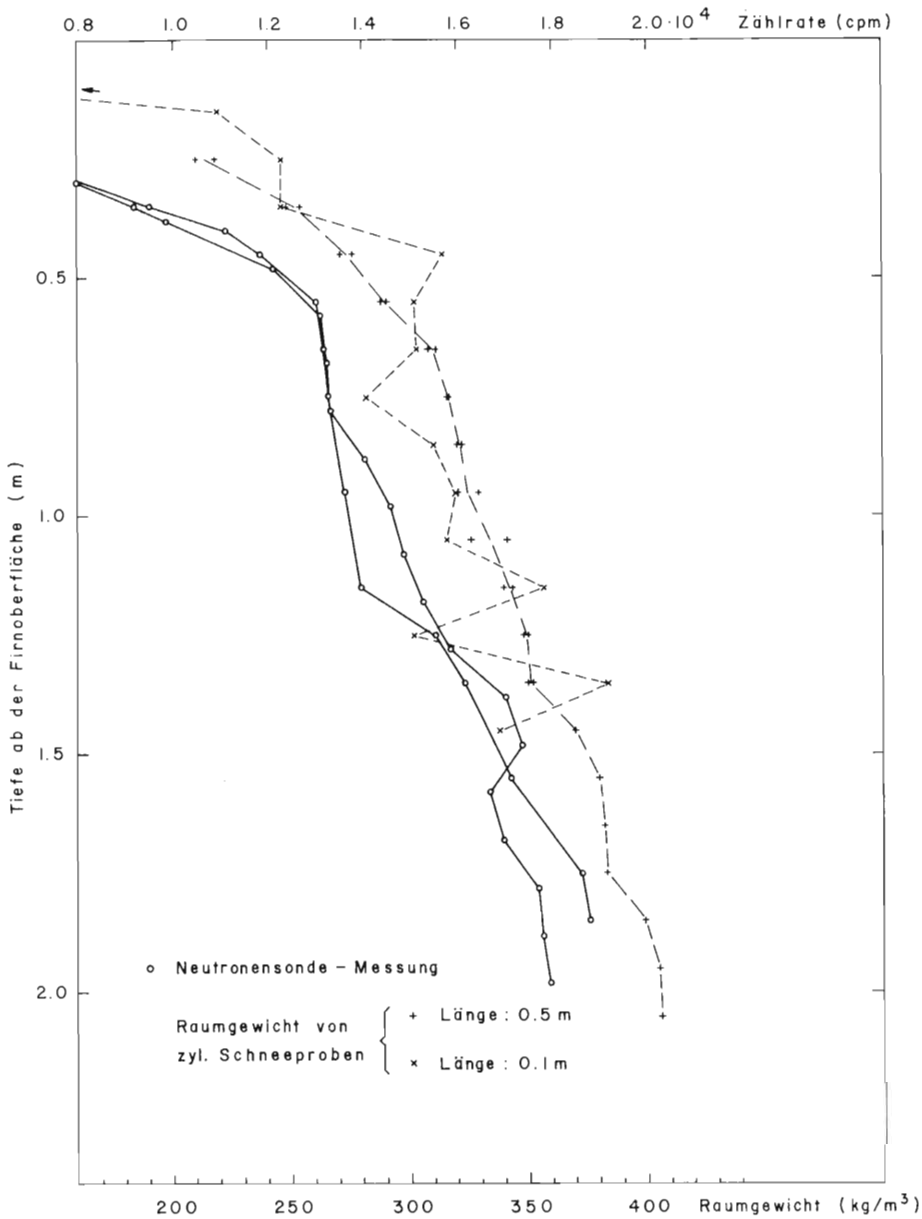

Abb. 26 Neutronensonde-Messung in einem SIPRE-Loch (2 x gemessen) und Zuordnung von zylindrischen Schneeproben.

wurden den gemessenen Zählraten Schneezylinder von 0.5 m Zylinderhöhe zugeordnet. Dass diese Zuordnung sinnvoll ist, ergibt sich aus Abb. 26, wo der ähnlich integrative Charakter der Neutronensonde und der Zylindermessung gezeigt wird. Aus Vergleichsgründen wurden in dieser Abbildung noch Zylindermessungen von nur 0.1 m Länge aber grösserer Grundfläche eingezeichnet, wobei deren Raumgewichte infolge des kleinen vertikalen Bereiches wesentlich stärker schwanken.

Den Neutronensonde-Messungen im engen Bohrloch wurden 0.3 m lange Schneezylinder zugeordnet. Abb. 27 zeigt die Gegenüberstellung der Zählraten, die in den beiden Bohrlocharten gemessen wurden und zusätzlich noch die entsprechenden Schneezylinder. Das wesentlich stärkere Schwanken der Zählrate im engen Bohrloch beweist, dass hier die Neutronensonde viel differenzierter misst als im weiten SIPRE-Bohrloch. Desgleichen zeigen auch die mittleren Raumgewichte von nur 0.3 m langen Zylinderstücken eine leicht grössere Schwankung als die Raumgewichte von 0.5 m langen Probestücken.

Der grössere Bohrlochdurchmesser bewährte sich auch im Hinblick auf im Schnee vorhandene Eisschichten, die

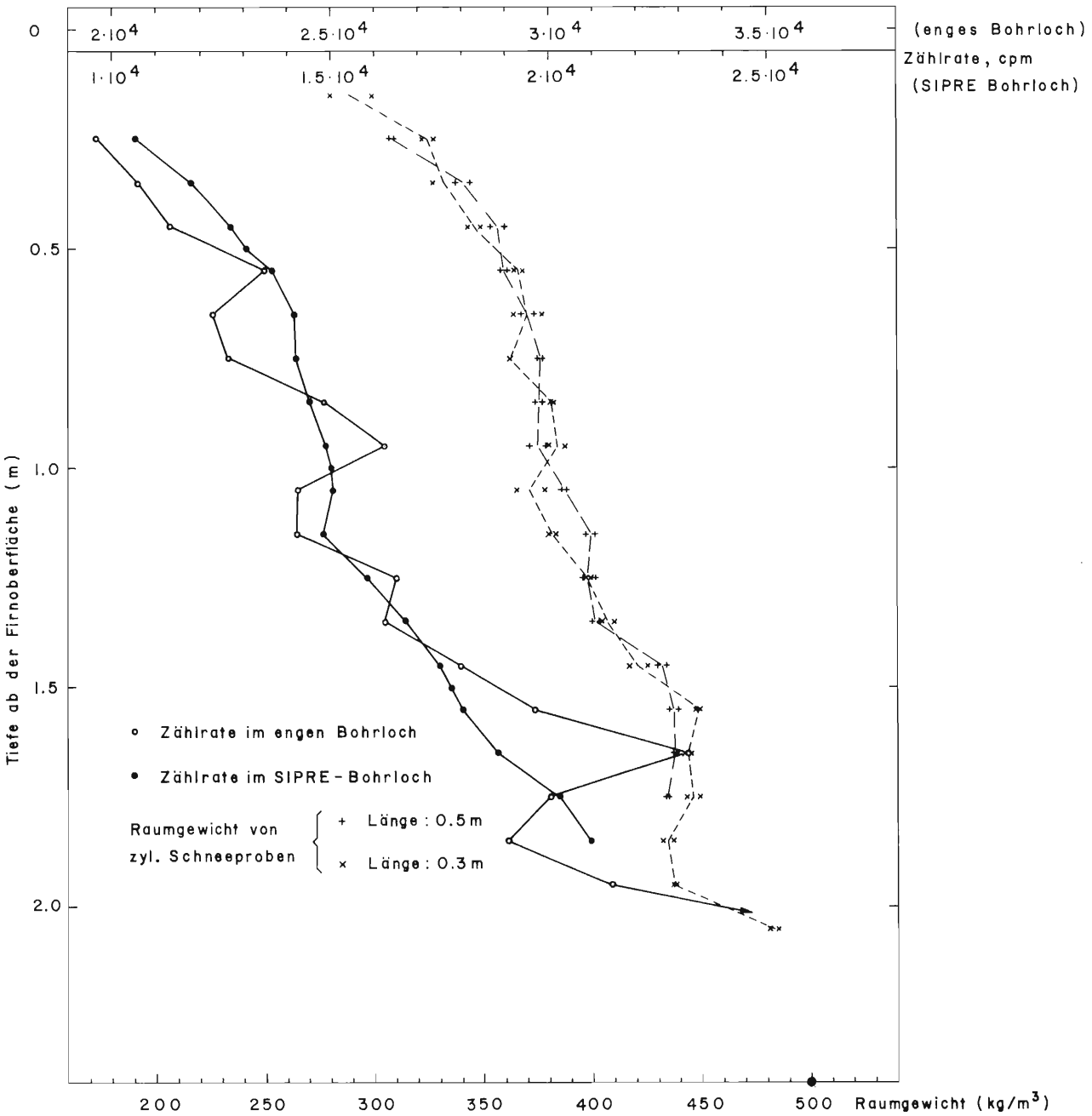

Abb. 27 Variation und Gegenüberstellung der Zählraten, die in den beiden Bohrlocharten gemessen wurden. Zusätzlich die Variation des Schneeraumgewichtes, das mit der Wägemethode bestimmt wurde.

gemäss den Messungen von Anderson et al. (1962), Smith et al. (1966) im engen Bohrloch einen sprungartigen Anstieg der Neutronen-Zählrate verursachen (bei einer Eis-Schichtdicke von 31 mm: 30%). Auch in der vorliegenden Untersuchung machte sich im engen Bohrloch ein Anstieg der Zählrate infolge von Eisschichten bemerkbar (ca. 5%). Der wesentlich kleinere Anstieg ist dem kleineren Auflösungsvermögen der hier benützten Neutronensonde zuzuschreiben, da ihr Zählrohr doppelt so lang ist, wie jenes, das von Anderson et al. (1962) und von Smith et al. (1966) benützt wurde.

Im weiten SIPRE-Loch hingegen verursachten, wie dies Abb. 28 zeigen soll, weder einzelne dicke, noch mehrere dünne Eisschichten einen starken Zählratenanstieg, d.h. die Zählrate erhöhte sich ungefähr in dem Masse, wie sich auch das mittlere Raumgewicht der Firnproben durch darin enthaltene Eisschichten erhöhte. Dieser Umstand ist deshalb wichtig, weil dadurch die Grundlage geschaffen wird, das mittlere Raumgewicht einer grossen Schnee-

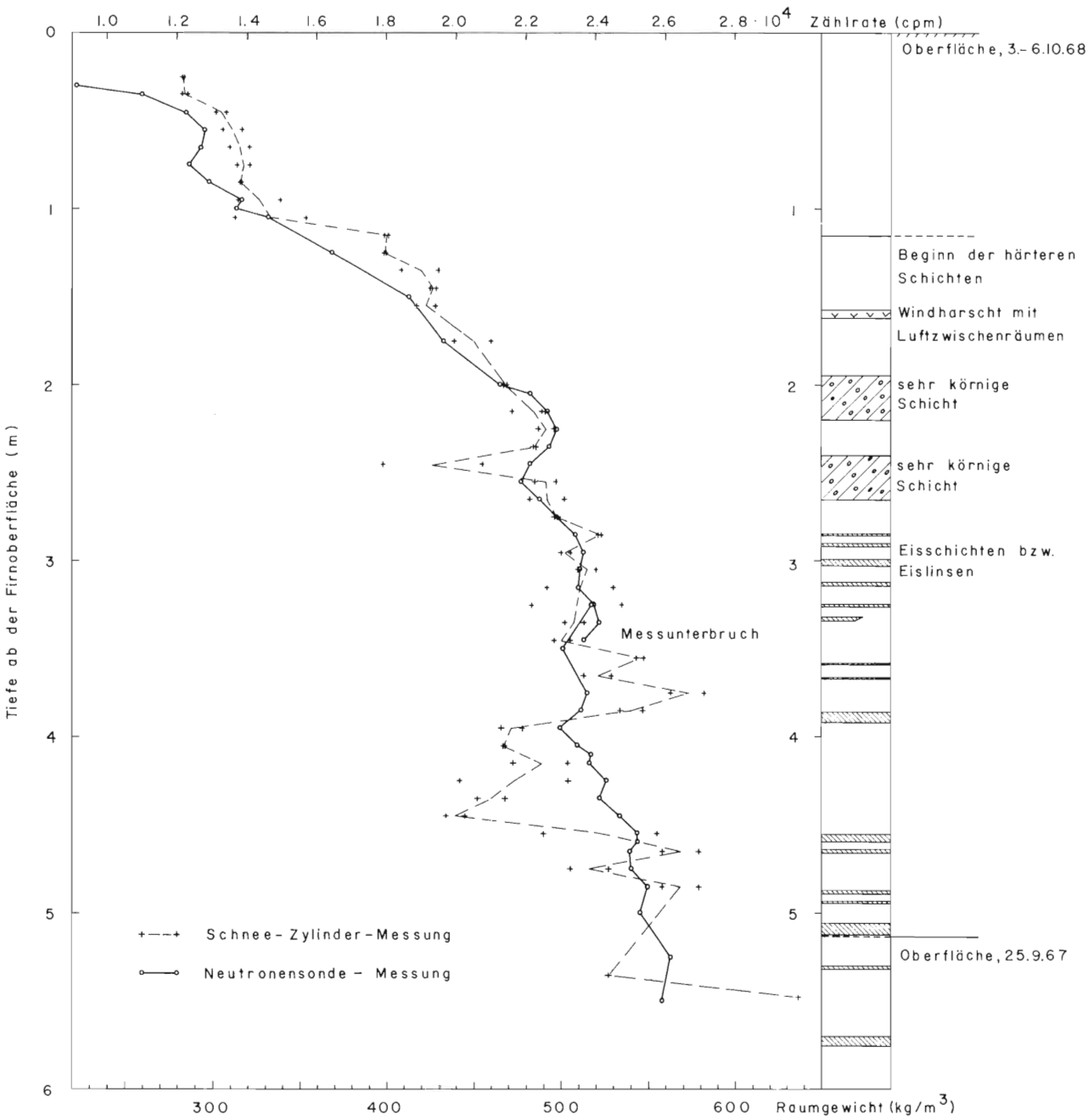

Abb. 28 Variation der Neutronensonde-Zählrate (SIPRE-Loch) und des Raumgewichtes (0.5 m lange, zylindrische Schneeproben) mit zunehmender Firntiefe, gemessen am 3. - 6.10.1968 auf 3500 m ü.M.

schicht mit relativ wenigen, in gewissem Abstand gemachten Neutronensonde-Messungen zu bestimmen. Würde nämlich die Zählrate im SIPRE-Loch ebenfalls bei jeder Eisschicht stark ansteigen, so könnte der Fall eintreten, dass bei der Vermessung eines Bohrloches zufällig meistens auf der Höhe einer Eisschicht gemessen würde, wodurch das mittlere Raumgewicht der Gesamt-Schneeschicht und damit der Gesamt-Wasserwert wesentlich zu hoch ausfallen würde.

Mit der ersten Neutronensonde-Messung wurde im Bohrloch jeweils erst in 0.3 m Tiefe unter der Schneeoberfläche begonnen, und die letzte Messtiefe befand sich 0.3 m über dem Bohrlochboden, damit die Messpunkt-Umgebung für alle Messtiefen dieselbe blieb.

6.4.6. Eichkurven

Gemäss theoretischen Berechnungen von Lorch (1963) und aufgrund der eigenen, aufgezeichneten experimentellen Werte durfte sowohl für das enge Bohrloch wie für das SIPRE-Bohrloch ein linearer Anstieg der Eichkurven erwartet werden.

In Abb. 29 sind die Neutronen-Zählraten der Messungen im engen Bohrloch und die entsprechenden Schneeraumgewichte von 0.3 m langen Schneezylindern aufgetragen (Anzahl Messungen, n = 134). Die Gleichung der Regressionsgeraden lautet:

$$\gamma_i = 1.13 \cdot 10^{-2} \cdot N + 96.8, \qquad (36)$$

wobei γ_i das Schneeraumgewicht in kg/m^3 und N die Neutronen-Zählrate in Impulsen pro Minute (cpm) bedeuten. Der Korrelationskoeffizient r = 0.993 ist mit 99.9% gesichert. Die Standardabweichung des Fehlers (des Residuums) beträgt S' = 18.9 kg/m^3, das Verhältnis der beiden Standardabweichungen S'/S = 0.114. Wesentliche Voraussetzung für die Anwendung der üblichen Schätz- und Testmethoden für die Regressionsparameter ist allerdings die gegenseitige stochastische Unabhängigkeit der Residuen. Diese Voraussetzung ist aber im vorliegenden Fall nicht ganz erfüllt, denn es wurden von ein und demselben Bohrloch jeweils mehrere Messwerte in die Analyse einbezogen, deren Fehler voneinander kaum ganz unabhängig sind.

Zur groben Abschätzung wurde deshalb nachträglich der Freiheitsgrad bei den Berechnungen der statistischen Sicherheit entsprechend der Anzahl vermessener Bohrlöcher (Anzahl Bohrlöcher, n = 16) verringert. (Dies auch deswegen, weil das Raumgewicht zwar an jeder Messstelle mit wachsender Tiefe zunimmt, doch je nach Ort und Jahreszeit verschieden stark).

Die mit diesem stark verkleinerten Freiheitsgrad berechnete Sicherheit der Analyse verringerte sich aber nur geringfügig, sodass die obigen Angaben als gesichert betrachtet werden können.

Wie schon erwähnt, wurde die Eichung der Neutronensonde im SIPRE-Loch im Hinblick auf die spätere Benützung für Massenbilanz-Messungen vorgenommen. Da bei solchen Bilanz-Messungen meistens tiefe, routinemässig gebohrte Löcher ausgemessen werden, wurde mit Hilfe von Mehrfachregressionsanalysen nicht nur der Einfluss des Schneeraumgewichtes (γ_i), sondern auch jener der Messtiefe (H) und der Bohrlochtiefe (L) auf die Neutronen-Zählrate (N) untersucht.

Durch graphisches Auftragen der Gesamtheit aller Raumgewichts-Messwerte in Funktion der entsprechenden Zählraten konnten die Ansätze für die Regressionsanalysen und die Nützlichkeit verschiedener Gruppenbildungen abgeschätzt werden. So schien zum vorneherein, infolge der Linearität der Beziehungen, das Einteilen der Werte in viele kleine Raumgewichts-Gruppen unergiebig und unnötig. - Bei den ersten Analysen wurden nur zwei Unabhängige explizit eingeführt: Die Neutronenzählrate in linearer Form, die Messtiefe einmal linear und einmal logarithmisch. Die Lochtiefe wurde insofern berücksichtigt, als die Werte in zwei verschiedene Gruppen unterteilt wurden: Daten aus Löchern von 0 - 3 m und solche aus Löchern von 3 - 6 m. Die verschiedenen Analysen, die mit beiden Gruppen gemacht wurden, erbrachten zwar die Berechtigung dieser Gruppenbildung, doch wurde für die weiteren Analysen aufgrund der Ueberlegung, dass der Lochtiefe-Einfluss kontinuierlich sein müsse, die Lochtiefe zusätzlich als dritte Unabhängige in linearer Form berücksichtigt und auf die Gruppenbildung verzichtet.

In Abb. 30 ist die Grundgesamtheit der Messwerte aufgezeichnet. Die Eichkurvenschar, die aufgrund der in Tabelle 2 dargestellten Gleichungen 1a und 2a errechnet wurde, ist am jeweiligen Ende des Punkteschwarms auf der gleichen Abbildung eingezeichnet, wobei die Geradenschar links unten die Eichkurvenschar bei linearem Ansatz für Mess- und Lochtiefe darstellt. Aus Darstellungsgründen wurde die dritte Unabhängige, die Lochtiefe,

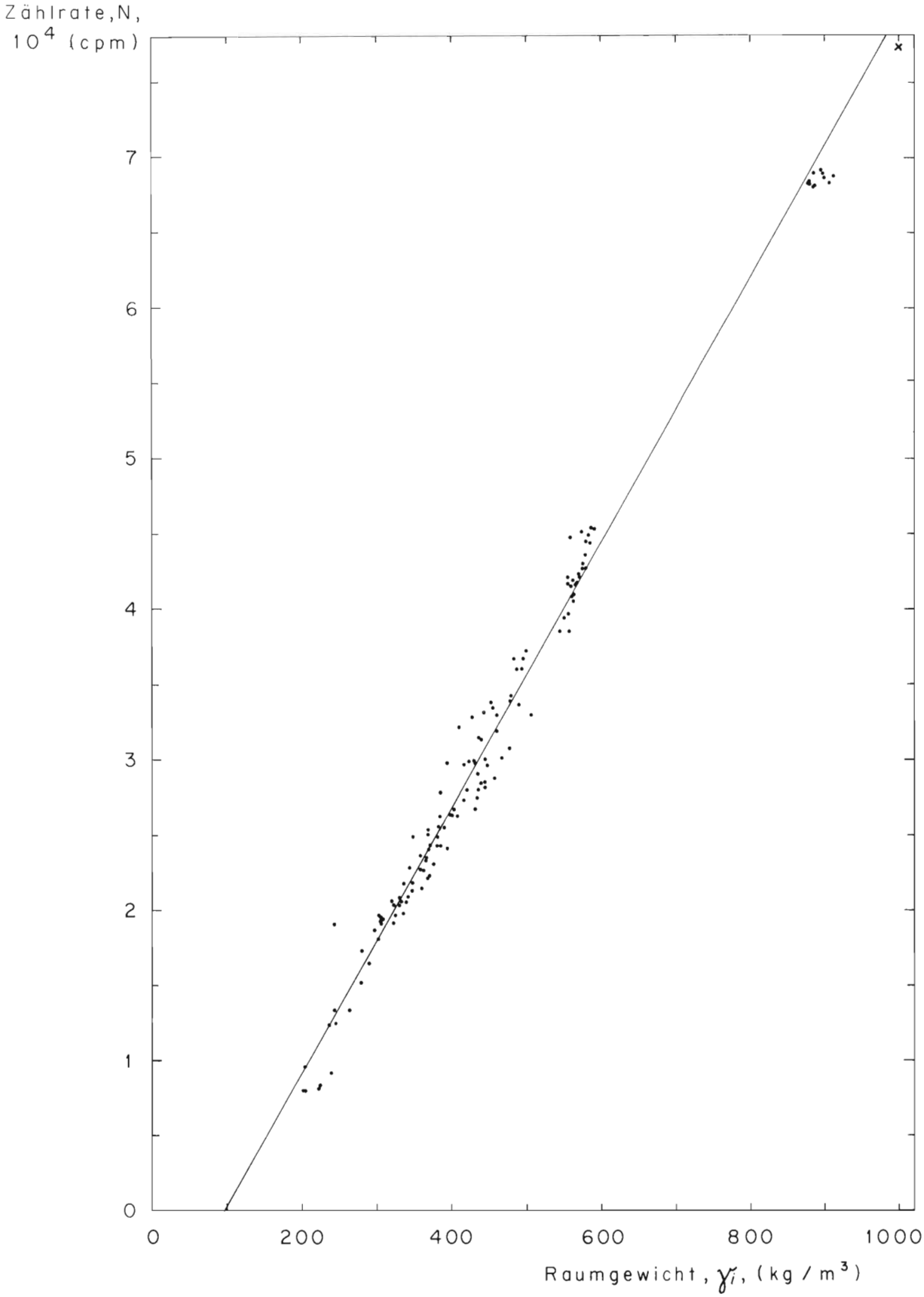

Abb. 29 Grundgesamtheit der Messwerte, gemessen in engen Bohrlöchern, und entsprechende Regressionsgerade (Eichkurve).

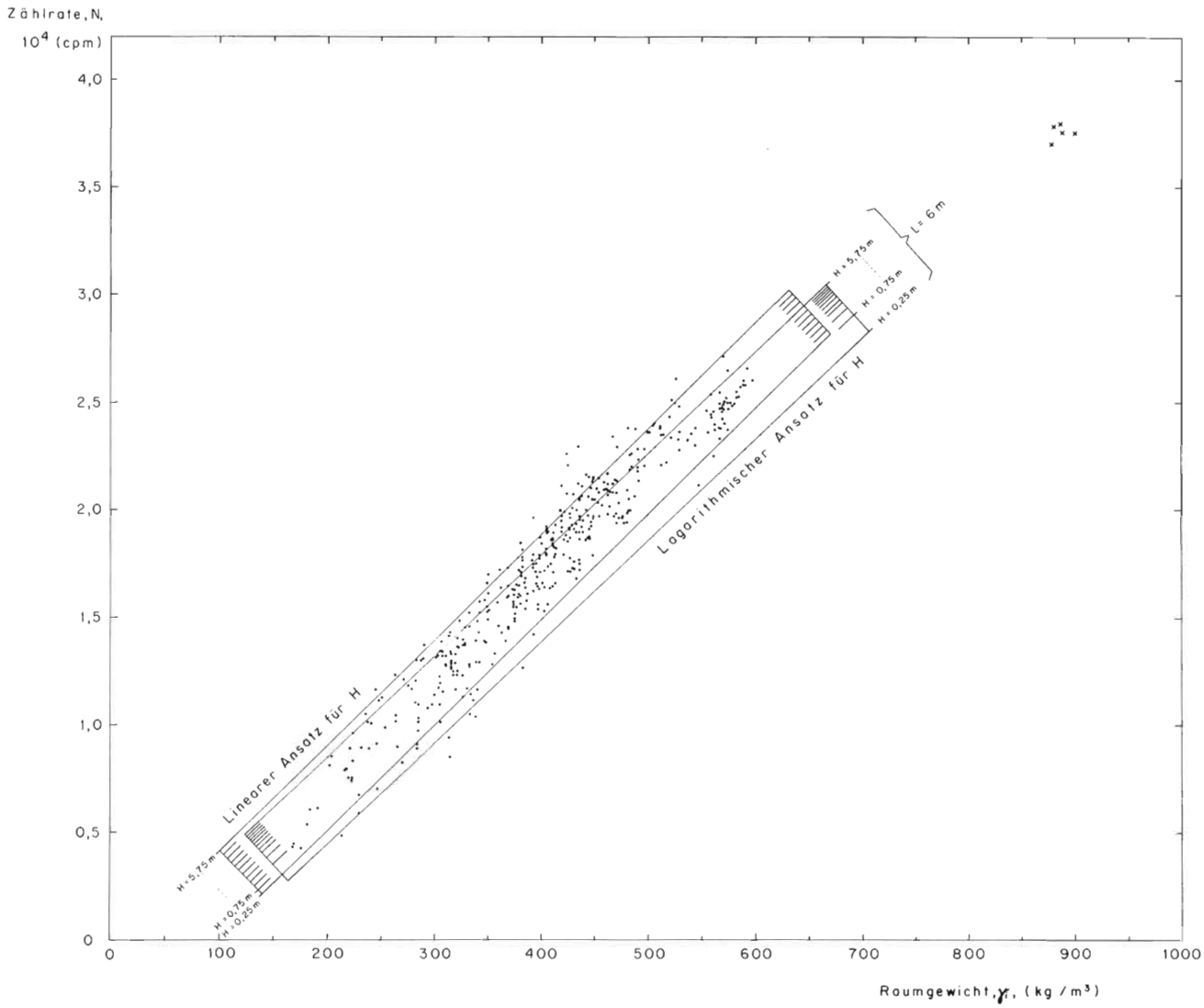

Abb. 30 Grundgesamtheit der Messwerte, gemessen in SIPRE-Löchern, und entsprechende Eichgeradenschar für den Fall, dass die Lochtiefe 6 m beträgt.

konstant gehalten (L = 6 m). Die Geradenschar rechts oben ergibt sich bei logarithmischem Ansatz für die Messtiefe und entspricht ebenfalls einer konstanten Lochtiefe von 6 m. Die Lochtiefe von 6 m wurde deshalb zur Darstellung gewählt, weil die entsprechenden Geradenscharen für alle anderen Lochtiefen innerhalb der jeweils äussersten Geraden der dargestellten Geradenscharen liegen. Die beiden Geradenscharen müssten natürlich über den ganzen Punktschwarm hinweg-verlängert werden, was auf der Abbildung aber unterlassen wurde, um die Darstellung nicht unübersichtlich zu machen.

Da bei der statistischen Behandlung des Zahlenmaterials die Frage auftauchte, wie weit die vorhandene gegenseitige Abhängigkeit der Fehler von Messwerten, die nahe beieinander im gleichen Bohrloch erhalten wurden, den Zufallscharakter der Analyse beeinflusse, wurden für die Analysen 1a und 2a nochmals analoge Analysen durchgeführt. Dabei wurden von jedem Bohrloch durch mehr oder weniger zufällige Auswahl nur je 2 Messwerte berücksichtigt, wobei der eine eher im oberen, der andere eher im unteren Teil des Bohrloches lag. Die so aus 24 Bohrlöchern gewonnenen 48 Messwerte bestätigten aber anhand der durchgeführten Analysen 1b und 2b die Ergebnisse der ersten Analysen, indem begreiflicherweise die Standardabweichungen grösser wurden, doch die Korrelation und deren statistische Sicherheit annähernd dieselben blieben.

Die Eich-Regressionsgleichungen 1a und 2a können beide aufgrund ihrer ähnlichen Korrelationskoeffizienten zur

Tabelle 2: Eich-Regressionsgleichungen für SIPRE-Löcher, wobei das Schneeraumgewicht (γ_i) mit der Neutronen-Zählrate (N), der Messtiefe (H) und der Lochtiefe (L) korreliert wurde.
Schneeraumgewicht in kg/m^3 ; Neutronen-Zählrate in Impulsen pro Minute (cpm) ; Messtiefe und Lochtiefe in m.

Analysen Nr.	Anzahl Messwerte	Eich-Regressionsgleichungen	$\bar{\gamma}_i$	S'	$\frac{S'}{\bar{S}}$	R	$r_{Partiell}$
1a	n = 402	$\gamma_i = 2.04106 \cdot 10^{-2} \cdot N - 14.6364 \cdot H + 10.6844 \cdot L + 34.9712$	403	$2.15 \cdot 10^1$	$2.26 \cdot 10^1$	0.974^{***}	r_N: 0.960 r_H: -0.458 r_L: 0.529
1b	n = 48	$\gamma_i = 2.0674 \cdot 10^{-2} \cdot N - 17.817 \cdot H + 14.337 \cdot L + 24.077$	389	$2.44 \cdot 10^1$	$2.35 \cdot 10^{-1}$	0.973^{***}	r_N: 0.957 r_H: -0.485 r_L: 0.591
2a	n = 402	$\gamma_i = 2.1216 \cdot 10^{-2} \cdot N - 2.7426 \cdot 10^3 \cdot \ln H + 10.192 \cdot L + 1.3155 \cdot 10^2$	403	$2.07 \cdot 10^1$	$2.17 \cdot 10^{-1}$	0.976^{***}	r_N: 0.958 r_H: -0.522 r_L: 0.553
2b	n = 48	$\gamma_i = 2.1529 \cdot 10^{-2} \cdot N - 2.9994 \cdot 10^3 \cdot \ln H + 12.461 \cdot L + 1.2989 \cdot 10^2$	389	$2.29 \cdot 10^1$	$2.20 \cdot 10^{-1}$	0.977^{***}	r_N: 0.960 r_H: -0.573 r_L: 0.605

Interpretation von Neutronensondemessungen benützt werden, wobei die Regressionsgleichung 2a (logarithmische Messtiefenabhängigkeit) bei Vermessung von wenig tiefen Bohrlöchern in lockerem Oberflächenschnee wohl einen besseren Schätzwert für das Raumgewicht ergibt.

Zur raschen Interpretation von Neutronensonde-Messungen können die Eich-Regressionsgleichungen in eine Form gebracht werden, wie dies Abb. 31 zeigt. Dabei wird die lineare Beziehung der vier Variablen (von Analyse 1a) in einem Leiternomogramm wiedergegeben.

In Abb. 29 (Eichkurve für Messungen im engen Bohrloch) ist noch die in Wasser gemessene Zählrate aufgetragen, obwohl dieser Wert nicht in die Regressionsanalyse einbezogen wurde. Diese Zählrate ist um rund 3% kleiner, als es der erstellten Regressionsgleichung entspricht. Eine wesentliche Abweichung der "Eis"-Werte, wie sie Anderson et al. (1962) beschrieben, konnte nicht beobachtet werden, sodass die "Eis"-Werte ebenfalls in die Regressionsanalyse einbezogen wurden.

Hingegen sind die in Abb. 30 (Eichkurvenschar für Messungen im SIPRE-Bohrloch) eingezeichneten "Eis"-Werte nicht in die Regressionsanalyse einbezogen worden, weil der Bohrloch-Einfluss (Lochtiefe, Messtiefe) und das Raumgewichtsprofil in Eis zu verschieden sind, als dass die "Eis"-Werte mit den "Schnee-Firn"-Werten in den gleichen Analysen verarbeitet werden könnten. - Die im Rahmen verschiedener Arbeiten beobachteten, zu geringen Neutronen-Zählraten in Wasser müssen übrigens nicht durch den verschiedenen Aggregatszustand der Streumaterie erklärt werden, sondern lassen sich durch das begrenzte Auflösungsvermögen des Zählrohrs und des Zählers erklären, indem beide, falls die Anzahl ankommender Impulse sehr gross wird, einen bestimmten Prozentsatz gar nicht zu registrieren vermögen. Aus dem gleichen Grunde wurden wohl bei Messungen in Eis oft zu geringe Zählraten beobachtet.

Freies Wasser, das bei einigen Messungen sicher im Schnee vorhanden war, bewirkte ebenfalls keine merkbare Aenderung der Zählrate.

6.4.7. Genauigkeit und Anwendungsbereich

Die Reststreuung S' (Standard-Abweichung des Residuums) der Regressionsgleichung 1a beträgt gemäss Tabelle 2 21 kg/m^3, was für den Mittelwert der beobachteten Raumgewichte ($\bar{\gamma}_i$ = 400 kg/m^3) einen mittleren Fehler von 5% ausmacht. In dieser Reststreuung sind die Abweichungen, die durch den schwankenden Neutronenfluss, die Unregelmässigkeiten der Bohrtechnik, die zufälligen Spannungsschwankungen und die natürliche Streuung des Schneeraumgewichtes entstanden, enthalten. Um die beachtliche Reststreuung verstehen zu können, soll noch kurz auf die einzelnen Glieder eingegangen werden.

Die Emission und die Zählung der Neutronen sind ein Zufallsprozess. Mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 1% liegt der zufällige Fehler der Zählrate einer Einzelmessung innerhalb der Grenzen:

$$f_{99\%} = \pm \frac{2.58 \cdot \sqrt{N}}{\sqrt{t}} \quad \text{(cpm)}, \qquad (36)$$

wobei N die Zählrate in cpm und t die Messzeit in Minuten bezeichnet. Der zufällige Fehler der Zählrate könnte also mit entsprechend grossem zeitlichem Aufwand (4 x längere Messzeit verkleinert den Fehler auf die Hälfte) wesentlich verkleinert werden. Es zeigte sich aber bei allen Messungen immer wieder, dass die Differenzen zwischen sich folgenden, beobachteten Zählraten zu oft grösser waren, als die durch Gleichung (36) beschriebenen Fehlergrenzen dies erlauben würden. Sehr wahrscheinlich überlagern sich dem "Zähl"-Fehler noch Schwankungen, die durch die Apparate-Elektronik bedingt sind, wobei diese aber weder von der Umgebungstemperatur noch vom Ladungszustand der Batterien merkbar abhängen. Diese Schwankungen, die sich sowohl bei der Mes-

sung der "Standard"-Zählrate wie bei Messungen im Schnee bemerkbar machen, weisen auch keine bestimmte steigende oder fallende Tendenz auf, sodass sie sich durch periodisches Messen der "Standard"-Zählrate und das Bilden einer Verhältniszahl: Zählrate/"Standard"-Zählrate eliminieren liessen. Durch diesen Umstand bedingt, liegt die Reproduzierbarkeit der Neutronensonde-Zählraten bei 1.5%. Es hat also bei Routinemessungen wenig Sinn, den zufälligen Fehler der Zählrate der einzelnen Messung durch lange Messzeiten auf Bruchteile von Prozenten zu verkleinern, da ihm immer die apparatebedingte Schwankung überlagert ist, deren Periodizität nicht bekannt ist.

Der grösste Teil der genannten Reststreuung ist hingegen durch die natürliche Streuung der Raumgewichte in den Schneeschichten und die Bohrtechnik bedingt. Wie im Abschnitt 6.3.3. gezeigt wurde, beträgt beim Wägeverfahren die mittlere Streuung der Einzelmessung, falls dichte Firnschichten untersucht wurden, 3.2%, wobei nur ein geringer Teil dieser Streuung auf das Messverfahren selbst zurückzuführen ist.

Was die Bohrtechnik anbetrifft, so wird der Bohrlochdurchmesser in einer bestimmten Tiefe auch bei gleicher Bohrlochtiefe immer gewissen Schwankungen unterworfen sein, die von der Schneebeschaffenheit und der Bohrtechnik des Bohrenden abhängen. Diese Streuung könnte eventuell verringert werden, wenn ein motorgetriebener Bohrer zur Verfügung stünde, da dabei der Vortrieb konstant gehalten werden könnte. (Der im Rahmen dieser Arbeit ausprobierte Bohrermotor war zu schwach, um damit genügend grosse Löcher bohren zu können).

Das der Eichung entsprechende Messvorgehen bei Massenbilanzmessungen ist prinzipiell dasselbe, wie es beim Wägeverfahren angewandt wird. Die Zählrate wird im SIPRE-Loch im vertikalen Abstand von 0.5 m gemessen, indem bei 0.3 m unter der Firnoberfläche begonnen wird. Mit Hilfe der Eichkurve (Abb. 31) wird dann das mittlere Raumgewicht der Umgebung des Messpunktes bestimmt und durch Multiplikation mit der entsprechenden Schichthöhe von 0.5 m in Wasserwertseinheiten umgerechnet; anschliessend werden die einzelnen Wasserwerte zum Gesamtwasserwert aufsummiert.

Ob die Standard-Abweichung dieses Gesamt-Wasserwertes relativ gesehen von der gleichen Grössenordnung oder eher kleiner ist als die Standard-Abweichung der Einzelmessung, hängt davon ab, wie stark die einzelnen Messwerte im Bohrloch voneinander abhängig und ob die Standard-Abweichungen der aufsummierten, einzelnen Wasserwerte ungefähr gleich gross sind. Da man aber für die meisten Glieder, die diese Standard-Abweichung beeinflussen (z.B. schwankender Neutronenfluss, Spannungsschwankungen, natürliche Streuung der Schneeraumgewichte) eine Zufallsverteilung annehmen darf, wird die Standard-Abweichung des Gesamtwasserwertes meistens kleiner sein als die der Einzelmessungen.

Auch wenn der mit der Neutronensonde gemessene einzelne Gesamtwasserwert eine leicht höhere Standard-Abweichung aufweist als der Gesamtwasserwert, der mit dem Wägeverfahren erhalten wird, so besteht doch bei der Neutronensonde-Methode die Möglichkeit, mehrere Bestimmungen am gleichen Messplatz vorzunehmen, wodurch sich die Standard-Abweichung um den Faktor $1/\sqrt{n}$ (n = Anzahl Bestimmungen) verkleinern lässt.

Der Zeitaufwand für die Bestimmung des Gesamtwasserwertes an einer Messstelle setzt sich aus der Zeit, die für das Abteufen des Bohrloches und die Messung im Bohrloch benötigt wird, zusammen. Falls die zu messende Schneeschicht 6 m beträgt, benötigt ein 2 Mann-Team rund zwei Stunden für das Bohren des SIPRE-Bohrloches. Die für die eigentliche Messung benötigte Zeit beträgt 24 Minuten, wenn man voraussetzt, dass die Messzeit pro Einzelmessung, die im Bohrloch in einem Abstand von 0.5 m gemacht werden, 2 Minuten beträgt. Da die Neutronensonde nach jeder Einzelmessung versetzt werden muss, erhöht sich die gesamte, für die Messung eines 6 m tiefen Bohrloches benötigte Zeit auf rund eine Stunde.

Ein 3 Mann-Team kann demzufolge im Tag rund 4 Bohrlöcher von 6 m Tiefe vermessen, wobei das Vorgehen so ist, dass zwei Männer vorausgehen und an vorher bestimmten Stellen die Löcher bohren und der dritte Mann ihnen folgt und diese mit der Neutronensonde vermisst. Aus dem Gesagten wird ersichtlich, dass die Gesamtzeit pro Bohrloch-Vermessung vor allem durch die für das Bohren benötigte Zeit bestimmt wird. Wenn für die müh-

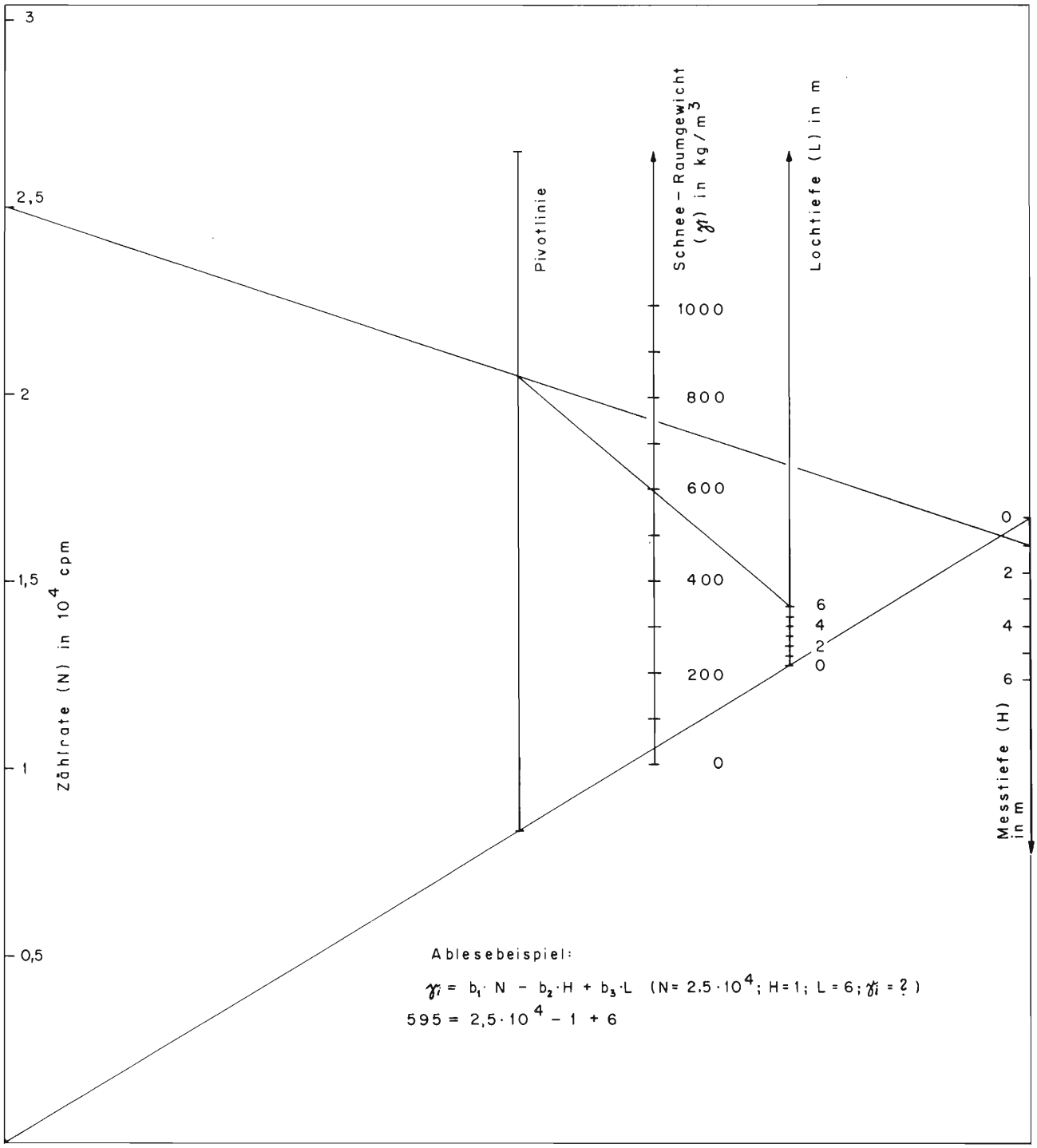

Abb. 31 Eichgeradenschar $\gamma_i = f$ (N, H, L) für die Neutronensonde bei Messungen in SIPRE-Löchern, dargestellt als Leiternomogramm.

same Bohrarbeit ein Motor zur Verfügung steht, kann diese Gesamtzeit pro Bohrloch noch wesentlich verringert werden.

Da die gesamte Ausrüstung (Neutronensonde, Verrohrung, Bohrer mit Verlängerungen) rund 45 bis 50 kg wiegt, ist ein Motorschlitten fast unerlässlich. Leider stand für den grössten Teil der Neutronensonde-Messungen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, kein solches Fahrzeug zur Verfügung, wodurch allzuviel Zeit durch den Transport der Ausrüstung verloren ging.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Neutronensonde-Messmethode, trotz gewisser Nachteile, wie sie das Gewicht der Ausrüstung und eine grössere Standard-Abweichung der Einzelmessung darstellen, erstmals die Möglichkeit bietet, ein ganzes Firngebiet systematisch zu vermessen. Für routinemässige, jährliche Massenbilanzmessungen bedeutet sie insofern eine Erleichterung, als damit in kurzer Zeit einige repräsentative Firnpunkte vermessen werden können, wozu schon zwei bis drei Tage mit schönem Wetter ausreichen, während das Wägeverfahren infolge des aufwendigen Grabens mehrerer Firnschächte eine längere Schönwetterperiode erfordert.

6.5. BESTIMMUNG DES MITTLEREN RAUMGEWICHTES BZW. DES WASSERWERTES MIT HILFE VON DRUCKKISSEN

6.5.1. Problemstellung

Die Erfahrungen, die mit Schnee-Druckkissen in unvergletschertem Gelände gemacht wurden (Beaumont, 1965; Penton and Robertson, 1967) können folgendermassen zusammengefasst werden: Schneedruck-Kissen von grossem Durchmesser (ø = 3.7 m) erlauben, Gesamtwasserwerte bis ca. 2000 mm mit einem Fehler von rund 5% zu bestimmen. Temperatur- und Luftdruckunterschiede beeinflussen das Druck-System nur geringfügig und können vernachlässigt werden. Die wichtigste Erfahrung im Hinblick auf ihre Verwendung für Massenbilanzmessungen war aber die, dass der Fehler der Messung bei kleinen Kissen grösser ist als bei grossen, und dass er mit zunehmendem Gesamtwasserwert grösser wird.

Trotz der genannten Erfahrungen kamen für die Druckkissenversuche im Rahmen dieser Arbeit keine grossflächigen Druckkissen in Frage, weil der damit verbundene finanzielle Aufwand zu gross gewesen wäre. Dies sollen einige Zahlen erläutern:

- Die von den genannten Autoren verwendeten Druckkissen sind aus Butyl-Gummi oder Neopren angefertigt und käuflich erhältlich. Ein einzelnes, grosses Kissen (ø = 3.7 m) kostet ohne Zuleitungen und sonstige Installationen rund 4000 SFr.
- Die Kissen werden meistens mit einer Mischung von Methylalkohol und Wasser gefüllt, wobei die Füllmenge beim genannten grossen Kissen rund 1 m^3 beträgt. Da man diese Füllmenge zu den teilweise abgelegenen Messstellen transportieren muss, entstehen grosse Transportprobleme.
- Die aufwendige Ausrüstung zur Registrierung und Ablesung der Druckunterschiede (Schwimmer oder Manometer mit Registriereinrichtung) erfordert eine periodische Wartung und bedeutet einen zusätzlichen finanziellen Aufwand.
- Die ganze Messanordnung kann nur während eines Bilanzjahres benützt werden und ein Ausgraben der Kissen ist illusorisch, da man mit solchen Druckkissen gerade das Ausheben eines Firnschachtes umgehen möchte.

Die Problemstellung für die hier beschriebenen Versuche umfasste deshalb zwei Fragen: Erstens, ob und wieweit mit geringem finanziellem Aufwand (kleine Kissen mit geringen Füllmengen) ein einfaches Druckkissen-System geschaffen werden könnte, das den extremen Hochgebirgsverhältnissen materialmässig gewachsen wäre. Zweitens, wie stark die spezifischen Firnverhältnisse, etwa die Setzung der Kissenunterlage und der Steigrohrbefestigung (Pegelstange), vorhandene Eisschichten und die grosse, oft windgepresste Schneeüberlagerung, die Genauigkeit der Messung beeinträchtigen würden.

6.5.2. Messprinzip

Zur Zeit der Kissenauslage weist die Frostschutzlösung im kommunizierenden Gefässsystem, bestehend aus Druckkissen und Steigrohr, überall den gleichen hydrostatischen Druck auf, d.h. die Flüssigkeitsniveaus stehen gleich hoch ($h_1 = h_2$).

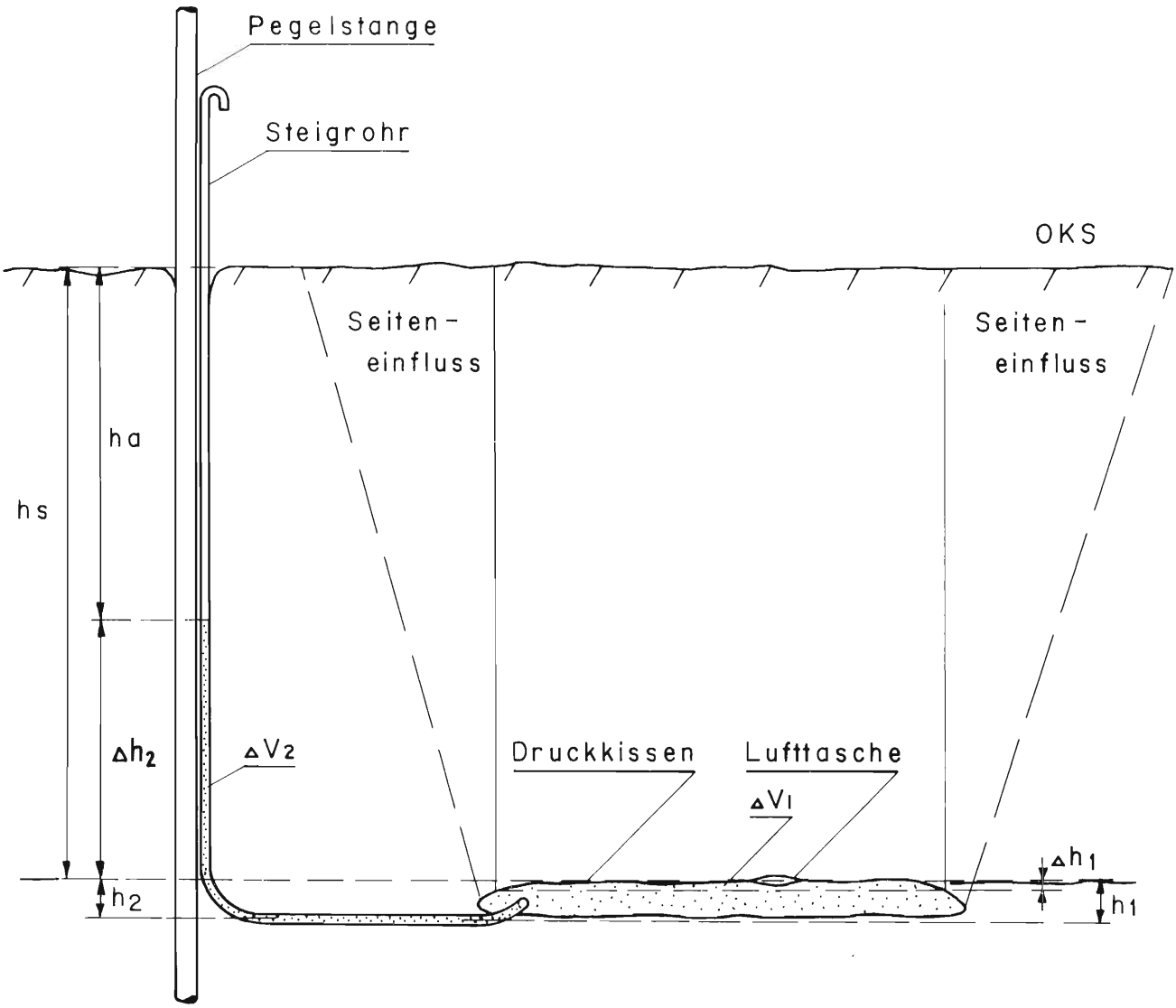

Abb. 32 Messanordnung eines Schneedruckkissens.

Durch die fortlaufende Schneeakkumulation überlagert sich auf der Kissenseite dem Flüssigkeitsdruck der Schneedruck (p_s), und durch die allseitige Druckfortpflanzung verschieben sich die beiden Niveaus in entgegengesetzter Richtung, wie dies Abb. 32 darstellt:

$$p_s + \gamma_{Fl} \; (h_1 - \Delta h_1) = \gamma_{Fl} \; (h_2 + \Delta h_2). \qquad (37)$$

Der Schneedruck (p_s) entspricht dem Wasserwert der Schneeüberlagerung, und die Bestimmungsgleichung lautet:

$$\gamma_w \cdot h_w = \gamma_{Fl} \; (\Delta h_2 + \Delta h_1); \qquad (38)$$

diese Gleichung kann unter Vernachlässigung der sehr kleinen Höhendifferenz Δh_1 geschrieben werden:

$$\gamma_W \cdot h_W = \gamma_{Fl} \cdot \Delta h_2 = \gamma_{Fl} \cdot (h_s - h_a) \qquad (39)$$

Δh_1, Δh_2 = Verschiebung der Flüssigkeitsniveaus im Druckkissen, bzw. im Steigrohr; h_W = Wasserwert der Schneeüberlagerung.

h_s = Schneehöhe, h_a = Abstichhöhe von der Schneeoberfläche auf das Niveau im Steigrohr, γ_{Fl} = spezifisches Gewicht der Füllflüssigkeit, γ_W = spezifisches Gewicht von Wasser.

6.5.3. Vorversuche

Um das in Frage kommende Kissenmaterial, die Steigrohre und die Kupplungen auszuprobieren, wurden im Winter 1966/67 zwei kleine selbstgeschweisste Polyaethylen-Kissen auf der Schneemessstation Käserstatt (Hasliberg, BE) ausgelegt. Die Steigrohre bestanden aus steifen Polyaethylen-Schläuchen (ø = 5.5 x 8 mm) und die Füllflüssigkeit aus einer Mischung von Frostschutz-Lösung und Wasser. - Das eine Kissen blieb intakt, zeigte aber im Frühling rund 25% zuwenig Wasserwert an, was möglicherweise auf Gewölbewirkung infolge der bei der Installation des Kissens erfolgten Störung zurückzuführen ist; das Kissen war in einem Loch der bereits vorhandenen Schneedecke ausgelegt worden. Das zweite Kissen hatte einen Riss und war ausgelaufen. Das genannte Polyaethylen-Material liess sich also mit der verwendeten punktförmigen Schweisstechnik nicht befriedigend verarbeiten.

Im November 1967 wurden mit Erlaubnis von Herrn Professor M. de Quervain auf dem Versuchsfeld SLF, Weissfluhjoch, drei weitere Druckkissen und ein 5 m langer Butylgummischlauch ausgelegt. Das verwendete Material und die verschiedenen Auslagebedingungen zeigt Tabelle 3. Leider besitzen die verwendeten, käuflichen Matratzen nicht 2 verschiedene Ventile, sodass beim Füllen der Kissen mit Flüssigkeit nicht die gesamte darin befindliche Luft entweichen kann. Um diesen "Fülleffekt" gut beobachten zu können, wurden die Kissen verschieden stark gefüllt. Sowohl die Kissen als auch der Schlauch wurden auf eine horizontale Unterlage aus Holzbrettern gelegt, und die Steigrohre wurden in rund 2 m Entfernung an einer Pegelstange in die Höhe geführt.

Zur Messung der Flüssigkeitssteighöhe im Steigrohr wurde ein einfaches und doch wirksames Abstichsystem verwendet. - Dabei wird das untere Ende eines dünnen, flexiblen Polyaethylen-Schläuchleins, dessen äusserer Durchmesser ungefähr dem inneren Durchmesser des Steigrohres entspricht, langsam in das Steigrohr eingeführt, während das obere Ende des Schläuchleins mit einer Speichelblase versehen wird. Sobald das untere Ende des Abstichschläuchleins in die Flüssigkeit im Steigrohr eintaucht, wird die Speichelblase am oberen Ende durch die Kompression der Luftsäule ausgestossen. Aus der Differenz zwischen der Schneehöhe (h_s) und der Abstichhöhe (h_a) kann die Steighöhe (Δh_2) gemäss Gleichung (39) gefunden werden. Indem diese Steighöhe noch um die mittlere Eindringtiefe des Schläuchleins in die Flüssigkeitsfläche korrigiert wird und auch das spezifische Gewicht der Füllflüssigkeit in Rechnung gezogen wird, erhält man den Gesamtwasserwert der Schneeschicht, die das Kissen überlagert.

Die Kissenabstiche wurden jeweils am 1. und 15. jedes Monats von Herrn Beck (SLF) vorgenommen, dem ich an dieser Stelle dafür danken möchte.

Parallel dazu wurde der Gesamtwasserwert der Schneedecke in einem rund 20 m entfernten Schneeschacht mit Hilfe der Wägemethode bestimmt. Die dabei erhaltenen Resultate zeigt Abb. 33.

Beurteilung der Resultate: Die Kissen konnten leider erst Ende November, als schon 70 cm Neuschnee auf dem Versuchsfeld lagen, ausgelegt werden. Nach der Auslage wurden die Kissen wiederum mit Schnee zugedeckt. Das aus Abb. 33 ersichtliche Einpendeln der Kissenwasserwerte ist wohl auf diese anfängliche Störung und

Tabelle 3: Montage-Daten der Druckkissen, Versuchsfeld SLF, Weissfluhjoch, 2540 m ü.M., Winter 1966/67

Kissen 1:	Käufliche Gummi-Matratze mit Leinwand verstärkt; Mischungsverhältnis: Frostschutzlösung : Wasser ≈ 1 : 3; Fläche = 0.85 m^2, Kissenhöhe = 50 mm, γ_{Fl} = 1060 kg/m^3; Kissen auf das total mögliche Volumen mit Flüssigkeit gefüllt, Füllmenge rund 35 ℓ.
Kissen 2:	Käufliche Gummi-Matratze mit Leinwand verstärkt; Mischungsverhältnis: Frostschutzlösung : Wasser ≈ 1 : 4; Fläche = 0.85 m^2, Kissenhöhe = 40 mm, γ_{Fl} = 1038 kg/m^3; Kissen auf rund 2/3 des möglichen Volumens mit Flüssigkeit gefüllt, Füllmenge rund 25 ℓ.
Kissen 3:	Käufliche Plastic-Matratze; Mischungsverhältnis: Frostschutzlösung : Wasser ≈ 2 : 7; Fläche = 0.8 m^2, Kissenhöhe = 40 mm, γ_{Fl} 1050 kg/m^3; Kissen auf rund 2/3 des möglichen Volumens mit Flüssigkeit gefüllt, Füllmenge rund 20 ℓ.
Schlauch:	Butyl-Gummischlauch, ø = 35 mm, 5 m lang; Mischungsverhältnis: Frostschutzlösung : Wasser ≈ 1 : 4; γ_{Fl} = 1038 kg/m^3, Schlauch auf das total mögliche Volumen mit Flüssigkeit gefüllt, Füllmenge rund 5 ℓ.
Steigrohre:	Polyaethylen-Schläuche, ø = 5.5 x 8 mm.
Kupplungen:	Zylindrische Messing-Schraubkupplungen.
Ableseschläuchlein:	Polyaethylen-Schläuchlein, ø = 2 x 4 mm.

auf den Umstand, dass vorhandene Luftblasen zuerst entweichen mussten, zurückzuführen. Kissen 1, welches auf das total mögliche Volumen gefüllt wurde, zeigte zuerst und während rund zwei Monaten den richtigen Wasserwert an, während die übrigen Kissen erst später annähernd richtige Werte ergaben. Die Schlauch-"Wasserwerte" waren ganz allgemein viel zu hoch, da der dünne, gewölbte Schlauch einen unverhältnismässig grossen Anteil an Seitendrucken aufnahm. Im März machte sich aufgrund der Messwerte zunehmend eine Art Brückenbildung über den Kissen bemerkbar, deren Entwicklung leider nicht verfolgt werden konnte, da die an mehreren Stellen an der Pegelstange mit Plastic-Band befestigten Steigrohre vom sich setzenden Schnee mitgerissen, geknickt und damit abgeschnürt wurden. Es konnte somit eine Zeit lang kein Abstich gemacht werden. - Die Schneebrücken existierten anscheinend auch noch Ende Mai (vgl. Abb. 33), als die Abschnürung der Steigrohre behoben war. Die letzten Maitage waren sehr warm und die Nullgradgrenze stieg gegen 4000 m ü.M., sodass diese Brücken wahrscheinlich infolge der Erwärmung fast schlagartig zusammenbrachen, was ein plötzliches Ansteigen der Kissen-Wasserwertskurven veranlasste. Mitte Juli, als die Kissen ausgegraben wurden, war Kissen 3 ausgelaufen und die übrigen zwei Kissen zeigten deshalb einen zu hohen Wasserwert an, weil jedes von ihnen eine Eisschicht trug, die aus dem seitlichen Widerlager gelöst war und das Ausmass der Kissenlast seitwärts vergrösserte. Die Eisschichten waren rund 20 mm dick und sind auf Abb. 34 gut sichtbar.

Die gemessenen Druckkissen-Werte wurden absichtlich nicht korrigiert, auch wenn für gewisse Einflüsse (γ_{Fl}, Eindringtiefe des Abstichschläuchleins) sowohl Vorzeichen wie Betrag bekannt waren, da durch das späte Auslegen und Vergraben der Kissen und durch den Umstand, dass die Vergleichswerte mit der Wägemethode in einem rund 20 m entfernten Schacht gewonnen wurden, keine enge Uebereinstimmung der Kurven erwartet werden konnte.

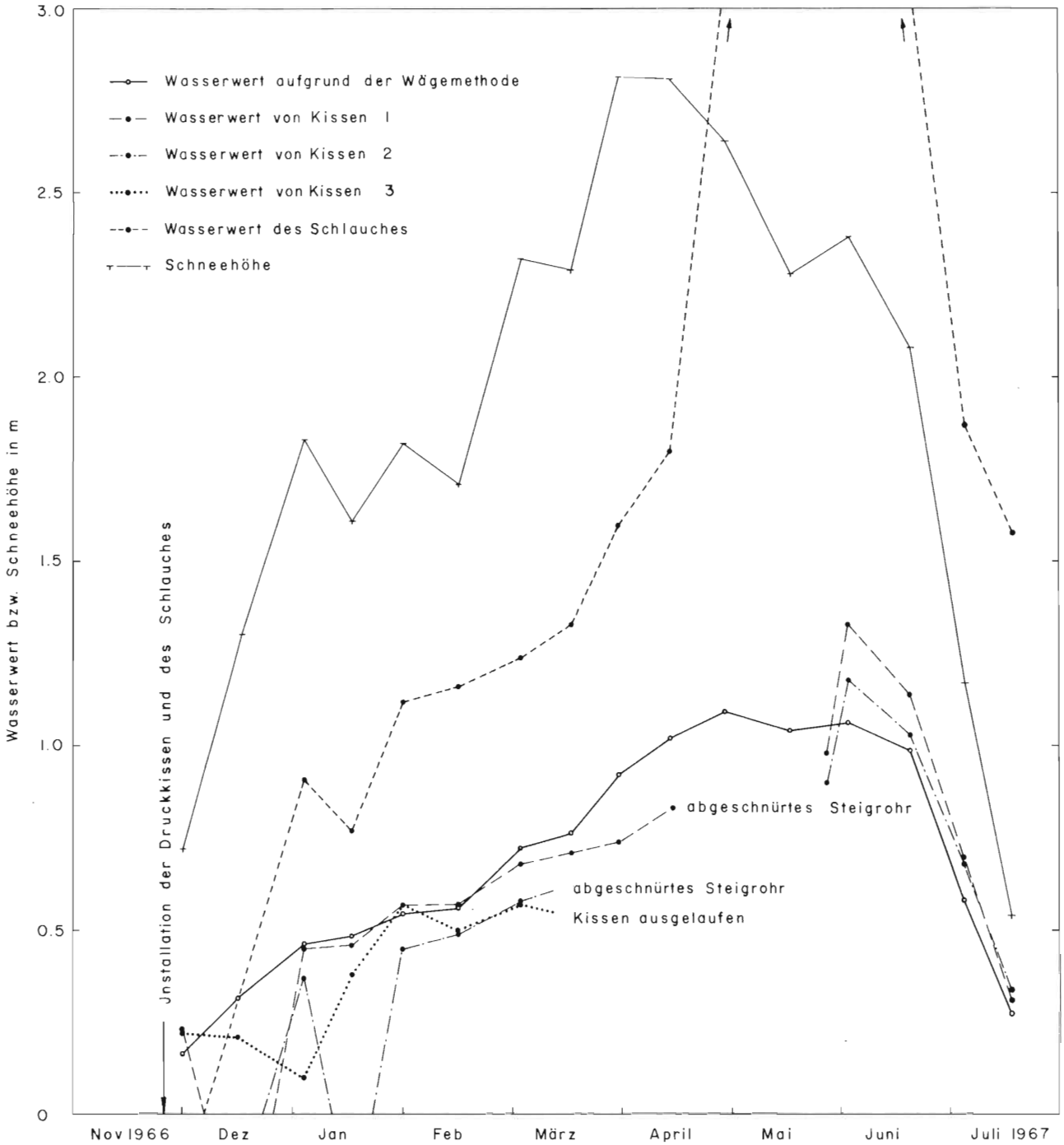

Abb. 33 Gesamtwasserwerte der Schneedecke, die im Winterhalbjahr 1966/67 auf dem Versuchsfeld SLF, Weissfluhjoch (2540 m ü.M.) mit Druckkissen und mit dem Wägeverfahren bestimmt wurden.

6.5.4. Versuche im Firngebiet

Zu Beginn des Bilanzjahres 1967/68 wurden in der unmittelbaren Nähe von zwei verschiedenen Firnpegeln P 5 und P 11 des Grossen Aletschgletschers Druckkissen von der beschriebenen Art und Grösse ausgelegt. Beide Kissen wurden mit rund 40 ℓ Flüssigkeit gefüllt (Frostschutzlösung : Wasser ≈ 1 : 3), und die Steigrohre wurden an den 8 m langen Pegelstangen senkrecht in die Höhe gezogen.

Der wesentliche Unterschied gegenüber der Anordnung vom Winter 1966/67 auf dem Weissfluhjoch bestand also

nur darin, dass die Kissenunterlage aus Schnee bestand und dass sich die Steigrohrbefestigung (Pegelstange) gegenüber dem Kissenhorizont verschieben konnte.

Die Kissen-Wasserwerte beider Druckkissen konnten erst im Herbst 1968 bestimmt werden, nachdem die erneut entstandenen Knickstellen der Steigrohre durch Aufgraben der Schneedecke entlang der Steigrohre beseitigt waren.

In Tabelle 4 sind die Resultate des Bilanzjahres 1967/68 zusammengestellt.

Tabelle 4: Zusammenstellung der Gesamtwasserwerte, die mit Hilfe der Druckkissen und der Wägemethode im Bilanzjahr 1967/68 bestimmt wurden.

Firnpunkt	Höhe in m ü.M.	Schneehöhe (Pegelmessung) m	Gesamtwasserwert (Wägemethode) mm	Gesamtwasserwert (Druckkissen) mm	Differenz mm
Jungfraufirn, P 5	3500	6.9. (15.9.67-6.10.68)	3320	2410	- 910
Ewigschneefeld, P 11	3450	5.5. (17.9.67-12.9.68)	2760	2260	- 500

Die beiden Kissen-Gesamtwasserwerte sind im Vergleich mit den Werten, die mit der Wägemethode bestimmt wurden, wesentlich zu klein ausgefallen. Dies kann dem Umstand zugeschrieben werden, dass im Bilanzjahr 1967/68 die Akkumulation in den Hochgebirgslagen oft von starken Stürmen begleitet war, sodass die Schneeschichten stark gepresst wurden. Die seitliche Verankerung der Schichten war deshalb relativ stark und das Druckkissen wurde durch eine Art Brückenbildung der Firnschichten zu wenig belastet. - Die Steigrohre aus Polyaethylen erwiesen sich als zu wenig druckfest, wurden sie doch an verschiedenen Befestigungsstellen am Pegel abgeschnürt.

Für das Bilanzjahr 1968/69 wurden wiederum zwei Druckkissen ausgelegt, diesmal beide an der gleichen Firnmessstelle (P 5, 3500 m ü.M.). Da diese Messstelle in kurzer Zeit vom Jungfraujoch her erreicht werden kann, wurde diesmal das eine der Kissen grösser gewählt, da infolge des kurzen Weges der Transport einer grössern Menge Füllflüssigkeit möglich wurde. Das grössere Druckkissen bestand aus der grössten käuflich erhältlichen Gummi-Matratze, hatte eine Grundfläche von 1.4 m^2 und eine Höhe von 50 mm. Es wurde mit rund 65 ℓ Füllflüssigkeit (Mischungsverhältnis: Frostschutzlösung : Wasser ≈ 1 : 4) gefüllt. Das zweite Druckkissen bestand aus dem gleichen Material wie die Kissen des Bilanzjahres 1967/68 und wurde auch analog gefüllt. Als Steigrohre wurden diesmal armierte Ferflex-Schläuche, ø = 4.5 x 10 mm, verwendet. Die Resultate sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

Das grössere Kissen scheint den richtigen Gesamtwasserwert registriert zu haben; leider konnte am 2.4.1969 das Abstichschläuchlein bis ins Kissen hineingestossen werden, ohne dass die Speichelblase ausgestossen wurde, sodass angenommen werden muss, dass das Kissen ausgelaufen ist. Die Gesamtwasserwerte des kleineren Kissens waren anfänglich zu hoch, doch scheint der Wert von h_w = 2310 mm, der am 21.4.1969 gemessen wurde, annähernd richtig zu sein, entspricht er doch einem mittleren Schneeraumgewicht von $\bar{\gamma}$ = 405 kg/m^3, was für Ende April ein üblicher Wert in jener Höhenlage ist. (vgl. Abb. 37, unterer Teil).

Tabelle 5: Zusammenstellung der Gesamtwasserwerte, die mit Hilfe der Druckkissen und der Wägemethode im Bilanzjahr 1968/69 bestimmt wurden.

Datum	Schneehöhe (Pegelmessung) m	Gesamtwasserwert (Wägemethode) mm	Gesamtwasserwert (Druckkissen, F = 1.4 m^2) mm	Gesamtwasserwert (Druckkissen, F = 0.85 m^2) mm
14. 9.1968	-	--	--	--
22/23.10.1968	0.9	302	290	390
21. 1.1969	3.8	keine Messung	1250	1440
2. 4.1969	4.2	1610	Druckkissen ausgelaufen	1720
21. 4.1969	5.7	keine Messung		2310
29. 7.1969	5.8	keine Messung		Steigrohr abgeschnürt, Messung nicht möglich.

6.5.5. Fehlerquellen

Ein Druckkissen-System von der beschriebenen Art weist zum voraus gewisse Mängel auf und folgende Fehlerquellen scheinen aufgrund der gemessenen Werte die Resultate zu beeinflussen:

1. Der Schnee, der neben dem Kissen abgelagert wird, setzt sich im Laufe des Bilanzjahres, sodass dem Kissen, vor allem wenn Eisschichten in der Schneeüberlagerung die Kissenlast seitwärts vergrössern, eine zu grosse Schneelast aufgeladen wird.
2. Kissen, die am Anfang des Bilanzjahres auf die Firnoberfläche gelegt werden, verändern die Setzungsbedingungen der Kissenunterlage. Da das Füllvolumen des Kissens mindestens das doppelte Gewicht aufweist wie ein aequivalentes Schneevolumen, wird sich die Kissenunterlage und damit das Kissen vermutlich stärker setzen als die Kissenumgebung, sodass sich eine Art Gewölbe über dem Kissen bilden kann. Dieser Effekt kann durch die oben genannte Setzung der Kissenumgebung abgeschwächt oder kompensiert werden. Die Brückenbildung kann aber auch wesentlich verstärkt werden, wenn während der sommerlichen Infiltrationsperiode Schmelzwasser auf die Kissenoberfläche gelangt und von dort seitwärts abgeleitet wird. Dabei können sich über dem Kissen Eisbrücken und seitwärts des Kissens Eisbrücken-Widerlager bilden wie dies auch bei den Messungen auf dem Weissfluhjoch beobachtet werden konnte (vgl. Abb. 34). Diese Brückenbildung bewirkt einen zu kleinen Schneedruck auf das Kissen, woraus ein zu kleiner Wasserwert der Schneeüberlagerung resultiert.

6.5.6. Zusammenfassung

Die Resultate der Versuchsperiode 1967/68 und 1968/69 zeigen, dass mit dem genannten begrenzten Aufwand weder die Eignung des Materials noch die Genauigkeit der Methode befriedigend abgeklärt werden konnte. Die erhaltenen Resultate können immerhin als Hinweis für weitere Untersuchungen dienlich sein. Folgende Punkte scheinen in dieser Hinsicht erwähnenswert: Für Massenbilanzmessungen sollten möglichst starke, dünne und grossflä-

Abb. 34 Aufgebrochene Eisdecke über einem Schneedruckkissen. Dicke der Eisschicht rund 20 mm. Die Eisdecke überragt seitwärts die Kissenfläche (siehe linker unterer Teil des Bildes!). Photo P. Föhn.

chige Kissen benützt werden, da sich die Fehler, mit denen dicke, kleine Kissen behaftet sind, bei Firnmessungen eher noch vergrössern (vgl. Fehlerquellen). Da sich die Befestigungsstange des Steigrohres (Firnpegel) und das Druckkissen verschieden stark setzen, muss der Befestigung der Steigrohre und der Kupplung zwischen Steigrohr und Kissen besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Ob die Tatsache, dass eines der Kissen im Bilanzjahr 1968/69 ausgelaufen ist, im Ungenügen des Kissenmaterials oder der Kupplung zu suchen ist, kann leider nicht entschieden werden.

Da die Kissenwasserwerte zum Teil um beträchtliche Beträge von den Werten abweichen, die mit der Wägemethode bestimmt wurden, scheint überdies die anfängliche Befürchtung, dass die grosse mechanische Festigkeit einzelner Firnschichten und die Setzungserscheinungen der Kissenunterlage die Genauigkeit der Messung stark beeinflusse, zuzutreffen.

7. HYDRO-GLAZIOLOGISCHE RESULTATE

7.1. EINLEITUNG

Für die Entwicklung und Prüfung der beschriebenen Messmethoden waren umfangreiche Versuchsmessungen nötig, die zum grössten Teil auf dem Ewigschneefeld ausgeführt wurden. In messtechnischer Hinsicht wurden dabei das Messvorgehen, die Genauigkeit und der Anwendungsbereich der Methoden geprüft. In hydrologischer Hinsicht ist die Ausbeute dieser Messungen aus zwei Gründen nicht sehr gross. Einerseits verhinderte die zeitraubende messtechnische Entwicklungsarbeit die detaillierte hydrologische Vermessung des ganzen Gebietes, andererseits darf die Aussagekraft der gemessenen Daten nicht überschätzt werden, da der zeitliche Bereich, auf den sich die Messungen beziehen, relativ kurz ist.

7.2. SCHNEEHOEHENVERTEILUNG IM EWIGSCHNEEFELD

Mit "Ewigschneefeld" ist im folgenden nicht der ganze Firnseitenarm des Grossen Aletschgletschers gemeint, der diesen Namen führt und der bis zum Konkordiaplatz reicht, sondern nur das in Abb. 35 umrandete Gebiet, das im Süden durch die Profillinie von P 13 begrenzt wird. Dies hat zwei Gründe: Erstens mussten der grosse Eisfall sowie die benachbarten Hängegletscher am unteren Ende des Ewigschneefeldes aus messtechnischen Ueberlegungen ausgeklammert werden. Zweitens sollte in einem späteren Zeitpunkt die Möglichkeit bestehen, die in dieser Arbeit berechneten Flächenwerte (B, C) mit Werten des Wasser- und Eis/Firnabflusses in der Profillinie P 13 zu vergleichen. Dies ist momentan leider noch nicht möglich, da der Felsuntergrund, d.h. der Durchflussquerschnitt in jener Profillinie seismisch noch nicht bestimmt werden konnte.

In Abb. 36 ist die Schneehöhenverteilung im zentralen, flachen Teil des Ewigschneefeldes anhand von drei Querprofilen dargestellt. Die Lage der Querprofile ist in Abb. 35 eingezeichnet, wobei P-i die allgemeine Bezeichnung für einen fixen Firnpegelstandort im Stromstrich des Firnfeldes ist.*) Die Querprofile von P 13, P 12 und P 11 befinden sich in verschiedenen Höhenlagen, was die verschiedene mittlere Schneehöhe in den drei Querprofilen erklärt. Die Werte der Querprofile P 13 und P 12 wurden durch Firnpegelmessungen ermittelt, während im Querprofil P 11 die ausgelegten Drähte zur Schneehöhenmessung benutzt werden konnten.

Die Messungen sind nicht alle am Ende eines hydrologischen Jahres und auch nicht alle am gleichen Datum gemacht worden und sollen weniger die zeitliche als die örtliche Variation der Schneehöhe entlang der drei Querprofillinien in Funktion der Geländeform zeigen. Da sich die meisten Messungen auf das hydrologische Jahr 1967/68 beziehen, wurde zur Darstellung des Geländes die topographisch bestimmte Firnoberfläche vom September 1967 benützt.

Die in der Abbildung dargestellten Schneehöhen zeigen, dass auch auf Firnfeldern die Oberflächenform die Schneehöhe wesentlich beeinflusst, wobei der an exponierten Stellen weggeblasene Schnee in den Geländemulden zur Ablagerung gelangt. Diese Schneehöhenverteilung ist in verschiedenen Jahren recht ähnlich, dies zeigen vor allem die Messungen im Querprofil P 11, wo mit Hilfe der Drähte die Schneehöhenverteilung ziemlich detailliert durch Messungen im Abstand von 30 - 40 m entlang der Querprofillinie während dreier Jahre (1966/67 - 1968/69) verfolgt werden konnte.

---

*) Die in Abb. 2 und 35 eingezeichneten Firnpegel werden zum Teil seit Jahrzehnten von der AHG alljährlich im gleichen Fixpunkt gesetzt und während des Bilanzjahres zur Messung der Schneehöhe und der Oberflächengeschwindigkeit benützt (vgl. Haefeli und Kasser, 1948).

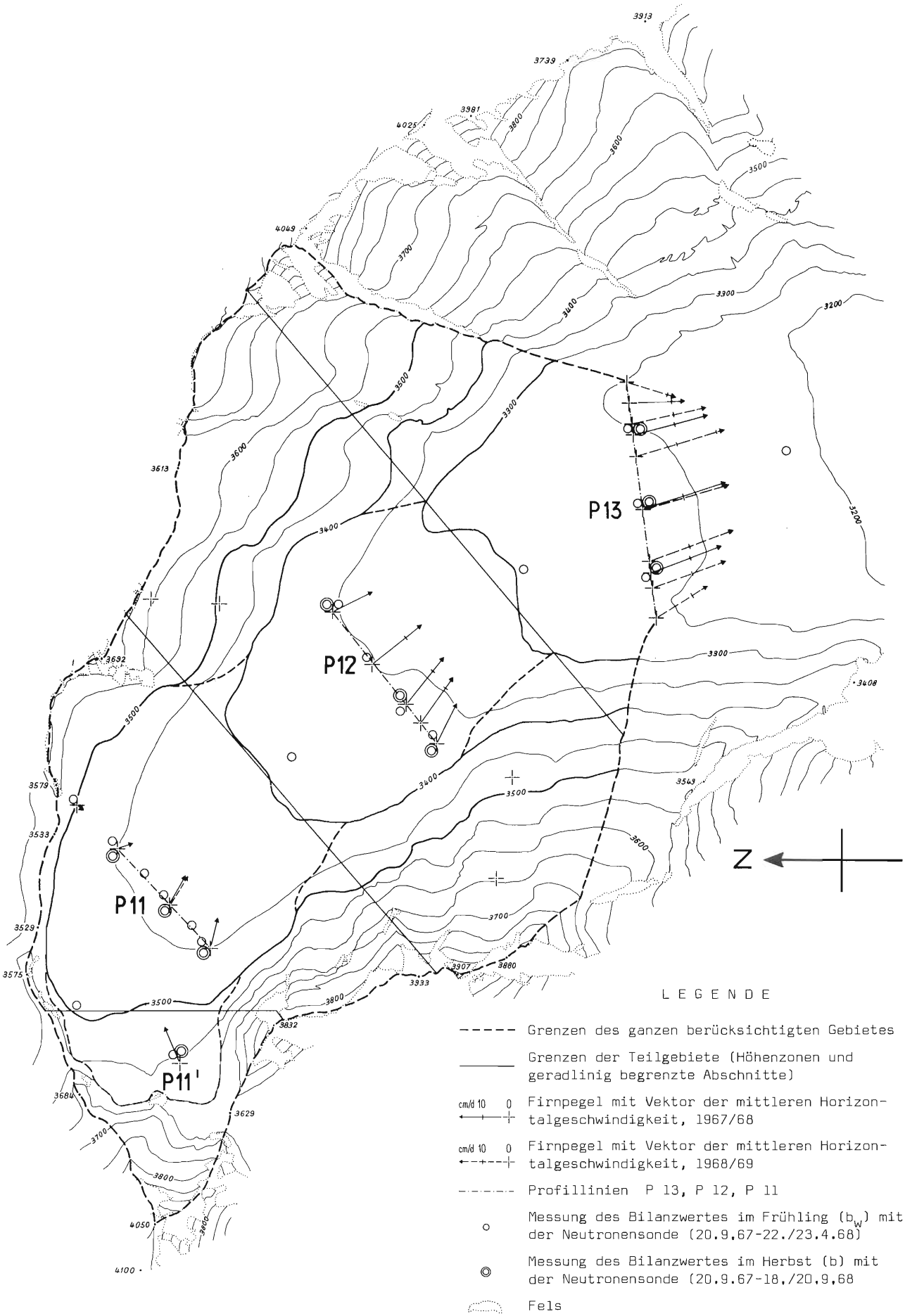

Abb. 35 Situation des Ewigschneefeldes. Massstab 1 : 25'000, Aequidistanz der Höhenkurven 50 m.

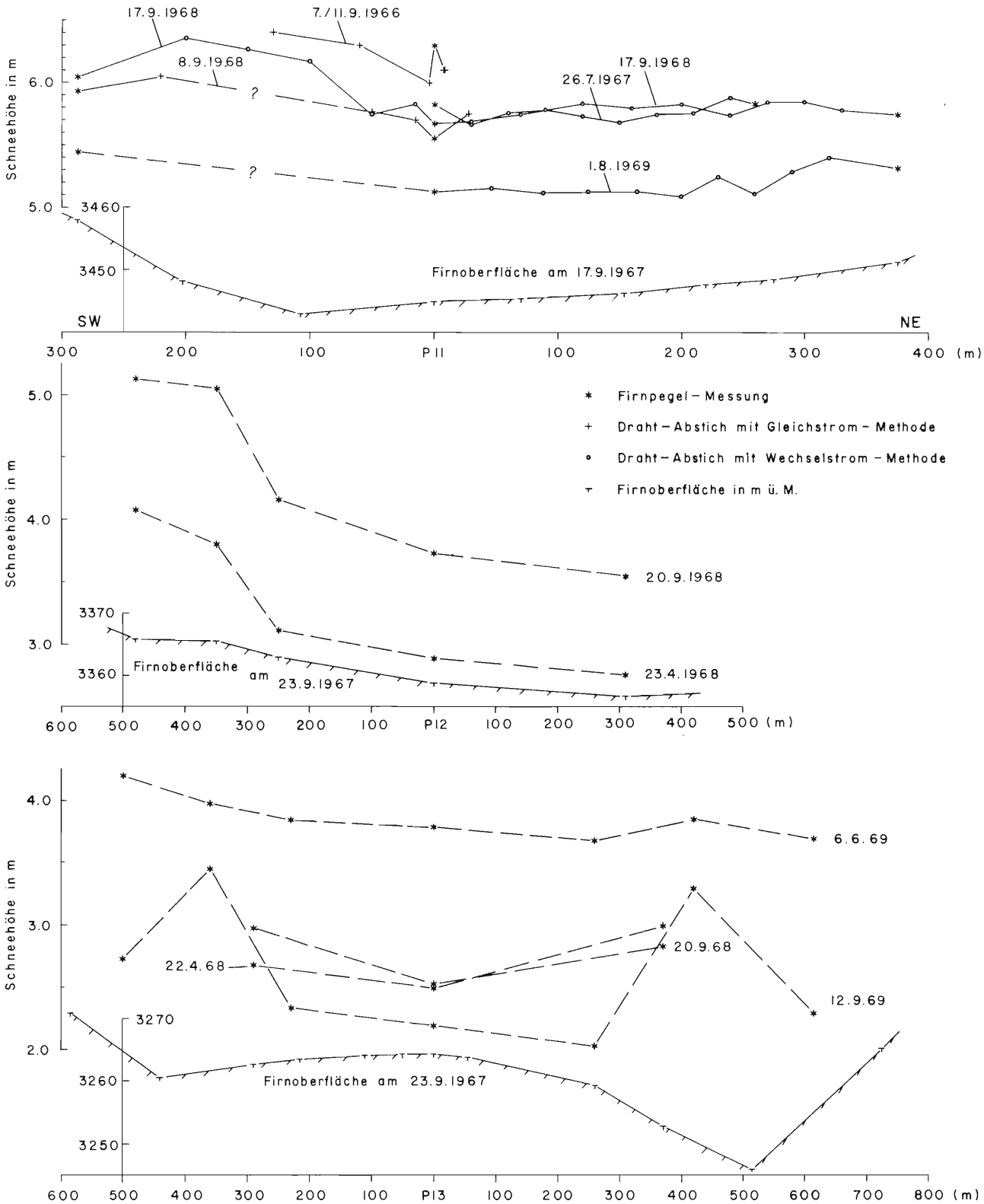

Abb. 36 Schneehöhenverteilung in drei Querprofilen des Ewigschneefeldes (P 13, P 12, P 11) in Funktion der Geländeform.

Im Bilanzjahr 1967/68 wurden überdies noch fünf Firnpegel in verschiedenen Höhenlagen an den Seitenhängen des Ewigschneefeldes gestellt und beobachtet. Damit sollte die oft vertretene Ansicht geprüft werden, dass auf den relativ flachen Gletscherebenen, d.h. in Grossmulden des Geländes (vgl. Messungen von Hoinkes und Lang, 1962, auf dem Hintereis- und Kesselwandferner) jener Schnee zur Ablagerung gelangt, der an den Hängen weggeblasen wird. Die Lage dieser Pegel ist in Abb. 35 ebenfalls eingezeichnet. Obwohl einer der Pegel, sehr wahrscheinlich durch eine Lawine, weggerissen wurde, konnte mit Hilfe der übrigen Pegel auch im Ewigschneefeld ein "Hang-Defizit" gefunden werden. Drei Hangpegel (auf ca. 3500 m ü.M. stehend) zeigten im Frühling und Herbst 1968 rund 30% und ein Hangpegel (auf ca. 3600 m ü.M. stehend) sogar 50% weniger Schnee an, als für die gleichen Höhenlagen im zentralen, flacheren Streifen des Firnbeckens gefunden wurde.

7.3. JAHRESBILANZ IN FIRNPUNKTEN IM HYDROLOGISCHEN JAHR 1967/68

Im Bilanzjahr 1967/68, als die Eichung und Prüfung der Neutronensonde-Messmethode vorgenommen wurde, konnte das mittlere Raumgewicht der Schneedecke aufgrund der rationellen Messweise der Neutronensonde in verschiedenen Höhenlagen im Ewigschneefeld bestimmt werden. Dabei wurden die mittleren Raumgewichte in jedem der drei Querprofile von P 13, P 12, P 11 sowohl im Frühling (Ende April) als auch im Herbst (Ende September) an 3 - 5 Querprofilpunkten und in einigen zusätzlichen Punkten im Stromstrich des Firnfeldes gemessen. Die Messpunkte sind in Abb. 35 eingetragen und die Messwerte in Abb. 37 (unterer Teil) aufgezeichnet, wobei die Werte in Funktion der Höhe über Meer dargestellt sind. Die Variationsbreite der mittleren Raumgewichte ist sowohl innerhalb jeder einzelnen Höhenlage als auch in den verschiedenen Höhenstufen im Frühling und im Herbst klein.

Mit Hilfe der gemessenen Schneehöhen (h_s) und der mittleren Raumgewichte ($\bar{\gamma}$) wurde dann mit Gleichung (3) die Jahresbilanz für das hydrologische Jahr 1967/68 in den verschiedenen Firnpunkten berechnet. Die Werte sind in Tabelle 6 dargestellt und die Bilanzwerte sind in Abb. 37 (mittlerer Teil) in Funktion der Höhe über Meer aufgetragen, wobei die Mittelwerte jeder Höhenlage $\bar{b}_a$ geradlinig miteinander verbunden wurden. Zur Bildung der Mittelwerte wurden nur Werte, die im zentralen, relativ flachen Streifen des Ewigschneefeldes gemessen wurden, benützt. Da die verschiedenen h_s- und $\bar{\gamma}$-Werte nicht nur Ende September 1968 (Jahresbilanz, b_a), sondern auch Ende April 1968 bestimmt wurden, konnte zusätzlich auch die Winterbilanz b_w berechnet werden. Das Winterende wurde deshalb auf Ende des Monats April festgesetzt, weil die Ablation, die aufgrund der Summe der positiven Temperatur-Tagesmittel nach Zingg (1951) berechnet wurde (das benützte Vorgehen wird später besprochen), im April im ganzen beobachteten Gebiet des Ewigschneefeldes meistens noch nicht eingesetzt hat, hingegen im Monat Mai, vor allem im unteren Teil des Ewigschneefeldes, oft schon spürbare Beträge erreicht. Wie zu erwarten war, variieren die einzelnen Bilanzwerte, bedingt durch die ungleiche, in Abb. 36 dargestellte Schneehöhenverteilung, in einzelnen Höhenlagen beträchtlich. Im übrigen fällt der starke Anstieg der Bilanzwerte mit zunehmender Höhe über Meer auf, wobei dieser Anstieg im Herbst und im Frühling annähernd linear ist.

7.4. MITTLERE JAHRESBILANZ $\langle b_a \rangle$ IN FIRNPUNKTEN IN VERSCHIEDENEN REFERENZPERIODEN

Die vorgängig festgestellte, annähernd lineare Zunahme der mittleren Jahresbilanzwerte $\bar{b}_a$ mit der Meereshöhe bezieht sich, wie erwähnt, nur auf das Bilanzjahr 1967/68. Um festzustellen, ob eine ähnliche Zunahme auch in

*) Da bei diesen jährlichen Messungen in einigen Punkten (P 9, P 5) nicht jedes Jahr das mittlere Raumgewicht gemessen wurde, musste bei der Berechnung der mehrjährigen Bilanzmittelwerte $\langle b_a \rangle$ in einigen Jahren der mehrjährige Mittelwert von $\bar{\gamma}$ verwendet werden; da aber die mittleren Raumgewichte der Schneedecke in verschiedenen Jahren nur wenig ändern, dürfte dieser Umstand die einzelnen Mittelwerte von b_a nur wenig beeinflussen.

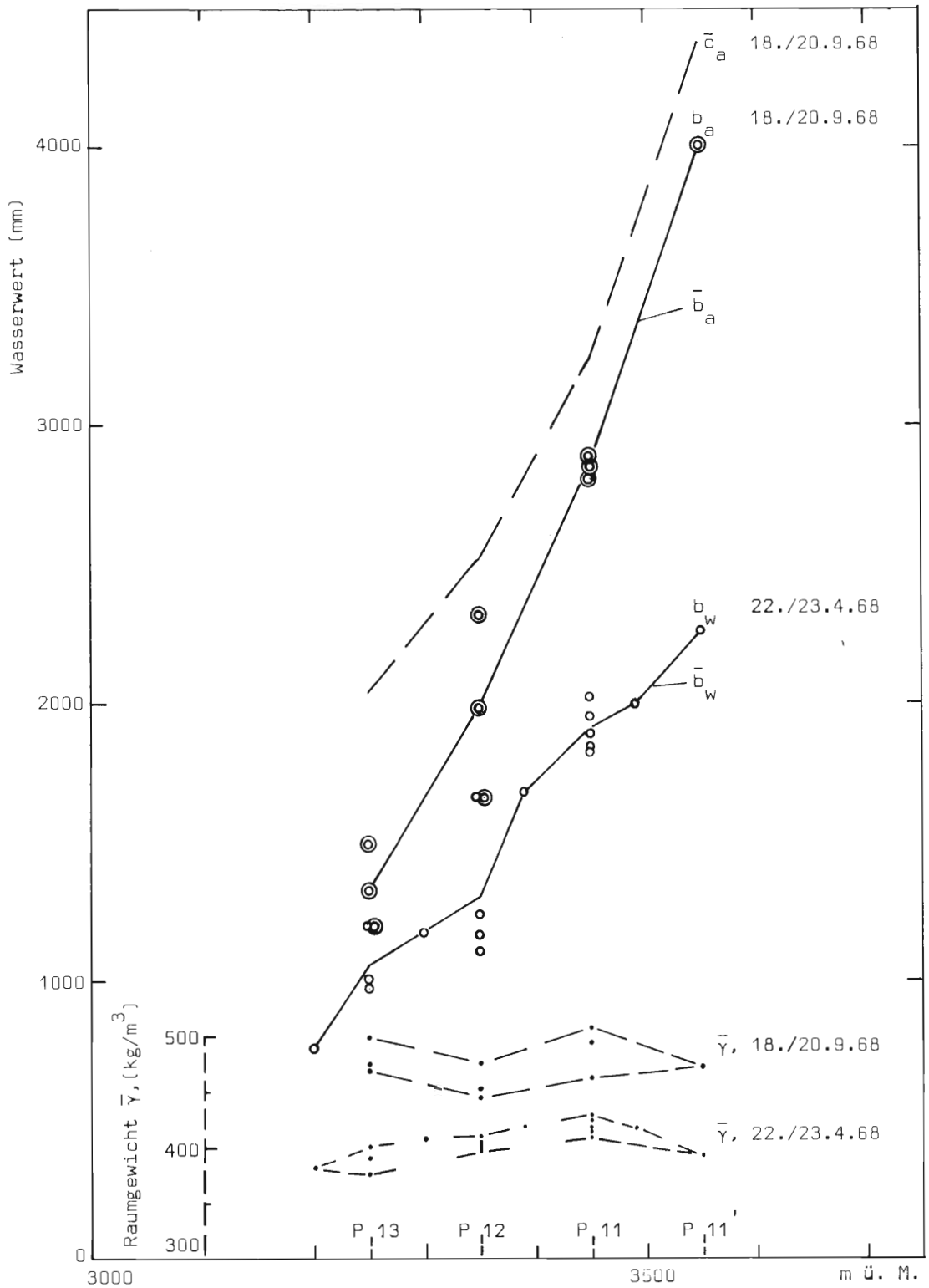

Abb. 37 Jahres- und Winterbilanzwerte im Ewigschneefeld für das hydrologische Jahr 1967/68 (17./23.9.67 - 18./20.9.68) in Funktion der Höhe über Meer; (die Mittelwerte sind geradlinig verbunden). - Zusätzlich sind die mittleren Raumgewichte und die berechnete jährliche Akkumulation ebenfalls in Funktion der Höhe über Meer aufgetragen.

früheren Jahren vorhanden war, wurde diese Zunahme von b_a auch mit Hilfe der jährlich in der Firnachse ausgeführten Bilanzmessung berechnet. Zu diesem Zweck wurden die mehrjährigen Messungen in Tabelle 7 zusammengestellt und die zeitlichen Mittelwerte $\langle b_a \rangle$ von verschiedenen Referenzperioden bestimmt.*) Da sich diese

Tabelle 6: Winter- und Jahresbilanzwerte, bzw. deren Mittelwerte und mittlere Akkumulationswerte für das Bilanzjahr 1967/68, im zentralen, relativ flachen Streifen des Ewigschneefeldes gemessen (Die Messpunkte sind in Abb. 35 eingetragen).

Referenz-periode	17.23.9.67 - 22./23.4.68				17./23.9.67 - 18./20.9.68				
Messpunkte	h_s	$\bar{r}$	b_w	$\bar{b}_w$	h_s	$\bar{r}$	b_a	$\bar{b}_a$	$\bar{c}_a$
	m	kg/m^3	mm	mm	m	kg/m^3	mm	mm	mm
P 11'	5.75	392	2257		8.70	473	4080		4375
3550 m ü.M.									
Pkt. 3490 m ü.M.	4.75	417	1991		----	---	----		
Querprofil SW	4.50	418	1889		6.05	462	2797		
P 11	4.75	426	2023						
	4.50	409	1837	1907	5.70	508	2885	2846	3230
3450 m ü.M.	4.55	428	1949						
NE	4.40	415	1836		5.75	495	2856		
Pkt. 3390 m ü.M.	4.00	419	1682						
Querprofil SW	4.10	409	1670		5.15	453	2322		
P 12	3.10	399	1245		4.20	475	1982		
3350 m ü.M.	2.90	403	1169	1298	3.75	446	1665	1990	2515
NE	2.75	402	1109						
Pkt. 3300 m ü.M.	2.90	408	1183		----	---	----		
Querprofil W	2.70	376	1007		3.00	500	1492		
P 13	2.50	391	977	1062	2.55	474	1210	1342	2035
3250 m ü.M. E	3.00	402	1202		2.85	468	1324		
Pkt. 3200 m ü.M.	2.00	382	764		----	---	----		

Mittelwerte im Ewigschneefeld nur auf 4 Jahre (P 13), bzw. auf 13 Jahre (P 11) beziehen, wurden auch noch mehrjährige Mittelwerte, die im Jungfraufirn gemessen wurden, zum Vergleich herangezogen. In Abb. 38 sind diese Mittelwerte $\langle b_a \rangle$ für verschiedene Referenzperioden in Funktion der Höhe über Meer dargestellt.

Auch diese mehrjährigen Mittelwerte von $\langle b_a \rangle$ liegen sowohl im Ewigschneefeld wie im Jungfraufirn annähernd auf einer Geraden, wobei die Steigung derselben im Ewigschneefeld wesentlich grösser ist als im Jungfraufirn. Da diese Steigung, d.h. die Zunahme der Massenbilanz mit der Meereshöhe, im Jungfraufirn im vierjährigen Mittel (1965/66 - 1968/69) gleich ist wie im 13-jährigen Mittel (1956/57 - 1968/69), wurde die auf vierjährige Beobachtung beruhende Gerade des Ewigschneefeldes ebenfalls parallel verschoben und zwar so, dass sie durch den einzigen über 13 Jahre beobachteten Punkt (P 11) im Ewigschneefeld ging. Damit erhielt man auch im Ewigschneefeld als Annäherung den Bilanzmittelwert $\langle b_a \rangle$ in Funktion der Meereshöhe für die letzten 13 Jahre (1956/57 - 1968/69). Die Neigung dieser Geraden weicht nun allerdings von derjenigen wesentlich ab, die sich im Bilanzjahr

*) Fussnote siehe Seite 89.

Tabelle 7: Schneehöhenwerte (h_s) in m, Jahresbilanzwerte (b_a) in mm und deren Mittelwerte in verschiedenen Referenzperioden.

Bilanzjahr		1956/57	1957/58	1958/59	1959/60	1960/61	1961/62	1962/63	1963/64	1964/65	1965/66	1966/67	1967/68	1968/69	Mittelwert 1965/66-68/69	Mittelwert 1956/57-68/69	Mittelwert 1943/44-68/69
Jungfraufirn		25.9.56 - 9.9.57	12.9.57 -11.9.58	10.9.58 -12.9.59	9.9.59 -14.9.60	15.9.60 -14.9.61	19.9.61 -12.9.62	2.10.62 -17.9.63	30.9.63 -22.9.64	22.9.64 -21.9.65	21.9.65 -14.9.66	14.9.66 -18.9.67	18.9.67 -12.9.68	12.9.68 - 8.9.69			
P 3	h_s	2.30	3.20	3.25	4.45	5.10	2.70 ①	3.20	3.15	6.15	4.75	4.80	4.40	4.95	4.72	4.03	3.88
3350 m ü.M.	b_a	1090	1750	1720	2340	3000	1570	1770	1400	3150	2550	2350	2240	2590	2430	2120	1870
Jungfraufirn		8.9.56 -16.9.57	9.9.57 -10.9.58	10.9.58 - 7.9.59	7.9.59 -12.9.60	12.9.60 -17.9.61	20.9.61 -14.9.62	14.9.62 -28.9.63	30.9.63 -26.9.64	20.9.64 -19.9.65	19.9.65 -20.9.66	20.9.66 -15.9.67	25.9.67 -14.9.68	14.9.68 -13.9.69			
P 5	h_s	3.50	5.25	4.90	5.90	5.50	4.30	5.10	4.35 ②	8.10	5.50	6.80	6.20	6.20	6.17	5.51	5.65
3500 m ü.M.	b_a	1650	2820	2660	3000	2800	1820	2640	2210	4110	2800	3450	2930 ③	3150	3080	2770	2870
Jungfraufirn		25.9.56 -20.9.57	12.9.57 -12.9.58	2.10.58 -18.9.59	18.9.59 -13.9.60	14.9.60 -21.9.61	21.9.61 -24.9.62	15.9.62 -17.9.63	26.9.63 -24.9.64	24.9.64 - 6.9.65	5.10.65 -22.9.66	22.9.66 -26.9.67	26.9.67 -26.9.68	26.9.68 -19.9.69			
P 9	h_s	0.95	-0.35	-0.20	0.35	0.65	0	0	-1.10	2.20	0.70	0.35	1.95	1.05	1.00	0.50	
2950 m ü.M.	b_a	470	-175	-100	175	320	0	0	-545	1180	410	155	1020	440	506	260	
Ewigschneefeld		12.9.56 -21.9.57	21.9.57 -12.9.58	12.9.58 - 8.9.59	8.9.59 -11.9.60	12.9.60 -17.9.61	20.9.61 -15.9.62	15.9.62 -18.9.63	19.9.63 -19.9.64	17.9.64 -22.9.65	22.9.65 -20.9.66	20.9.66 -24.9.67	17.9.67 -17.9.68	17.9.68 -11.9.69			
P 11	h_s	3.10 ①	4.80	3.95	5.75	5.40	4.00	3.95	3.15	6.95	6.20	5.80	5.70	5.70	5.78	4.93	
3450 m ü.M.	b_a	1380	2620	2160	2960	2980	1760 ①	2070	1510	3460	3290	2910	2880	2910	2995	2530	
Ewigschneefeld											5.10.65 -19.9.66	19.9.66 -23.9.67	23.9.67 -20.9.68	20.9.68 -12.9.69			
P 13	h_s										2.55	1.75	2.30	2.20	2.20		
3250 m ü.M.	b_a										1420	850	1210	1120	1150		

① unsicherer Wert ② Wert, der durch eine Eislawine beeinflusst wurde. ③ γ-Messung am 3./4. 10. 1968

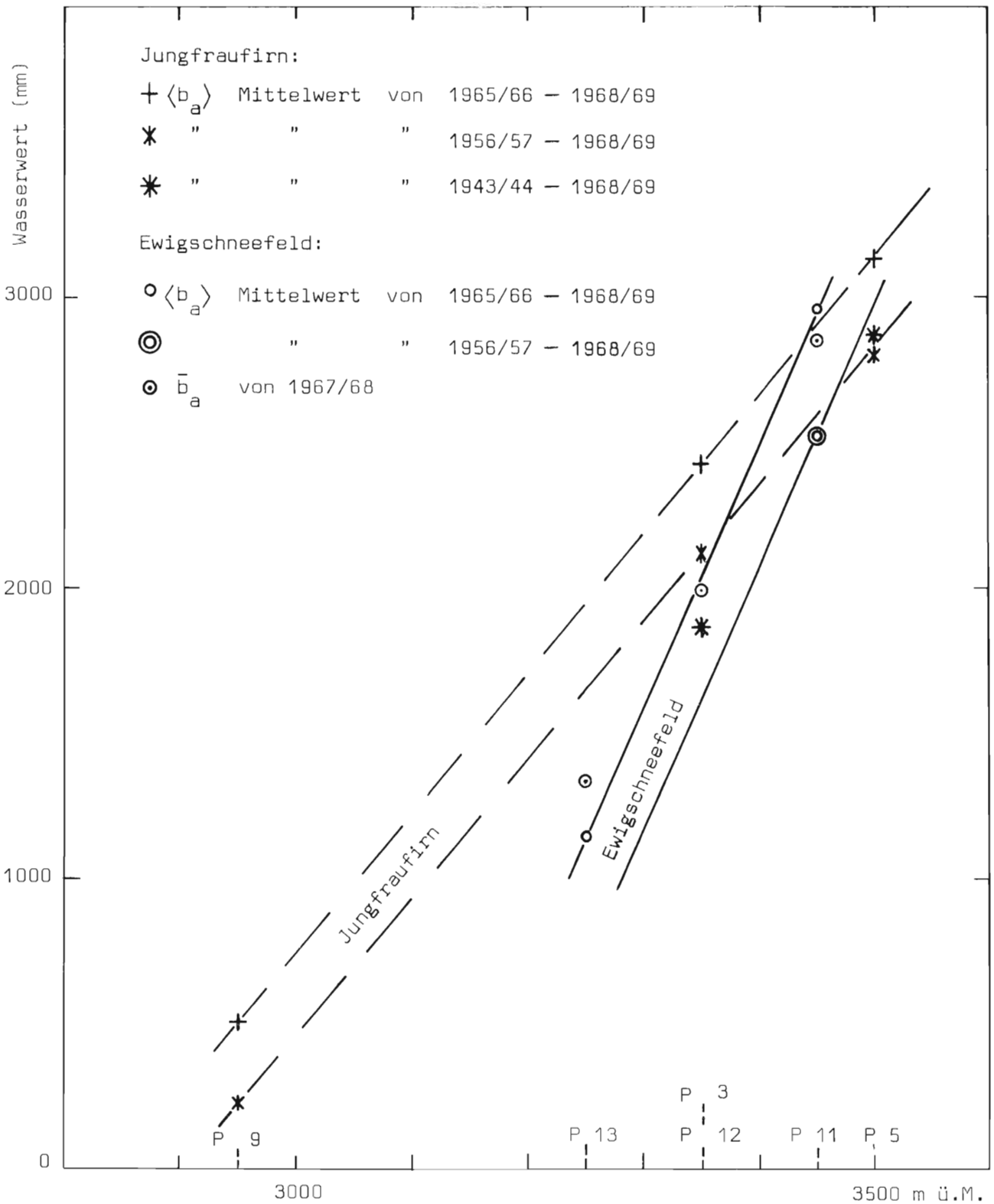

Abb. 38 Mittlere Jahresbilanzen $< b_a >$ von verschiedenen Zeitabschnitten in Funktion der Höhe über Meer für Jungfraufirn und Ewigschneefeld

1967/68 mit Hilfe von räumlichen Mittelwerten $\bar{b}_a$ oder mit den Werten b_a im Stromstrich des Firnfeldes ergeben. Es wurden folgende mittlere Gradienten berechnet:

$\frac{\Delta \bar{b}_a}{\Delta H}$ (1967/68) : 730 mm/100 m

$\frac{\Delta b_a}{\Delta H}$ (1967/68) : 800 mm/100 m

$\frac{\Delta \langle b_a \rangle}{\Delta H}$ (1965/66 - 1968/69) : 900 mm/100 m

Der Grund für die ungleichen Beträge von $\Delta \bar{b}_a/\Delta H$ und $\Delta b_a/\Delta H$ liegt darin, dass gemäss Abb. 36 die Schneehöhenverteilung im mittleren und unteren Teil des Ewigschneefeldes (P 12, P 13) nicht mehr so einheitlich ist wie im oberen Teil (P 11). Die in der Mitte des Firnfeldes gemessenen Bilanzwerte b_a entsprechen nur im Querprofil P 11 gleichzeitig dem Mittelwert $\bar{b}_a$, in den beiden andern Querprofilen sind die Werte in der Achse des Firnfeldes kleiner als die Querprofilmittelwerte. Im Bilanzjahr 1967/68 waren die Mittelwerte $\bar{b}_a$ im Querprofil P 12 um 19%, im Querprofil P 13 um 12% grösser als die entsprechenden Werte in der Achse des Firnfeldes.

7.5. JAHRESBILANZ 1967/68 UND MITTLERE JAHRESBILANZ DER REFERENZPERIODE 1956/57 - 1968/69 FUER DAS GANZE GEBIET DES EWIGSCHNEEFELDES

Mit Hilfe der in verschiedenen Referenzperioden festgestellten linearen Zunahme der Punktbilanzwerte $\bar{b}_a$, b_a, bzw. $\langle b_a \rangle$ mit der Meereshöhe, wurde nun unter Berücksichtigung des im Bilanzjahr 1967/68 gefundenen "Hang"-Defizits die Massenbilanz des ganzen Ewigschneefeldes für das Bilanzjahr 1967/68 und für die Referenzperiode 1956/57 - 1968/69 berechnet.

Die angewandte Berechnungsmethode soll hier für das Bilanzjahr 1967/68 kurz beschrieben werden: Das ganze Gebiet wurde in einzelne Höhenzonen von je 100 m eingeteilt, wobei jede der Höhenzonen, von der ein Teil in der Firnebene (d.h. im zentralen, relativ flachen Streifen des Ewigschneefeldes) lag, in einen "ebenen" Teil und einen "Hang"-Teil unterteilt wurde (vgl. Höhenzonen in Abb. 35). Ungefähr auf mittlerer Höhe jeder "ebenen"-Teilzone befanden sich somit ein oder mehrere Messpunkte (vgl. Abb. 35). Da an den Hängen weniger Messpunkte vorhanden waren, wurden die "Hang"-Teilzonen nur bis in eine Höhe von 3500 m ü.M. ausgeschieden und das übrige "Hang"-Gebiet bis zu den Gräten als eine Teilzone behandelt.

Zur Berechnung des gespeicherten Wasservolumens (B_a) wurden die "ebenen" Teilzonenflächen mit den entsprechenden Werten $\bar{b}_a$, bzw. b_a multipliziert. Diese Werte wurden der Abb. 37, bzw. Tabelle 7 entnommen. Die "Hang"-Teilflächen wurden für Höhenzonen bis 3500 m ü.M. mit den der Höhenzone entsprechenden, aber um 30% verkleinerten Werten von $\bar{b}_a$ bzw. b_a multipliziert (vgl. Abschnitt 7.2.: "Hang"-Defizit). Die "Hang"-Teilflächen der Höhenzonen oberhalb 3500 m ü.M. wurden gesamthaft mit dem um 50% reduzierten Wert der "ebenen" Teilzone zwischen 3500 und 3600 m ü.M. (P 11') multipliziert. Die so erhaltene Gesamtmenge Wasser geteilt durch die Gesamtfläche ergab die Jahresbilanz des ganzen Gebietes. Sie beträgt für das hydrologische Jahr 1967/68, falls man die Mittelwerte $\bar{b}_a$ zur Berechnung verwendet:

$(B_a)_1$ = + 2120 mm Wasserwert;

falls man die Achsenwerte b_a zur Berechnung verwendet:

$$(B_a)_2 = + 2064 \text{ mm Wasserwert}$$

Würde man die Hangflächen nicht mit reduzierten Werten multiplizieren, so erhielte man für die Jahresbilanz 1967/68 des Gebietes einen viel zu hohen Wert $(B_a)_1 = + 5606$ mm Wasserwert. Diese Tatsache zeigt deutlich, dass die im Ewigschneefeld in der Firnebene gemessenen Werte nicht ohne Reduktion auf die in gleicher Meereshöhe liegenden Hangzonen bezogen werden dürfen.

Für die Referenzperiode 1956/57 - 1968/69 wurde zur Berechnung der mittleren Jahresbilanzwerte $\langle B_a \rangle$ die gleiche Berechnungsmethode ebenfalls angewandt. Dabei wurden die mittleren $\langle b_a \rangle$ -Werte der Abb. 38 entnommen und zur Berechnung verwendet, wobei den Hangflächen wiederum um 30%, bzw. 50% reduzierte Werte zugeordnet wurden. Die mittlere Jahresbilanz beträgt in diesem Fall $\langle B_a \rangle = + 1751$ mm Wasserwert.

Der Gebiets-Bilanzwert war also im hydrologischen Jahr 1967/68 beträchtlich grösser als der Mittelwert der Gebietsbilanz in den letzten 13 Jahren.

7.6. JAEHRLICHE AKKUMULATION UND MITTLERE JAEHRLICHE AKKUMULATION IN FIRNPUNKTEN

Wenn in einem Firnpunkt nicht nur der Jahresbilanzwert b_a, sondern auch die jährliche Ablation a_a, entweder durch Messung oder Schätzung bekannt ist, kann gemäss Gleichung (2) auch die jährliche Akkumulation c_a in jenem Punkt bestimmt werden:

$$c_a = a_a + b_a$$

Dabei wird angenommen, dass sich die jährliche Ablation aus der Schmelzwassermenge (S) und der Verdunstung (V) zusammensetzt. Von vorübergehend abgelagertem und durch den Wind wieder verfrachtetem Schnee muss hier abgesehen werden. Da sich die nachfolgenden Betrachtungen aber vorläufig nur auf den zentralen, relativ flachen Streifen des Ewigschneefeldes beziehen, wo der Windeinfluss gleichmässig ist, dürfte dieser Umstand nicht sehr ins Gewicht fallen. Nach strenger Definition wäre a_a und damit auch c_a um einen bestimmten, nicht messbaren Betrag grösser.

Die Schmelzwassermenge (S) kann mit einer Näherungsgleichung von Zingg (1951) gefunden werden:

$$S = 4.5 \cdot T \text{ (mm)}, \qquad (40)$$

wobei T die Summe der positiven Temperatur-Tagesmittel bezeichnet. Im vorliegenden Fall wurden die Werte von T für die verschiedenen Höhenstufen aus der mittleren Tagestemperatur der meteorologischen Station Jungfraujoch mit dem mittleren Temperaturgradienten von -0.65° pro 100 m Höhenzunahme berechnet. Die Summen der positiven Temperatur-Tagesmittel sind in Tabelle 8 zusammengestellt.

Die Verdunstung kann leider in den in Frage kommenden Höhenlagen von 3250 - 4000 m ü.M. nur grob abgeschätzt werden. Nach Lütschg (vgl. Keller, 1950) beträgt die Verdunstung in einer Höhe von 3450 m ü.M. (diese Höhe entspricht ungefähr der mittleren Höhe des beobachteten Teilgebietes im Ewigschneefeld) V = 200 mm. Da einerseits der nach Lütschg berechnete Verdunstungsbetrag eher zu hoch erscheint, andererseits im gesamten betrachteten Gebiet nicht stark ändern dürfte, wurde er bei der Berechnung der jährlichen Ablation vorerst nicht berücksichtigt.

Tabelle 8: Summen der positiven Temperatur-Tagesmittel in Grad Celsius für verschiedene Höhenlagen und Referenzperioden.
Die einzelnen Summenwerte wurden erhalten, indem für jeden Tag das arithmetische Tagesmittel der Lufttemperatur:

$$\frac{T_{07}30 + T_{13}30 + T_{21}30}{3}$$ für die meteorologische Station

Jungfraujoch (3578 m ü.M.) gebildet wurde. Dieses Tagesmittel wurde mit Hilfe des Temperatur-Gradienten: 0.65°C/100 m ΔH auf die einzelnen Höhenlagen reduziert und die Werte pro Referenzperiode aufsummiert.

Höhenlage m ü.M. / Referenzperiode	2950	3050	3150	3250	3350	3450	3550	3650	3750	3850	3950	4050
1.-30.10.1956	30.8	22.8	15.7	10.4	6.4	3.7	1.4	0.5				
1.5.-30.9.1957	289.8	243.2	200.6	162.8	129.3	102.7	79.5	61.5	46.7	33.7	24.2	17.2
1.10.56-30.9.57	320.6	266.0	216.3	173.2	135.7	106.4	80.9	62.0	46.7	33.7	24.2	17.2
1.-30.10.1957	33.4	21.4	12.2	7.4	3.8	2.5	1.9	1.2	0.5			
1.5.-30.9.1958	441.0	390.8	309.8	248.0	198.9	153.2	114.0	78.7	54.7	36.8	23.3	14.6
1.10.57-30.9.58	474.4	412.2	322.0	255.4	202.6	155.7	115.8	79.9	55.4	36.8	23.3	14.6
1.-30.10.1958	16.8	11.3	8.0	5.1	3.2	1.9	0.6					
1.5.-30.9.1959	494.1	323.2	258.8	203.7	152.0	108.5	74.7	51.5	34.8	22.0	14.2	9.3
1.10.58-30.9.59	510.9	334.5	266.8	208.8	155.2	110.4	75.3	51.5	34.8	22.0	14.2	9.3
1.-30.10.1959	17.8	11.0	5.9	3.1	1.2	0.2						
1.5.-30.9.1960	245.1	190.6	149.5	112.7	81.2	56.5	37.4	26.9	14.9	8.4	4.6	1.3
1.10.59-30.9.60	262.9	201.6	155.3	115.8	82.4	56.7	37.4	26.9	14.9	8.4	4.6	1.3
1.-30.10.1960	7.2	5.3	3.8	2.5	1.5	0.8	0.2					
1.5.-30.9.1961	394.0	333.1	278.1	233.5	189.5	150.6	115.1	85.5	58.5	37.2	19.9	9.7
1.10.60-30.9.61	401.2	338.4	281.8	235.9	190.9	151.4	115.3	85.5	58.5	37.2	19.9	9.7
1.-30.10.1961	41.4	32.1	24.0	17.9	12.9	8.6	5.1	2.9	1.3			
1.5.-30.9.1962	394.9	344.7	289.5	236.7	191.3	150.6	113.3	83.2	48.7	38.1	23.0	13.8
1.10.61-30.9.62	436.2	376.8	313.4	254.6	204.1	159.2	118.4	86.1	50.0	38.2	23.0	13.8
1.-30.10.1962	63.3	52.9	38.9	33.1	24.8	17.0	9.0	5.8	2.9	1.6	0.6	
1.5.-30.9.1963	349.6	297.5	228.5	173.8	134.6	98.7	70.9	50.7	35.1	23.1	13.9	8.2
1.10.62-30.9.63	413.0	350.4	267.4	207.0	159.4	115.7	79.9	56.5	37.9	24.6	14.5	8.2
1.-30.10.1963	33.3	24.7	20.0	10.4	6.0	3.2	1.6	0.6				
1.5.-30.9.1964	448.3	370.6	314.7	241.2	189.0	143.1	103.6	72.1	46.9	30.4	20.5	11.8
1.10.63-30.9.64	481.6	395.3	334.7	251.6	195.0	146.3	105.2	72.7	46.9	30.4	20.5	11.8
1.-30.10.1964	8.1	4.0	1.1									
1.5.-30.9.1965	262.2	210.4	168.7	129.7	101.1	75.5	52.7	37.1	24.3	13.4	6.9	3.3
1.10.64-30.9.65	270.3	214.4	169.9	129.7	101.1	75.5	52.7	37.1	24.3	13.4	6.9	3.3
1.-30.10.1965	40.9	31.1	21.7	13.6	6.9	2.3						
1.5.-30.9.1966	323.8	260.2	203.3	159.3	123.2	89.3	65.5	46.4	35.2	26.2	17.3	11.4
1.10.65-30.9.66	364.7	291.2	225.0	172.9	130.2	91.6	65.5	46.4	35.2	26.2	17.3	11.4
1.-30.10.1966	33.6	24.1	16.5	10.4	6.5	3.9	1.9	0.1				
1.5.-30.9.1967	405.7	346.1	283.2	234.5	190.5	137.6	98.1	74.5	50.3	31.0	15.7	6.1
1.10.66-30.9.67	439.3	370.2	299.7	244.9	196.9	141.4	100.1	74.7	50.3	31.0	15.7	6.1
1.-30.10.1967	70.3	56.2	43.7	33.2	23.5	16.1	11.0	6.6	4.2	2.0	0.6	
1.5.-30.9.1968	261.4	205.1	148.3	121.2	92.7	69.7	54.9	43.0	33.8	26.1	17.6	13.9
1.10.67-30.9.68	331.7	261.3	192.0	154.4	116.2	85.8	65.9	49.5	38.1	28.1	18.2	13.9
1.-30.10.1968	40.4	29.2	20.9	14.0	8.8	5.6	2.3	0.1				
1.5.-30.9.1969	397.6	334.9	277.0	224.7	178.5	137.6	102.3	73.2	48.9	31.3	17.8	2.0
1.10.68-30.9.69	438.1	364.1	297.9	238.7	187.3	143.2	104.6	73.3	48.9	31.3	17.8	2.0

Die jährlichen Akkumulationswerte wurden also nur mit Hilfe der gemessenen Jahresbilanzwerte und der nach Zingg berechneten Schmelzwassermenge für die verschiedenen Firnpegelstandorte bestimmt. Die für das hydrologische Jahr 1967/68 berechneten Werte sind in Abb. 37 (oberer Teil) in Funktion der Höhe über Meer aufgetragen, wobei es sich wiederum um Mittelwerte $\bar{c}_a$ handelt, da bei ihrer Berechnung von den Mittelwerten $\bar{b}_a$ ausgegangen wurde.

Das gleiche Vorgehen wurde auch zur Berechnung der mittleren Akkumulation $< c_a >$ in der Referenzperiode 1956/57 - 1968/69 benützt. Auch hier wurde zu den in Abb. 38 dargestellten Werten von $< b_a >$ die für die gleiche Referenzperiode berechnete Ablation $< a_a >$ addiert, woraus $< c_a >$ in verschiedenen Höhenlagen für diese 13-jährige Periode resultiert. Aus Vergleichsgründen wurde die gleiche Berechnung auch für das Jungfraufirngebiet vorgenommen, und die erhaltenen Werte sind in Abb. 39 in Funktion der Höhe über Meer aufgetragen. Wie man feststellt, ist der Gradient $\Delta < c_a > / \Delta H$ im Ewigschneefeld wesentlich grösser als im Jungfraufirn, wobei dieser Unterschied wohl den verschiedenen Niederschlagsverhältnissen in den beiden Gebieten zuzuschreiben ist. Einzig Unterschiede in der Niederschlagsmenge dürften in diesem Fall ausreichen, um die relativ grossen Unterschiede bezüglich der jährlichen Akkumulation im unteren Teil der beiden Firnbecken zu erklären. Andere Faktoren wie die Verdunstung oder der Niederschlagsanteil in flüssiger Form können die Akkumulationsraten in den beiden Firnbecken nur geringfügig beeinflussen. Erstens ist ihr prozentualer Anteil bezüglich der Gesamtablation, bzw. bezüglich des Gesamtniederschlages klein und zweitens sind beide stark von der mittleren Lufttemperatur abhängig, welche in den beiden Firnbecken und in der gleichen Höhenlage annähernd dieselbe sein dürfte. Nach Pardé (vgl. Lliboutry, 1955) beträgt in der Schweiz der Niederschlagsanteil in flüssiger Form in Höhenlagen von 3450 m ü.M. nur 5% des Gesamtniederschlages. - Die grossen in Abb. 37 und 39 dargestellten Akkumulationsgradienten des Ewigschneefeldes können deshalb so gedeutet werden, dass der untere, südliche Teil des Ewigschneefeldes (P 13, P 12) ein Gebiet ist, das, relativ gesehen, geringe Niederschläge erhält, während der obere, nordwestliche Teil (P 11, P 11') unverhältnismässig grosse Niederschlagsmengen empfängt. Es liegt auf der Hand, dass es sich hier nicht um einen reinen Höheneinfluss handelt, sondern dass die Orographie und die verschiedene Entfernung von der Wetterscheide diese grossen Unterschiede bedingen. Der obere Teil des Ewigschneefeldes ist, wie dies Abb. 2, 35 und 41 zeigen, am Unteren Mönchsjoch gegen Nordwesten offen und liegt unmittelbar an der Wetterscheide.

Der untere Teil wird hingegen durch den Trugberg gegen NW und durch mehrere Gipfel gegen S- und SE abgeschirmt und liegt schon rund 5 km südlich der Wetterscheide. Er erhält somit erstens weniger Niederschläge von NW und zweitens nur geringe aus S, SE-Richtung, woraus sich der grosse Akkumulationsgradient erklären lässt. Der Jungfraufirn kann hingegen, wie dies Abb. 40 gut illustriert, mit einem von NW nach SE geöffneten Kanal verglichen werden, der abwechslungsweise sowohl durch die N, NW- wie durch die S-Winde Niederschlag erhält und deshalb einen wesentlich kleineren Akkumulationsgradienten besitzt.

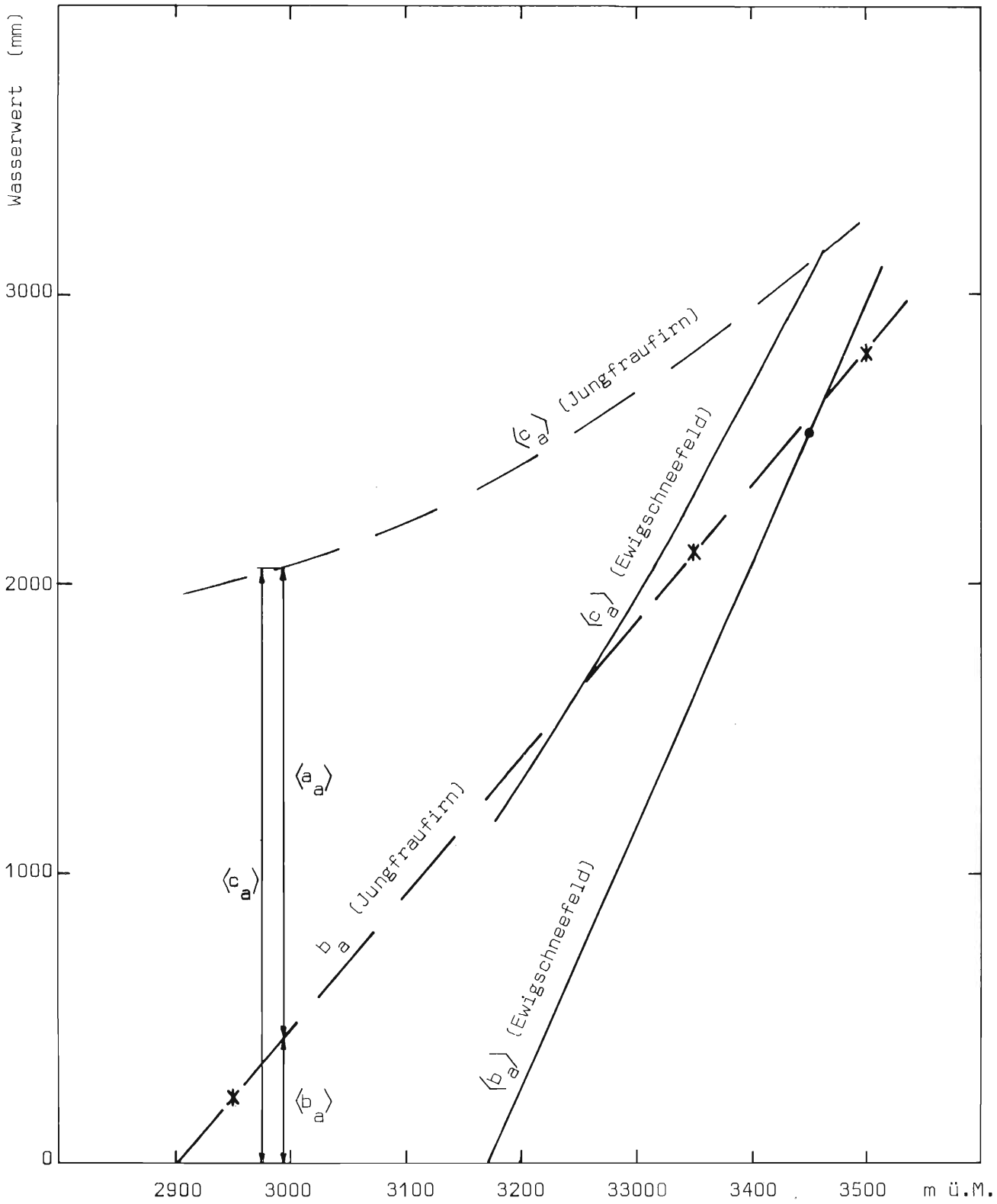

Abb. 39 Mittlere Jahresbilanzwerte ($<b_a>$, 1956/57 - 1968/69) im Jungfraufirn und im Ewigschneefeld in Funktion der Höhe über Meer. Zu den mittleren Jahresbilanzwerten wurde die nach Zingg (1951) berechnete und gemittelte Ablation $<a_a>$ addiert, woraus die mittlere Akkumulation $<c_a>$ in Funktion der Höhe über Meer resultiert.

Abb. 40 Flugbild des oberen Teiles des Grossen Aletschgletschers, von SSE aufgenommen; in der Bildmitte Konkordiaplatz, darüber Jungfraufirn, im rechten oberen Bildteil das Ewigschneefeld. Photo Swissair.

7.7. JAEHRLICHE AKKUMULATION, BZW. MITTLERE JAEHRLICHE AKKUMULATION IM EWIGSCHNEEFELD IM HYDROLOGISCHEN JAHR 1967/68 UND IN DER REFERENZPERIODE 1956/57 - 1968/69

Mit Hilfe der berechneten Gradienten der Akkumulation, die in den Abbildungen 37 und 39 dargestellt sind, kann die Akkumulation des ganzen Gebietes (C_a) für das hydrologische Jahr 1967/68 und $\bar{C}_a$ für die mehrjährige Referenzperiode 1956/57 - 1968/69 berechnet werden.

Zur Berechnung wurden zwei verschiedene Methoden (I, II) benützt. Der Methode I liegt die Idee zu Grunde, dass die Akkumulation im betrachteten Gebiet vor allem eine Funktion der Höhe über Meer ist, wobei aber die Akkumulation an den exponierten Seitenhängen geringer ist als in den Gletscher-"ebenen", die in den gleichen Höhenzonen liegen (vgl. Abschnitt 7.2.).

Bei Methode I konnte deshalb sowohl für das Bilanzjahr 1967/68 als auch für die Periode 1956/57 - 1968/69, zu den in Abschnitt 7.4. berechneten Bilanzwerten des ganzen Gebietes die berechnete Ablation A_a, bzw. $< A_a >$ addiert werden, sodass für das Bilanzjahr 1967/68 die Jahres-Akkumulation $(C_a)_1$, $(C_a)_2$ und für die Referenzperiode 1956/57 - 1968/69 die mittlere jährliche Akkumulation $< C_a >$ des ganzen Gebietes erhalten wurde.

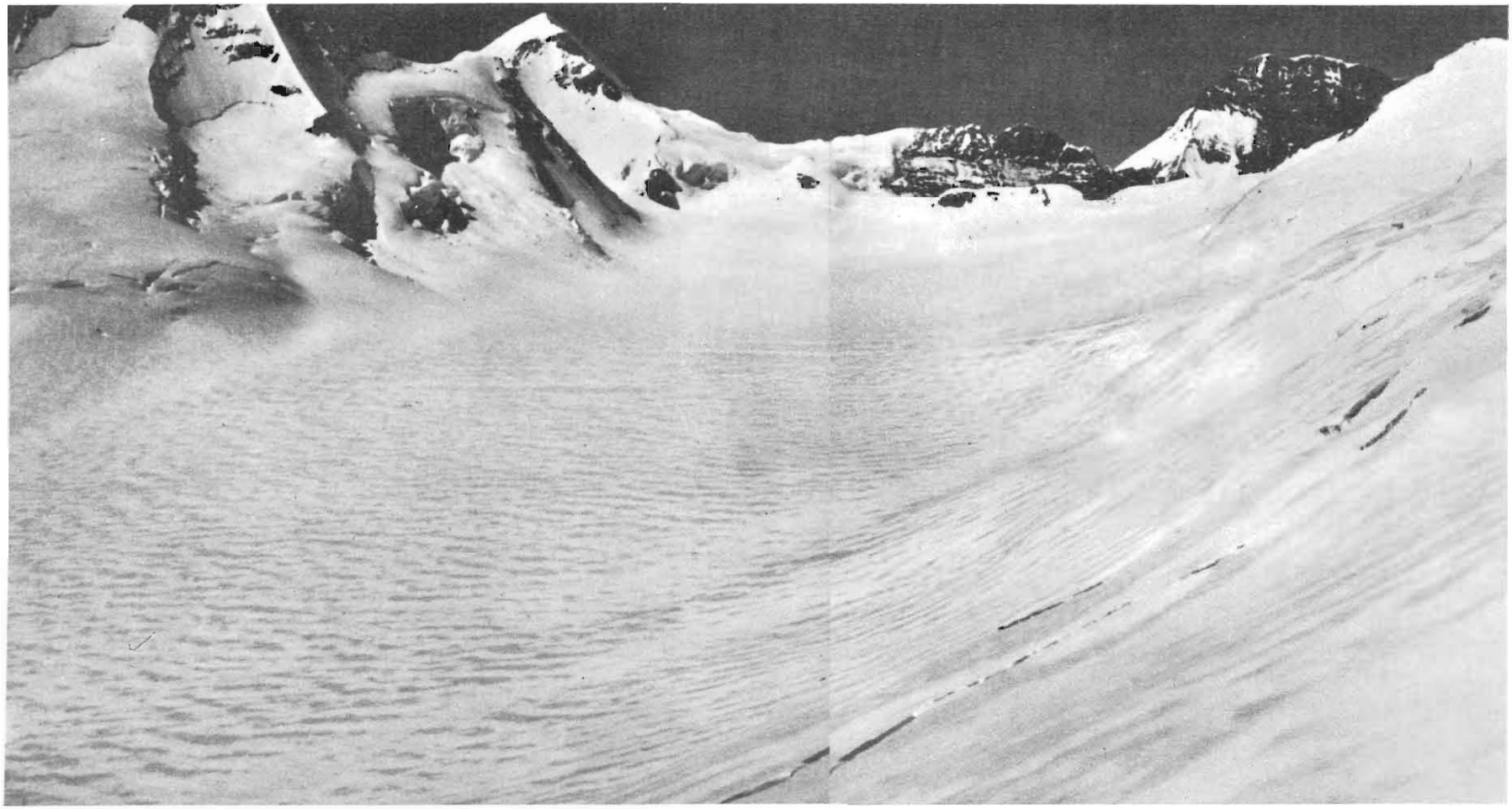

Abb. 41 Ewigschneefeld, Blick vom südöstlichen Hang des Gross Fiescherhorns firnaufwärts; links im Hintergrund Mönch, rechts im Hintergrund der Eiger.

Photo H. Röthlisberger.

Dabei gilt:

$(C_a)_1 = (B_a)_1 + A_a$ Querprofilmittelwerte $\bar{b}_a$ zur Berechnung verwendet

$(C_a)_2 = (B_a)_2 + A_a$ Achsenwerte b_a zur Berechnung verwendet.

Methode II beruht auf der Idee, dass der Niederschlag im Ewigschneefeld weniger eine Funktion der Höhe über Meer als eine Funktion des Abstandes von der Wetterscheide ist. Das Ewigschneefeld wurde deshalb in vier, zum Teil geradlinig begrenzte Abschnitte aufgeteilt, deren Mitte ungefähr mit der Lage der Pegelstandorte P 13, P 12, P 11, P11' identisch ist (vgl. Abb. 35). Die Mitten der Abschnitte weisen verschiedene Abstände von der Wetterscheide auf. Das "Hang"-Defizit wurde insofern berücksichtigt, als bei der Berechnung der Gesamtmenge Wasser die einzelnen Abschnittflächen nicht mit den Mittelwerten $\bar{c}_a$ (die aufgrund der Mittelwerte $\bar{b}_a$ berechnet wurden) multipliziert wurden, sondern mit den c_a-Werten, die in der Mitte des Firnbeckens bestimmt wurden. Diese sind im allgemeinen kleiner als die Mittelwerte $\bar{c}_a$, da nach Abb. 36 der an den Hängen verfrachtete Schnee zum grössten Teil am Hangfuss wieder abgelagert wird. Die Werte c_a stellen somit im Querprofil des Firnbeckens einen mittleren Wert dar, der dem ganzen, begrenzten Abschnitt zugeordnet werden kann. Jede einzelne Abschnittsfläche wurde nun direkt mit dem für die Mitte des Abschnittes berechneten Wert c_a multipliziert ohne Berücksichtigung der verschiedenen im Abschnitt liegenden Höhenzonen. Die Berechnung wurde wiederum für das hydrologische Jahr 1967/68 und die Referenzperiode 1956/57 - 1968/69 ausgeführt.

Die mit den beiden Methoden erhaltenen Resultate sind in Tabelle 9 zusammengestellt.

Tabelle 9: Jährliche Akkumulation C_a, bzw. mittlere jährliche Akkumulation $\langle C_a \rangle$ im Ewigschneefeld im hydrologischen Jahr 1967/68 und in der Referenzperiode 1956/57 - 1968/69. (in mm Wasser auf die Gesamtfläche von 8.05 km^2 bezogen).

Berechnungs-vorgehen	Berechnungs-grundlage	1967/68	1956/57 - 1968/69
Methode I	$\bar{c}_a$	$(C_a)_1 = 2544$	
Methode I	c_a	$(C_a)_2 = 2488$	$\langle C_a \rangle = 2356$
Methode II	c_a	$C_a = 2562$	$\langle C_a \rangle = 2475$

Die mit den beiden verschiedenen Methoden errechneten Werte sind nicht stark verschieden, woraus man den Schluss ziehen kann, dass die zweite, einfachere Methode, für die nur die Werte von c_a in der Achse des Firnbeckens benötigt werden, im Ewigschneefeld den Gegebenheiten gut Rechnung trägt und deshalb die erste Methode in Zukunft ersetzen kann.

Um die mittlere jährliche Akkumulation $\langle C_a \rangle$ (1956/57 - 1968/69) mit dem mittleren Gebietsniederschlag ($\bar{N}$) des ganzen Einzugsgebietes der Massa vergleichen zu können, kann man die in Abschnitt 7.6. berechnete und bis anhin vernachlässigte Verdunstung V = 200 mm und den Anteil an flüssigem Niederschlag von 5% zum berechneten Wert $\bar{C}_a$ dazuschlagen und erhält dann für die Referenzperiode 1956/57 - 1968/69 einen mittleren, jährlichen Niederschlag, $\bar{N} \approx 2750$ mm. Der mittlere, jährliche Gebietsniederschlag des ganzen Einzugsgebietes der Massa beträgt nach Kasser (1967)*) in der gleichen Referenzperiode $\bar{N} = 2138$ mm.

*) Da die genannte Arbeit nur die Werte bis und mit 1964/65 enthält, wurden die Werte für die Bilanzjahre 1965/66 - 1968/69 in analoger Weise berechnet und ergänzt.

Die mittlere, jährliche Niederschlagsmenge des betrachteten Teilgebietes des Ewigschneefeldes ist entsprechend der grossen Meereshöhe des Gebietes, trotz der relativ niederschlagsarmen Zone am unteren Ende des Teilgebietes, wesentlich grösser als die mittlere Niederschlagsmenge des ganzen Einzugsgebietes der Massa. Andererseits scheinen aber die Niederschläge nicht so hoch zu sein, wie dies die "Niederschlagskarte der Schweiz" (vgl. Atlas der Schweiz, 1968) angibt. Nach dieser Karte würde das ganze betrachtete Gebiet in der Referenzperiode 1901 - 1940 jener Niederschlagszone angehören, in der die mittleren, jährlichen Niederschlagsmengen grösser als 3200 mm sind. Dieser Betrag scheint im Vergleich mit dem berechneten und oben genannten Betrag von $\overline{N} \approx 2750$ mm zu hoch, da die in dieser Arbeit betrachtete Referenzperiode von 1956/57 - 1968/69 als eher niederschlagsreich zu bezeichnen ist.

7.8. BEWEGUNGSMESSUNGEN IM GEBIET DES EWIGSCHNEEFELDES

Die Firnpegel, die an einer, durch Triangulation vermessenen Stelle gesetzt werden, können nicht nur zur Messung der Schneehöhe, sondern auch zur Messung der Firnbewegung während eines Bilanzjahres benützt werden. Da die Pegel einzelne Punkte an der Firnoberfläche (d.h. genau gesagt die oberste Schicht des Firns) markieren, kann mit ihrer Hilfe und bei entsprechender Vermessung die mittlere Oberflächengeschwindigkeit in diesen Punkten bestimmt werden.

Die im Bilanzjahr 1967/68 gemessenen Vektoren der mittleren täglichen Pegel-Horizontalgeschwindigkeiten sind in Abb. 35 eingezeichnet. Im Querprofil P 13, wo die Pegelstangen im Bilanzjahr 1967/68 aus 5 m langen Bambusrohren bestanden, gingen leider drei der sieben Pegel verloren, weshalb als Ergänzung noch einige Pegelmessungen des Bilanzjahres 1968/69 eingetragen sind. Abgesehen von der verhältnismässig grossen Geschwindigkeit des Pegels P 11', die zum Teil auf die verstärkte Krichbewegung der grossen Schneedecke in jenem Punkt zurückzuführen ist (am Pegel P 11' wurde am Ende des Bilanzjahres 1967/68 eine Schneehöhe von rund 8 m abgelesen), lässt sich die übliche Zunahme der Geschwindigkeit vom Bergschrund firnabwärts beobachten. Die Oberflächengeschwindigkeits-Verteilung in den Querprofilen P 13, P 12 entspricht ebenfalls der erwarteten Verteilung, indem die Horizontalgeschwindigkeit in der Mitte des Firnbeckens ihr Maximum erreicht, gegen den Rand hin zunehmend abnimmt und in der eigentlichen Randzone ihr Minimum aufweist.

Die Geschwindigkeitsverteilung im Querprofil P 11 konnte aber nicht nur durch Einmessen von einzelnen Pegeln, sondern auch durch Bestimmen der Lage eines ursprünglich geradlinigen Drahtes im Firn gemessen werden. Dabei wurden mehrere Drahtepizentrumspunkte an der Firnoberfläche mit Hilfe der Gleich- oder Wechselstrommethode bestimmt und signalisiert. Die Lage der Epizentrumspunkte wurde dann in gleicher Weise wie die Lage der Pegel durch Triangulation von festen Standorten (Felskuppen) vom Gletscherrand aus vermessen. Da die Position der Drähte, und, bei entsprechendem Aufwand, auch ihre Tiefe während mehrerer Jahre bestimmt werden kann, bietet die Vermessung von Drähten die Möglichkeit, die Geschwindigkeitsverteilung nicht nur in der obersten Firnschicht, sondern auch in tieferen Firnschichten zu bestimmen. Diese Möglichkeit ist in Abb. 42 angedeutet, wo die Epizentren von "ein"- und "mehrjährigen" Drähten, die im Querprofil P 11 jeweils zu Beginn des Bilanzjahres ausgelegt und ein oder mehrere Jahre später wieder eingemessen wurden, aufgezeichnet sind. Dabei wurden die einzelnen Epizentrumspunkte an der Firnoberfläche zur Darstellung lotrecht auf eine durch die ursprüngliche Profilquerlinie P 11 gehende Horizontalfläche projiziert (Horizontalgeschwindigkeit)*) Die vertikale Komponente der Bewegung wurde nicht bestimmt.

Die in der Abbildung dargestellten Drahtepizentren vermitteln ein Bild der Verteilung der Horizontalgeschwindig-

*) Die Epizentrumspunkte des Doppeldrahtes 1967 und 1968 (Messung vom 30.7./2.8.69) bezeichnen die Mitte zwischen den beiden Drahtepizentrumspunkten, während sich jene des Doppeldrahtes 1967 (Messung vom 7./8.9.68) auf die Position des firnabwärts liegenden Drahtes beziehen.

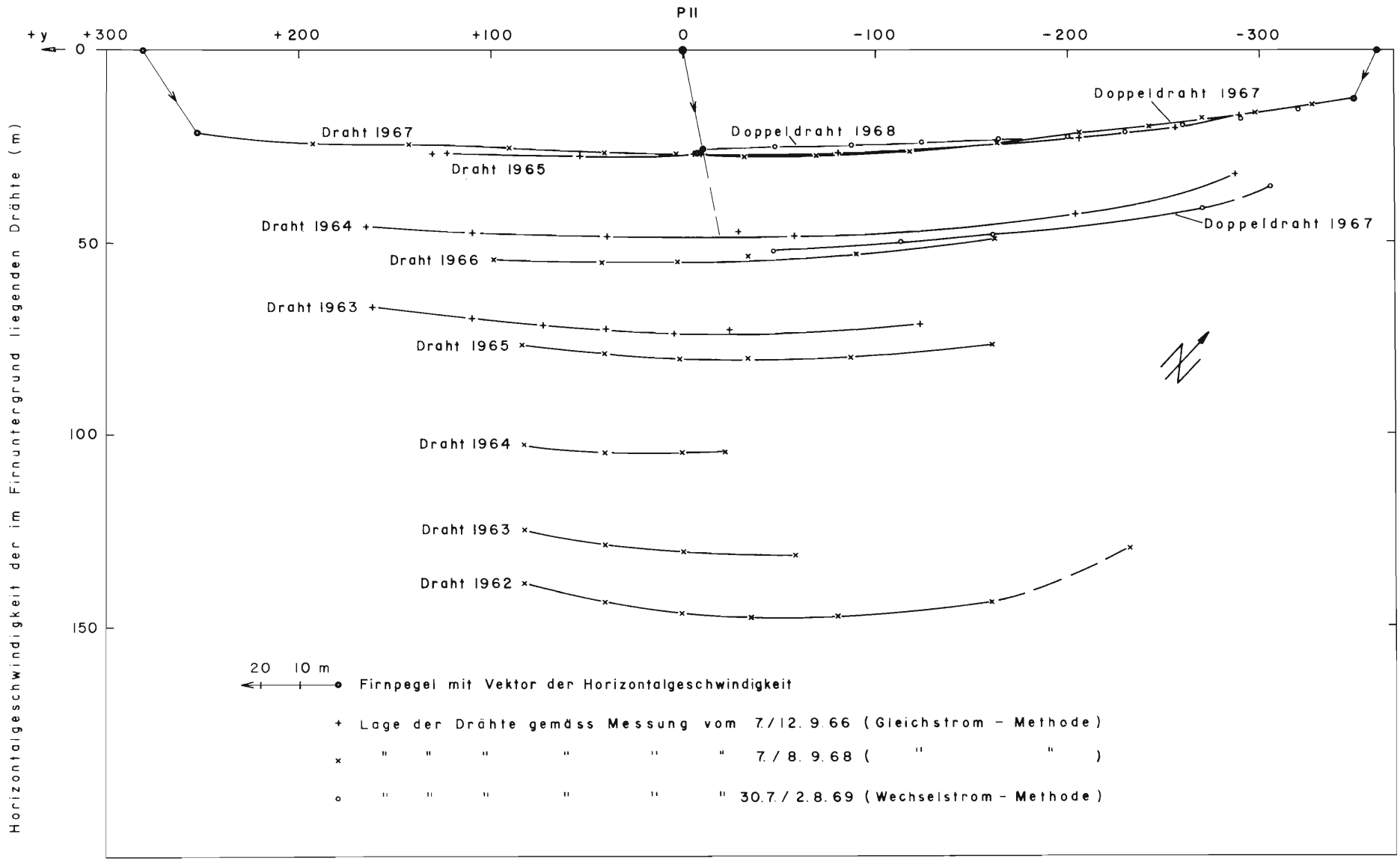

Abb. 42 Lage der Drähte (auf eine Horizontalebene projiziert) nach einem oder mehreren Jahren der Auslage im Querprofil P 11.

keit in verschiedenen Firntiefen im Querprofil P 11. Diese Verteilung scheint über mehrere Jahre ziemlich homogen zu sein, indem die auf die beschriebene Horizontalebene projizierten Drähte auch nach mehreren Jahren, d.h. wenn sie in tiefere Firnschichten gelangt sind, noch annähernd den gleichen Abstand voneinander aufweisen. Die einzige Ausnahme bildet der Draht 1962 (Messung 7.12.9.68), dessen Abstand vom Draht 1963 wesentlich kleiner ist, als der Abstand zwischen den übrigen Drähten. Der Draht 1962 befand sich zum Zeitpunkt der Messung in einer Tiefe von rund 26 m. (Diese Tiefe wurde mit dem in Abschnitt 6.2.6. erwähnten Verfahren gefunden. Sie lässt sich mit Hilfe der Firndichte-Kurve von Seligmann und Hughes (1939) und aufgrund des jährlich bestimmten Bilanzwertes (b_a) annähernd errechnen). Eine Erklärungsmöglichkeit für diesen kleineren Abstand bestünde darin, dass in einer Tiefe von 25 - 30 m, wo nach Untersuchungen von Seligmann und Hughes (1939) der Firnschnee in dieser Höhenlage in kompaktes Eis übergeht, gewisse Differentialbewegungen vorkommen (vgl. Messungen von Miller, 1957), über deren Grösse man vorläufig noch sehr wenig weiss. Falls solche Drähte in gewissen Zeitintervallen systematisch über mehrere Jahre vermessen werden, sollte es mit ihrer Hilfe möglich sein, auch hierüber genauere Angaben zu machen.

8. ZUSAMMENFASSUNG

Während vier Jahren wurden im Rahmen dieser Arbeit verschiedene Messmethoden zur Bestimmung der Massenbilanz in Firnpunkten entwickelt oder geprüft und wo möglich mit den herkömmlichen Methoden verglichen.

Die Schneehöhe wurde mit Hilfe von langgestreckten Drähten, bzw. Drahtschleifen bestimmt. Diese wurden zu Beginn des Bilanzjahres quer zum Firnbecken auf die Firnoberfläche ausgelegt und konnten nach einem Jahr bei Verwendung von Gleich- oder Wechselstrom durch die Vermessung des entstehenden elektrischen resp. elektromagnetischen Feldes wieder aufgefunden werden. Mit der Gleichstrom-Methode konnte die Drahtposition eines rund 6 m unter der Firnoberfläche liegenden Drahtes auf 50 cm genau und die Drahttiefe (= Schneehöhe) durch Tiefenprofile auf 20 cm genau bestimmt werden. Da aber die Genauigkeit und der Anwendungsbereich der Gleichstrom-Methode stark von den Wind- und Wetterverhältnissen abhängig ist, wird zur genauen Schneehöhenmessung mit Vorteil die Wechselstrom-Methode benützt. Diese gestattete die Drahtposition mit einer Genauigkeit von 20 cm und die Drahttiefe mit Tiefenprofilen auf 5 cm genau zu bestimmen.

Mit Hilfe der Drähte kann also die Schneehöhe mindestens so genau wie mit Firnpegeln bestimmt werden, wobei aber die Schneehöhe bei Benützung von Drähten nicht nur in einem einzigen Punkt, sondern entlang der ganzen Drahtauslage in beliebig vielen Punkten gemessen werden kann. Ueberdies ist es bei der Wechselstrom-Methode durch Messen von Oberflächenprofilen auch möglich, die Position und Tiefe von "mehrjährigen", in grösserer Tiefe unter der Firnoberfläche liegenden Drähten, zu finden. Damit kann die Wechselstrom-Methode nicht nur zur Schneehöhenmessung, sondern auch zur Bestimmung der Firnverdichtung und der Firnbewegung im Firnuntergrund benützt werden.

Zur Messung des mittleren Raumgewichtes der Schneedecke wurden zwei verschiedene Methoden geprüft, wobei beide Methoden so konzipiert waren, dass eine Schneeprobenentnahme überflüssig war und somit das zeitraubende Graben eines Firnschachtes vermieden werden konnte.

Bei der Neutronensonde-Messmethode wurde das Raumgewicht der einzelnen Schneeschichten mit Hilfe der Neutronensonde von einem lotrechten, verrohrten Bohrloch aus alle 50 cm gemessen und das mittlere Raumgewicht der ganzen Schneedecke als Mittelwert aller Messungen berechnet. Um trotz des relativ grossen Abstandes von zwei Einzelmessungen einen guten Mittelwert für das Raumgewicht zu erhalten, wurde die Einflusssphäre der Neutronensonde durch Benützung von weiten Bohrlöchern (SIPRE-Bohrlöcher, ø = ca. 13 cm) vergrössert. Die Neutronensonde wurde dann speziell für diese Bohrlochart geeicht. Da sich die Bohrlöcher bei grossen Lochtiefen nach unten verjüngten, wurde der Bohrlocheinfluss (Messtiefe, Bohrlochtiefe) mit Hilfe der Mehrfachregressionsrechnung abgeschätzt und in den Eichkurven berücksichtigt. Die Neutronensonde darf aufgrund der erhaltenen Resultate als geeignetes Messinstrument zur Bestimmung des mittleren Raumgewichtes einer grossen Schneedecke bezeichnet werden. Mit ihrer Hilfe kann das mittlere Raumgewicht einer sechs Meter hohen Schneedecke in einem Tag an rund vier Stellen bestimmt werden. Der mittlere Fehler der Messung (ca. 3 - 5%) ist etwas grösser als beim Wägeverfahren (ca. 3%), doch kann er bei Benützung der Neutronensonde ohne allzu grossen zeitlichen Aufwand auf das gewünschte Mass verkleinert werden, indem an jedem Messplatz nicht nur eine, sondern mehrere Messungen ausgeführt werden.

Bei der Druckkissen-Messmethode wurde das mittlere Raumgewicht der Schneedecke durch Messen des Schneedruckes auf ein mit Frostschutzlösung gefülltes Kissen bestimmt. Da die im unvergletscherten Gelände schon vielerorts mit Erfolg benützte Messmethode relativ umfangreiche und zum Teil teure Installationen notwendig macht, konnte sie nicht ohne Anpassung für Firnbilanzmessungen übernommen werden. Die ganze Installation kann hier nämlich nur während eines Bilanzjahres benützt werden, da sie am Ende der Messperiode nicht ausapert wie im unvergletscherten Gelände. Als Kissen wurden deshalb billige, käufliche Gummi-Luftmatrazen verwendet, und als Messystem wurde ein vereinfachtes Abstichsystem benützt. Leider konnten mit dem reduzierten Aufwand keine befriedigenden Resultate erzielt werden, da teils das Kissenmaterial, teils die Steigrohre den extremen

Hochgebirgsverhältnissen nicht gewachsen waren, teils auch prinzipielle Schwierigkeiten auftraten. Die einzelnen Einflüsse können nur abgeschätzt werden, doch scheinen die teilweise beträchtliche mechanische Festigkeit der Firnschichten und die durch die Kissen veränderten Setzungsverhältnisse der Firnunterlage die Resultate am meisten zu beeinflussen. Die mit der Wägemethode bestimmten mittleren Schneeraumgewichte stimmten deshalb nur in einigen wenigen Fällen mit den Druckkissen-Werten überein, woraus geschlossen werden kann, dass Druckkissen von der beschriebenen Art zur Messung des mittleren Raumgewichtes in Firngebieten nicht geeignet sind.

Da der grösste Teil der Messungen im Ewigschneefeld ausgeführt wurde, konnten aufgrund der Messdaten auch gewisse hydrologisch interessante Grössen für dieses Gebiet berechnet werden. Die Messungen beziehen sich aber nur auf ein, bzw. einige wenige Jahre, sodass die Aussagekraft der gemessenen Daten nicht überschätzt werden darf. Die wesentlichen Ergebnisse sind folgende:

- Die Schneehöhenverteilung ist im Ewigschneefeld aufgrund der Messungen des Bilanzjahres 1967/68 so, dass an den Hängen mit zunehmender Höhe über Meer, d.h. in Richtung der exponierten Gräte, weniger Schnee abgelagert wird als im zentralen, relativ flachen Streifen des Firnbeckens. In diesem Streifen ist die Schneehöhenverteilung in verschiedenen Jahren (1966/67 - 1968/69) recht ähnlich, wobei der von den Hängen weggeblasene Schnee auf beiden Seiten dieses Streifens, d.h. am Hangfusse wieder zur Ablagerung gelangt.
- Das mittlere Raumgewicht der Schneedecke variierte sowohl im Frühling 1968 wie im Herbst 1968 nur geringfügig und betrug im Frühling im Mittel 404 kg/m^3 und im Herbst 475 kg/m^3.
- Mit Hilfe der gemessenen Schneehöhen und der mittleren Raumgewichte wurde die Jahresbilanz des Ewigschneefeldes im Bilanzjahr 1967/68 berechnet. Unter der Annahme, dass die Schneehöhenverteilung auch in anderen Jahren gleich war, wurde die mittlere Jahresbilanz auch für die Referenzperiode 1956/57 - 1968/69 berechnet. Gleichzeitig wurde die Grössenordnung der Akkumulation für die gleichen Referenzperioden bestimmt, indem die Ablation zunächst unter Vernachlässigung der Verdunstung mit Hilfe der experimentell bestimmten Gleichung von Zingg (1951) berechnet wurde und zum entsprechenden Bilanzwert addiert wurde.

  Bei der Annahme, dass die Verdunstung im betrachteten Gebiet $V = 200$ mm (gemäss Lütschg, vgl. Keller, 1950) betrug und dass der flüssige Niederschlag 5% des Gesamtniederschlages ausmachte (gemäss Pardé, vgl. Lliboutry, 1955), konnte der mittlere jährliche Niederschlag für die Referenzperiode 1956/57 - 1968/69 abgeschätzt werden. Die Abschätzung ergab $\bar{N} \approx 2750$ mm.

  Der mittlere jährliche Gebietsniederschlag war somit im Ewigschneefeld entsprechend seiner Höhenlage deutlich grösser als der nach Kasser (1967) für das ganze Einzugsgebiet der Massa berechnete, der in der gleichen Referenzperiode $\bar{N} = 2138$ mm betrug; andererseits erreichte er aber nicht den Betrag $N > 3200$ mm, den die "Niederschlagskarte der Schweiz" (vgl. Atlas der Schweiz, 1968) für die langjährige Referenzperiode 1901 - 1940 angibt.

Die ganze, teils auf Messungen, teils auf Abschätzungen beruhende hydrologische Charakterisierung des Ewigschneefeldes, zeigte einmal mehr, dass die Zahl der Messpunkte in solchen Firngebieten nicht gross genug gewählt werden kann. Viele Messpunkte kommen aber nur dann in Frage, wenn zur Messung auch rationelle Messmethoden, wie sie z.B. in der vorliegenden Arbeit beschrieben wurden, zur Verfügung stehen.

SUMMARY

Quantitative information on annual glacier mass balance can be found from the "surface balance method". Assuming that the main part of the annual change in mass takes place in a relatively thin surface layer of the glacier, this thin layer must be measured at the end of the balance year at representative points.

In the accumulation area of a glacier these measurements consist mostly of snow stake readings and of snow pit samplings in order to determine the annual snow depth and the bulk density of the snow layers.

As long as the snow depths are low, this procedure is adequate. However in the accumulation area of the "Grosse Aletschgletscher", where the snow depth in the higher parts often exceeds 6 m and the accumulation area covers about 75 km^2 this procedure is no longer satisfactory.

In this study several partly new methods have been investigated, which allow more rapid point measurements for the snow depth and the bulk density. The methods are especially designed for large, relatively flat glacier areas, where the annual snow depths are high.

The snowdepth was determined by means of long straight electrical wires or very elongated wire rectangles. These were placed on the firn surface and across the firn valley at the beginning of the balance year. At the end of the year they were located either by applying D.C. current to the buried wires and measuring the electric field at the surface (D.C. method) or similarly by applying A.C. current and measuring the magnetic field (A.C. method).

The D.C. method was demonstrated to be not very suitable, although it was possible to determine the wire position as well as its depth below the surface, i.e. the snowdepth. The reasons are that good measurements can only be made during fair weather conditions without wind and that "surface profile" measurements (measuring the electric field in profiles on the firn surface perpendicular to the linear wire-electrode) cannot be used to evaluate the snowdepth. For the easy evaluation of such profile measurements one has to assume that the medium surrounding the wire is homogenous and isotropic. This was not possible, because the resistivity of the particular firn layers was quite different.

The A.C. method, applying 10 KHz to the rectangular wire system, was successful. It was possible to determine the position of a wire system, which was 6 m below the firn surface, within 20 cm. The depth could be found by "surface-profiles" (measuring the magnetic field vector in profiles on the firn surface perpendicular to the long side of the rectangular wire system) within 20 cm and advancing a sounding coil directly toward the wire system within 5 cm.

The A.C. method can be used to trace the movement of wire systems in the firn underground over several years and can yield firn densification rates as well as the velocities of subsurface firn layers.

The bulk density of the annual snow layers was determined by means of a neutron-scattering probe (Nuclear-Chicago) and by simple pressure pillows. Both systems allow measurements of the bulk density "in situ" without digging firn pits and sampling the different layers.

The sampling influence radius of the neutron probe was enlarged by lowering the probe in a close casing, which was introduced in large boreholes (SIPRE-auger borehols, $\varnothing \approx 13$ cm). The probe was surrounded immediately by the casing and an air hollow-cylinder. Thus the influence radius of the probe as well as the immediate, for the backscattering important snow-matrix could be essentially increased and the successive measurements in the borehole had to be done only at vertical increments of 50 cm. The neutron probe was especially calibrated for this type of borehole. With the aid of these procedures it was possible to determine the bulk density of a 6 m thick annual snow layer in about 2 hours including the drilling of the borehole. As the boreholes were drilled mechanically, the borehole diameter decreased with depth, dependent on the total depth of the borehole. This naturally influenced the density measurements. The influences were estimated with multiple regression analysis and taken into consideration in the calibration curves.

The standard deviation of one measurement was 21 kg/m^3; that is, 5% for a density of 400 kg/m^3. The standard deviation of the bulk density, determined as the arithmetic mean value of the individual measurements in one borehole was never more than 3%, in cases where several boreholes at the same location were measured.

The snow pillows were composed of commercially available air-mattresses, which were filled with an antifreeze solution. The standpipes consisted of "Ferflex" hoses and were attached to wooden stakes. Simple installation and low costs are essential, because the whole measuring system is usually abandonned after one balance year.

In some cases the material used was not rugged enough to stand up against the extreme climatic conditions and leakage occurred. According the data obtained, the mechanical strength of the firn layers (ice layers) and the settling of the pillow foundations impair the measurements. The bulk density values from the pillows were only in accordance with bulk density values measured with other methods in few cases. Snow pillows do not seem to be a valuable tool for measuring the bulk density of the annual snow layer in firn aeras.

Most of these measurements were carried out on the Ewigschneefeld (Grosser Aletschgletscher), so that some hydrological characteristics of this aera could be evaluated by the aid of the measured data:

- The snow depth in the higher central part of the firn valley is quite uniform, whereas the lower central part, based on the irregular surface shape, has a snow depth maximum on both margins. The steep slopes on both sides of the firn valley catch less snow than the relatively flat central part.
- The bulk density of the snowlayers was rather independent of altitude and for the balance year 1967/68 the mean values were 404 kg/m^3 at the end of the winter balance period and 475 kg/m^3 at the end of the balance year.
- With the aid of the different snow depths and bulk densities the annual balance for 1967/68 was calculated. Assuming the same snow depth distribution on the steep slopes as was found in 1967/68, the mean annual balance for the period 1956/57 - 1968/69 was also calculated.
- The accumulation was determined for the same periods, estimating the ablation rates with the empiric equation of Zingg (1951) and adding these amounts to the annual blance values.
- According to Lütschg (cf. Keller, 1950), the evaporation in these altitudes is about 200 mm per year and Pardé (cf. Lliboutry, 1955) states that the precipitation in liquid form is about 5% of the total precipitation per year. Using these values, the mean annual precipitation for the Ewigschneefeld area could be evaluated. For the period 1956/57 - 1968/69 the mean annual precipitation is 2750 mm, a value which is naturally higher than the calculated mean precipitation ($\bar{P}$) over the whole drainage basin : $\bar{P}$ = 2140 mm (Kasser, 1967). On the other hand the precipitation seems to be somewhat lower than the amount $\bar{P} > 3200$ mm, which the "Niederschlagskarte der Schweiz" (cf. Atlas der Schweiz, 1968) mentions for the period 1901 - 1940.

During the evaluation of the before mentioned hydrologic characteristics of the Ewigschneefeld it became obvious again, that the number of measuring points should be as large as possible in such areas. However, large numbers of point measurements are only feasible, if expedient measuring methods are available, such as were described in this report.

9. LITERATURNACHWEIS

Ambach, W., Bortenschlager, S. and Eisner, H. (1966) Pollen-Analysis investigation of a 20 m. Firn pit on the Kesselwandferner (Oetztal Alps). Journal of Glaciology, Vol. 6, No. 44, p. 233 - 236.

Ambach, W. und Eisner, H. (1965) Untersuchung der Radioaktivität der Firnschichten eines Alpengletschers zur Festlegung von Datierungsmarken; Acta physica austriaca, Band XX, Heft 1 - 4, S. 58 - 62.

Anderson, H.W., Mc Donald, P.M. and Gay, L.W. (1962) Gamma and neutron probes for measuring hydrologic characteristics of snow, Transactions, American Geophysical Union, Vol. 43, No. 4, p. 450. (Abstract).

Andrieux, P. (1963) Sondages electriques sur glace. Thèse présentée à la Faculté des Sciences de l'Université de Paris, 52 p.

Atlas der Schweiz, (1968) Klima und Wetter II, Tafel 12, Vierte Lieferung.

Beaumont, R.T. (1965) Evaluation of the Mt. Hood pressure pillow snow gage and application to forecasting avalanche hazard, IASH, No. 69, p. 341 - 349.

Borovinsky, B.A. (1965) Experimental determination of the speed of the ice movement within a glacier by Geophysical methods. 6 pp. mimeo. (Tran. from a Russian article in Herald of the Acad. Sa. Kazakhstan, No. 12 (153) p. 56 - 60, 1967)

Cooper, Ch.F. (1966) Sampling characteristics of neutron probe measurements in a mountain snow pack. Journal of Glaciology, Vol. 6, No. 44, p. 289 - 298.

Danfors, E., Fleetwood, A., Schytt, V. (1962) Application of the neutron scattering method for measuring snow density. Geografiska Annaler, Vol. 44, No. 3 - 4, p. 409 - 411.

Der Firnzuwachs pro 1920/21 ff. in einigen Schweizerischen Firngebieten, Sonderdruck aus der Vierteljahresschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich, LXVII (1922) ff., S. 21 ff.

Deutsch, S., Ambach, W. and Eisner, H. (1966) Oxygen isotope study of snow and firn on an alpine glacier. Earth and planetary science letters, 1, p. 197 - 201.

Epstein, S. (1956) Variations of the $^{18}O/^{16}O$ ratios of fresh water and ice, National Academy of Science, Nuclear Science Series, Report No. 19, p. 20 - 28.

Fritsch, V. (1960) Elektrische Messungen an räumlich ausgedehnten Leitern. Verlag G. Braun, Karlsruhe, 372 S.

Gay, L.W. (1962) Measuring snowpack profiles with radioactive sources, proceedings, 30th Annual Meeting, Western Snow Conference, p. 14 - 19.

Gerdel, R.N., Hansen, B.L. and Cassidy (1950) The use of Radioisotopes for the measurement of the water equivalent of a snow pack, Transactions, American Geophysical Union, Vol. 31, No. 3., p. 449 - 453.

Haefeli, R. und Kasser, P. (1948) Beobachtungen im Firn- und Ablationsgebiet des Grossen Aletschgletschers. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasser- und Erdbau, ETH, No. 15, S. 3 - 11.

Hoinkes, H. (1957) Zur Bestimmung der Jahresgrenzen in mehrjährigen Schneeansammlungen, Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Band 8, Heft 1, S. 56 - 60.

Hoinkes, H. und Lang H. (1962) Winterschneedecke und Gebietsniederschlag 1957/58 und 1958/59 im Bereich des Hintereis- und Kesselwandferners (Oetztaler Alpen). Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B, Band 11, Heft 4, S. 424 - 446.

Kasser, P. (1959) Der Einfluss von Gletscherrückgang und Gletschervorstoss auf den Wasserhaushalt. Wasser- und Energiewirtschaft, Nr. 6, 16 S.

Kasser, P. (1967) Fluctuations of glaciers 1959 - 1965, IASH, UNESCO Tafel 11.

Keller, R. (1950) Niederschlag, Abfluss und Verdunstung im Schweizer Hochgebirge, Sonderdruck aus "Erdkunde", Band IV, Lfg. 1/2, S. 54 - 67.

Kuroiwa, D. (1962) Electrical properties of snow, in : Snow as a material, USA- CRREL monograph, Part II, Sect. B, Chapter J., p. 63 - 79.

Langway, C.C. Jr. (1967) Stratigraphic analysis of a deep ice core from Greenland. USA- CRREL Research Report 77, 130 p.

Lliboutry, L. (1961) Measurement of firn motion by a magnetic prospecting method. Journal of Glaciology, Vol. 3, No. 29, p. 879 - 881.

Lliboutry, L. (1965) Traité de Glaciologie, Tome II, Verlag Masson, Paris, p. 428 - 1040.

Leighty, R.D. (1965) Nuclear measurement of snow density. USA- CRREL Special Report 74, 14 p.

Lorch, S. (1963) Messung des Wassergehaltes in Böden mit der Neutronensonde. Zeitschrift für Geophysik, Jahrg. 29, Heft 6, S. 261 - 308 (Dissertation)

Lütschg-Loetscher, O. (1944) Zum Wasserhaushalt des Schweizer Hochgebirges. Die Bedeutung und Bewertung der Vorratsänderungen im Wasserhaushalt der Gletscher im Schweizer Hochgebirge. I. Band, 1. Teil, 4. Kapitel, S. 61 - 101.

Maertens, C., Morizet, J. et Studer R. (1965) Modalités d'utilisation en agronomie d'un humidimètre a ralentissement de neutrons. Ann. agron., Vol. 16, No. 1, p. 5 - 23.

Mass-Balance Terms (1969) Journal of Glaciology, Vol. 8, No. 52, p. 3 - 7.

Meyer, A.U. and Roethlisberger, H. (1962) Electrical DC-resistivity measurements on glacier ice near Thule, Greenland, USA- CRREL Technical Report 87, 34 p.

Miller, M.M. (1957) Phenomena associated with the deformation of a glacier bore-hole. IASH, Publ. No. 46, Vol. IV, p. 437 - 452.

Oeschger, H., Renaud, A. et Schumacher, E. (1962) Essai de datation par le Tritium des couches de névé du Jungfraufirn et détermination de l'accumulation annuelle. Bull. Soc. Vaud. sc. nat., Vol. 68, No. 306, p. 49 - 56.

Østrem, G. and Stanley, A. (1969) Glacier mass balance measurements. Manual for field and office work. 125 p.

Penton, V.E. and Robertson, A.C. (1957) Experience with the pressure pillow as a snow measuring device. Water resources research, Vol. 3, No. 2, p. 405 - 408.

de Quervain, A. (1917) Die Bestimmung des jährlichen Firnniederschlages durch Schneefärbung und Wägung. Separat-Abdruck aus der Meteorologischen Zeitschrift, Heft 2, S. 76 - 82.

Rutgers, F. (1914) I-Bericht der Gletscher-Kommission der Physikalischen Gesellschaft Zürich, Sonderdruck aus dem Jahrbuch "Ski", Jahrgang IX, S. 35 - 48.

Seligmann, C. and Hughes, T.P. (1939) The temperature, melt water movement and density increase in the névé of an alpine glacier. Monthly Notices of R.A.S., Geophysical Supplement, Edinburgh.

Sharp, R.P., Epstein, S. and Vidzimas I. (1960) Oxygen-isotope ratios in the Blue Glacier, Olympic Mountains, Washington, USA, J. Geophys. Res. 65, p. 4043

Smith, J.L., Willen, D.W., Owens, M.S. (1966) Portable radioactive isotope snow gages for profiling snowpacks. Report of the Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Berkeley, California, 51 p.

Schüepp, M. (1960) Lufttemperatur, Klimatologie der Schweiz, C, Beiheft zu den Annalen der Schweiz. Meteorologischen Zentralanstalt, Jahrgang 1960, 2. Teil, S. 15 - 62.

Schweizerische Meteorologische Zentralanstalt, Annalen, Jahrgänge 1938 - 1967.

Schweizerische Meteorologische Zentralanstalt, Ergebnisse der täglichen Niederschlagsmessung, Jahrgänge 1956 ff.

Swithinbank, C.W.M. (1954) The use of stakes in measuring the accumulation of snow on glaciers. IASH, No. 39, p. 128 - 131.

Vareschi, V. (1935) Pollenanalysen aus Gletschereis. Vorläufige Mitteilung mit besonderer Berücksichtigung des Problems der Pollenstreuung. Bericht über das Geobotanische Forschungsinstitut Rübel in Zürich für das Jahr 1934, S. 81 - 99.

Vareschi, V. (1937) Prüfung der neuen pollenanalytischen Methode der Gletscherforschung an Hand eines Firnprofils bekannter Entstehungszeit. Zeitschrift für Gletscherkunde, Bd. XXV, S. 17 - 35.

Vögtli, K. (1967) D.C. resistivity soundings on Devon Island, N.W.T., Canada, Journal of Glaciology, Vol. 6, No. 47, p. 635 - 642.

Warnick, C.C. and Penton, V.E. (1963) Methods of automatic measurement of snow water content to predict water supply, Final Report Proj. 42, Eng. Expt. Sta., Univ. of Idaho, Moscow.

Work, R.A., Stockwell, H.J., Freemann, T.G. and Beaumont, R.T. (1965) Accuracy of field snow surveys. USA-CRREL Technical Report 1963, 43 p.

Zingg, Th. (1964) Zur Methodik der Schneemessung am Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF). Winterbericht SLF 1962/63, Nr. 27, S. 130 - 138.

Zingg, Th. (1951) Beitrag zur Kenntnis des Schmelzwasserabflusses der Schneedecke. Winterbericht des Eidg. Institutes für Schnee- und Lawinenforschung Weissfluhjoch, Davos, Winter 1949/50, Nr. 14, S. 86 - 90.