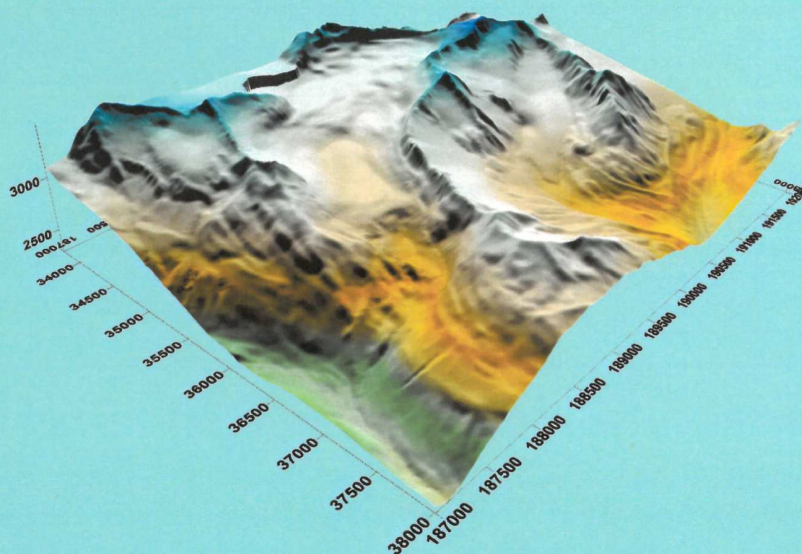


Österreichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik

Heft 33

RADARMESSUNGEN DER EISDICKE ÖSTERREICHISCHER GLETSCHER

Band I: Messungen 1995 bis 1998



Norbert Span, Andrea Fischer, Michael Kuhn,
Marius Massimo und Michael Butschek

Wien 2005

**Österreichische Beiträge zu
Meteorologie und Geophysik**

Heft 33

RADARMESSUNGEN DER EISDICKE ÖSTERREICHISCHER GLETSCHER

Band I: Messungen 1995 bis 1998



Wien 2005

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien

Publ.Nr. 414

ISSN 1016-6254

IMPRESSUM

Herausgeber: Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), Wien

Leitende Redakteure: Sophie Debit, Fritz Neuwirth, ZAMG, Wien

für den Inhalt verantwortlich:

Norbert Span, Andrea Fischer, Michael Kuhn, Marius Massimo und Michael Butschek
Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Innsbruck; Kommission für
geophysikalische Forschungen der österreichischen Akademie der Wissenschaften

Druck: Grafisches Zentrum HTU GmbH
1040 Wien, Wiedener Hauptstraße 8-10
www.grafischeszentrum.at

Verlag: Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik
Hohe Warte 38, A-1190 Wien
Austria (Österreich)

© ZAMG Das Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Die dadurch begründeten Rechte bleiben vorbehalten.
Auszugsweiser Abdruck des Textes mit Quellenangabe ist gestattet.

Norbert Span, Andrea Fischer, Michael Kuhn, Marius Massimo und
Michael Butschek

Radarmessungen der Eisdicke österreichischer Gletscher

Band I: Messungen 1995 bis 1998

20. Mai 2005

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Methode	8
1.2	Meßgerät	8
1.3	Auswertung	12
1.4	Fehlerabschätzung	13
2	Ergebnisse der Radarmessungen	15
2.1	Grinner Ferner	16
2.2	Weißseeferner	17
2.3	Gepatschferner	21
2.3.1	Kartografische Aufzeichnungen	21
2.3.2	Frühere refraktionsseismische Eisdickenmessungen	23
2.3.3	Ergebnisse der Radarmessungen 1996	26
2.3.4	Eisdicke und Untergrund des Gepatschferners	41
2.4	Hintereisferner	44
2.4.1	Frühere Tiefenmessungen	44
2.4.2	Ergebnisse der Tiefenmessungen des IMGI	52
2.4.3	Topographie des Gletscherbettes	54
2.5	Langtaufererjochferner	55
2.6	Kesselwandferner	57
2.6.1	Frühere Messungen und Berechnungen der Eisdicke	58
2.6.2	Ergebnisse der Eisdickenmessungen 1995	63
2.6.3	Vergleich der Eisdicken 1924, 1955, 1985 und 1995	70
2.6.4	Rekonstruktion des Gletscheruntergrunds	71
2.7	Hochjochferner	73
2.8	Tisenjochferner	80
2.9	Mittelbergferner, Hangender Ferner, Karlesferner	82
2.10	Gurgler Ferner	91
2.10.1	Frühere Eisdickenmessungen	96
2.11	Weißbrunnferner	98
2.12	Daunkogelferner	100
2.12.1	Eisdickenmessungen 1976	102
2.13	Schaufelferner	104
2.14	Fernauferner	106
2.15	Gaißkarferner	110
2.16	Tuxer Ferner (Gefrorene Wand Kees)	112
2.16.1	Frühere Eisdickenmessungen	116
2.17	Großes Riepenkees	120
2.18	Stubacher Sonnblickkees	121
2.19	Ödenwinkelkees	124
2.20	Pasterze	129
2.20.1	Frühere Eisdickenmessungen	130
2.20.2	Ergebnisse der Eisdickenmessungen 1997/98	133
2.20.3	Vergleich Seismik/GPR 1997	142

Literatur 143

Zusammenfassung

Im Rahmen des österreichischen Gletscherinventars wurden bis 1998 die Eisdicken von 21 österreichischen und einem italienischen Gletscher mit einem RadioechoLOT gemessen. Das Gerät wurde auf Rucksackgröße reduziert und arbeitet mit 4 oder 6,5 MHz bei Antennenlängen von 25 oder 15 m.

Für alle Gletscher wird die Lage der Messpunkte in Ausschnitten der österreichischen Landeskarte dargestellt, Eisdicke und Profile der Oberfläche sowie des Untergrunds wiedergegeben, von vier Gletschern wurden Karten des Untergrunds erstellt. Bei sechs Gletschern konnten die neuen Messungen mit alten seismischen Daten oder mit Bohrungen verglichen werden. Zusätzliche Messungen werden in einem zweiten Band veröffentlicht.

Summary

In the framework of the Austrian Glacier Inventory, ice thickness of 21 Austrian and one Italian glacier has been determined by radio echo sounding from 1995 to 1998. The hand carried sounder works at frequencies of 4 and 6,5 MHz with antennas of 25 and 15 m length. For each glacier, location of soundings, ice thickness and profiles of surface and ice base are given, in four cases a map of the base was constructed. Six of the glaciers had previously been explored by seismic methods or by mechanical drilling. Further measurements will be published in a second volume.

Vorwort

Die Kommission für Geophysikalische Forschungen der Österreichischen Akademie der Wissenschaften wurde im Jahr 1992 neu gegründet. Als Nachfolgerin der früheren Kommission für Hochgebirgsforschung und der Geophysikalischen Kommission wurden ihr zwei Schwerpunkte gegeben: Die Erstellung eines neuen Inventars der österreichischen Gletscher und Tiefenseismische Untersuchungen.

Im ersten österreichischen Gletscherinventar 1969 wurden 925 Gletscher mit einer Gesamtfläche von 540 km² aufgenommen (Patzelt 1978 [41]). Im neuen Inventar sollten neben den Flächen auch die Volumina der Gletscher erfasst, und als Grundlage dazu die Eisdicken mit Radarreflexionen (Radio-Echo-Lot) gemessen werden. Während die Kenntnis des Volumens für die Hydrologie und Wasserwirtschaft interessant ist, ist die Kenntnis der Eisdicke oder der dreidimensionalen Verteilung des Eises eine Voraussetzung für die numerische Modellierung der Eisbewegung. Die Veränderungen der Oberflächen der österreichischen Gletscher seit 1969 können nur verstanden werden, wenn neben der Verteilung der Massenbilanz auch die Eisdynamik mitberechnet wird.

In diesem Band werden die Messungen zusammengefasst, die von der Kommission für Geophysikalische Forschungen und dem Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck von 1995 bis 1998 durchgeführt wurden, neuere Messungen werden in einem zweiten Band folgen. Im vorliegenden Band werden auch die seismischen Messungen dargestellt, die seit 1929 veröffentlicht wurden.

Im Rahmen des Projekts 'Österreichische Gletscher: Flächen und Volumina' wurden nacheinander Dr. Norbert Span, Mag. Michael Butschek, Dr. Andrea Fischer angestellt, Mag. Susanne Lentner und Mag. Marius Massimo bearbeiteten Teile der Messungen in ihren Diplomarbeiten, die Messgeräte wurden von Ing. Franz Weitlahner und Rainer Diewald gebaut. Alle Arbeiten wurden am Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck ausgeführt.

Die ersten Messungen am Hintereisferner wurden noch mit einem Oszilloskop aufgezeichnet, das zur Stromversorgung einen Generator brauchte, der mit anderem Gerät von sechs Personen über das Eis gezogen wurde. Mit dem heutigen Stand der Technik kann das Messgerät von einer Person auf dem Rücken getragen werden, zum Auslegen der Antennen und zur alpinen Sicherheit wird zu dritt gearbeitet. Diese Fortschritte in der Messtechnik und der Analyse verdanken wir unter anderen auch Dr. Norbert Blindow vom Institut für Geophysik der Universität Münster und Prof. Ewald Brückl vom Institut für Geophysik der Technischen Universität Wien.

Nicht alle Gletscher sind leicht und sicher erreichbar - in manchen Fällen wurden die Gruppen vom Hubschrauber abgesetzt. Die beste Zeit für die Messungen war der Hochwinter mit weitgehend zugeschnittenen Gletscherspalten und trockenem Schnee. Im Frühsommer waren die Messungen wegen der starken Absorption in der wassergesättigten Schneedecke manchmal erfolglos, bei hochsommerlichen Verhältnissen wieder gut durchführbar.

Bei der Darstellung der Ergebnisse wurde auf Anschaulichkeit Wert gelegt. Der obere Teil der Abbildungen zeigt Profile von Eisoberfläche und Untergrund, der untere Teil die Eisdicke, zu der auch das Jahr der aktuellen Messung angegeben wird. Die Gletscheroberflächen dieses Jahres waren allerdings meist nicht bekannt, sodass ältere Oberflächenprofile mit dem Jahr der Kartenaufnahme dargestellt werden und die absolute Höhe des Gletscheruntergrunds nicht exakt ist.

Aus praktischen Gründen werden nicht alle österreichischen Gletscher sondiert werden können. Es wird daher versucht, nur ca. 50 Gletscher auszumessen, die für verschiedene Größen, Formen, und Regionen repräsentativ sind, und aus ihnen Formeln für die Skalierung des Volumens aus

der Fläche zu bestimmen, mit denen die Volumina der restlichen Gletscher angenähert werden können. Die Diplomarbeit von Lentner (1999) [34] gibt dazu interessante Beispiele.

Michael Kuhn, Projektleiter
Innsbruck, Dezember 2004

Einleitung

Die Entwicklung der Gletscher ist für den Alpenraum und seine Bewohner von besonderem Interesse. Der Siedlungsraum war in vergangenen Jahrhunderten immer wieder durch Gletschervorstöße oder Ausbrüche von Gletscherseen bedroht. Die ersten regelmäßigen Beobachtungen von Gletschern waren von Naturkatastrophen wie z.B. dem Ausbrechen des vom Vernagtferner aufgestauten Gletschersees veranlasst [40] (Abbildung 1.1). Zwischen dem letzten Gletscherhöchststand um 1850 und 1969 verloren die Gletscher fast die Hälfte ihrer Fläche [26]. Die akute Bedrohung des Siedlungsraumes als Triebkraft der Gletscherforschung wurde im 20. Jahrhundert abgelöst durch die verstärkte wirtschaftliche Nutzung der Gletscherflächen durch Energiewirtschaft und Tourismus. Die Österreichischen Gletscher sind Gegenstand einiger Monitoringprogramme. Die

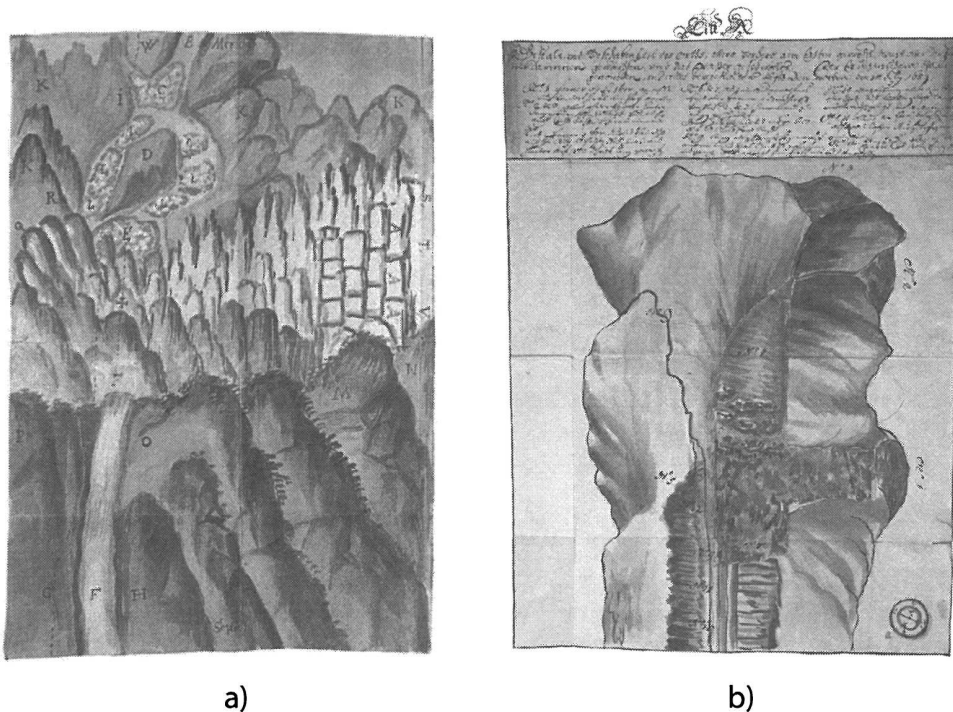


Abbildung 1.1. a) Darstellungen des ins Rofental vorgestoßenen Vernagtferners, 15. Mai 1678 b) Plan des Rofentales mit Vernagtferner und seinem Eissee, 15. Juli 1681. Quelle: Beilage zu [40].

jährlichen Längenänderungen von 107 Gletschern werden vom Gletschermeßdienst des österreichischen Alpenvereins beobachtet. An 9 Gletschern werden jährliche Massenbilanzmessungen durchgeführt. Die ersten Eisdicken Österreichs wurden am Hintereisferner 1893 bis 1922 mit Tiefenbohrungen gemessen. Seither wurde auf 49 Gletschern die Eisdicke gemessen.

Fläche und Oberflächentopographie sämtlicher Gletscher Österreich ist im Gletscherinventar 1969 erfasst. Zur Zeit wird an einem neuen Gletscherinventar gearbeitet, das erstmals weltweit auch das Eisvolumen enthält. In den Jahren 1995 bis 1998 wurde die Eisdicke von 21 österreichi-

Gletschernaame	ID	Fluss	Gebirgsgruppe	Geografische Breite N	Geografische Länge O	Fläche [km ²]	Hmax	Hmin	Jahr	Messpunkte
Daunkogelferner	716	SI	SA	46° 59,5'	11° 06,3'	1,5	3260	2640	1995	48
Fennauferner	714	SI	SA	46° 58,8'	11° 08,2'	1,9	3290	2590	1995 1999	98
Gaifkarferner	337	OE	SA	46° 58,4	11° 07,0'	0,5	3190	2890	1995	28
Gepatschferner	30	FA	OA	46° 51,3'	10° 45,5'	17,7	3518	2063	1996	371
Grinner Ferner	804	SA	LA	47° 10,3'	10° 28,8'	0,1	2840	2740	1996	22
Großes Riepenkees	97	ZI	ZI	47° 03,2	11° 40,5	1,0	3170	2770	1998	34
Gurglerferner	372	OE	OA	46° 47,3'	10° 59,1'	10,3	3420	2270	1998	100
Hangender Ferner	344	OE	OA	46° 55,5	10° 55,0	0,2	3020	2710	2001	23
Hinterseeferner	423	OE	OA	46° 47,8'	10° 46,2'	8,5	3710	2390	1997 2001	145
Hochjochferner	419	OE	OA	46° 47,4'	10° 49,4'	6,7	3500	2580	1997	105
Karlesferner	476	OE	OA	46° 55,9	10° 55,0	1,6	3350	2620	2001	23
Kesselwandferner	427	OE	OA	46° 50,3'	10° 47,9'	4,2	3490	2720	1995	21,3
Langtauferejochferner ¹	423	OE	OA	46° 48,7'	10° 45,6'	1,5	3500	2770	1997	20
Mittelbergferner	477	PI	OA	46° 54,7'	10° 54,0'	11,0	3530	2250	1998 2000	123
Odenwinkelkees	613	SA	GR	47° 06,5'	12° 39,1'	2,3	3180	2130	1998	99
Pasterze	273	MO	GG	47° 06,1'	12° 41,7'	18,3	3700	2070	1997 1998	178
Schaulferner	714	SI	SA	46° 59,1'	11° 07,1'	1,5	3200	2700	1995 1997 2000 2002	115
Sonnblakkees	616	SA	GR	47° 07,9'	12° 36,0'	1,6	3030	2500	1998	82
Tisenjochferner ²	409	OE	OA	46° 46,9'	10° 50,9'	0,4	3240	3000	1997	29
Tuxer Ferner ³	925	ZI	ZI	47° 04,4'	11° 41,1'	4,4	3300	2480	1998	89
Weißbunnferner ⁴				46° 29,0'	10° 46,3'	0,7	3430	2890	1996	21
Weißseeferner	31	FA	OA	46° 51,4'	10° 42,8'	2,9	3518	2560	1996	22

Tabelle 1.1. Tabelle der wichtigsten Kennzahlen der in dieser Studie behandelten Gletscher.¹ im Gletscherkataloger 1969 wird der Langtauferejochferner als Seitengletscher des Hinterseeferners geführt. Seit dem Jahr 2000 endet die Zunge des Langtauferejochferners oberhalb der Zunge des Hinterseeferners.² im Gletscherkataloger 1969 ist der Tisenjochferner als Seitengletscher der Niederjochferners geführt.³ auch Geforene Wand Kees.⁴ liegt auf italienischem Staatsgebiet. Höhen und Lage aus Orthofotokarte 1987 (Georges, persönliche Mitteilung). ID... Identifikationsnummer des Gletschers im Gletscherkataloger 1969, F... Fläche des Gletschers aus der zum Zeitpunkt der Messung verwendeten Kartengrundlage (im Text des entsprechenden Kapitels angegeben), Hmax... maximale Höhe des Gletschers 1969, Hmin... minimale Höhe des Gletschers 1969, Jahr... Jahr der Radarmessungen. Flüsse: FA... Pagger, MO... Möll, OE... Ötz, PI... Pitze, SA... Salzach, SA Sanna, SI... Sill, ZI... Ziller. Gebirgsgruppen: GG... Glocknergruppe, GR... Granatspitzgruppe, LA... Lechtaler Alpen, OA... Ötztaler Alpen, SA... Stubai Alpen, ZI... Zillertaler Alpen.

schen und einem italienischen Gletscher gemessen (Tabelle 1). Die Gesamtfläche der vermessenen Gletscher Österreichs beträgt $97,3 \text{ km}^2$, das entspricht etwa 20 % der Gletscherfläche Österreichs. Von den zehn größten Gletschern Österreichs sind sechs in dieser Studie erfasst.

Bei einzelnen Gletschern konnten nicht alle der in der Tabelle angegebenen Messpunkte ausgewertet werden, sodass weniger Datenpunkte in den Eisdickendiagrammen zu finden sind als hier angegeben.

1.1 Methode

Radarecholotung ist die in den letzten Jahren am meisten genutzte Methode zur Messung von Eisdicken. Im Unterschied zu Tiefenbohrungen, Reflexions- oder Refraktionsseismik oder Geoelektrik ermöglicht das Radarecholot (Ground Penetrating Radar, GPR) das Messen von quasikontinuierlichen Profilen.

Die Messung der Eisdicke beruht auf dem Laufzeitunterschied zwischen dem vom Gletscheruntergrund reflektiertem und dem direkten Signal. Das von den Antennen ausgesandte gepulste elektromagnetische Signal dringt in den Gletscher ein, wird am Untergrund reflektiert und kommt später beim Empfänger an, als das durch die Luft transmittierte (direkte) Signal. Das reflektierte Signal wird im Eis entsprechend den elektromagnetischen Eigenschaften des Gletschers auch an internen Schichten reflektiert und gestreut. Gletschereis hat eine komplexe Struktur. Eisbewegung, Einschlüsse von Luft, Wasser und Gestein verursachen Inhomogenitäten. Auch reines Gletschereis weist, bedingt durch die Entstehung während verschiedener Niederschlagszyklen, interne Schichten auf. Im Firngebiet gibt es Schichten mit verschiedener Dichte, Wassersättigung und Körngröße, eventuell sogar Wassertafeln.

Die elektromagnetischen Eigenschaften eines Materials werden durch die komplexe relative Permittivität ϵ beschrieben:

$$\epsilon = \epsilon' - i\epsilon'' \quad (1.1)$$

$\epsilon'_{Eis}=3,15$ ist im gesamten Mikrowellenbereich nahezu unabhängig von Temperatur des Mediums und Frequenz des Signals [37]. Schnee ist ein Gemisch aus Luft, Eis und flüssigem Wasser, dessen Permittivität durch Mischungsformeln beschrieben wird [42] [13] [51].

Die Ausbreitung einer ebenen harmonischen Welle entlang der z- Achse in einem absorbierenden homogenen Medien wird beschrieben durch:

$$E(z) = E_0(z)e^{i\omega(t-z/c)} \quad (1.2)$$

mit der komplexen Amplitude $E_0(z)$, der Zeit t , der Kreisfrequenz ω und der Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen c .

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c elektromagnetischer Wellen in einem Medium ist kleiner als die Lichtgeschwindigkeit in Vakuum c_0 . Sie hängt von den elektromagnetischen Eigenschaften dieses Mediums ab:

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon'}} \quad (1.3)$$

Misst man die Zeitdifferenz zwischen dem direkten und reflektierten Signal, kann man bei bekannter Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Signals den Weg und somit die Eisdicke berechnen.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit in Luft wird allgemein mit $300 \text{ m}/\mu\text{s}$ angegeben. Für Gletschereis findet man in der Literatur verschiedene Werte z.B. $167,7$ ($\epsilon' = 3,195$, [25]), $168,5$ ($\epsilon' = 3,170$, [14]) und $169,0$ ($\epsilon' = 3,150$, [32]).

In dieser Arbeit wurde eine Ausbreitungsgeschwindigkeit in Eis von $168 \text{ m}/\mu\text{s}$ verwendet [3] [39] und das Medium Gletscher als homogen angenommen und somit Firnschicht und Winterschneesichten vernachlässigt. Im verwendeten Wellenlängenbereich konnte die Dicke der Firnschicht nicht aus dem reflektierten Signal abgeleitet werden.

Temperierte Gletscher haben einen hohen Anteil an Flüssigwasser, was zu starken Verlusten in höheren Frequenzen führt. Um die nötige Eindringtiefe zu erreichen, arbeitet man daher in Frequenzen bis 10 MHz .

1.2 Meßgerät

Für die Messungen wurde ein Hochleistungs-Impuls Sender von Narod [39] verwendet. Dieser arbeitet mit bipolaren 550 V Pulsen mit einer Anstiegszeit von unter 2 ns . Die Pulswiederholungsrate beträgt 512 Hz . Das Signal auf der Empfängerseite wurde bis 1998 mit einer Scopekarte (Samplingrate bis 200 MS/s) und ab 1998 mit einem Digitalen Scopemeter des Typs Fluke 105B, das Abtastgeschwindigkeiten von bis zu 5 GS/s ermöglicht, aufgezeichnet. Mit dem Fluke 105 B können Impulse bis 40 ns aufgezeichnet werden, die Ablesegenauigkeit kann je nach gewählter Auflösung bis 5 ns pro Skaleneinheit betragen. Der Stromverbrauch beträgt 180 mA bei $10\text{-}14$

V Gleichstrom (5mA im Standby Betrieb) und wird aus einer Trockenbatterie (6,5 Ah, 12V) gedeckt. Die RF Spitzenleistung beträgt 24 kW.

Am Institut für Meteorologie und Geophysik wurden zwei verschiedene widerstandsbelastete Dipol-Antennen [54] [43] hergestellt, deren halbe Länge 15 bzw. 25 m beträgt. Aus diesen ergeben sich nach Narod (pers. Mitteilung)

$$f_c = \frac{96}{l} \text{MHz} \quad (1.4)$$

zentrale Frequenzen f_c von 6,5 MHz bzw. 4 MHz.

Widerstände von 68, 82, 120, 220 und 680 Ohm, die äquidistant von innen nach außen angeordnet sind, verhindern die Reflexion des Signals am Antennenende und optimieren die Energieabgabe an den Untergrund.



Abbildung 1.2. Signalaufzeichnung mit Scopekarte.

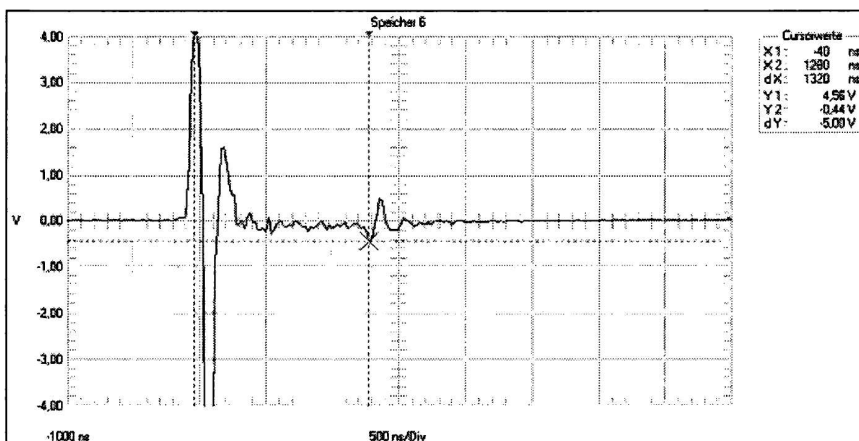


Abbildung 1.3. Signalaufzeichnung mit Fluke.

Abbildung 1.2 zeigt ein Beispiel für die Signalaufzeichnung mit Scopekarte, Abbildung 1.3 ein Speicherbild des Fluke 105B Oszilloskops. Auf beiden Bildern ist die Phasenumkehr des am Untergrund reflektierten Signals erkennbar. Diese Phasenumkehr tritt auf, wenn elektromagnetische Wellen an einer Grenzschicht zwischen einem Medium mit kleinerer zu einem Medium mit größerer Dielektrizitätskonstante reflektiert werden. Das ist bei Alpengletschern fast immer der Fall, da die Dielektrizitätskonstante von Gletschereis mit etwa 3,2 über der Dielektrizitätskonstante von Fels liegt. In Fällen, wo der Untergrund eine kleinere Dielektrizitätskonstante als das Eis hat, zeigt das reflektierte Signal keine Phasenumkehr. Dies kann abhängig von der Dicke der Wasserschicht bei wassergesättigten Sedimenten oder Eis, das auf Wasser oder Ozean schwimmt, auftreten.

Abbildungen 1.4 bis 1.6 zeigen drei an derselben Stelle mit denselben Einstellungen innerhalb einer Stunde aufgezeichnete Signale. Alle Signale sind 256-fach gemittelt. Das Signal in Abbildung 1.4 ist problemlos zu interpretieren. Die in Abbildungen 1.5 und 1.6 gezeigten Signale sind stärker verrauscht. Abbildung 1.5 ist noch eindeutig interpretierbar, in Abbildung 1.6 ist das reflektierte Signal nicht mehr gut zu erkennen. Außerdem wird bei stark verrauschten Signalen die Messung der Zeitdifferenz ungenauer, da die Lage des Maximums bzw. des Minimums nicht mehr genau lokalisierbar ist.

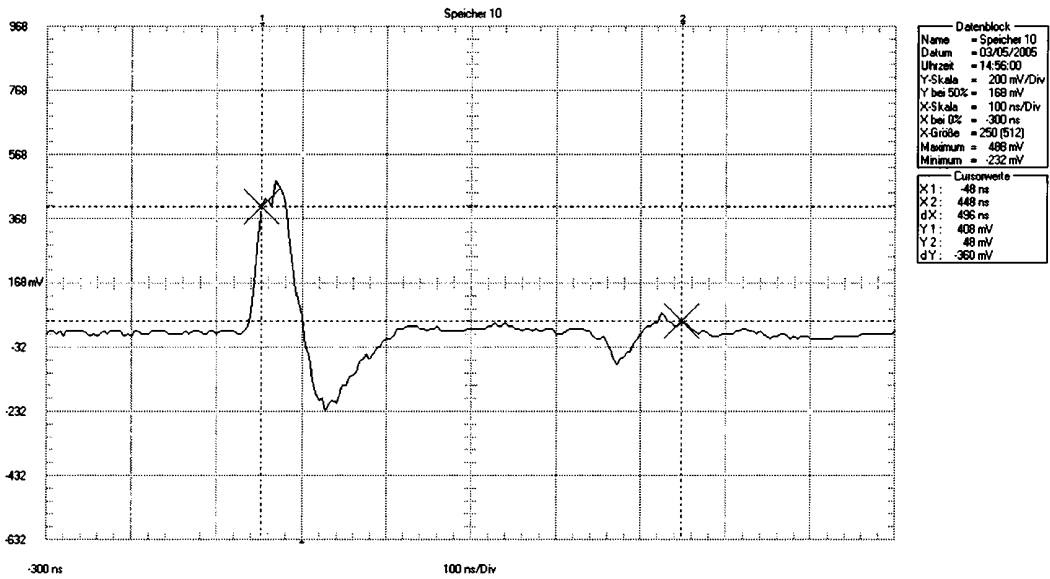


Abbildung 1.4. Beispiel für Signalaufzeichnung mit Fluke ohne Rauschen.

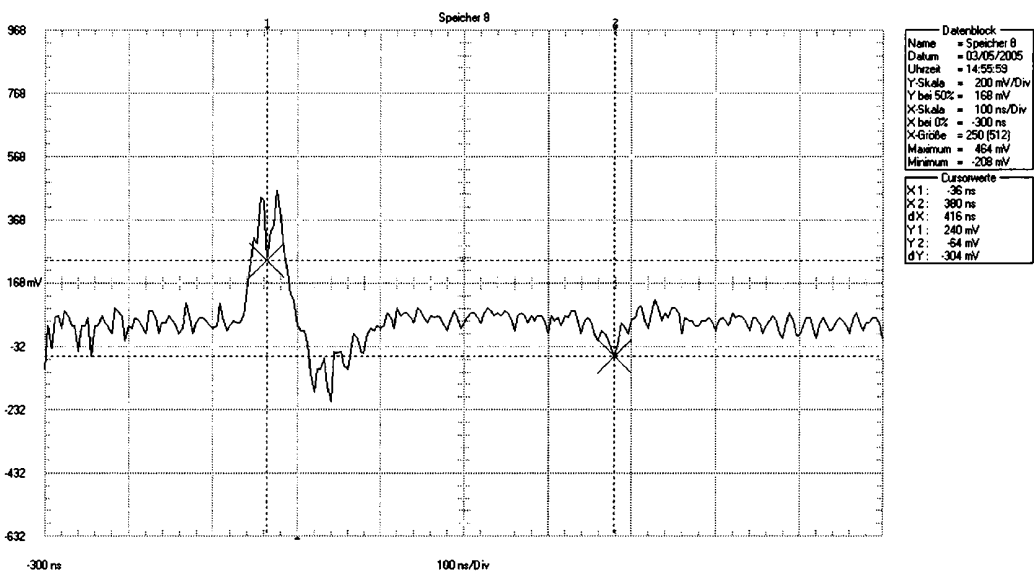


Abbildung 1.5. Beispiel für ein mittelstark verrauschtes, aber noch gut interpretierbares Signal.

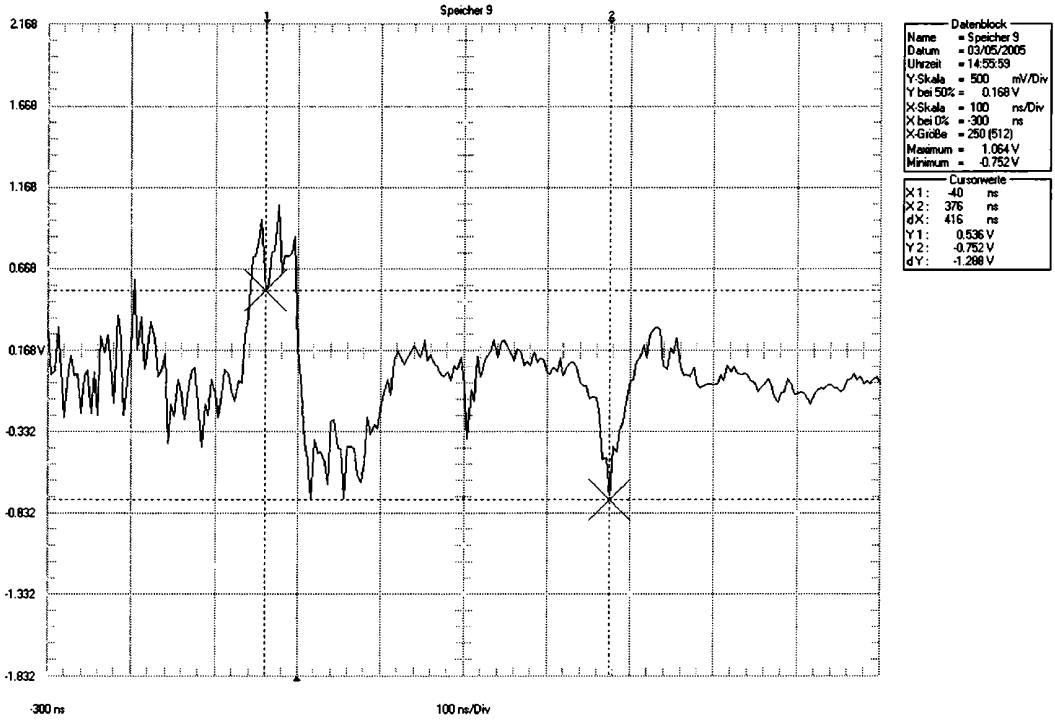


Abbildung 1.6. Beispiel für ein stark verrauschtes und schwer interpretierbares Signal.

1.3 Auswertung

Gemessen wird der Antennenabstand a und der Laufzeitunterschied Δt zwischen direkten und reflektierten Signal, die zur Zeit t_D bzw. t_R am Empfänger eintreffen. Dieser Laufzeitunterschied hängt von Geschwindigkeit des Signals in den verschiedenen Medien c_M und den zurückgelegten Weglängen s (im Eis) und a (in Luft) ab.

$$s = t_R \cdot c_E \quad (1.5)$$

Dabei ist a gleich dem Abstand zwischen Sender und Empfänger, und s hängt von der Eisdicke h ab:

$$s = 2 \cdot \sqrt{\frac{a^2}{4} + h^2} \quad (1.6)$$

Im Falle eines homogenen, planparallelen Eiskörpers bedeutet dies

$$h = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\left(\Delta t + \frac{a}{c_L}\right)^2 \cdot c_E^2 - a^2} \quad (1.7)$$

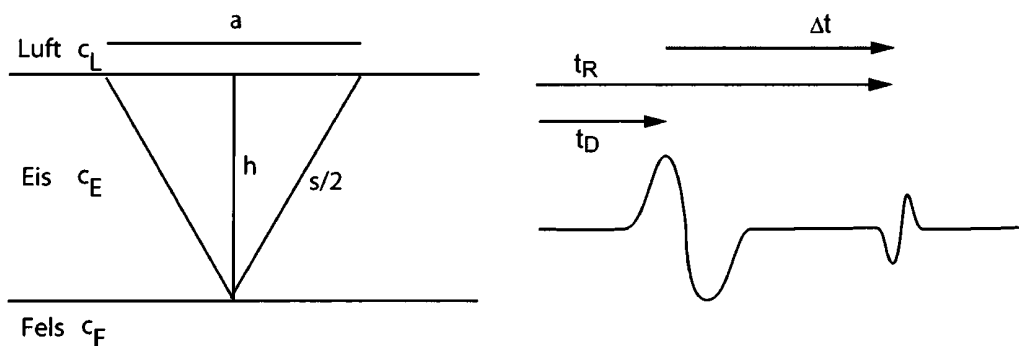


Abbildung 1.7. Laufzeitunterschied des direkten und des reflektierten Signals.

Ist der Eiskörper nicht planparallel, muss die Lage des Reflexionspunktes durch Migration (Abbildung 1.8) [55] ermittelt werden. Dabei wird die Untergrundsform aus den Umhüllenden der Ellipsoide der möglichen Reflexionspunkte des Signals berechnet. Sender und Empfänger liegen in den Brennpunkten des der Messung zugeordneten Ellipsoides.

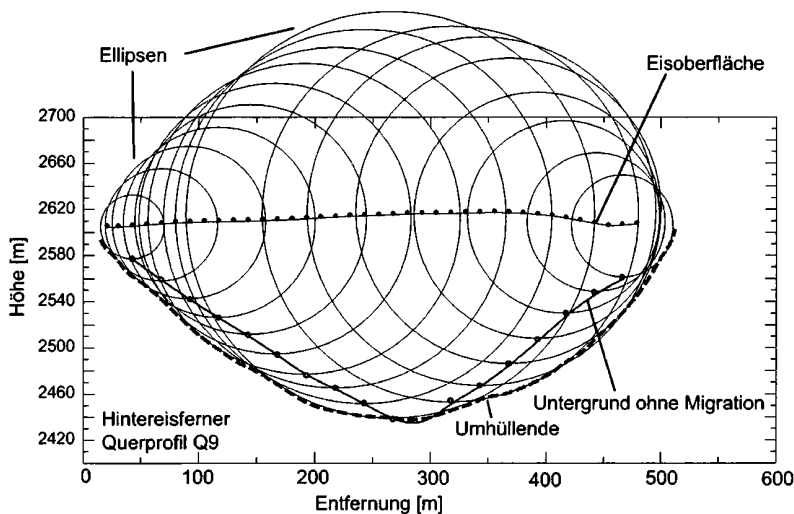


Abbildung 1.8. Korrektur des Reflexionspunktes und somit der Eistiefe durch Migration am Beispiel des Profils Q9 am Hintereisferner.

1.4 Fehlerabschätzung

Der Gesamtfehler in der Messung der Eistiefen ergibt sich aus in etwa gleichbleibenden Ableseungenauigkeiten und systematischen Fehlern, die stark von Ort und den Bedingungen zum Zeitpunkt der Messung abhängen. Bei der Bestimmung der Laufzeit kann der Ablesefehler etwa 30 ns betragen. Durch ungünstiger Oberflächenbeschaffenheit kann ein Fehler bei der Messung des Antennenabstandes von 2 m auftreten. Kumulieren sich diese Fehler, ist bei einer Laufzeit von 1 μs und einem Antennenabstand von 15 m ein Fehler in der Eisdicke von etwa 3 m möglich.

Systematische Fehler entstehen aus internen Reflexionen, ungünstiger Untergrundgeometrie, falschen Annahmen über die Geschwindigkeiten sowie der Vernachlässigung von Firn- und Schneeschichten am Gletscher.

Fehler durch interne Reflexion An internen Schichten mit unterschiedlichen dielektrischen Eigenschaften kommt es zu Reflexion und Streuung des Signals. Dadurch wird die Interpretation der reflektierten Signale erschwert. Ein Beispiel dafür ist die Reflexion an der die Eis/Luft Grenzschicht von Gletscherspalten. Im ungünstigsten Fall sind die Verluste durch Absorption und Streuung an internen Schichten so groß, dass das reflektierte Signal am Empfänger nicht mehr meßbar ist.

Fehler durch ungünstige Untergrundgeometrie Große Rauigkeit des Untergrundes erschwert die Zuordnung des Reflexionspunktes, der nicht direkt unterhalb des Meßprofils liegen muß. Solche Probleme können nur durch sehr dichte Messungen und dreidimensionale Migrationsverfahren mit großem Zeitaufwand vermieden werden. Wird das Signal von einer außerhalb des Profils liegenden Erhebung im Untergrund reflektiert, kann die Eisdicke im Profil unterschätzt werden. Die Eisdicke zwischen zwei im Profil liegenden Felsrippen im Untergrund wird ebenfalls unterschätzt, wenn der Abstand zwischen den Felsrippen zu klein ist.

Fehler durch unbekannte Dicke der Firn/Schneeschicht Auf den hier behandelten Gletschern variiert die Dicke der Firnschicht zwischen 0 und über 20 m. Die Winterschneedecke zum Zeitpunkt der Messungen dürfte eine Höhe von 5 m nicht überschritten haben. In der Literatur wird der maximale Fehler durch Vernachlässigung Firnschicht mit 5 % angegeben [27]. Nimmt man eine mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit in Firn von 200 m/ μs und in trockenem Winterschnee von 290 m/ μs an, unterschätzt man bei einer Winterschneedecke von 4 m, einer Firnschicht von 20 m und einer Eisschicht von 100 m die Gesamtdicke des Firn/Eiskörpers bei Vernachlässigung der Winterschneeschicht um einen Meter. Bei einer Firnschicht von 30 m würde sich der Fehler durch die Vernachlässigung einer Winterschneedecke von 4 m kompensieren. Da über die Dicke, Dichte und Wassergehalt der Firnschichten an den Meßpunkten nur wenig bis keine Information vorliegt, kann der tatsächliche Fehler abweichen.

Fehler durch Vernachlässigung der Hangneigung Bei steilen Gletschern muß berücksichtigt werden, dass der Reflexionspunkt nicht unterhalb des Profils liegt. Da die Meßpunkte in dieser Studie alle in relativ flachen, spaltenarmen Gebieten liegen, kann dieser Fehler vernachlässigt werden.

Die Fehler durch interne Reflexion, unbekannte Signalwege und ungünstige Untergrundgeometrie können beliebig groß sein. Im Normalfall werden sie aber bei der Datenkontrolle durch Vergleich mit den Nachbarpunkten erkannt und der Datensatz nicht berücksichtigt. Also kann der Fehler durch Ablesefehler und Vernachlässigung der Firn/Schneeschicht etwa 5 m betragen.

Ist der Abstand zwischen den Meßpunkten klein, kann die Untergrundform genauer erfasst und das Profil besser migriert werden. Dadurch können die Abweichungen zwischen zwei Messungen mit verschiedenen Meßdichten lokal größer sein als die oben genannten 5 m. Dieser Effekt spielt vor allem am Gletscherrand und in trogförmigen Untergrundstopografien eine Rolle. Beispiele für die Auswirkung verschiedener Meßdichten findet man in den Abschnitten 2.4 und 2.6.

Ergebnisse der Radarmessungen

In diesem Kapitel sind die von uns zwischen 1995 und 1998 auf 20 österreichischen und einem südtiroler Gletscher gemessenen Eisdicken zusammengefasst. Für die meisten dieser Gletscher liefern die vorliegenden Messungen die erste Information über die Eisdicke, einige Gletscher wurden schon früher vermessen. Bereits zwischen 1893 und 1922 wurde die Eisdicke des Hintereisferners an zwölf Stellen durch Tiefenbohrungen ermittelt [28] [5] [6] [7]. Für Hintereisferner, Gepatschferner, Daunkogelferner und Pasterze existieren ältere, seismische Eistiefendaten. 1929 fanden die ersten seismischen Messungen am Hintereisferner [38] und auf der Pasterze [8] [9] [10] statt.

Etwa 20 Jahre später wurden in den Ötztaler Alpen einige seismische Messungen durchgeführt: 1953/54 am Hintereisferner [22], 1955 [20] und 1960/61 [24] am Gepatschferner. Im Jahr 1970 wurden im Rahmen des österreichischen Programms der Internationalen hydrologischen Dekade am Obersten Pasterzenboden (Schneewinkel und Rifflwinkel) refraktionsseismische Messungen zur Bestimmung des Eisvolumens der Pasterze durchgeführt [4].

Die Eisdicke des Daunkogelferners wurde erstmals 1976 mit seismischen Methoden vermessen [2]. Bereits 1982 wurden am Hintereisferner auch Eisdickenmessungen mit dem Radarecholot durchgeführt (Wächter, unveröffentlicht).

In der vorliegenden Arbeit wurden auch die Ergebnisse der früheren Eisdickenmessungen und die Lage der Profile aufgenommen. Die im Zuge der früheren seismischen Messungen ermittelten Eisdicken liegen meist unter den von uns ermittelten Werten. Die Ergebnisse aus Bohrungen und früheren Radarmessungen sind dagegen ähnlich wie unsere.

Einige der im Verlauf dieses Projektes ermittelten Eisdicken wurden in den Diplomarbeiten von Lentner [34] und Massimo [36] sowie der Dissertation von Span [49] am Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck behandelt. Für drei Gletscher (Hintereisferner, Gepatschferner, Kesselwandferner) wurde die Topographie des Untergrundes berechnet.

Bedingt durch die unterschiedlichen Profillängen und Eistiefen wurden vier verschiedene Maßstäbe für die Abbildungen verwendet. Die Ergebnisse der Eisdickenmessungen sind in zwei Grafiken aufgetragen, wie in der Bildunterschrift von Abbildung 2.113 erläutert. Die untere Grafik zeigt die Eisdicken an den Meßpunkten. Zwischen den Messpunkten wurde die mit Cubic Spline interpolierte Eisdicke eingezeichnet. Die obere Grafik zeigt die Oberflächenhöhe an den Meßpunkten aus der zum Zeitpunkt der Messungen aktuellen Österreichkarte des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesens (BEV) im Maßstab 1: 50 000 und die durch Abziehen der Eisdicke berechneten Höhe des Gletscherbettes. In beiden Grafiken wurden die an einzelnen Punkten ermittelten Ergebnisse mit einer mit Cubic Spline interpolierten Linie verbunden. Die Blickrichtung, in der die Querprofile gezeichnet sind, ist die Fließrichtung des Gletschers. Die rechte Seite der Grafik entspricht also der orografisch rechten Seite des Gletschers. Längsprofile sind immer von links nach rechts fallend dargestellt.

Zu jedem Gletscher ist ein Ausschnitt aus der betreffenden Österreichkarte (ÖK) mit einem Gitter von 2 km abgebildet, in der die Lage der Radarprofile vermerkt ist. Jeweils am Anfang und am Ende der auf den Übersichtskarten eingezeichneten Profile liegt ein Meßpunkt, dazwischen liegen, wenn nicht anders angegeben, äquidistant die anderen Punkte. Die Schrägentfernungen zwischen den Punkten wurden mithilfe der Antennen gemessen und betragen ein Vielfaches der jeweiligen Antennenlänge. Schneeaufgaben oder sonstige Änderungen der Oberflächentopographie zum Zeitpunkt der Messung wurden nicht berücksichtigt.

2.1 Grinner Ferner

Der Grinner Ferner (47° 10,3' N, 10° 28,8' O) ist ein Kargletscher in den Lechtaler Alpen. Mit einer Fläche von 0,1 km² (1991) ist er der kleinste Gletscher dieser Studie. Die Eisdicke wurde 1996 an 22 Stellen in einem Längs- und einem Querprofil gemessen. Die tiefste Stelle des Gletschers befindet sich in der Mitte.



Abbildung 2.1. Karte des Grinner Ferners (Lechtaler Alpen). Quelle: Alpenvereinskarte Digital, 2003

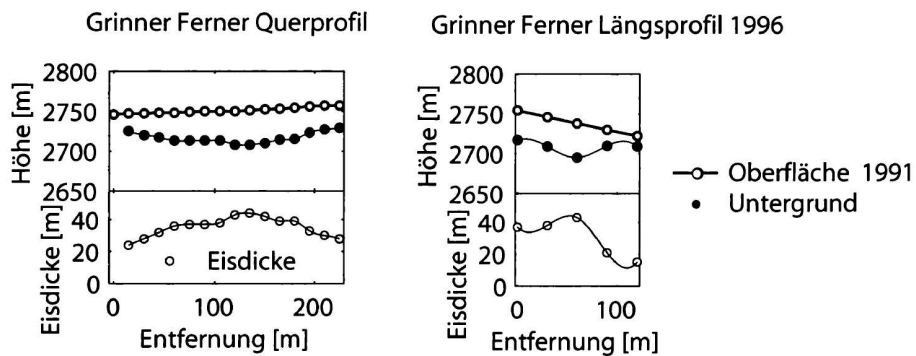


Abbildung 2.2. Gletscheroberfläche 1991, Untergrund (berechnet aus Oberfläche und Eisdicke 1996) und Eisdicken (gemessen 1996 wie in der Überschrift angegeben) entlang des Längs- und Querprofils am Grinner Ferner.

2.2 Weißseeferner

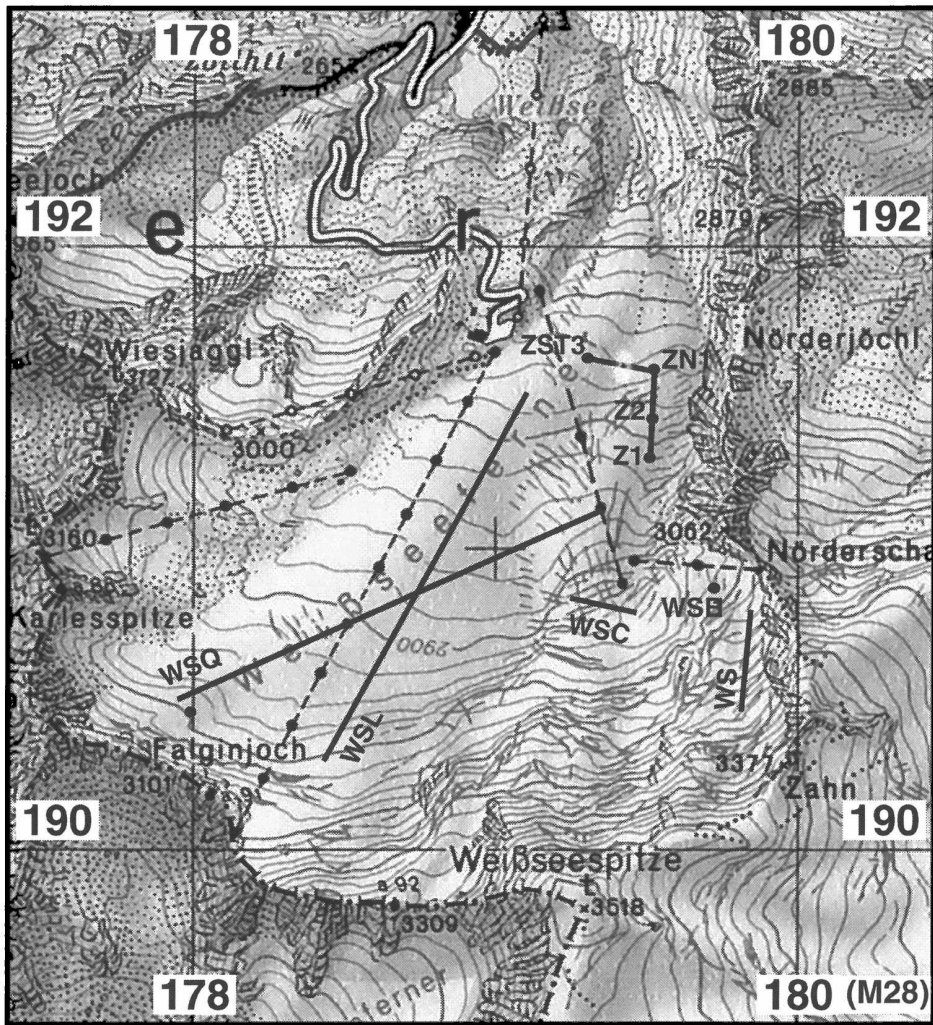


Abbildung 2.3. Karte des Weißseeferners (Ötztaler Alpen) mit den gemessenen Radarprofilen. Quelle: ÖK 1:50000 BEV.

Der Weißseeferner ($46^{\circ} 51,4' N$, $10^{\circ} 42,8' O$) in den Ötztaler Alpen bedeckte 1991 eine Fläche von $2,9 \text{ km}^2$. Die Eisdicke wurde 1996 an 22 Punkten gemessen. Der westliche Teil des Gletschers unter der Hinteren Karlesspitze, der die Verbindung zum Hauptgletscher bereits verloren hat, wurde bei der Berechnung der Fläche nicht mit einbezogen. Am Weißseeferner befindet sich das Schigebiet Kaunertaler Gletscher. Das Schmelzwasser des Gletschers wird zur Stromerzeugung genutzt.

Über das Querprofil WSQ zeigt die Eisdicke nur geringe Variationen. Im Längsprofil WSL kann man ein Übertiefung im zentralen Bereich erkennen. In diesem Bereich ist das Eis mit 92 m am dicksten. Gegen den oberen und unteren Rand des Längsprofils geht die Eisdicke stark zurück. Im Längsprofil WS sind die Eisdicken mit einem Maximalwert von 48 m geringer als im Hauptteil des Gletschers.

Meßpunkt	WSB	WSC1	WSC2	WSC3	Z1	Z2	ZN1	ZST3
Eistiefe [m]	33	69	68	69	46	36	52	51

Tabelle 2.1. Eisdicken an den in der Karte in Abbildung 2.3 eingetragenen Meßpunkten am Weißseeferner.

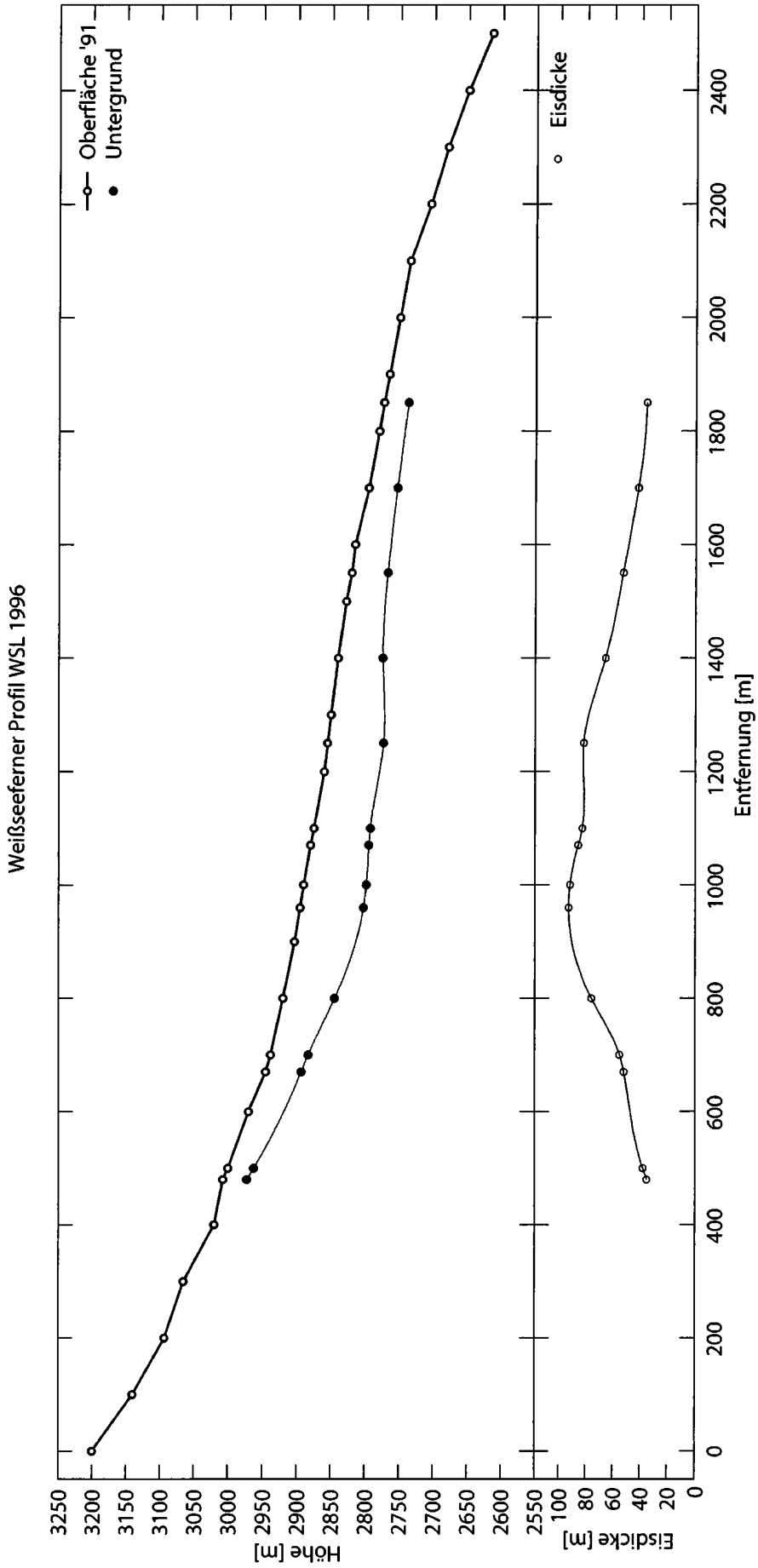


Abbildung 2.4. Gletscheroberfläche (Stand 1991) und Eisdicken entlang des Profiles WSL am Weißseeferner.

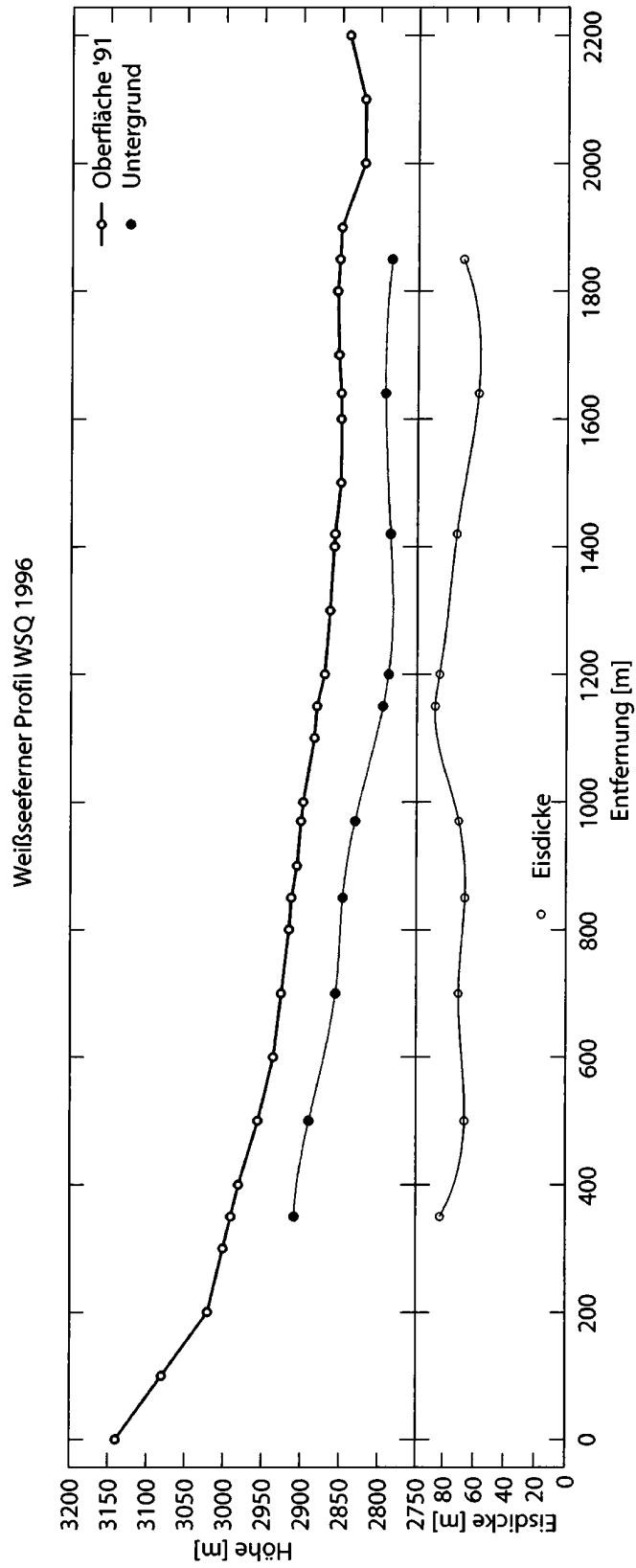


Abbildung 2.5. Gletscheroberfläche (Stand 1991) und Eisdicken entlang des Profils WSQ am Weißseeferner.

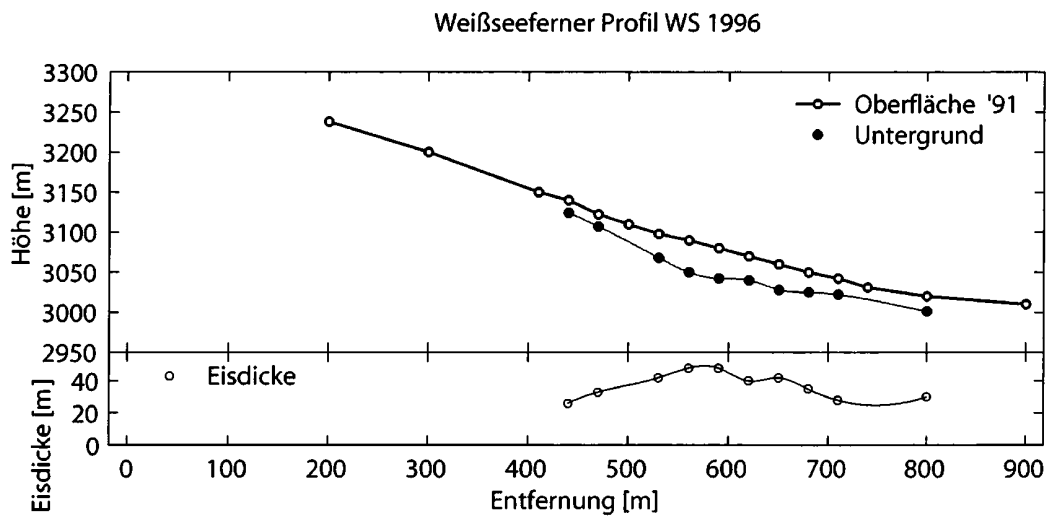


Abbildung 2.6. Gletscheroberfläche (Stand 1991) und Eisdicken entlang des Profiles WS am Weißseeferner.

2.3 Gepatschferner

Der Gepatschferner liegt im zentralen Teil der Ötztaler Alpen ($45^{\circ} 51,3' N$, $10^{\circ} 45,5' O$). Er ist mit einer Gesamtfläche von $21,6 \text{ km}^2$ (Stand 1991) der größte Gletscher der Ostalpen. Er liegt zum Teil auf österreichischem, zum Teil auf italienischem Staatsgebiet, wobei der österreichische Teil mit $17,7 \text{ km}^2$ (Stand 1991) den zweitgrößten Gletscher Österreichs bildet.

Vom Gepatschferner existiert eine lange Zeitreihe von kartographischen Aufnahmen (Kapitel 2.3.1). Seismische Eisdickenmessungen wurden erstmals 1955 durchgeführt (Kapitel 2.3.2).

Die Radarecholotmessungen am Gepatschferner wurden 1996 mit Ziel der Erstellung einer Karte des Gletscheruntergrunds durchgeführt [36].

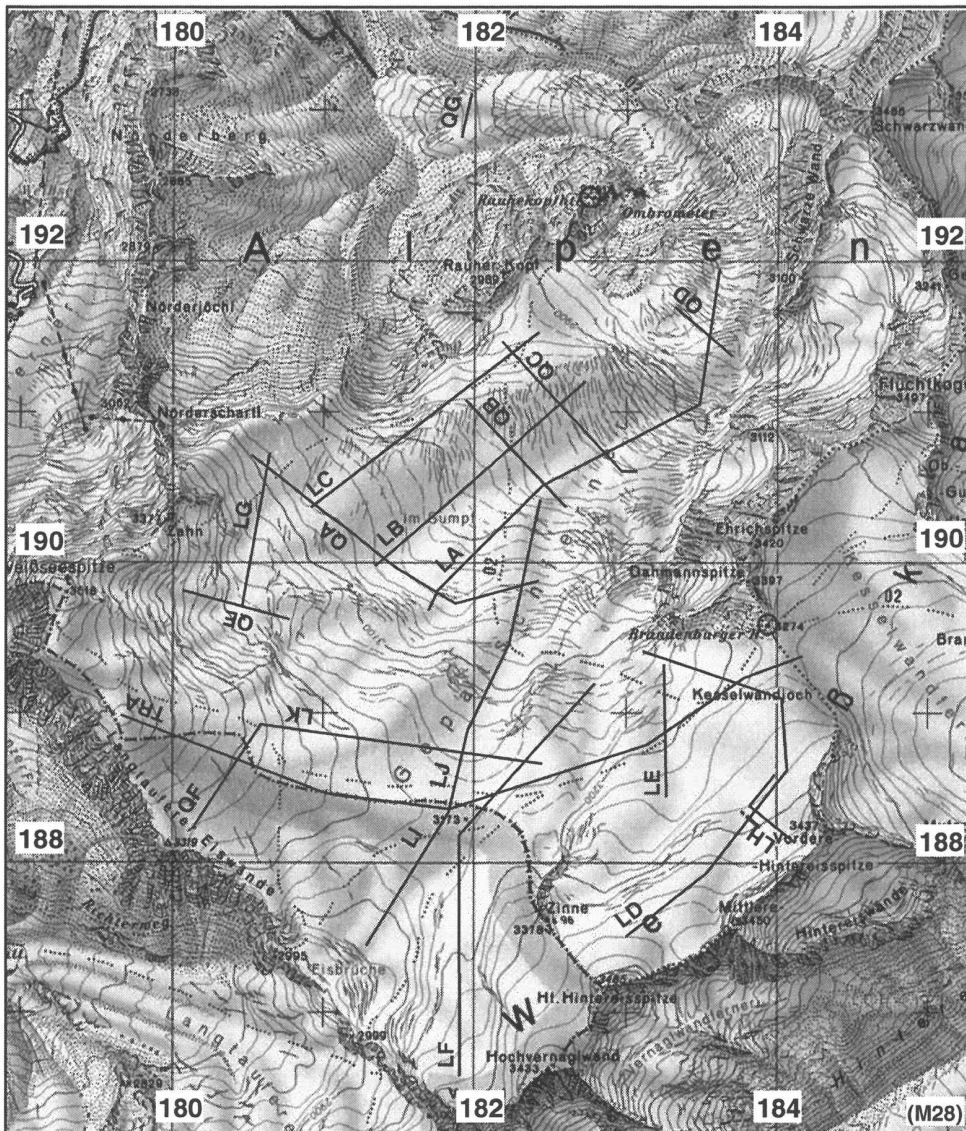


Abbildung 2.7. Karte des Gepatschfernens (Ötztaler Alpen). Quelle: ÖK 1:50 000 BEV, Gletscherstand 1991.

2.3.1 Kartografische Aufzeichnungen

Die erste Karte des Gepatschfernens erschien im Jahr 1774 im Atlas Tyrolensis von Peter Anich und Blasius Hueber [1]. Die dafür verwendeten Daten wurden 1750 bis 1765 erhoben. Im Jahr 1860 erschien eine weitere Karte des Gepatschfernens im Atlas zu Sonklars Forschungen in den Ötztaler Alpen [47]. Die Kartenaufnahme dazu datiert vermutlich um 1817. Die erste exakte

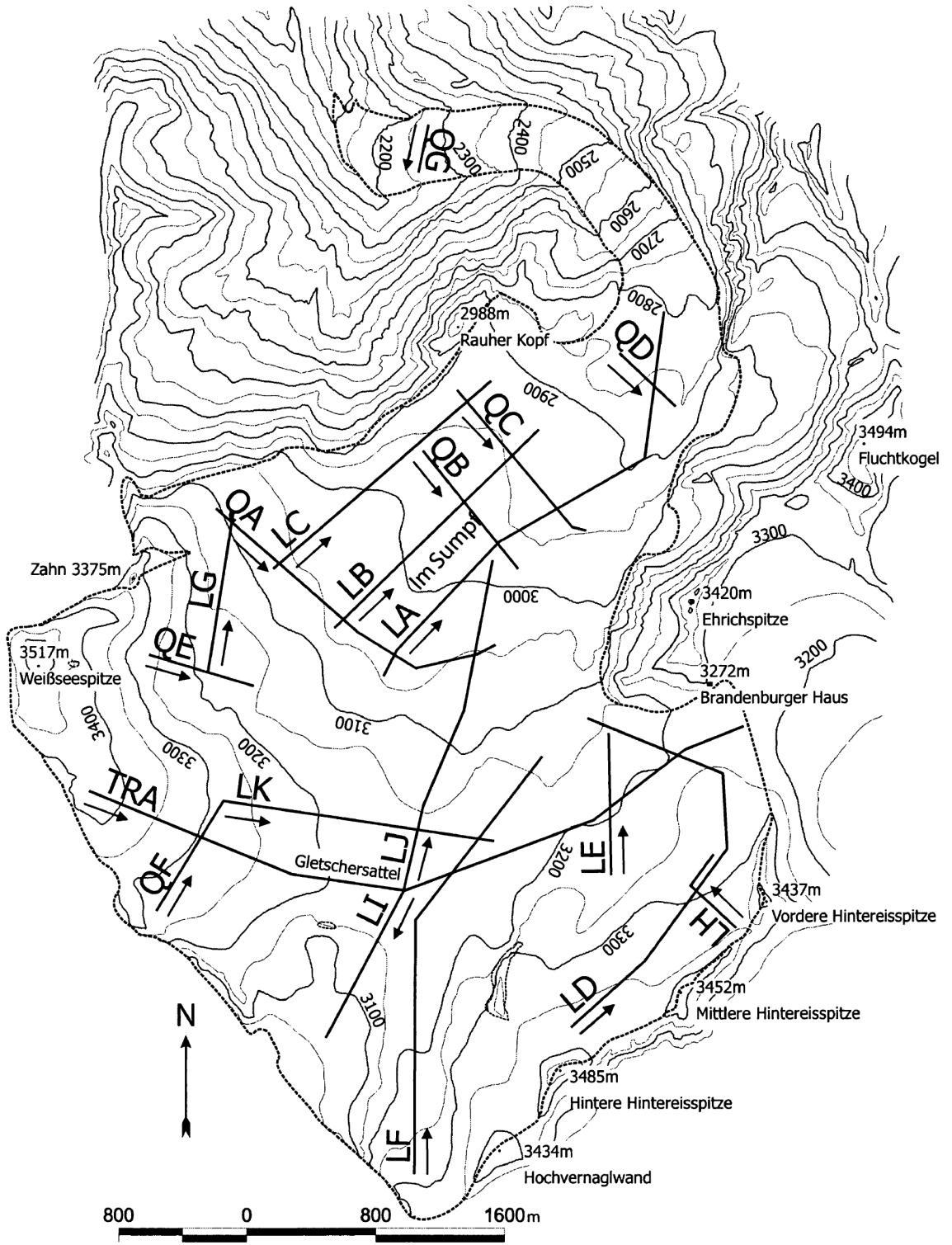


Abbildung 2.8. Karte des Gepatschferners 1971 (Ötztaler Alpen). Quelle: Kommission für Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, 1978 [12].

Vermessung wurde von Finsterwalder und Schunk 1886/87 durchgeführt [19]. Seither gibt es eine ganze Reihe von photogrammetrischen Daten [1] [12] [16] [15] [17] [18] [31] [33]. Die Volums- und Längenänderungen am Gepatschferner sind, bis auf das Fehlen des Gletschervorstoßes in den 1920er Jahren [36], ähnlich dem Verhalten der meisten anderen Ostalpengletscher. Die mittlere Höhe des Gesamtgletschers verringerte sich zwischen 1922 und 1940 um 0,63 m pro Jahr. Zwischen 1953 und 1979 gab es wieder Massenzuwächse. Die mittlere Höhe stieg zwischen 1953 und 1971 um 0,8 m pro Jahr und zwischen 1971 und 1979 um 0,2 m pro Jahr. Von 1979 bis 1990 verringerte sich die mittlere Höhe um 0,4 m pro Jahr.

2.3.2 Frühere refraktionsseismische Eisdickenmessungen

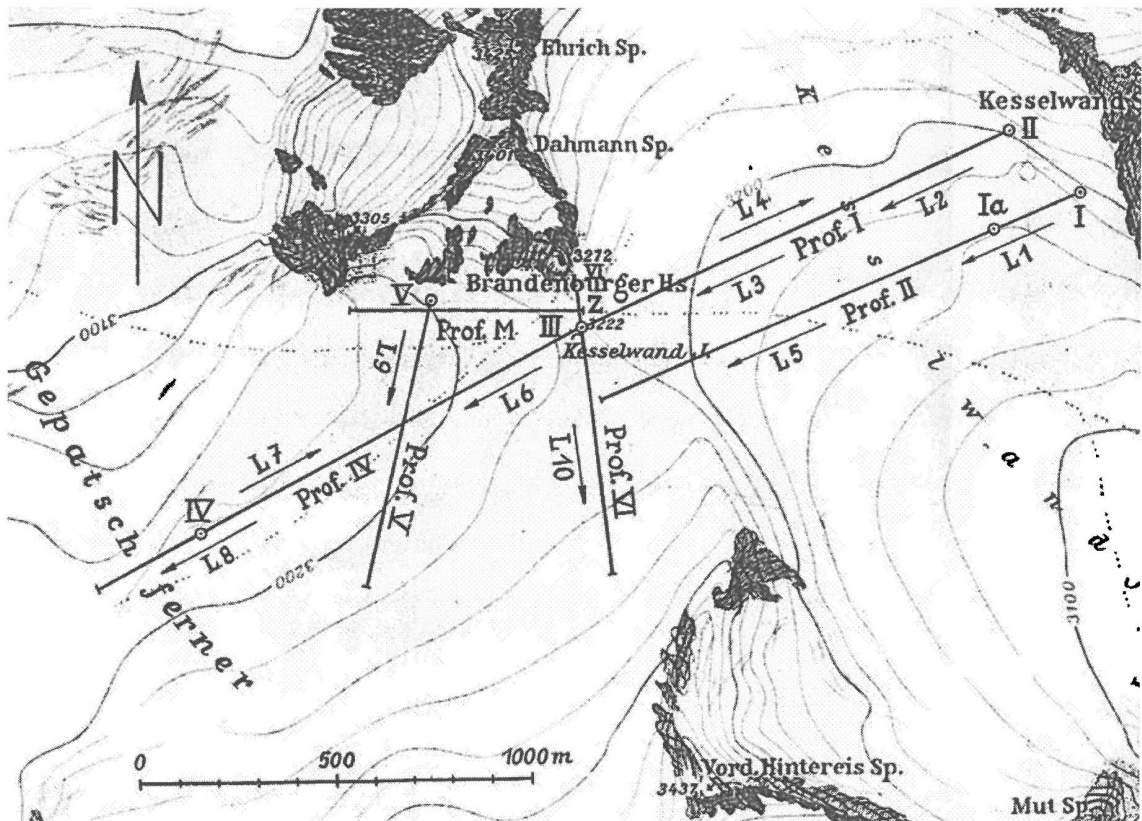


Abbildung 2.9. Lage der von Förtisch und Vidal 1954 vermessenen Profillinien aus [20].

Die ersten seismischen Eisdickenmessungen wurden von Förtisch, Schneider und Vidal im Jahr 1954 durchgeführt (Profile $G\bar{G}$ und $B\bar{B}$ in Abbildung 2.9 und 2.11) [20]. 1960/61 wurde der zentrale Teil des Firngebietes und die Zunge von Giese vermessen (Abbildung 2.10) [24].

Im Bereich der Eisscheide zwischen Kesselwandferner und Gepatschferner (Profil $G\bar{G}$) wurde eine Eistiefe von 60 m ermittelt. Der von Giese [24] errechnete Längsschnitt zeigt im oberen Teil des Gletschers Eisdicken zwischen 150 und 180 m, an der Zunge um 200 m.

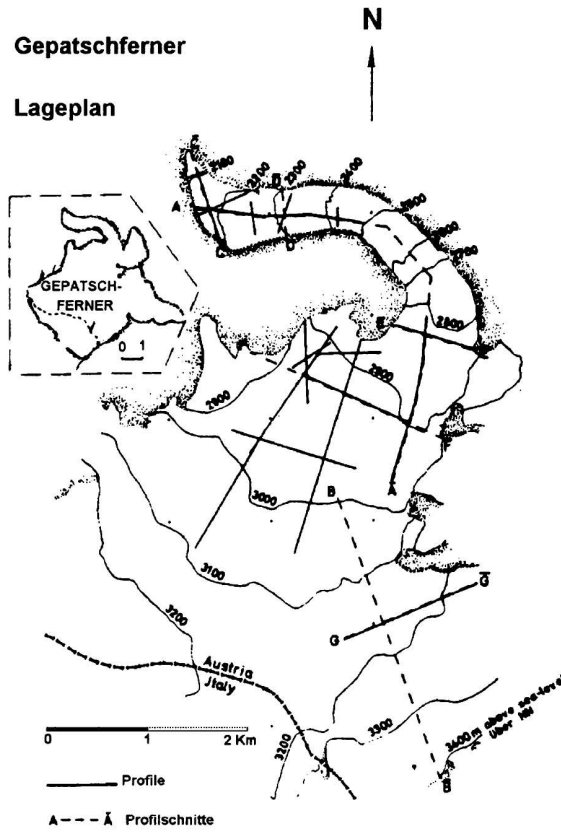


Abbildung 2.10. Lage der von Giese 1960/61 vermessenen Profillinien [24] mit Profil $\bar{G}\bar{G}$ von [20].

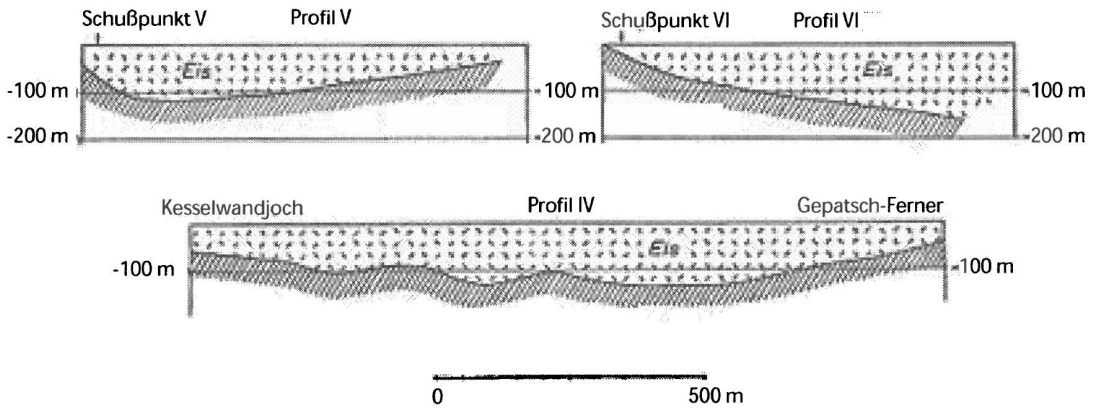


Abbildung 2.11. Ergebnisse der Seismikmessungen von Förtsch et. al. [20]

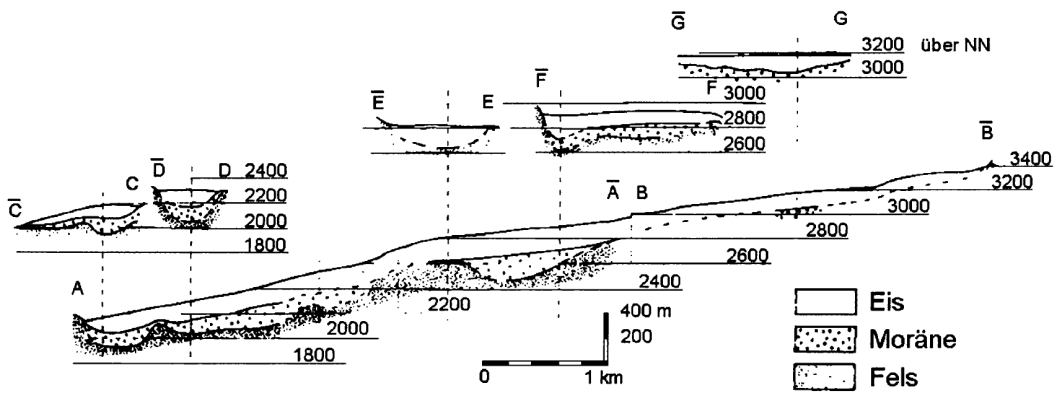


Abbildung 2.12. Profilschnitte am Gepatschferner (nach [24]).

2.3.3 Ergebnisse der Radarmessungen 1996

Die Eistiefe wurde 1996 an 355 Punkten in 19 Profilen mit einer Gesamtlänge von 33 km ermittelt. Der Abstand zwischen den einzelnen Meßpunkten betrug dabei 100 m (im Profil QG 30 m). Die gemessenen Eisdicken betragen zwischen 30 und 235 m. Die größte Eisdicke wurde auf Höhe der Gleichgewichtslinie in 2850 m Seehöhe im zentralen Bereich des Profils QB gemessen. Die Längsprofile LA, LB und LC (Abbildungen 2.14, 2.16 und 2.16) verlaufen zwischen 3100 m und 2900 m parallel zueinander entlang der Zunge. Sie sind durch die Querprofile QA (Abbildung 2.24), QB (Abbildung 2.25) und QC (Abbildung 2.26) verbunden.

Als Grundlage für die Berechnung der Höhe des Untergrundes aus den Eisdickenwerten wurde die Karte des Gepatschferners (1971) [12] verwendet. Die Höhenangaben dieser Karte entsprechen durch den Gletscherzuwachs in den Siebziger Jahren mit dem Vorstoß 1976 bis 1988 trotz des Gletscherrückgangs der folgenden Jahre ungefähr den topographischen Verhältnissen zur Zeit der Radarmessung.

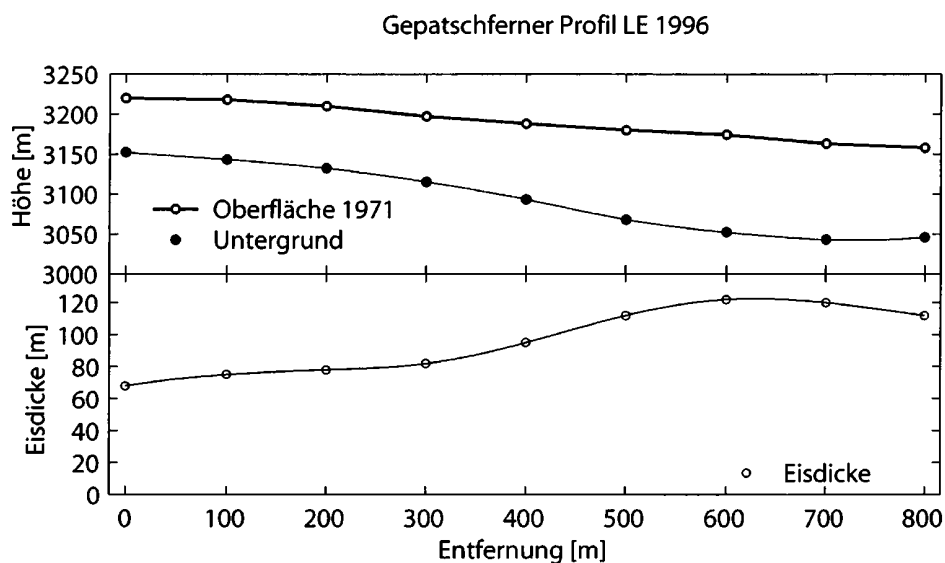


Abbildung 2.13. Gletscheroberfläche 1971 und Eisdicken 1996 am Gepatschferner entlang des Profils LE [36].

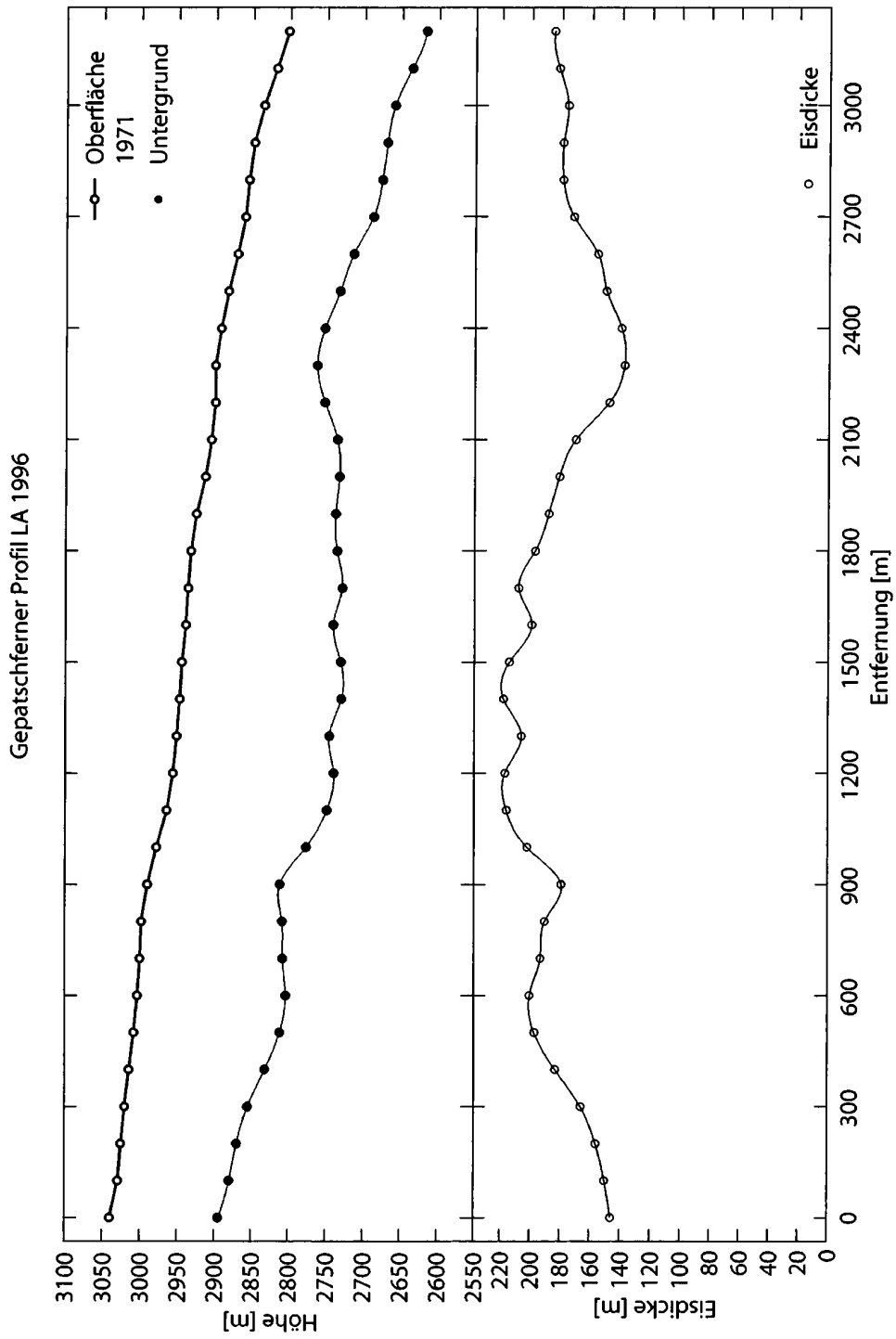


Abbildung 2.14. Gletscheroberfläche 1971 und Eisdicken 1996 am Gepatschferner entlang des Profils LA [36].

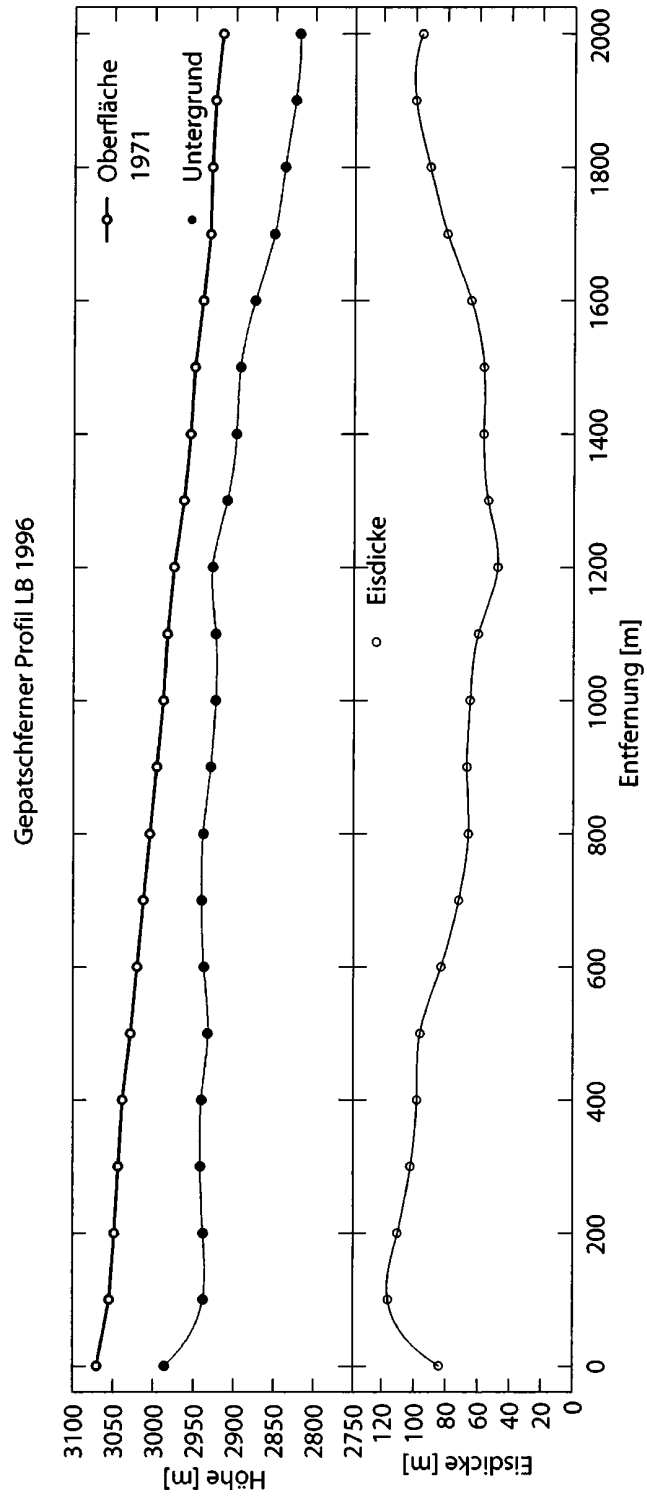


Abbildung 2.15. Gletscheroberfläche 1971 und Eisdicken 1996 am Gepatschferner entlang der Profile LB [36].

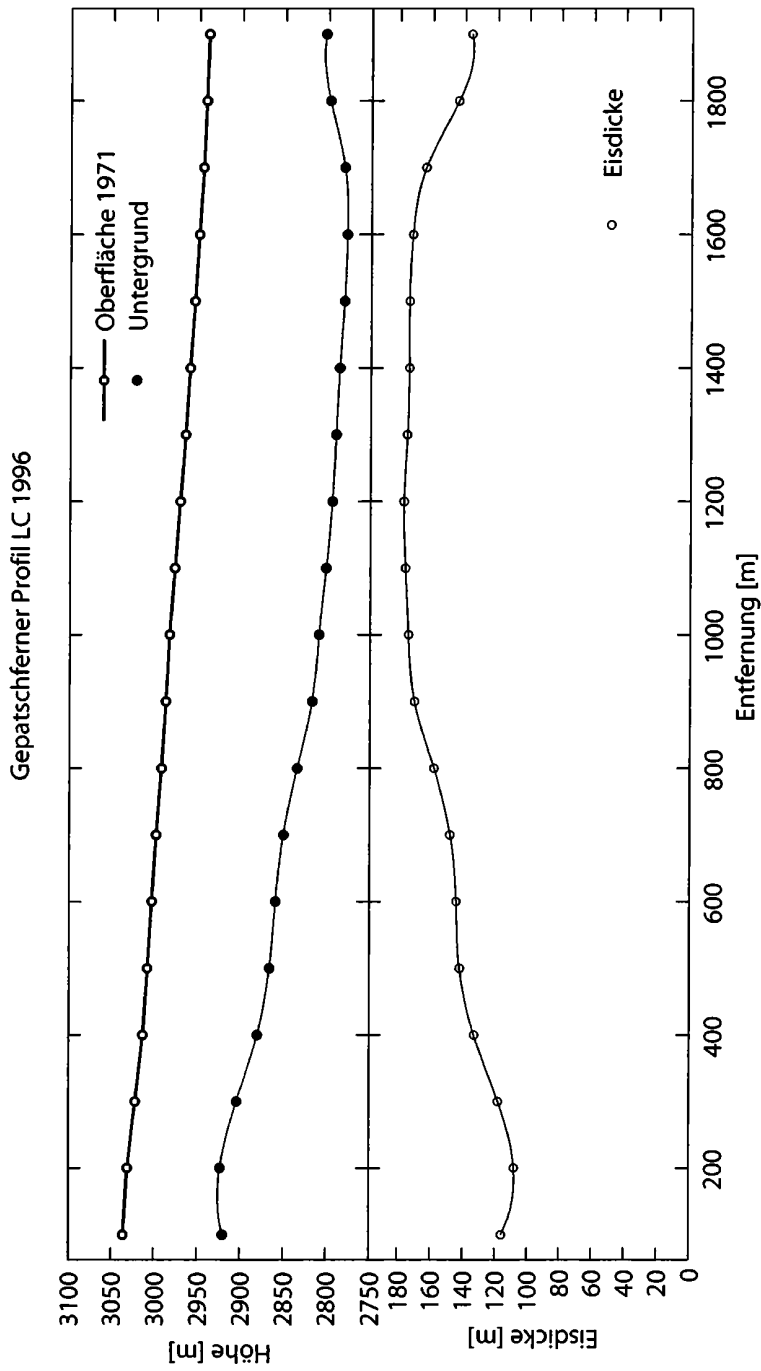


Abbildung 2.16. Gletscheroberfläche 1971 und Eisdicken 1996 am Gepatschferner entlang des Profils LC [36].

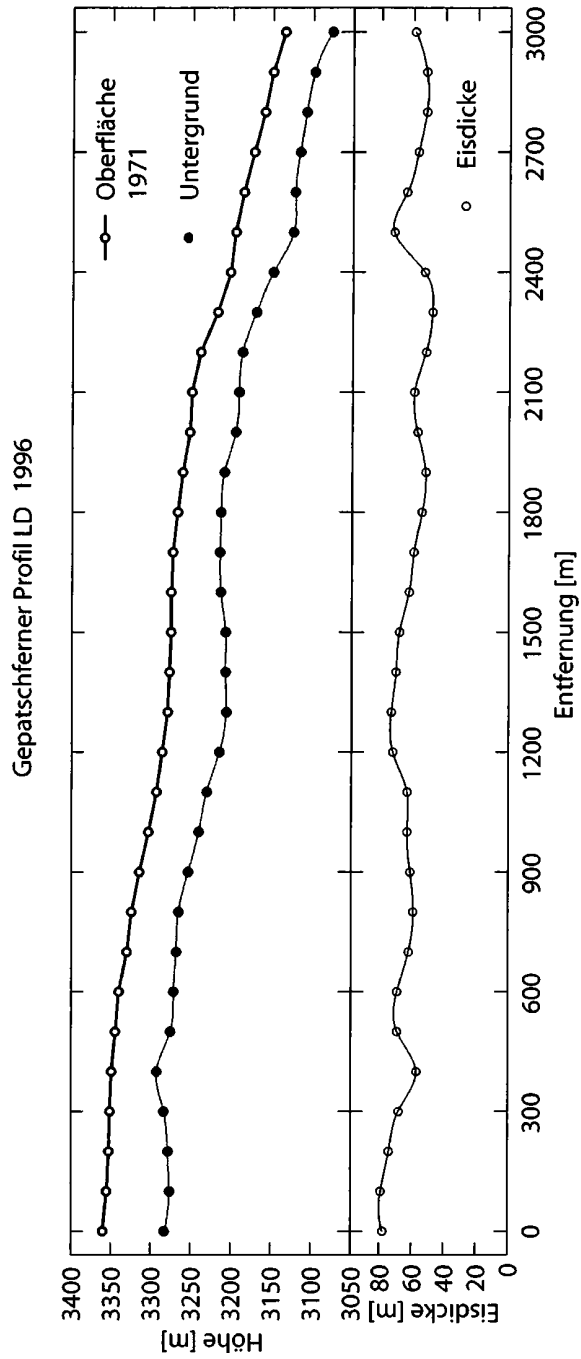


Abbildung 2.17. Gletscheroberfläche 1971 und Eisdicken 1996 am Gepatschferner entlang des Profils LD [36].

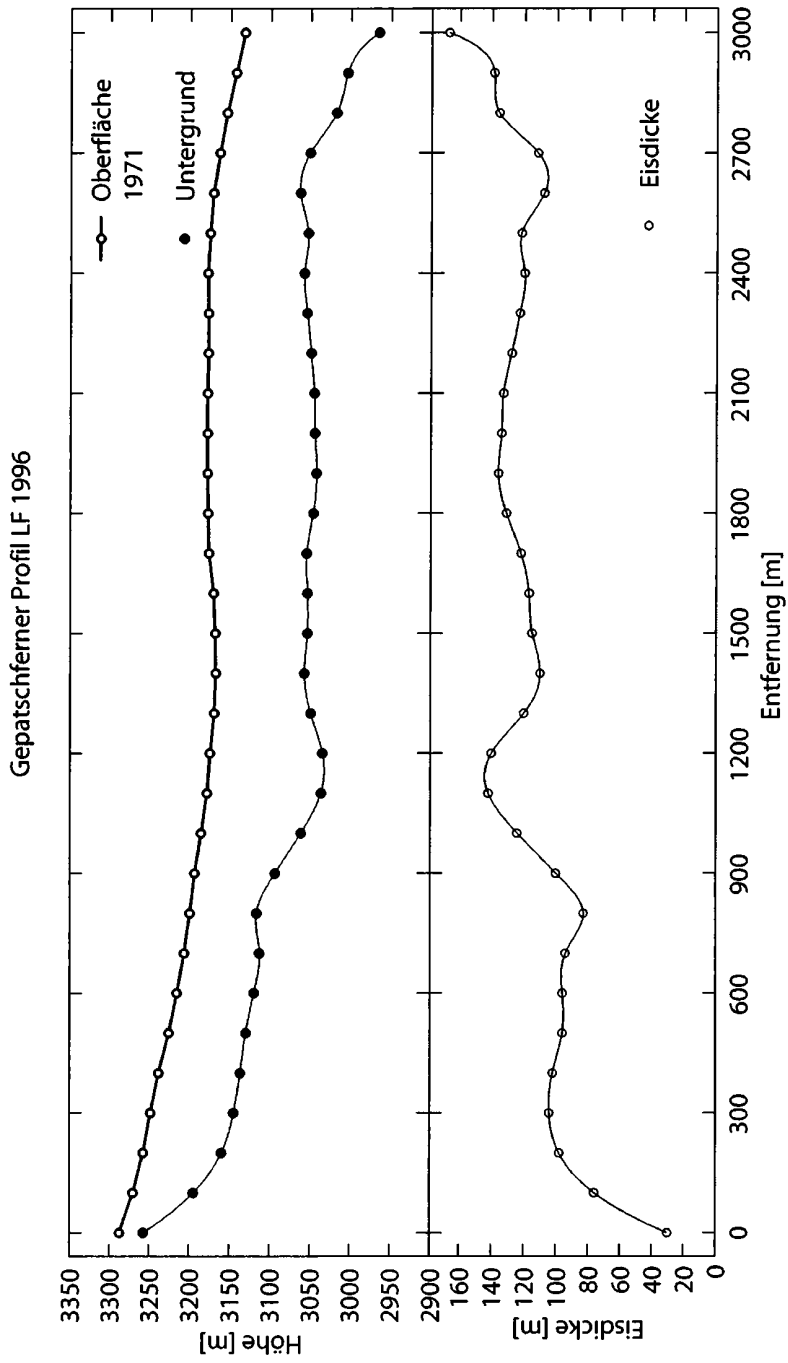


Abbildung 2.18. Gletscheroberfläche 1971 und Eisdicken 1996 am Gepatschferner entlang des Profils LF [36].

Gepatschferner Profil LG 1996

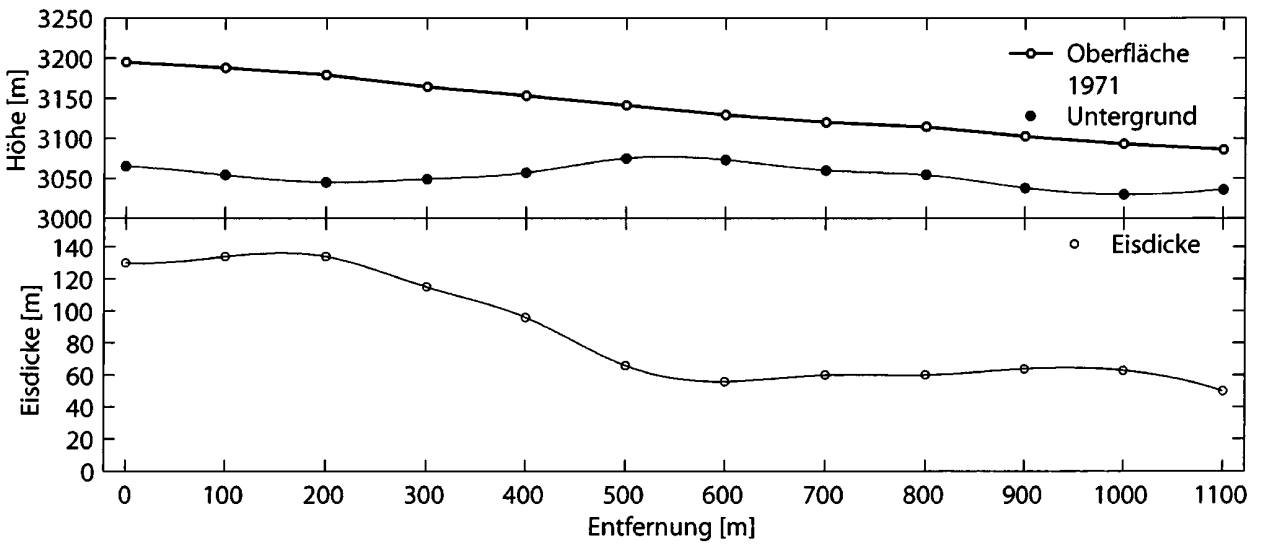


Abbildung 2.19. Gletscheroberfläche 1971 und Eisdicken 1996 am Gepatschferner entlang des Profils LG [36].

Gepatschferner Profil LH 1996

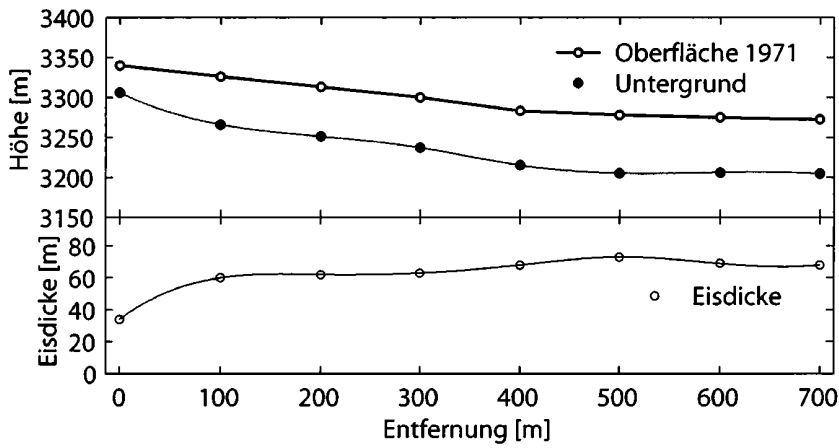


Abbildung 2.20. Gletscheroberfläche 1971 und Eisdicken 1996 am Gepatschferner entlang des Profils LH [36].

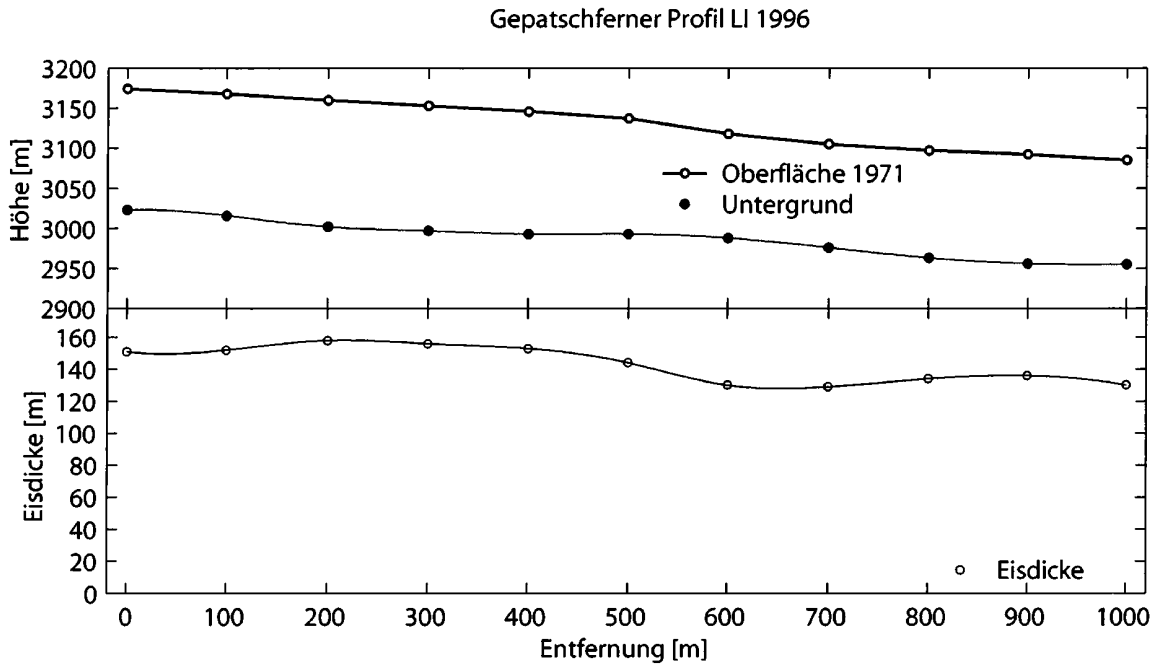


Abbildung 2.21. Gletscheroberfläche 1971 und Eisdicken 1996 am Gepatschferner entlang des Profils LI [36].

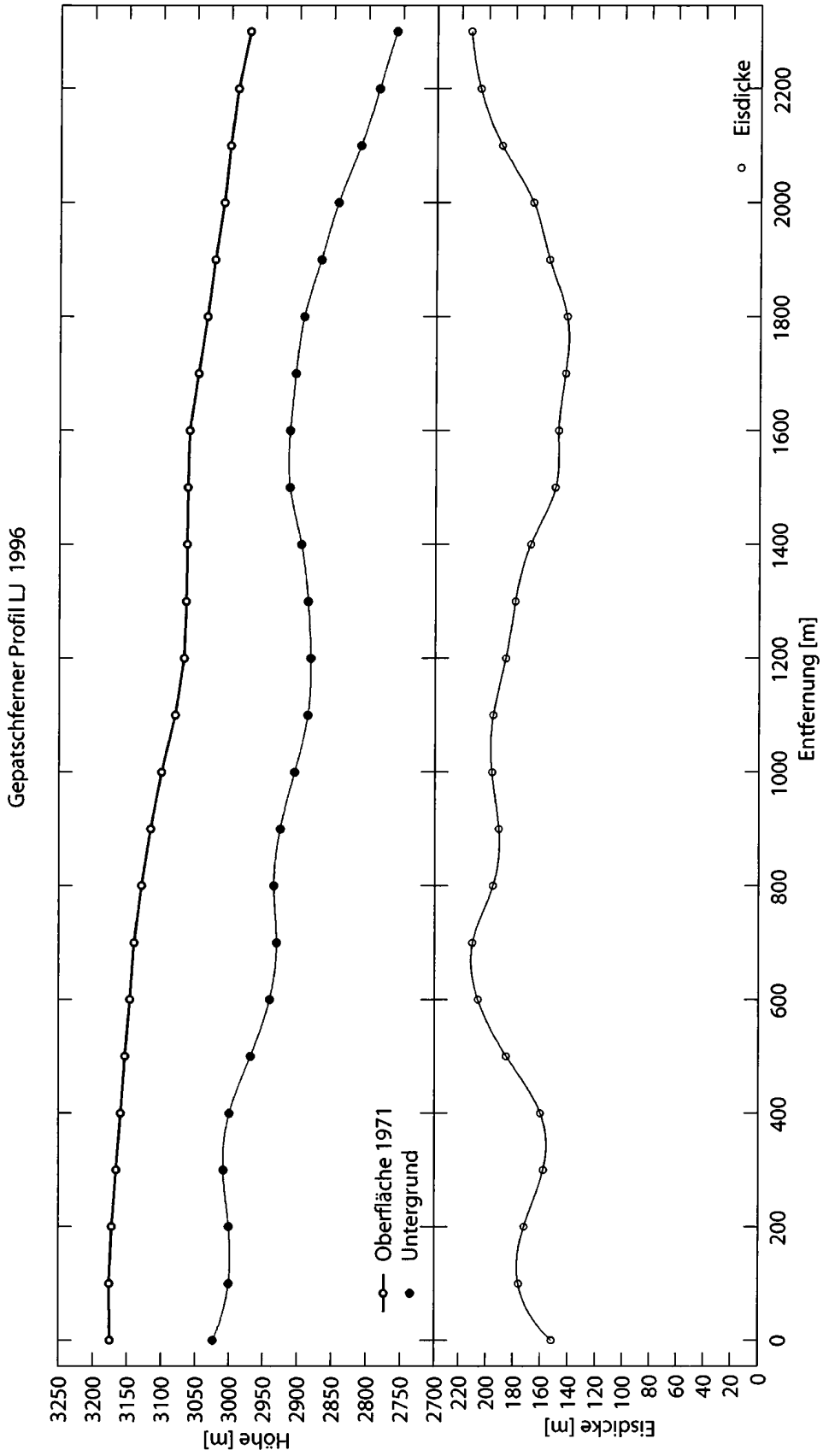


Abbildung 2.22. Gletscheroberfläche 1971 und Eisdicken 1996 am Gepatschferner entlang des Profils LJ [36].

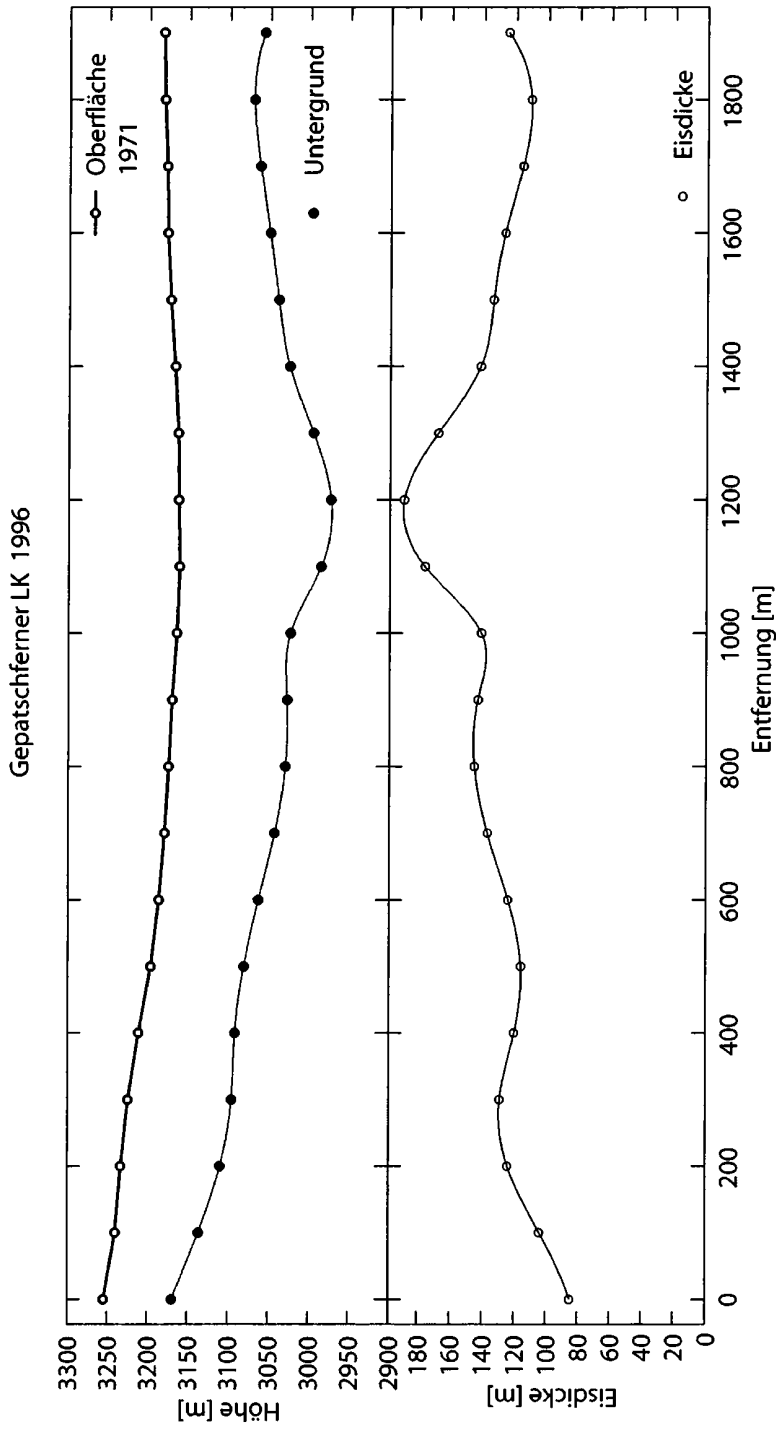


Abbildung 2.23. Gletscheroberfläche 1971 und Eisdicken 1996 am Gepatschferner entlang des Profils LK [36].

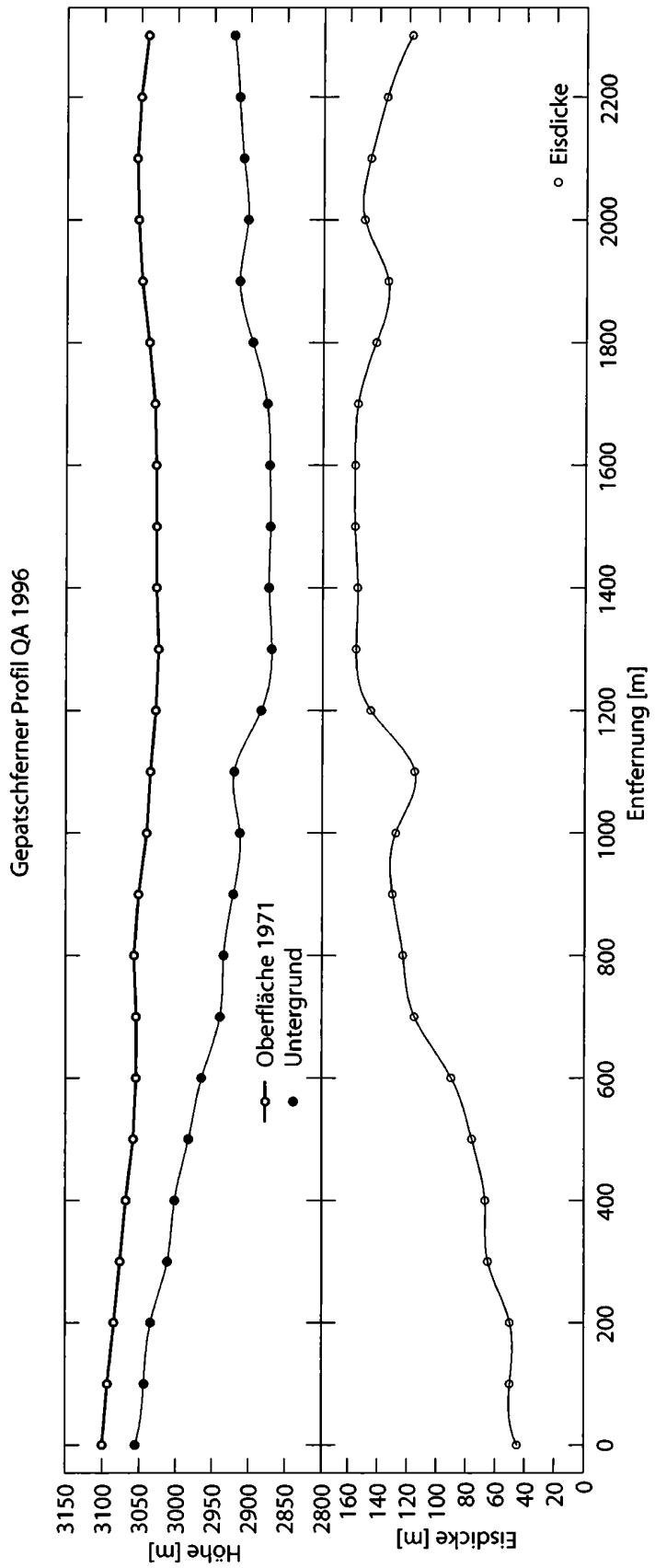


Abbildung 2.24. Gletscheroberfläche 1971 und Eisdicken 1996 am Gepatschferner entlang des Profils QA [36].

Gepatschferner Profil QB 1996

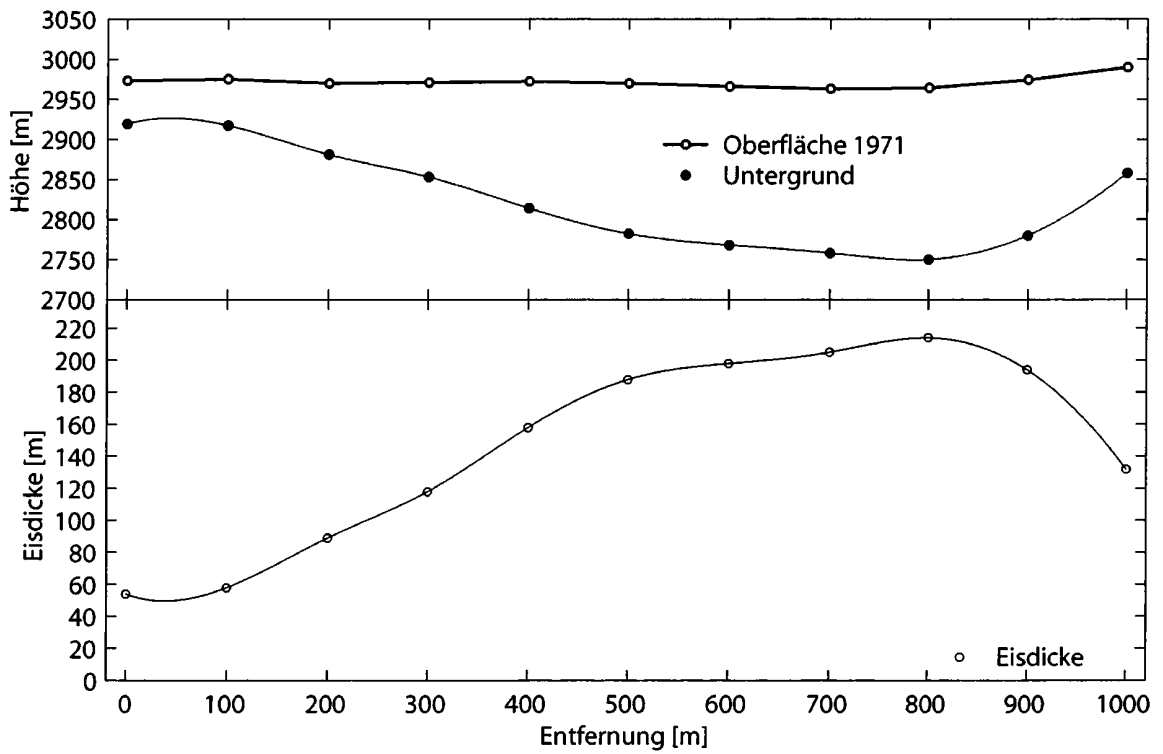


Abbildung 2.25. Gletscheroberfläche 1971 und Eisdicken 1996 am Gepatschferner entlang des Profils QB [36].

Gepatschferner Profil QC 1996

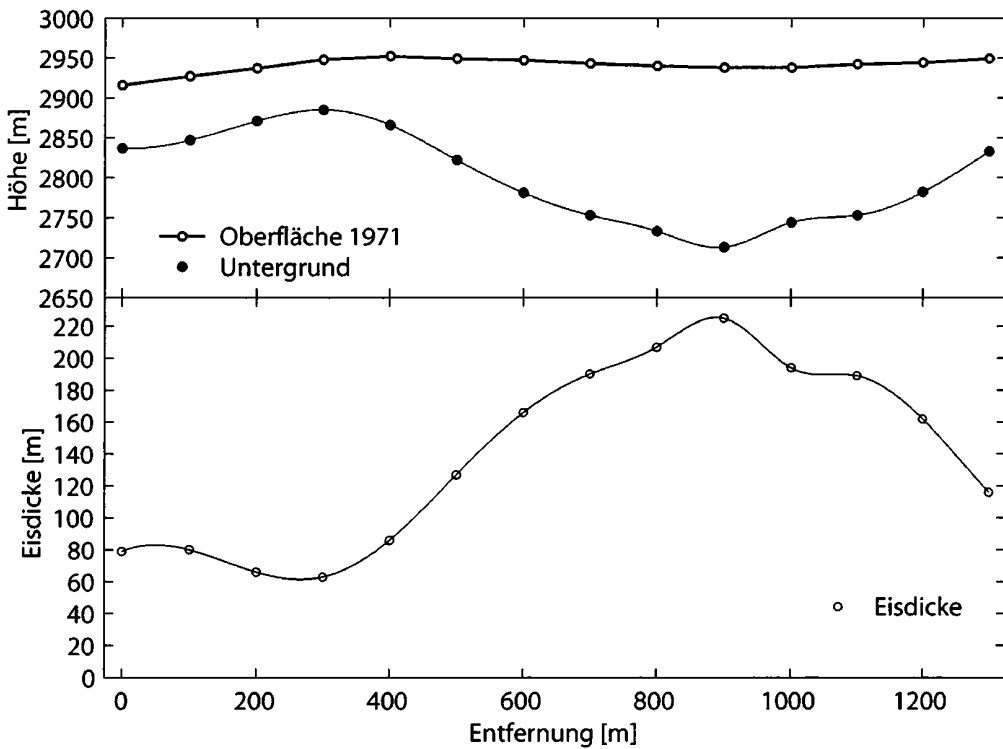


Abbildung 2.26. Gletscheroberfläche 1971 und Eisdicken 1996 am Gepatschferner entlang des Profils QC [36].

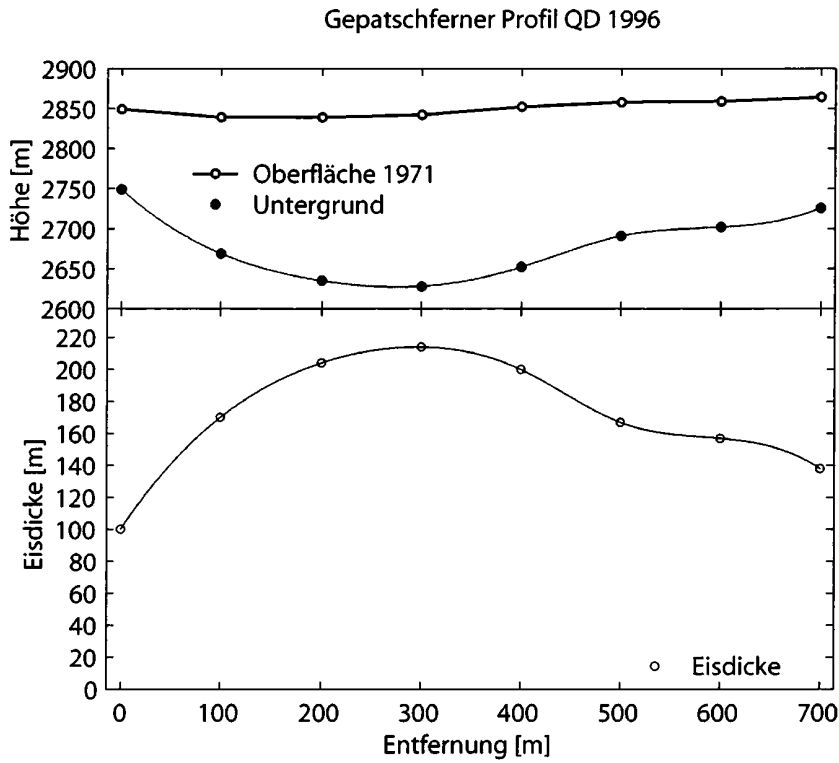


Abbildung 2.27. Gletscheroberfläche 1971 und Eisdicken 1996 am Gepatschferner entlang des Profils QD [36].

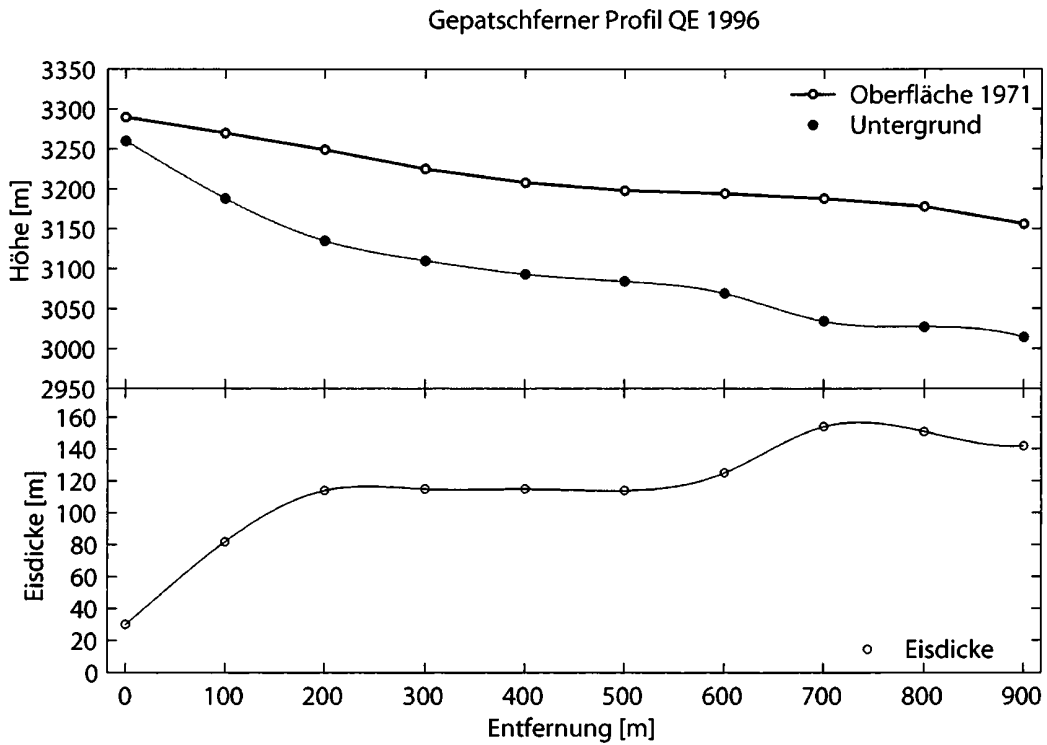


Abbildung 2.28. Gletscheroberfläche 1971 und Eisdicken 1996 am Gepatschferner entlang des Profils QE [36].

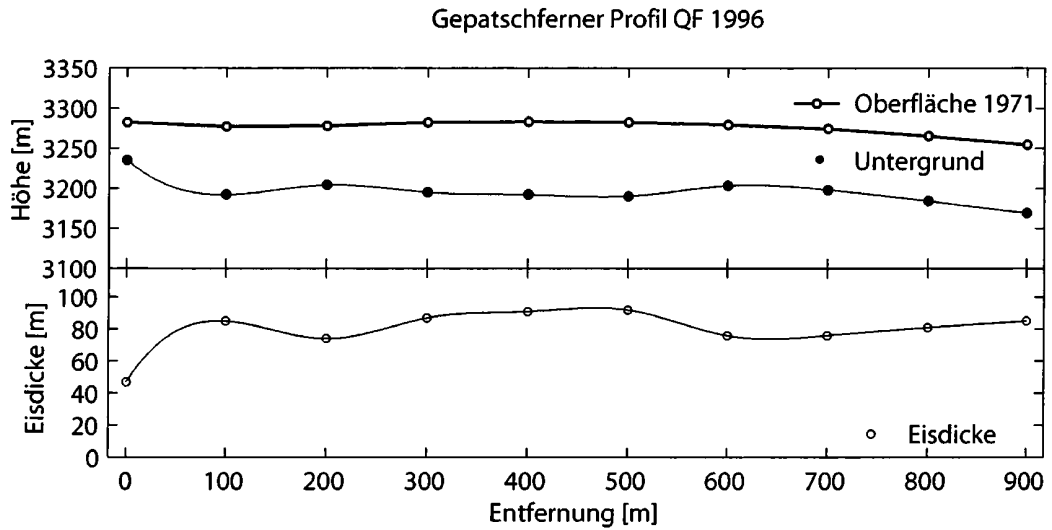


Abbildung 2.29. Gletscheroberfläche 1971 und Eisdicken 1996 am Gepatschferner entlang des Profils QF [36].

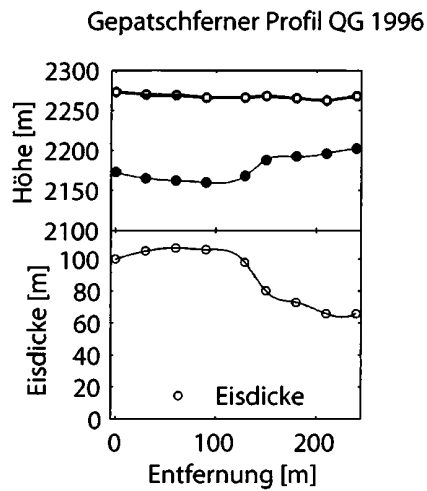


Abbildung 2.30. Gletscheroberfläche 1971 und Eisdicken 1996 am Gepatschferner entlang des Profils QG [36].

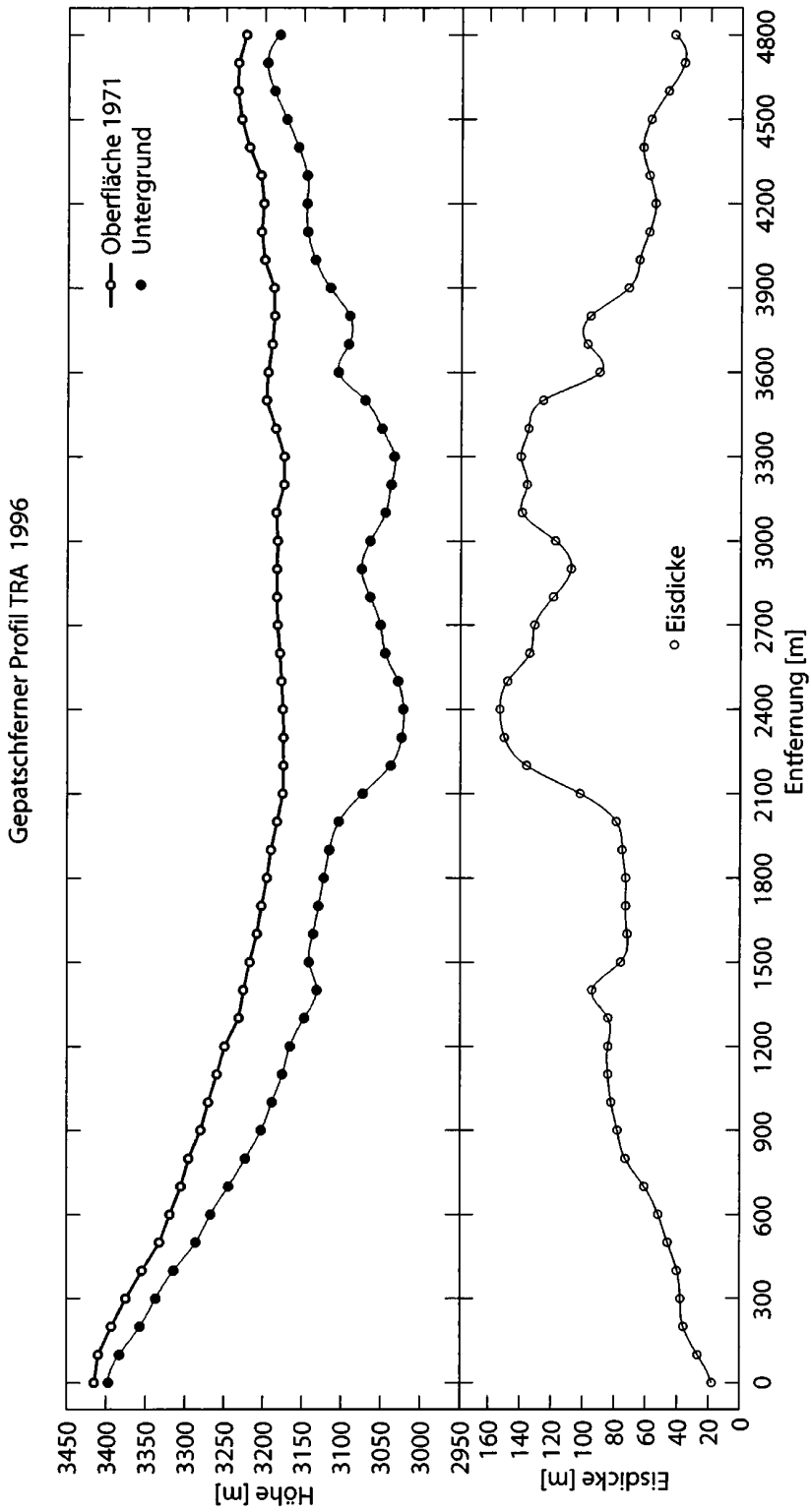


Abbildung 2.31. Gletscheroberfläche 1971 und Eisdicken 1996 am Gepatschferner entlang des Profils TRA [36].

2.3.4 Eisdicke und Untergrund des Gepatschferners

Die Karte des Untergrundes wurde von Massimo [36] erstellt. Die Berechnung des Gletscheruntergrundes erfolgte aus den Radardaten und der Karte von 1971 [12]. Die Gletscherzunge ist so stark zerklüftet, dass aus Sicherheitsgründen keine Radarmessungen durchgeführt werden konnten. In diesem Bereich wurde auf die Ergebnisse von P. Giese [24] zurückgegriffen [36]. Die Karten der Eisdicke und des Untergrundes beschränken sich auf den Hauptteil des Gletschers ohne Nebengletscher und Nebenzungen.

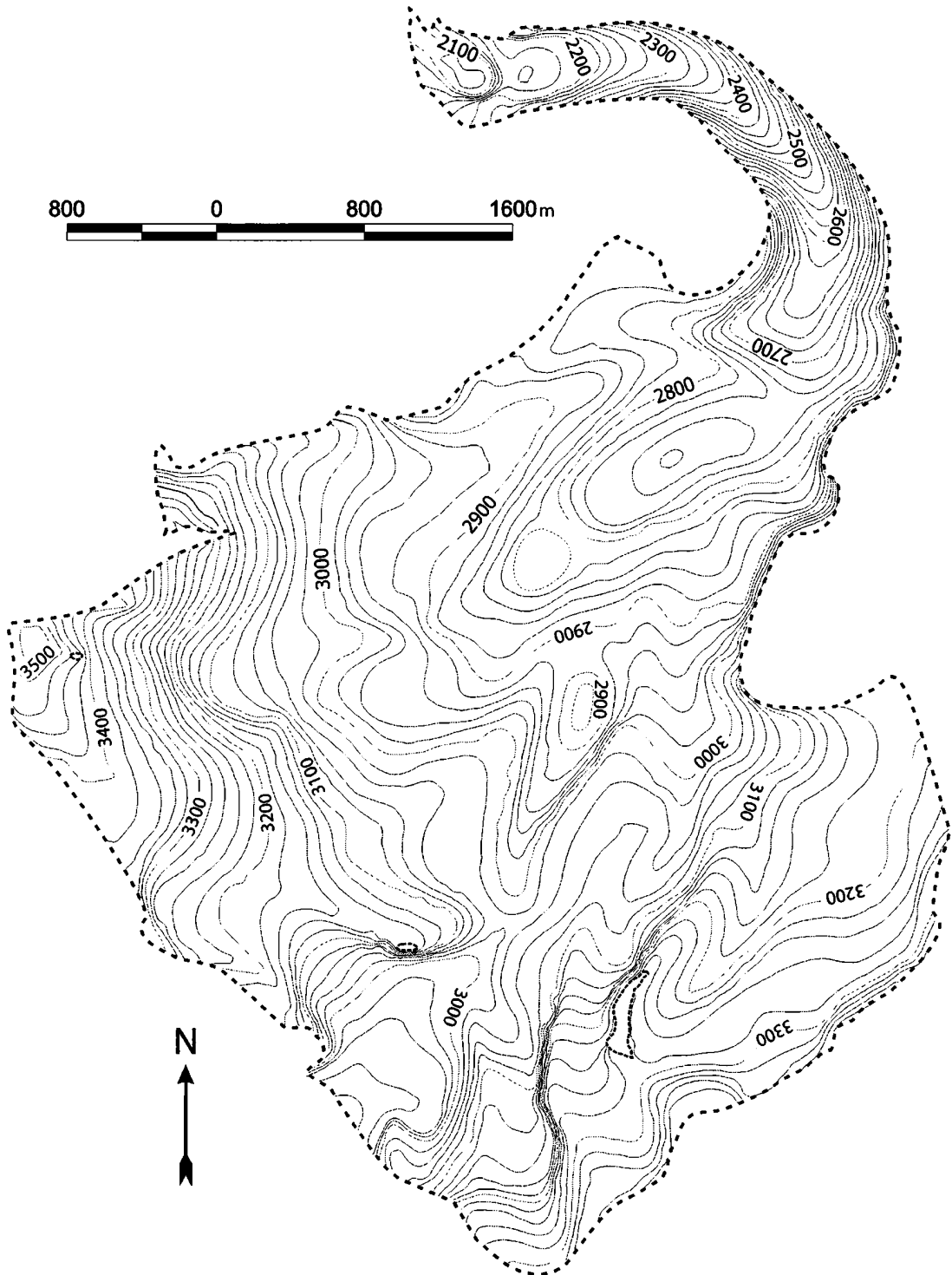


Abbildung 2.32. Karte des Gletscheruntergrundes am Gepatschferner nach [36].

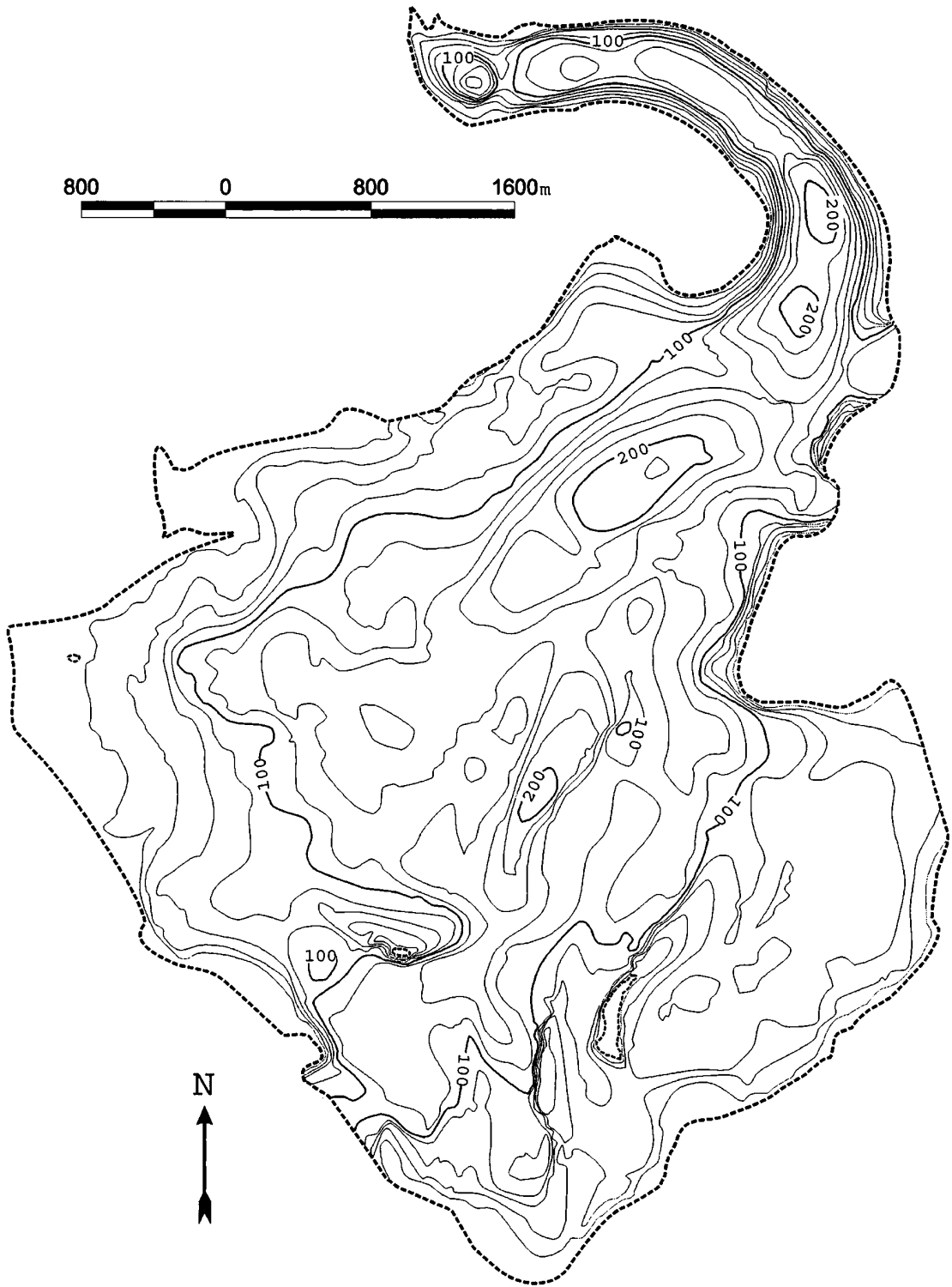


Abbildung 2.33. Karte des Eisdicke des Gepatschferners im Jahr 1996 nach [36].

Abbildung 2.32 zeigt das eisfreie Gletscherbett mit einem Schichtlinienabstand von 20 m. Die Interpolation der Eisdickendaten erfolgte durch Massimo [36]. Das aus der Karte der Eisdicke berechnete Eisvolumen des Gepatschferners ohne Seitengletscher beträgt $1,9 \text{ km}^3$. Das im Gepatschferner gespeicherte Wasser hat ein Volumen von $1,7 \text{ km}^3$.

2.4 Hintereisferner

Der Hintereisferner in den Öztaler Alpen ($46^{\circ} 47,8' N$, $10^{\circ} 46,2' O$) hatte 1991 inklusive des Langtaufererjochferners und des schuttbedeckten Teils der Zunge eine Fläche von $8,5 \text{ km}^2$. Das Akkumulationsgebiet des Hintereisferners ist nach Osten, das Ablationsgebiet nach Nordosten orientiert.

Die glaziologische Forschung am Hintereisferner hat lange Tradition. Seit dem Jahr 1952 werden jährlich vom Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck (IMGI) Massenbilanzmessungen und vom Institut für Mathematik Geschwindigkeitsmessungen durchgeführt [48]. Sie zählen zu den längsten Meßreihen weltweit. Dazu gibt es eine Reihe topographischer Aufnahmen des Hintereisferners aus den Jahren 1894, 1920, 1939, 1953, 1964, 1967, 1969, 1979, 1991 und 1997. Zusätzlich wurden in den Jahren 2001 bis 2004 Höhenmodelle im Rahmen des EU-Projektes Omega (<http://omega.utu.fi/>), an dem das IMGI beteiligt war, aufgenommen. Ziel des Projektes war der Vergleich von Methoden zur operationellen Gletscherbeobachtung. Dazu wurden Orthofotos, Satellitenbilder, flugzeuggetragenes interferometrisches SAR (INSAR) und Laserscanner verwendet. Zahlreich sind auch historische Eisdickenmessungen, die in Kapitel 2.4.1 zusammengefaßt sind. Die Topographie des Gletscherbettes wurde von Span aus den von Wächter 1982 und Span 1997 ermittelten Eisdicken berechnet. 1997 wurde die Eisdicke an 145 Punkten gemessen, wobei im Profil QP9 eine Vergleichsmessung IMGI/Wächter durchgeführt wurde (Abbildung 2.46).

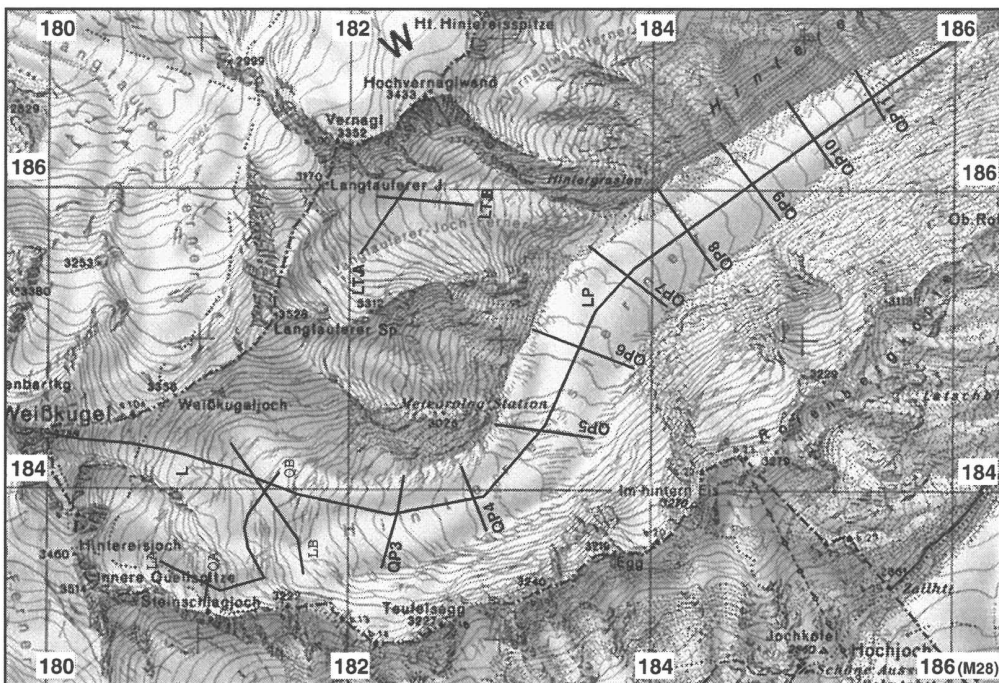


Abbildung 2.34. Karte des Hintereisferners (Ötztaler Alpen) mit Lage der Radarmessungen. Die Profile von Wächter (persönliche Mitteilung) sind mit P und der Profilnummer bezeichnet. Die Messungen am Langtaufererjochferner (LTJA und LTJB) sind im Abschnitt 2.5 beschrieben. Quelle: ÖK 1:50 000 BEV. Gletscherstand: 1991.

2.4.1 Frühere Tiefenmessungen

In den Jahren 1893 bis 1922 wurden von Blümcke und Hess am Hintereisferner 12 Löcher gebohrt um Eistiefe, Ablation und Fließgeschwindigkeit zu messen [28] [5] [6] [7]. Dabei wurde nicht nur die Abnahme der Eiseschwindigkeit gegen des Gletscherbett hin entdeckt, sondern auch die erste Karte des eisfreien Gletscherbettes berechnet. Erste seismische Messungen von Mothes am Hintereisferner lieferten 1929 Erkenntnisse über die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Longitudinalwellen [38]. In den Jahren 1953 und 1954 wurden von Förtsch und Vidal seismische

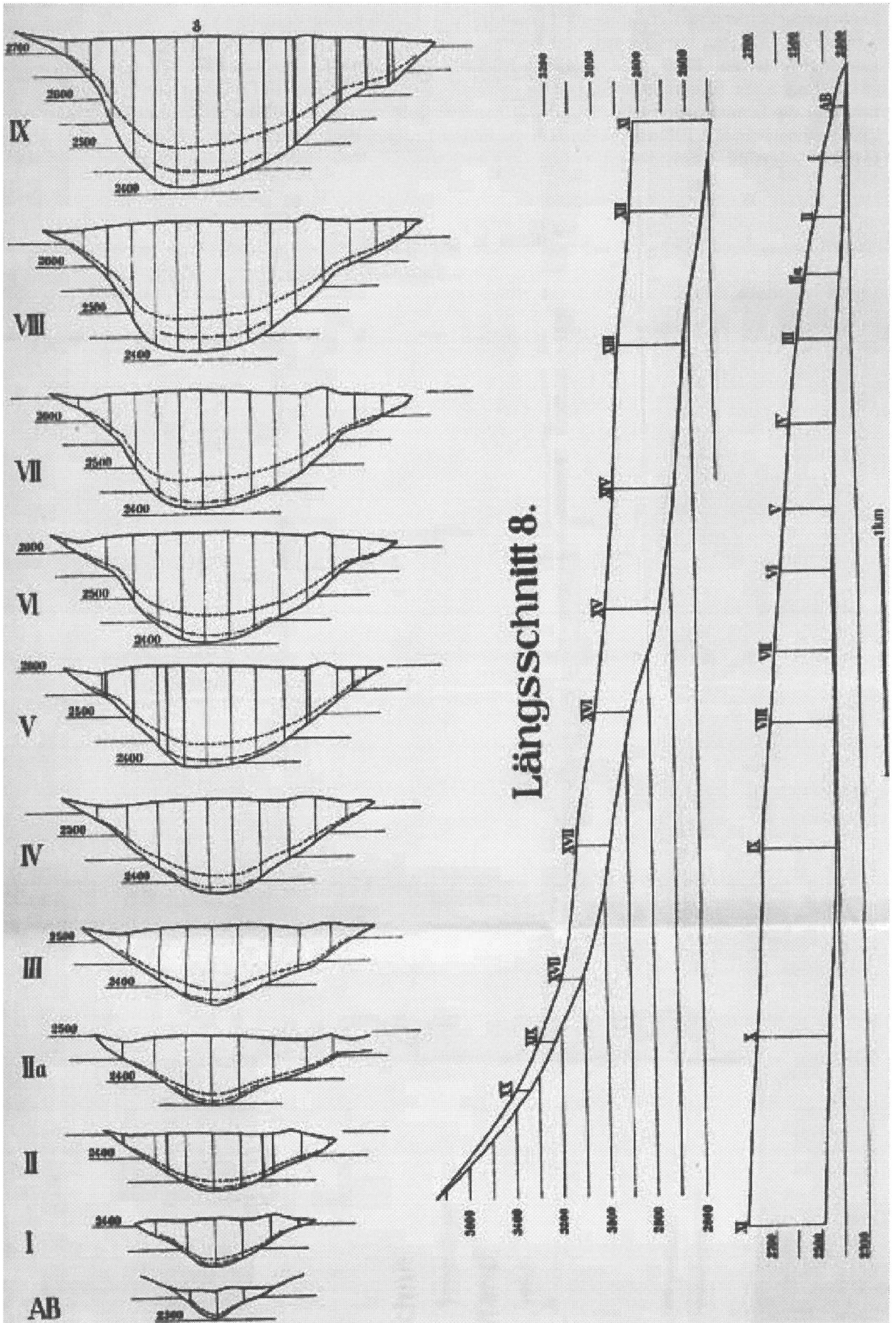


Abbildung 2.35. Profile des Gletscheruntergrundes von Hess. Quelle: [28].

Eisdickenmessungen an der Zunge bis in eine Höhe von 2970 m (die damalige Firngrenze) durchgeführt [22]. Aus den Daten wurde eine Karte des eisfreien Gletscherbettes berechnet. Mit dieser Karte modellierten Förtisch und Vidal den Rückzug des Hintereisferners zwischen 1954 und 2254 (Abbildung 2.38). Radarecholotung wurde erstmals 1982 von Wächter (ETH Zürich, unveröffentlicht) für die Ermittlung der Eisdicke des Hintereisferners verwendet. 1994 wurden vom IMGI in Zusammenarbeit mit Blindow (Münster) die ersten Probemessungen mit dem Radarsystem des IMGI durchgeführt.

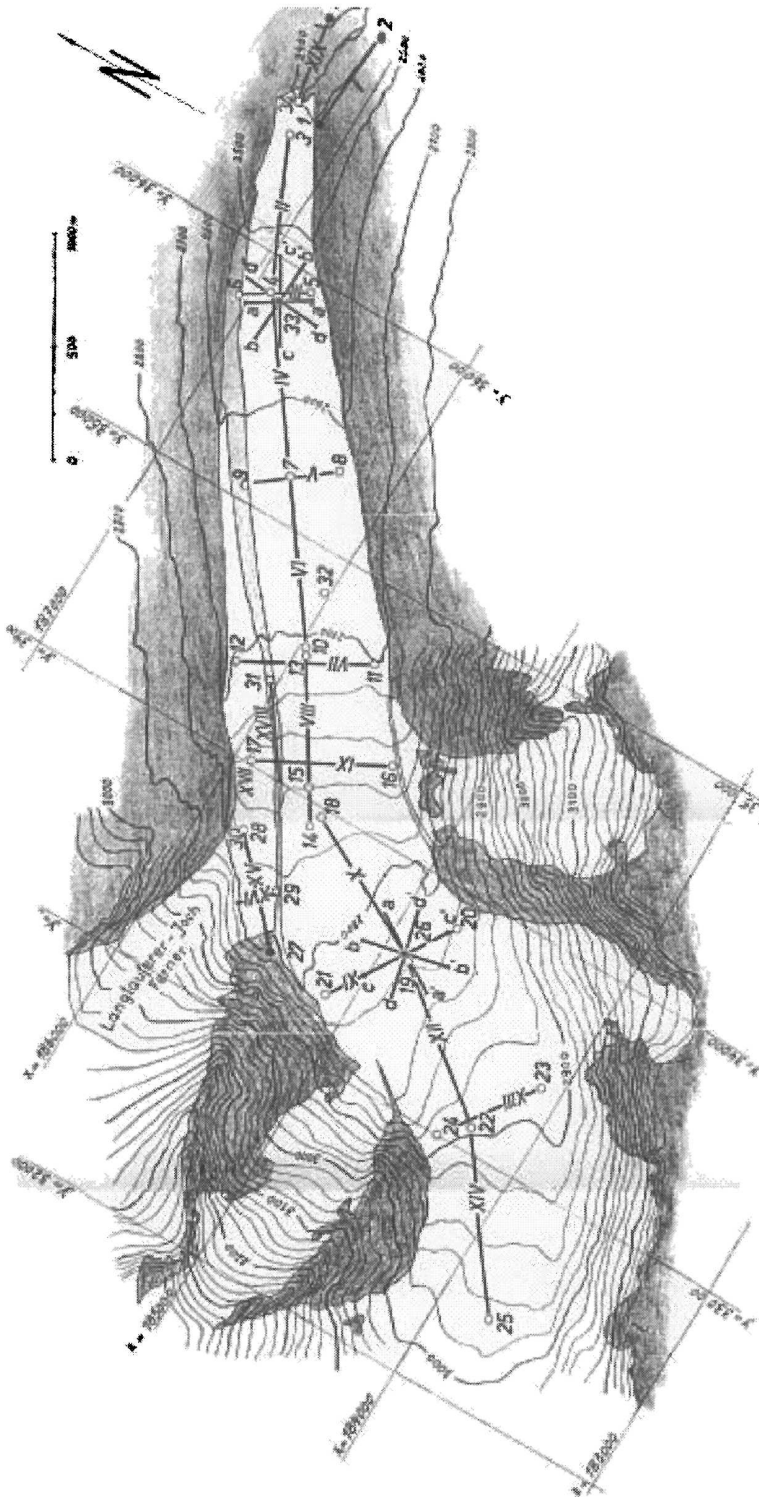


Abbildung 2.36. Lage der Seismikprofile von Förtisch und Vidal. Quelle: [21].

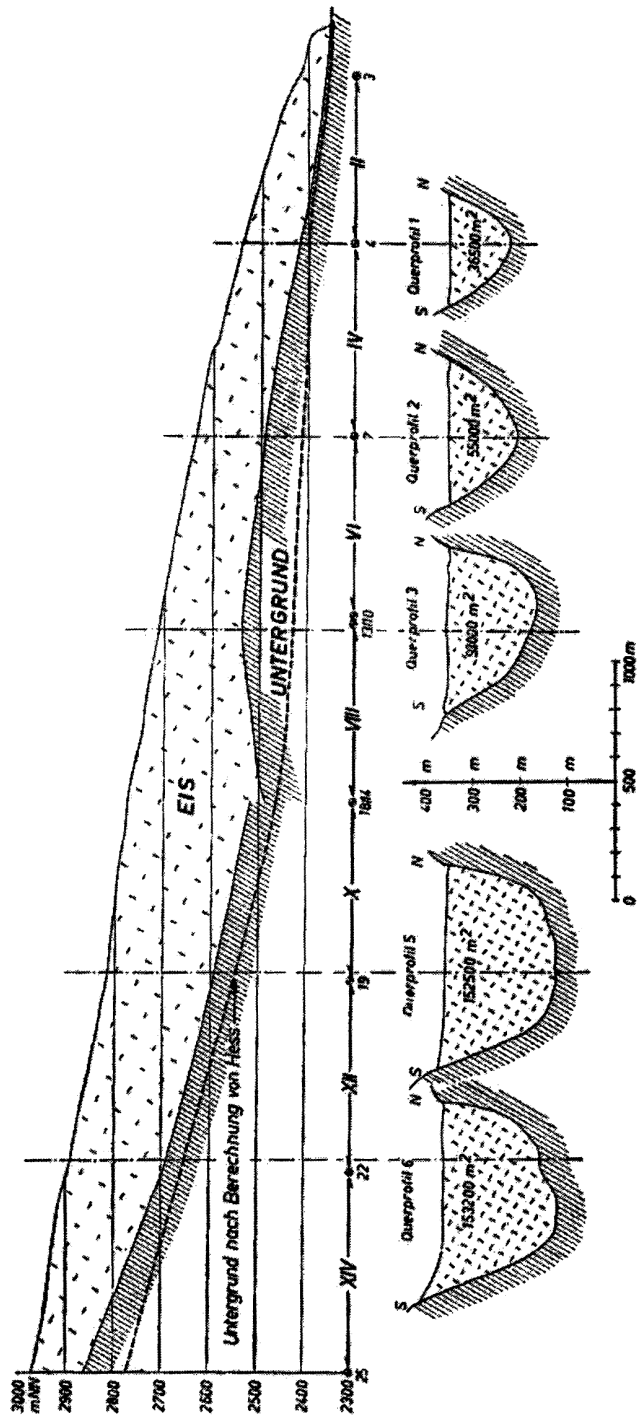


Abbildung 2.37. Profile des Gletscheruntergrundes von Förtsch und Vidal. Quelle: [21].

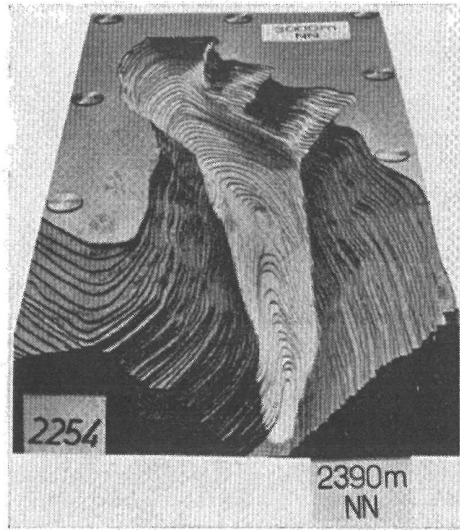


Abbildung 2.38. Modell des Gletscheruntergrundes von Förtsch und Vidal. Quelle: [21].

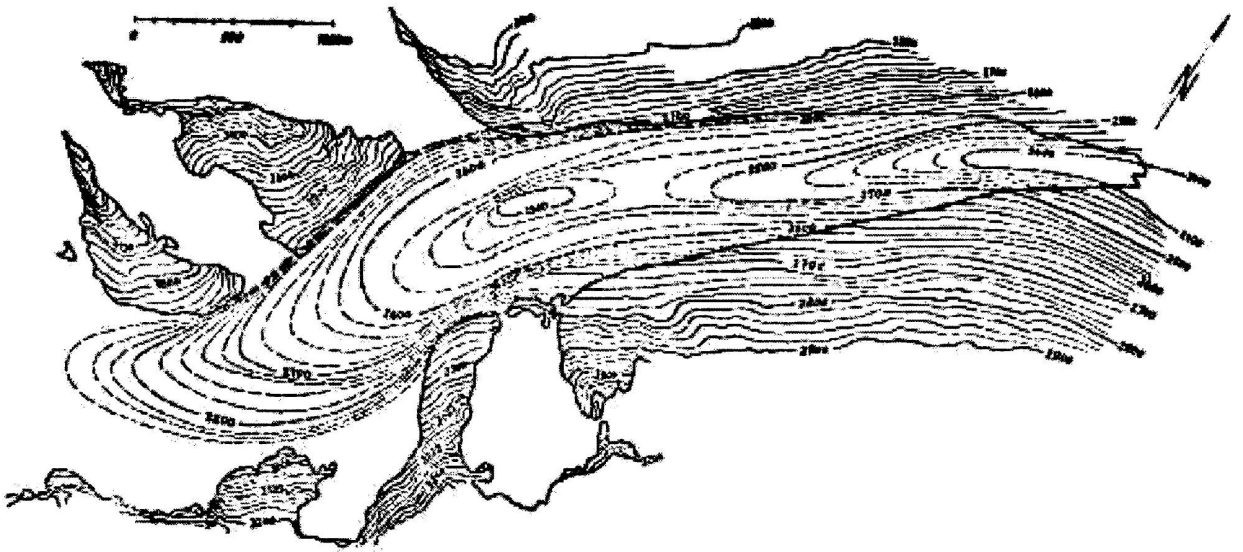


Abbildung 2.39. Karte des Gletscheruntergrundes von Hess. Quelle: [28].

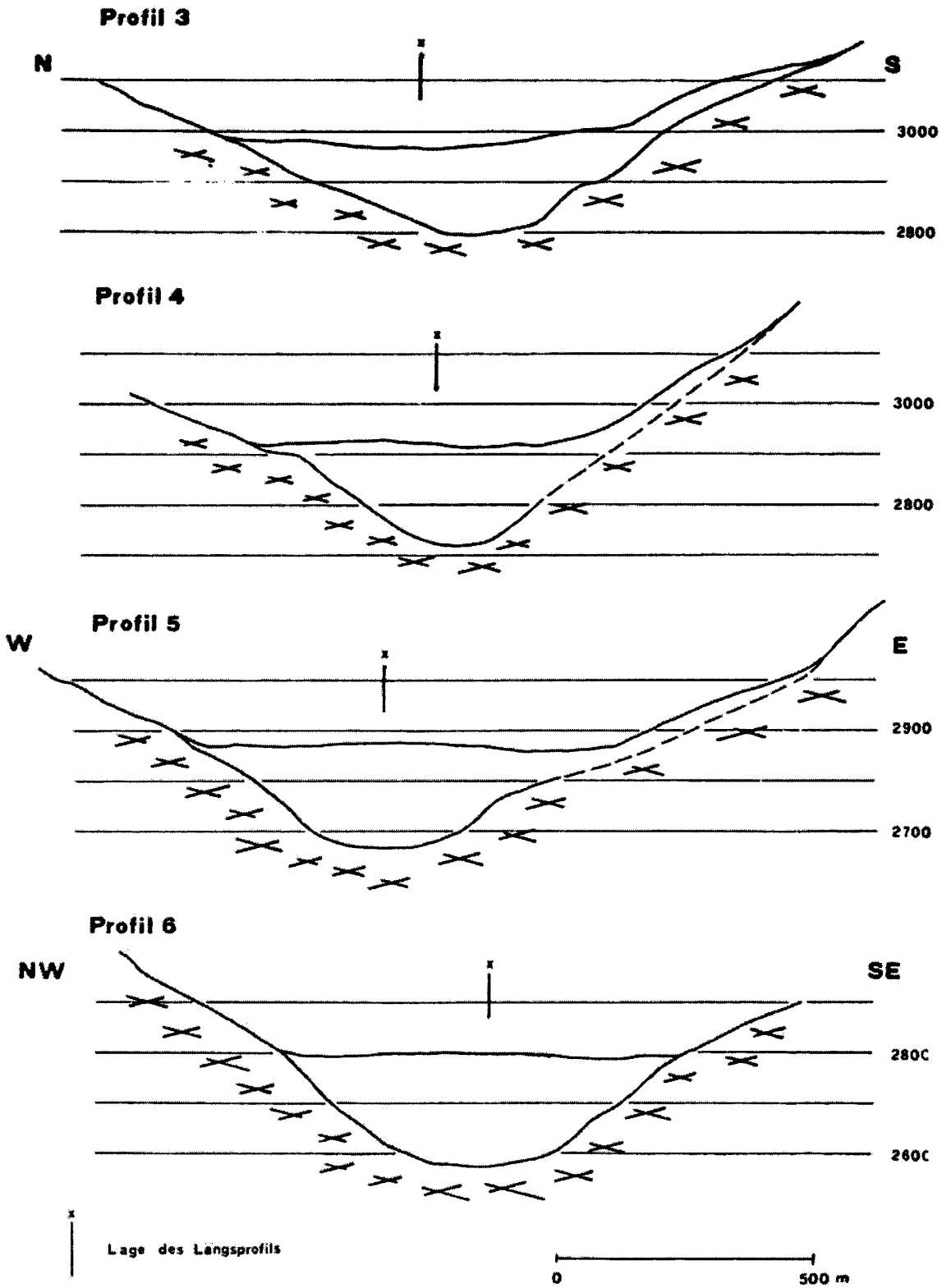


Abbildung 2.40. Gletscheroberfläche und Eisdicken entlang der Querprofile QP3 bis QP6 von Wächter (persönliche Mitteilung).

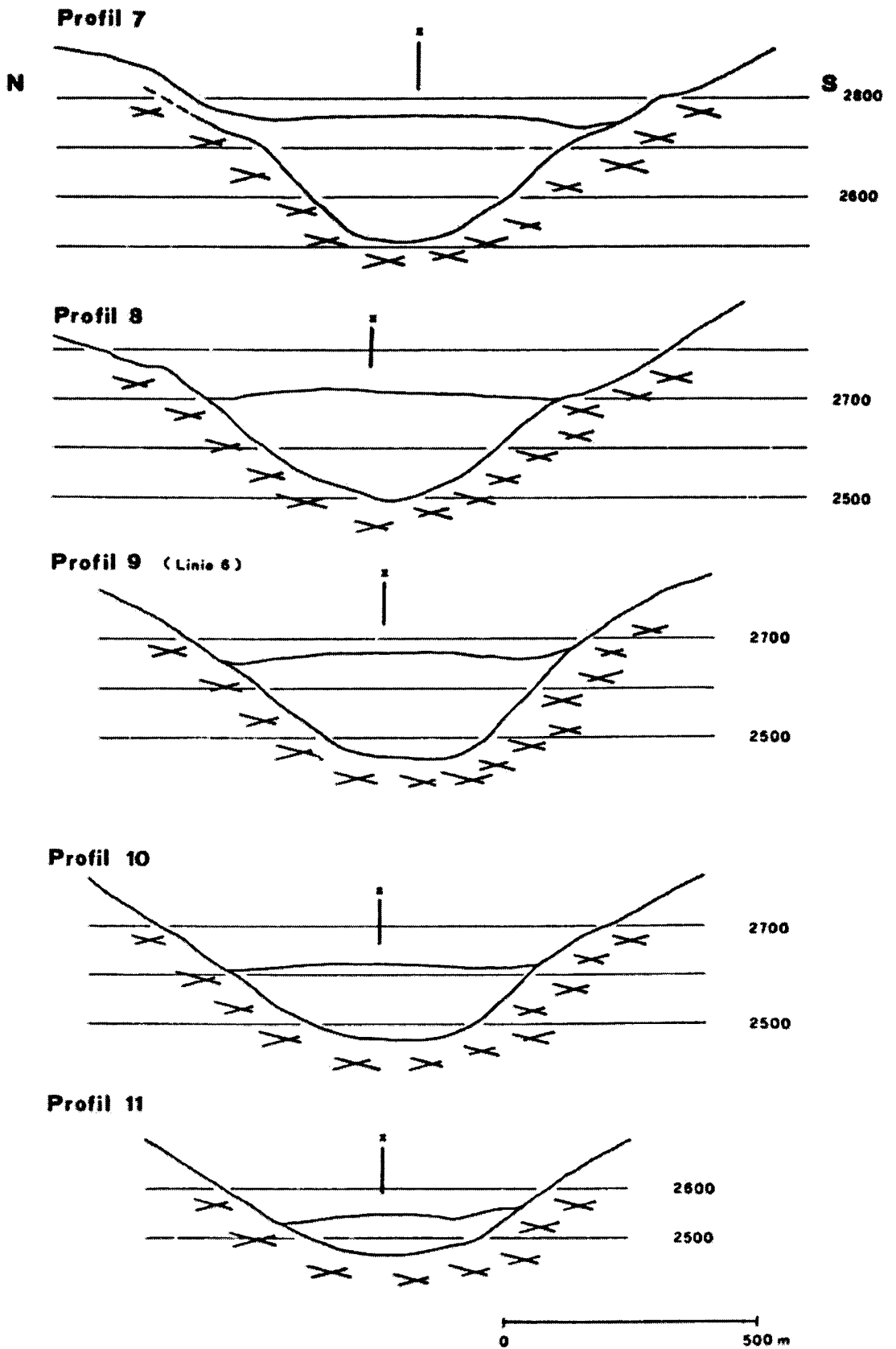


Abbildung 2.41. Gletscheroberfläche und Eisdicken entlang der Querprofile QP7 bis QP11 von Wächter (persönliche Mitteilung).

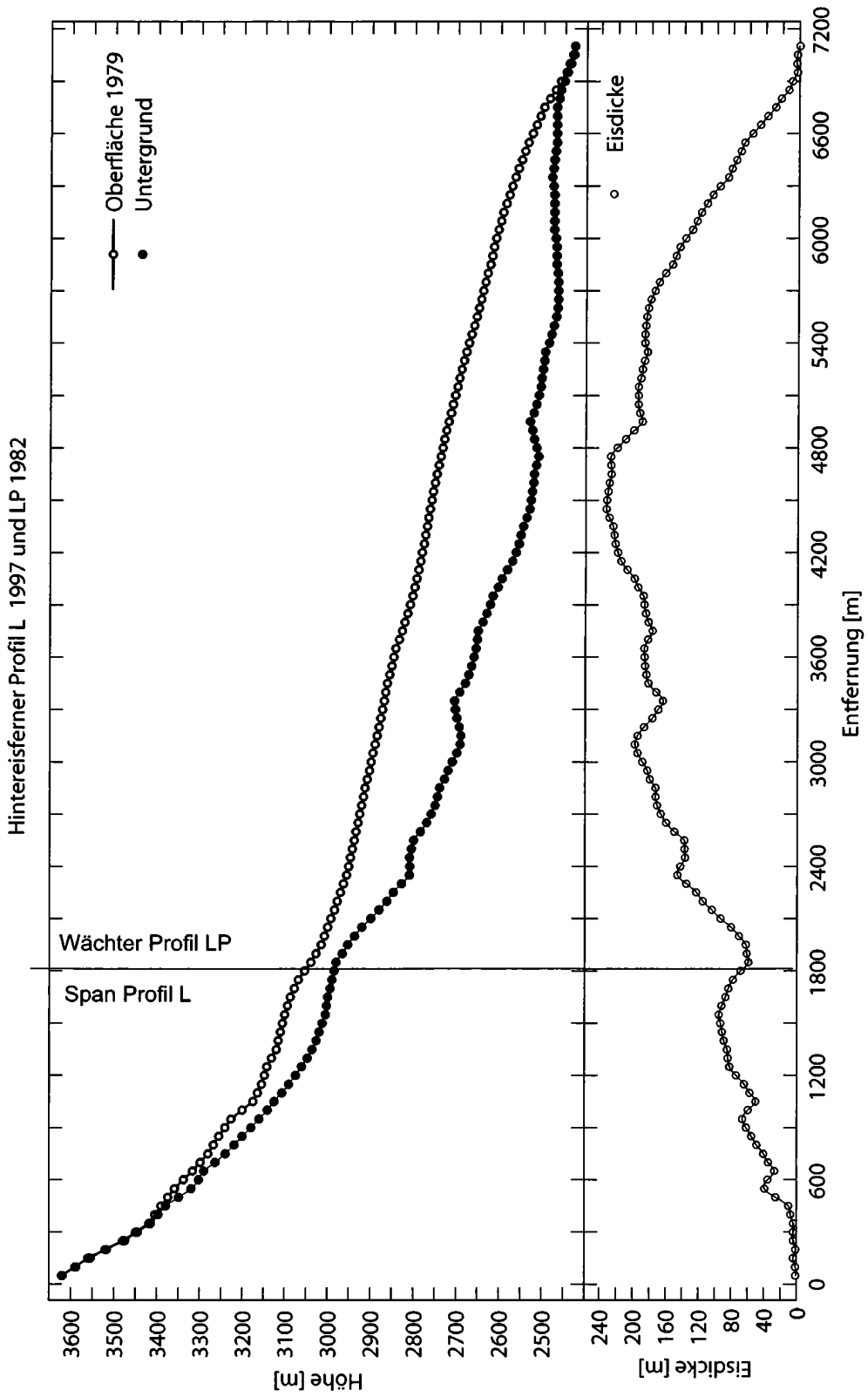


Abbildung 2.42. Gletscheroberfläche und Eisdicken entlang des Längsprofils LP von Wächter (persönliche Mitteilung).

2.4.2 Ergebnisse der Tiefenmessungen des IMGI

Die Eisdickenmessungen in den Profilen QA, QB, LA und LB wurden von Span 1997 durchgeführt und ergänzen die Datengrundlage von Wächter für die Berechnung des Untergrundes. Im Querprofil QP6 von Wächter, das der Linie 6 der Geschwindigkeitsmessungen entspricht, wurde im Jahr 2002 eine Vergleichsmessung durchgeführt (Abbildung 2.46)

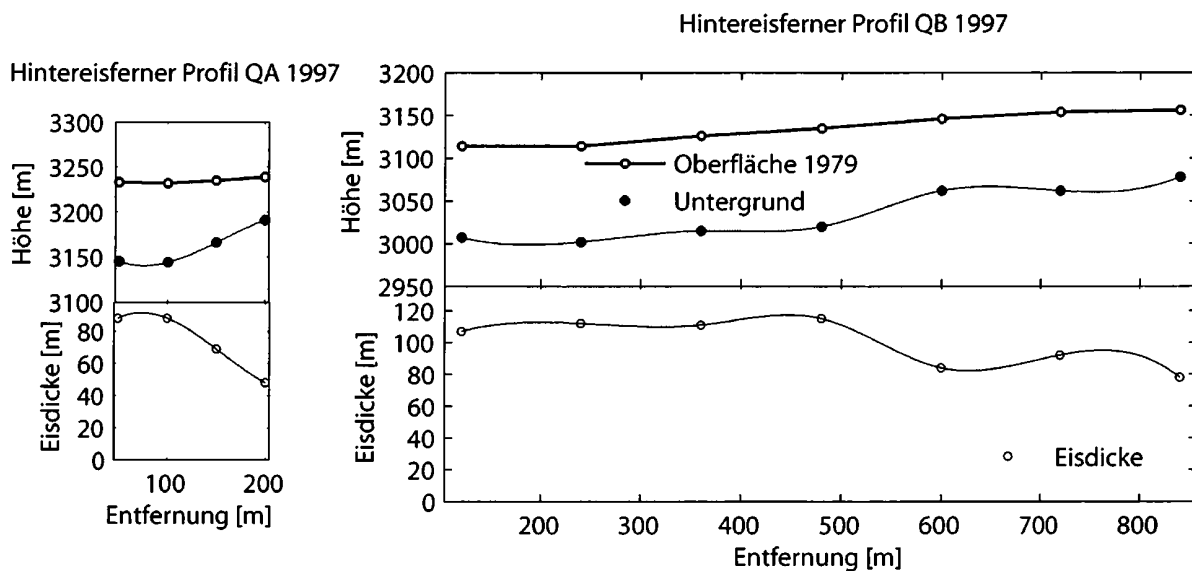


Abbildung 2.43. Gletscheroberfläche und Eisdicken entlang der Querprofile QA und QB.

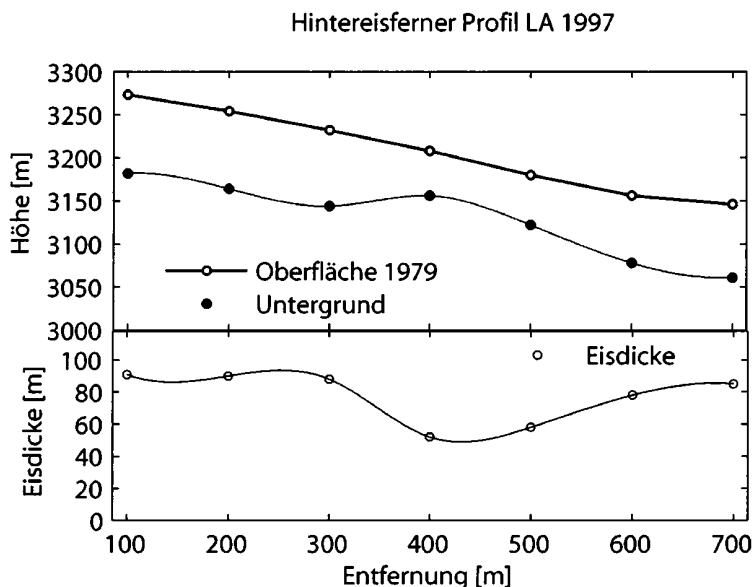


Abbildung 2.44. Gletscheroberfläche und Eisdicken entlang des Profils LA.

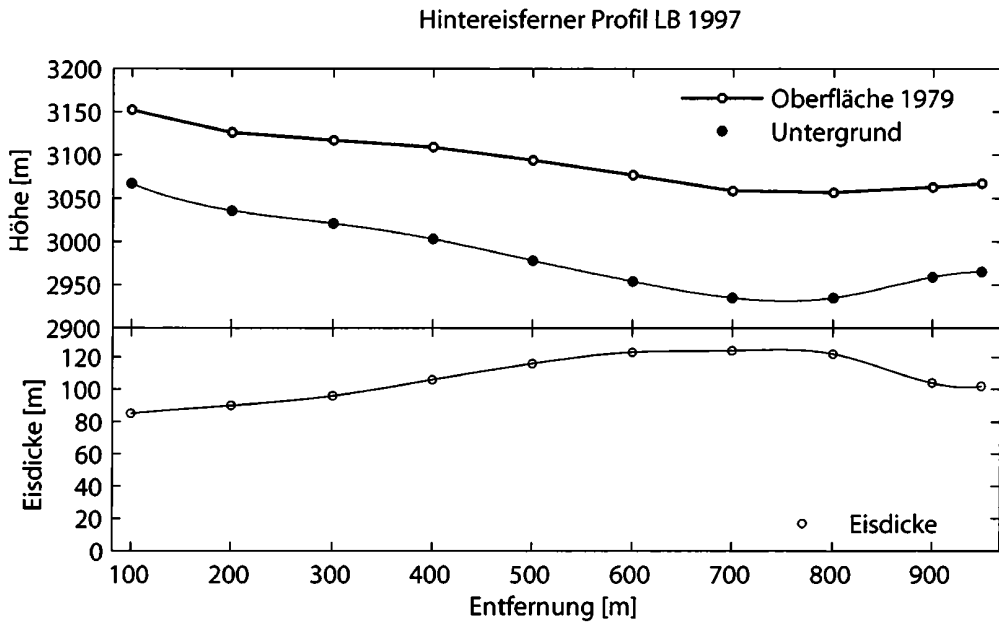


Abbildung 2.45. Gletscheroberfläche und Eisdicken entlang des Profils LB.

Hintereisferner Querprofil QP9/Linie 6

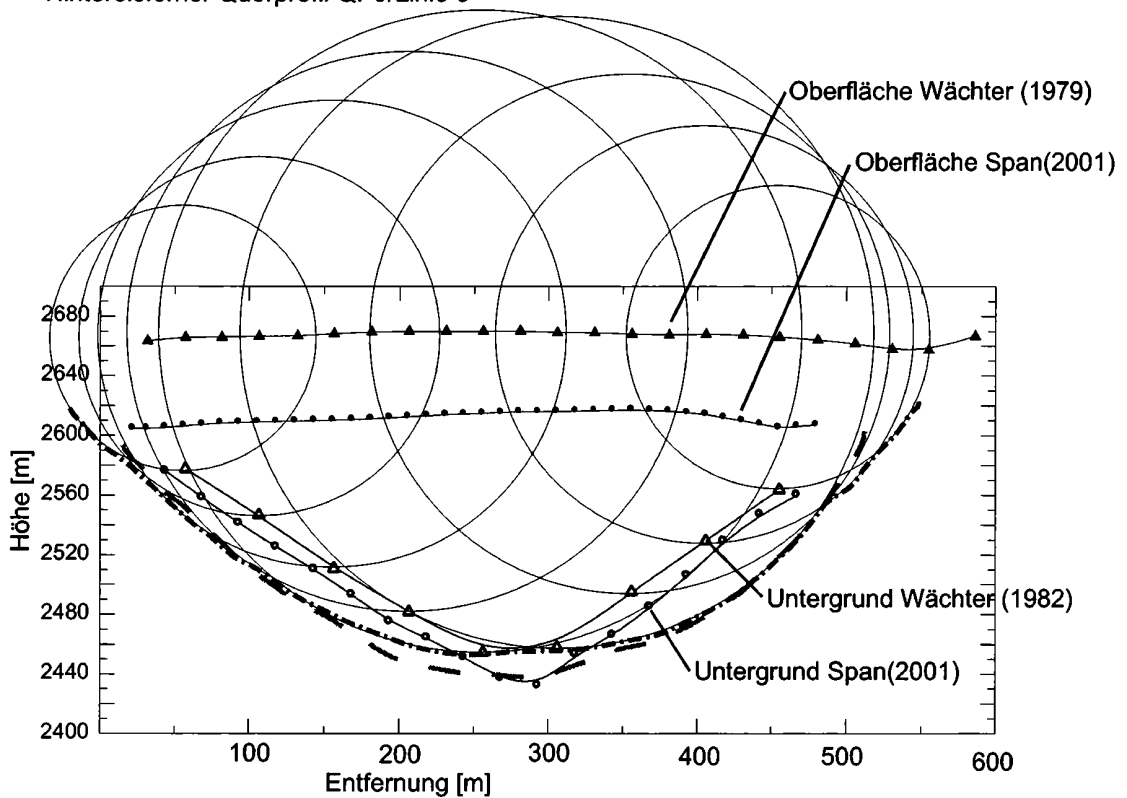


Abbildung 2.46. Gletscheroberfläche und Eisdicken entlang des Querprofils PQ9 (Linie 6) aus den Messungen von Wächter 1982 und Span 2002. Der aus den Radardaten migrierte Verlauf des Untergrundes ist strichliert (Span) bzw. strichpunktiiert (Wächter) dargestellt.

2.4.3 Topographie des Gletscherbettes

Die Topographie des Gletscherbettes wurde von Span aus den mit Radioecholotung gemessenen Tiefen und dem Höhenmodell 1997 berechnet.

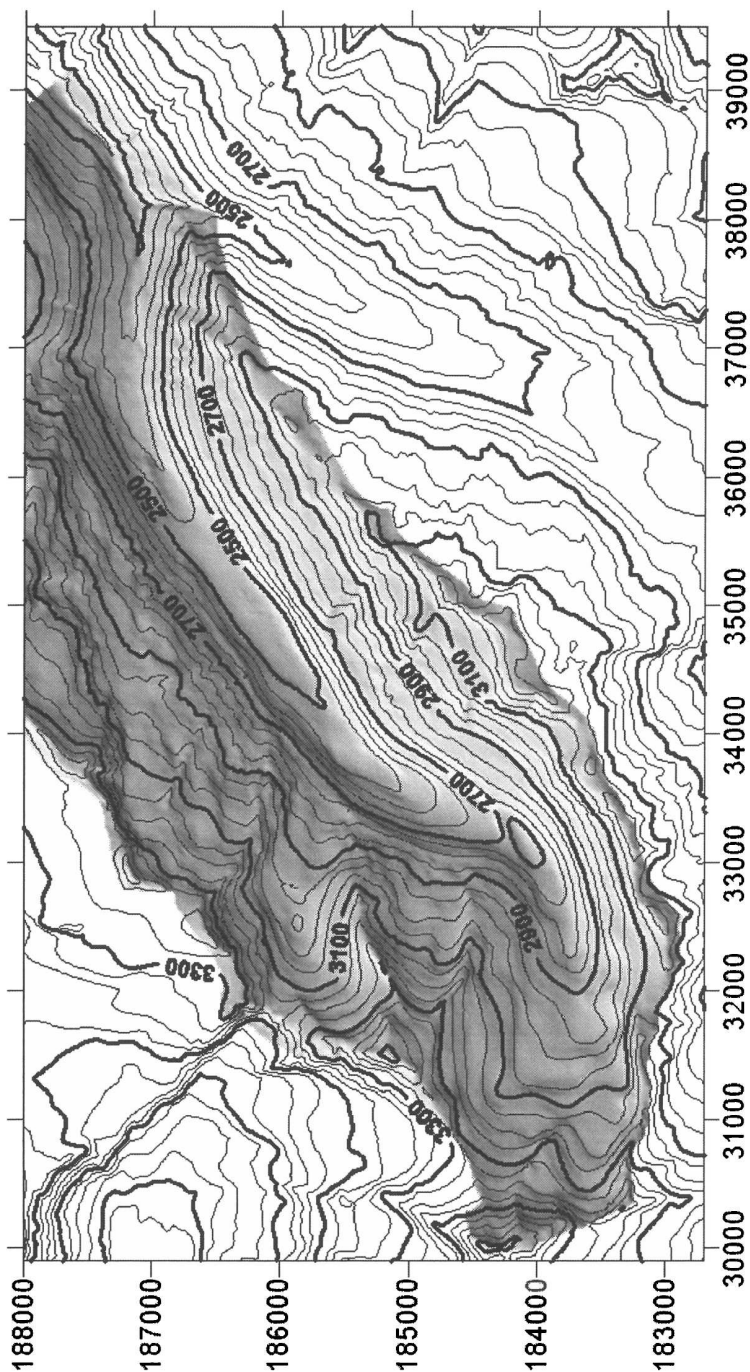


Abbildung 2.47. Berechnete Topographie des Gletscherbettes des Hintereisferners im grau schraffierten Bereich der Karte eingebettet in das Höhenmodell 1997.

Aus der Topographie des Gletscherbettes und den Oberflächenhöhen ergibt sich ein Eisvolumen von $0,5 \text{ km}^3$ [50].

2.5 Langtaufererjochferner

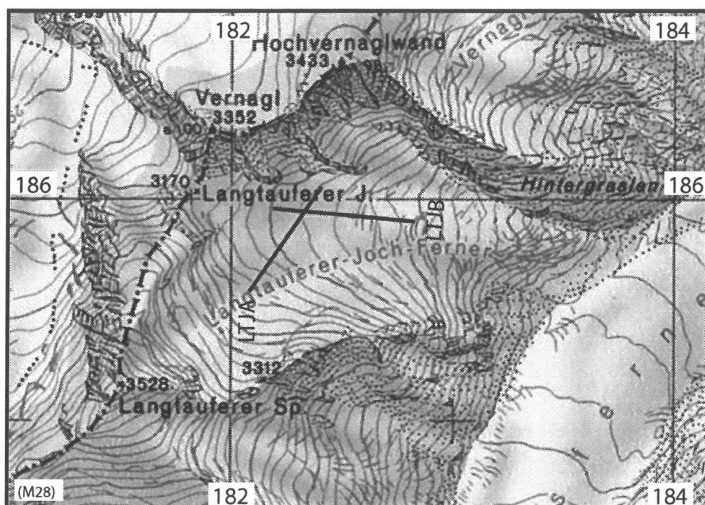


Abbildung 2.48. Karte des Langtaufererjochferners(Öztaler Alpen). Quelle: ÖK 1:50 000 BEV. Gletscherstand 1991.

Der Langtaufererjochferner ($46^{\circ} 48,7' N$, $10^{\circ} 45,6' O$) ist ein Seitengletscher des Hintereisferners, der mit diesem seit dem Jahr 2000 nicht mehr verbunden ist. Er hat eine Fläche von $1,5 \text{ km}^2$ und ist nach Osten bzw. Nordosten exponiert. Die im Jahr 1997 an 20 Stellen gemessenen Eisdicke betrug bis zu 120 m.

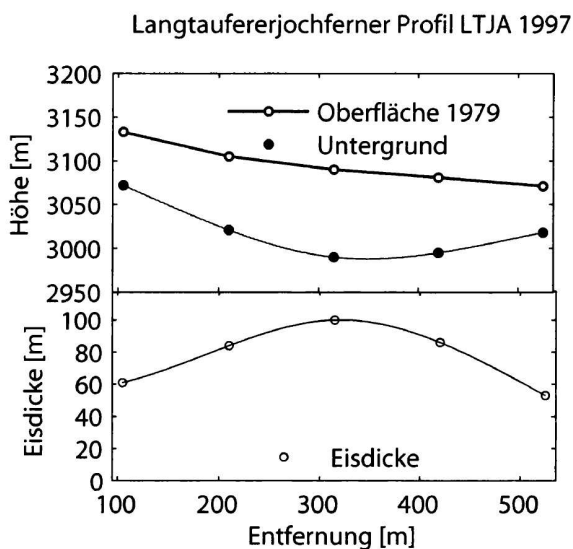


Abbildung 2.49. Gletscheroberfläche und Eisdicken entlang des Profils LTJA.

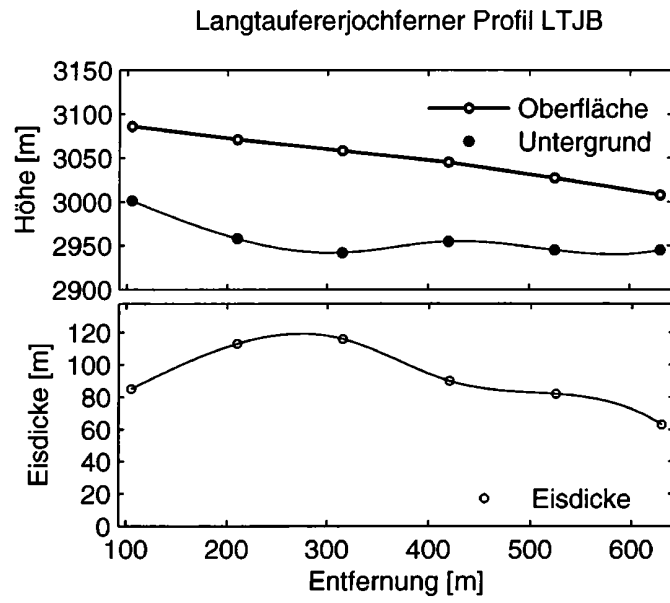


Abbildung 2.50. Gletscheroberfläche und Eisdicken entlang des Profils LTJB.

2.6 Kesselwandferner

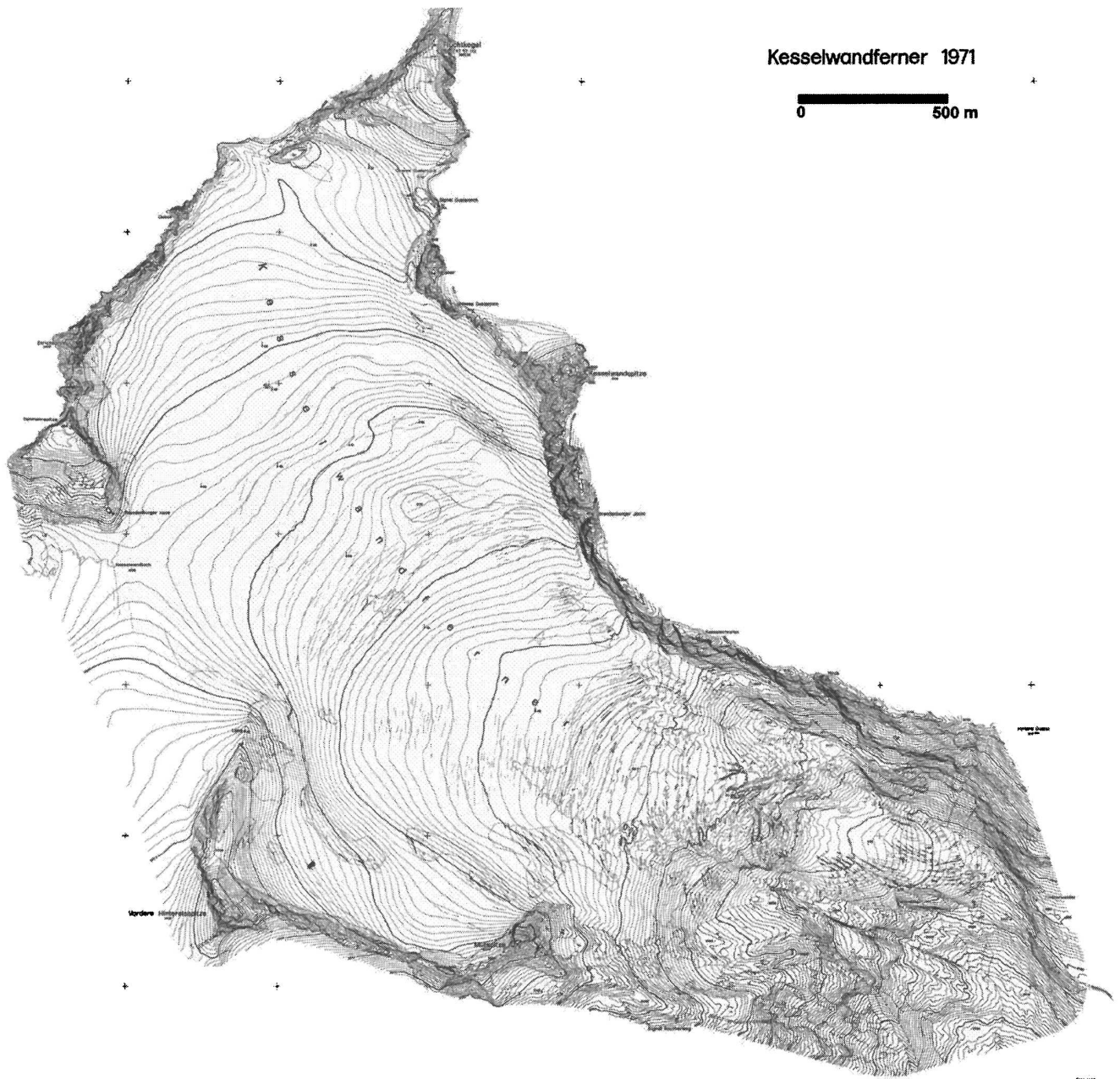


Abbildung 2.51. Karte des Kesselwandferners 1971 von Schneider [44].

Der Kesselwandferner ($46^{\circ} 50,3' \text{ N}$, $10^{\circ} 47,9' \text{ O}$) hatte 1971 eine Fläche von $4,2 \text{ km}^2$. Das große, flache Firnbecken hängt im Westen mit dem Akkumulationsgebiet des Gepatschferners zusammen. Die Zunge des Kesselwandferners fließt nach Südosten. Der Kesselwandferner war bis zum Jahr 1935 (mit einer kurzen Unterbrechung um 1914) mit dem Hintereisferner verbunden. Für den Kesselwandferner existieren zudem historische Geschwindigkeitsmessungen und reiches Kartenmaterial, das in [49] detailliert aufgeführt ist.

Von der Universität Innsbruck werden am Kesselwandferner jährliche Massenbilanzmessungen und Geschwindigkeitmessungen (ab 1965) vorgenommen. Diese Datenreihe ermöglichte die Modellierung des dynamischen Verhalten des Kesselwandferners [49] [50].

1997 wurde die Eisdicke mit dem Radarecholot an 213 Stellen gemessen. Ziel der Arbeiten war nicht nur die Berechnung des Volumens, sondern auch die Erstellung einer Karte des Gletscheruntergrundes als Datengrundlage für die Modellierung der Eisdynamik.

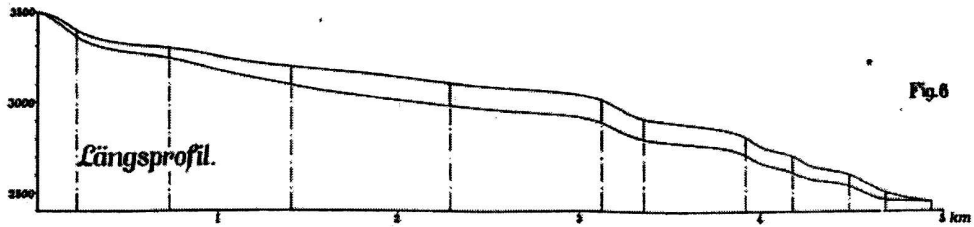


Abbildung 2.52. Von Hess 1924 berechnetes Längsprofil des Kesselwandferners [29].

2.6.1 Frühere Messungen und Berechnungen der Eisdicke

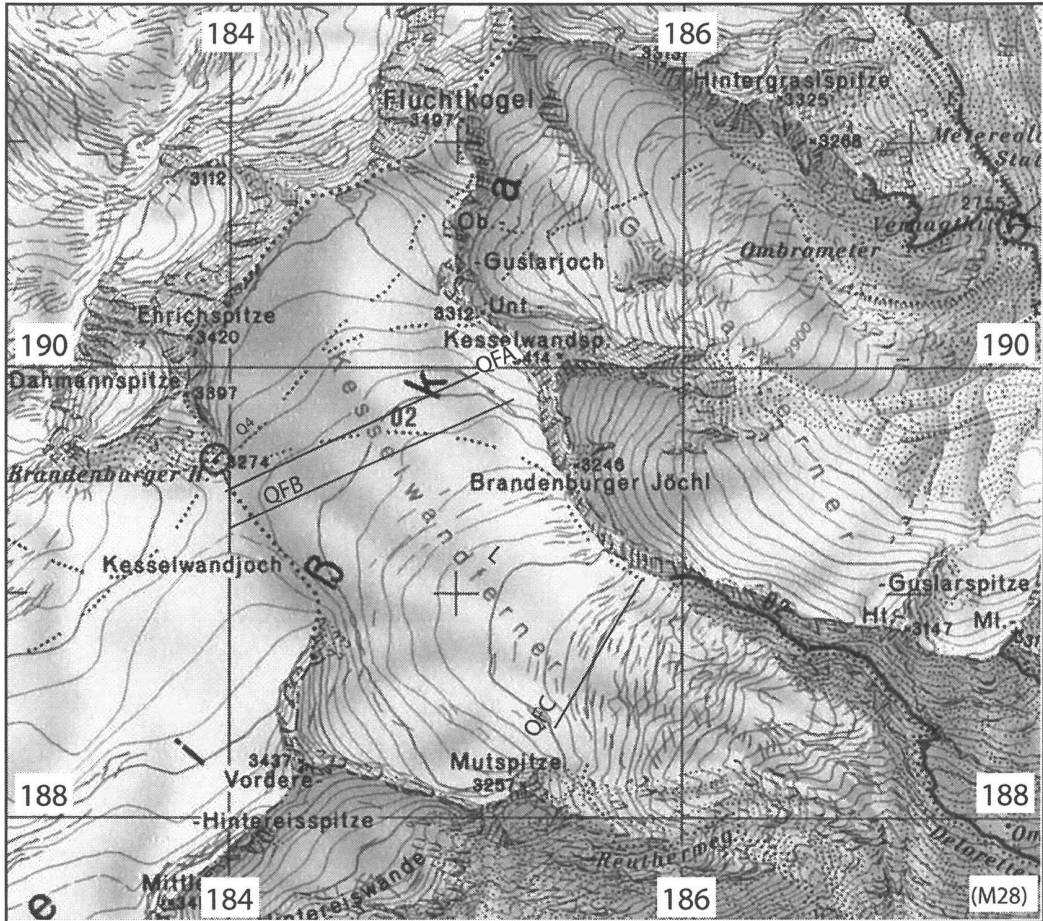


Abbildung 2.53. Karte des Kesselwandferners (Öztaler Alpen) mit Lage der Seismikprofile von Förtsch und Vidal [20], [21]. Quelle: ÖK 1:50000 BEV.

Die erste Abschätzung der Eistiefe des Kesselwandferners wurde von Hess im Jahr 1924 durchgeführt [29]. Dazu benutzte er die von Finsterwalder 1897 entwickelte stationäre Strömungstheorie und Annahmen über den Verlauf der Massenbilanz sowie über eine mittleren Geschwindigkeit durch einen Querschnitt. Damit wurde der in Abbildung 2.52 gezeigte Längsschnitt der Eisdicke berechnet. Die abgebildete Eisoberfläche wurde vermutlich aus der Karte von 1914 entnommen. Anders als beim Hintereisferner, wo die Eistiefe aus Bohrungen bekannt war, standen am Kesselwandferner keine direkten Messungen der Eisdicke zur Verfügung.

Die ersten seismischen Eisdickenmessungen wurden in den Jahren 1953/54 durch Förtsch und Vidal durchgeführt [20] [21]. Die Lage der damals gemessenen drei Querprofile ist in Abbildung 2.53 angeführt. Das Seismikprofil FA liegt nahe des Radarprofils B von 1995; das Seismikprofil FC deckt sich mit dem Radarprofil D von 1995.

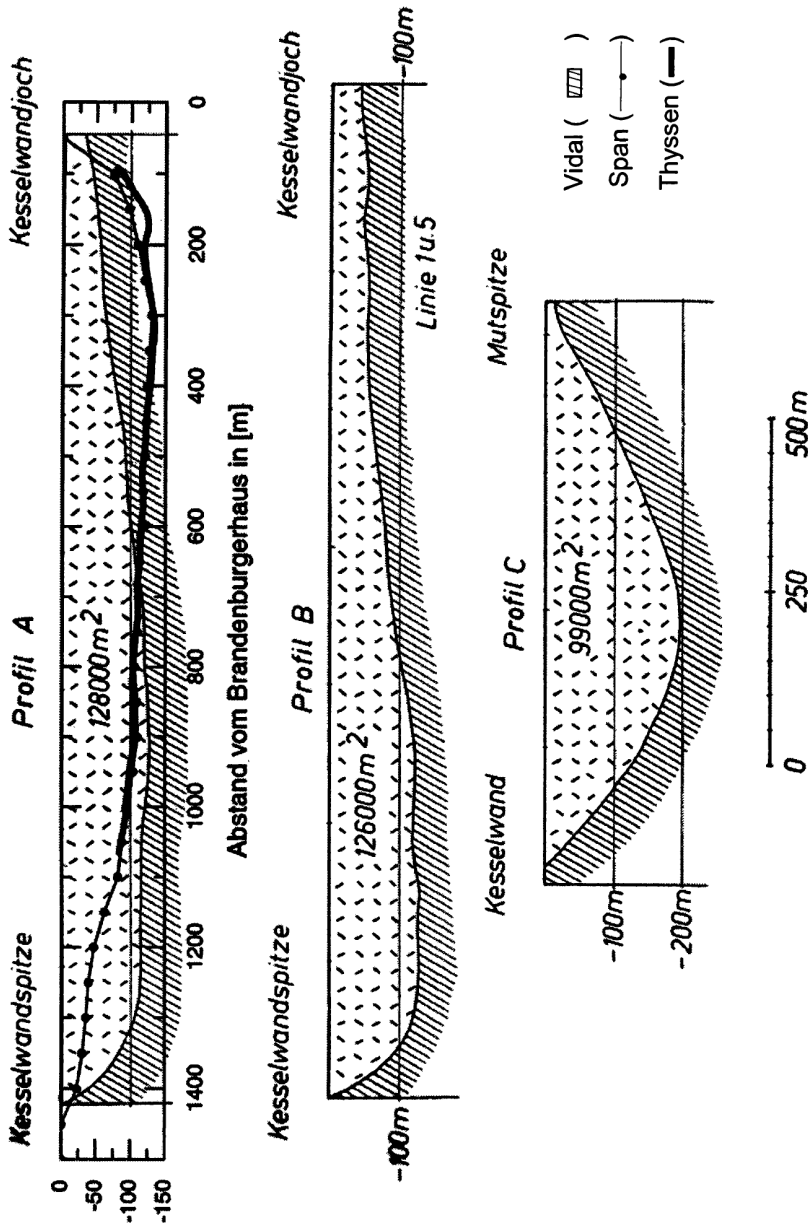


Abbildung 2.54. Ergebnisse der seismischen Eisdickenmessungen von Förtsch und Vidal 1955/56 [20] [21]. Im Profil A sind die von Vidal, Thyssen und Span ermittelten Eisdicken überlagert. Für diesen Vergleich wurde die Änderung der Oberflächenhöhe zwischen 1995 und 1955 berücksichtigt.

Im Jahr 1985 wurden von Thyssen die ersten Messungen mit Radarecholot durchgeführt. Die acht Querprofile und das Längsprofil liegen im Bereich des vom IMG I gemessenen B-Profiles und oberhalb davon (Abbildung 2.55).

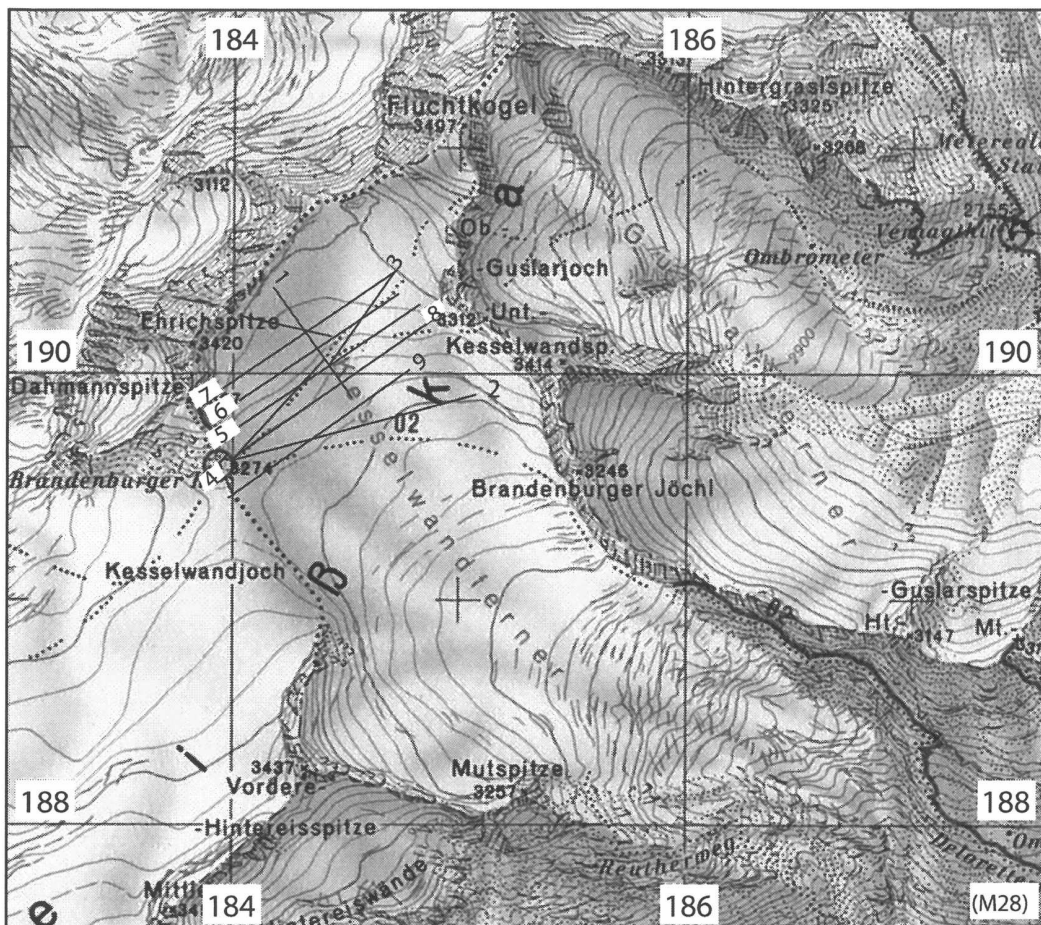


Abbildung 2.55. Karte des Kesselwandferners (Ötztaler Alpen) mit Lage der Radarprofile von Thyssen.
Quelle: ÖK 1:50000 BEV.

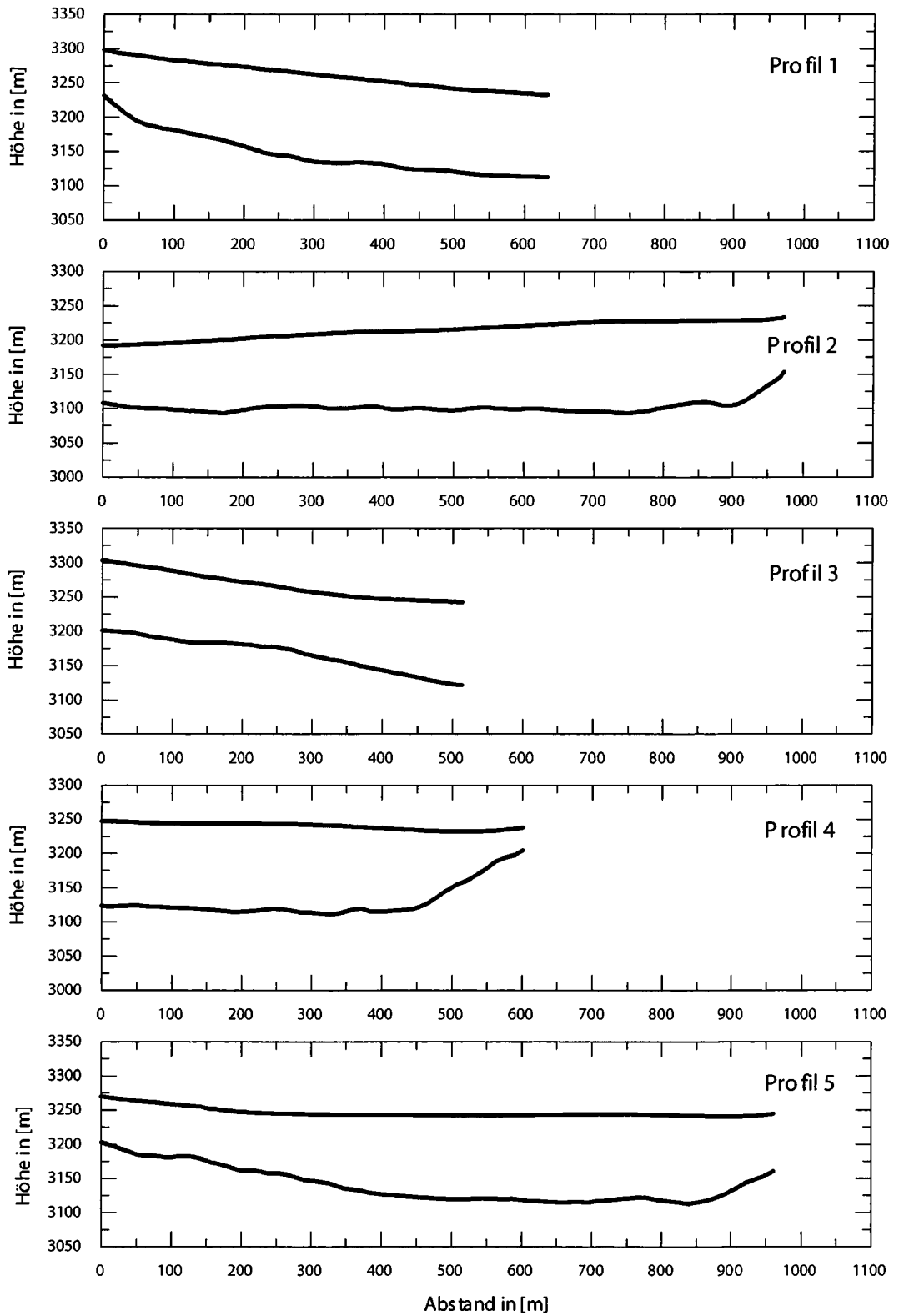


Abbildung 2.56. Von Thyssen 1985 gemessene Radarprofile 1 bis 5 (Zur Verfügung gestellt von Blindow, Münster).

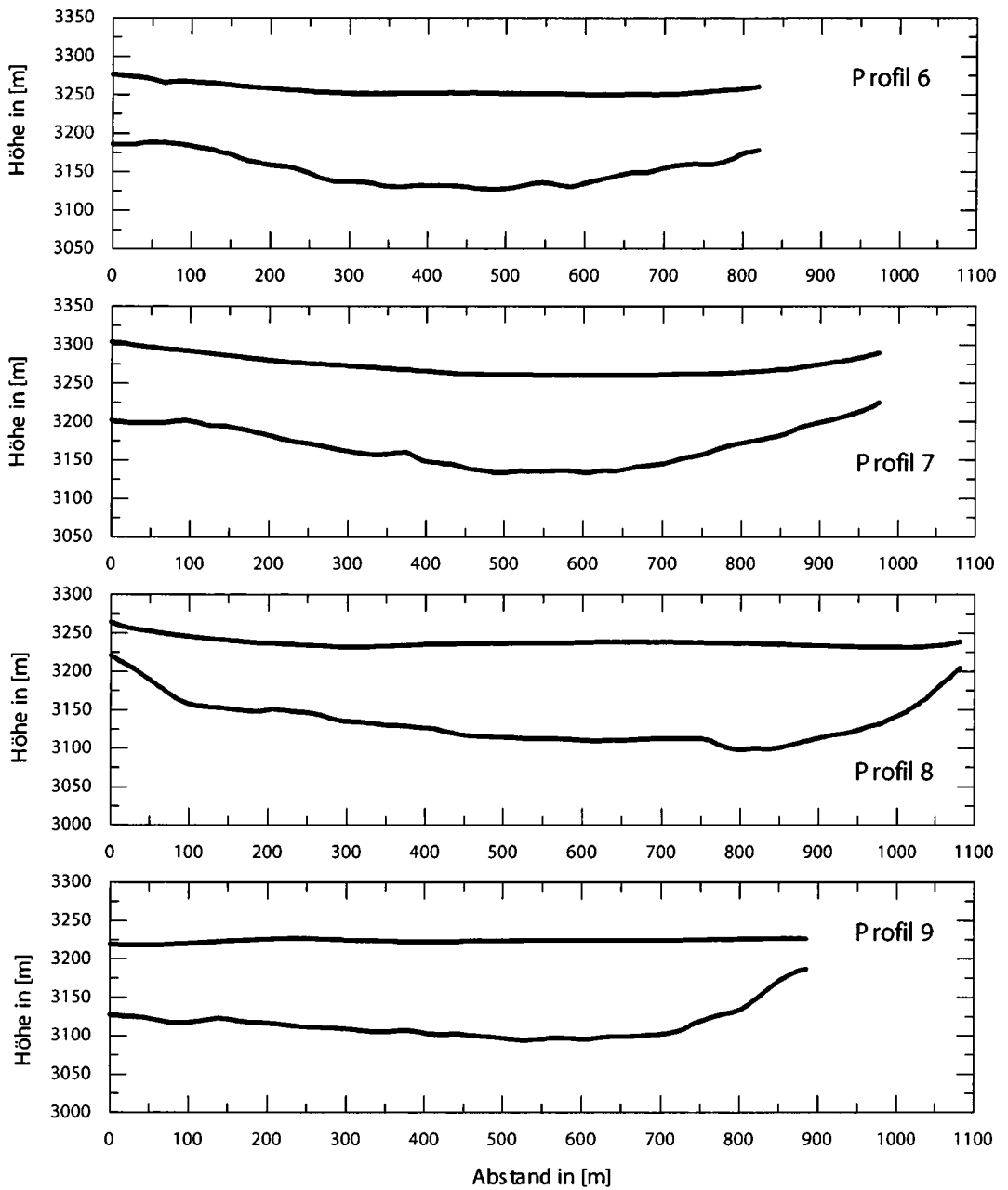


Abbildung 2.57. Von Thyssen 1985 gemessene Radarprofile 6 bis 9 (Zur Verfügung gestellt von Blindow, Münster).

2.6.2 Ergebnisse der Eisdickenmessungen 1995

Im Jahr 1995 wurde die Eisdicke des am Kesselwandferners an 213 Stellen gemessen [49].

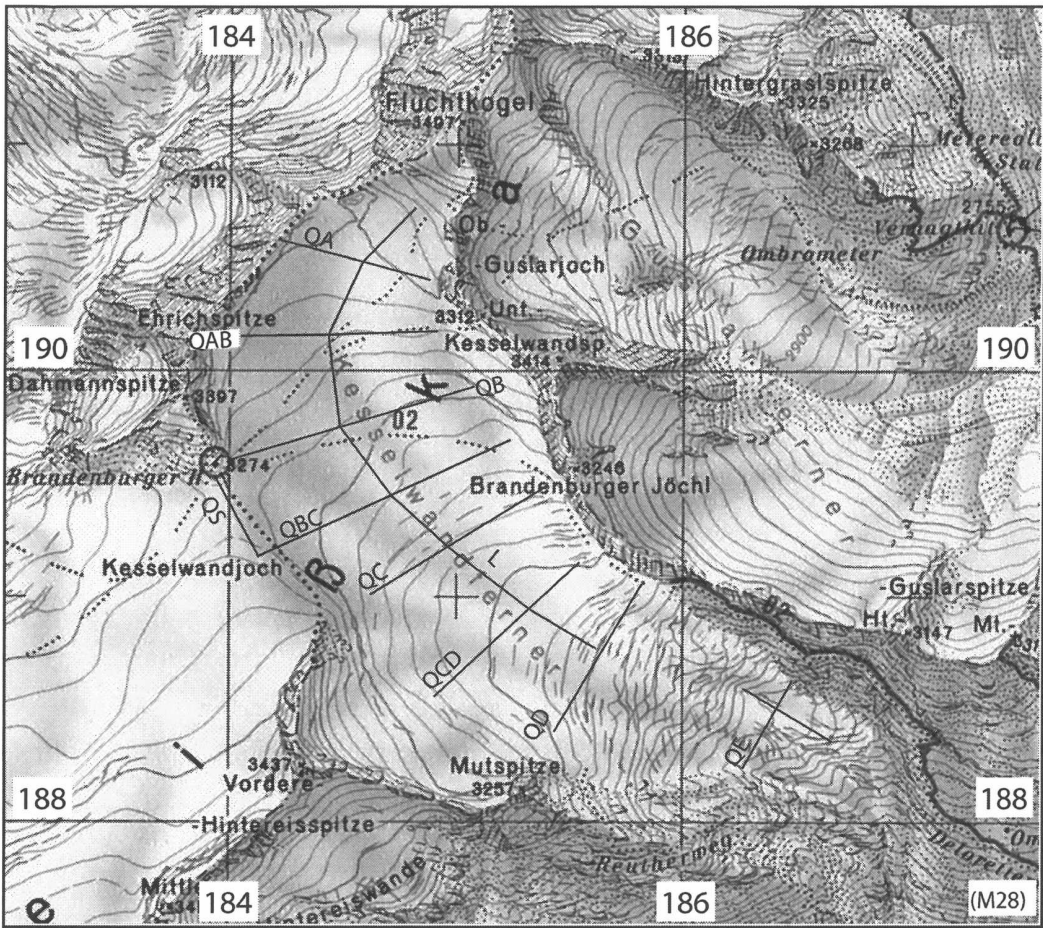


Abbildung 2.58. Karte des Kesselwandferners (Ötztaler Alpen) mit Lage der Radarprofile des IMGI [49]. Quelle: ÖK 1:50000 BEV.

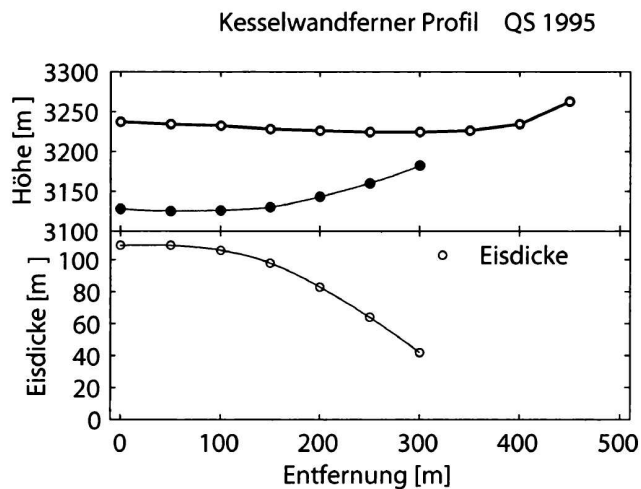


Abbildung 2.59. Gletscheroberfläche 1971 und Eisdicken 1995 entlang des Profiles QS.

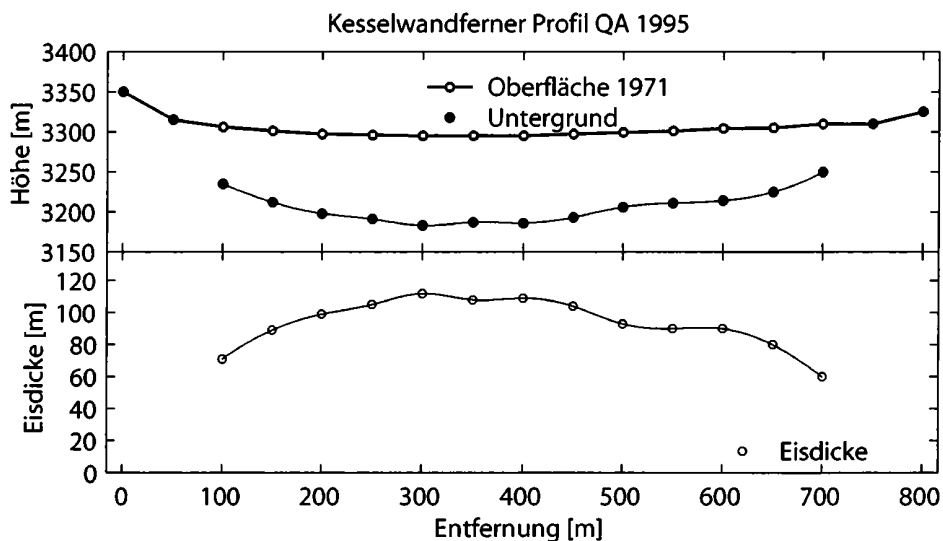


Abbildung 2.60. Gletscheroberfläche 1971 und Eisdicken 1995 entlang des Profiles QA.

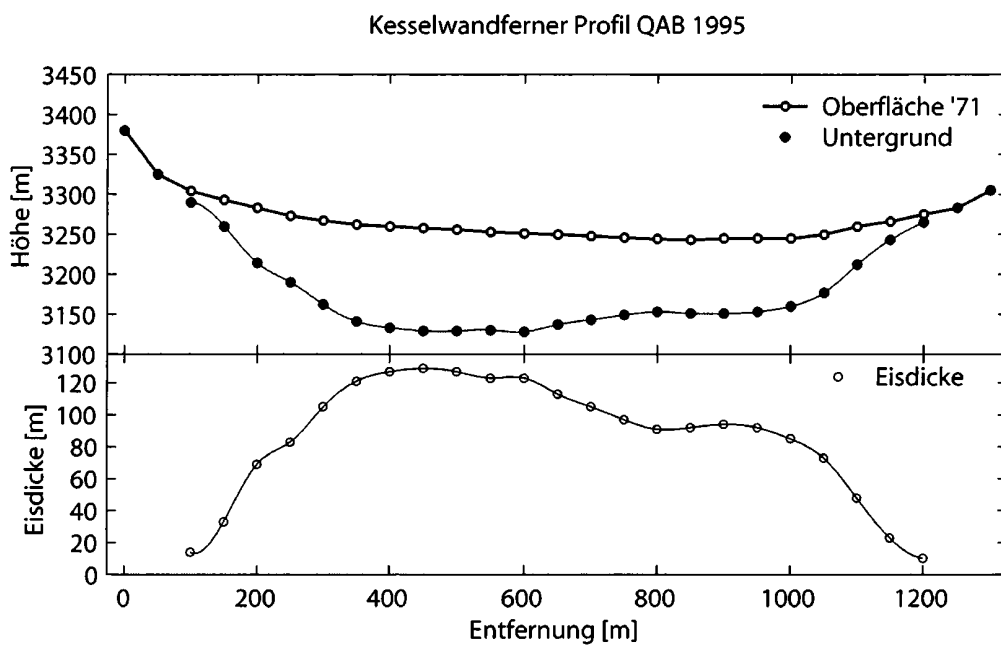


Abbildung 2.61. Gletscheroberfläche 1971 und Eisdicken 1995 entlang des Profiles QAB.

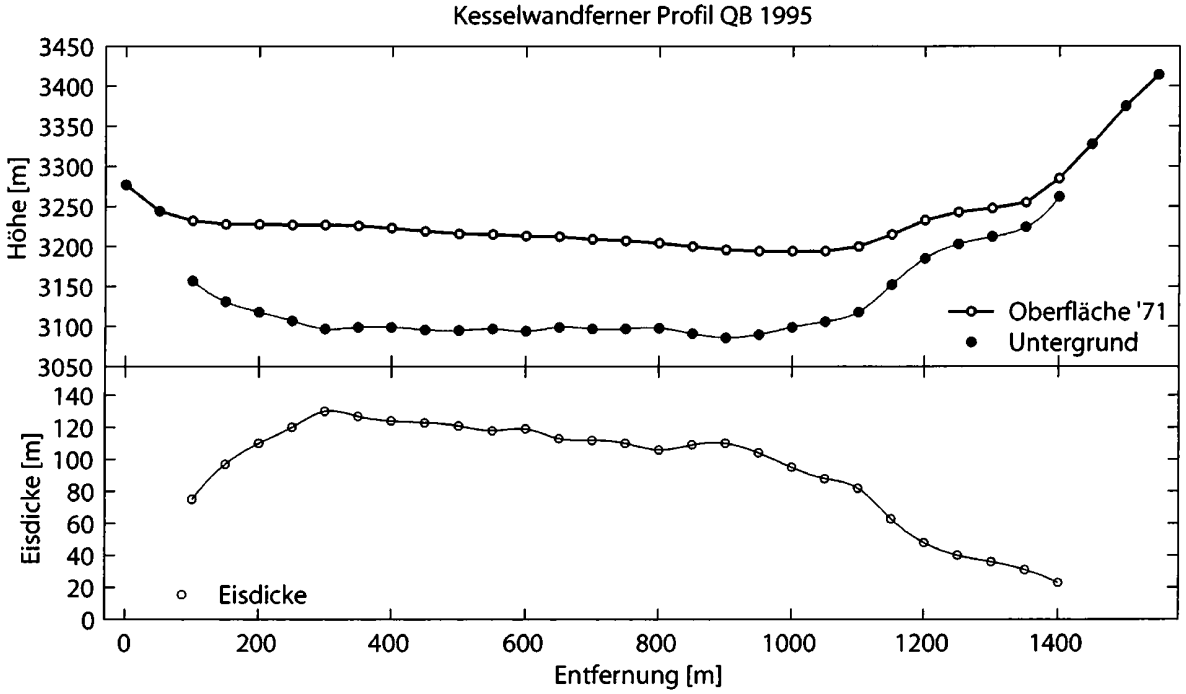


Abbildung 2.62. Gletscheroberfläche 1971 und Eisdicken 1995 entlang des Profiles QB.

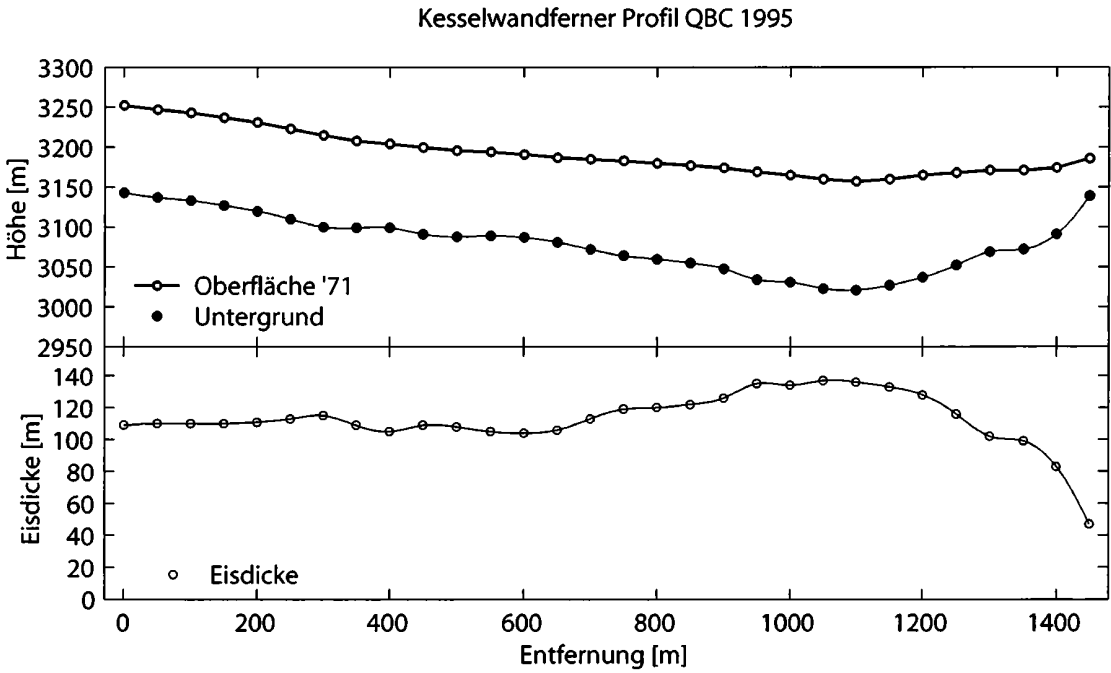


Abbildung 2.63. Gletscheroberfläche 1971 und Eisdicken 1995 entlang des Profiles QBC.

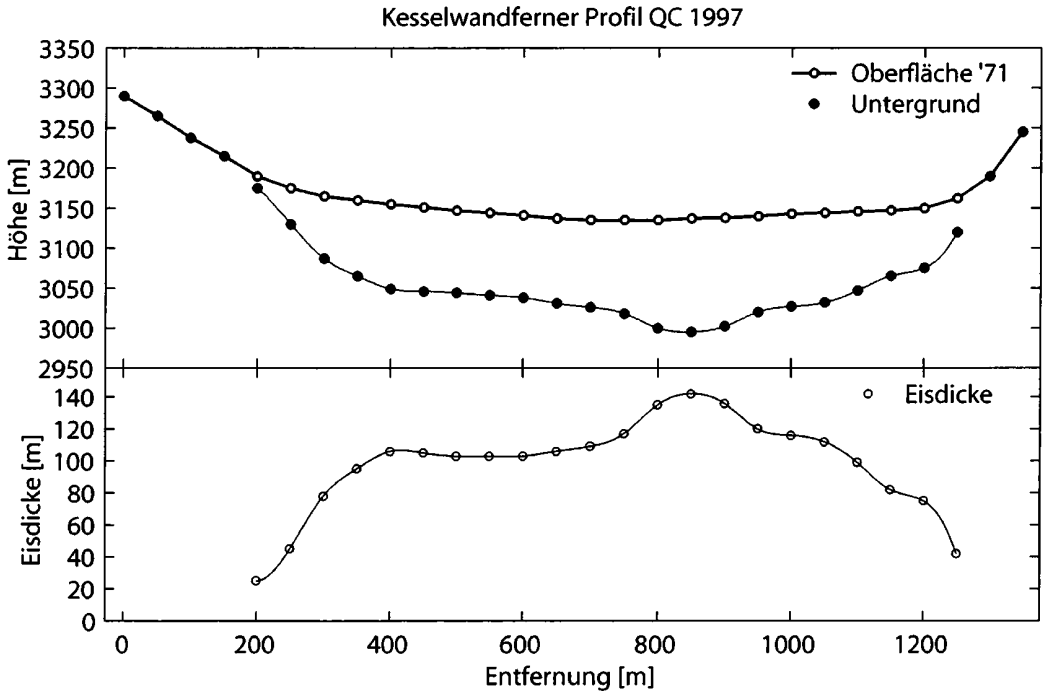


Abbildung 2.64. Gletscheroberfläche 1971 und Eisdicken 1995 entlang des Profils QC.

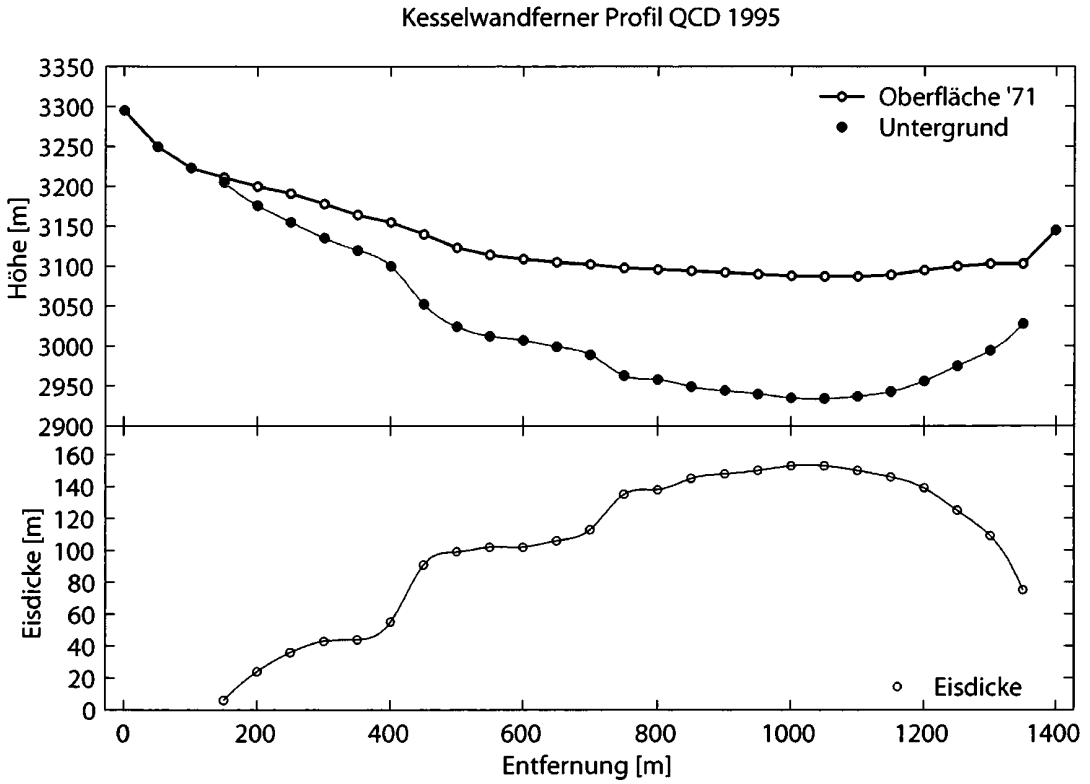


Abbildung 2.65. Gletscheroberfläche 1971 und Eisdicken 1995 entlang des Profils QCD.

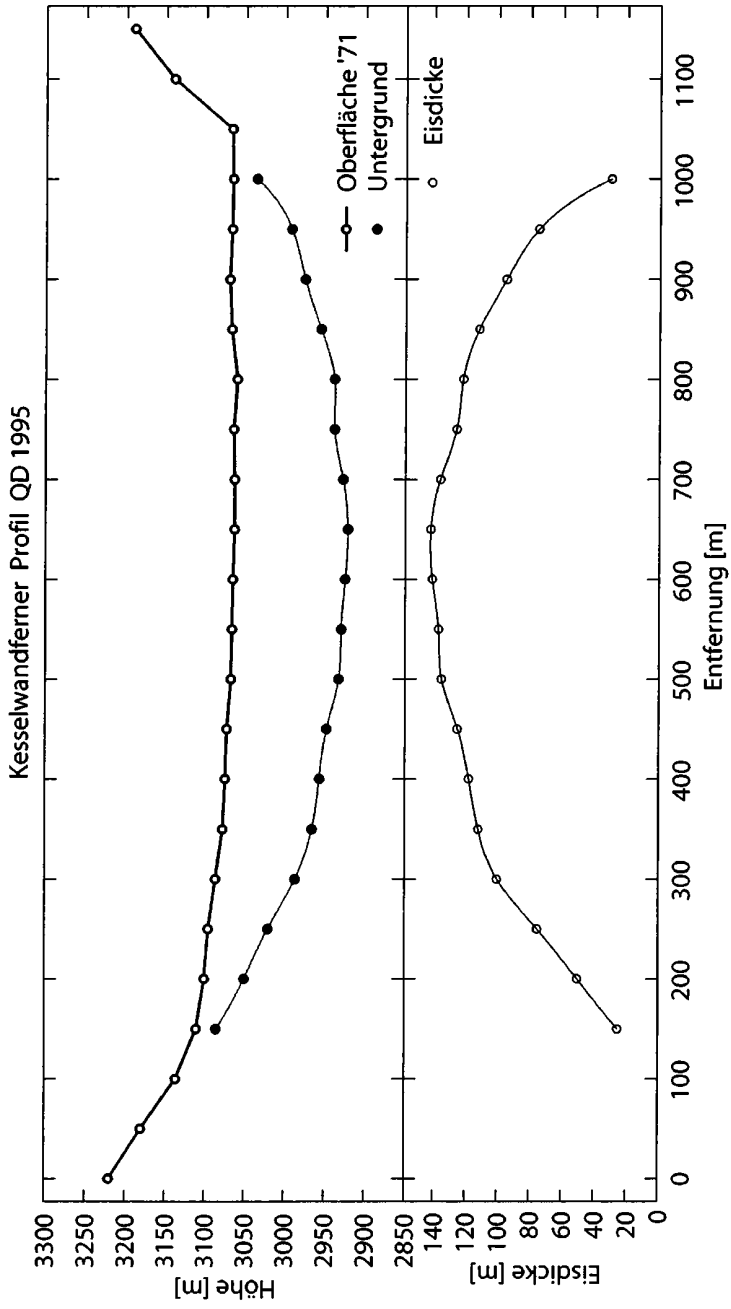


Abbildung 2.66. Gletscheroberfläche 1971 und Eisdicken 1995 entlang des Profiles QD.

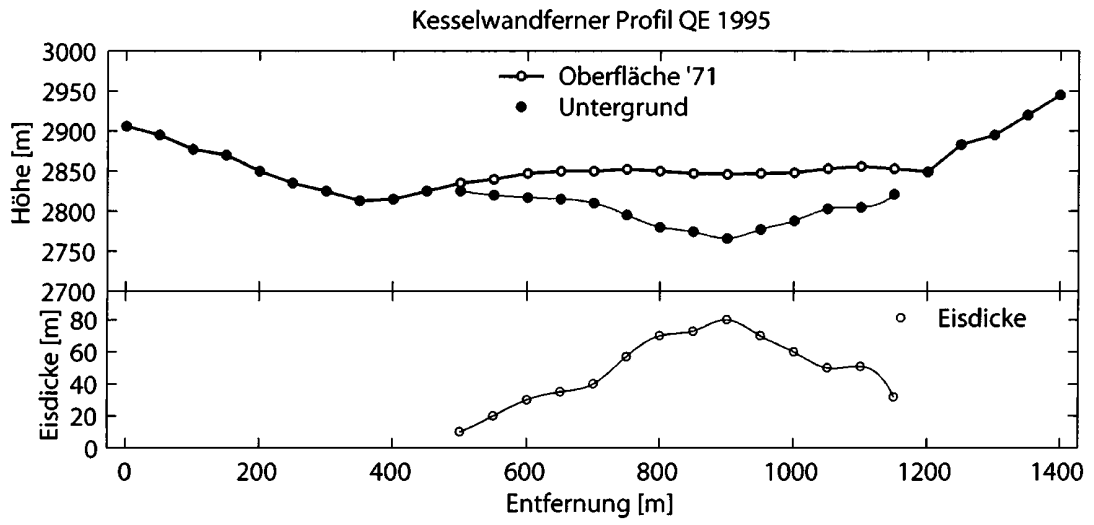


Abbildung 2.67. Gletscheroberfläche 1971 und Eisdicken 1995 entlang des Profils QE.

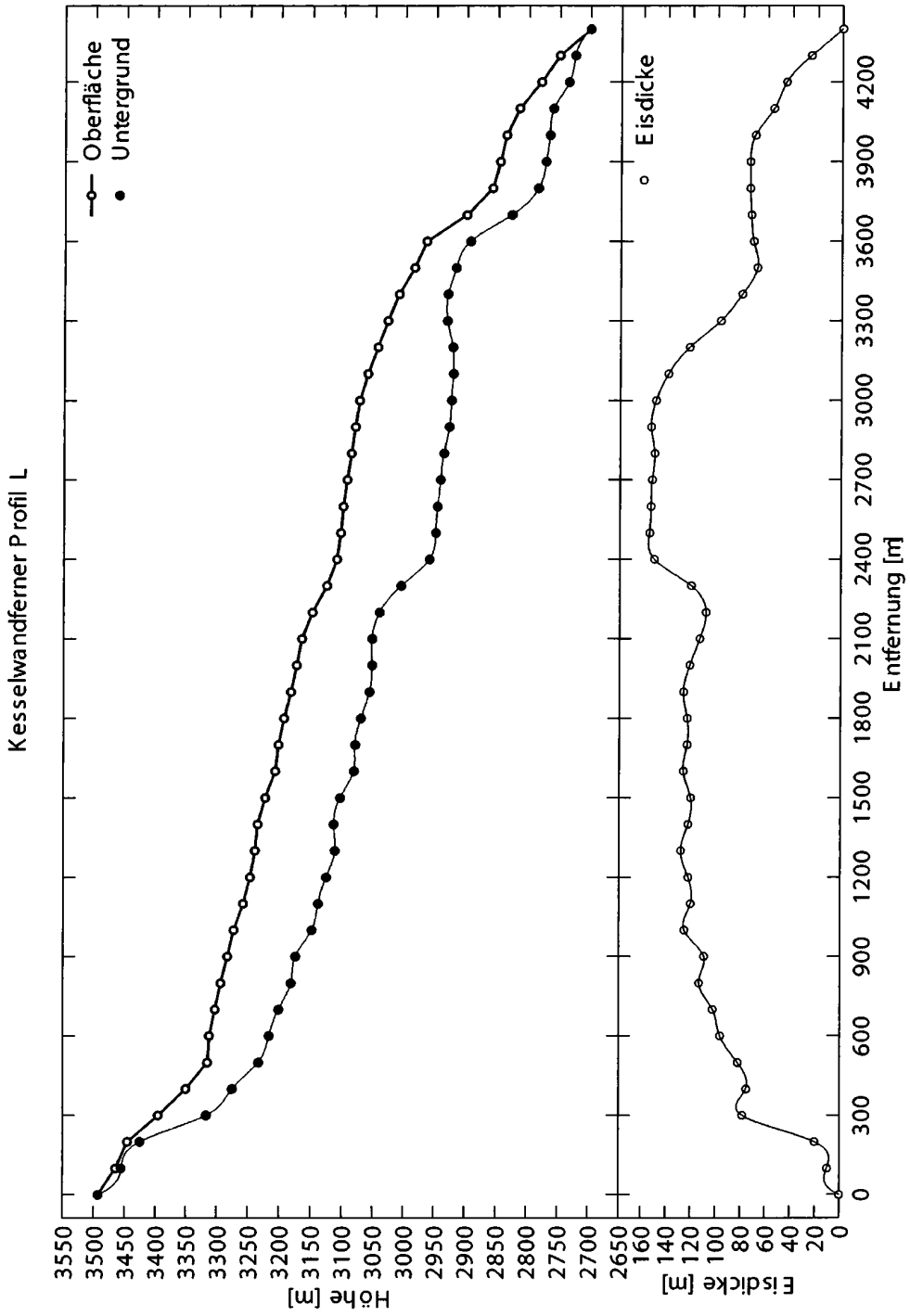


Abbildung 2.68. Gletscheroberfläche 1971 und Eisdicken 1995 entlang des Längsprofils L.

2.6.3 Vergleich der Eisdicken 1924, 1955, 1985 und 1995

Die Übereinstimmung der von Thyssen ermittelten Eistiefen mit den 1995 gemessenen ist gut. Im Bereich der sehr steil abfallenden Felswände unterhalb des Brandenburgerhauses gibt es eine Differenz von etwa 20 m. Diese Differenz erklärt sich aus Unterschieden in der Messdichte: Während Thyssen alle zwei Meter eine Messung durchführt, waren die Messpunkte von Span 20 m voneinander entfernt. Durch die höhere Messdichte von Thyssen ist auch eine bessere Datengrundlage für die Migration des tatsächlichen Untergrunds vorhanden. Die Profile von Thyssen dürften in diesem Bereich den wirkliche Verlauf des Untergrundes besser wiedergeben [49]. Bei den seismischen Messungen von Förtsch und Vidal zeigt nur das Profil QFA gute Übereinstimmung mit dem Radarprofil QB von 1995. Das Profil QFB ist im Vergleich zu den Radarmessungen 1995 spiegelverkehrt [20] (Abbildung 2.54). Im Bereich des Profile QD bzw. QFC scheint die Tiefe um etwa 50 Meter überschätzt [49]. Die von Hess berechneten Eistiefen sind im Mittel um etwa 30 bis 40 Meter zu klein.

2.6.4 Rekonstruktion des Gletscheruntergrunds

Die Karte des Gletscheruntergrunds wurde auf Basis der Eistiefenmessungen von 1995 und der Karte des Kesselwandferners 1971 [44] erstellt. Der Höhenunterschied zwischen der Oberfläche von 1971 und der Oberfläche von 1995 beträgt in allen Profilen außer dem E-Profil weniger als 3 m. Die Isolinien des Untergrunds wurden händisch gezeichnet und mit einem Gitterpunktabstand von 15 m in ein Höhenmodell umgewandelt [49].

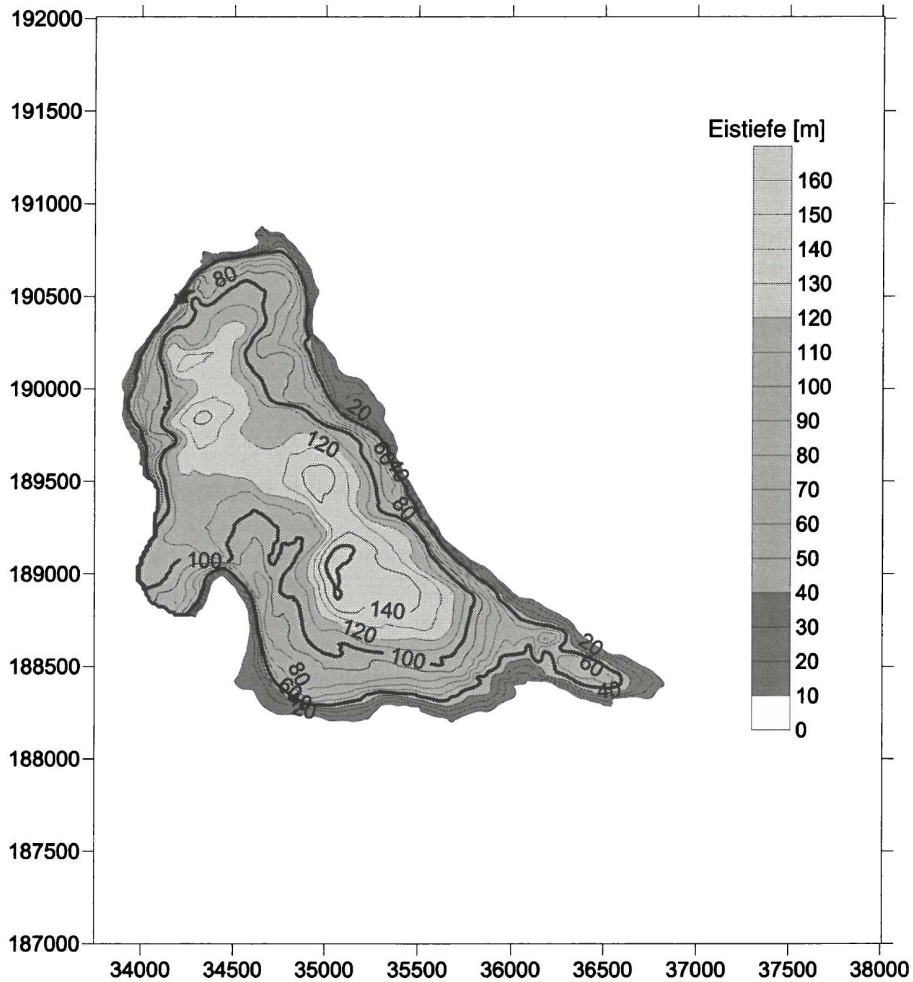


Abbildung 2.69. Eistiefe am Kesselwandferner nach [49].

Aus der Topographie des Gletscherbettes und den Oberflächenhöhen ergibt sich ein Eisvolumen von $0,3 \text{ km}^3$ [50].



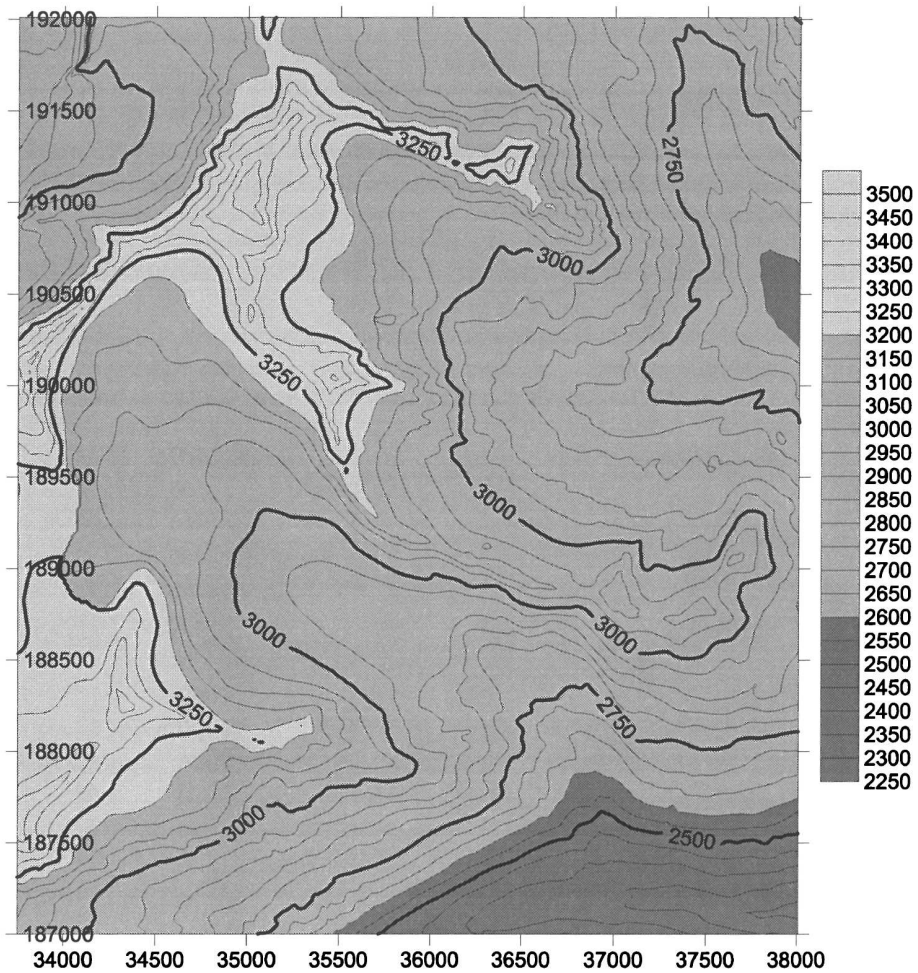


Abbildung 2.70. Gletscherbett des Kesselwandferners nach [49] eingepaßt in das Höhenmodell 1997

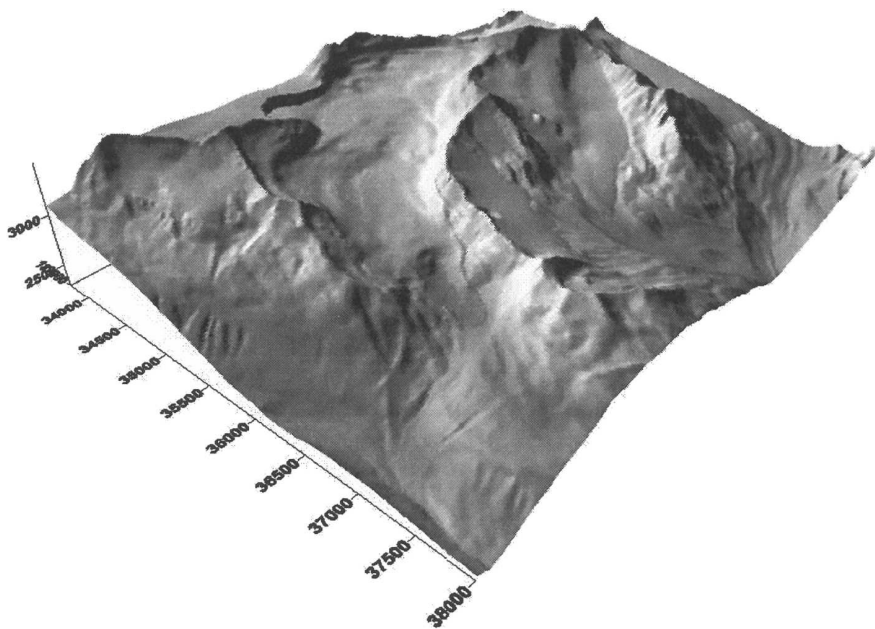


Abbildung 2.71. Perspektivische Darstellung des Gletscherbetts des Kesselwandferners eingepaßt in das Höhenmodell 1997 nach [49].

2.7 Hochjochferner

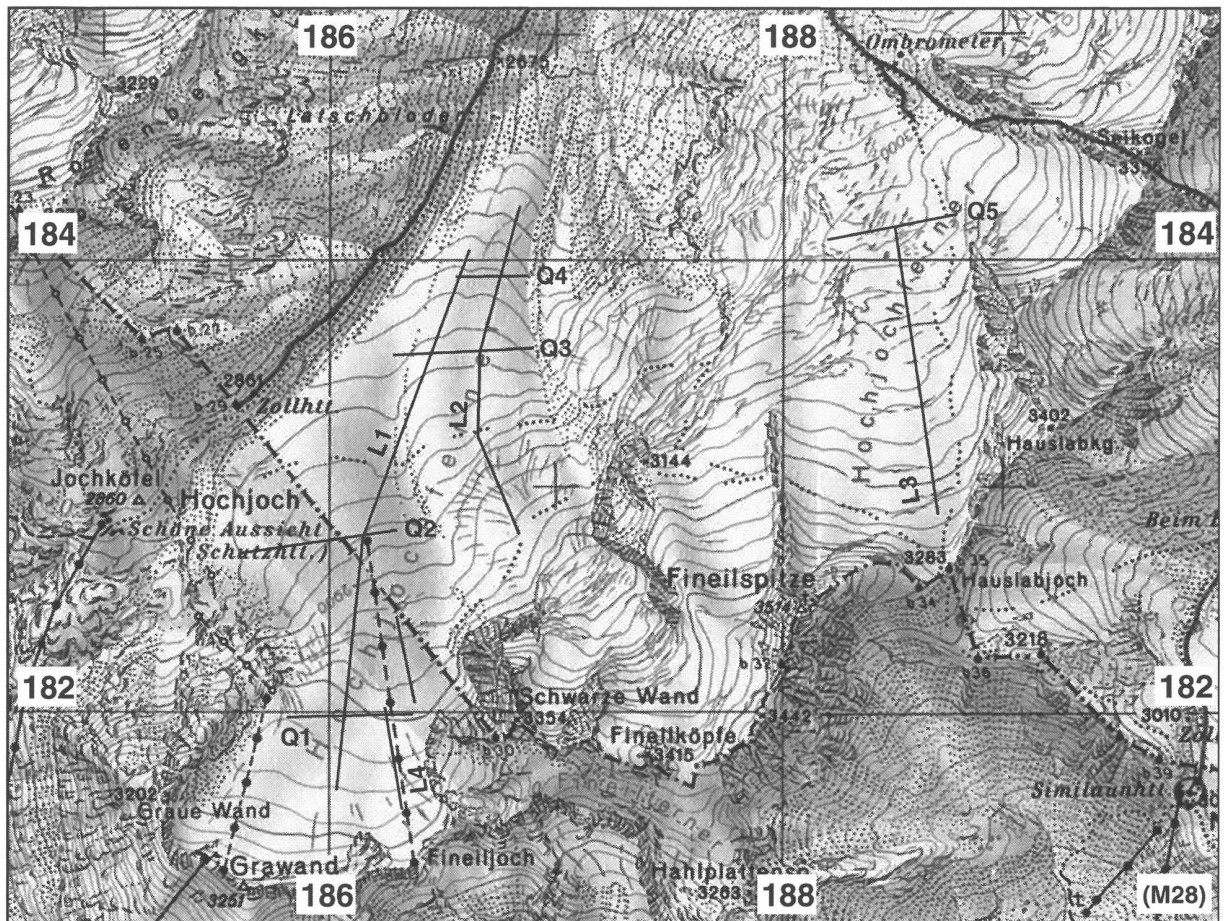


Abbildung 2.72. Karte des Hochjochferners (Ötztaler Alpen). Quelle: ÖK 1:50000 BEV. Gletscherstand 1991.

Der Hochjochferner ($46^{\circ} 47,4' N$, $10^{\circ} 49,4' O$) befindet sich zum Teil in Südtirol, zum Teil in Österreich. Die südtiroler Seite des Hochjochferners wird für ein Gletscherschigebiet genutzt. Die Gesamtfläche des Gletschers beträgt $6,7 \text{ km}^2$ (1997). Bei den Radarmessungen 1997 wurde die Eisdicke an 105 Stellen gemessen. Der Untergrund und die Eisdicke des Hochjochferners wurde von A. Lambrecht (Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck) im Rahmen des Projektes Omega berechnet (Abbildungen 2.82 und 2.83).

Durch den starken Rückgang des Hochjochferners nach 1850 gibt es heute einen südlichen und einen nördlichen Teilgletscher. Diese Teilgletscher hatten um 1850 noch eine gemeinsame Zunge, die, wie auch der Hintereisferner, bis zum alten Hochjochhospiz reichte. Heute hängen die Teilgletscher an nur mehr wenigen Stellen im Firngebiet zusammen. Der südliche Teil des Hochjochferners besteht aus zwei Hauptzungen, die durch eine Mittelmoräne getrennt sind. In diesem flachen, spaltenarmen Teil des Gletschers wurden die Längsprofile L1 und L4 sowie zwei Querprofile gemessen. Die orographisch rechte Hauptzungen entwässert nach Norden. Sie ist zwischen dem relativ flachen Firnbecken unterhalb der Fineilspitze und der Schwarzen Wand und der relativ flachen Zunge sehr spaltig, sodass in diesem Bereich keine Radarmessungen durchgeführt werden können. Das Längsprofil L2 wurde unterhalb dieses Eisbruches begonnen und bis zum Ende der nach der österreichischen Seite abfließenden Zunge fortgeführt. In tieferen Bereichen dieses Teils des Gletschers wurden zwei Querprofile, Q1 und Q2, gemessen.

Der nördliche Teil weist nur mehr schwach ausgeprägte Zungen auf. Er ist relativ flach und endet oberhalb einer Geländestufe. In diesem Bereich wurde das Längsprofil L3 und das Querprofil Q5 gemessen.

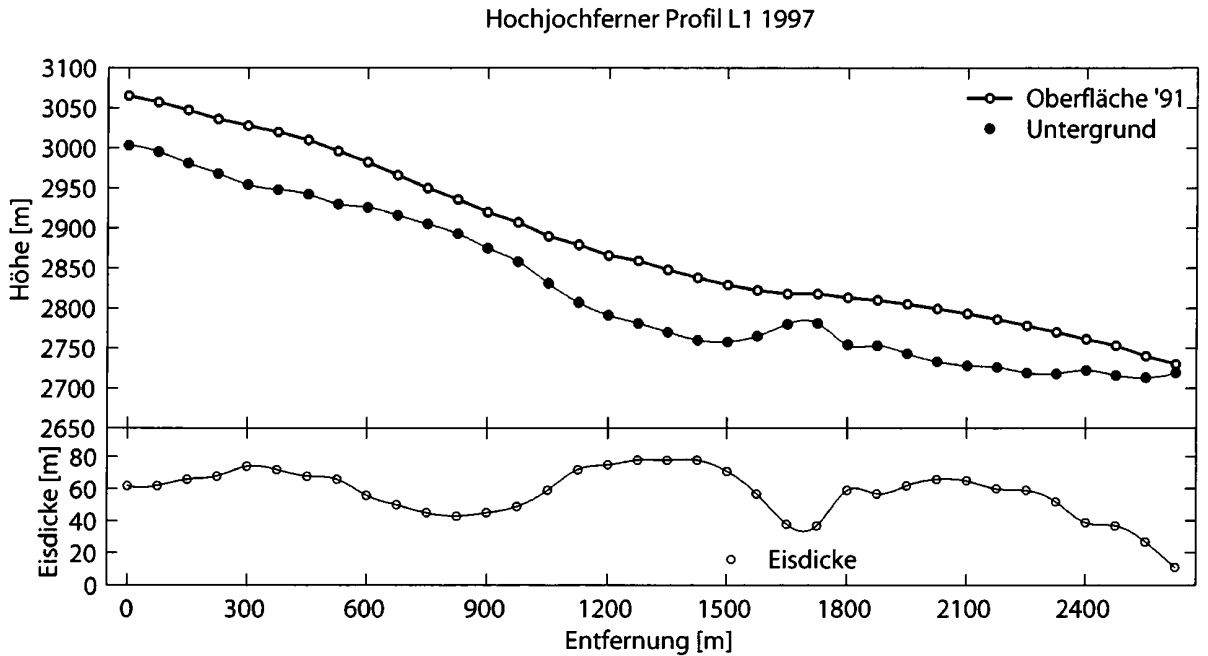


Abbildung 2.73. Gletscheroberfläche 1991 und Eisdicken entlang des Profils L1.

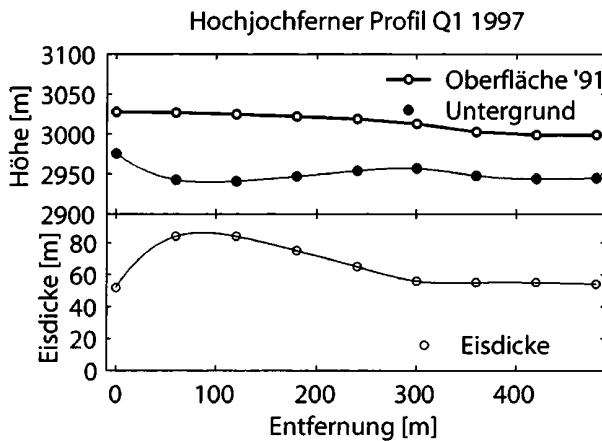


Abbildung 2.74. Gletscheroberfläche 1991 und Eisdicken entlang des Profils Q1.

Das Längsprofil L1 zeigt im oberen, flachen Teil Eisdicken zwischen 60 und 80 m, die gegen den rechten Rand hin (mit einem Minimum an der Mittelmoräne) abnehmen. Im Gebiet der orographisch rechten Hauptzunge nimmt die Eisdicke wieder auf etwas über 60 m zu. Das Querprofil Q2 zeigt dass die Eisdicken in der orographisch linken Hauptzunge nach dem Rand hin rasch abnehmen, die maximale Tiefe im zentralen Teil mit etwa 80 m konstant bleibt. Diese maximale Tiefe wird auch schon im oberen Bereich dieses Teils des Gletscher auf ca. 3000 Metern im orographisch linken Hauptteil erreicht. Das Längsprofil L2 zeigt eine deutliche Übertiefung mit einer maximalen Eisdicke von etwa 80 m im Bereich des flachen Bodens, wo jetzt das Zungenende liegt. Auch im südlichen Teil des Gletschers ist das Eis noch bis zu 100 m dick. Die Eistiefen nehmen nach einem Maximum in einer Höhe von 3100 m auf etwa 60 m am unteren Ende des Profils ab. Wie aus dem Profil Q5 ersichtlich ist, nimmt die Eisdicke gegen den Rand des Gletschers zu rasch auf 40 m ab.

Hochjochferner Profil L4 1997

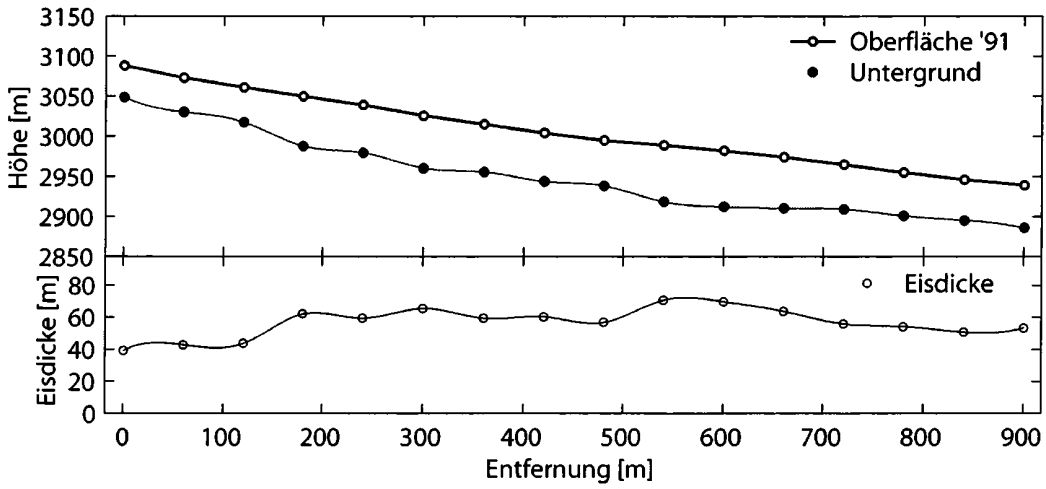


Abbildung 2.75. Gletscheroberfläche 1991 und Eisdicken entlang des Profils Profils L4

Hochjochferner Profil Q2 1997

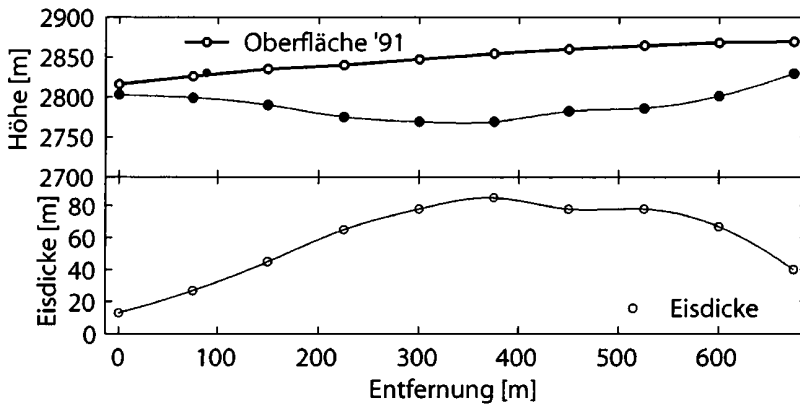


Abbildung 2.76. Gletscheroberfläche 1991 und Eisdicken entlang des Profils Q2.

Hochjochferner Profil L2 1997

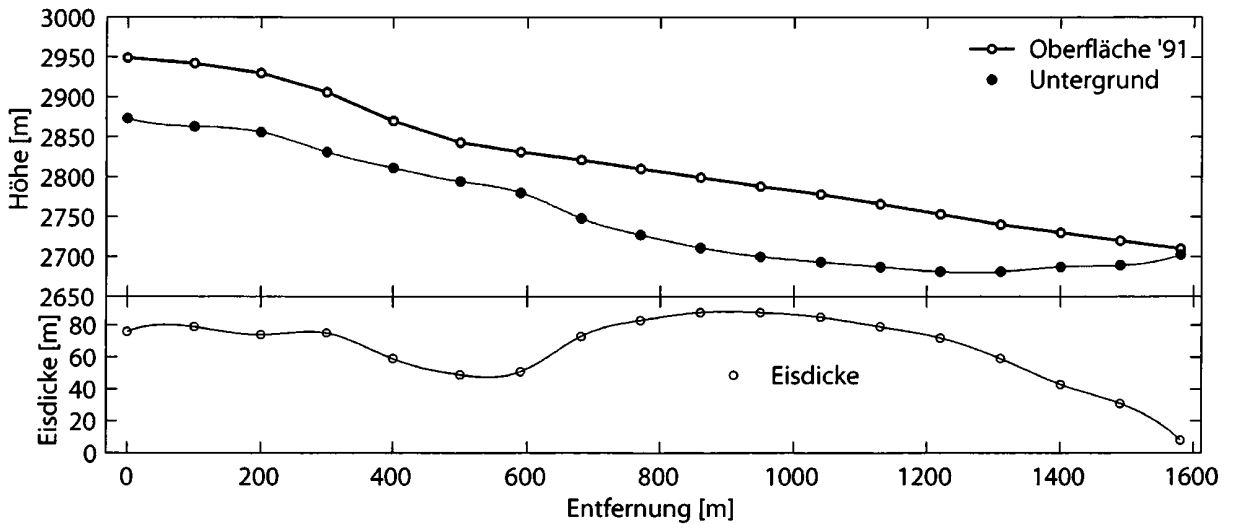


Abbildung 2.77. Gletscheroberfläche 1991 und Eisdicken entlang des Profils L2.

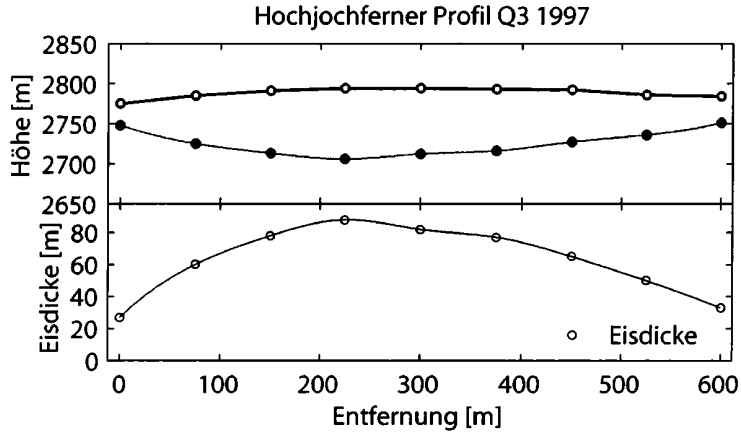


Abbildung 2.78. Gletscheroberfläche 1991 und Eisdicken entlang des Profils Q3.

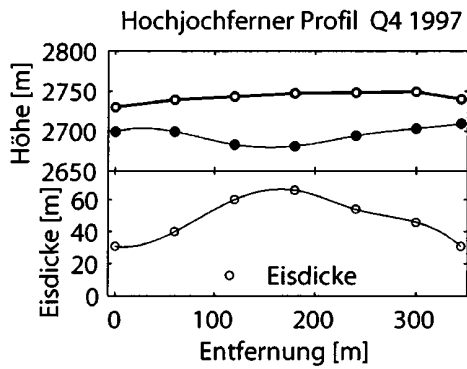


Abbildung 2.79. Gletscheroberfläche 1991 und Eisdicken entlang des Profils Q4.

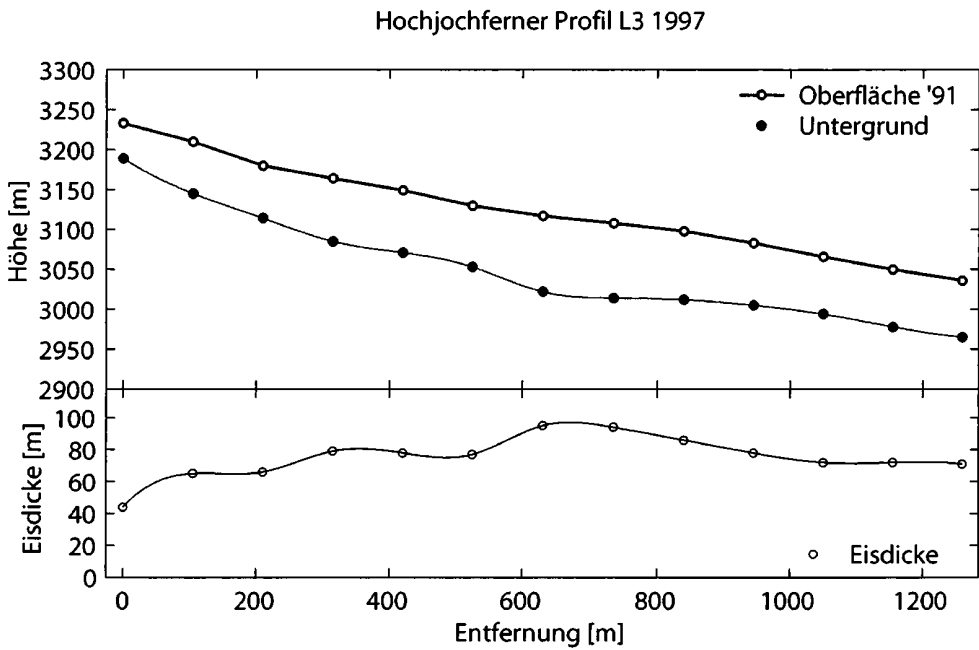


Abbildung 2.80. Gletscheroberfläche 1991 und Eisdicken entlang des Profils L3.

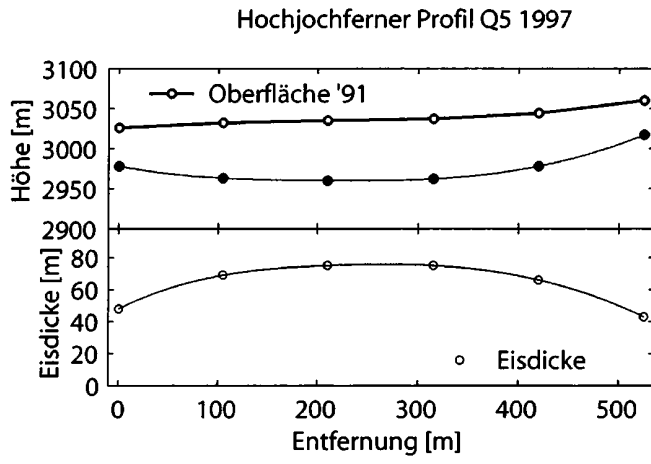


Abbildung 2.81. Gletscheroberfläche 1991 und Eisdicken entlang des Profils Q5.

Untergrund des Hochjochferners

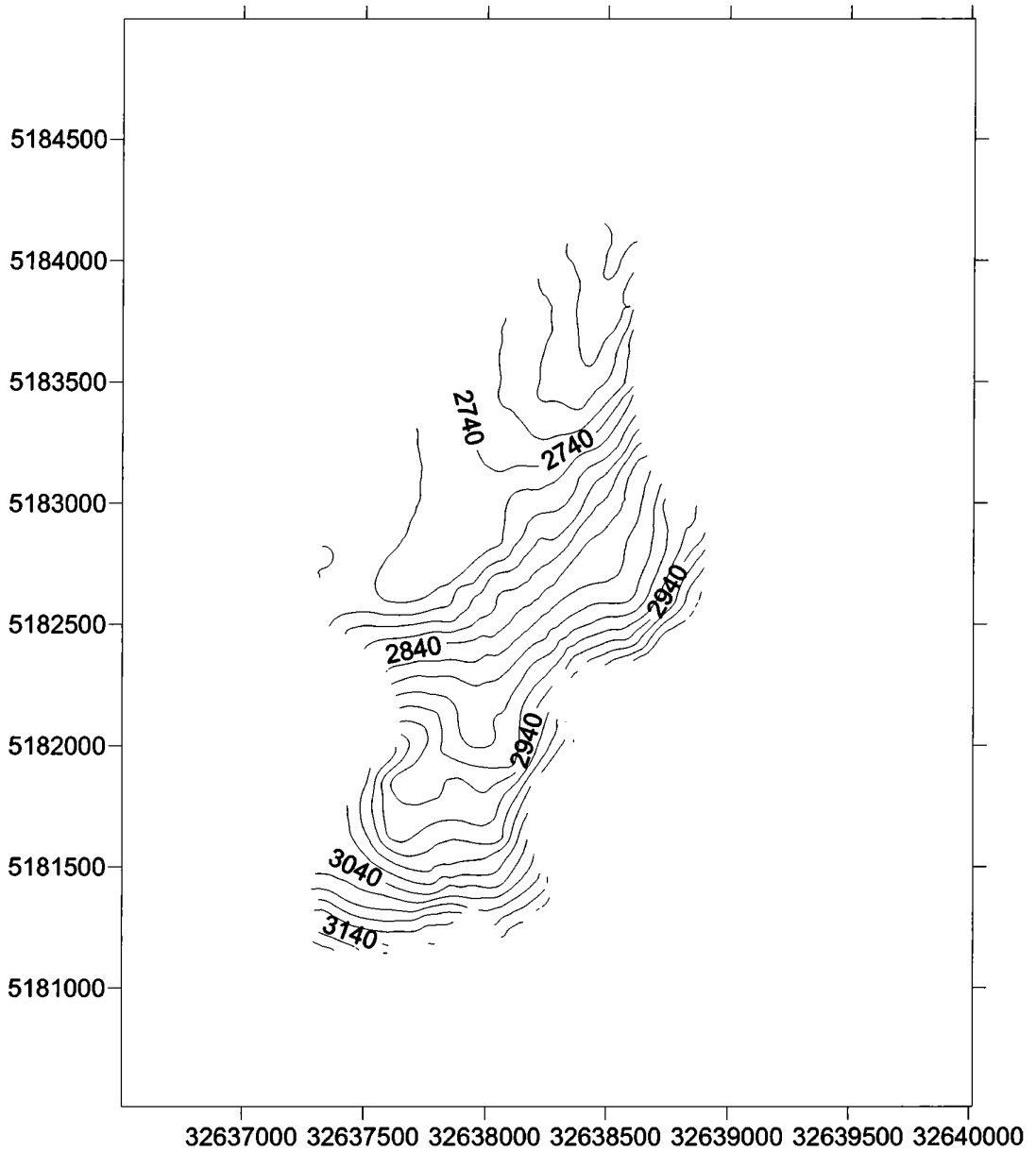


Abbildung 2.82. Untergrund des Hochjochferners, berechnet von Lambrecht (Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck) im Rahmen des Projektes Omega.

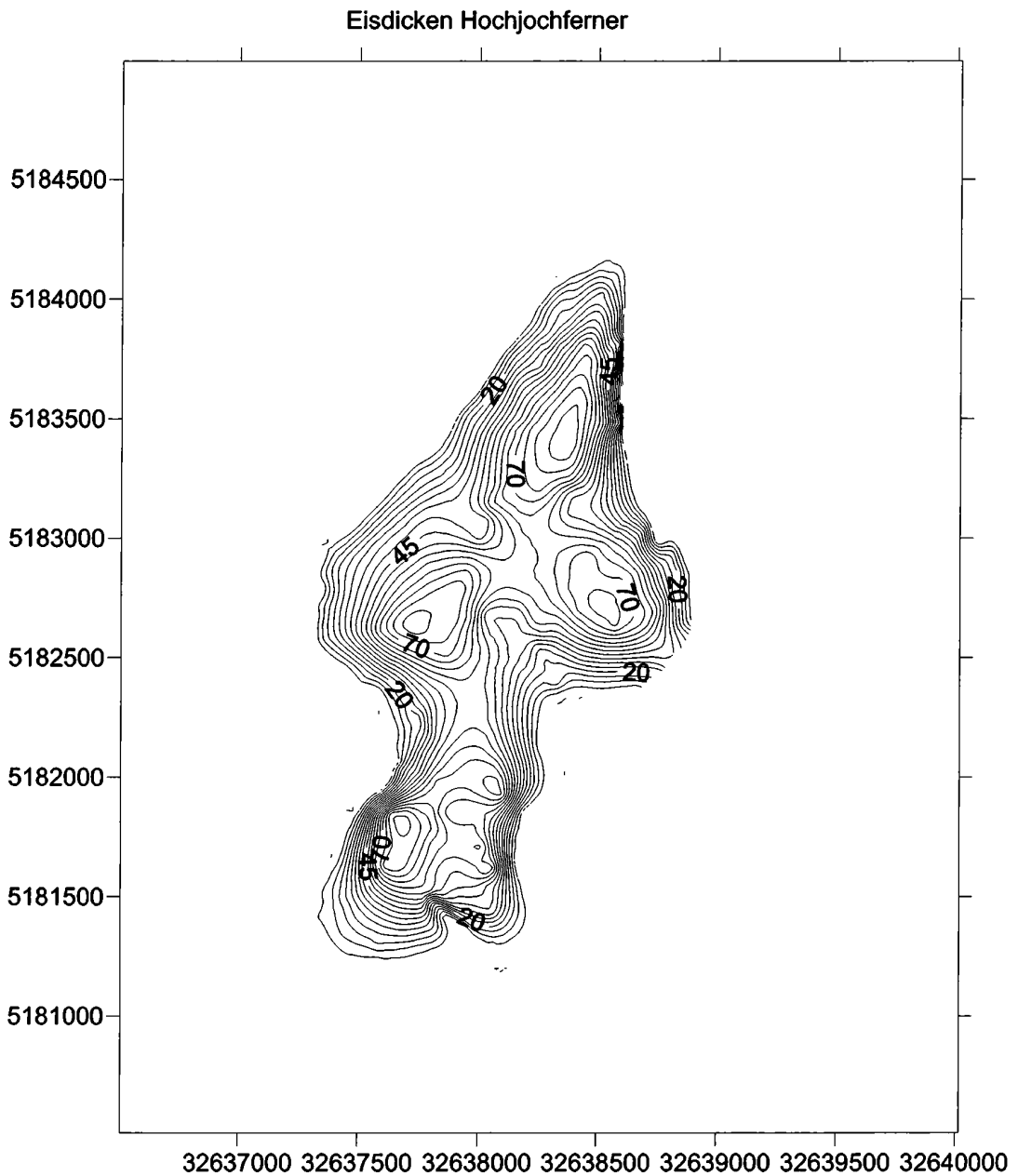


Abbildung 2.83. Eisdicke des Hochjochferners, berechnet von Lambrecht (Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck) im Rahmen des Projektes Omega.

2.8 Tisenjochferner

Der Tisenjochferner (46° 46,9' N, 10° 50,9' O) in den Ötztaler Alpen ist mit einer Größe von 0,4 km² (Stand: 1991) einer der kleinsten Gletscher in dieser Studie. Er liegt am Ende des Niedertales war früher mit dem Niederjochferner verbunden. Aus diesem Grund ist der Name Tisenjochferner nicht in den Karten angegeben. Dieser steile, in den letzten Jahren stark zurückgegangene Gletscher wurde durch den Fund des Eismannes Ötzi im Jahr 1991 an seiner höchsten Stelle, dem Hauslabjoch, in der Öffentlichkeit bekannt (x in Abbildung 2.84). Die Eisdicke wurde 1997 an 29 Stellen gemessen. Die Profile zeigen geringe Eistiefen um etwa 40 m. In einer ausgeprägten Senke im zentralen Bereich des Längsprofils erreicht die Eisdicke 52 m.

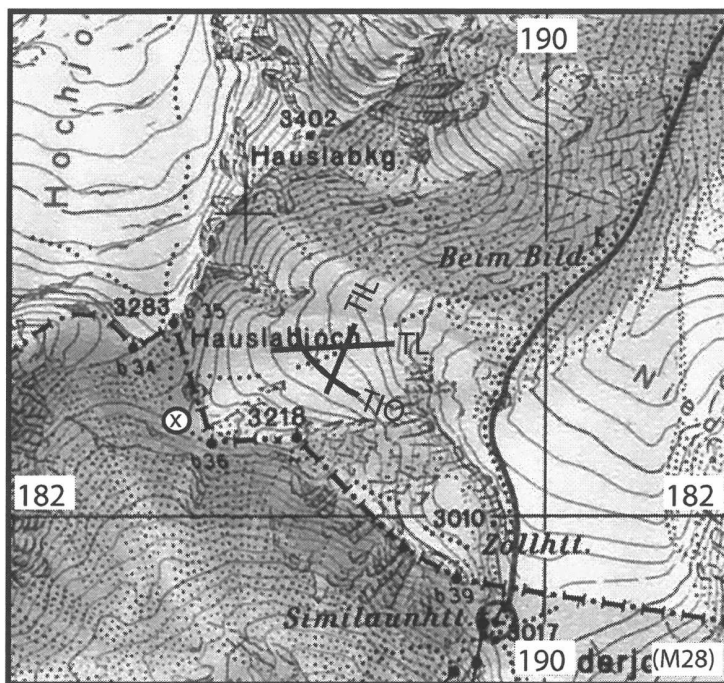


Abbildung 2.84. Karte des Tisenjochferners (Ötztaler Alpen). Quelle: ÖK 1:50 000 BEV.

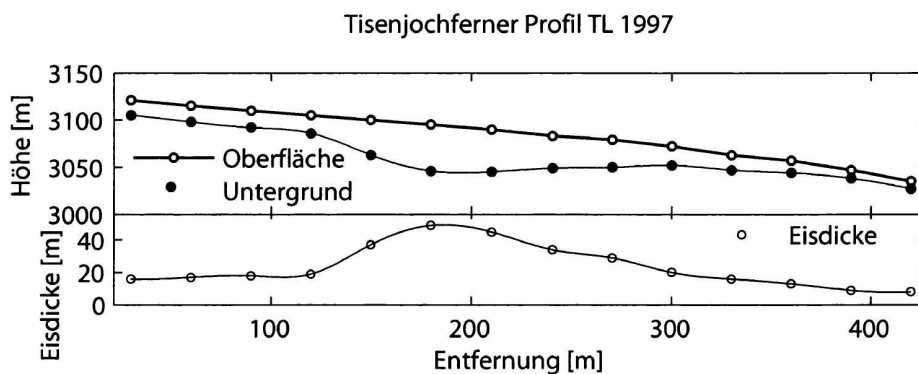


Abbildung 2.85. Gletscheroberfläche (Stand: 1991) und Eisdicken entlang des Profils TL am Tisenjochferner.

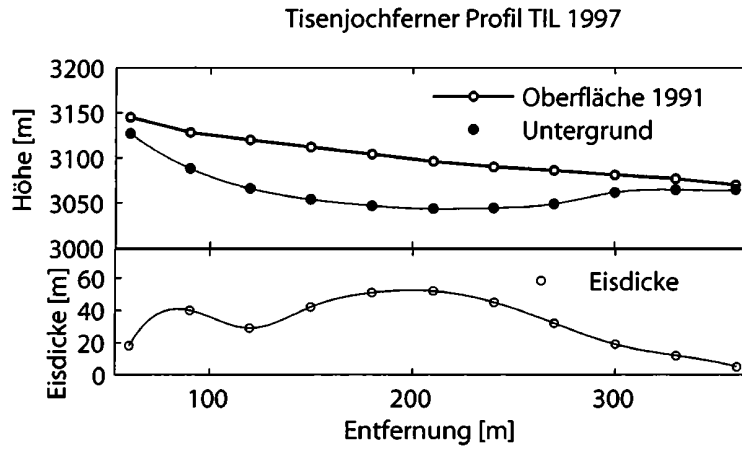


Abbildung 2.86. Gletscheroberfläche (Stand: 1991) und Eisdicken entlang des Profils TIL am Tisenjochferner.

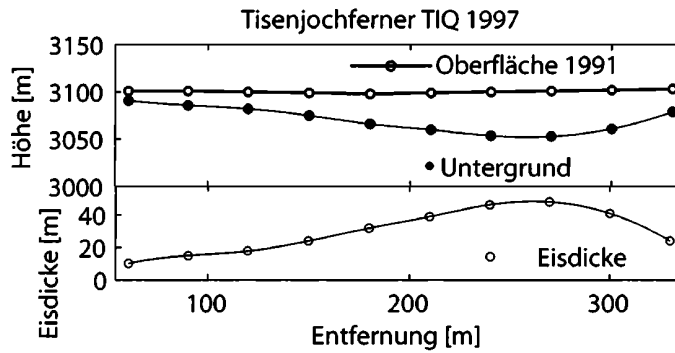


Abbildung 2.87. Gletscheroberfläche (Stand: 1991) und Eisdicken entlang des Profils TIQ am Tisenjochferner.

2.9 Mittelbergferner, Hangender Ferner, Karlesferner

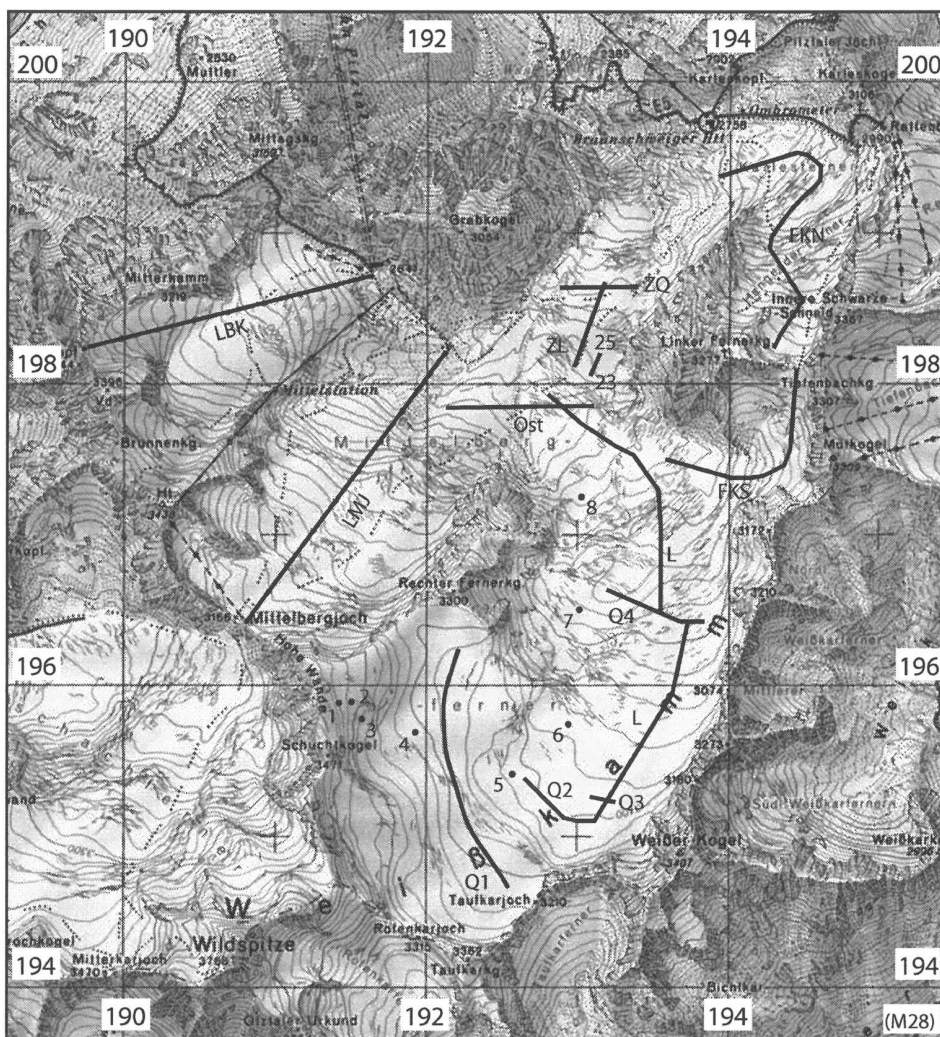


Abbildung 2.88. Karte des Mittelbergferners (Ötztaler Alpen). Quelle: ÖK 1:50 000 BEV. Gletscherstand: 1991

Der Mittelbergferner in den Ötztaler Alpen ($46^{\circ} 54,7' N$, $10^{\circ} 54,0' O$) ist mit einer Fläche von $11,0 \text{ km}^2$ (1991) der fünftgrößte Gletscher Österreichs. Der Westteil des Gletschers wird vom Schigebiet Pitztaler Gletscher genutzt. Der Ostteil des Gletschers wird, durch die günstige Lage der Braunschweiger Hütte und den Fernwanderweg E5 bedingt, von Bergsteigern stark frequentiert. Hangender Ferner und Karlesferner hängen heute nur mehr im Firngebiet mit dem Mittelbergferner zusammen.

Profilname	Jahr	Zahl der Meßpunkte
LMJ, Ost, ZL, ZQ, 23-25, 1-8, Q1, Q2	1998	zusammen mit den Messungen von 1998: 123
LBK	1999	
Q3, Q4, L	2000	zusammen mit den Messungen von 1998: 123
FKN, FKS	2001	

Tabelle 2.2. Zusammenstellung der Eisdickenmessungen an Mittelbergferner, Karlesferner und Hangendem Ferner.

Der Mittelbergferner ist nach Norden exponiert. Die Oberflächenneigung ist im Großteil des Gletschers sehr gering. Das Akkumulationsgebiet besteht aus drei Firnbecken, deren Größe von

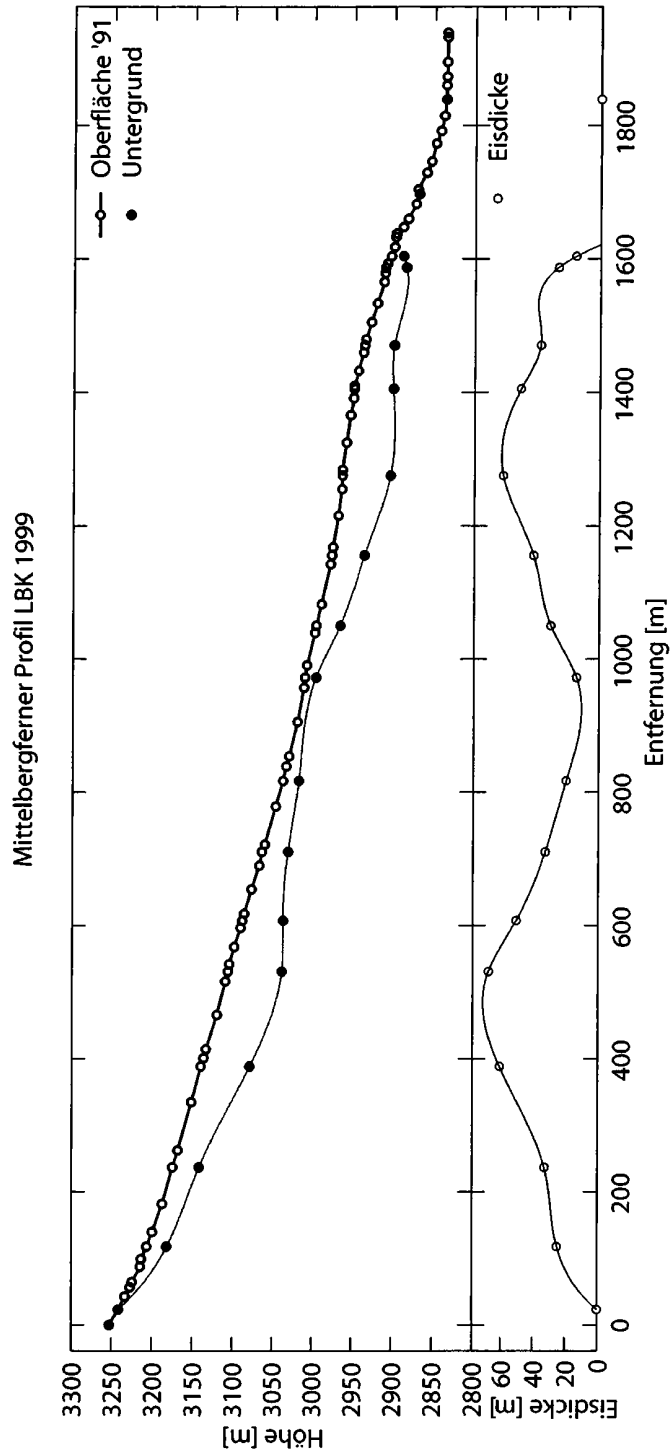


Abbildung 2.89. Gletscheroberfläche 1991 und Eisdicken entlang des Profils LBK am Mittelbergferner.

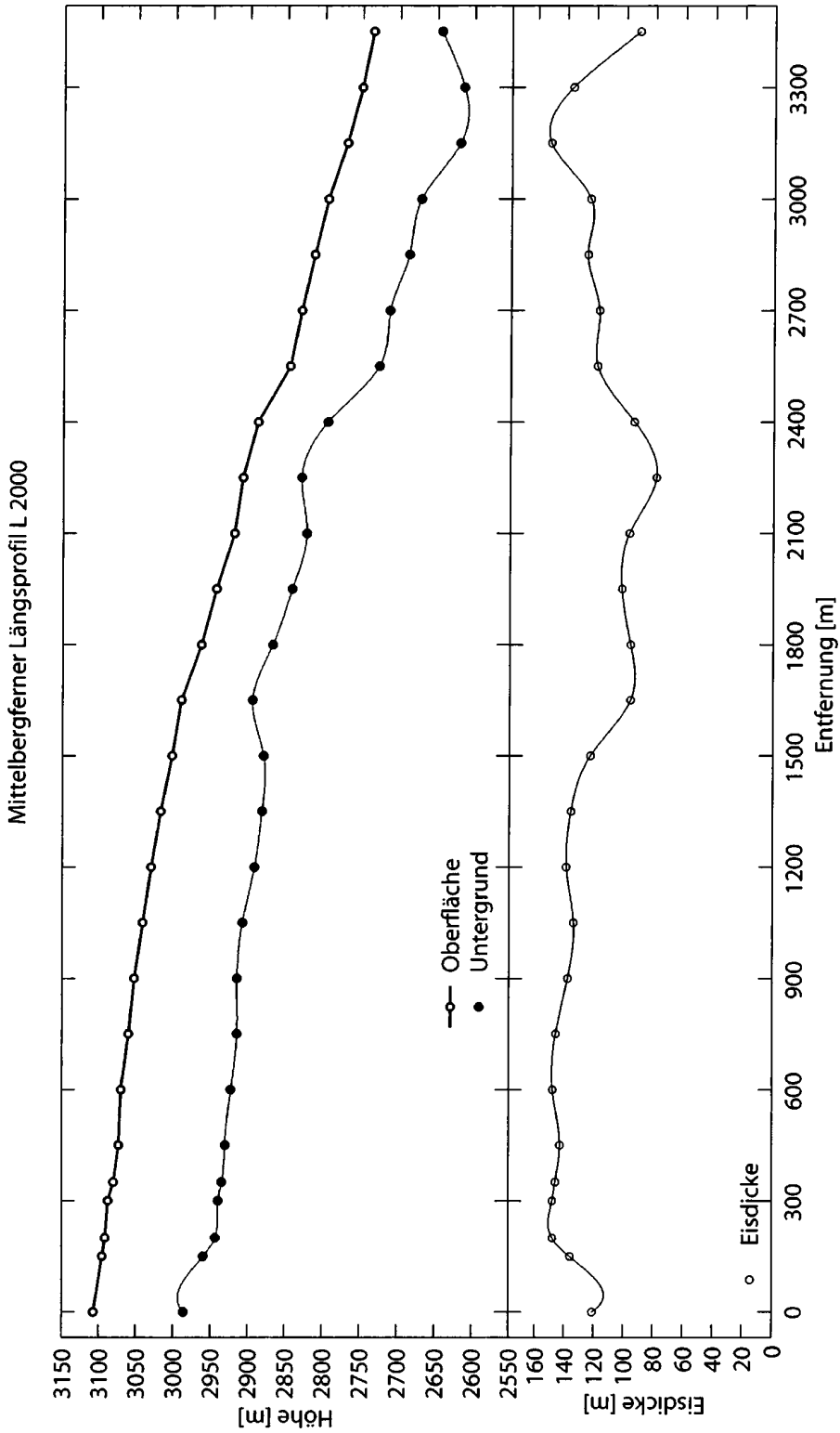


Abbildung 2.90. Gletscheroberfläche 1991 und Eisdicken entlang des Längsprofils L am Mittelbergferner.

West nach Ost zunimmt. Das westlichste Becken verfügt über keine ausgeprägte Zunge. Das Eis aus den beiden anderen Firnbecken fließt unterhalb des Rechten Fernerkogels zusammen, wobei aus der Lage der Mittelmoräne klar erkennbar ist, daß die Hauptmasse des Eises aus dem östlichsten Becken kommt.

Die Messungen mit dem Radarecholot wurden zwischen 1998 und 2001 durchgeführt (siehe Tabelle 2.9). Insgesamt wurden 208 Werte für die Eistiefe ermittelt. Die Eistiefen der westlichen Teilgletscher sind eher gering. Die größten Eistiefen finden sich mit etwas über 150 m im östlichen Hauptteil des Gletschers: Im Profil Q3 auf 3100 m, im Profil L auf 2750 m und im Profil O auf 2770 m Höhe. Das Längsprofil L zeigte eine ausgeprägte Übertiefung am unteren Ende.

Meßpunkt	1	2	3	4	5	6	7	8	23	24	25
Eistiefe [m]	8	22	38	74	113	97	70	60	118	140	132

Tabelle 2.3. Eisdicken an den in der Karte in Abbildung 2.88 eingetragenen Meßpunkten eins bis acht sowie 23, 24, und 25 am Mittelbergferner.

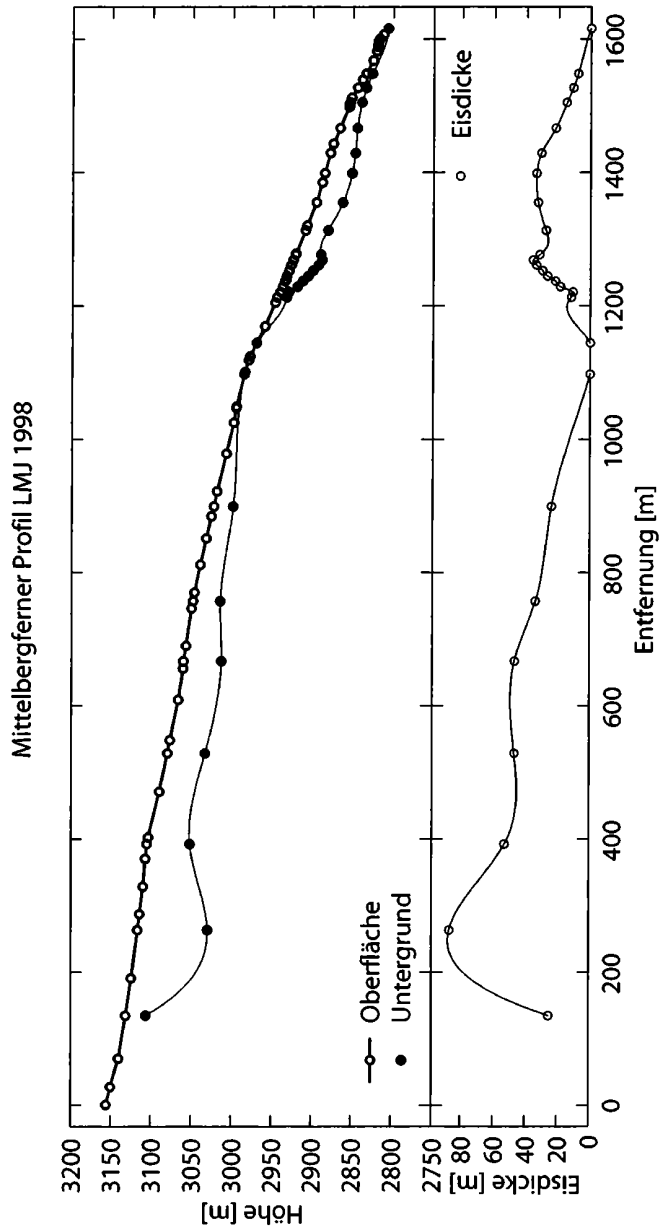


Abbildung 2.91. Gletscheroberfläche 1991 und Eisdicken entlang des Längsprofils MBJ am Mittelbergferner.

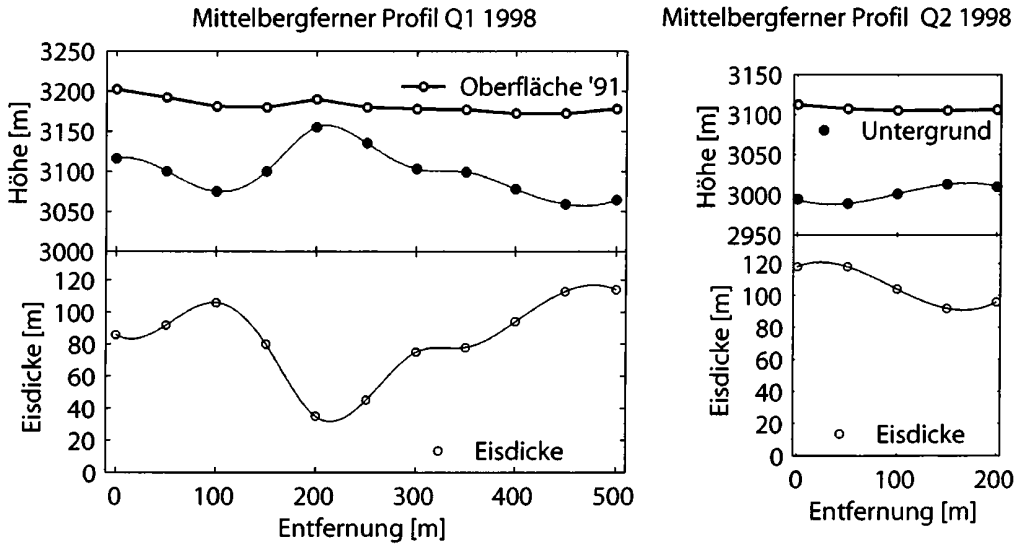


Abbildung 2.92. Gletscheroberfläche 1991 und Eisdicken entlang des Querprofile Q1 und Q2 am Mittelbergferner.

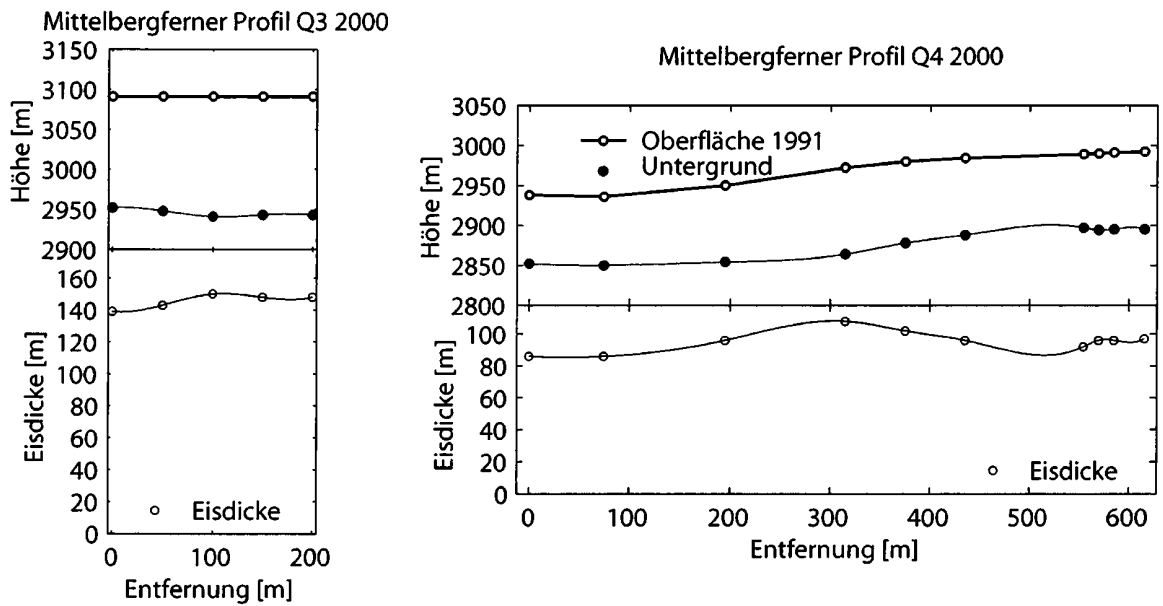


Abbildung 2.93. Gletscheroberfläche 1991 und Eisdicken entlang der Querprofile Q3 und Q4 am Mittelbergferner.

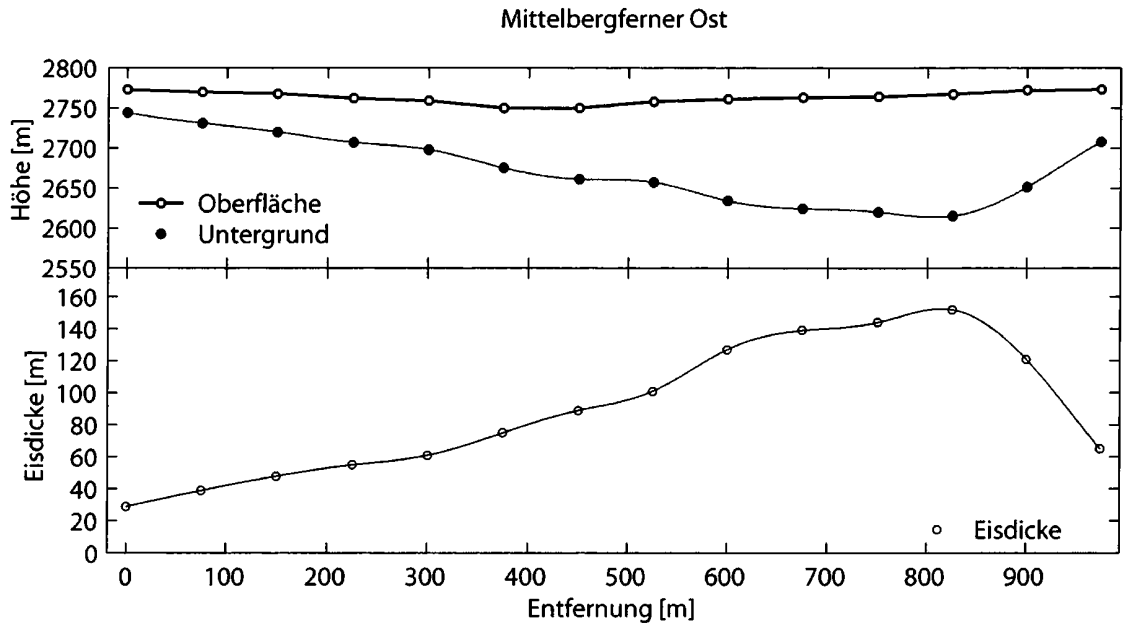


Abbildung 2.94. Gletscheroberfläche 1991 und Eisdicken entlang des Querprofils Ost am Mittelbergferner.

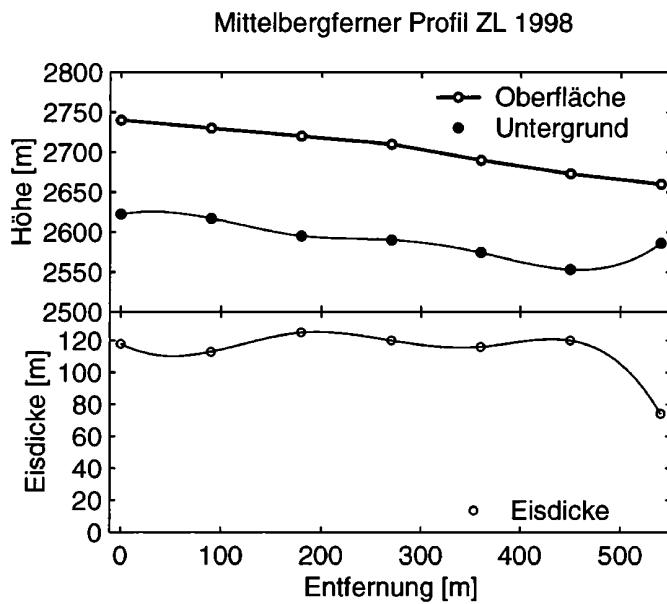


Abbildung 2.95. Gletscheroberfläche 1991 und Eisdicken entlang des Längsprofils ZL an der Zunge des Mittelbergferners.

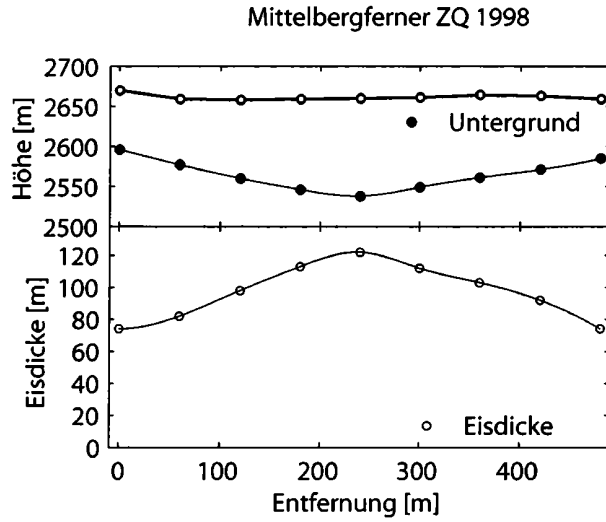


Abbildung 2.96. Gletscheroberfläche 1991 und Eisdicken entlang des Querprofils ZQ an der Zunge am Mittelbergferner.

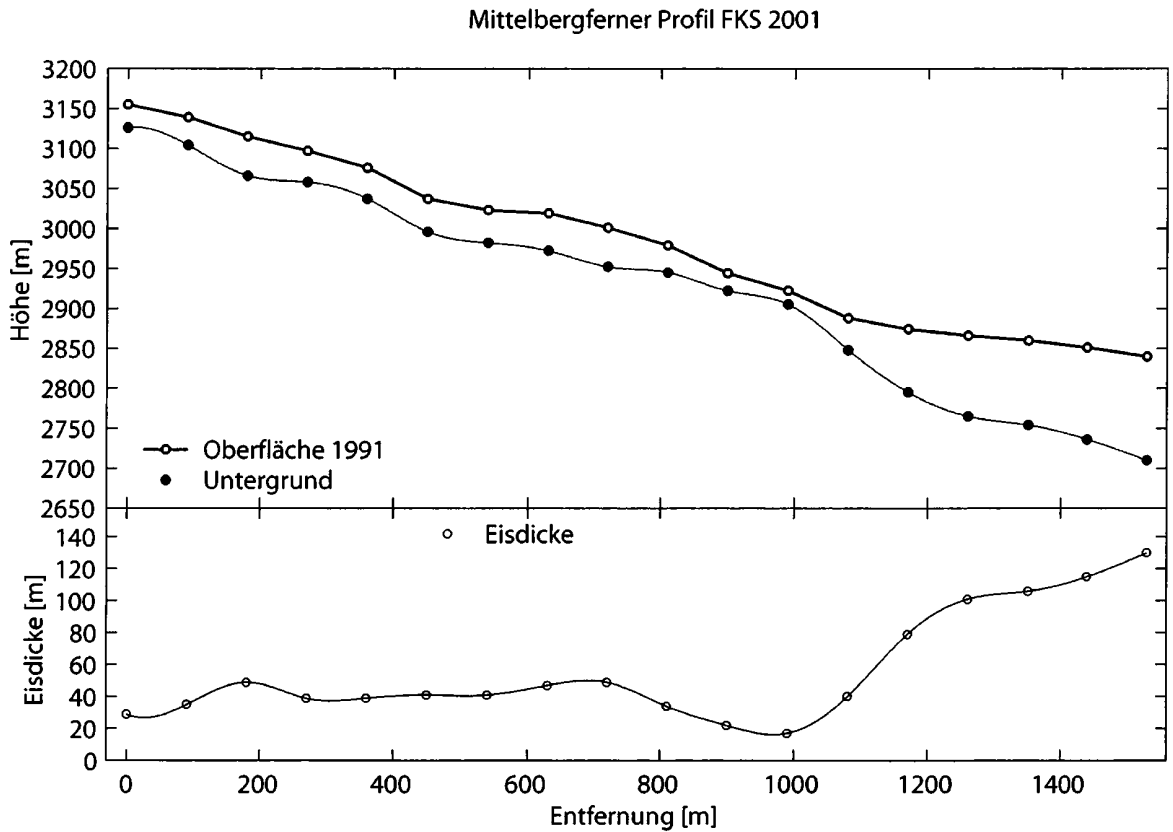


Abbildung 2.97. Gletscheroberfläche 1991 und Eisdicken entlang des Profils FKS am Mittelbergferner.

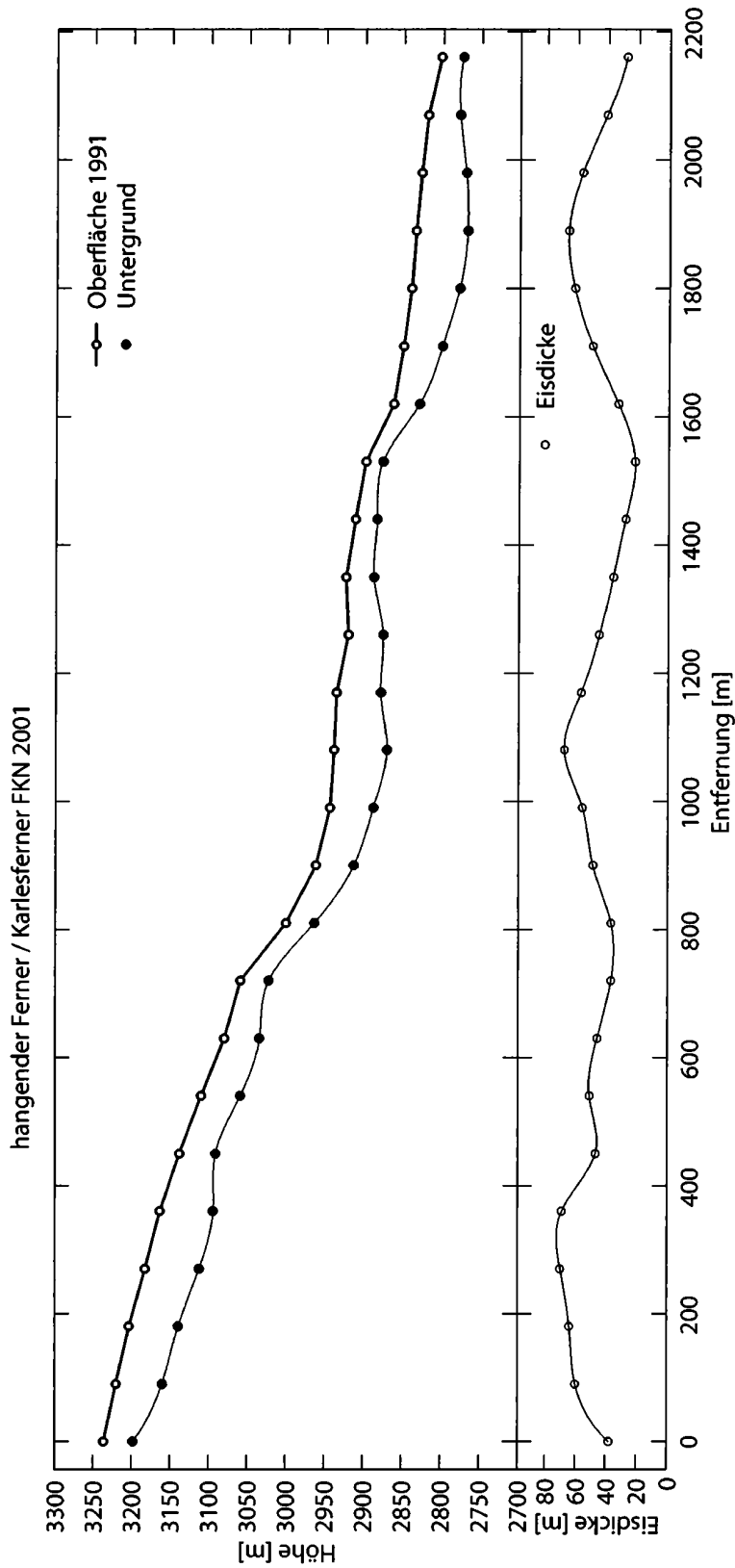


Abbildung 2.98. Gletscheroberfläche 1991 und Eisdicken entlang des Profils FKN an Hangendem Ferner und Karlesferner.

2.10 Gurgler Ferner

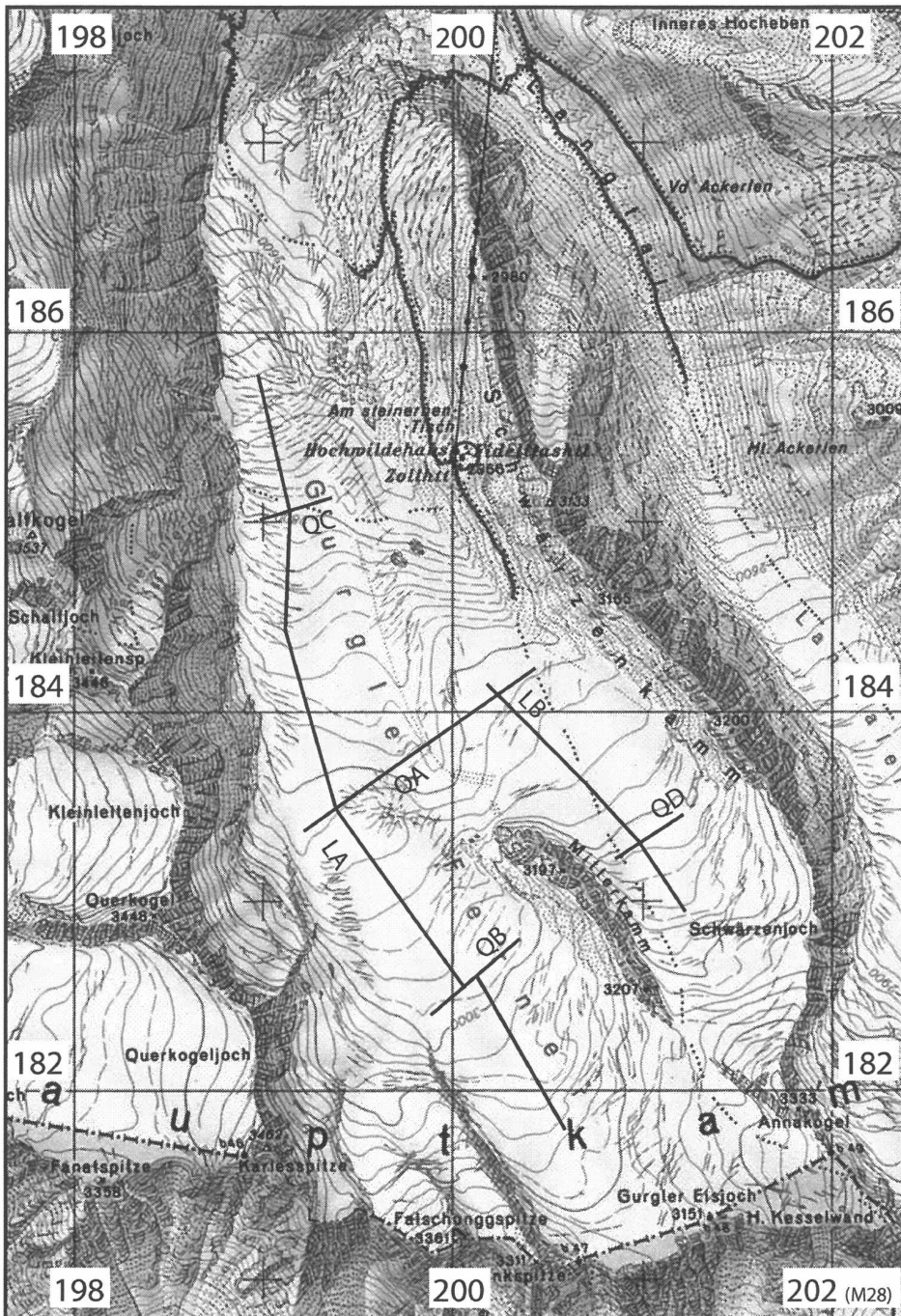


Abbildung 2.99. Karte des Gurgler Ferners (Ötztaler Alpen). Quelle: ÖK 1:50000 BEV. Gletscherstand 1991.

Der Gurglerferner ($46^{\circ} 47,8'N$ $10^{\circ} 59,1' O$) in den Ötztaler Alpen hat bei einer Länge von ca. 8 km eine Fläche von $10,3 \text{ km}^2$ (Gletscherstand 1991). Er ist nach Norden bzw. Nordwesten ausgerichtet. Im Jahr 1998 wurde die Eisdicke an 100 Punkten mit dem Radarecholot gemessen. Das Firnggebiet des Gurgler Ferners besteht aus drei Becken, die durch Felsrippen getrennt sind. Unterhalb des Mitterkamms, auf etwa 3000 m, vereinigen sich die Eisströme zu einer breiten Zunge, die bis auf etwa 2550 m hinabreicht. Aufgrund dieser Struktur wurden zwei Längsprofile gemessen, die unterhalb des Mitterkamms mit einem Querprofil ergänzt wurden. Zusätzlich wurde in jedem der Einzugsgebiete ein Querprofil auf einer Höhe von ca. 3000 m angelegt. Unterhalb

des Hochwildehauses, auf einer Höhe von ca. 2800 m, wurde ein Querprofil über die gesamte Zunge gemessen.

Im Sommer 1956 wurden von Förtsch und Vidal seismische Eisdickenmessungen am Gurgler Ferner durchgeführt [23].

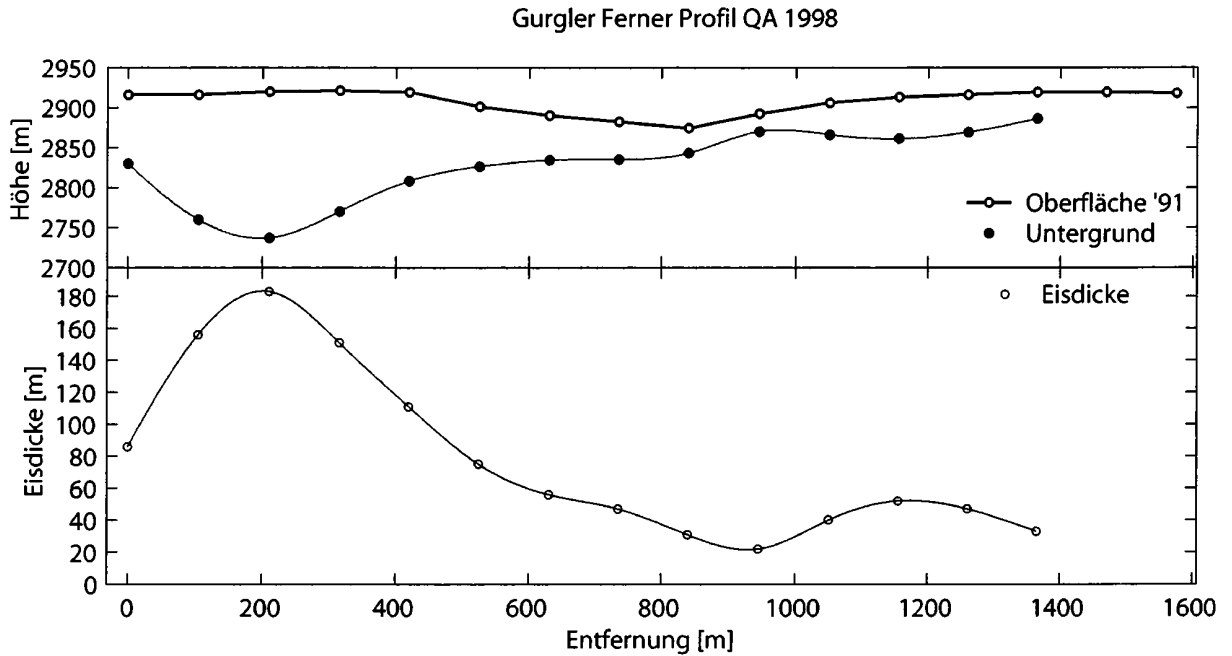


Abbildung 2.100. Gletscheroberfläche 1991 und Eisdicken 1998 entlang des Querprofils QA.

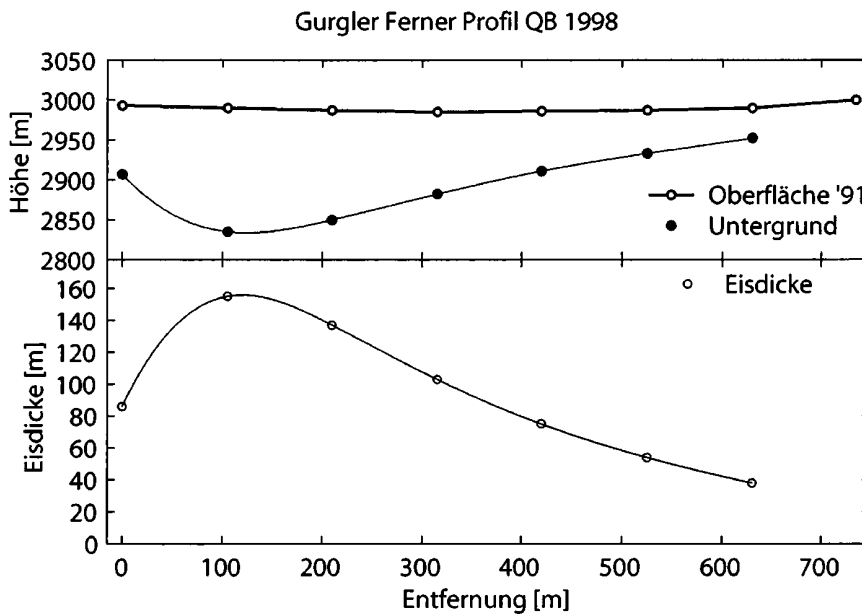


Abbildung 2.101. Gletscheroberfläche 1991 und Eisdicken 1998 entlang des Querprofils QB.

Der orographisch linke Teil des Gletschers ist, wie bereits aus der Größe des Einzugsgebiets zu vermuten wäre, wesentlich tiefer als der orographisch rechte Teil (Querprofil QA in Abbildung 2.100). Das Gletscherbett zeigt im Längsprofil LA über eine Länge von 1600 m große Tiefen um etwa 180 m. Die größte Eisdicke wird auf einer Höhe von 2800 m erreicht. In diesem Bereich nimmt

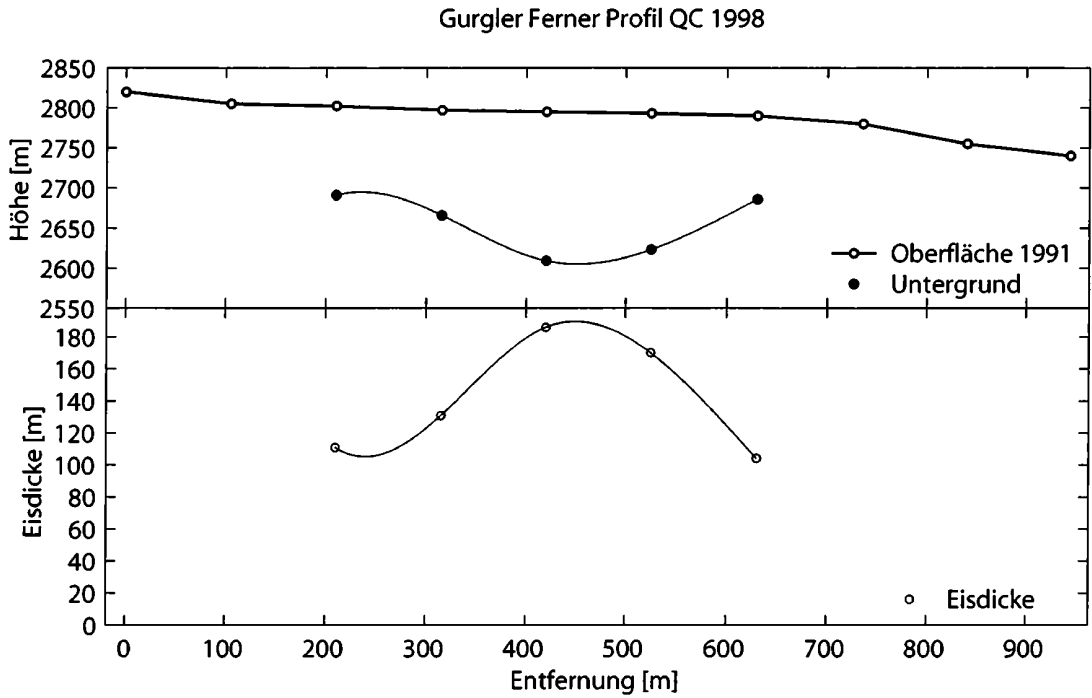


Abbildung 2.102. Gletscheroberfläche 1991 und Eisdicken 1998 entlang des Querprofils QC.

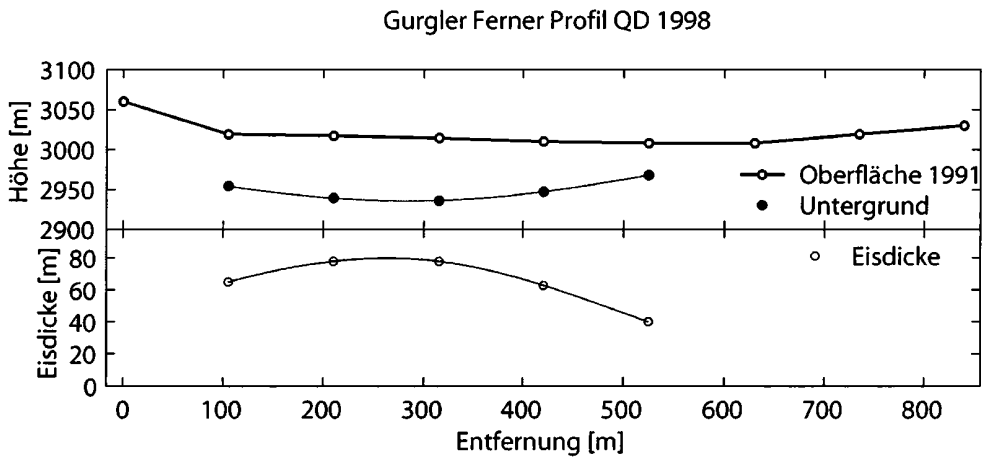


Abbildung 2.103. Gletscheroberfläche 1991 und Eisdicken 1998 entlang des Querprofils QD.

der Querschnitt der Zunge topographisch bedingt ab und der etwas höher gelegene orographisch rechte Teil des Gletschers fließt in die Hauptzunge. Im Längsprofil LB finden sich nur Eistiefen unter 80 m, die, wie aus Querprofil QD ersichtlich, gegen den Rand hin schnell abnehmen. Das Querprofil QB zeigt gegen den orographisch linken Rand des Gletschers hin eine Zunahme der Eisdicke. Das Querprofil QC auf der Zunge unterhalb des Hochwildehauses zeigt die größte Tiefe in der Mitte.

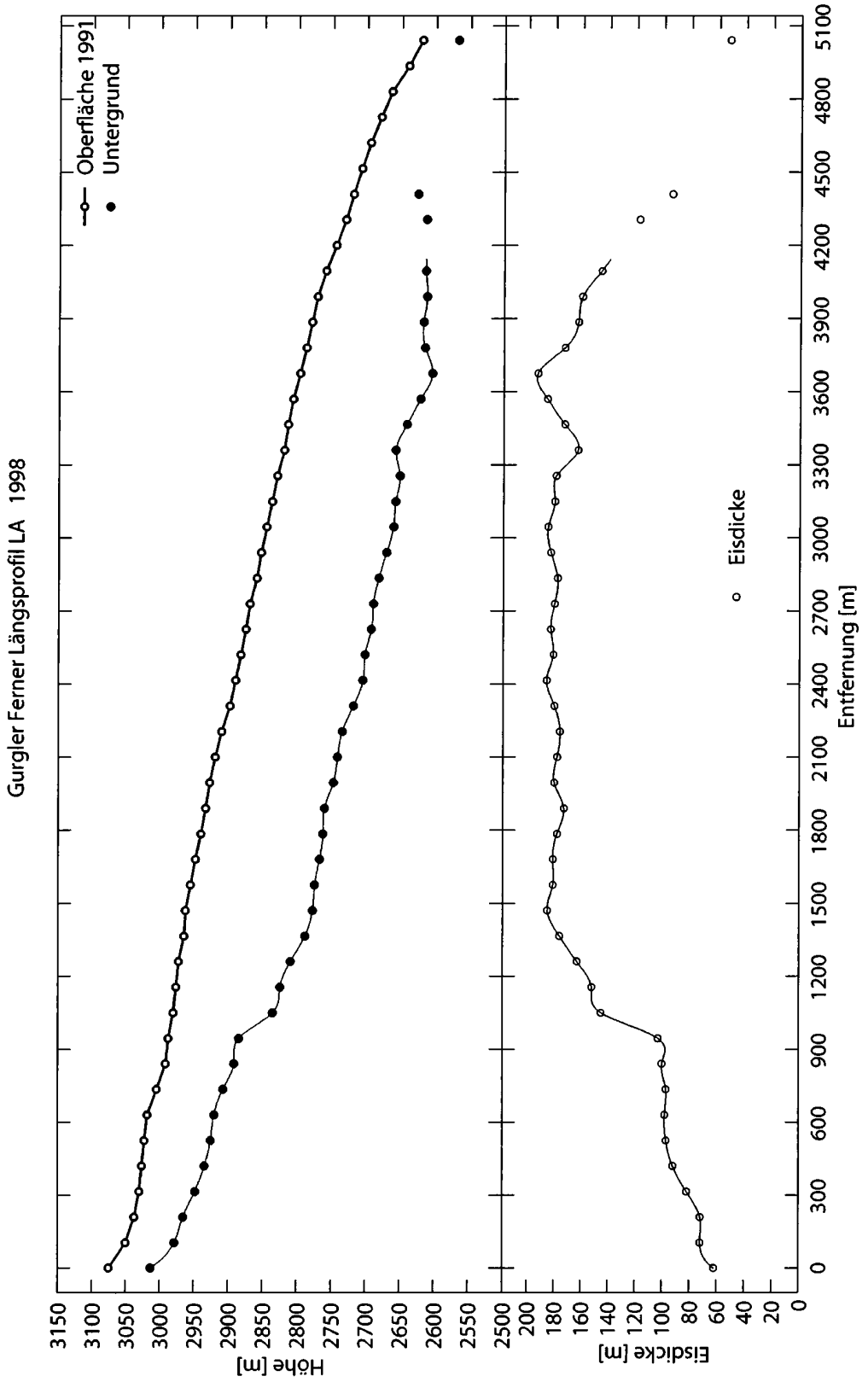


Abbildung 2.104. Gletscheroberfläche 1991 und Eisdicken 1998 entlang des Längsprofils LA.

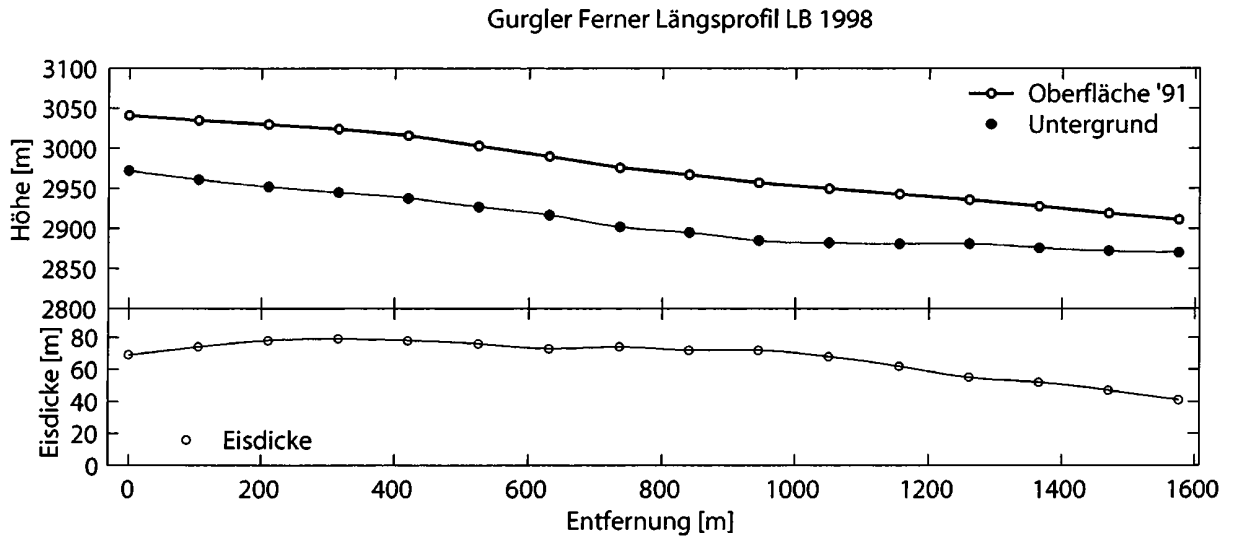


Abbildung 2.105. Gletscheroberfläche 1991 und Eisdicken 1998 entlang des Längsprofils LB.

2.10.1 Frühere Eisdickenmessungen

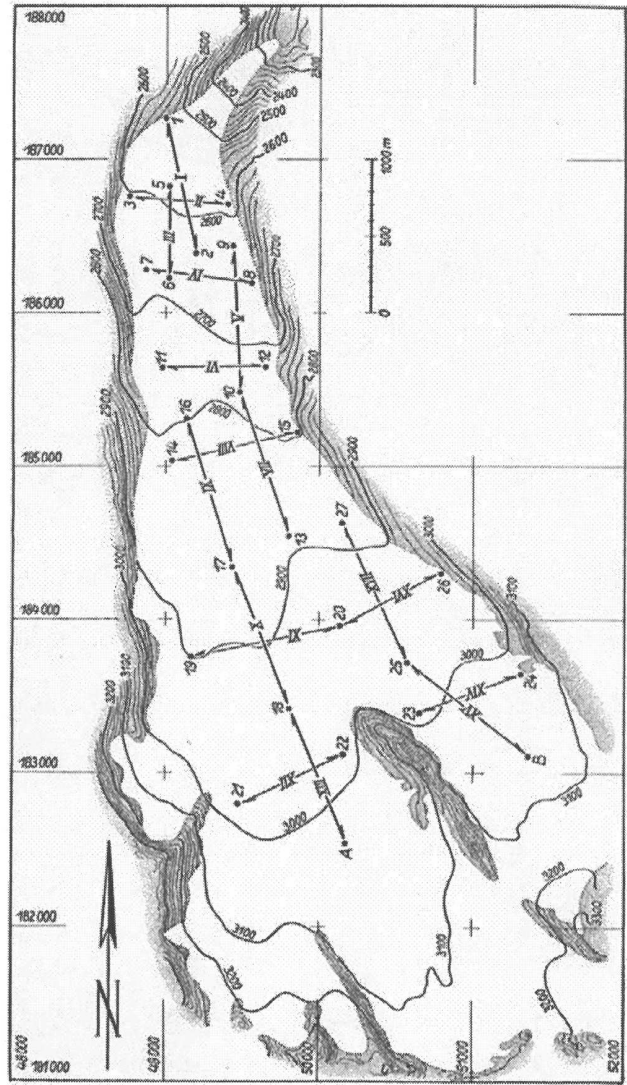


Abbildung 2.106. Karte der seismischen Eisdeckenmessungen am Gurgler Ferner [23].

Im Sommer 1956 wurden am Gurgler Ferner refraktionsseismische Eisdickenmessungen in 17 Profilen durchgeführt [23]. Die Lage der Radarprofile und der Seismikprofile ist vergleichbar, wie in Tabelle 2.4 angegeben.

Radarprofile	LA	LB	QA	QB	QC	QD
Seismikprofile	XIII, X, IX	XV, XVII	XI, XVI	XII	VIII	XIV

Tabelle 2.4. Liste der Radarprofile 1998 und der Seismikprofile 1956, deren Lage miteinander vergleichbar sind.

Die von Förtsch und Vidal ermittelten Eisdicken sind, besonders im oberen Bereich des Gletschers, wesentlich zu niedrig. Die Zunge wäre heute nach den seismischen Messungen von 1956 in großen Bereichen eisfrei. Die mit dem Radar ermittelte Eistiefe ist in etwa so groß wie die von Förtsch und Vidal gemessenen Mächtigkeiten von Eis und Grundmoräne zusammen.

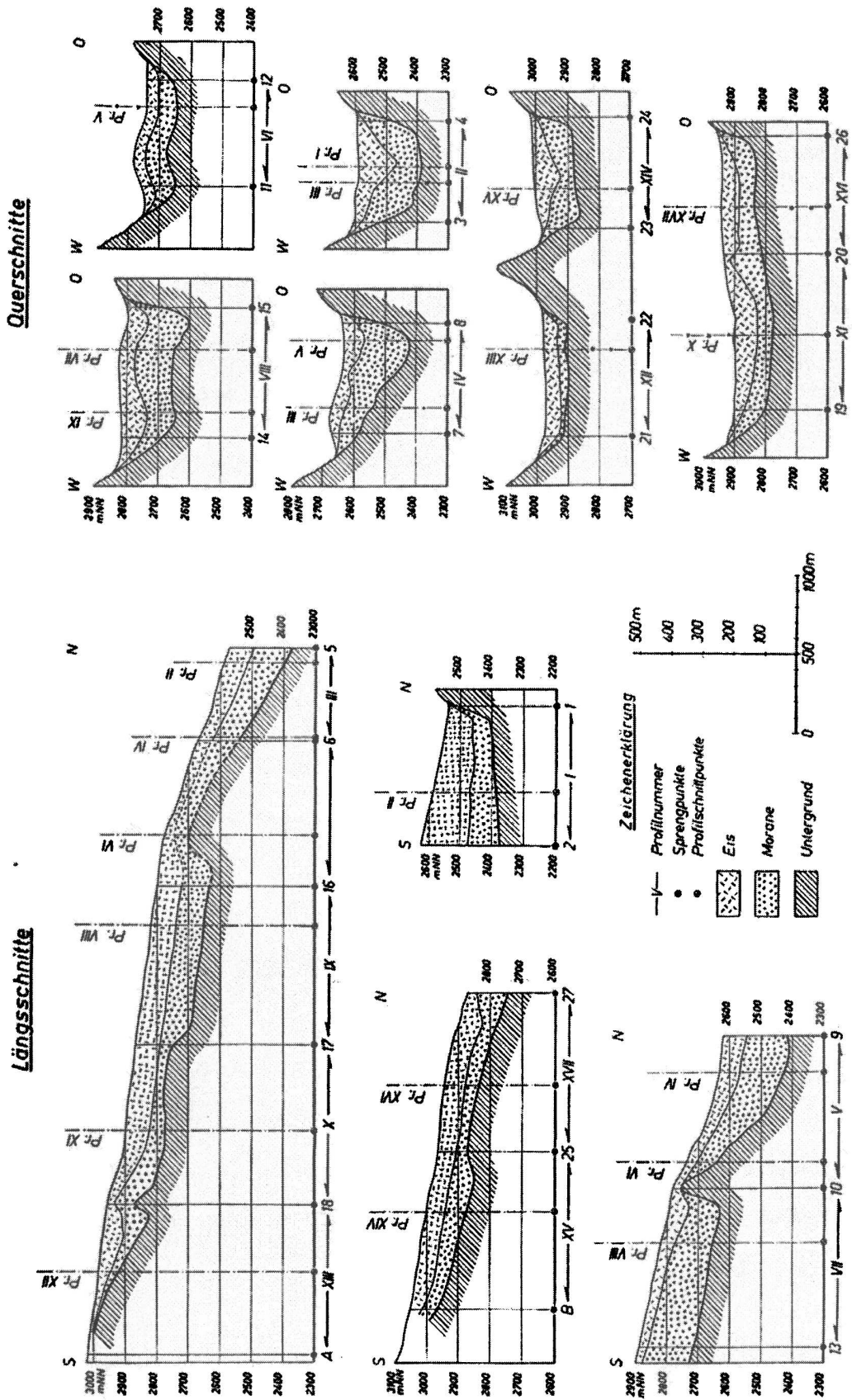


Abbildung 2.107. Ergebnisse der seismischen Eisdickenmessungen am Gurgler Ferner [23].

2.11 Weißbrunnferner

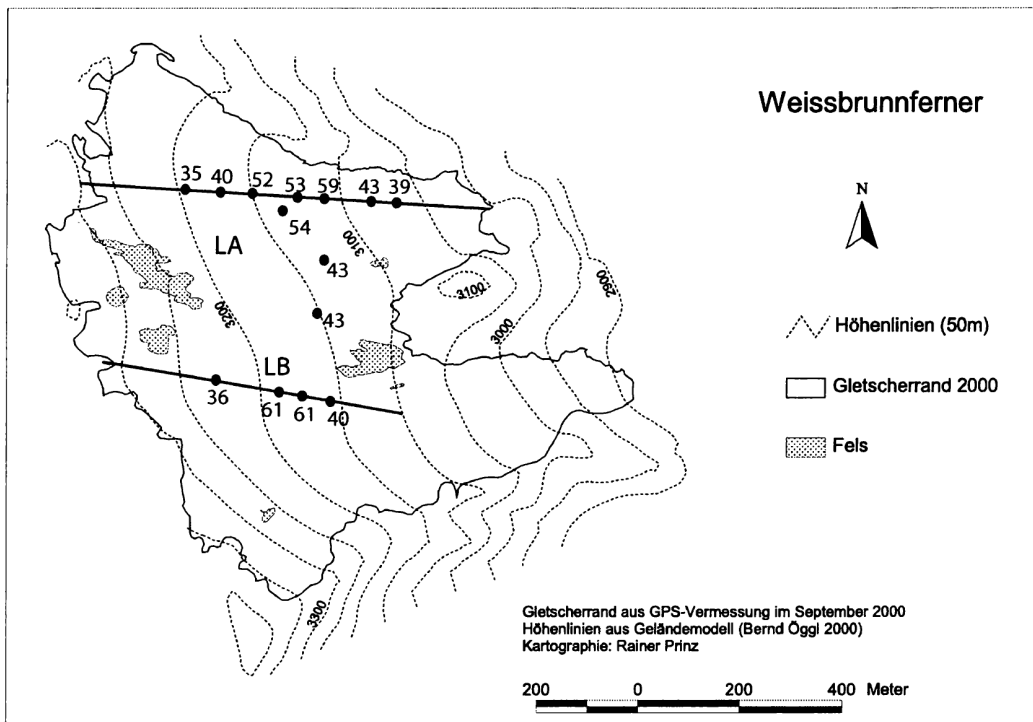


Abbildung 2.108. Karte des Weißbrunnferner (Ortlergebiet). Quelle: Rainer Prinz, Institut für Geographie der Universität Innsbruck (persönliche Mitteilung).

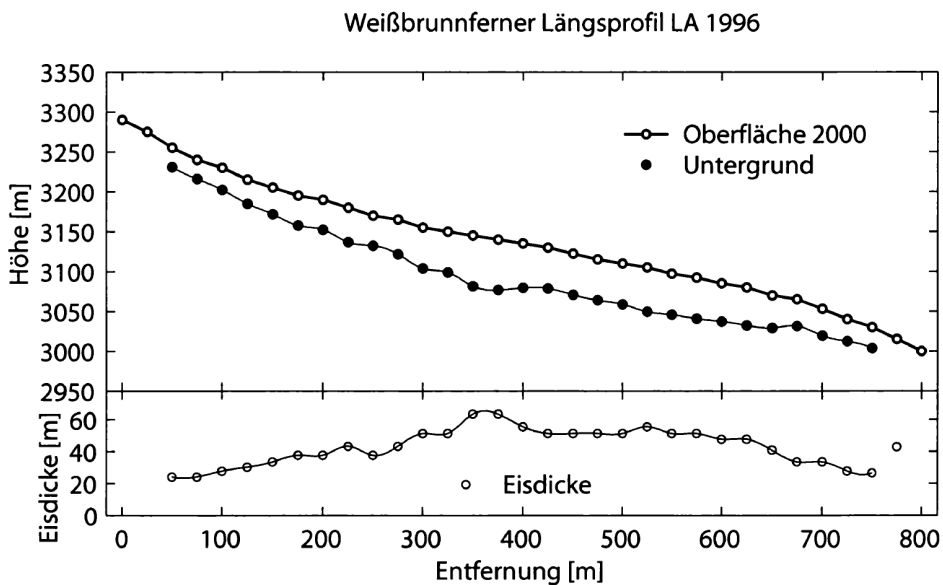


Abbildung 2.109. Gletscheroberfläche (Stand 1995) und Eisdicken entlang des Längsprofils LA am Weißbrunnferner.

Der Weißbrunnferner/Ghiacciaio di Fontana Bianca ($46^{\circ} 29,0' N$, $10^{\circ} 46,3' O$) ist der einzige Gletscher in dieser Studie der gänzlich auf italienischem Staatsgebiet liegt. Er bedeckt eine Fläche von $0,7 \text{ km}^2$. Am Weißbrunnferner läuft seit 1983/84 mit einer Unterbrechung zwischen

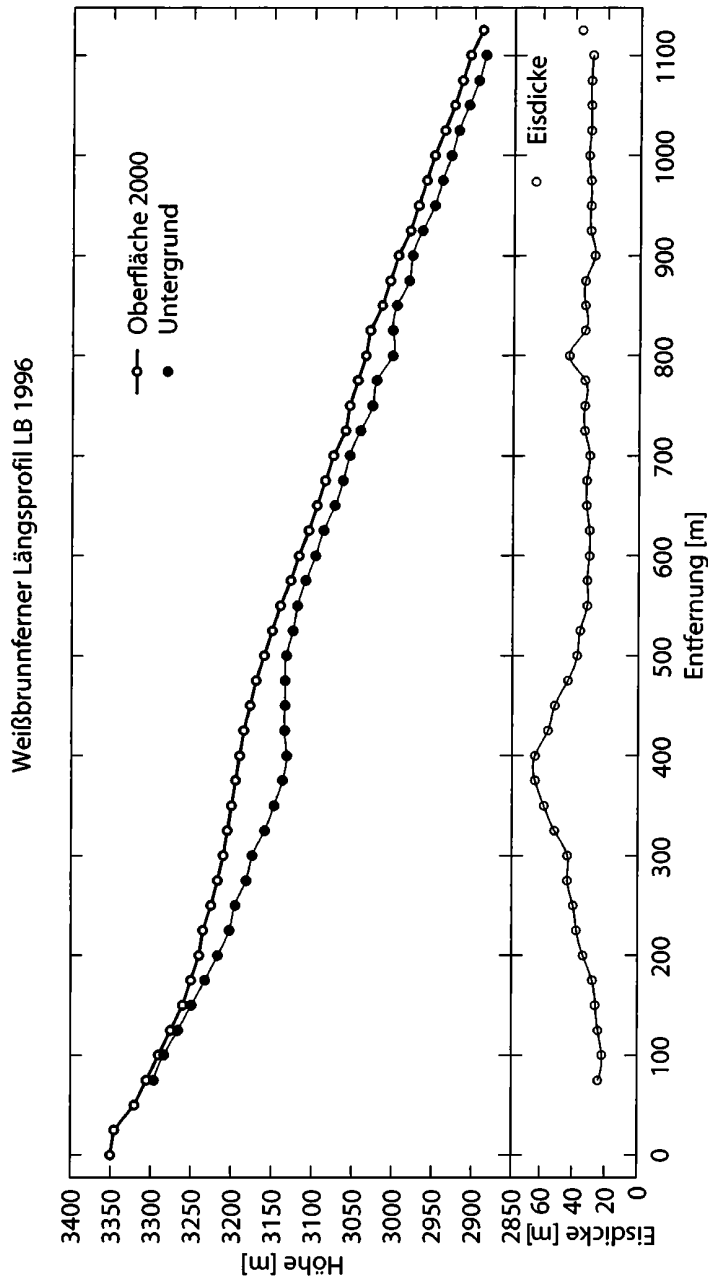


Abbildung 2.110. Gletscheroberfläche (Stand 1995) und Eisdicken entlang des Längsprofils LB am Weißbrunnferner.

1987/88 und 1991/92 ein Massenbilanzprogramm, das vom Institut für Geographie der Universität Innsbruck in Zusammenarbeit mit dem Hydrografischen Amt in Bozen unter der Leitung von G. Kaser durchgeführt wird [30]. Die Eisdicke wurde 1996 an 21 Stellen bestimmt. Die Auswertung beruht auf der vom Institut für Geografie der Universität Innsbruck 1995 erstellten Karte des Weißbrunnfernens. Grundlage für diese Karte war die Grundkarte der Provinz 1:10 000, Nr. 025/10: Autonome Provinz Bozen-Südtirol. Die größten Eisdicken betragen um 60 m.

2.12 Daunkogelferner

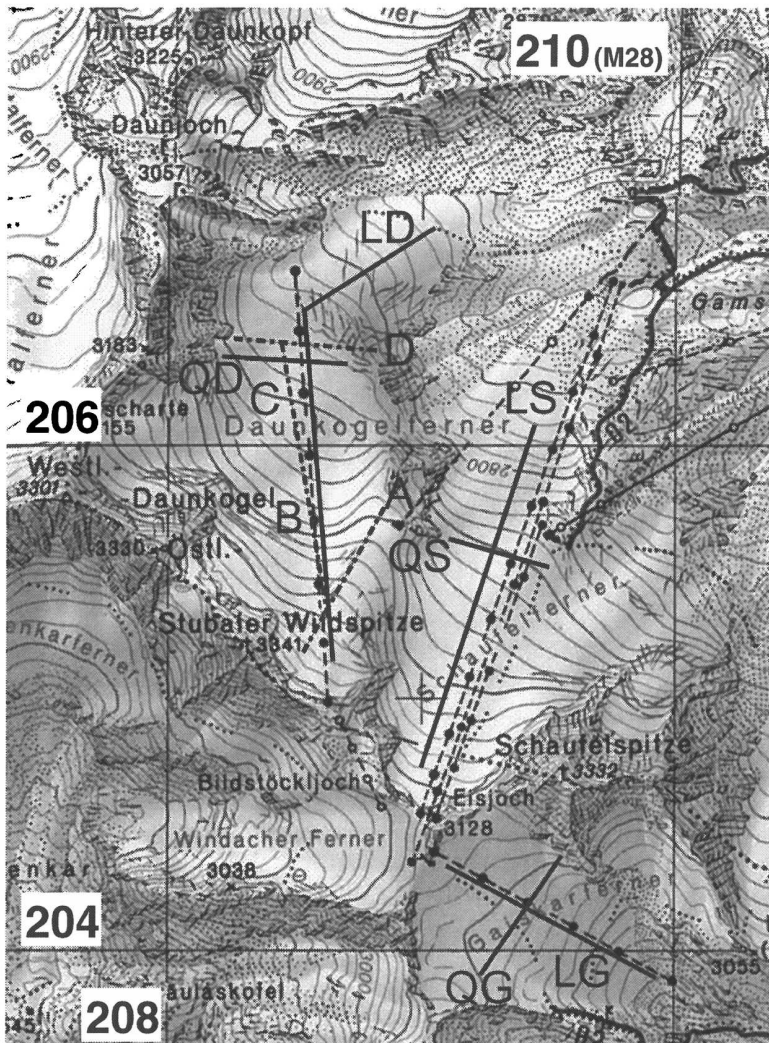


Abbildung 2.111. Karte des Daunkogelferners, Gaiskarferners und Schaufelferners (Stubai Alpen) mit Radarprofilen. Die strichlierten Profile A,B,C, und D bezeichnen die Seismikprofile von 1976 [2]. Quelle: ÖK 1:50 000 BEV.

Der Daunkogelferner ($46^{\circ} 59,5'$ Nord, $11^{\circ} 6,3'$ Ost) liegt in den Stubai Alpen und ist Teil des Schigebietes Stubaier Gletscher (Abb. 2.111). Er bedeckt eine Fläche von $1,5 \text{ km}^2$ und ist nord- bis nordöstlich exponiert. Der Daunkogelferner hängt mit dem Schaufelferner (Stubai Alpen, siehe Abschnitt 2.13) zusammen. In den Österreichkarten (ÖK) des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen (BEV) wird der untere Teil des Schaufelferners zum Daunkogelferner gerechnet (Abbildung 2.111).

Die ersten Eisdickenmessungen am Daunkogelferner wurden 1976 mit Refraktionsseismik durchgeführt [2]. 1995 wurde an 48 Punkten die Eisdicke erstmals mit Radar gemessen.

Das Längsprofil LD (Abbildung 2.111 und 2.112) wurde entlang der Liftrasse vom östlichen der beiden Firnbecken bis zum Ende der Zunge geführt und ändert auf einer Höhe von ca. 2850 m die Richtung. Im oberen Teil bewegen sich die Eisdicken um 80 m. Auf 3100 m befindet sich im Untergrund eine Geländekante, die auch an der Eisoberfläche erkennbar ist. Die Eisdicke verringert sich in diesem Bereich auf 68 m. Auf einer Höhe von 2900 m befindet sich ein übertieftes Becken, in dem mit 104 m die maximale Eisdicke erreicht wird. Orographisch rechts des Profiles befindet sich auf ca. 2850 m ein Eisbruch. Hier wird das Eis dünner; die Tiefe nimmt vom Ende des Beckens bis zur Zunge konstant ab.

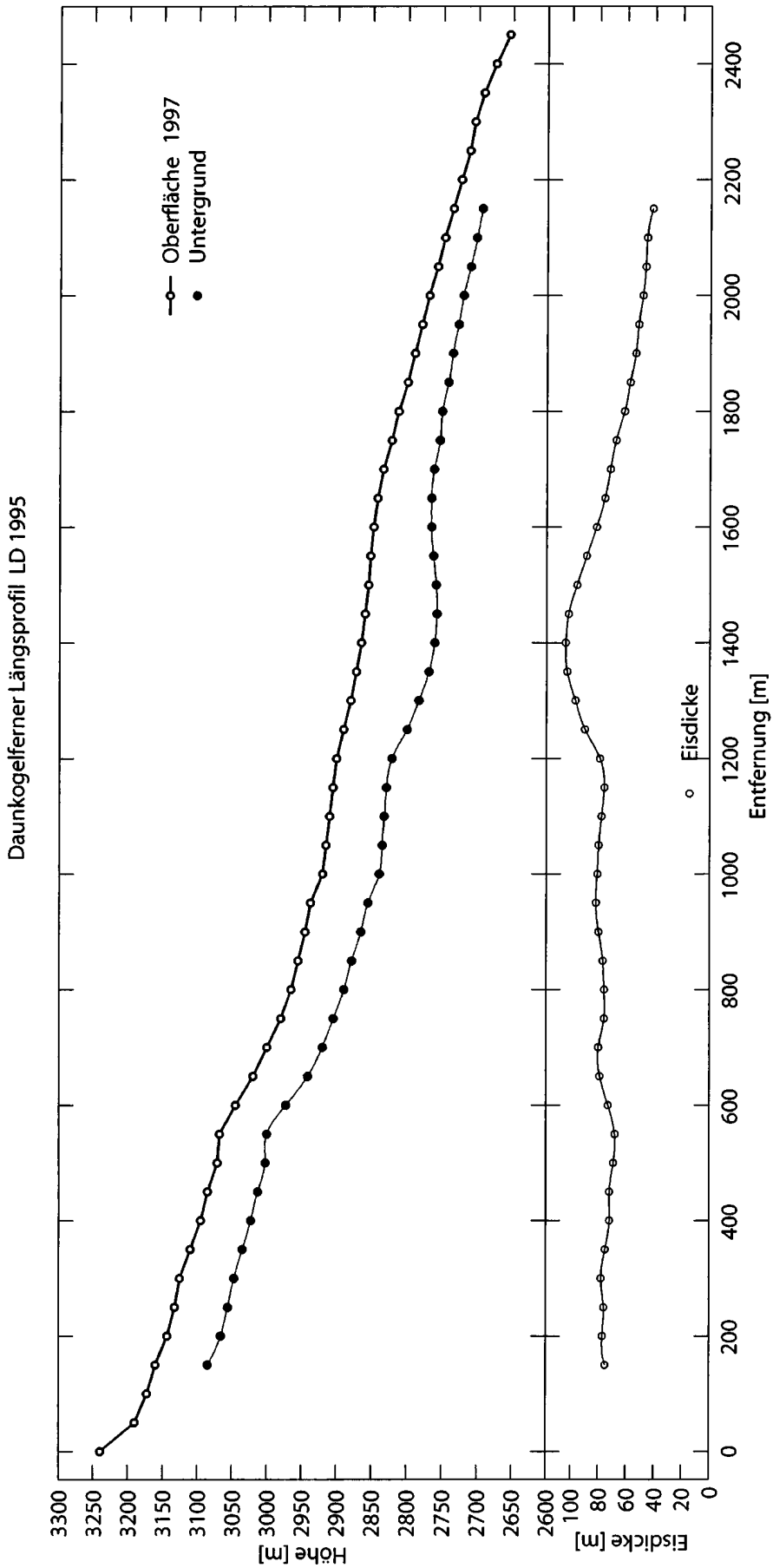


Abbildung 2.112. Gletscheroberfläche (Gletscherstand 1997) und Eisdicken 1995 entlang des Längsprofils LD Daunkogelferner.

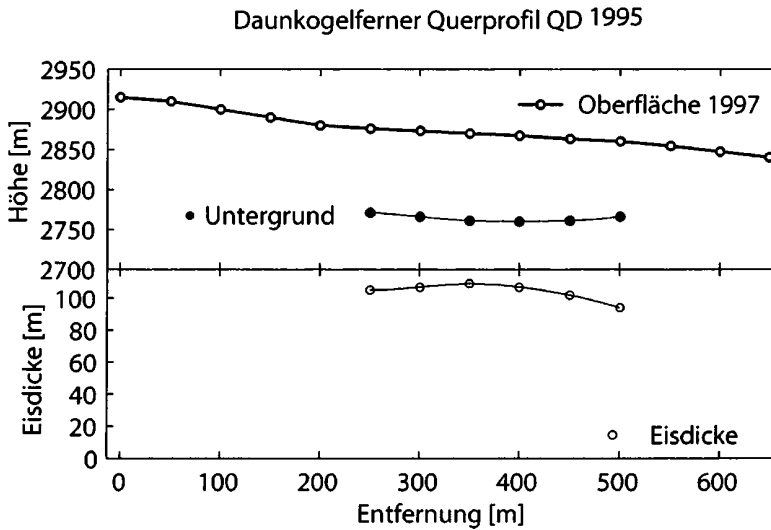


Abbildung 2.113. Gletscheroberfläche und Eisdicken entlang des Querprofils QD Daunkogelferner.

Das Querprofil wurde hinter dem Zusammenfluß des Eises aus beiden Firnbecken an einer flacheren Stelle gemessen. Der Mittelwert der Eisdicke beträgt hier 104 m.

2.12.1 Eisdickenmessungen 1976

Die Eisdickenmessungen 1976 [2] wurden mit Refraktionsseismik durchgeführt. Die Auswertung erfolgte mit der Plus-Minus-Methode. Das Ablationsgebiet wurde als Zweischichtfall (Eis und Schnee) betrachtet, im Akkumulationsgebiet wurden zusätzlich noch Altschnee- und Firnschichten berücksichtigt. Die für die einzelnen Schichten aus der Refraktionsseismik ermittelten Longitudinalwellengeschwindigkeiten sind in den Abbildungen 2.114 und 2.115 angegeben. Die in der Abbildung gezeigten Oberflächenhöhen beziehen sich auf die Orthofotokarte von 1980 im Maßstab 1:10 000.

Die Seismikprofile 1975 liegen nahe den Radarprofilen 1995 (Abbildung 2.111). Die Eisdicken aus den Seismikprofilen B, C und D sind in den Abbildungen 2.114 und 2.115 zu sehen. Die seismischen Eisdickenmessungen ergaben tendenziell niedrigere Eisdicken als die Radarmessungen im Jahr 1995.

Die Seismikprofile B und C beginnen höher und enden in der Verflachung, wo das Radarprofil die Richtung ändert. Die maximal gemessene Eisdicke im Seismikprofil beträgt nur ca. 75 m auf einer Höhe von 2900 m. Die im seismischen Querprofil A gemessenen Eisdicken sind um ein Viertel niedriger als die aus den Radardaten berechneten Eisdicken.

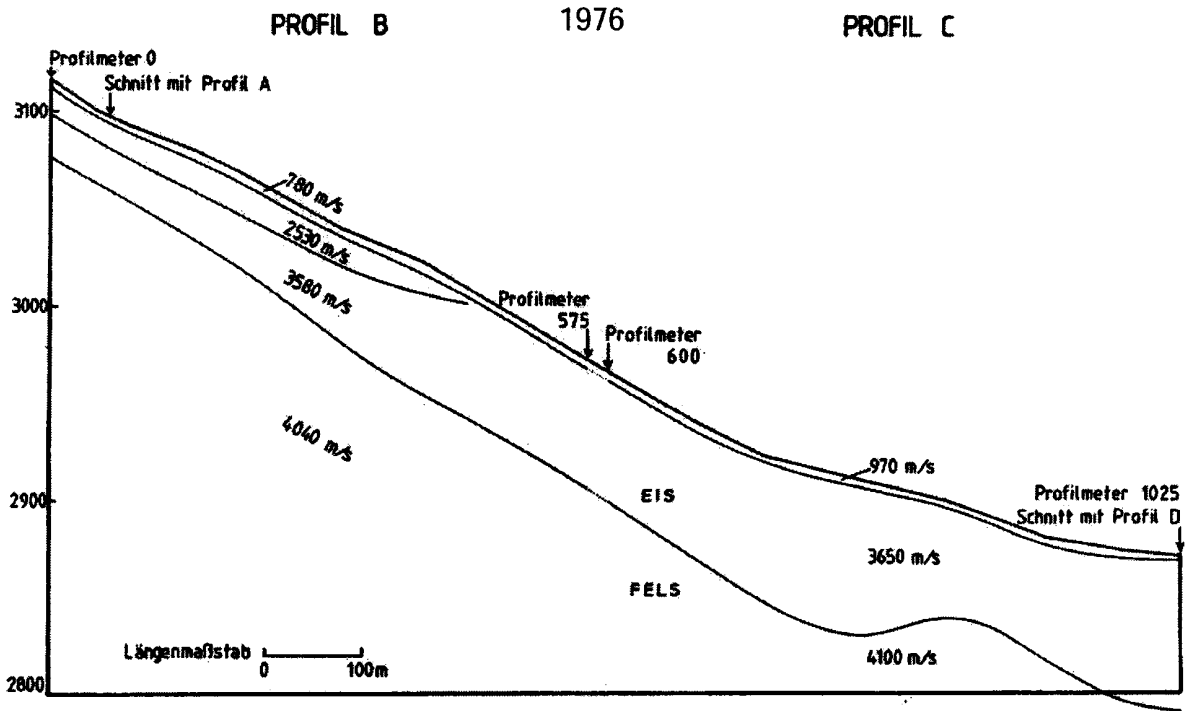


Abbildung 2.114. Gletscheroberfläche und Eisdicken in den Seismiklängsprofilen B und C in Abbildung 2.111(nach [2]).

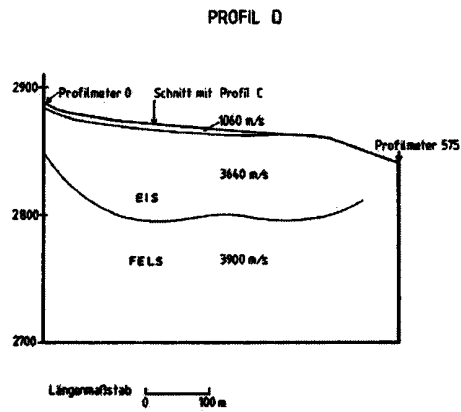


Abbildung 2.115. Gletscheroberfläche und Eisdicken entlang des Seismikquerprofils D (nach [2]).

2.13 Schaufelferner

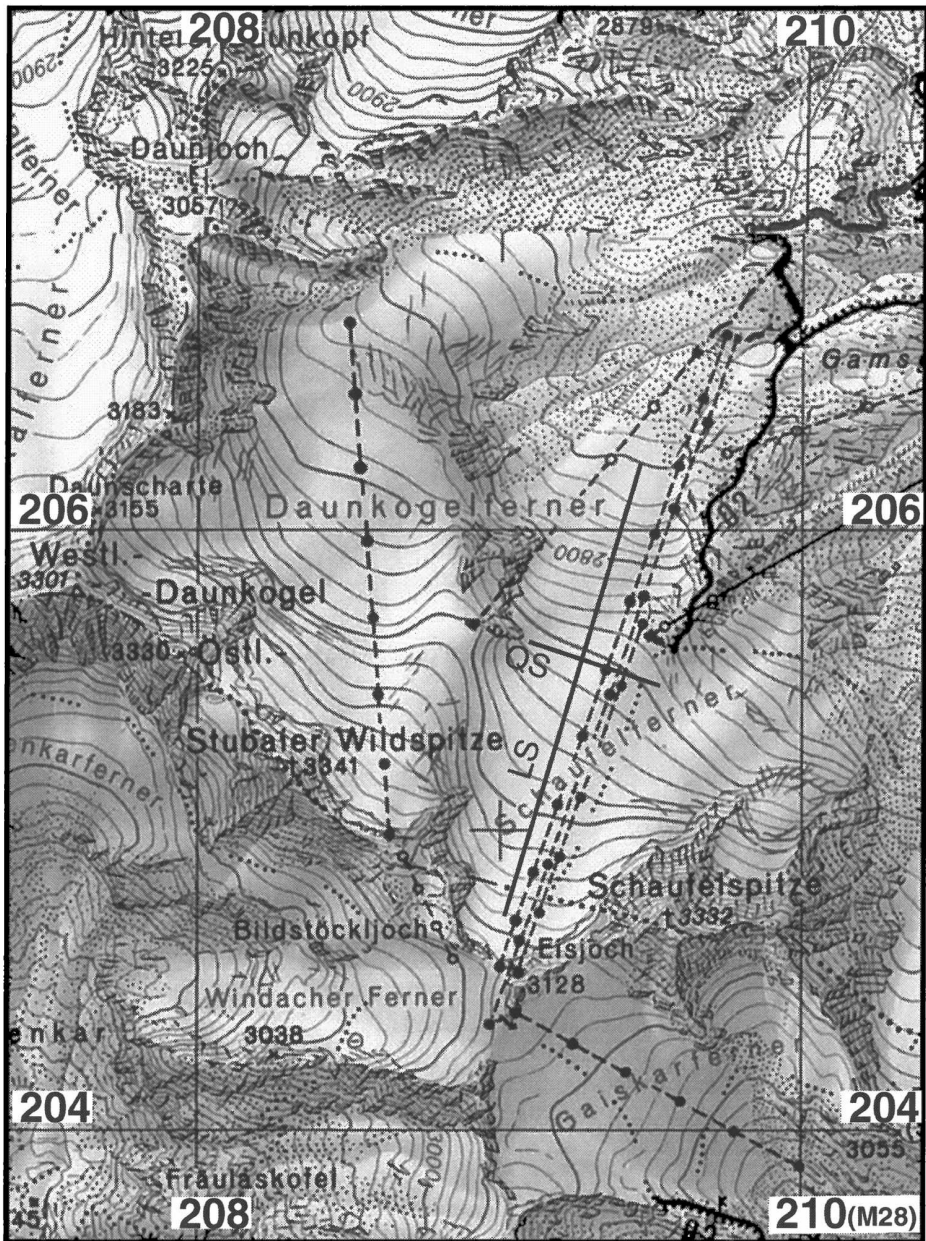


Abbildung 2.116. Karte des Schaufelferners (Stubai Alpen). Quelle: ÖK 1:50 000 BEV. Gletscherstand 1992.

Der Schaufelferner ($46^{\circ} 59,1' N$, $11^{\circ} 07,1' O$) in den Stubai Alpen hatte 1989 ein Fläche von $1,5 \text{ km}^2$. Er ist nach Nordosten exponiert. Das Eis aus dem flachen Firngebiet teilt sich in zwei Zungen, von denen die westliche die dickere ist. Im Bereich dieser Hauptzunge fließt Eis von den Flanken der Stubaier Wildspitze (Daunkogelferner) zu. Ein kleineres Firnbecken unterhalb der Schaufelspitze mündet in die östliche Zunge ein. In diesem Bereich wurden keine Eisdickenmessungen durchgeführt. Die Eisdicke wurde 1995, 1997, 2000 und 2002 an insgesamt 115 Stellen gemessen.

Der Untergrund des Schaufelferners ist nur schwach strukturiert; das Längsprofil sowie das Querprofil zeigen Eistiefen zwischen 40 und 60 m.

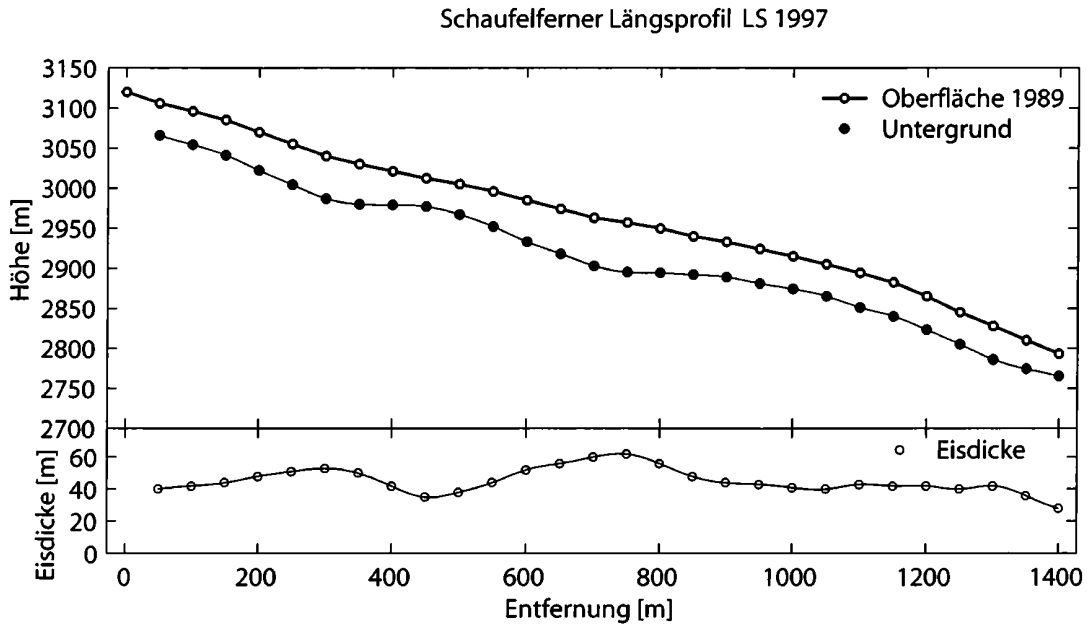


Abbildung 2.117. Gletscheroberfläche 1989 und Eisdicken entlang des Längsprofils LS Schaufelferner.

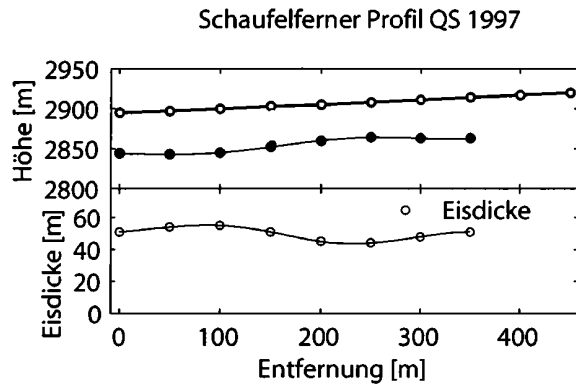


Abbildung 2.118. Gletscheroberfläche 1989 und Eisdicken entlang des Querprofils QS Schaufelferner.

2.14 Fernaufener

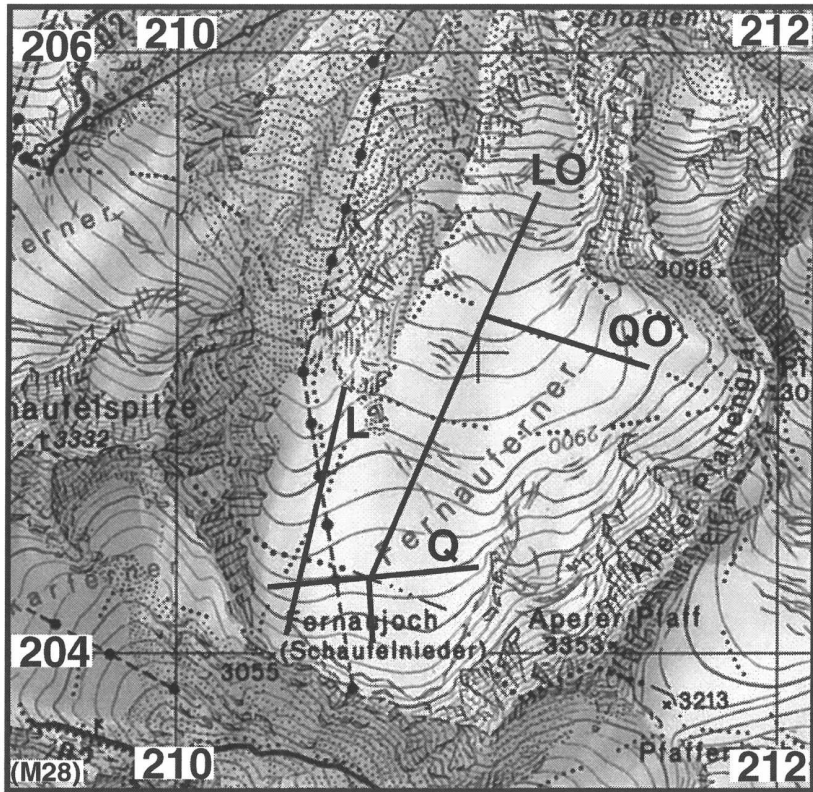


Abbildung 2.119. Karte des Fernaufeners (Stubai Alpen). Quelle: ÖK 147 1:50 000 BEV, Gletscherstand 1997.

Der Fernaufener in den Stubai Alpen (Abb. 2.119) ist mit einer Fläche von $1,9 \text{ km}^2$ der größte Gletscher des Stubai Gletscherschigebietes. Wirtschaftlich genutzt wird nur der westliche Teil des Gletschers.

In den Jahren 1995 und 1999 wurde die Eisdicke an 98 Punkten in zwei Längs- und zwei Querprofilen im östlichen bzw. westlichen Teil gemessen.

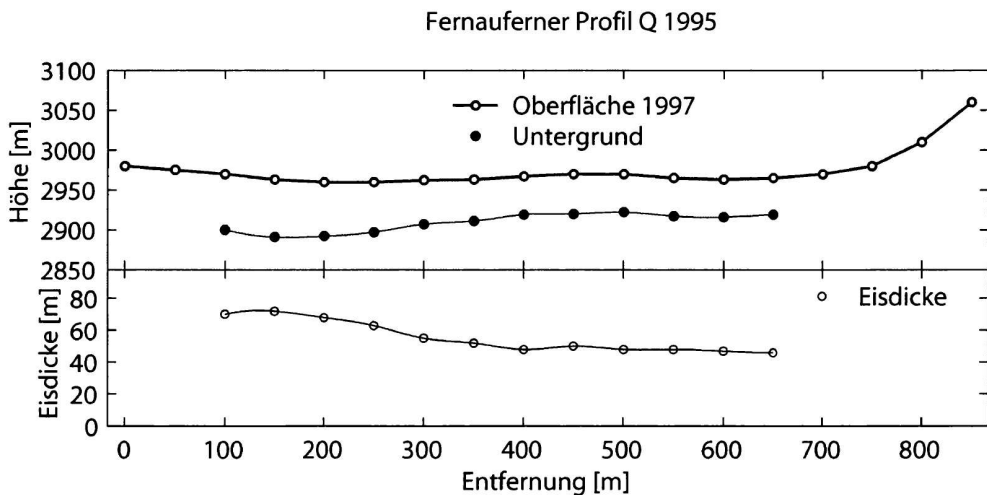


Abbildung 2.120. Gletscheroberfläche 1997 und Eisdicken 1995 entlang des Querprofils Fernaufener West (Q).

Das westliche Querprofil Q (Abb. 2.120) wurde im Firngebiet auf ca. 2970 m Höhe gemessen. Am orographisch linken Rand ist der Gletscher mit 72 m am mächtigsten; hier befindet sich auch der tiefste Punkt der Oberfläche. Richtung Osten nimmt die Eisdicke auf 46 m ab.

Die Eisdicke entlang des westlichen Längsprofils L (Abb. 2.122) ist mit einem Maximum von 51 und einem Mittelwert von 41 m im Vergleich zum Daunkogelferner gering. An der Stelle des Maximums auf ca. 2970 m ist der ansonsten recht homogene Gletscher etwas übertieft.

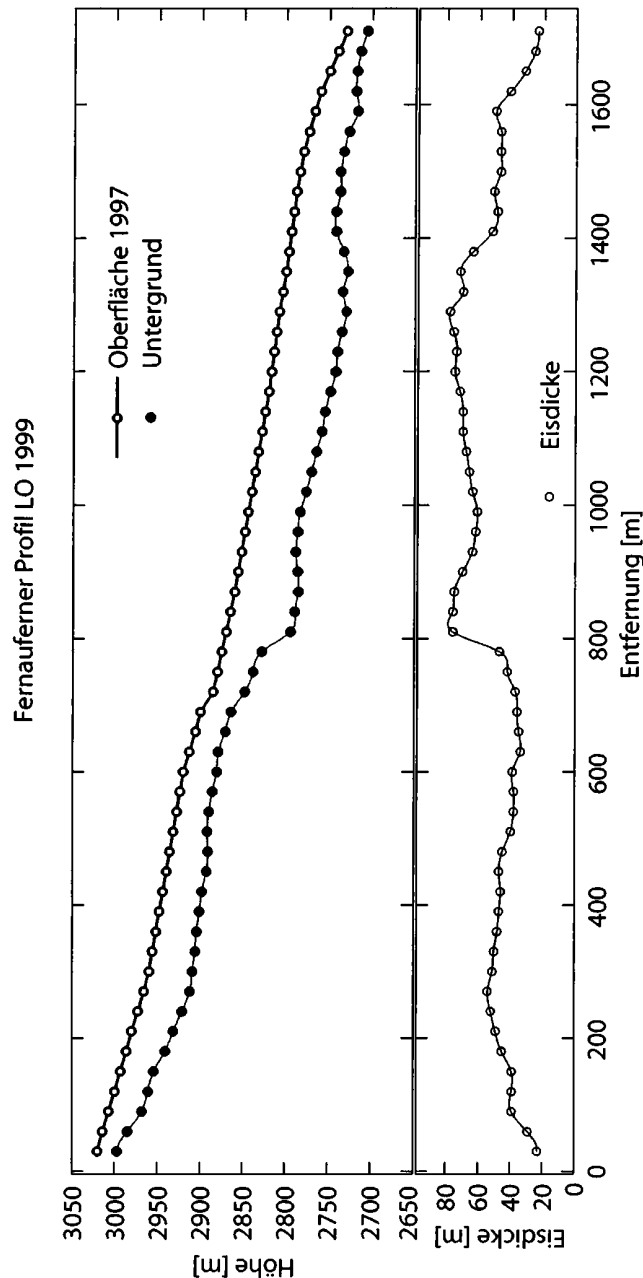


Abbildung 2.121. Gletscheroberfläche 1997 und Eisdicken 1995 entlang des östlichen Längsprofils LO am Fernauferner.

Im östlichen Teil des Fernaufeners wurden ein Längs- und ein Querprofil gemessen (Abb. 2.121, 2.122 und Abb. 2.123). Im oberen Teil des Längsprofils sind die Eisdicken mit einem Maximum von 54 m eher gering. Auf einer Höhe von 2880 m beträgt die Eisdicke nur 34 m. Weiter unten im Profil befindet sich ein Becken mit Eisdicken bis zu 78 m. Hier kommt das Profil in den Hauptstrom des Eises aus den Firnbecken unter dem Aperen Pfaffengrat.

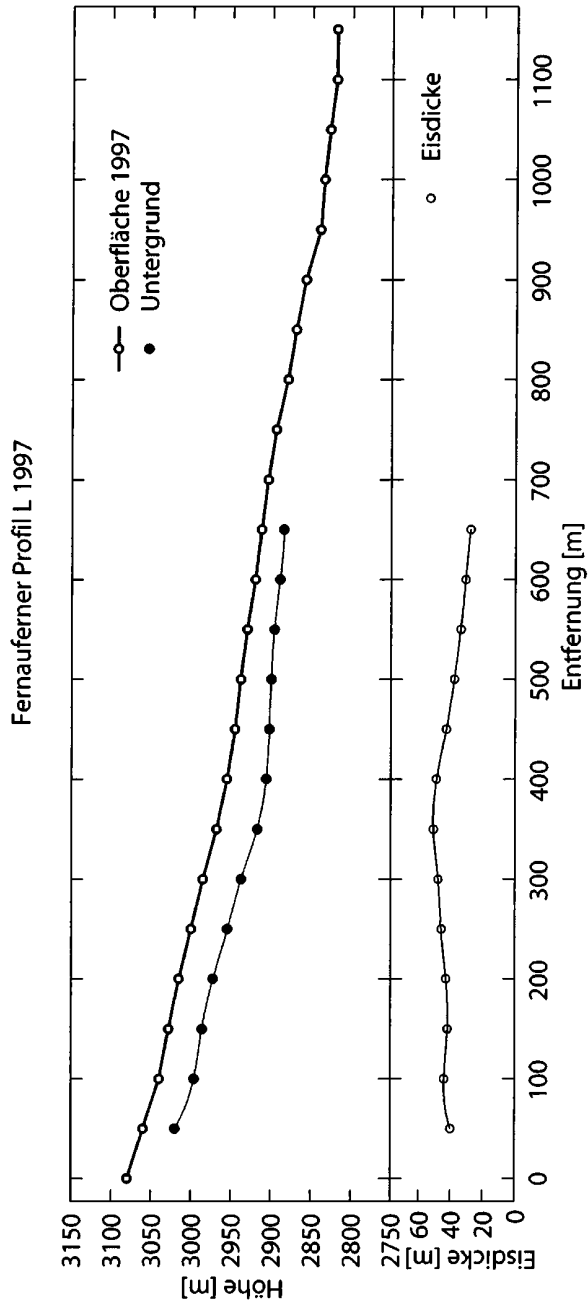


Abbildung 2.122. Gletscheroberfläche 1997 und Eisdicken 1995 entlang des westlichen Längsprofils L am Fernaufener.

Diese Struktur ist auch aus dem östlichen Querprofil QO (Abbildung 2.123) ersichtlich. In diesem Profil ist das Becken am unteren, orographisch linken Rand des Gletschers bis zu 88 m tief.

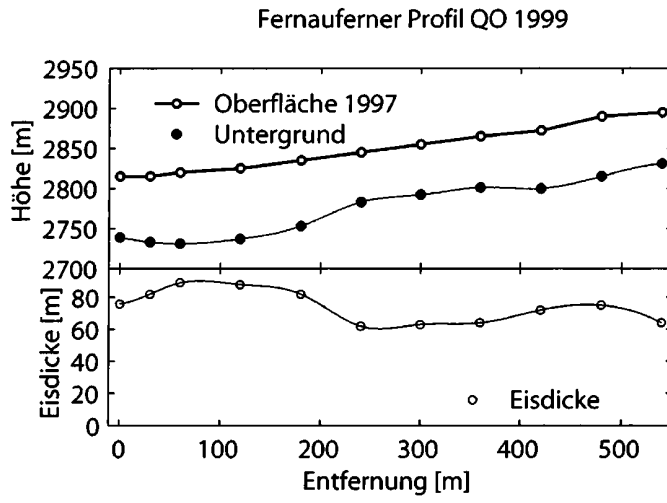


Abbildung 2.123. Gletscheroberfläche 1997 und Eisdicken 1995 entlang des Querprofils Fernaufener Ost (QO).

2.15 Gaißkarferner

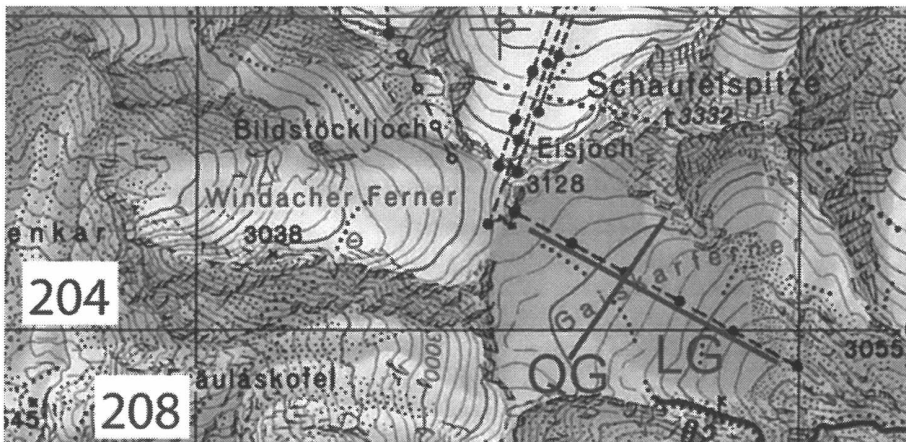


Abbildung 2.124. Karte des Gaißkarfernens (Stubai Alpen). Quelle: ÖK 147 1:50 000 BEV, Gletscherstand 1997.

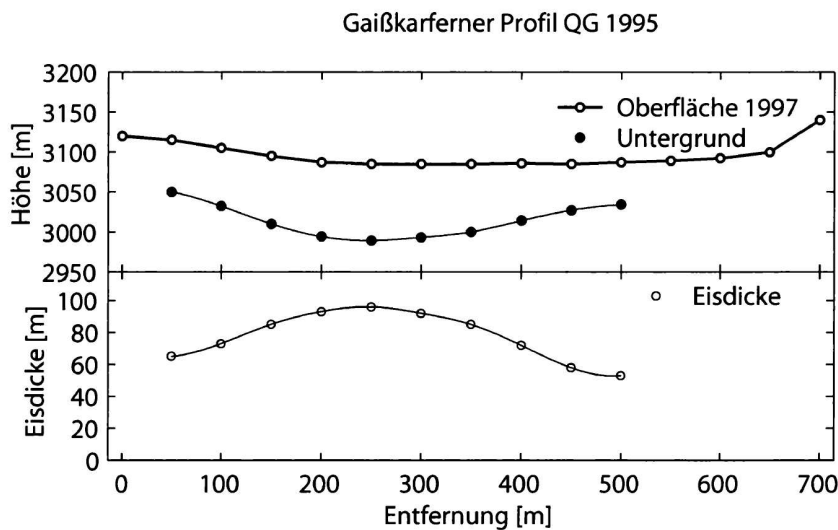


Abbildung 2.125. Gletscheroberfläche 1997 und Eisdicken 1995 entlang des Querprofils QG Gaißkarferner.

Der Gaißkarferner ist Teil des Stubai Gletscherschigebietes und hat eine Fläche von 0,5 km². Die Lage der Radarprofile ist in Abbildung 2.124 eingetragen. Die Eisdicke wurde 1995 an 28 Stellen gemessen. Der Gaißkarferner ist südöstlich exponiert. Er hängt über ein Joch mit nur mehr sehr geringer Eismächtigkeit mit dem Windacher Ferner zusammen. Im eher flachen Firnbecken nimmt die Eisdicke in Richtung Süden und Osten zu, während am nördlichen und westlichen Rand sowie an der Zunge die Eisdicken eher gering sind. Das Längsprofil (Abbildung 2.126) des Gaißkarfernens zeigt eine leichte Vertiefung mit einer maximalen Eisdicke von 73 m auf 3070 m Seehöhe. Im zentralen Bereich des Querprofils (Abbildung 2.125), das eine ausgeprägte Trogform zeigt, wird eine maximale Eisdicke von 96 m erreicht. Das zweite Firnbecken unterhalb der Schaufelspitze (Abbildung 2.124) ist nicht mehr mit dem Hauptgletscher verbunden.

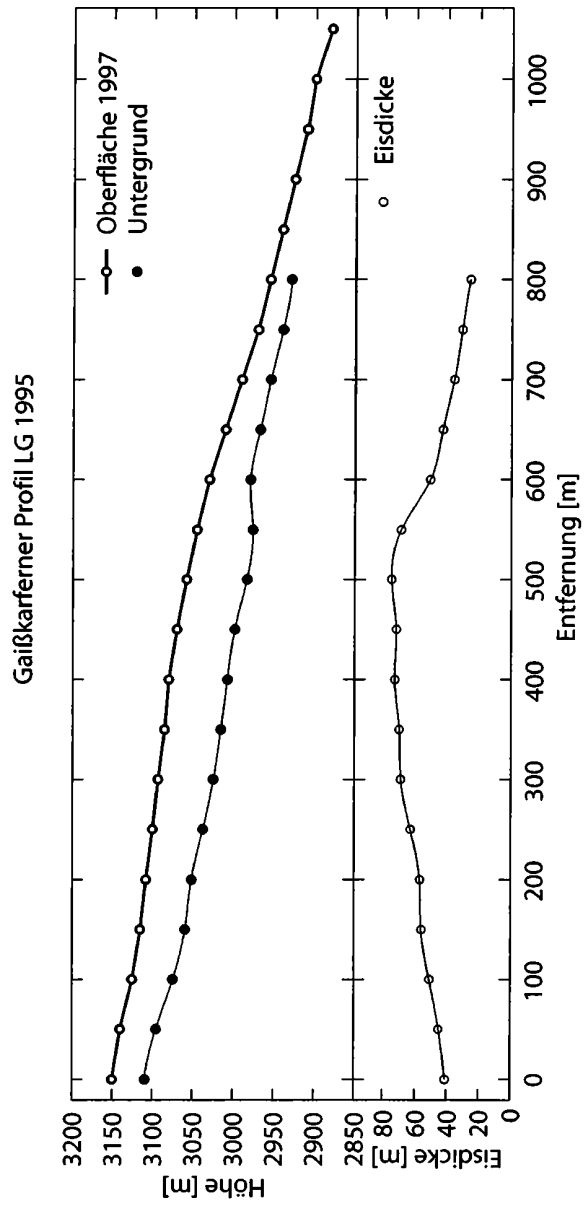


Abbildung 2.126. Gletscheroberfläche 1997 und Eisdicken 1995 entlang des Längsprofils LG Gaißkarferner.

2.16 Tuxer Ferner (Gefrorene Wand Kees)

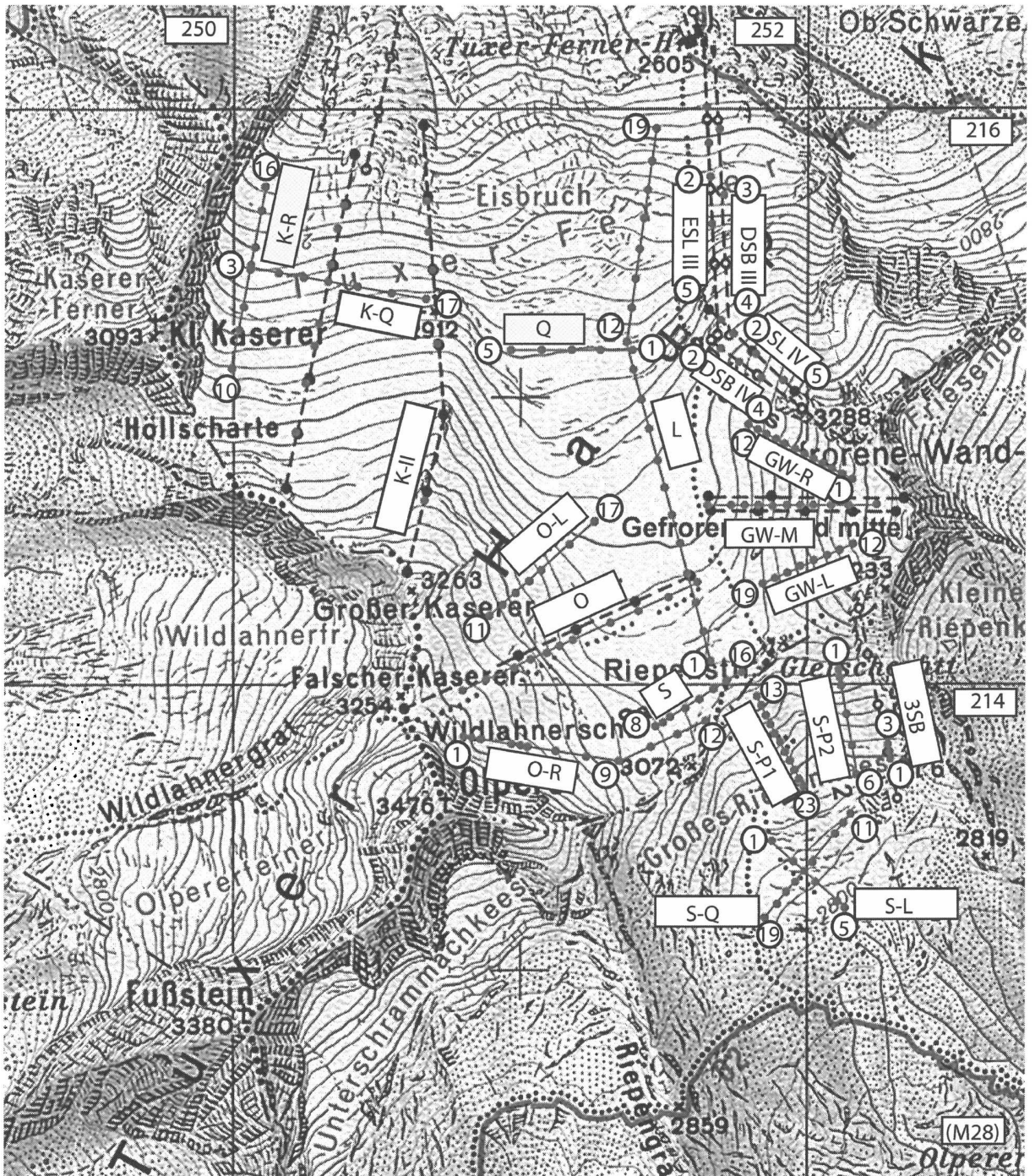


Abbildung 2.127. Karte des Tuxer Ferners (Gefrorenen Wand Kees, Zillertaler Alpen) mit Radarprofilen. Quelle: BEV ÖK Nr. 149 1:50 000. Gletscherstand 1986. Die Radarprofile am Riepenkees werden in Kapitel 2.17 behandelt.

Der Tuxer Ferner (auch als Gefrorene Wand Kees benannt) in den Zillertaler Alpen ($47^{\circ} 4,4' N$ $11^{\circ} 41,1' O$) ist nach Norden exponiert und hatte 1986 eine Fläche von $4,4 \text{ km}^2$. Die Eisdicke des Tuxer Ferners wurde erstmals 1969 mit Refraktionsseismik gemessen [11].

Im Jahr 1998 wurde die Eisdicke an 134 Stellen mit dem Radarecholot ermittelt. Das vom Untergrund reflektierte Signal war schwer zu identifizieren. Gründe dafür können Verluste durch feuchten Schnee, Mehrfachreflexionen an inneren Strukturen oder die Rauigkeit des Untergrundes

sein [34]. Die Eisdicken sind in den Abbildungen 2.128 bis 2.132 sowie der Tabelle 2.5 angegeben. Die größten Eisdicken wurden im Längsprofil L und im Querprofil Q mit etwa 100 m gemessen.

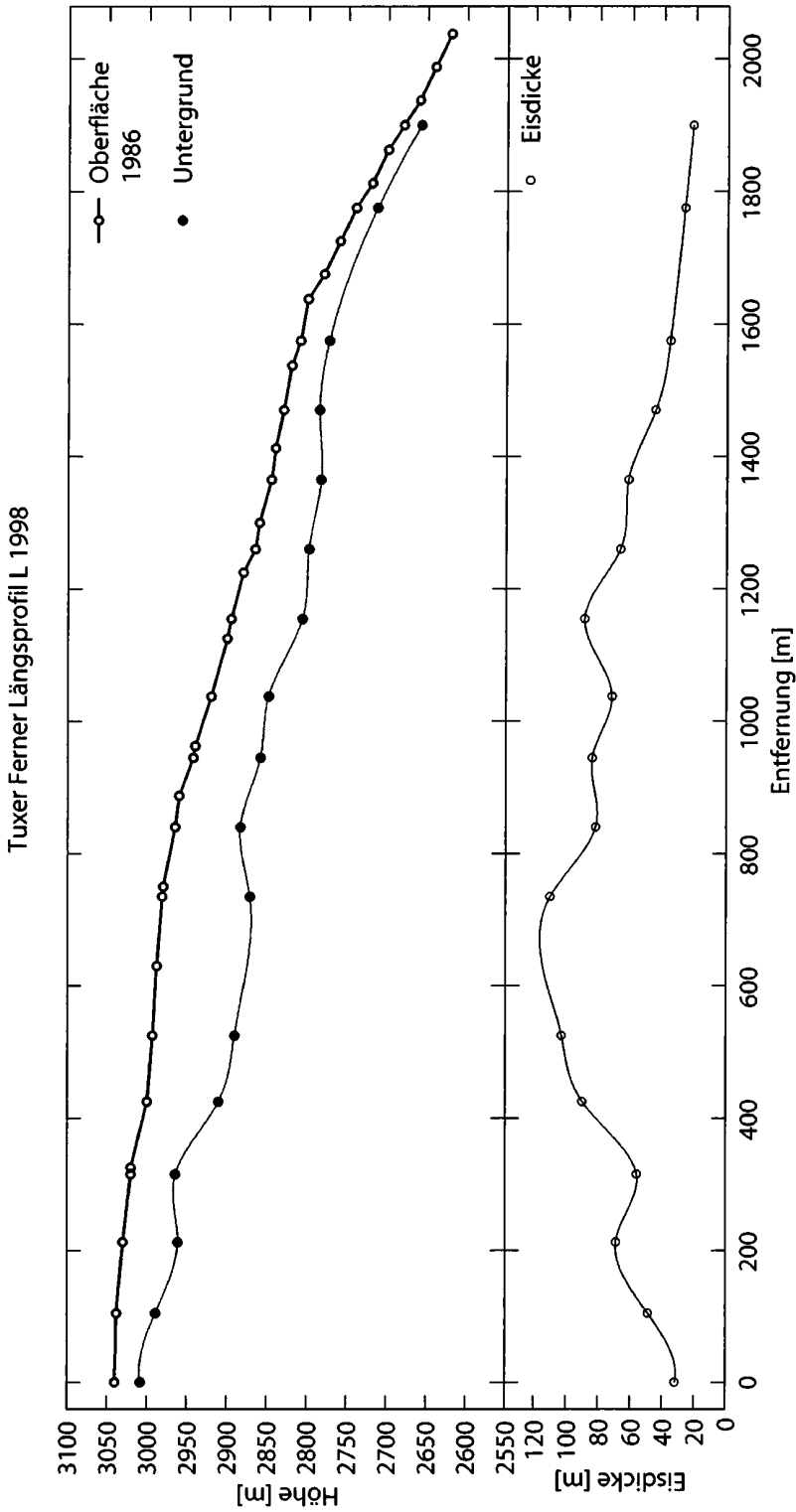


Abbildung 2.128. Gletscheroberfläche 1986 und Eisdicken 1998 entlang des Längsprofils L am Tuxer Ferner.

Tuxer Ferner GW-M 1998

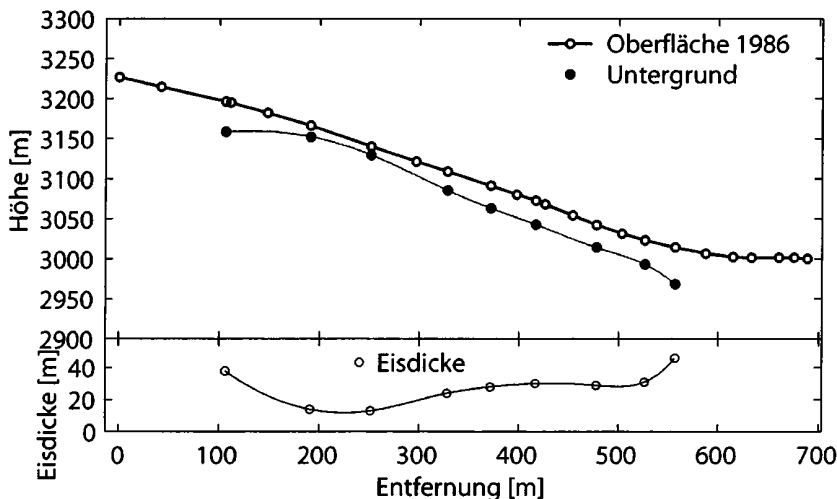


Abbildung 2.129. Gletscheroberfläche 1986 und Eisdicken 1998 entlang des Profils Gefrorene Wand Spitze Mitte (GW-M) am Tuxer Ferner.

Tuxer Ferner K II 1998

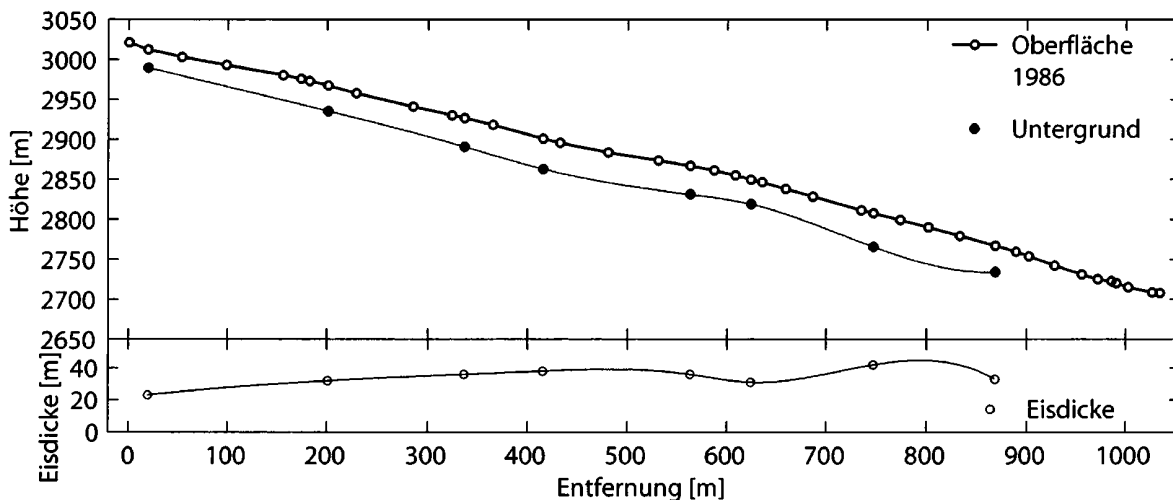


Abbildung 2.130. Gletscheroberfläche 1986 und Eisdicken 1998 entlang des Profils K II am Tuxer Ferner.

Profil	Nr.	d [m]	Profil	Nr.	d [m]	Profil	Nr.	d [m]	Profil	Nr.	d [m]	Profil	Nr.	d [m]	Profil	Nr.	d [m]
DSB III	4	12	GW-R	1	23	K-Q	18	25	K-R	15	56	O-R	1	45	S	8	41
DSB III	3	25	GW-R	2	22	K-Q	19	38	K-R	16	50	O-R	2	49	S	9	42
DSB IV	2	8	GW-R	3	30	K-Q	20	46	O-R	3	50	O-R	3	50	S	10	41
DSB IV	3	11	GW-R	4	26	K-Q	21	36	O-L	11	32	O-R	4	50	S	11	35
DSB IV	4	12	GW-R	5	29	K-Q	22	41	O-L	12	32	O-R	5	42	S	12	35
			GW-R	6	27	K-Q	23	38	O-L	13	30	O-R	6	43	S	13	51
			GW-R	7	41	K-Q	24	54	O-L	14	28	O-R	7	42	S	14	50
			GW-R	8	43	K-R	10	28	O-L	15	25	O-R	8	48	Q	1	90
ESLII	2	15	GW-R	9	19	K-R	11	28	SL-IV	2	11	O-R	9	47	Q	2	95
ESLII	3	25	GW-R	10	19	K-R	12	27	SL-IV	3	12	O-R	10	41	Q	3	102
ESLII	4	10	GW-R	11	21	K-R	13	37	SL-IV	4	13	O-R	11	39	Q	4	81
ESLII	5	15	GW-R	12	20	K-R	14	56	L-IV	5	12	O-R	12	43			

Tabelle 2.5. Tabelle der Eisdicken am Tuxer Ferner. An nicht in dieser Tabelle angeführten, aber in Abbildung 2.127 eingezeichneten Stellen konnte das Radarsignal nicht interpretiert werden. d...Eisdicke, Nr...Nummer des Meßpunktes laut Karte.

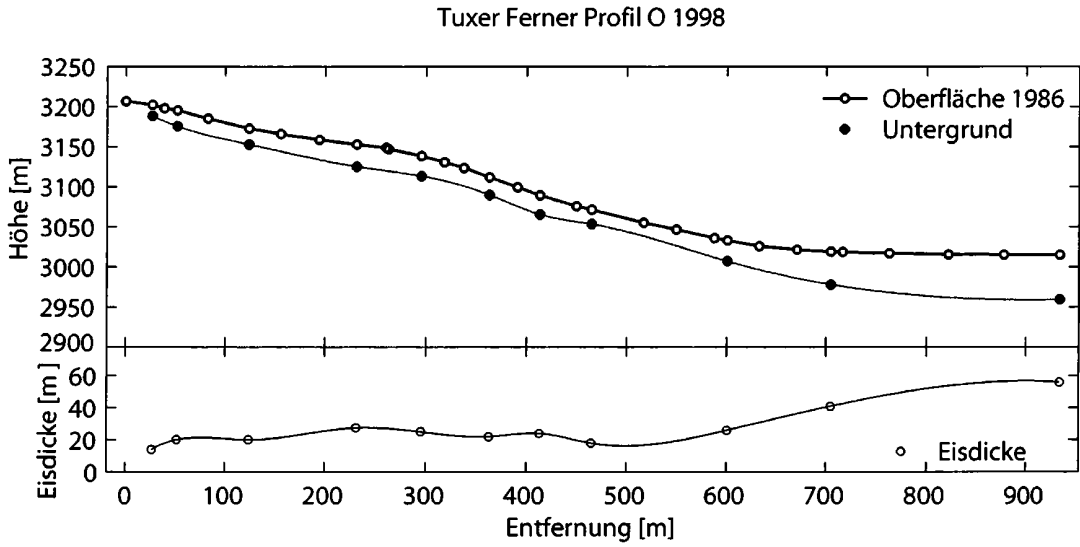


Abbildung 2.131. Gletscheroberfläche 1986 und Eisdicken 1998 entlang des Profils O Richtung Falscher Kaserer am Tuxer Ferner.

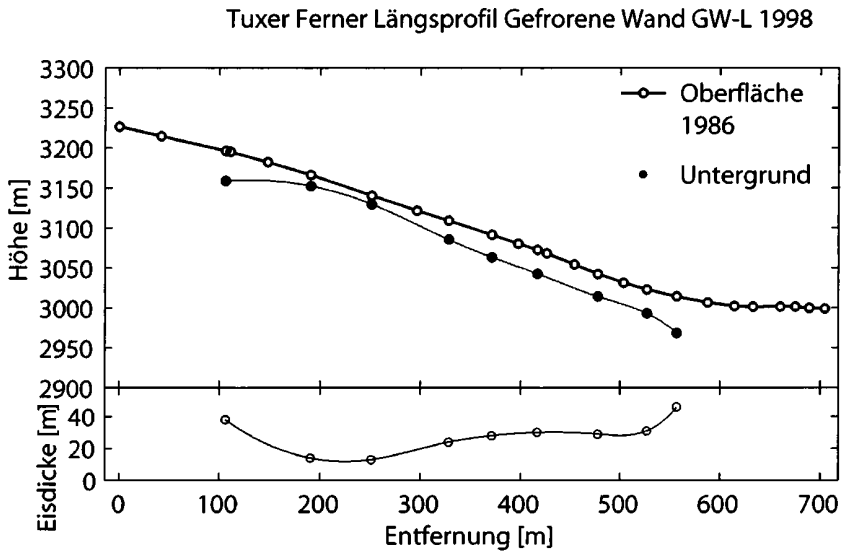


Abbildung 2.132. Gletscheroberfläche 1986 und Eisdicken 1998 entlang des Profils GW-L unterhalb der Gefrorene-Wand-Spitzen.

2.16.1 Frühere Eisdickenmessungen

Im Sommer 1969 wurden am Tuxer Ferner refraktionsseismische Eisdickenmessungen durchgeführt [11]. Die Lage der sechs vermessenen Profile ist in Abbildung 2.133 angegeben. Die 1969 ermittelten Eisdicken sind aus den Abbildungen 2.134 bis 2.136 ersichtlich. In diesen Abbildungen sind auch die Geschwindigkeiten der Longitudinalwellen angegeben.

Die Seismikprofile liegen anders als die Radarprofile. Die Eistiefen sind also nicht direkt vergleichbar. Vergleicht man aber die 1969 ermittelte Karte der Eisdicken [11] mit den Eisdicken aus der Radarmessungen, findet man Unterschiede von bis zu 40 m. Die seismisch ermittelten Eistiefen scheinen zu gering, sowohl was die größten ermittelten Eistiefen betrifft als auch z.B. das Gebiet kleinen Kaserers. Die dort seismisch ermittelten Eisdicken sind so gering, dass der Gletscher heute schon abgeschmolzen sein müsste.

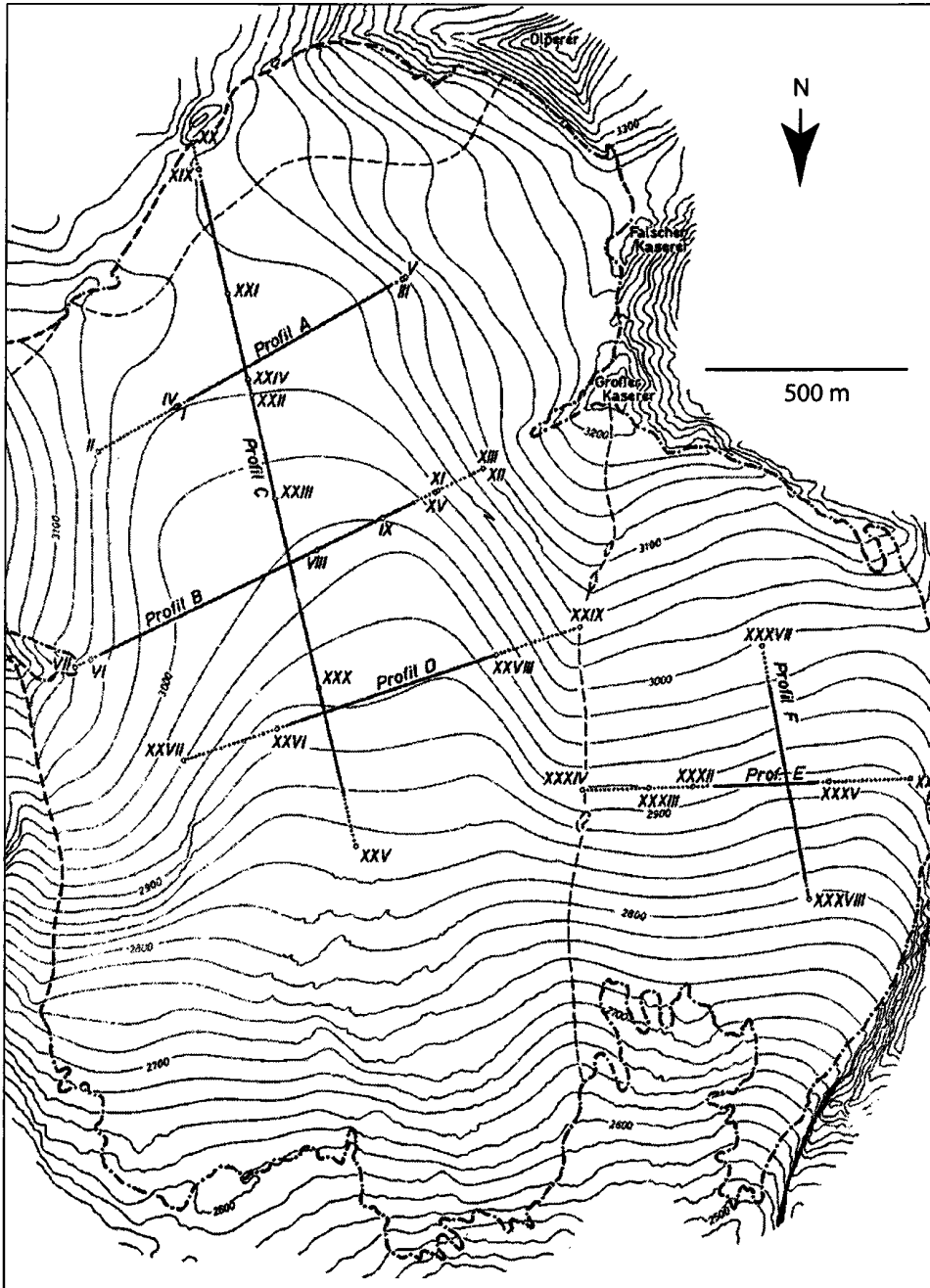


Abbildung 2.133. Ausschnitt aus der Karte des Tuxer Ferners, die für die refraktionsseismischen Eisdickenmessungen im Sommer 1969 benutzt wurde [11]. Die Lage der Seismikprofile ist eingezeichnet.

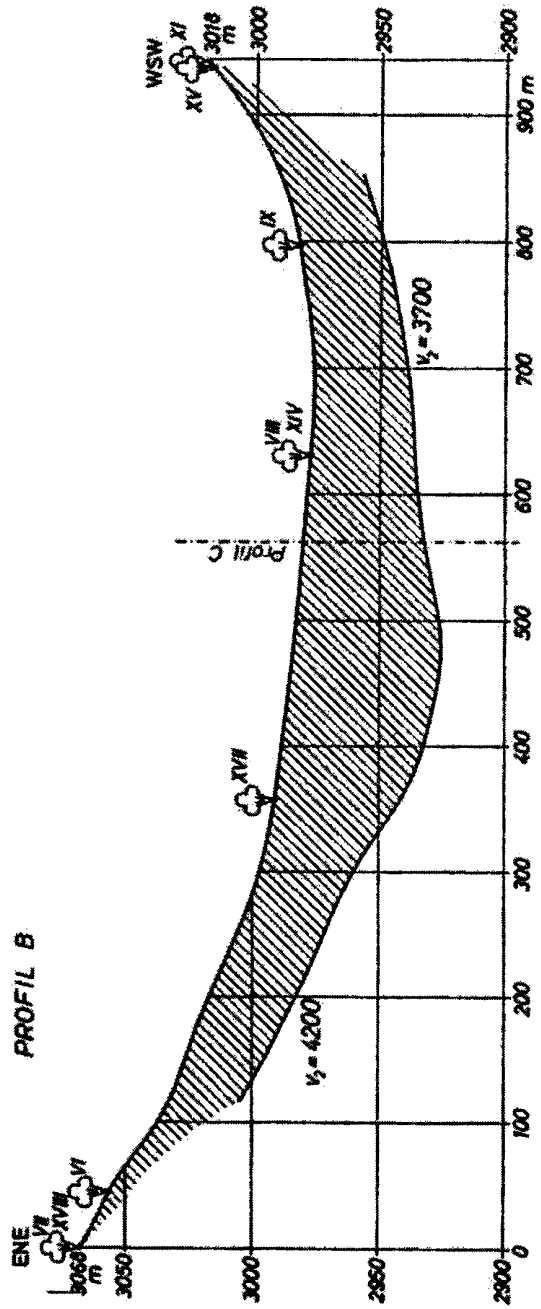
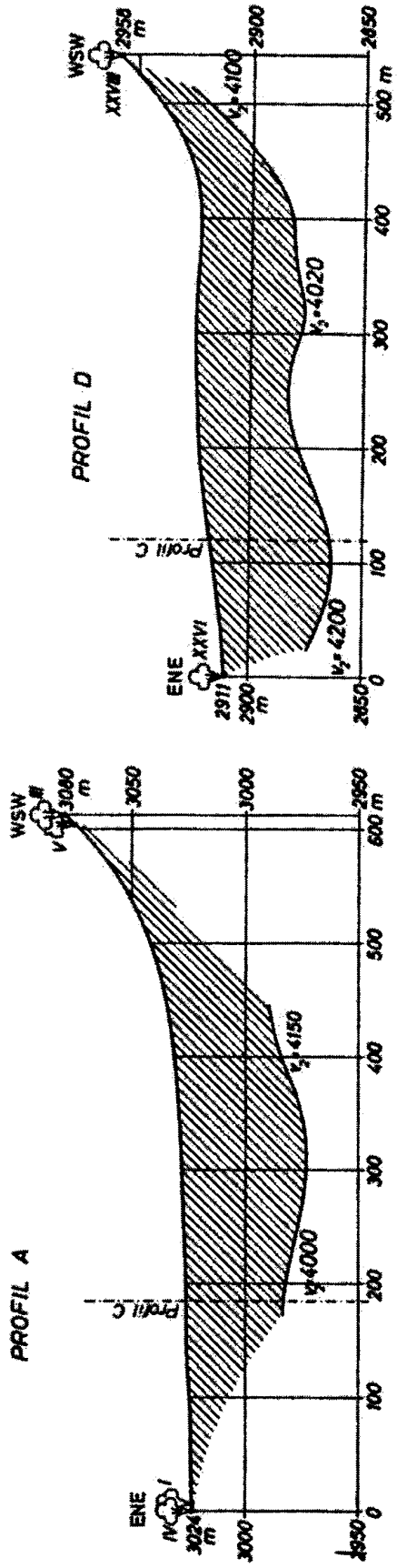


Abbildung 2.134. Eisdicken in den Seismikprofilen A, B und D (1969) nach [11].

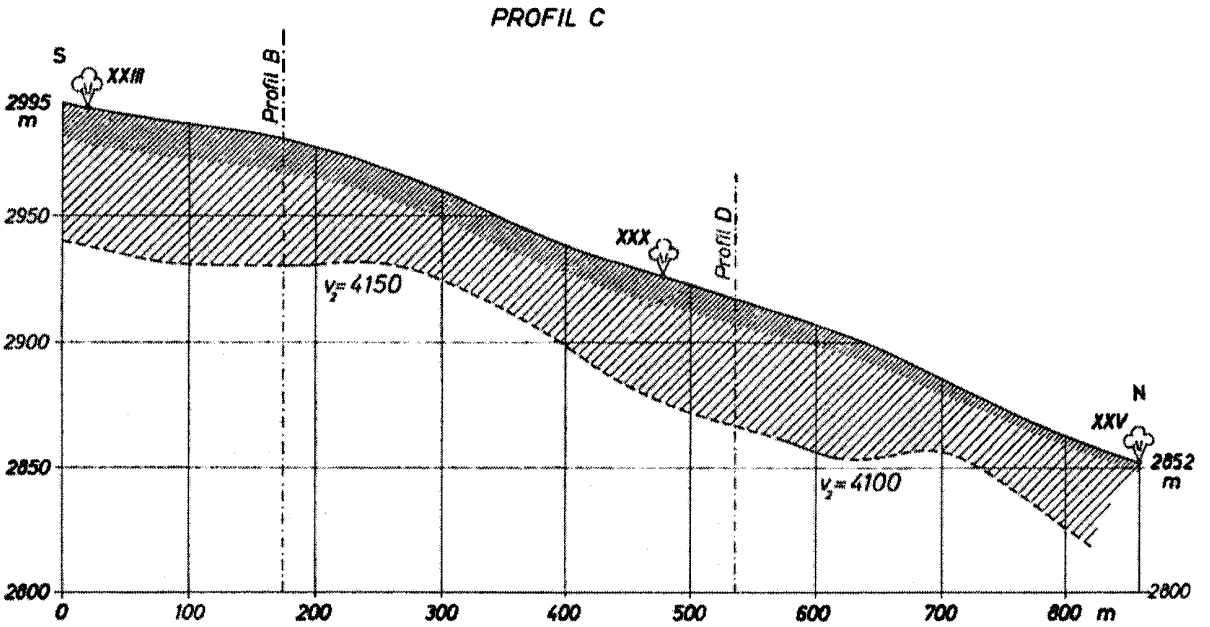
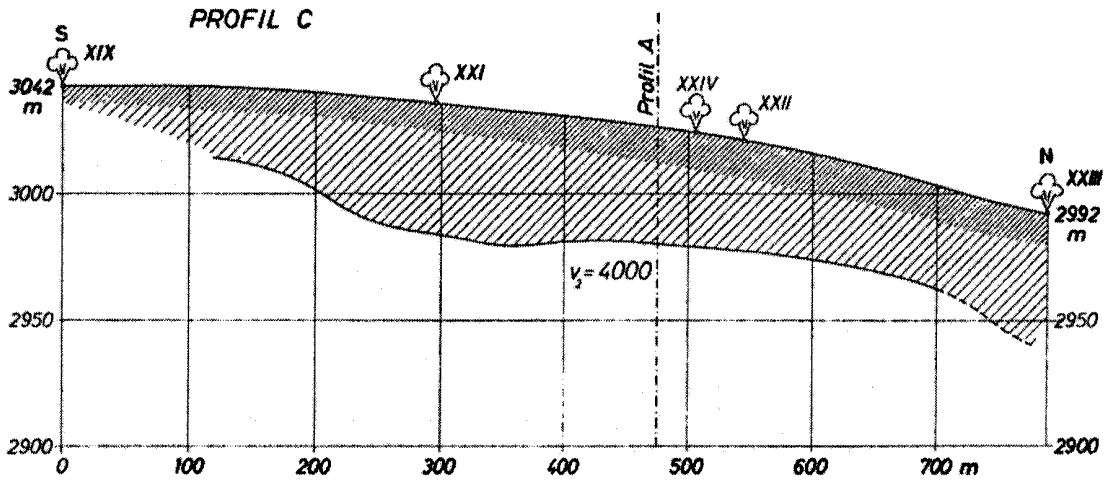


Abbildung 2.135. Eisdicken im Seismikprofil C (1969) nach [11].

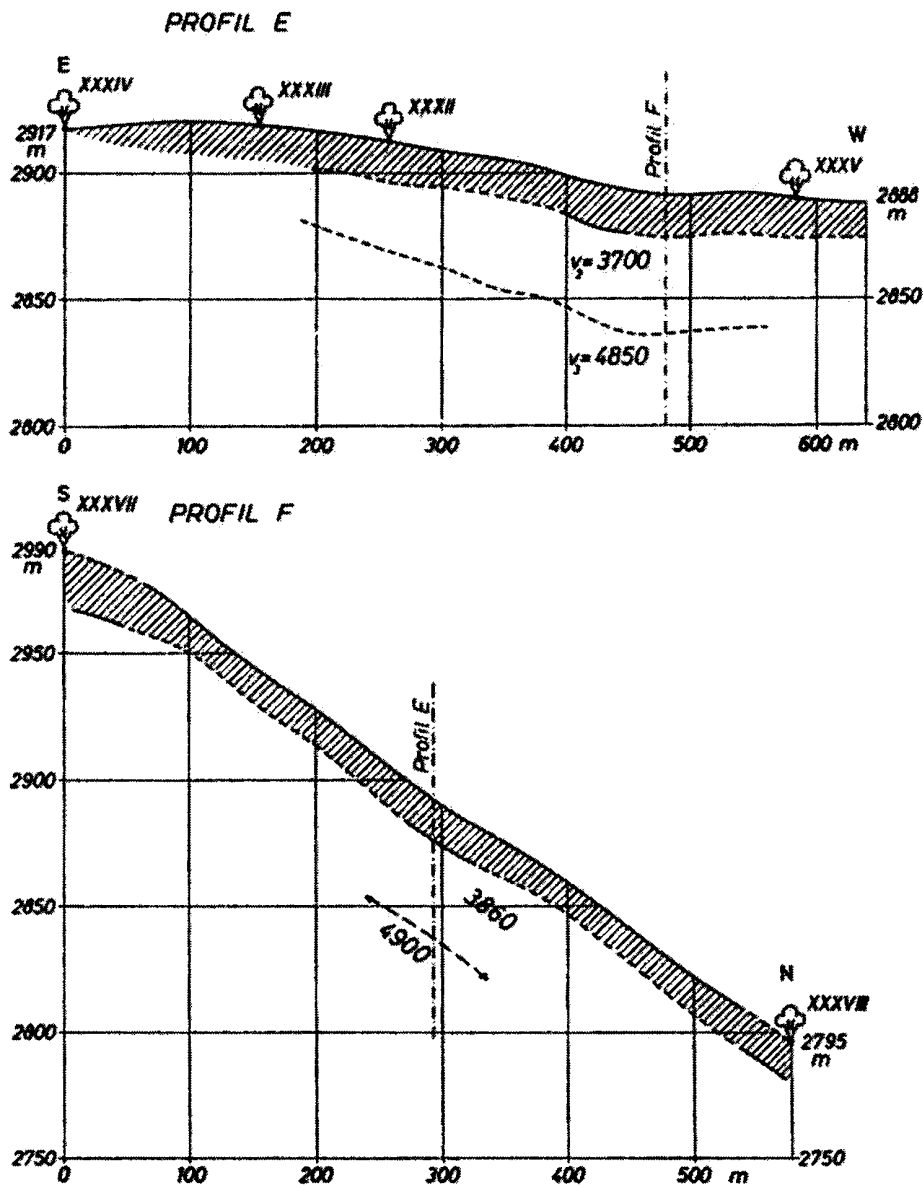


Abbildung 2.136. Eisdicken in den Seismikprofilen E und F (1969) nach [11]

2.17 Großes Riepenkees

Das Große Riepenkees (47° 3,2' N, 11° 40,5' O) in den Zillertaler Alpen hat eine Fläche von 0,7 km² und ist Teil des Schigebietes Hintertuxer Gletscher. Im Jahr 1998 wurde die Eisdicke an 45 Stellen gemessen. Die Eisdicken an den in Abbildung 2.137 eingezeichneten Stellen sind in Tabelle 2.6 angeführt. Die größte Eisdicke auf diesem nach Südosten exponierten Gletscher beträgt 49 m und befindet sich in der Mitte der Zunge.

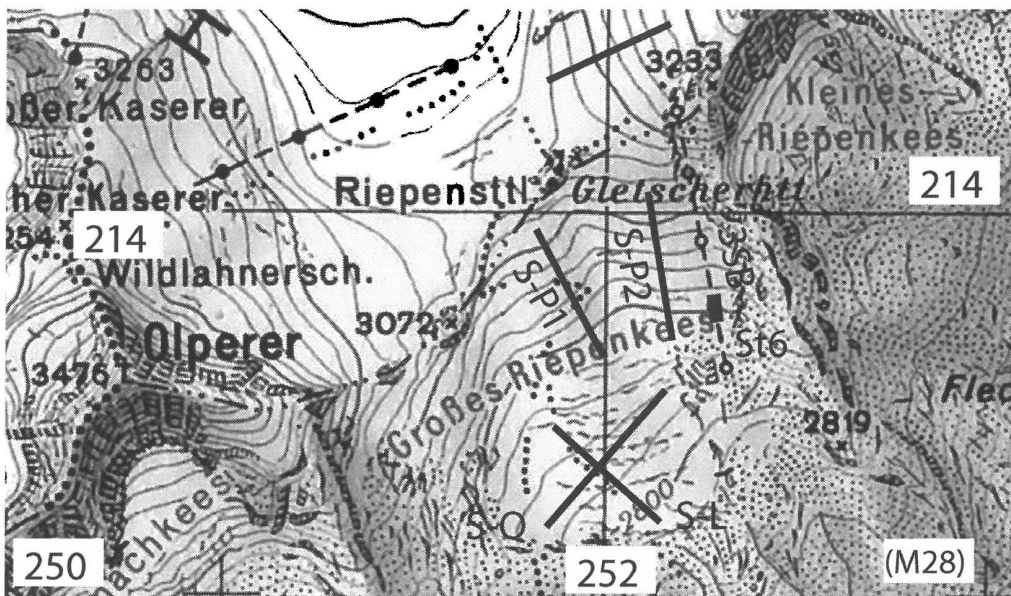


Abbildung 2.137. Karte des Großen Riepenkees (Zillertaler Alpen). Quelle: BEV ÖK Nr. 149 1:50 000. Gletscherstand 1986.

Profil	Nr.	d [m]	Profil	Nr.	d [m]	Profil	Nr.	d [m]	Profil	Nr.	d [m]
			S-P1	22	45	S-L	3	44	S-Q	18	41
S-P1	13	25	S-P1	23	47	S-L	4	31	S-Q	19	37
S-P1	14	30	S-P2	1	37	S-L	5	23	3SB	1	13
S-P1	15	27	S-P2	2	31	S-Q	12	9	3SB	2	15
S-P1	16	29	S-P2	3	27	S-Q	13	27	3SB	3	20
S-P1	17	30	S-P2	4	25	S-Q	14	42	Q	1	90
S-P1	19	34	S-P2	5	21	S-Q	15	49	Q	2	95
S-P1	20	36	S-L	1	36	S-Q	16	43	Q	3	102
S-P1	21	38	S-L	2	47	S-Q	17	45	Q	4	81

Tabelle 2.6. Tabelle der Eisdicken in den Profilen am Großen Riepenkees. An nicht in dieser Tabelle angeführten, aber in Abbildung 2.137 eingezeichneten Stellen konnte das Radarsignal nicht interpretiert werden.

2.18 Stubacher Sonnblickkees

Das Stubacher Sonnblickkees ($47^{\circ} 07,9' N$, $12^{\circ} 36,0' O$) in der Glocknergruppe ist nach Osten exponiert. 1992 bedeckte das Stubacher Sonnblickkees eine Fläche von $1,6 \text{ km}^2$. Die Zunge ist nur schwach ausgeprägt. Das Firngebiet zwischen Granatspitze, Stubacher Sonnblick und Hochfürlegg (Hochfilleck) ist relativ flach und wird nach unten durch eine Spaltenzone begrenzt. Der Kamm, der das Firngebiet umgibt, überragt den Gletscher nur wenig. Das Schmelzwasser des Sonnblickkeeses fließt in den Weißsee, der von den Österreichischen Bundesbahnen zur Energiegewinnung genutzt wird. Die Massenbilanz des Stubacher Sonnblickkeeses wird seit 1960 von H. Slupetzky [45][46] gemessen. Die Eisdicke wurde 1998 in Zusammenarbeit mit H. Slupetzky an 82 Punkten ermittelt.

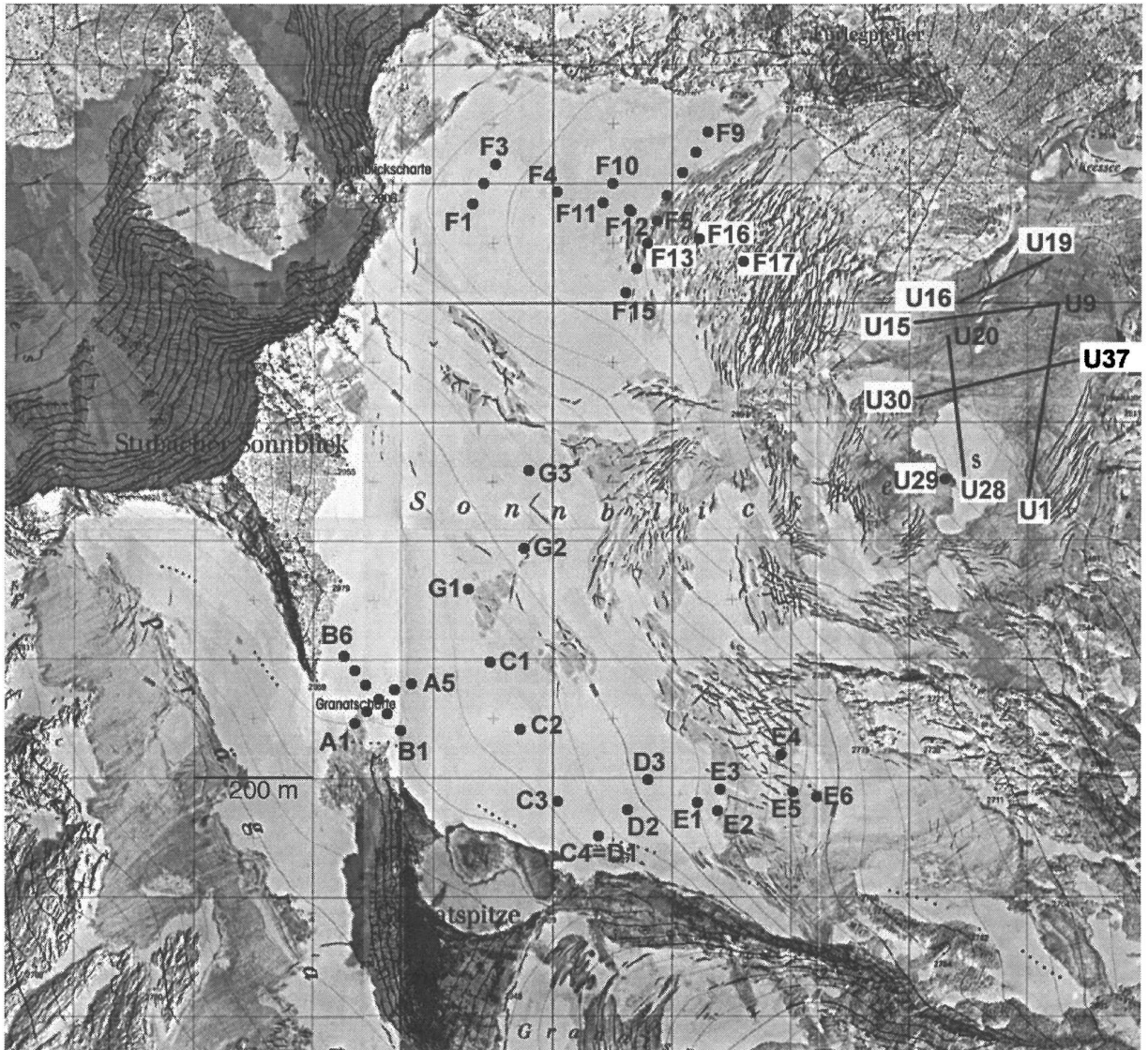


Abbildung 2.138. Karte des Sonnblickkeeses (Granatspitze). Quelle: ÖK 1:50 000 BEV.

Im Bereich der Granatscharte zwischen Stubacher Sonnblick und Granatspitze wurde ein Längs- (A) und ein Querprofil (B) gemessen. Der Gletscher ist hier um die 40 m tief, ebenso wie im orografisch rechten Teil des Firngebiets (Profil G1-C4). Erst orografisch rechts des Eisbruchs, am Beginn der südlichen Zunge, nimmt die Eisdicke zu. In diesem Becken am Punkt E3 erreicht die Eisdicke 77 m. Weiter Richtung Gletscherende nimmt die Eisdicke rasch wieder auf etwa 30 m ab. Im zentralen Teil des Firnplateaus unterhalb des Stubacher Sonnblicks (G2, G3) ist der Gletscher um 50 m dick. Zwischen Sonnblickscharte und Hochfürlegg befindet sich der tiefste Teil

des Stubacher Sonnblickkees. Oberhalb des Eisbruchs bei Punkt F13 auf 2745 m ist der Gletscher bis zu 142 m dick.

Im orografisch rechten Teil der Zunge (Punkte U9-U37) erreicht die Eisdicke 67 m (U28), der orografisch linke Teil der Zunge ist zwischen 22 und 47 m tief.

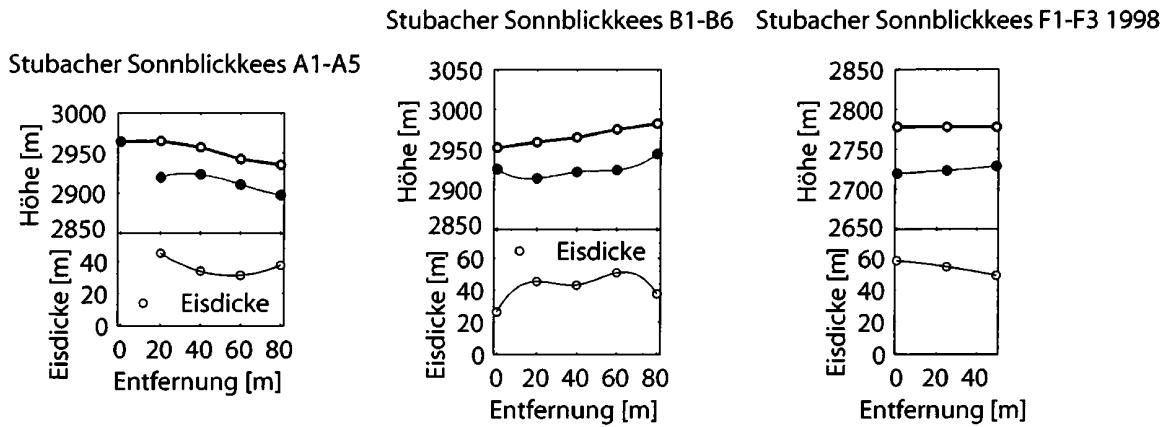


Abbildung 2.139. Gletscheroberfläche 1992 und Eisdicken 1998 entlang der Profile A1-A5, B1-B6, und F1-F3 am Stubacher Sonnblickkees.

Punkt	Dicke [m]	Punkt	Dicke [m]	Punkt	Dicke [m]	Punkt	Dicke [m]	Punkt	Dicke [m]
D2	57	U1	28	U9	28	U18	27	U27	65
D3	59	U2	55	U10	31	U19	22	U28	67
E1	68	U3		U11	37	U20	35	U30	
E2	68	U4	52	U12	40	U21	33	U31	36
E3	77	U5	45	U13	47	U22	37	U32	47
E4	38	U6	37	U14	36	U23	40	U33	40
E5	32	U7	38	U15	35	U24	40	U34	39
E6	34	U8	33	U16	35	U25	48	U35	36
G2	55	U9	28	U17	27	U26	55	U36	38
G3	49							U37	37

Tabelle 2.7. Eisdicke 1998 an den in der Karte (Abbildung 2.138) eingezeichneten Meßpunkten am Sonnblickkees.

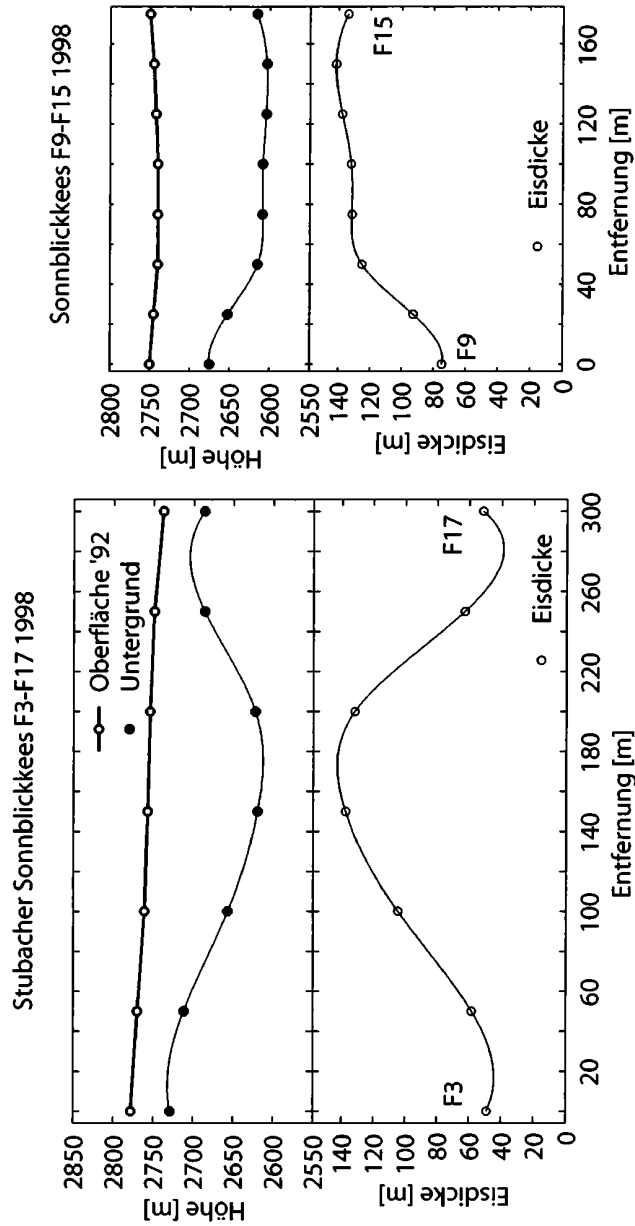


Abbildung 2.140. Gletscheroberfläche 1992 und Eisdicken 1998 entlang der Profile F3-F17 und F9-F15.

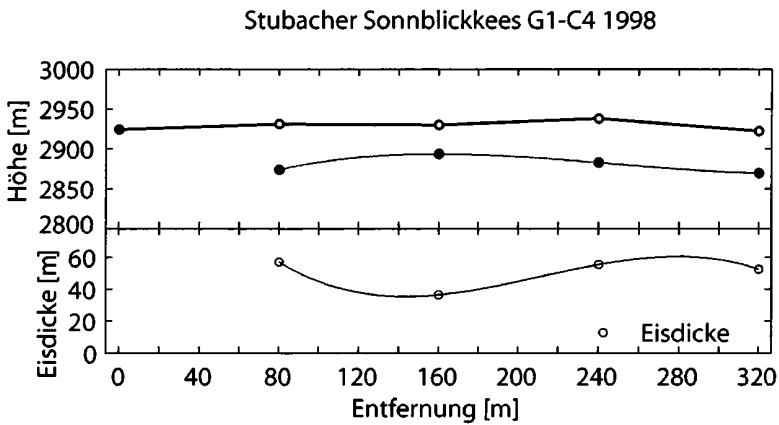


Abbildung 2.141. Gletscheroberfläche 1992 und Eisdicken 1998 entlang des Profils G1-C4 am Stubacher Sonnbllickees.

2.19 Ödenwinkelkees

Das Ödenwinkelkees (47° 06,5'N, 12° 39,1'O) in der Glocknergruppe grenzt direkt an den oberen Pasterzenboden an. Das Firnbecken wird von den hohen und steil abfallenden Felswänden des Kastengrates (zwischen Kastenturm und Johannesberg) umrahmt. Die ausgeprägte Zunge ist stark schuttbedeckt und in den letzten Jahren nur wenig zurückgeschmolzen. Das Ödenwinkelkees hatte 1992 eine Ausdehnung von 2,3 km². Der Abfluß des Ödenwinkelkeeses speist den Speicher Tauernmoossee und wird von den Österreichischen Bundesbahnen zur Energiegewinnung genutzt.

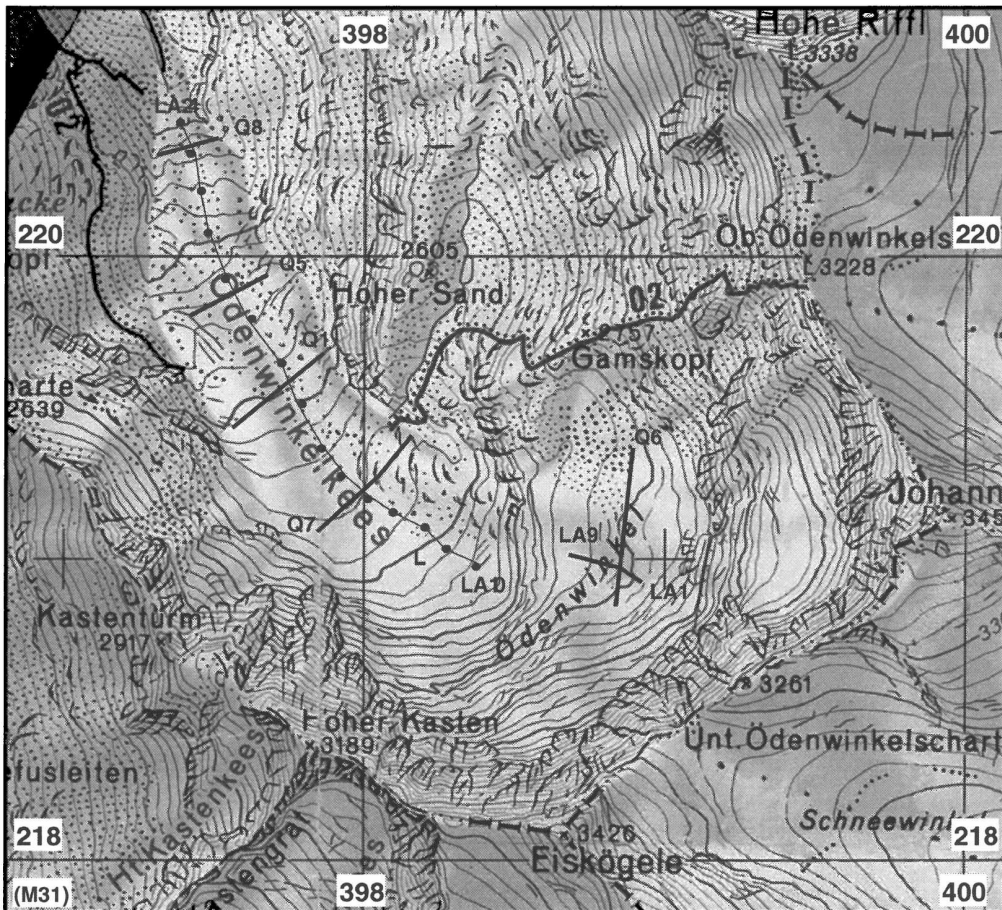


Abbildung 2.142. Karte des Ödenwinkelkees (Granatspitzgruppe/Glocknergebiet). Quelle: ÖK 1:50 000 BEV. Gletscherstand: 1992

Die Eistiefe wurde 1998 an 99 Stellen gemessen. Im Firngebiet ist das Eis etwa 80 m dick. Die größte Eisdicke wurde mit 156 m im Bereich des Querprofils Q7 auf einer Höhe von 2455 m gemessen. Gegen die Zunge hin nimmt die Eisdicke von etwa 120 m im Querprofil Q1 auf etwa 60 m im Querprofil Q8 ab. Am tiefsten Punkt des Längsprofils (2127) ist das Eis noch 42 m dick.

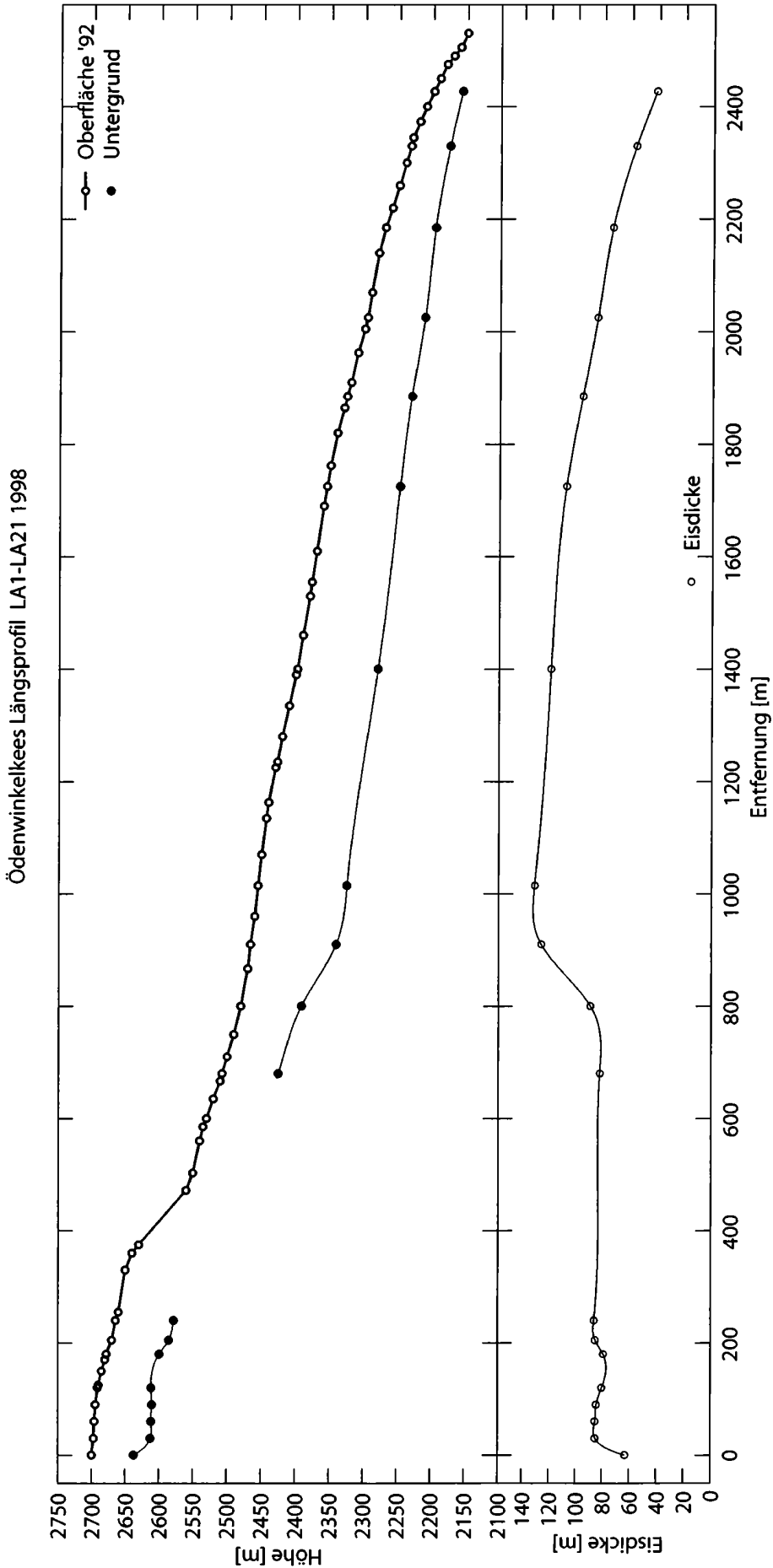


Abbildung 2.143. Gletscheroberfläche 1992 und Eisdicken 1998 entlang des Längsprofils (Messpunkte LA 1 bis LA 21) am Ödenwinkelkees.

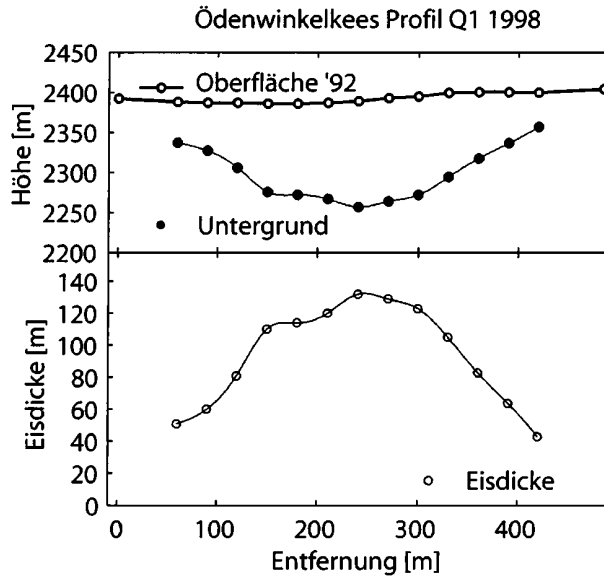


Abbildung 2.144. Gletscheroberfläche 1992 und Eisdicken 1998 entlang des Querprofils Q1 am Ödenwinkelkees.

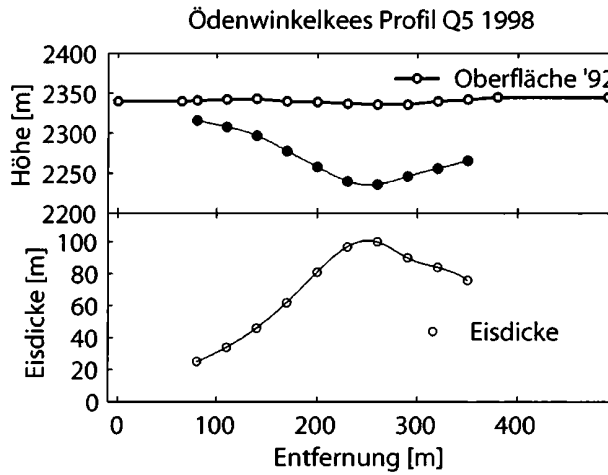


Abbildung 2.145. Gletscheroberfläche 1992 und Eisdicken 1998 entlang des Querprofils Q5 am Ödenwinkelkees.

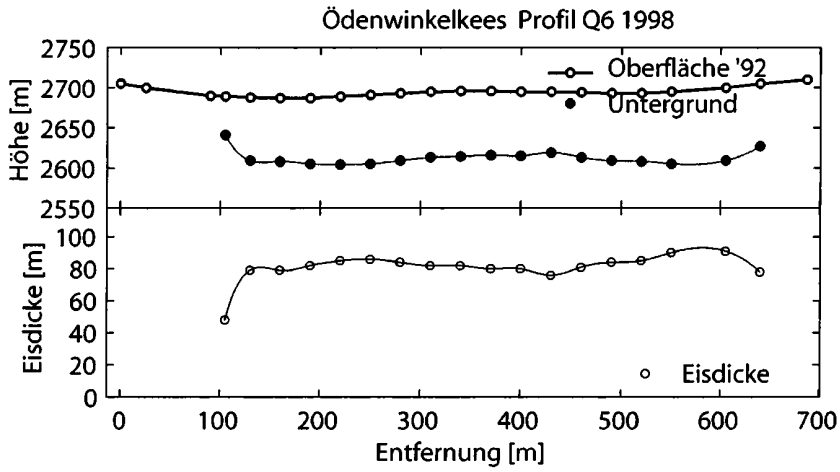


Abbildung 2.146. Gletscheroberfläche 1992 und Eisdicken 1998 entlang des Querprofils Q6 am Ödenwinkelkees.

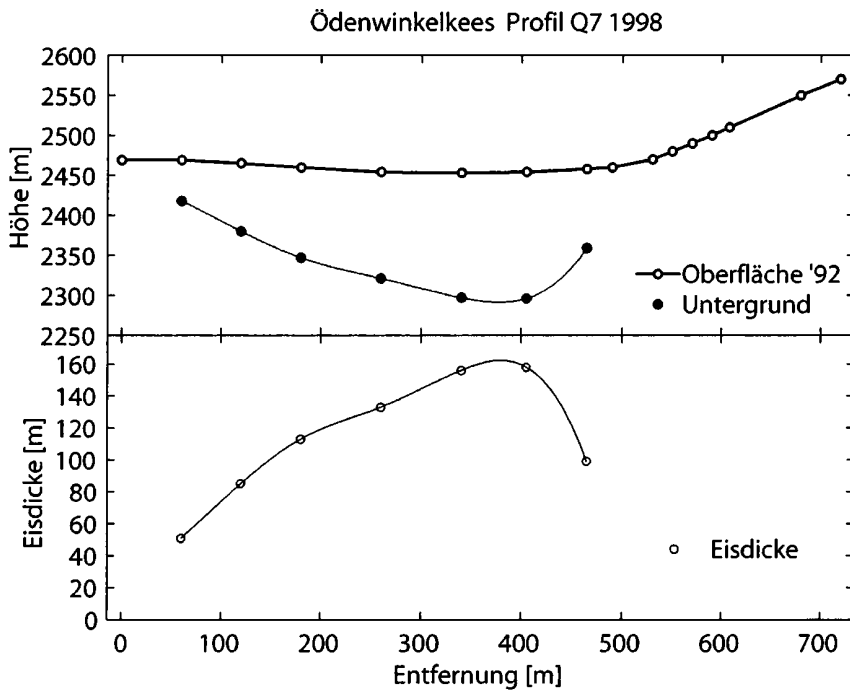


Abbildung 2.147. Gletscheroberfläche 1992 und Eisdicken 1998 entlang des Querprofils Q7 am Ödenwinkelkees.

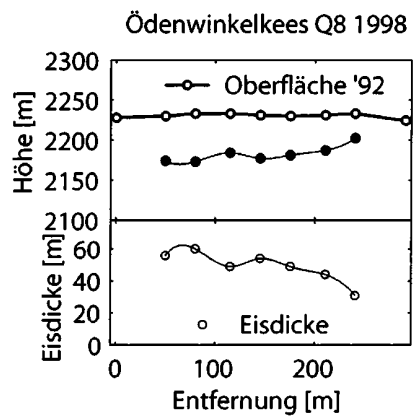


Abbildung 2.148. Gletscheroberfläche 1992 und Eisdicken 1998 entlang des Querprofils Q8 am Ödenwinkelkees.

2.20 Pasterze



Abbildung 2.149. Karte der Pasterze (Glocknergruppe). Quelle: ÖK 1:50 000 BEV. Gletscherstand 1992.

Die Pasterze ($47^{\circ} 06,1' N$, $12^{\circ} 41,7' O$) ist mit einer Fläche von $18,3 \text{ km}^2$ (1992) der größte Gletscher Österreichs. Das weitläufige Firngebiet, der Pasterzenboden, ist in nordwestliche bis südöstliche Richtung exponiert und reicht in Höhen bis über 3400 m . Auf der orographisch rechten Seite des Gletschers befinden sich auch einige kleiner Gletscher wie das Teufelskampkees und das Glocknerkees, die in die Pasterze einmünden. Zwischen dem flachen Firngebiet und der ebenfalls flachen Zunge befindet sich eine Spaltenzone, der Hufeisenbruch. Hier fließt der Gletscher über Felsstufen. Im Hufeisenbruch konnten keine Eisdickenmessungen durchgeführt werden.

Der größten Gletscher Österreichs war schon früh Ziel wissenschaftlicher Untersuchungen. Seit dem Jahr 1878 werden Längenänderungen der Zunge dokumentiert. 1929 und 1970 wurde die Eisdicke von Teilgebieten der Pasterze seismisch bestimmt (siehe Kapitel 2.20.1). Die Änderung der Oberflächenhöhe wird jährlich in 5 Querprofilen gemessen [35] [52] [53].

2.20.1 Frühere Eisdickenmessungen

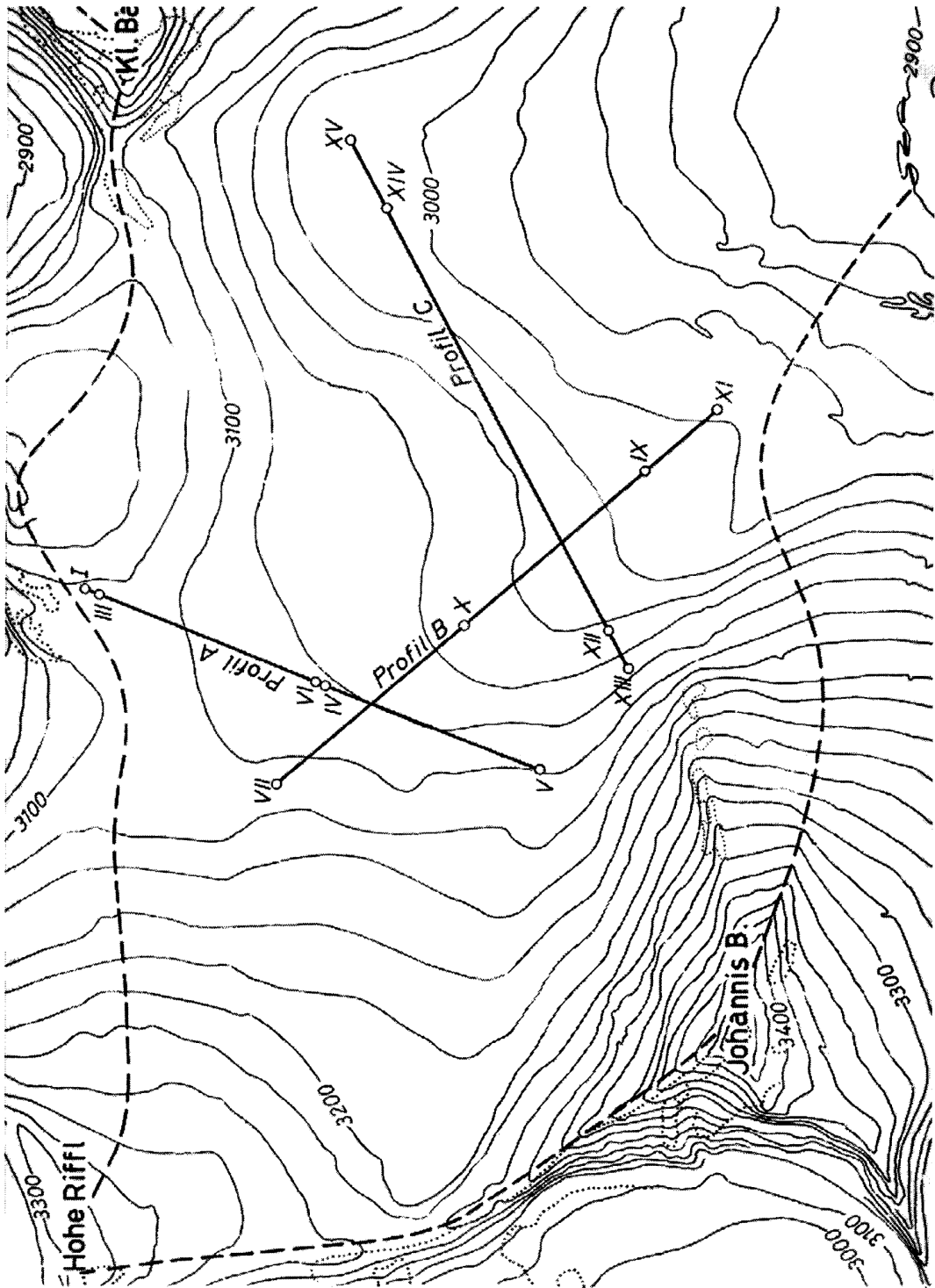


Abbildung 2.150. Lage der Seismikprofile 1970 am oberen Pasterzenboden (aus [4]).

Die ersten seismischen Eisdickenmessungen auf der Zunge der Pasterze wurden 1929 von Brockamp und Mothes durchgeführt [8] [9][10]. Im Jahr 1970 wurden im Rahmen des österreichischen Programms der internationalen hydrologischen Dekade am oberen Pasterzenboden (Schneewinkel und Riffwinkel) refraktionsseismische Messungen zur Bestimmung des Eisvolumens der Pasterze durchgeführt. Bittmann et. al. [4] führten auch eine Bestimmung der Dicke der Firnschicht durch. Die Lage der Seismikprofile B und C ist nicht direkt mit den Radarprofilen

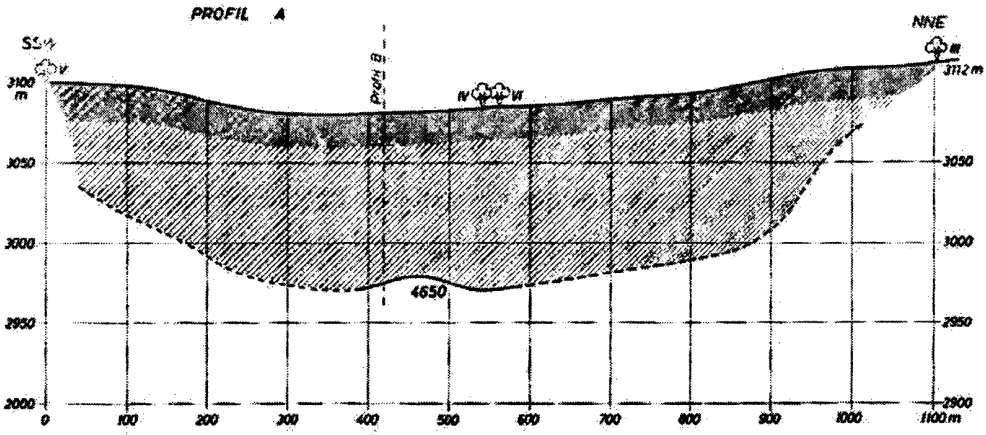


Abbildung 2.151. Oberfläche und Eisdicke im Profil A am Oberen Pasterzenboden 1970 (aus [4]).

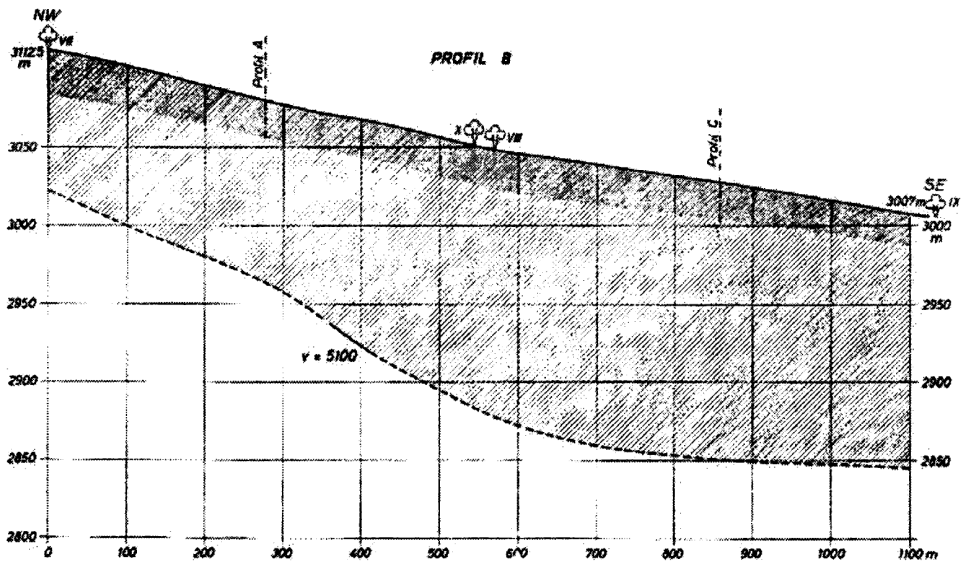


Abbildung 2.152. Oberfläche und Eisdicke im Profil B am Oberen Pasterzenboden 1970 (aus [4]).

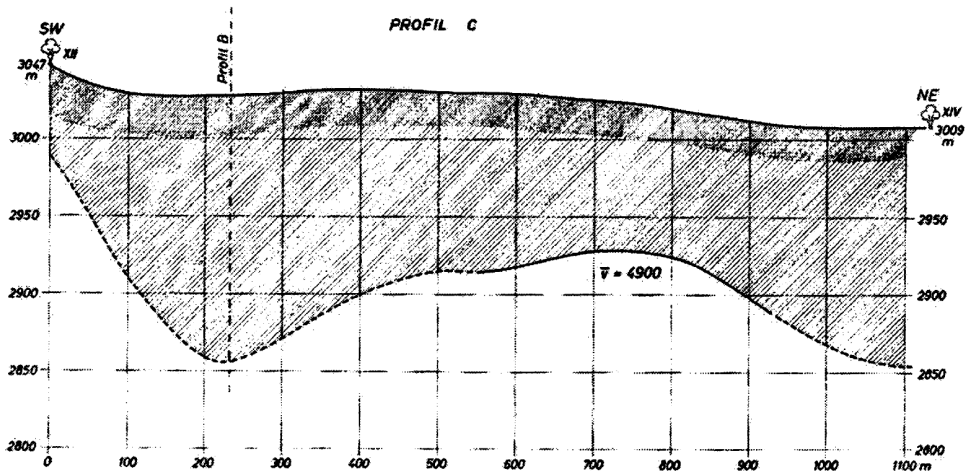


Abbildung 2.153. Oberfläche und Eisdicke im Profil C am Oberen Pasterzenboden 1970 (aus [4]).

des IMG1 vergleichbar. Die seismisch gemessenen Eisdicken zeigen aber tendenziell gute Übereinstimmung mit den Radardaten. Die Beckenstruktur im Seismikprofil A findet sich auch im Radarprofil Q wieder. Auch die Absolutwerte der Eistiefen sind vergleichbar.

2.20.2 Ergebnisse der Eisdickenmessungen 1997/98

Die Messung der Eistiefe mit Radarecholot wurde im Rahmen zweier Meßkampagnen durchgeführt. Die Bestimmung der Eisdicke an der Zunge wurde im Sommer 1997 in einem Längs- und drei Querprofilen durchgeführt. Zeitgleich wurde von der Verbundplan Prüf- und Meßtechnik im Auftrag der Verbund-AHP AG (E. Brückl, persönliche Mitteilung) Reflexionsseismik durchgeführt (siehe Abbildung 2.164). Die Vermessung des Firngebietes fand 1998 statt. Insgesamt wurde die Eistiefe an 178 Punkten ermittelt. Dabei wurde mit 275 m im oberen Teil der Zunge die bisher größte Eisdicke in Österreich gemessen.

Profil	LD	LOB	L-P	OB	OC	RL	Q	Q1	Q2	Q3
Jahr	1998	1998	1997	1998	1998	1998	1998	1997	1997	1997

Tabelle 2.8. Jahr der Radarmessungen auf der Pasterze.

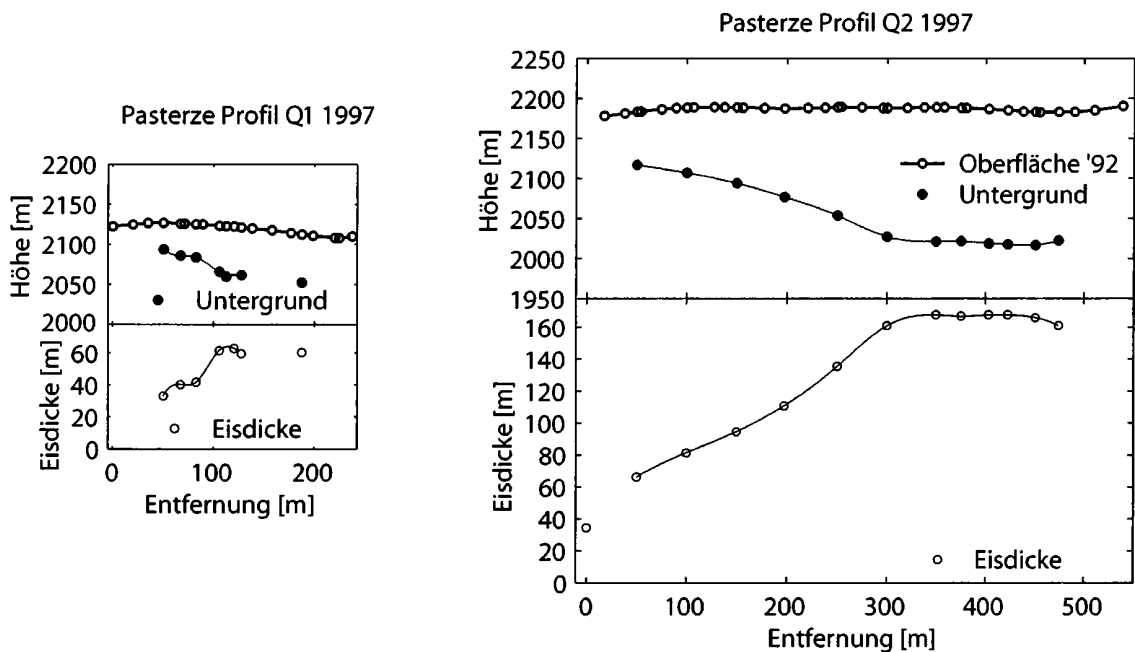


Abbildung 2.154. Gletscheroberfläche 1992 und Eisdicken 1997 entlang der Profile Q1 und Q2 auf der Pasterze.

Im orographisch rechten Teil des Firngebietes zwischen Johannisberg, Eiskögele und Romariswandköpfen liegt das Längsprofil LOB. Hier sind die Eistiefen zwischen 85 und 60 Metern eher gering. Im oberen Teil des Profils OL im orographisch linken Teil des Firngebietes ist das Eis um die 60 m dick. Im unteren Teil des Profils OL nimmt die Eistiefe rasch auf etwa 100 m zu. Die großen Schwankungen der Eistiefe im Gebiet des Hufeisenbruchs sind auf Felstufen im Untergrund zurückzuführen. Das Querprofil OC liegt zwischen der oberen Ödenwinkelscharte und der Führerscharte. Hier werden in einem ausgeprägten Becken südlich des Riffltores bereits Eistiefen von etwa 160 m erreicht. Das Profil RL-OB verläuft im Becken des Rifflwinkel Richtung Oberwalder Hütte. Im oberen Teil des Profils nimmt die Eisdicke kontinuierlich von 160 auf 100 m ab, um dann zu Beginn des nächsten Beckens wieder auf 120 m zuzunehmen. Das Querprofil Q zeigt deutlich die raue Topographie des Untergrundes mit zwei über dreißig Metern tiefen Tälern, die von 80 bis 110 m Eis überlagert sind. Die Struktur des Untergrundes ist aus der Topographie der Eisoberfläche nicht ersichtlich, und könnte auch mit theoretischen Berechnungen nicht ermittelt werden. Das Längsprofil LD beginnt im Becken südlich des Riffltores mit Eisdicken um 160 m, um nach Süden in Richtung des Hufeisenbruches auf Werte zwischen 110 und 130 m abzunehmen. Das Längsprofil L-P zeigt im unteren Teil der Zunge sehr große Eistiefen und eine ausgeprägte

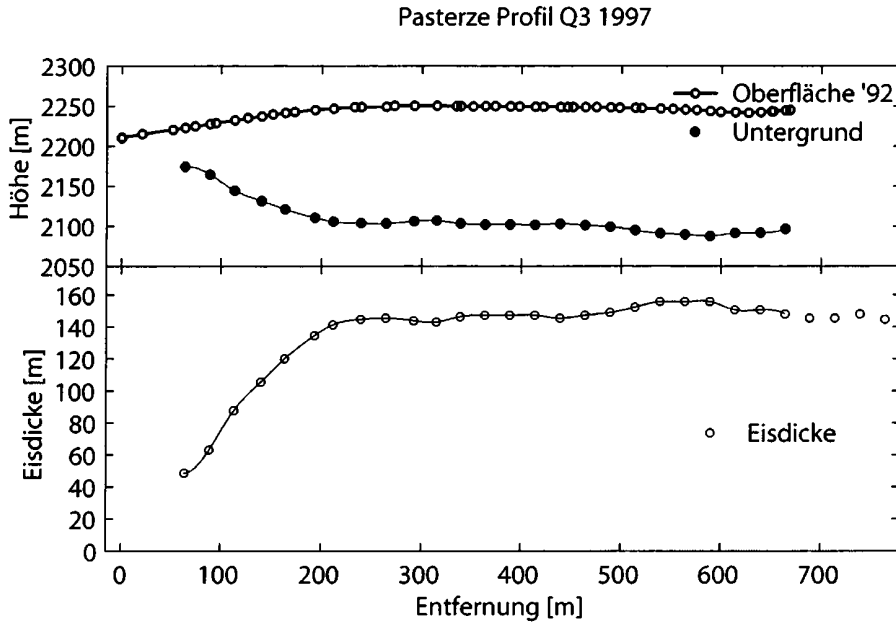


Abbildung 2.155. Gletscheroberfläche 1992 und Eisdicken 1997 entlang des Profils Q3 auf der Pasterze.

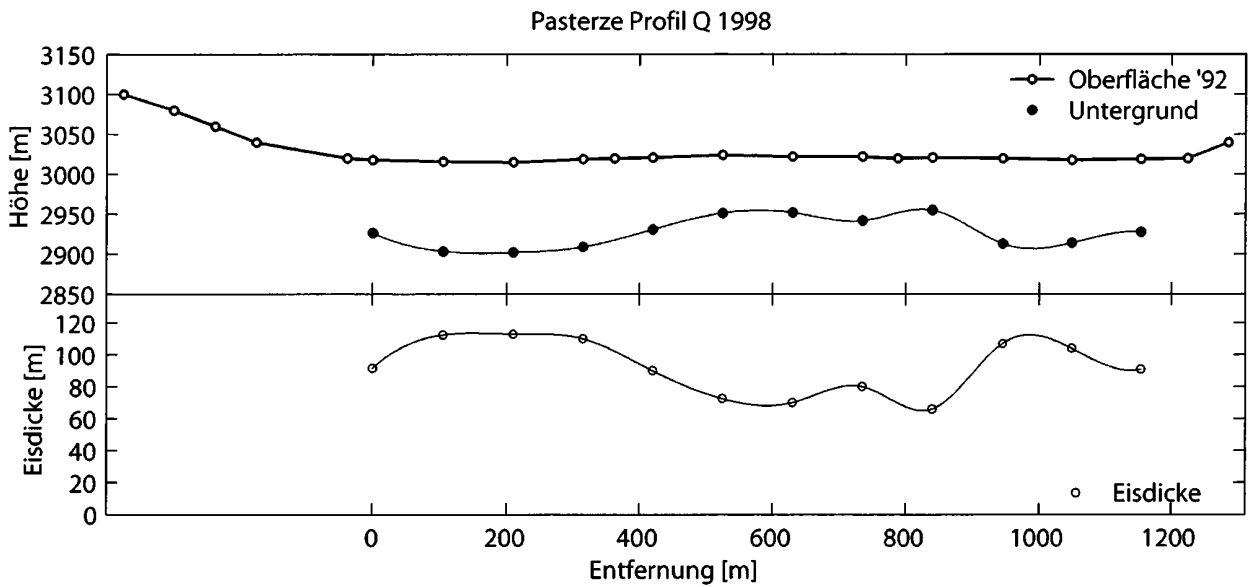


Abbildung 2.156. Gletscheroberfläche 1992 und Eisdicken 1998 entlang des Profils Q auf der Pasterze.

Beckenstruktur. Die größte Eisdicke von 275 m wurde auf einer Höhe von etwa 2420 m am Beginn des Profils gemessen. Bis etwa 500 m vor dem Ende des Profils beträgt die Eisdicke immer über 120 m. Auf den letzten 500 m des Profils L-P fällt die Eisdicke sehr rasch auf 60 m.

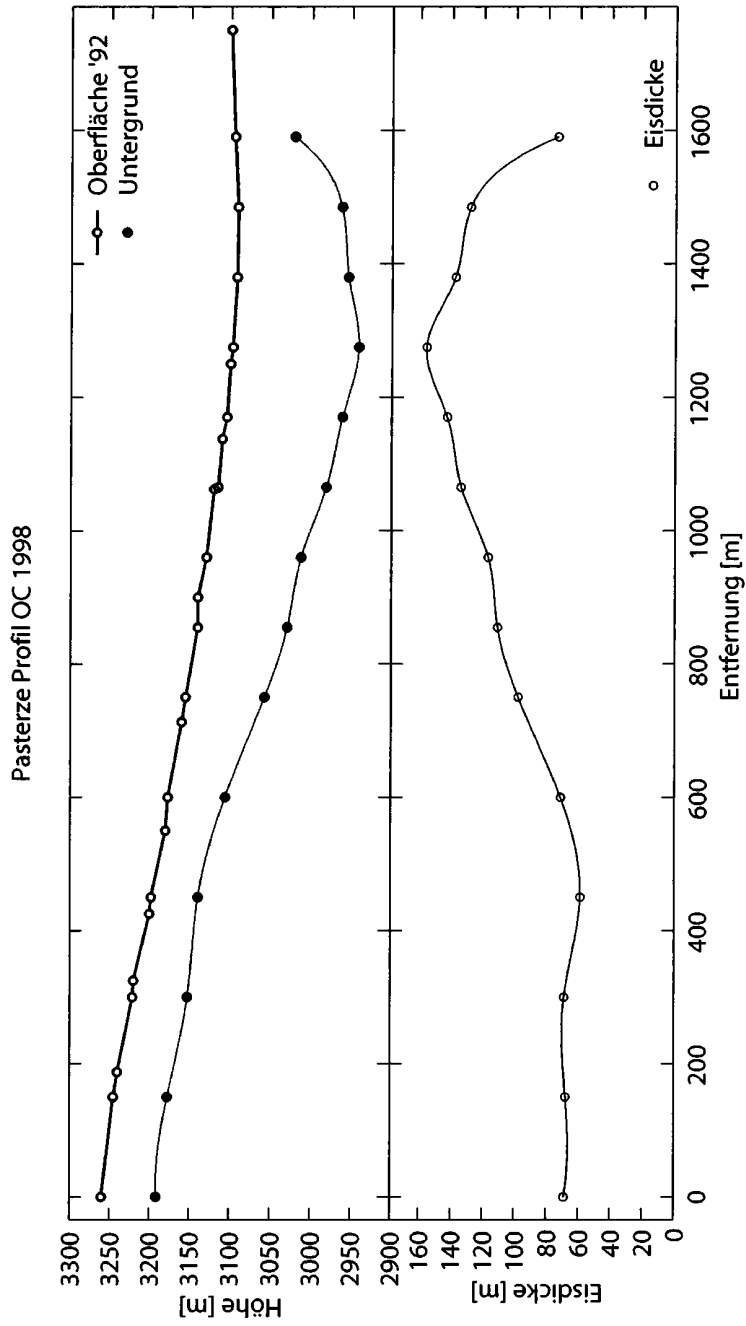


Abbildung 2.157. Gletscheroberfläche 1992 und Eisdicken 1998 entlang des Profils OC auf der Pasterze.

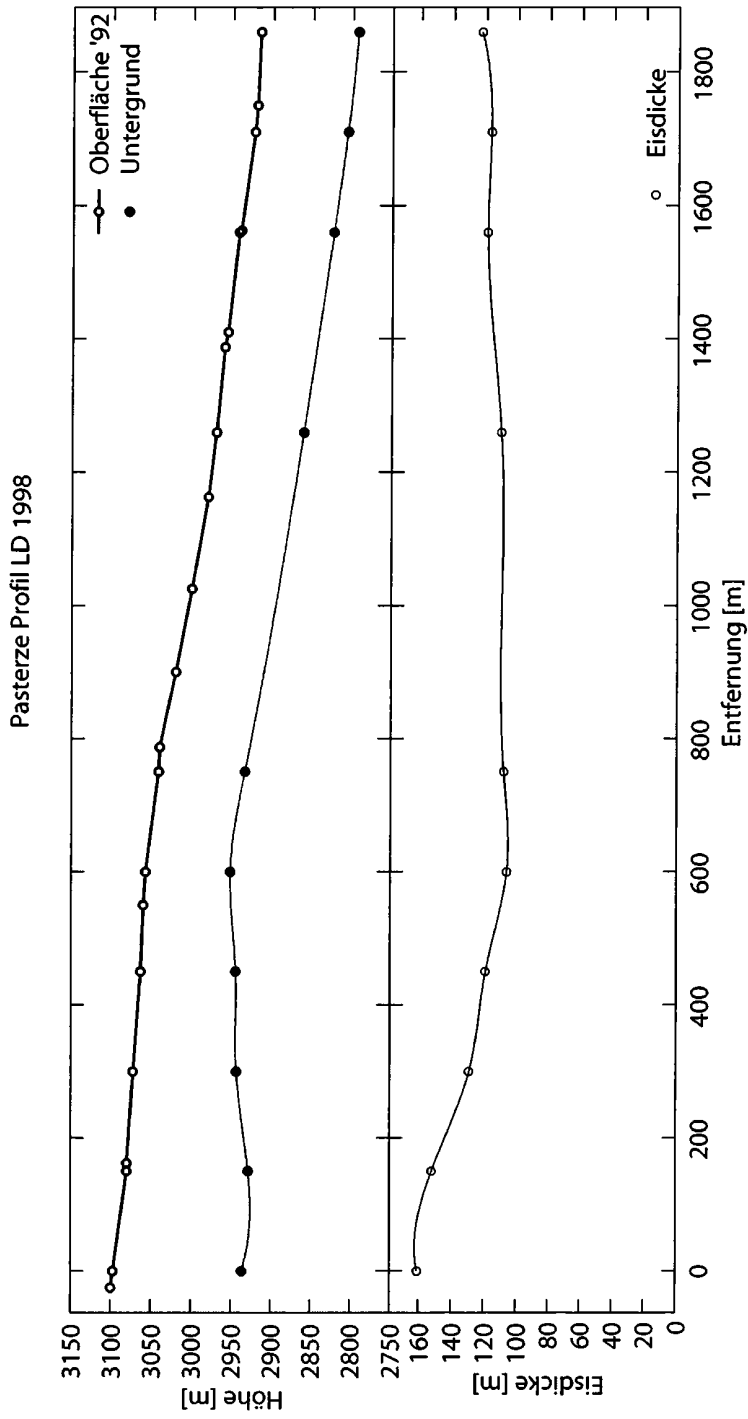


Abbildung 2.158. Gletscheroberfläche 1992 und Eisdicken 1998 entlang des Profils LD auf der Pasterze.

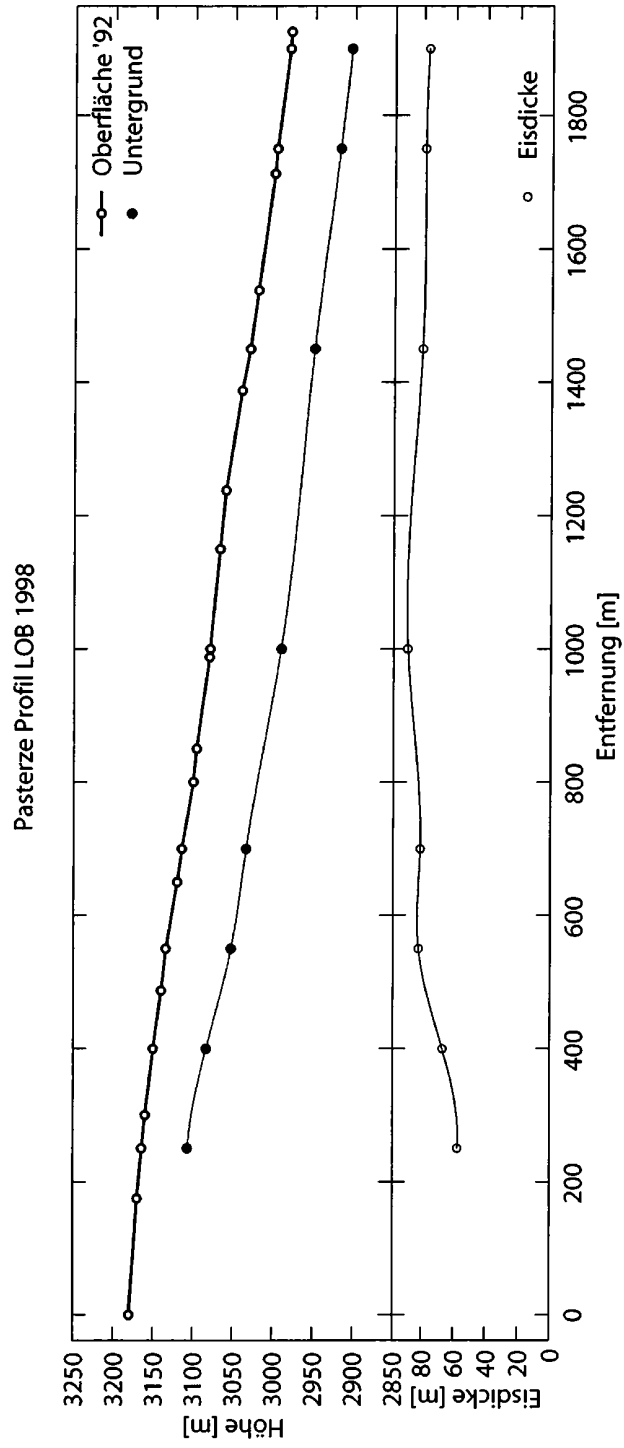


Abbildung 2.159. Gletscheroberfläche 1992 und Eisdicken 1998 entlang des Profils LOB auf der Pasterze.

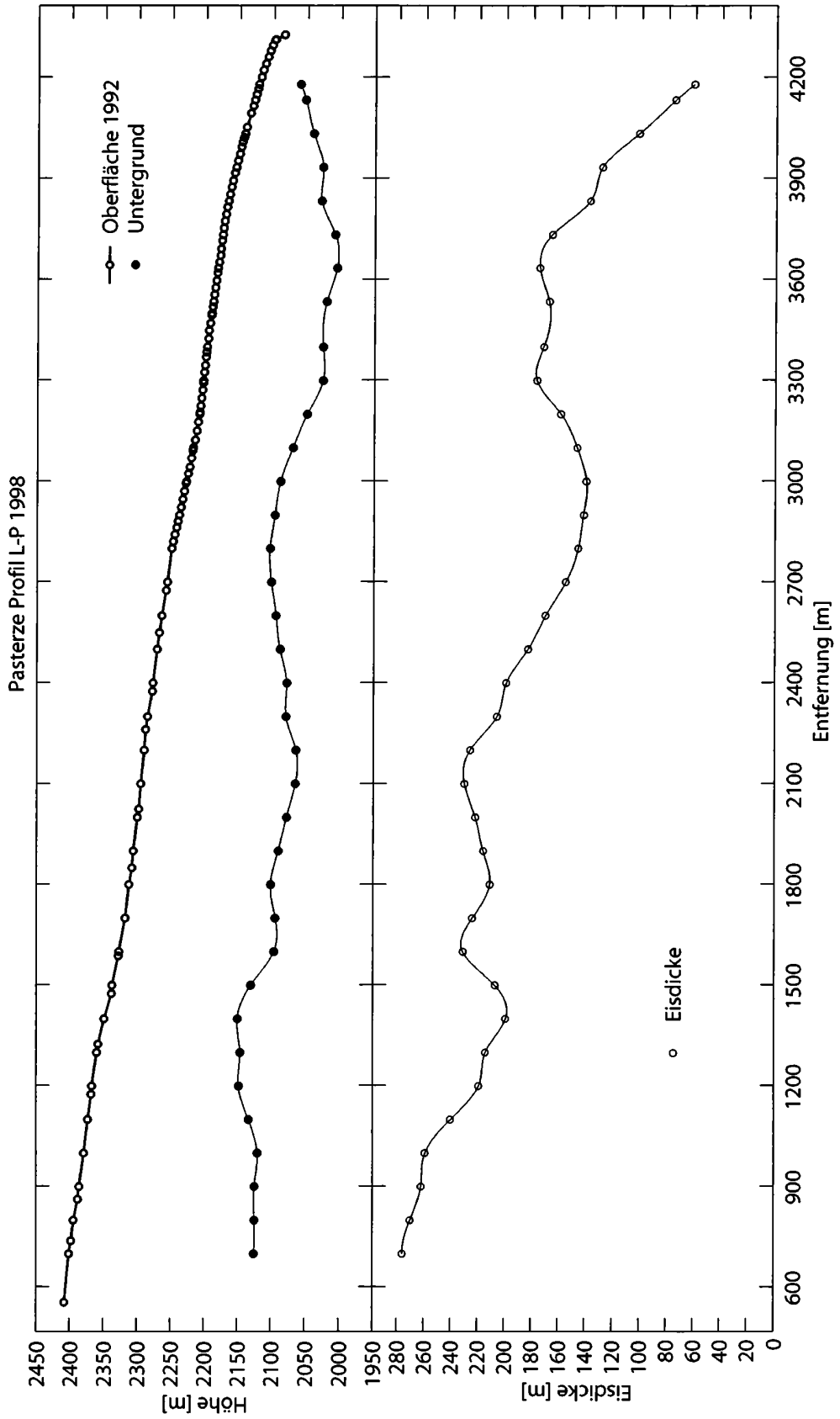


Abbildung 2.160. Gletscheroberfläche 1992 und Eisdicken 1998 entlang des Profils L-P auf der Pasterze.

Pasterze Profil OL 1998

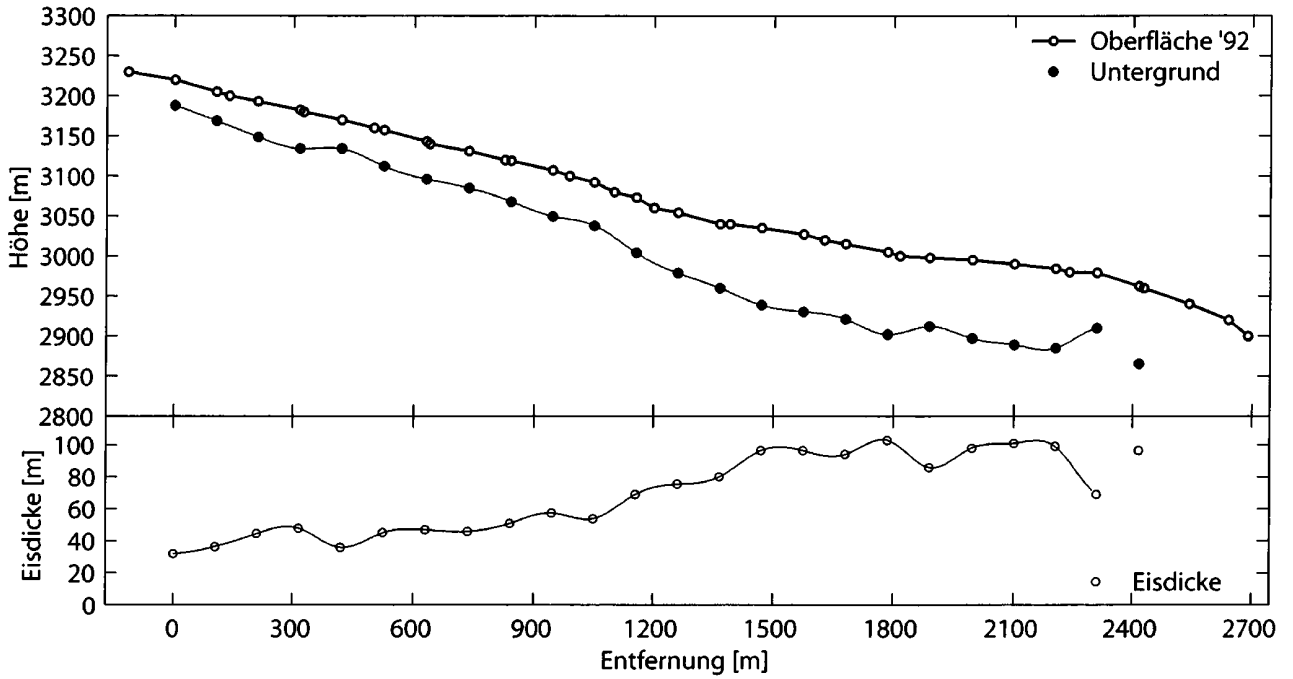


Abbildung 2.161. Gletscheroberfläche 1992 und Eisdicken 1998 entlang des Profils OL auf der Pasterze.

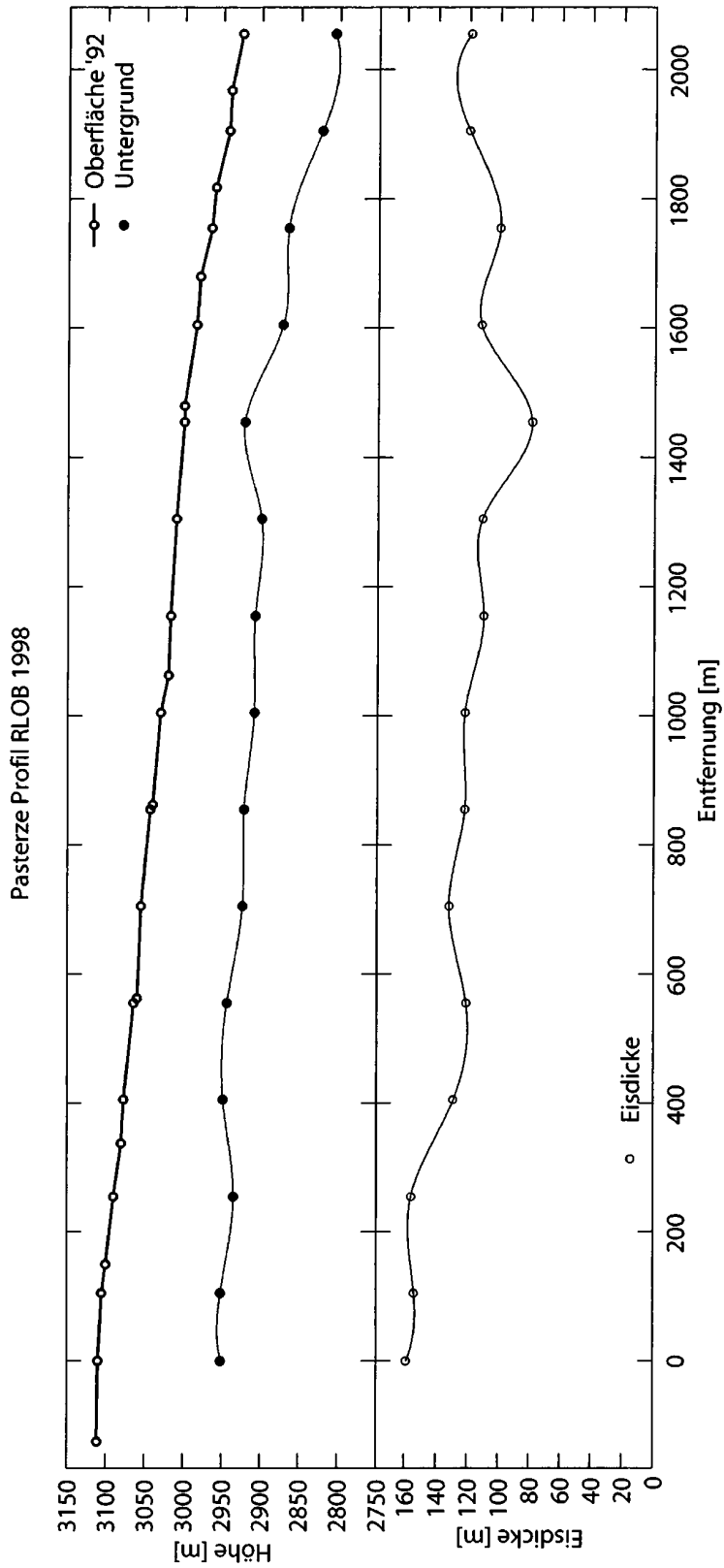


Abbildung 2.162. Gletscheroberfläche 1992 und Eisdicken 1998 entlang des Profils RLOB auf der Pasterze.

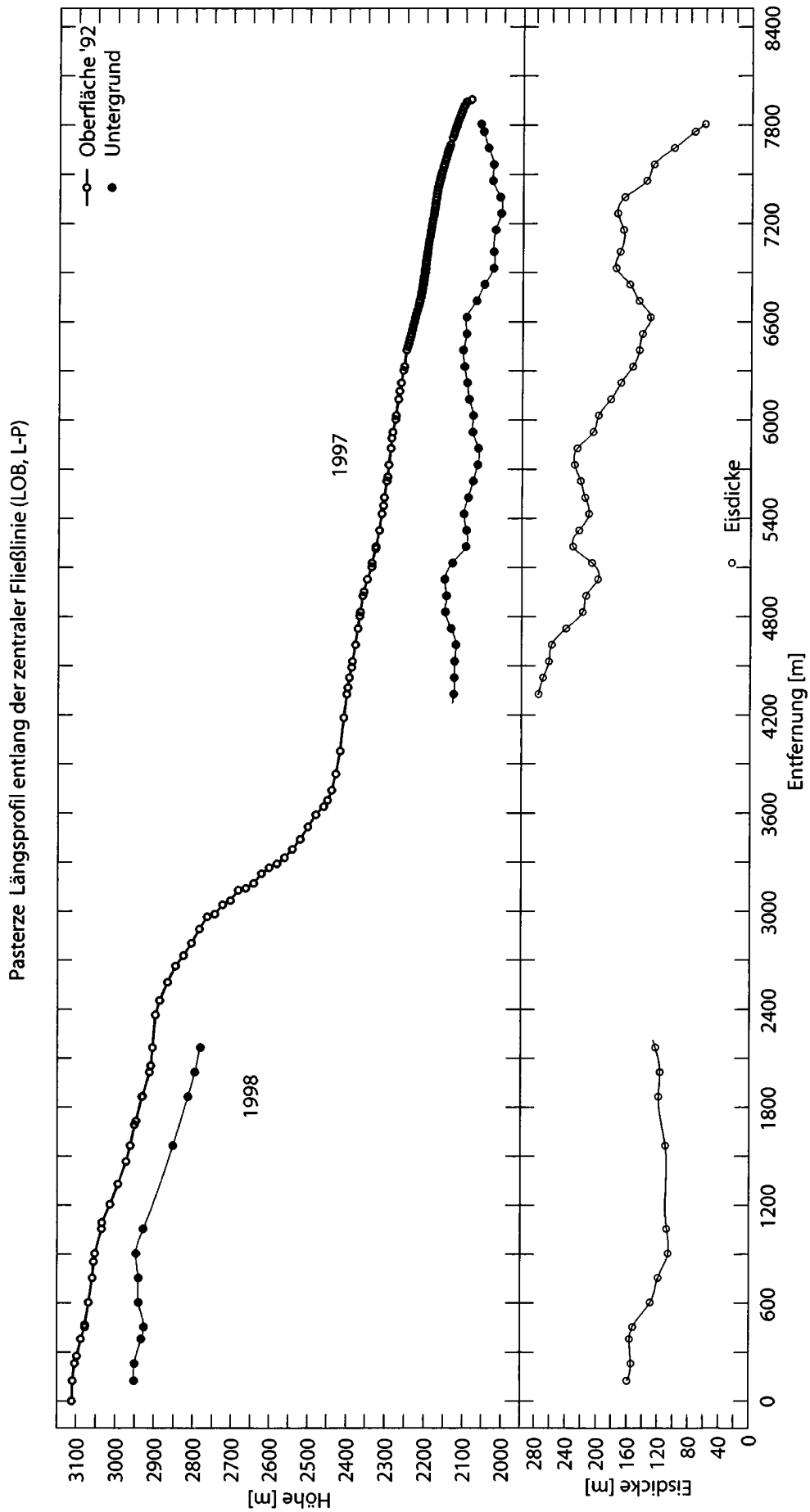


Abbildung 2.163. Gletscheroberfläche 1992 und Eisdicken 1997 und 1998 entlang des Profils L_{zent} auf der Pasterze.

2.20.3 Vergleich Seismik/GPR 1997

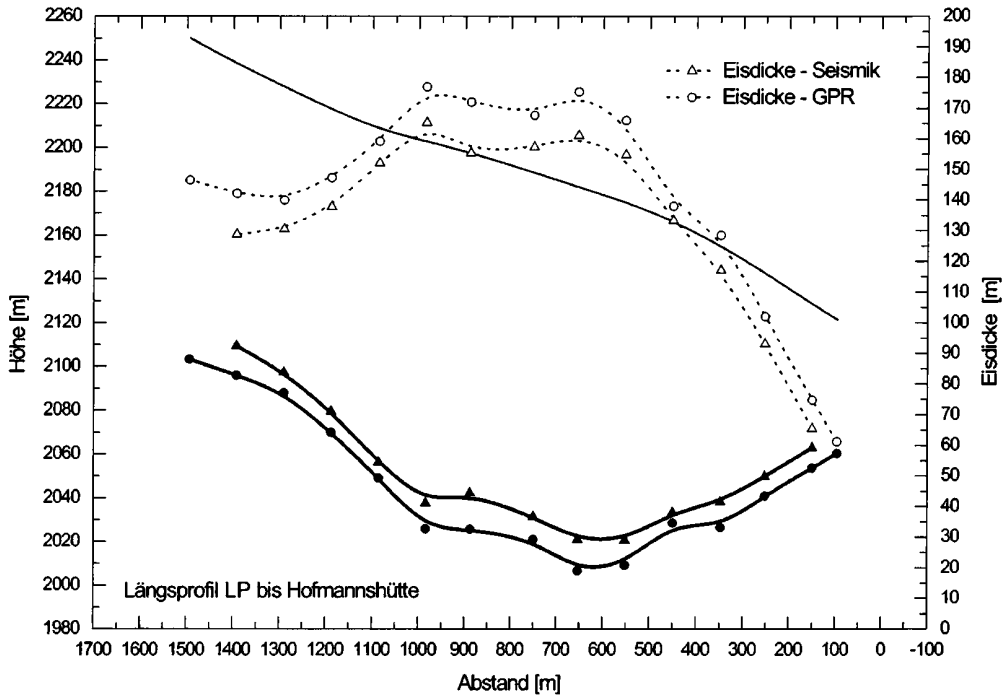


Abbildung 2.164. Vergleich der mit Radar bzw. Reflexionsseismik ermittelten Eistiefen entlang des Profils L-P bis auf Höhe des Querprofils Q3.

Im Profil L-P wurde bis auf Höhe des Querprofils Q3 eine Parallelmessung der Eisdicken mit Radar und Reflexionsseismik durchgeführt (Abbildung 2.164). Bei 13 vergleichbaren Meßpunkten ist eine mittlere Abweichung von 10 m bei Eisdicken zwischen 60 und 170 m aufgetreten. Die maximale Abweichung betrug 14 m, die kleinste Abweichung 5 m. Die Eisdicke aus Seismik lag bei allen Punkten unter der mit Radar gemessen. Der Grund für diese Abweichungen muß noch untersucht werden.

Literatur

1. ANICH, P. UND B. HUEBER: *Atlas Tyrolensis, 1774*. Faksimiledruck. 1974.
2. ARIC, K. UND E. BRÜCKL: Ergebnisse der seismischen Eisdickenmessungen im Gebiet der Stubaier Alpen (Daunkogelferner), der Venedigergruppe (Schlatenkees und Untersulzbachkees) und der Silvrettagruppe (Vermunt-Gletscher). 70, 1987.
3. BAUDER, A.: Bestimmung der Massenbilanz von Gletschern mit Fernerkundungsmethoden und Fließmodellierungen. VAW Mitteilungen 169, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, 2001.
4. BITTMANN, O., E. BRÜCKL G. GANGL UND F.J. WALLNER: Ergebnisse der seismischen Gletschermessungen am obersten Pasterzenboden (Glocknergruppe) im Jahre 1970. Heft 11, 1973.
5. BLÜMCKE, A., UND H. HESS: Untersuchungen am Hintereisferner. 1. Band(2. Heft):87, 1899.
6. BLÜMCKE, A., UND H. HESS: Tiefbohrungen am Hintereisferner im Sommer 1908. *Zeitschrift für Gletscherkunde*, 3:232 – 236, 1909.
7. BLÜMCKE, A., UND H. HESS: Tiefbohrungen am Hintereisferner im Sommer 1909. *Zeitschrift für Gletscherkunde* 4, 4:66–70, 1910.
8. BROCKAMP, B.: Reflexionsseismische Wiederholungsmessungen auf dem Pasterzengletscher. *Assemblée Générale de Toronto UGGI, Association Internationale d'Hydrologie Scientifique, Tombe IV*, 46, 1958.
9. BROCKAMP, B., UND H. MOTHES: Seismische Untersuchungen auf dem Pasterzengletscher I. *Z.f. Geoph.*, IV:482–500, 1931.
10. BROCKAMP, B., UND H. MOTHES: Seismische Untersuchungen auf dem Pasterzengletscher II. *Z.f. Geoph.*, VII:232–240, 1931.
11. BRÜCKL E., UND G. GANGL: Die Ergebnisse der seismischen Gletschermessungen am Gefrorne Wand Kees im Jahre 1969. *Arbeiten aus der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik*, (Heft 10), 1972.
12. BRUNNER, K.: Zur neuen Karte Gepatschferner 1971. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 14(2):133–151, 1978.
13. DENOTH, A.: Snow Dielectric Measurements. *Adv. Space Res.*, 9(1), 1989.
14. DE Q. ROBIN, G.: Velocity of radio waves in ice by means of a bore-hole interferometric technique. *Journal of Glaciology*, 15(73):151–159, 1975.
15. FINSTERWALDER, R.: Zur Geschichte der Gepatschferner-Vermessung. *Jahrbuch des Deutschen Alpenvereins (Alpenvereinszeitschrift)*, 76:9–16, 1951.
16. FINSTERWALDER, R.: Beiträge zur Gepatschvermessung. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 14(2):153–159, 1978.
17. FINSTERWALDER, S.: Bericht über die wissenschaftlichen Unternehmungen des Deutschen und Oesterreichischen Alpenvereins, IX. Vom Gepatsch-, Weißsee- und Langtauferer-Ferner. *Mitteilungen des Deutschen und Oesterreichischen Alpenvereins*, 23(8):94–95, 1897.
18. FINSTERWALDER, S.: Begleitwort zur Karte des Gepatschferners. *Zeitschrift für Gletscherkunde*, 16:20–41, 1928.
19. FINSTERWALDER, S., UND H. SCHUNCK: Der Gepatschferner. *Zeitschrift des Deutschen und Oesterreichischen Alpenvereins*, 19:50–57, 1888.
20. FÖRTSCH, O., H.J. SCHNEIDER UND H. VIDAL: Seismische Messungen auf dem Gepatsch- und Kesselwandferner in den Ötztaler Alpen. *Gerlands Beiträge zur Geophysik*, 64:233–261, 1955.
21. FÖRTSCH, O., UND H. VIDAL: Glaziologische und Glazialgeologische Ergebnisse seismischer Messungen auf Gletschern der Ötztaler Alpen. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 3:145–169, 1956.
22. FÖRTSCH, O., UND H. VIDAL: Glaziologische und Glazialgeologische Ergebnisse seismischer Messungen auf Gletschern der Ötztaler Alpen 1953/54. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 3:145 – 169, 1956.

23. FÖRTSCH, O., UND H. VIDAL: Die seismische Vermessung des Großen Gurglerferners in den Ötztaler Alpen im Spätsommer 1956. *Gerlands Beiträge zur Geophysik*, 67:1–30, 1957.
24. GIESE, P.: Some results of seismic refraction work at the Gepatsch Glacier in the Oetztal Alps. *I.A.S.H. publication*, (61):154–161, 1963.
25. GLEN, J.W., UND J.G. PAREN: The electrical properties of snow and ice. *Journal of Glaciology*, 15(73):1538, 1975.
26. GROSS, G.: Der Flächenverlust der Gletscher in Österreich 1850-1920-1969. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 23(Heft 2):131–141, 1987.
27. HAEBERLI, W., H.P. WÄCHTER W. SCHMID UND C. SIDLER: Erste Erfahrungen mit dem US Geological Survey Monopuls Radioecholot im Firn, Eis und Permafrost der Schweizer Alpen. *Arbeitsheft*, 6:23, 1982.
28. HESS, H.: Hintereisferner. *Zeitschrift für Gletscherkunde*, 10:145–203, 1917.
29. HESS, H.: Der Hintereisferner 1893-1922. Ein Beitrag zur Lösung des Problems der Gletscherbewegung. *Zeitschrift für Gletscherkunde*, 13:158–166, 1924.
30. KASER, G., M. MUNARI B. NOGGLER CH. OBERSCHMIED UND P. VALENTINI: Ricerche sul bilancio di massa del Ghiacciaio di Fontana Bianca (Weißbrunnferner) nel gruppo Ortles-Cevedale. *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, 18:277–280, 1995.
31. KERSCHENSTEINER, G.: Die zweite Vermessung des Gepatschferners. *Mittheilung des Deutschen und Oesterreichischen Alpenvereins*, 18(13):148–150, 1892.
32. KOVACS, A., A.J. GOW UND R.M. MOREY: The in-situ dielectric constant of polar firn revisited. *Cold Regions Science and Technology*, 23:245–256, 1995.
33. KUTTA, W.: Bericht über die wissenschaftlichen Untersuchungen des Deutschen und Oesterreichischen Alpenvereins:XXVII. DerGepatschferner im Jahre 1896. *Mittheilung des Deutschen und Oesterreichischen Alpenvereins*, 27(11):133–135, 1901.
34. LENTNER, S.: *Volumbestimmung von Gletschern der Ostalpen mittels Radardaten*. Diplomarbeit, Universität Innsbruck, 1999.
35. LIEB, G.K.: Gletschermessungen 1996 und 1997 an der Pasterze (Glocknergruppe). *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 34:89–94, 1998.
36. MASSIMO, M.: *Eisdickenmessungen am Gepatschferner mittels Radio-Echolot*. Diplomarbeit, Universität Innsbruck, 1997.
37. MÄTZLER, C.: Applications of the Interaction of Microwaves with the Natural Snow Cover. *Remote Sensing Review*, 2:259–387, 1987.
38. MOTHES, H.: Neue Ergebnisse der Eisseismik. *Zeitschrift für Geophysik*, 5:120 – 144, 1929.
39. NAROD, B.B., UND G.K.C. CLARKE: Miniature high-power impulse transmitter for radio-echo sounding. *Journal of Glaciology*, 40(134):190194, 1994.
40. NICOLUSSI, K.: Bilddokumente zur Geschichte des Vernagtferners im 17. Jahrhundert. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 26(Heft 2):97–119, 1990.
41. PATZELT, G.: The Austrian glacier inventory: status and first results. *IAHS-AISH Publication*, 26:181–184, 1978.
42. POLDER D., UND J.H. VAN SANTEN: The effective permeability of mixtures of solids. *Physica*, 12(5):257, 1946.
43. ROSE, G.C., UND R.S. VICKERS: Calculated and experimental response of restively loaded V antennas to impulsive excitation. *Int. J. Electron.*, 37:261 – 271, 1974.
44. SCHNEIDER, H.: Die Karte des Kesselwandferners 1971 und die Grundlagen der Vermessungen. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, Bd. XI(Heft 2):229–244, 1975.
45. SLUPETZKY, H.: Die Massenbilanzreihe vom Stubacher Sonnblickkees 1958/59 bis 1987/88. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 25(1):69–89, 1989.
46. SLUPETZKY, H., UND G. EHGARTNER: Programm 'Wasser- und Eishaushaltmessungen im Stubbachtal' (Massenbilanzmeßreihe vom Stubacher Sonnblickkees). Ergebnisbericht 1999. *Mitteilungen des Hydrographischen Dienstes in Österreich*, 81, 2002.
47. SONKLAR, K.: *Die Oetzthaler Gebirgsgruppe, mit besonderer Rücksicht auf Orographie und Gletscherkunde*. Verlag Justus Perthes Gotha, 1860.
48. SPAN, N., M.KUHN UND H. SCHNEIDER: 100 years of ice dynamics of Hintereisferner, Central Alps, Austria, 1894-1994. *Annals of Glaciology*, 24:297–302, 1997.
49. SPAN, N.: *Zur Dynamik des Kesselwandferners*. Dissertation, Universität Innsbruck, 1999.
50. SPAN, N., UND M. KUHN: Simulating annual glacier flow with a linear reservoir model. *J. of Geophysical Research*, 108(D10):4313, 2003.
51. TIURI, M., A. SIHVOLA E. NYFORS UND M. HALLIKAINEN: The complex dielectric constant of snow at microwave frequencies. *J. Ocean Eng.*, OE-9(5):377–382, 1984.
52. WAKONIGG, H.: Die Nachmessungen an der Pasterze von 1879 bis 1990. *Arbeiten aus dem Institut für Geographie der Universität Graz*, 30:271–305, 1991. (Paschinger- Festschrift).
53. WAKONIGG, H., UND G.K. LIEB: Die Pasterze und ihre Erforschung im Rahmen der Gletschermessungen. *Kärntner Nationalparkschriften*, 8:99–115, 1996.

54. WU, T.T., UND R.W.P. KING: The cylindrical antenna with non-reflecting resistive loading. *IEEE Trans. Antennas Propag. AP-*, 1965.
55. YILMAZ, O.: *Seismic Data Processing*. Society of Exploration Geophysicists, P.O. Box 702740, Tulsa, 1987.

Österreichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik

bisher erschienen:

Heft	Publ.Nr.	Fachgebiet	Autor	Titel und Umfang	Preis in Euro
1	329	Meteorologie		<i>Tagungsbericht EURASAP, Wien, 14.-16. Nov. 1988, Evaluation of Atmospheric Dispersion Models Applied to the Release from Chernobyl.</i> Wien 1989, 20 Beiträge, 198 S., 100 Abb., 17 Tab.	14,53
2	332	Geophysik		<i>Tagungsbericht über das 5. Internationale Alpengravimetrie Kolloquium - Graz 1989.</i> Herausgeber: H. LICHTENEGGER, P. STEINHAUSER und H. SÜNKEL, Wien 1989, 256 S., 100 Abb., 17 Tab.	vergriffen
3	336	Geophysik		<i>Schwerpunktprojekt S47-GEO: Präalpidische Kruste in Österreich, Erster Bericht.</i> Herausgeber: V. HÖCK und P. STEINHAUSER, Wien 1990, 15 Beiträge, 257 S., 104 Abb., 17 Tab., 23 Fotos	20,35
4	338	Meteorologie	LANZINGER, A. et al:	<i>Alpex-Atlas.</i> FWF-Projekt P6302 GEO, Wien 1991, 234 S., 23 Abb., 2 Tab., 200 Karten	18,17
5	341	Meteorologie	BÖHM, R.:	<i>Lufttemperaturschwankungen in Österreich seit 1775.</i> Wien 1992, 95 S., 34 Abb., 24 Tab.	vergriffen
6	343	Geophysik	MEURERS, B.:	<i>Untersuchungen zur Bestimmung und Analyse des Schwerefeldes im Hochgebirge am Beispiel der Ostalpen.</i> Wien 1992, 146 S., 72 Abb., 9 Tab.	11,63
7	351	Meteorologie	AUER, I.:	<i>Niederschlagsschwankungen in Österreich seit Beginn der instrumentellen Beobachtungen durch die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik.</i> Wien 1993, 73 S., 18 Abb., 5 Tab., 6 Farbkarten	23,98
8	353	Meteorologie	STOHL, A., H. KROMP-KOLB:	<i>Analyse der Ozonsituation im Großraum Wien.</i> Wien 1994, 135 Seiten, 73 Abb., 8 Tabellen	23,98
9	356	Geophysik		<i>Tagungsbericht über das 6. Internationale Alpengravimetrie-Kolloquium, Leoben 1993.</i> Herausgeber: P. STEINHAUSER und G. WALACH, Wien 1993, 251 Seiten, 146 Abb.	23,98
10	357	Meteorologie	ZWATZ-MEISE, V.:	<i>Contributions to Satellite and Radar Meteorology in Central Europe.</i> Wien 1994, 169 Seiten, 25 Farbab., 42 SW-Abb., 13 Tab.	23,98
11	359	Geophysik	LENHARDT W. A.:	<i>Induzierte Seismizität unter besonderer Berücksichtigung des tiefen Bergbaus.</i> Wien 1995, 91 S., 53 Abb.	23,98
12	361	Meteorologie	AUER, I., R. BÖHM, N. HAMMER †, W. SCHÖNER., WIESINGER W., WINIWARTER W.:	<i>Glaziologische Untersuchungen im Sonnblickgebiet: Forschungs-programm Wurtenkees.</i> Wien 1995, 143 S., 59 SW-Abb., 13 Farbab., 9 SW-Fotos, 47 Tab.	23,98
13	372	Meteorologie	PIRINGER, M.:	<i>Results of the Sodar Intercomparison Experiment at Dümrohr, Austria.</i> Wien 1996	23,98
14	373	Geophysik	MEURERS, B.:	<i>Proceedings of the 7th International Meeting on Alpine Gravimetry, Vienna 1996.</i> Wien 1996	23,98
15	374	Meteorologie	RUBEL, F.:	<i>PIDCAP - Quick Look Precipitation Atlas.</i> Wien 1996	23,98
16	378	Meteorologie	DOBESCH, H., KURY G.:	<i>Wind Atlas for the Central European Countries Austria, Croatia, Czech Republic, Hungary, Slovak Republic and Slovenia,</i> Wien 1997	23,98

Heft	Publ.Nr.	Fachgebiet	Autor	Titel und Umfang	Preis in Euro
17	382	Meteorologie		<i>Proceedings of the 9th International Symposium on Acoustic Remote Sensing and Associated Techniques of the Atmosphere and Oceans, Vienna 1998</i> , 329 Seiten, Wien 1998	23,98
18	383	Meteorologie	RUBEL, F.:	<i>PIDCAP - Ground Truth Precipitation Atlas</i> . 84 Seiten, 99 Farbkarten, Wien 1998	36,34
19	384	Meteorologie		<i>Proceedings of the 2nd European Conference on Applied Climatology, 19 to 23 Oct. 1998, Vienna</i> . CD-ROM, Wien 1998	23,98
20	387	Meteorologie		<i>Proceedings of the 2nd International Conference on Experiences with Automatic Weather Stations, 27 to 29 Sept. 1999, Vienna</i> . CD-ROM, Wien 1999	23,98
21	388	Meteorologie		<i>Bericht über den Workshop Umweltforschung im Hochgebirge - Ergebnisse von GAW-Dach und verwandten Projekten, 05. bis 06. Okt. 1999, Wien</i> . 147 Seiten, Wien 1999	23,98
22	389	Meteorologie	DOBESCH, H., H. V. TRAN:	<i>The Diagnostic Wind Field Model ZAWIMOD2</i> . 47 Seiten, 8 Farbbabb., Wien 1999	23,98
23	392	Meteorologie		<i>Proceedings of the 26th International Conference on Alpine Meteorology; 11 to 15 Sept. 2000, Innsbruck</i> . CD-ROM, Wien 2000	23,98
24	395	Meteorologie	SABO, P.:	<i>Hochnebelprognose mittels eines objektiven Inversionsindexes für die synoptische Praxis</i> , 80 Seiten, Wien 2000	23,98
25	397	Meteorologie	AUER, I., R. BÖHM, W. SCHÖNER:	<i>Austrian long-term climate 1767-2000 - Multiple instrumental climate time series from central Europe</i> , 160 Seiten, 31 Farbseiten, CD-ROM, Wien 2001	25,00
26	398	Geophysik	MEURERS, B.:	<i>Proceedings of the 8th International Meeting on Alpine Gravimetry, Leoben 2000</i> , 240 Seiten, 4 Farbseiten, Wien 2001	25,00
27	399	Meteorologie		<i>Proceedings of the Deutsch-Österreichisch-Schweizerische Meteorologentagung; 18 to 21 Sept. 2001, Vienna</i> . CD-ROM, Wien 2001	25,00
28	408	Meteorologie	AUER, I., R. BÖHM, M. LEYMÜLLER, W. SCHÖNER:	<i>Das Klima des Sonnblicks – KlimaAtlas und Klimatographie der GAW Station Sonnblick einschliesslich der umgebenden Gebirgsregion</i> , 305 Seiten, 130 Farbbildungen, CD-ROM, Wien 2002	50,00
29	409	Meteorologie		<i>Scientific Contributions of Austria to the Mesoscale Alpine Programme (MAP)</i> , 74 Seiten, 38 Farbseiten, Wien 2003	25,00
30	411	Meteorologie	HUBER-POCK, F.:	<i>Die atmosphärischen Gleichungen in den meteorologischen Koordinatensystemen</i> , 160 Seiten, 1 Farbseite, Wien 2003	25,00
31	412	Geophysik	MEURERS, B., R. PAIL:	<i>Proceedings of the 1st Workshop on International Gravity Field Research, Graz 2003</i> , 204 Seiten, 3 Farbseiten, Wien 2004	25,00
32	413	Meteorologie	BAUMANN-STANZER, K.:	<i>Qualitätsprüfung, Verifikation und Anwendung von Windprofilerdaten in Österreich</i> , 133 Seiten, 29 Farbseiten, Wien 2004	25,00
33	414	Meteorologie	SPAN, N., A. FISCHER, M. KUHN, M. MASSIMO, M. BUTSCHEK:	<i>Radarmessungen der Eisdicke österreichischer Gletscher, Band I: Messungen 1995 bis 1998</i> , 154 Seiten, Wien 2005	25,00

