

# **GIS-basierte, geodätische Massenbilanzierung des Gepatschferners, Ötztaler Alpen, 1872 – 2003**

**Bilanzierung des Volumens, der Fläche und der  
Masse mit GIS unter Zuhilfenahme digitaler  
Geländemodelle, erstellt aus topographischen  
Karteninformationen**

**Betreuer:**

**PD Dr. Axel Thomas**

**Vorgelegt von:**

**Holger Erdmann**

**Oktober 2009**

**Diplomarbeit am Institut für Geographie  
Justus-Liebig-Universität Gießen**







---

## Inhaltsverzeichnis:

<b>1. Einführung</b>	<b>1</b>
1.1 Einleitung und Motivation . . . . .	1
1.2 Gliederung . . . . .	3
1.3 Aufgabenstellungen und Ziele . . . . .	5
<b>2. Geologische und Geographische Beschreibung des Untersuchungsgebiets</b>	<b>7</b>
2.1 Räumliche und Naturräumliche Einordnung . . . . .	7
2.2 Geologie . . . . .	11
2.3 Geomorphologie . . . . .	17
2.4 Klima . . . . .	21
2.5 Böden und Vegetation . . . . .	29
2.6 Klima- und Gletscherrekonstruktionen mit Hilfe von Dendrochronologie . . . . .	31
2.7 Vergletscherung im Kaunertal / Ötztaler Alpen im späten Pleistozän und Holozän . . . . .	35
2.8 Der Gepatschferner . . . . .	41
<b>3. Forschungsstand und Datengrundlagen</b>	<b>47</b>
3.1 Forschungsstand am Gepatschferner . . . . .	47
3.2 Chronologie der Vermessung am Gepatschferner . . . . .	49
3.2.1 Kartenaufnahmen des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins . . . . .	49
3.2.2 Kartenaufnahmen der österreichischen Landesvermessung . .	52
3.2.3 Sonstige Kartenaufnahmen . . . . .	54
3.3 Datengrundlagen . . . . .	59
3.3.1 GIS-Daten . . . . .	59
3.3.2 Topographische Karten . . . . .	59

<b>4. Erstellung digitaler Geländemodelle aus topographischen Karteninformationen</b>	<b>61</b>
4.1 Arbeitsschritte	61
4.2 Datenaufbereitung	63
4.2.1 Scannen der Kartengrundlagen	63
4.2.2 Kartenbearbeitung	63
4.2.3 Georeferenzierung	68
4.2.4 Vektorisierung	73
4.3 Erstellung digitaler Geländemodelle	83
4.3.1 Erstellung von TIN Geländemodellen	83
4.3.2 Erstellung von Raster (Grid) Geländemodellen	87
4.4 Berechnungen	91
4.4.1 Volumenberechnungen	91
4.4.2 Flächenberechnungen	92
4.4.3 Berechnung der Massenbilanzen	93
4.4.4 Berechnung des VBP, der ELA und der AAR	93
4.4.5 Definition der Teilbereiche des Gepatschferners	94
4.5 Fehlerdiskussion	97
<b>5. Ergebnisse</b>	<b>105</b>
5.1 Volumenbilanz	105
5.2 Flächenbilanz	111
5.3 Massenbilanzen	117
5.4 VBP, ELA und AAR	121
5.5 Visualisierung der Ergebnisse	147
<b>6. Diskussion und Interpretation</b>	<b>153</b>
<b>7. Zusammenfassung / Summary</b>	<b>161</b>

---

<b>8. Quellen und Hilfsmittel</b>	<b>165</b>
Literatur .....	165
Internet .....	173
Karten .....	174
Software .....	175

<b>Anhang</b>	<b>177</b>
---------------	------------

<b>Danksagung und eidesstattliche Erklärung</b>	<b>235</b>
---	------------

**Beilagen:**

Gletscherstände des Gepatschferners 1872 – 2003

Eisdicke des Gepatschferners 1872 – 2003

Höhenänderungen des Gepatschferners 1890 – 2003

Ausdehnung der Zunge des Gepatschferners 1850 – 2003

Nährgebiet des Gepatschferners 1872 – 2003

Daten-DVD





## Abbildungsverzeichnis:

2.1.1: Naturräumliche Gliederung Österreichs . . . . .	7
2.1.2: Die südlichen Öztaler Alpen mit dem Gepatschferner . . . . .	8
2.2.1: Allgemeine Zeittafel zur Erdgeschichte . . . . .	11
2.2.2: Geologische Übersichtskarte des Altkristallins der Öztaler und Stubaier Alpen nach PURTSCHELLER und FRUTH . . . . .	13
2.2.3: Modell einer steilstehenden Falte . . . . .	14
2.4.1: Sommertemperatur im Alpenraum im späten Pleistozän und Holo- zän, abgeleitet aus der Variation von Baum- und Schneegrenzen . . .	21
2.4.2: Rekonstruktion der Sommer-Frühherbst Temperatur (Juni – Septem- ber) in den Alpen seit dem Jahr 755 n. Chr. in °C als Abweichung vom Mittel der Jahre 1901 – 2000 . . . . .	22
2.4.3: Jahresgang der Niederschlagsmenge im Alpenraum . . . . .	23
2.4.4: Niederschlag an der Station Obergurgl . . . . .	24
2.4.5: Zeitreihe der Winterniederschläge (Oktober – Mai) der Station Vent (fünfjähriger übergreifender Mittelwert) der Jahre 1903 – 2002 . . . . .	26
2.4.6: Zeitreihe der Sommertemperaturen (April – September) der Station Vent für die Jahre 1903 – 2002 . . . . .	27
2.6.1: Das Gletschervorfeld des Gepatschfernners mit den Fundstellen von Baumresten . . . . .	33
2.7.1: Vergletscherung des Alpenraums während des Pleistozäns . . . . .	35
2.7.2: Spätglaziale Gletscherstände und Schneegrenzen Depression nach MAISCH 1981 . . . . .	36
2.7.3: Vergletscherung des Kaunertals während des Egesen-Maximal- standes . . . . .	38
2.8.1: Satellitenaufnahme des Gepatschfernners . . . . .	41
2.8.2: Holozäne Gletscherentwicklung von Pasterze und Gepatschferner . .	44
2.8.3: Szenarios Eisdicke Gepatschferner 2006 + 1°C bis 2006 + 4°C . . . . .	46
3.2.1: Die Zunge des Gepatschfernners. Original-Aufnahme von Dr. S. FINSTERWALDER, Dr. H. SCHUNK u. Dr. A. BLÜMCKE. Maßstab ca. 1:10.750 . . . . .	50

3.2.2: Gepatschferner 1893. Ausschnitt aus der Karte: Oetzthal & Stubai, Blatt IV, S. Weisskugel. Maßstab 1:50000 . . . . .	51
3.2.3: Vergletscherung der Ötztaler Alpen nach WARMUND YGL 1604/05 . . .	54
3.2.4: Der Gepatschferner um 1765. Ausschnitt aus der Karte von Tirol von PETER ANICH . . . . .	55
3.2.5: Orientierung der Messprofile der Eisdickenbestimmung 1996 . . . . .	57
3.2.6: Gletscherbett des Gepatschfernens 1996 mit 20 m Höhenlinien . . . . .	58
4.2.1: Passgenauigkeit des Gletscherbetts (nach MASSIMO) im Vergleich zur Gletschergrenze von 1997 . . . . .	65
4.2.2: Lage der per Hand interpolierten Randbereiche des Gletscherbetts . .	66
4.2.3: Veränderte Bereiche der Daten Gepatschferner 1890 . . . . .	78
4.2.4: Per Hand interpolierte Bereiche des Gletscherstandes von 1990 . . . . .	79
4.3.1: TIN des Geländes mit Gletscherbett . . . . .	85
4.3.2: TIN des Geländes mit dem Gletscherstand von 1997 . . . . .	85
4.3.3: TIN des Gepatschfernens mit Seitengletscher Stand 1997 . . . . .	86
4.3.4: TIN der Eisdicke des Gepatschfernens 1997 . . . . .	87
4.3.5: Grid (Rasterweite 5m) des Gepatschfernens 1997 . . . . .	88
4.4.1: Verteilung der Teilgebiete des Gepatschfernens am Beispiel Gletscherstand 1939 . . . . .	95
5.1.1: Volumen der Teilbereiche des Gepatschfernens 1872 – 2003. . . . .	105
5.1.2: Volumenbilanz der Teilbereiche des Gepatschfernens 1872 – 2003. .	107
5.1.3: Volumenbilanz (prozentual) der Teilbereiche des Gepatschfernens 1872 – 2003. . . . .	107
5.1.4: Volumenbilanz (jährlich) der Teilbereiche des Gepatschfernens 1872 – 2003. . . . .	108
5.1.5: Volumenbilanz (jährlich, prozentual) der Teilbereiche des Gepatschfernens 1872 – 2003. . . . .	108
5.2.1: Fläche der Teilbereiche des Gepatschfernens 1872 – 2003 . . . . .	112
5.2.2: Flächenbilanz der Teilbereiche des Gepatschfernens 1872 – 2003 . .	113
5.2.3: Flächenbilanz (prozentual) der Teilbereiche des Gepatschfernens 1872 – 2003 . . . . .	114

---

5.2.4: Flächenbilanz (jährlich) der Teilbereiche des Gepatschferners 1872 – 2003 . . . . .	115
5.2.5: Flächenbilanz (jährlich, prozentual) der Teilbereiche des Gepatschferners 1872 – 2003 . . . . .	115
5.2.6: Vergleich 2D zu 3D Fläche ausgewählter Gletscherstände . . . . .	116
5.3.1: Mittlere Spezifische Massenbilanz und Mittlere Spezifische Massenbilanz (jährlich) des Gepatschferner 1872 – 2003 . . . . .	117
5.3.2: Mittlere Spezifische Massenbilanz und Mittlere Spezifische Massenbilanz der Hauptzunge des Gepatschferners 1872 – 2003 . . . . .	118
5.4.1: Vertikale Massenverteilung des Gepatschferners für 50m Höhenintervalle 1872 – 2003 . . . . .	122
5.4.2: Fläche der 50m Höhenintervalle des Gepatschferners 1872 – 2003 . . . . .	123
5.4.3: Gesamt-Nettomassenbilanzen des Gepatschferners für 50m Höhenintervalle 1872 – 2003 . . . . .	124
5.4.4: Vertikale Bilanz-Profile des Gepatschferners 1872 – 2003 . . . . .	125
5.4.5: Gesamt-Nettomassenbilanzen des Gepatschferners für 50m Höhenintervalle 1922 – 2003 . . . . .	126
5.4.6: Vertikale Bilanz-Profile des Gepatschferners 1922 – 2003 . . . . .	127
5.4.7: Vertikale Bilanz-Profile (jährlich) des Gepatschferners 1872 – 2003 . . . . .	128
5.4.8: Vertikales Bilanz-Profil des Gepatschferners 1872 – 1890 . . . . .	130
5.4.9: Vertikales Bilanz-Profil des Gepatschferners 1890 – 1922 . . . . .	132
5.4.10: Vertikales Bilanz-Profil des Gepatschferners 1922 – 1939 . . . . .	134
5.4.11: Vertikales Bilanz-Profil des Gepatschferners 1939 – 1971 . . . . .	136
5.4.12: Vertikales Bilanz-Profil des Gepatschferners 1971 – 1976 . . . . .	138
5.4.13: Vertikales Bilanz-Profil des Gepatschferners 1976 – 1990 . . . . .	140
5.4.14: Vertikales Bilanz-Profil des Gepatschferners 1990 – 1997 . . . . .	142
5.4.15: Vertikales Bilanz-Profil des Gepatschferners 1997 – 2003 . . . . .	144
6.1: Lufttemperatur im Alpenraum im Vergleich zu Gletschervorstößen und Gletscherrückzügen . . . . .	155
6.2: Längenmessungen an österreichischen Gletschern . . . . .	155
6.3: Gegenüberstellung der Oberflächenänderung des Gepatschferners von 1971 – 1990 . . . . .	157

---

## **Tabellenverzeichnis:**

4.2.1: Trigonometrische Punkte im Bereich des Gepatschferners . . . . .	69
---	----

# Kapitel 1:

## Einführung

### 1.1 Einleitung und Motivation

Gegen Ende der als Kleine Eiszeit bezeichneten, etwa 700 Jahre andauernden neuzeitlichen Kälteperiode, erreichten die Gletscher der Alpen um 1850 ihre maximale Ausdehnung. Viele Alpengletscher erreichten sogar ihre maximale Ausdehnung seit Ende der letzten Eiszeit vor ca. 10000 Jahren. Seit 1850 hat sich die globale Mitteltemperatur um etwa  $0.7^{\circ}\text{C}$  erhöht, im Alpenraum waren es sogar etwa  $1.5^{\circ}\text{C}$ . Daraus resultierend stieg die mittlere Frostgrenze im Sommer um etwa 250 m von etwa 2800 m auf über 3000 m an. Durch die ansteigenden Temperaturen kam es seit 1850 zu einem fast kontinuierlichen Rückgang der meisten Alpengletscher, welcher nur in den 1890er, 1920er und 1970er Jahren durch kleinere Vorstoßphasen unterbrochen war. Gerade die Alpengletscher scheinen stark auf Änderungen der klimatischen Bedingungen zu reagieren, wobei es regional durchaus gravierende Unterschiede geben kann. Insgesamt haben die Alpengletscher im Zeitraum von 1850 bis heute über 50% ihres Volumens verloren.

Frühe Gletscherbeobachtungen vor 1850 wurden in erster Linie wegen der Gefahren durch sich ausdehnende Gletscher betrieben. Nach 1850 wurde der allgemeine Rückgang von der Wissenschaft durchaus wahrgenommen und untersucht. Die Öffentlichkeit nahm aber zu dieser Zeit noch kaum Anteil daran. In der Vorstoßphase in den 1970er Jahren dagegen warnten einige Wissenschaftler sogar vor einer neuen Eiszeit. Erst mit der, in den 1980er Jahren, aufflammenden Diskussion um die globale Klimaerwärmung rückten die Gletscher mehr und mehr in das Interesse der Wissenschaft und der Öffentlichkeit. Da seit Mitte/Ende der 1980er Jahre die meisten Alpengletscher wieder deutlich zurück schmolzen.

Gerade in der Öffentlichkeit wirken stark abschmelzende Gletscherzungen äußerst dramatisch. Aber wie verändert sich das Volumen der Gletscher wirklich und in welchem Zusammenhang steht dies mit den veränderten klimatischen Rahmen-

bedingungen? Diese Fragestellungen können nur durch seriöse wissenschaftliche Untersuchungen geklärt werden.

Obwohl es bereits für viele Gletscher der Alpen Untersuchungen der Massenbilanz gibt, gibt es recht wenige umfassende Untersuchungen zu diesem Thema. Meist beschränken sich die Arbeiten auf die reine Bestimmung der Höhenveränderung oder des Volumenverlustes für einen begrenzten Zeitraum oder die Erfassung der Änderung der Ausdehnung der Gletscherzunge.

Interessanterweise gibt es auch nur wenige Untersuchungen am Gepatschferner in den Öztaler Alpen, obwohl dieser das zweitgrößte Gletschergebiet Österreichs darstellt.

Als mir Herr PD Dr. AXEL THOMAS dieses Thema anbot, war schnell mein Interesse geweckt. Zum Einen konnte ich auf diese Weise für mich neue Anwendungsgebiete von GIS Programmen erlernen, zum Anderen lag der Reiz darin, neue wissenschaftliche Erkenntnisse zu gewinnen. Befassten sich frühere Untersuchungen am Gepatschferner mit der Veränderung der Zungenlage (HENNINGER 1985) und der Höhenänderung der Gletscheroberfläche (z. B. FINSTERWALDER, RÜ 1976 & 1980, KEUTTERLING 1998), sollte im Rahmen dieser Diplomarbeit eine umfangreiche Volumen- und Massenanalyse durchgeführt werden. Dies wurde möglich, da im Rahmen der Diplomarbeit von MASSIMO (1997) eine Kartenabbildung des Gletscherbetts des Gepatschfernners entstanden war. Dies war Voraussetzung dafür, nicht nur eine einfache Untersuchung der Volumenabnahme durchzuführen, sondern diese auch in Relation zum Gesamtvolumen des Gletschers setzen zu können. Durch das Vorhandene Kartenmaterial (Siehe Kapitel 3) konnte ein Zeitraum von etwa 1872 bis 2004 abgedeckt werden.

## 1.2 Gliederung

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in mehrere Teilbereiche. Nach einer allgemeinen Einführung (Kapitel 1) folgt eine geographisch/geologische Beschreibung des Untersuchungsgebietes (Kapitel 2). Hier sollen aber nur die wichtigsten Aspekte angesprochen werden. Eine ausführliche Beschreibung physiographischer Merkmale des Gepatschferners lieferte bereits KEUTTERLING (1998). Ausführlicher behandelt wurden der Forschungsstand und die Kartengrundlagen (Kapitel 3), da gerade die verfügbaren Kartenwerke die wesentliche Grundlage für diese Arbeit darstellen. Auch der Umsetzung der Untersuchung mit Hilfe von GIS (Kapitel 4) wurde ein größerer Umfang eingeräumt, da diese den größten Teil der Arbeitszeit dieser Arbeit ausmachten. Hier soll weniger auf die Grundlagen von GIS eingegangen werden, da diese schon in unzähligen Werken abgehandelt wurden, sondern mehr auf die Probleme die bei der Anwendung auftraten. Auch soll hier auf die Möglichkeiten des Zusatzprogramms ArcScan eingegangen werden, da dieses im Lehrbetrieb von Universitäten nur selten vorhanden ist. Abgerundet wird diese Arbeit durch die Präsentation der Ergebnisse (Kapitel 5) und deren Diskussion und Interpretation (Kapitel 6). Den Abschluss bilden die Zusammenfassung (Kapitel 7) und die Quellenangaben (Kapitel 8). Im Anhang finden sich die Tabellen mit den errechneten Volumen-, Flächen- und Massenwerten und deren Bilanzen, da diese im Kapitel 5 zu viel Platz eingenommen hätten. Des Weiteren finden sich hier eine Reihe von Ansichten des Gepatschferners und seiner Umgebung, welche einen Eindruck von der Beschaffenheit der Landschaft dieser Region vermitteln sollen.





### 1.3 Aufgabenstellungen und Ziele

Ziel dieser Arbeit ist die Bestimmung des Volumens, der Fläche und der Masse des Gepatschferners sowie deren Veränderungen im Zeitraum von 1872 bis 2004. Dabei ergibt sich der untersuchte Zeitraum aus dem vorhandenen bzw. verwendbaren Kartenmaterial. Nicht geplant ist dagegen ein Vergleich der Ergebnisse mit Massenbilanzen anderer Gletscher oder aber ein umfangreicher Vergleich mit klimatischen Größen, da dies den Umfang dieser Arbeit deutlich überschreiten würde. Zur Bestimmung der Bilanzen sind folgende Arbeitsschritte notwendig:

- Digitalisierung und digitale Aufbereitung der Kartengrundlagen
- Ableitung der benötigten Daten wie Höhenlinien, Höhenpunkte, Grenzen und Flächen aus den aufbereiteten Karten unter ArcGIS
- Erstellung digitaler Geländemodelle (DGM) in Form von TIN und Grid unter ArcGIS
- Berechnung der Volumen- Flächen- und Massenbilanzen der einzelnen Gletscherstände aus den DGM's
- Statistische Auswertung der Ergebnisse
- Präsentation der Ergebnisse in Form von Tabellen, Diagrammen und Karten



## Kapitel 2:

# Geologische und Geographische Beschreibung des Untersuchungsgebiets

## 2.1 Räumliche und Naturräumliche Einordnung

Der im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Gepatschferner liegt am Ende des Kaunertals (nach S. FINSTERWALDER 1888 & 1928 auch Kaunsertal genannt) in den südlichen Öztaler Alpen im Bereich der gleichnamigen Gemeinde Kaunertal.

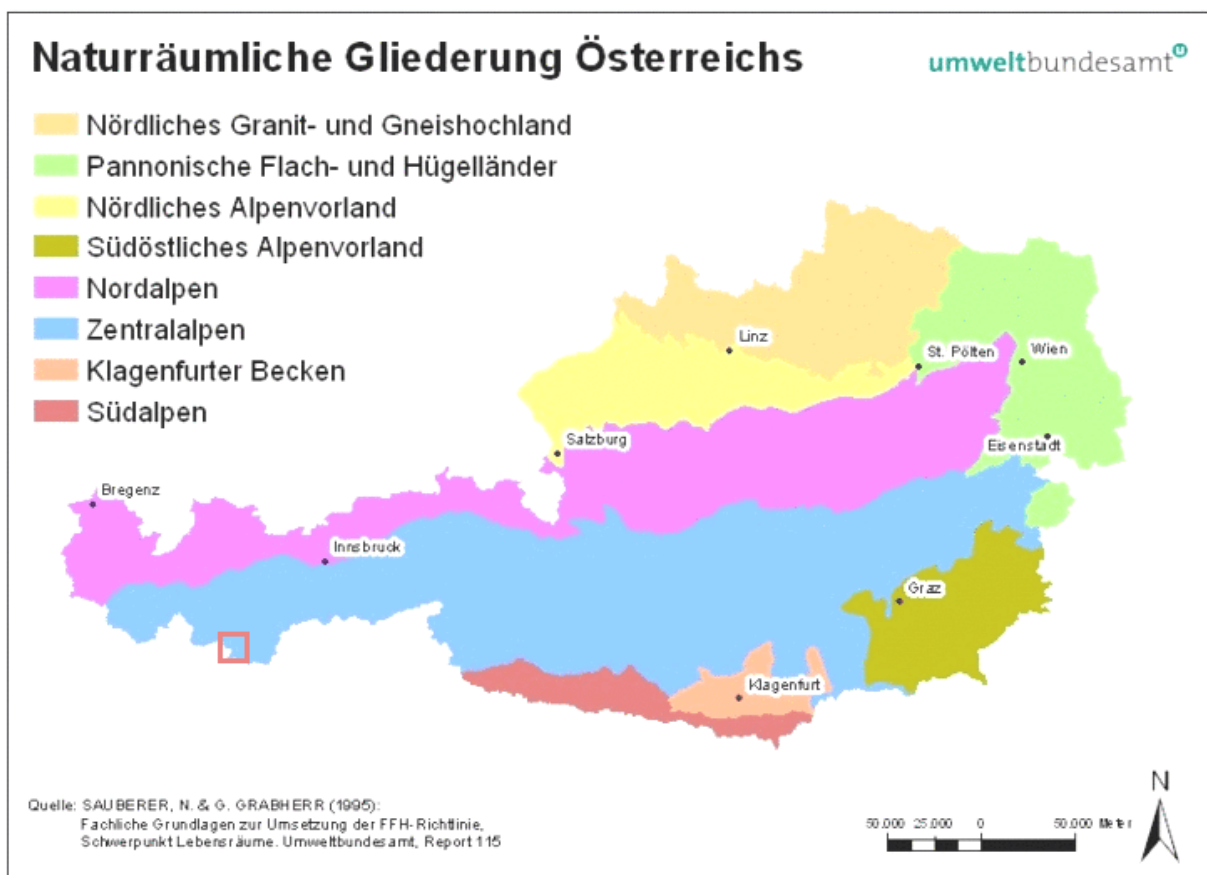


Abb. 2.1.1: Naturräumliche Gliederung Österreichs. Das Gebiet des Gepatschfernens ist rot umrandet ([www.naturschutz.at/natur-und-landschaft/](http://www.naturschutz.at/natur-und-landschaft/), verändert).

## 2. Geologische und Geographische Beschreibung des Untersuchungsgebiets

Die Gemeinde Kaunertal befindet sich am südöstlichen Rand des Bezirks Landeck, welcher Teil des Bundeslandes Tirol ist. Naturräumlich gehören die Öztaler Alpen zum südwestlichen Teil der Zentralalpen, die sich fast über die gesamte Breite Österreichs erstrecken. Das Gebiet, in dem sich der Gepatschferner befindet, ist rot umrandet.

Der größte Teil des Gepatschferners befindet sich auf österreichischem Staatsgebiet (siehe Abb. 2.1.2), lediglich der südwestliche Teil von der Weißseespitze über die Zinne bis hin zur Hinteren Hintereisspitze und der Hochvernaglwand befindet sich auf italienischem Staatsgebiet.

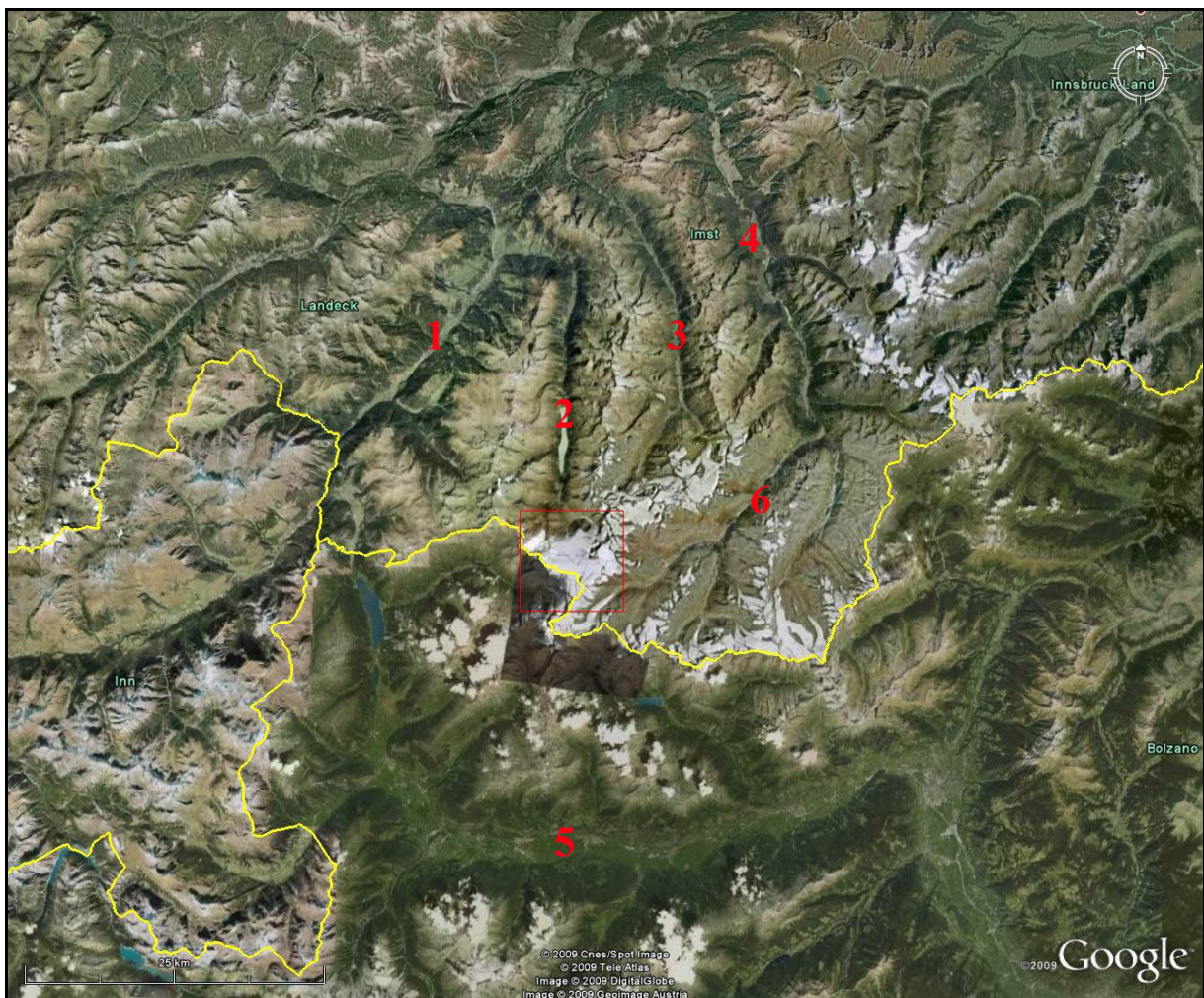


Abb. 2.1.2: Die südlichen Ötztaler Alpen. Das Gebiet des Gepatschferners ist rot umrandet. Staatsgrenzen sind in Gelb abgesetzt. 1: Inntal, 2: Kaunertal, 3: Pitztal, 4: Ötztal, 5: Etschtal, 6: Ventertal (Google Earth 2009, verändert).

In Abb. 2.1.2 befindet sich Österreich im Norden, die Schweiz im Westen und Italien im Süden. Das Kaunertal ist neben dem Inntal, dem Pitztal und dem Ötztal eines der nahezu in Nord-Süd-Richtung ausgerichteten Haupttäler der Ötztaler Alpen. Weiter im Süden bildet das nahezu in West-Ost-Richtung verlaufende Etschtal, das sich bereits auf italienischem Staatsgebiet befindet, den südlichen Abschluss der Ötztaler Alpen. Südöstlich des Gepatschferners verläuft das Rofental, welches in das Ventertal mündet.

Die Entwässerung des Gepatschferners erfolgt zum überwiegenden Teil in nördliche Richtung über den Faggenbach (gelegentlich auch als Gepatschbach bezeichnet) und den Gepatschstausee durch das Kaunertal. Lediglich der südliche und südwestliche Teil des Gepatschferners, welcher im Wesentlichen dem italienischen Staatsgebiet entspricht, mündet in den südwestlich angrenzenden Langtauferer Ferner und entwässert über den Karlinbach, der durch das Langtauferertal fließt, in den Reschensee, welcher in Abb. 2.1.2 westlich des Gepatschferners zu erkennen ist (siehe hierzu auch Abb. A 2.1 und A 2.2 im Anhang).

### **Namensgebung:**

Der Name Gepatsch leitet sich vom romanischen *compaccio* ab, was soviel wie „großes karges Feld“ bedeutet. Der Begriff Ferner für Gletscher ist in fast ganz Nordtirol verbreitet. Er leitet sich vom altergermanischen, gotischen *fairn* bzw. altdeutschen *firmi* oder *verne* ab, was soviel bedeutet wie „der Alte, Vorjährlinge, im Laufe der Zeit zu Eis gewordene Schnee“. Von dem Namen des Dorfes Ötz leitet sich die Bezeichnung des Ötztals und der Ötztaler Alpen her. Dabei leitet sich der Begriff Ötz von dem altdeutschen *äsen* oder *etzen* her und bedeutet Weide.



## 2.2 Geologie

### Alpenraum:

Die Entstehung der Alpen basiert, stark vereinfacht, auf zwei Komplexen der Gebirgsbildung, dem älteren Variszischen Gebirge, dessen Bildung bereits im Jungpaläozoikum abgeschlossen war, und dem Alpidischen Gebirge, welches während der Kreidezeit und des Tertiärs entstand. Die Abfolge der Gebirgsbildung ist anhand der allgemeinen geologischen Zeittafel (Abb. 2.2.1) nachvollziehbar.

Abb. 2.2.1: Allgemeine Zeittafel zur Erdgeschichte (BÖGEL und SCHMIDT, 1976).

Ära (Zeitalter)	Periode (Formation)	Epoche (Abteilung)	Beginn vor Mio. Jahren	Gebirgsbildung	
Känozoikum	Quartär		Holozän Pleistozän	<b>ALPIDISCHE</b>	
	Tertiär	Neogen	{ Pliozän Miozän		1,5
Paläogen			{ Oligozän Eozän Paleozän	67	
	Mesozoikum	Kreide	Ober-		{ Maastricht Campan Santon Coniac Turon Cenoman Alb Apt
Unter-			{ Barrême Hauterive Valangien		
Jura		Malm	{ Tithon Kimmeridge Oxford	195	
		Dogger	{ Callovien Bathonien Bajocien Aalenien Toarcien Pliensbachien Sinemurien Hettangien		
Trias		Ober-	{ Rät Nor Karn	225	
		Mittel- Unter-	{ Ladin Anis Skyth		
Paläozoikum		Perm	Ober- Mittel- Unter-	Zechstein Rotliegend	285
	Karbon	Ober-	{ Stefan Westfal Namur	350	
		Unter-	{ Visé Tournai		
	Devon	Ober- Mittel- Unter-		405	<b>KALEDONISCHES EREIGNIS</b>
	Silur		Ludlow Wenlock Llandovery	440	
	Ordovizium		Ashgill Caradoc Llandeilo Llanvirn Arenig Tremadoc	500	
	Kambrium	Ober- Mittel- Unter-		570	
Präkambrium	Jung- Mittel- Alt-				

## 2. Geologische und Geographische Beschreibung des Untersuchungsgebiets

Während des Karbons kam es im Zusammenhang mit der Variszischen Gebirgsbildung zu Verfaltungen und Überschiebungen der paläozoischen Sedimente und Vulkanite. Nach Abschluss der Variszischen Gebirgsbildung drangen, vermutlich schon im Oberkarbon und Perm, granitische Plutonite ein. Während der Trias kam es überwiegend zur Ablagerung von Flachwassersedimenten. Beginnend in der Trias, aber überwiegend im Jura, bildeten sich die Helvetischen-, Penninischen- und Ostalpinen-Tröge heraus. Wegen der Ausbildung von Becken kam es während des Jura sowohl zur Ausbildung geringmächtiger Schwellensedimente, als auch sehr mächtiger Beckenfüllungen. Noch während der Kreidezeit begann die Alpidische Orogenese. In der Folgezeit kam es zu verschiedenen Ereignissen der Verfaltung, Überschiebung, Absenkung und Sedimentation. Aber erst im Miozän begann eine Hebung, welche gegen Ende des Pliozän zur Ausbildung des Hochgebirgscharakters der Alpen in seiner heutigen Form führte (BÖGEL und SCHMIDT, 1976).



**Ötztaler-Stubaier-Masse:**

Das Gebiet des Gepatschferners ist Teil der Ötztaler-Stubaier-Masse, welche wiederum ein wesentlicher Bestandteil des Oberostalpinen Altkristallins ist (siehe Abb. 2.2.2).

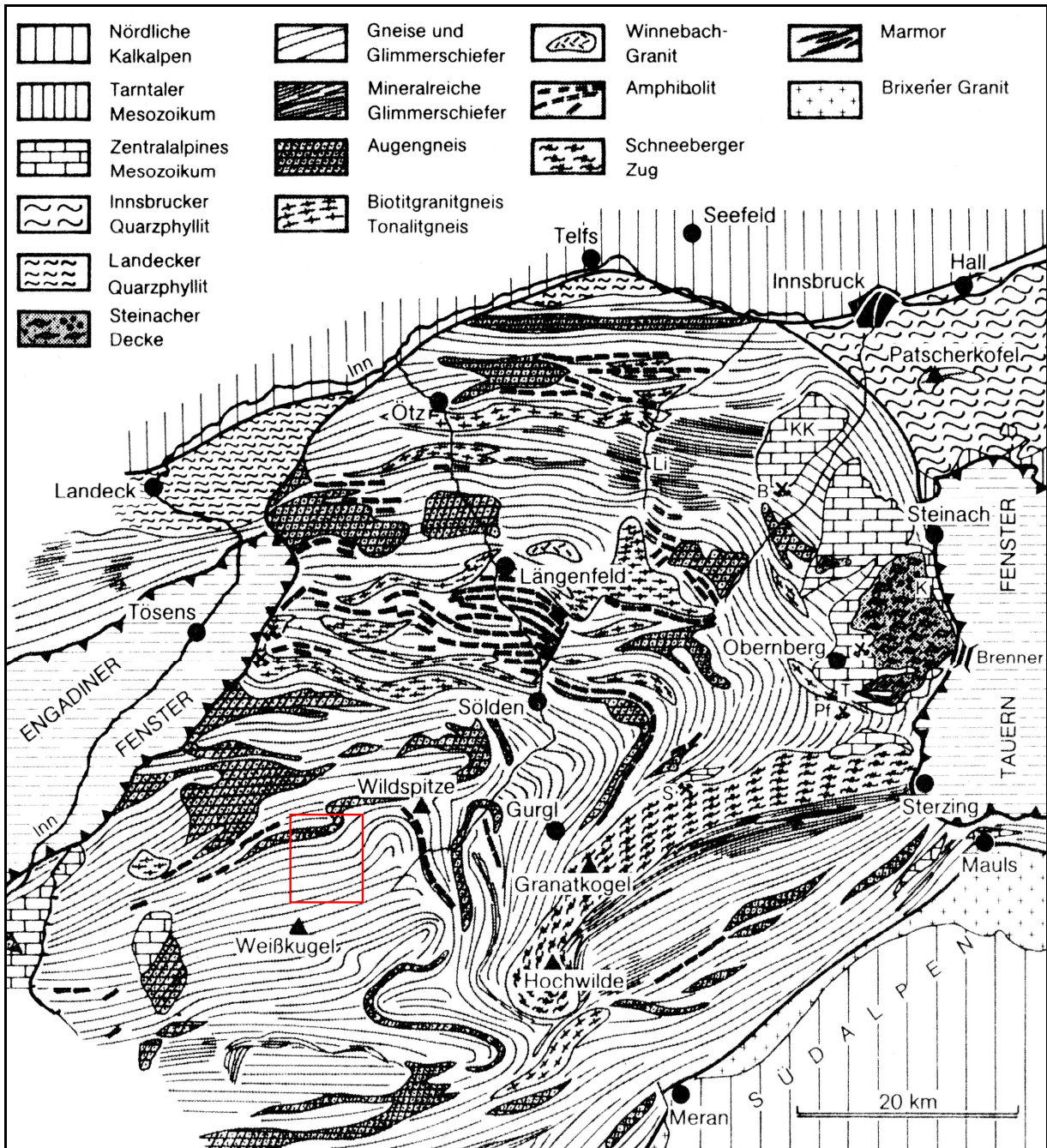


Abb. 2.2.2: Geologische Übersichtskarte des Altkristallins der Ötztaler und Stubai Alpen nach PURTSCHELLER und FRUTH (BÖGEL und SCHMIDT, 1976, verändert). Das Gebiet in dem sich der Gepatschferner befindet ist rot umrandet.

Die Öztaler-Stubaier-Masse umfasst ein Gebiet von etwa 70 x 70 km. Dieses wird im Westen durch das Penninikum des Engadiner Fensters, im Norden durch die Nördlichen Kalkalpen, im Osten durch die Schieferhüllen des Tauern Fensters und im Süden durch die Zone der alten Gneise und dem Schneeberger Zug begrenzt. Sie ist die größte ortsfremde Kristallinscholle der Ostalpen, die offensichtlich den Nördlichen Kalkalpen aufgeschoben ist. Die im Westen und Osten hervortretenden penninischen Gesteine weisen darauf hin, dass das Penninikum durch die Öztaler-Stubaier-Masse überfahren wurde, welche ihr nun als Decke aufliegt. Relativ flache, in Ost-West Richtung verlaufende Faltenachsen finden sich im nördlichen Teil der Öztaler Alpen.

Nach Süden hin richten sich diese, bei gleichzeitiger Änderung des Streichens, bis zur Steilstellung auf (siehe Abb. 2.2.3). Dieser steilstehende Faltenbau, der im mm bis km Bereich vorhanden sein kann, wird auch als Schlingentektonik bezeichnet (BÖGEL und SCHMIDT, 1976). Der genaue geologische Aufbau der Ötztaer-Stubaier-Masse kann aus Abb. 2.2.2 ersehen werden.

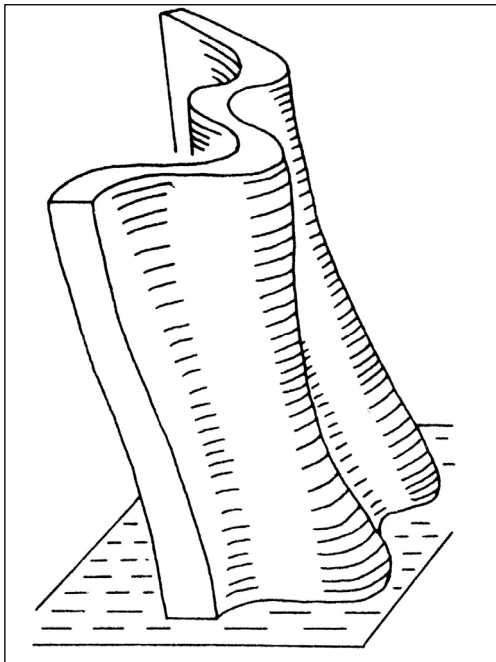


Abb. 2.2.3: Modell einer steilstehenden Falte (BÖGEL und SCHMIDT, 1976).

### **Petrographie:**

Die Hauptmasse der Gesteine wird aus grauen Biotit-Plagioklasgneisen, welche aus mächtigen Grauwacken- und Tonschiefer-Serien entstanden, gebildet. Stellenweise gehen diese in granat-, staurolith- und disthenführende Glimmerschiefer über. Durchsetzt sind diese mit Amphiboliten, Eklogiten und Granitgneisen. Die

steilwandigen, schroffen Felsgrate werden meist von den Abkömmlingen magmatischer Gesteine gebildet, wohingegen die Bergkämme in der Regel von weicheren Glimmerschiefern und Sedimentgneisen gebildet werden. Der südöstlich gelegene Schneeberger Zug wird dagegen von granatführenden Glimmerschiefern, Amphiboliten, Marmoren, Hornblende-Garbenschiefern und Quarziten aufgebaut (Bögel und Schmidt 1976; PURTSCHELLER 1971).

Das Gestein im Bereich des Gepatschferners wird überwiegend aus Paragneisen und Glimmerschiefern gebildet. Im Bereich des Rauhen Kopfes stehen Granitgneise in Form von Muskowitgranit und zweiglimmerigem Augengneis an, welcher schleifenförmig gefaltet ist. Der Gipfel des Fluchtkogels wird hingegen aus morphologisch hartem Amphibolit gebildet (PURTSCHELLER 1971). Anzunehmen ist, dass auch andere Gipfel und Grate im Bereich des Gepatschferners, die zum Teil aus der Gletscheroberfläche heraus schauen, aus solchen morphologisch härteren Gesteinen bestehen.

### **Metamorphose:**

Im Laufe der Zeit hat das Oberostalpine Altkristallin eine vielfache Metamorphose erlebt. Sein Gepräge erhielt es in sehr tiefen Zonen der Erdkruste bei entsprechend hohen Temperaturen und Drucken. Bereits im tiefen Oberkarbon war die gefügeprägende Metamorphose der Phyllite, Glimmerschiefer, Gneise, Migmatite und Amphibole abgeschlossen, da sie diskordant von mesozoischen Sedimenten überlagert werden. Diese metamorphen Gesteine entstanden aus Ablagerungen und Vulkaniten des Altpaläozoikums und des Jungpräkambriums im Zusammenhang mit der Variszischen Gebirgsbildung. Radiometrische Altersbestimmungen haben ergeben, dass weite Teile des Altkristallins ihre letzte Metamorphose und Mineralneubildung im Karbon vor 350 – 280 Mio. Jahre durchliefen. Altersbestimmungen von 480 - 420 Mio. Jahre bestätigen zudem, dass es bereits im Altpaläozoikum während des Ordoviziums und des Silurs zu Gesteinsaufschmelzungen und zu Intrusionen granitischer Schmelzen kam. Diese stehen in Verbindung zum Kaledonischen Ereignis. Auch die Alpidische Gebirgsbildung hinterließ ihre Spuren. Dies beweisen Altersbestimmungen von 120 - 70 Mio. Jahre an Biotiten. Man kann diese Daten als Abkühlungsalter des vormals erneut auf über 300°C erwärmten Altkristallins während der Anhebung durch die Alpidische Gebirgsbildung deuten (BÖGEL und SCHMIDT, 1976).



## 2.3 Geomorphologie

### **Öztaler Alpen und Kaunertal:**

DONGUS (1984) schlägt das Gebiet der Öztaler Alpen, so auch das des Kaunertals und des Gepatschferners, nach seiner Einteilung den Gebieten mit zugefisteten Rumpftreppen im Kristallin mit Graten, Kämmen, Einzelgipfeln, Firnfeldern und Kartreppen, zu. Nach PURTSCHELLER (1971) folgen die Haupttäler der Öztaler Alpen, wie zum Beispiel das Ötztal, das Pitztal und auch das Kaunertal, regelhaft einem Nord-Süd streichenden Hauptgefügesystem. Diese recht regelmäßige Anordnung der Täler in den nördlichen Öztaler Alpen ist maßgeblich auf die präpleistozäne Verwitterung und Erosion zurückzuführen, welche ihrerseits stark vom recht einfachen geologischen Bau aus flachliegenden, Ost-West streichenden Großfalten beeinflusst ist, die in dieser Region vorherrschen. Der südliche Teil der Öztaler Alpen weist dagegen einen viel weniger einheitlichen geologischen Bau auf, der vielfach durch steilstehende Schlingentektonik geprägt ist. Zwar finden sich auch hier senkrecht zur Faltenachse verlaufende Täler, wie das Venter Tal und das Rofental, doch treten hier vermehrt Engstellen und Knicke in Tälern auf, die zum Beispiel auf Täler querende Gesteinsstrukturen größerer morphologischer Härte zurückzuführen sind. PURTSCHELLER (1971) schließt daraus, dass die Orientierung der sich in diesem Gebiet befindenden Täler von der tektonisch vorgegebenen Struktur unabhängig ist (siehe hierzu auch Abb. 2.1.2).

Sowohl im Ötztal als auch im Kaunertal finden sich, sowohl weite, flache Talbecken, als auch schluchtartige Engstellen, die teilweise mit Steilstufen verbunden sind. Nach PURTSCHELLER (1971) sind diese Unterschiede in den Tallängsverläufen auf das Vorkommen unterschiedlicher Gesteine zurückzuführen. So macht er für Talweitungen weiche, verwitterungsanfällige Gesteine wie Schiefergneise verantwortlich, wohingegen steile Engstellen auf härtere, verwitterungsresistentere Gesteine wie Granodioritgneise, Augengneise und Amphibolite zurückzuführen sind. Die Auswirkung von Glazialerosion lässt PURTSCHELLER allerdings offen.

### **Gepatschferner und Umgebung:**

Auch für den Bereich des Gepatschferners und sein weiteres Umfeld sind diese geologischen Voraussetzungen von Bedeutung. So ist nach PURTSCHELLER (1971) die Engstelle an der sich heute der Damm des Gepatschstausees befindet, auf den

## 2. Geologische und Geographische Beschreibung des Untersuchungsgebiets

dort anstehenden Augengneis zurückzuführen, wohingegen der weitere Teil des Tales, in dem sich heute der Stausee befindet, auf den dort anstehenden, weicheren Paragneis zurückzuführen ist (siehe hierzu auch Abb. A 1 und A 2 im Anhang).

Wie schon in Kap. 2.2 erwähnt, besteht auch der Rauhe Kopf teilweise aus Augengneis. Nach KEUTTERLING (1998) könnte sich dieser Augengneis-Riegel von etwa der Weißseespitze, über den Rauhen Kopf und die Schwarze Wand bis hin zur Hochvernagtspitze ziehen. Allerdings fehlt der letzte Beweis, da es bislang keine morphologische Literatur speziell zu diesem Gebiet gibt, bzw. keine gefunden werden konnte. Lediglich für den Fluchtkogel ist bekannt, dass dieser aus Amphibolit besteht (PURTSCHELLER 1971). Mit 3493,5 m Höhe (nach AV-Karte 30/2 Ausg. 2003 3500 m) stellt er die höchste Erhebung am östlichen Rand des Gepatschferners dar. Auffallend ist, dass der Gepatschferner von einer ganzen Reihe schroffer Gipfel und Wände geradezu umringt wird. Auch im Gletscherbett selbst befinden sich mehrere aus der Gletscherfläche herausstehende Felsformationen (siehe hierzu auch Abb. A 2, A 6 und A 10 im Anhang). Anzunehmen ist, dass auch diese Oberflächenformen auf härtere, verwitterungsresistentere Gesteinsformationen zurückzuführen sind.

Dagegen weist das Gletscherbett einige Verebnungsflächen auf aber auch mehrere Hohlformen. Die Hohlformen sind vermutlich auf die Tätigkeit des Gletschers zurückzuführen. Eventuell verharrte der Gletscher während starker Rückzugsphasen für längere Zeiträume in diesen Vertiefungen.

Für die Verebnungsflächen gibt es verschiedene Entstehungstheorien. Nach PURTSCHELLER (1971) findet sich in den gesamten Öztaler Alpen ein Verflachungssystem, welches die mitteltertiäre Landoberfläche darstellen soll und in einer Höhe von 2700 bis 2800 m anzutreffen sei. Entstanden sei diese durch ruckweise Hebung des Gebirgskörpers. Die außergewöhnliche Vergletscherung der Öztaler Alpen sei darauf zurückzuführen, dass sich diese Verebnungsflächen im Bereich der rezenten Schneegrenzen befänden.

DONGUS (1984) dagegen sieht, auch in den Öztaler Alpen, mehrere Verebnungsflächen, welche eng mit den vorhandenen Steilformen verzahnt sind. Genetisch seien diese als tertiäre Rumpfflächen und Rumpfstufen anzusehen, welche, ähnliche den Mittelgebirgsrumpftreppen, in präpleistozäner Zeit entstanden seien. Diese Formen seien während des Pleistozäns glazial stark überformt worden. Speziell im Gletscherbett des Gepatschferners treten Verebnungsflächen bis in eine Höhe von etwa 3300 m auf, die so nicht zur Theorie PURTSCHELLERS passen. Eine

eindeutige Aussage kann aber im Rahmen dieser Arbeit nicht gegeben werden, da das heutige Gletscherbett während des Tertiärs und den Interglazialen des Pleistozäns vermutlich mehrmals vollständig eisfrei war und die Oberflächenformen fluviatil überprägt wurden. Auch DONGUS (1984) weist darauf hin, dass die alpinen Flachformen bei späteren Hebungen kaum konserviert sondern stark zerschnitten wurden.

Die Oberflächenformen, welche sich heute unterhalb der Altflächen befinden, führt DONGUS (1984) auf tektonische Bewegungen und damit verbundene Erosionsvorgänge während des Jungtertiärs zurück. Dazu gehören vor allem die Bildung von neuen, breiten Talböden und deren darauf folgende Zerschneidung. Auch PURTSCHELLER (1971) erwähnt Terrassen und Gesimse in den Öztaler Alpen, speziell auch im Kaunertal. Die hängetalartigen Seitentäler in Höhe der Ortschaft Feichten, welche in einem Niveau von etwa 600 Metern über der Talsohle in das Kaunertal münden, bestätigen diese Theorie (siehe hierzu auch Abb. A 1 im Anhang). Nach DONGUS (1984) bilden die Reste der jungtertiären Terrassen und Täler die Grundlage der Trogschultern und glazialen Tröge.

### **Pleistozäner Formenschatz:**

Im Vergleich zur präpleistozänen Oberflächenformung sieht PURTSCHELLER (1971) nur einen geringen Einfluss der pleistozänen Vergletscherungen auf die Morphologie. So seien die bereits vorhandenen Hohlformen nur ausgestaltet und weiter ausgeformt worden. So weist zum Beispiel das Gletscherbett des Gepatschferners und seiner Gletscherzunge eindeutige Merkmale glazialer Formungsprozesse auf. DONGUS (1984) bezeichnet das während des Tertiärs entstandene Relief als Rohrelief, welches während des Pleistozäns glazial überformt wurde.

S. FINSTERWALDER (1888) erwähnt „riesige Schliiffwände“ und „rotbraune Rundbuckel“. Im Begleitwort zur Karte des Gepatschferners (1928) wird S. FINSTERWALDER konkreter. Er beschreibt im Gletschervorfeld des Gepatschferners Gletscherschliffe auf dem Hügel, auf welchem das Gepatschhaus zu finden ist sowie eine etwa 1 km lange und 100 m hohe, glatte Schliiffwand, durch die die Gletscherzunge einst stark nach rechts gedrückt wurde. Weiter hinten ist das ehemalige Zungenbecken von einem moränenbekleideten Hang begrenzt. Im rechten Bereich des Zungenbeckens beschreibt FINSTERWALDER eine mehrfach gestufte Rundbuckellandschaft, welche größtenteils mit Moränenschutt bedeckt sei.

## 2. Geologische und Geographische Beschreibung des Untersuchungsgebiets

SENARCLENS-GRANCY (1956) erwähnt bis zu 10 Wälle, die sich auf der Riffelseite und Im Wannet befinden. Er deutet diese als die Reste von Seiten- und randnahen Mittelmoränen. Verschiedene Überreste von Seiten- und Endmoränen beschreiben auch KERSCHNER (1979) und NICOLUSSI und PATZELT (2000), welche im gesamten Bereich des Talschlusses des Kaunertals zu finden sind. Diese lassen sich vielfach den Daun- und Egesen-Stadialen zuordnen. Andere Moränen sind dem postglazialen Maximalstand von 1855 zuzuschlagen. Diverse Kare im Bereich des Talschlusses, die in den Daun- und Egesen-Stadialen von Gletschern erfüllt waren, vervollständigen den glazialen Formenschatz des hinteren Kaunertals (siehe hierzu auch Abb. A 2.3, A 2.4, A 2.5, A 2.7 und A 2.9 im Anhang).



## 2.4 Klima

### Alpenraum im ausgehenden Pleistozän und Holozän:

Nach BÖHM (1993) stellt die Lufttemperatur die bestimmende Größe des Klimas im Verlauf der Jahrzehnte dar. Des Weiteren stellt sie die am besten erforschte klimatische Größe dar. Die Lufttemperatur alleine darf aber nicht mit dem Begriff Klima gleichgesetzt werden, da das Klima aus der Gesamtheit der Klimaelemente besteht. Aus besagten Gründen soll im Folgenden, anhand der bodennahen Lufttemperatur, das Klima des späten Pleistozäns und des Holozäns dargestellt werden.

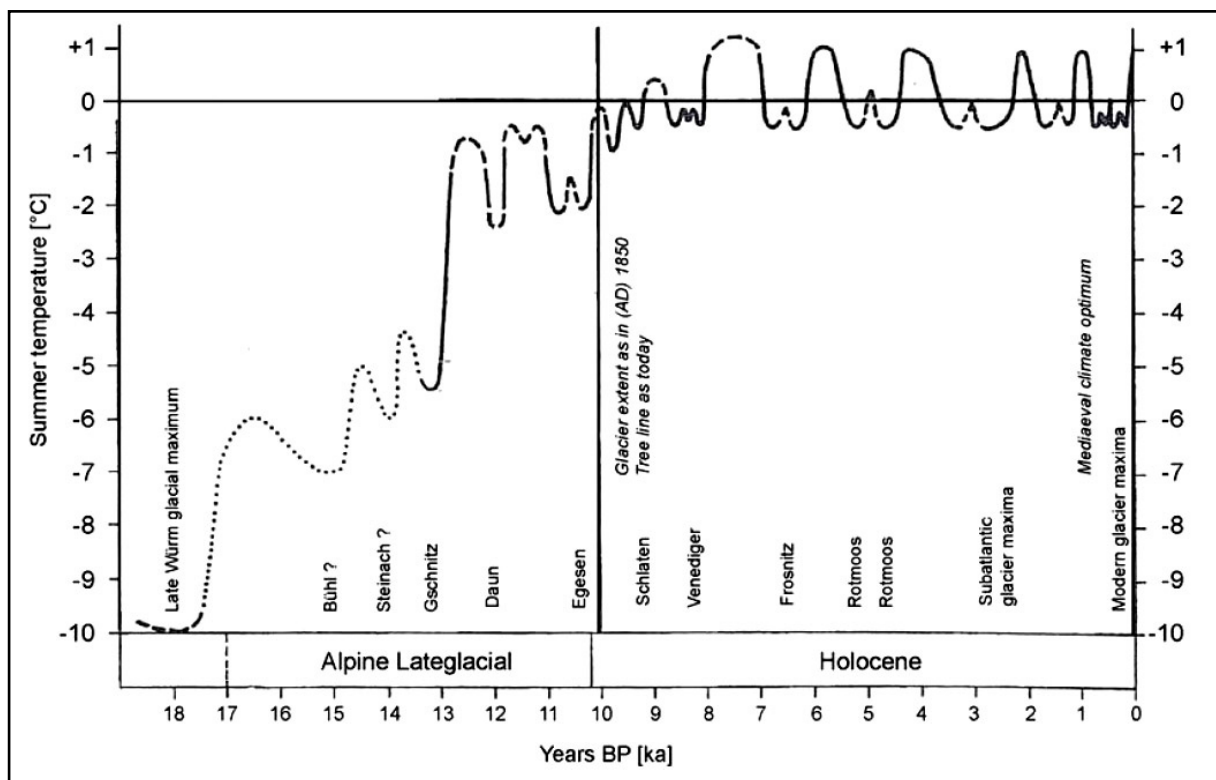


Abb. 2.4.1: Sommertemperatur im Alpenraum im späten Pleistozän und Holozän, abgeleitet aus der Variation von Baum- und Schneegrenzen (PATZELT 1980, verändert).

Nach dem Maximalstand der Vereisung der Würmzeit vor etwa 18000 Jahren vor heute (v. h.) erwärmte sich das Klima im Alpenraum relativ rasch. Die Erwärmung wurde aber immer wieder von Kältephasen mit entsprechenden Gletschervorstößen unterbrochen. Vor etwa 10000 Jahren v. h. waren die Temperaturen etwa auf den Stand von 1850 angestiegen, so dass auch die Ausdehnungen der Gletscher in etwa

## 2. Geologische und Geographische Beschreibung des Untersuchungsgebiets

dem Stand von 1850 entsprachen. Nach PATZELT (1980) waren die sommerlichen Temperaturen in diesem Zeitraum um etwa 9 – 10°C angestiegen.

Zur Zeit des Holozänen Optimums (ca. 8000 - 3500 v. h.) waren die Temperaturen auf das höchste Niveau im gesamten Holozän angestiegen. In Österreich lagen die Temperaturen um etwa 2°C höher als heute und die Baumgrenze war etwa 200 – 300 m höher angesiedelt. Diese Zeitperiode war von einzelnen Kälteperioden unterbrochen. In der darauf folgenden Zeitperiode sanken die Temperaturen um etwa 1-2°C unter das heutige Niveau. Nach dieser Temperaturdepression folgten das Optimum der Römerzeit (um 2000 v. h.) und das Mittelalterliche Optimum (um 1200 - 800 v. h.), welche durch eine weitere etwa 400 jährige kältere Periode unterbrochen waren (SCHABLEGER 1996). Der Wechsel von kälteren und wärmeren Phasen kann anhand von Abb. 2.4.1 gut nachvollzogen werden (vergleiche dazu auch Abb. 2.7.2).

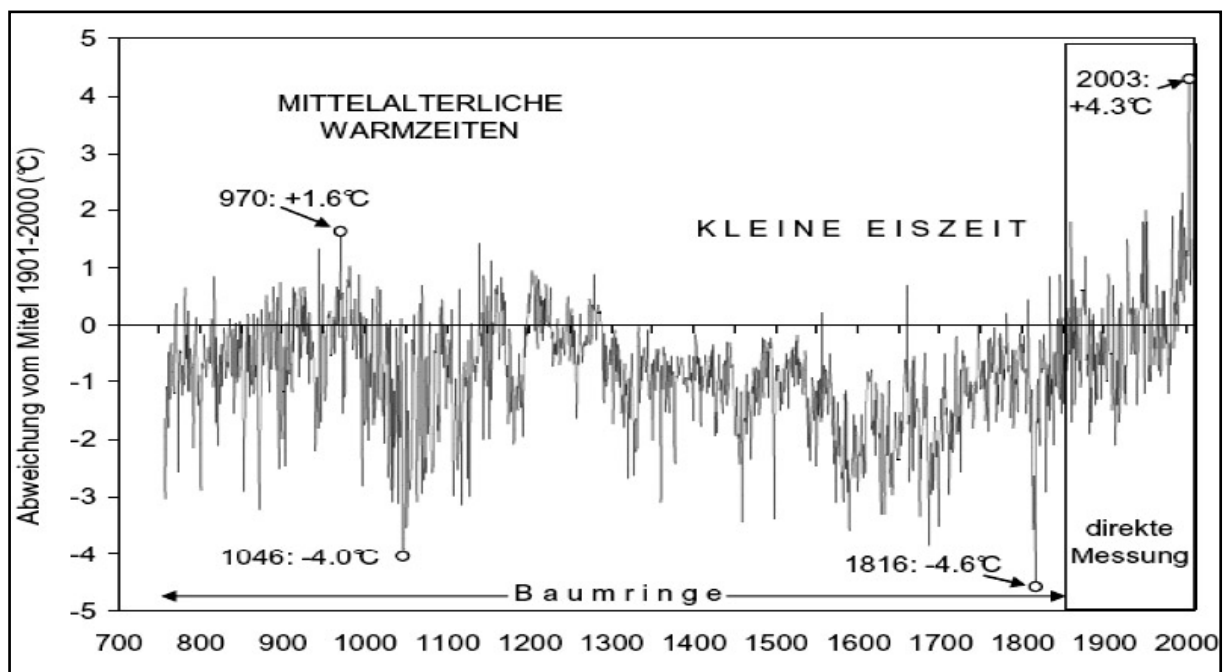


Abb. 2.4.2: Rekonstruktion der Sommer-Frühherbst Temperatur (Juni – September) in den Alpen seit dem Jahr 755 n. Chr. in °C als Abweichung vom Mittel der Jahre 1901 – 2000 (BÖHM et al., 2007).

Nach dem letzten Temperatur-Hochstand der Mittelalterlichen Warmzeit sanken die Temperaturen wieder deutlich ab. Die folgende Zeitperiode von etwa 1300 n. Chr. – 1900 n. Chr. wird auch als Kleine Eiszeit bezeichnet. In dieser Zeitperiode erreichten die Gletscher im Alpenraum mehrmals ihre maximale holozäne Ausdehnung. Bei der Kleinen Eiszeit handelt es sich aber nicht um eine durchgehende Kälteperiode.

## 2. Geologische und Geographische Beschreibung des Untersuchungsgebiets

Vielmehr wechselten sich mehrere Jahrzehnte andauernde kalte und mildere Phasen ab, wobei die Temperaturminima in den letzten 200 Jahren etwa um 1850 n. Chr. und 1890 n. Chr. anzusiedeln sind. Bis etwa zum Jahr 1950 folgte eine Phase nahezu kontinuierlicher Erwärmung mit einem entsprechend starken Rückgang der Vergletscherung in den Alpen (SCHABLEGER 1996).

### Rezentes Klima im Alpenraum:

Die flächenhafte Verteilung des Niederschlags im Alpenraum kann schon auf geringe Entfernungen große Unterschiede aufweisen. Allgemein kann jedoch gesagt werden, dass die Niederschlagsmenge von den Randbereichen der Alpen zu den Inneralpen kontinuierlich abnimmt. Dies wird aus Abb. 2.4.3 ersichtlich. So nimmt die Jahresniederschlagsmenge um etwa 20 mm je 2 km horizontale Entfernung von den Inneralpen zu den Randalpen zu. Dies entspricht in etwa der Zunahme der Jahresniederschlagsmenge je 100 Höhenmeter. Im mittleren Jahrgang der Niederschläge entsprechen die Ost- und Zentralalpen dem kontinentalen Typ mit dem Niederschlagsmaximum im Sommer und relativer Wintertrockenheit.

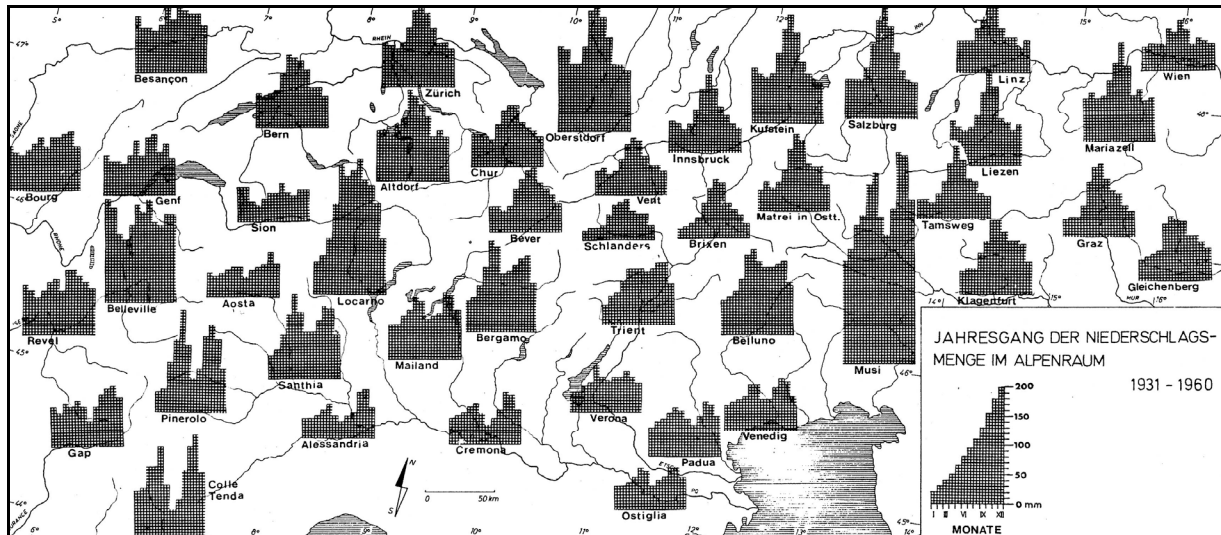


Abb. 2.4.3: Jahrgang der Niederschlagsmenge im Alpenraum (FLIRI, 1974).

Die Lufttemperaturen dagegen zeigen flächenhaft eine deutlich größere Kohärenz als die Niederschlagsmengen. So können die gemessenen Niederschlagsmengen einer Station nicht ohne weiteres für einen ganzen Raum angenommen werden. Eher möglich ist dies jedoch bei den gemessenen Lufttemperaturen (FLIRI 1974).

### Ötztaler Alpen und Kaunertal:

Nach KÖLBEL (1984) ist das Klima des südlichen Ötztals relativ trocken und wolkenarm. In typischer Weise entspricht es dem relativ trockenen Klima des gesamten inneralpinen Bereiches, welches sich aus den Effekten der Massenerhebung herleiten lässt. Im Bereich der inneren Alpen hat aber auch die Orographie einen großen Einfluss auf das lokale Klima. So wirkt sich gerade bei Nord- und Nordwestwetterlagen die Abschirmung des Ötztals gegenüber diesen Strömungsrichtungen auf die Niederschlagshöhe aus. Auf das Jahr bezogen weist die Niederschlagsverteilung das für Mitteleuropa typische Sommermaximum auf, wobei aber die herbstlichen Niederschläge, zumindest im Ötztal, taleinwärts an Bedeutung zunehmen. Die sommerlichen Niederschläge sind meist auf gesamtalpine Tiefdrucklagen zurückzuführen, wogegen die herbstlichen Niederschläge einen mediterranen Einfluss aufweisen.

Die im hinteren Ötztal gelegene Station Obergurgl weist, gemessen an der Meereshöhe, ausgesprochen niedrige mittlere Jahresniederschläge auf (siehe Abb. 2.4.4).

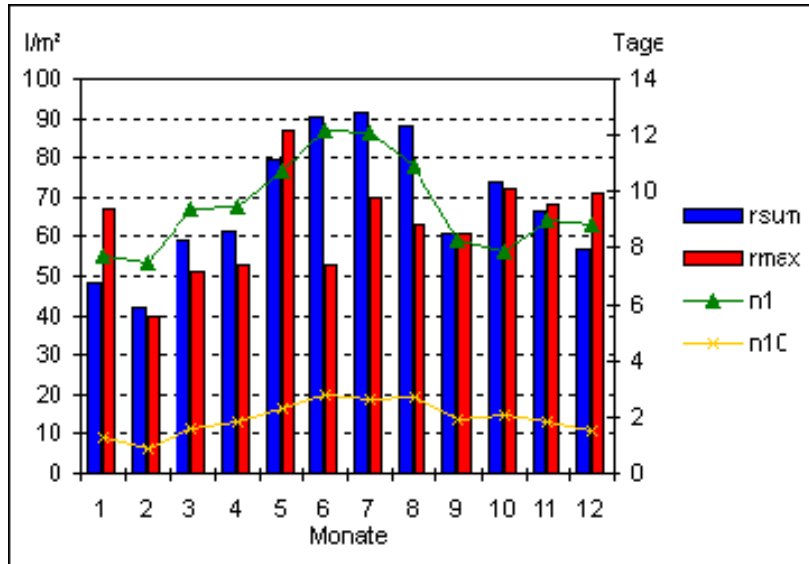


Abb. 2.4.4: Niederschlag an der Station Obergurgl ([www.zamg.ac.at/](http://www.zamg.ac.at/))

Die mittlere jährliche Niederschlagshöhe für die Station Obergurgl gibt KÖLBEL (1984) für den Zeitraum von 1901 bis 1960 mit 840 mm an. Für den Zeitraum von 1961 – 1990 gibt das ZAMG ([www.zamg.ac.at/](http://www.zamg.ac.at/)) eine mittlere jährliche Niederschlagshöhe von 851 mm an und 819,2 mm für den Zeitraum von 1971 – 2000. Für den Zeitraum von 1901 bis 1990 ergibt sich daraus eine mittlere jährliche Niederschlagshöhe von 843,7 mm. Daraus kann abgeleitet werden, dass die Niederschläge in den 1960er

Jahren gegenüber der Periode 1901 – 1960 angestiegen waren. Die Zeitüberschneidung der Messzeiträume 1961 – 1990 und 1971 – 2000 mit ihren Unterschieden lässt nur den Schluss zu, dass die 1990er Jahre deutlich niederschlagsärmer waren als die Jahrzehnte zuvor.

Wegen der relativen Nähe und der ähnlichen topographischen Ausrichtung können die für das Ötztal gemachten Angaben zumindest in leicht abgewandelter Form auch für das Kaunertal angenommen werden. Wie schon erwähnt, sollte man nicht unterschätzen, dass gerade die Niederschläge durch die alpine Orographie regional starke Unterschiede aufweisen können. So ist die beim Ötztal zum Tragen kommende Abriegelung gegenüber Nord- und Nordwestwetterlagen beim Kaunertal in diesem Maße nicht vorhanden. Demnach kann angenommen werden, dass Nord- und Nordwestwetterlagen für die Niederschläge im Kaunertal, und damit auch für die des Gepatschferners, viel bedeutender sind als im Ötztal. Andererseits können die den Gepatschferner gerade im Süden umgebenden hohen Grate als Hindernis für südliche, mediterrane Wetterlagen wirken, welche aber zum Beispiel für den benachbarten und südexponierten Hintereisferner wiederum von deutlich größerer Bedeutung sind.

Da es am Gepatschferner selbst keine Klimamessstation gibt, müssen die klimatischen Bedingungen von den Messwerten anderer Stationen aus dem näheren Umfeld abgeleitet werden. So können die Messwerte der Station Obergurgl nach KÖLBEL (1984) mit Einschränkungen für das Gebiet des inneren Ötztals verallgemeinert werden.

Am Staudamm des Gepatschstausees im Kaunertal gelegen, liefert die Station Faggenbach seit 1988 automatisiert meteorologische Messwerte. THOMAS (1994) gibt für diese Station die jährliche Niederschlagshöhe für den Zeitraum von 1988 bis 1993 mit 890 mm an. Zu beachten sind aber die niederschlagsreichen Jahre 1988 bis 1990 mit jeweils über 1000 mm. Anhand von kleinmaßstäblichen Niederschlagskarten ermittelte THOMAS (1994) eine mittlere jährliche Niederschlagshöhe von 1000 – 1200 mm in Höhe des Gepatschstausees und bis zu 1700 – 2000 mm in den höchsten Lagen des Gepatschferners.

Einige Unterschiede bestehen bereits zu der näher am Gepatschferner gelegenen Station Vent. Nach KÖLBEL (1984) ist die Station Vent die kontinentalste im gesamten Ostalpenraum (siehe dazu auch Abb. 2.4.3). Die Maxima und Minima der Niederschläge dieser Station (Abb. 2.4.5) lassen trotz der räumlichen Nähe einige

## 2. Geologische und Geographische Beschreibung des Untersuchungsgebiets

Unterschiede zu den Vorstoß- und Rückzugsphasen des Gepatschferners erkennen (siehe dazu Kap. 2.8). Auch scheint es in den 1960er und 1990er Jahren Unterschiede zu den Niederschlägen an der Station Obergurgl gegeben zu haben (zu beachten ist, dass es sich bei den Niederschlägen in Vent in Abb. 2.4.5 nur um die Winterniederschläge handelt). Dies könnte ein Hinweis auf die regional unterschiedliche Verteilung der Niederschläge sein.

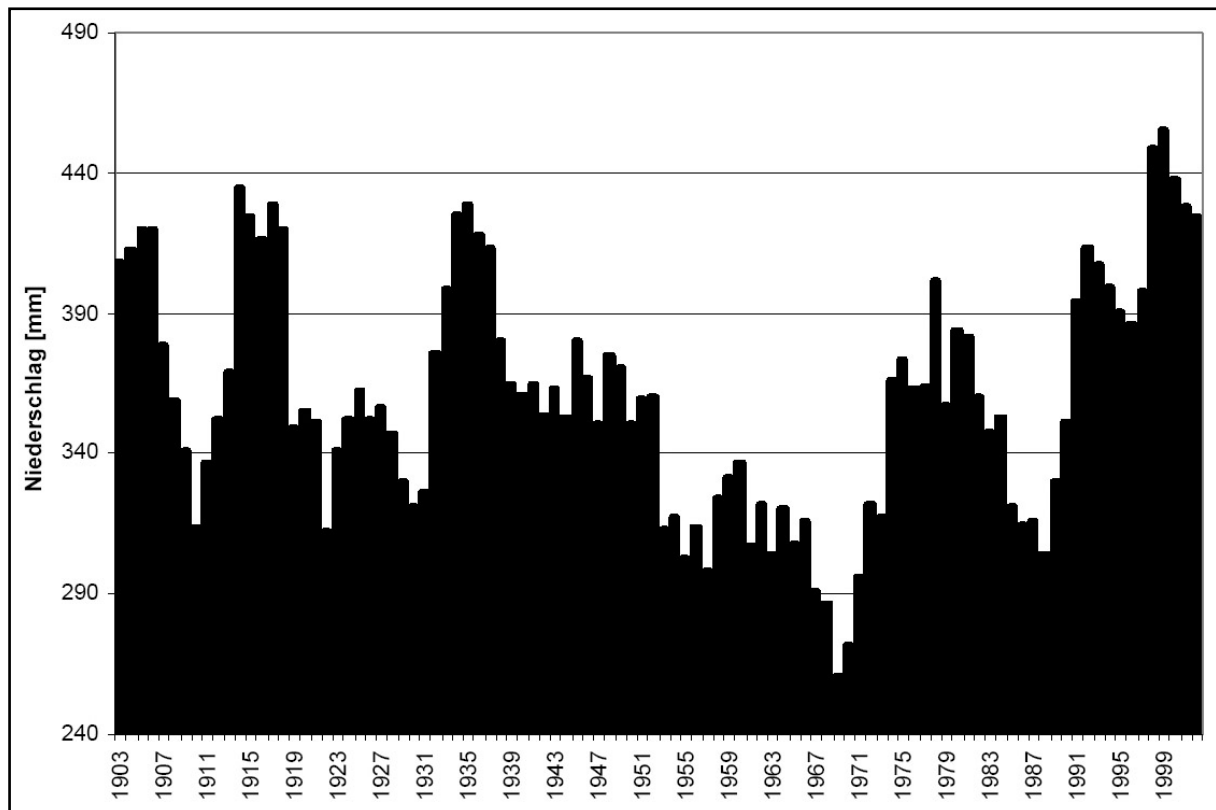


Abb. 2.4.5: Zeitreihe der Winterniederschläge (Oktober – Mai) der Station Vent (fünfjähriger übergreifender Mittelwert) der Jahre 1903 – 2002 (ISOLA, 2003).

Nach THOMAS (1994) gibt es zwischen den Messwerten der Station Obergurgl und, höhenkorrigiert, der Station Faggenbach praktisch keine Unterschiede bei der Jahresmitteltemperatur. Der langjährige Mittelwert der Jahresmitteltemperatur der Station Obergurgl (1938 m) beträgt für die Jahre 1901 - 1960  $1.6^{\circ}\text{C}$ , für die Jahre 1961 – 1990 dagegen  $2.8^{\circ}\text{C}$  ([www.zamg.ac.at/](http://www.zamg.ac.at/)). Diese Werte ergeben von 1901 bis 1990 eine Jahresmitteltemperatur von  $2.0^{\circ}\text{C}$ . Für die Jahre 1971 – 2000 dagegen ist die durchschnittliche Jahresmitteltemperatur mit  $2.2^{\circ}\text{C}$  angegeben ([www.zamg.ac.at/](http://www.zamg.ac.at/)). Die Jahresmitteltemperatur an der Station Faggenbach (1770 m) für die Jahre 1988 bis 1993 betrug nach THOMAS (1994)  $4.3^{\circ}\text{C}$ . Rechnet man die

## 2. Geologische und Geographische Beschreibung des Untersuchungsgebiets

durchschnittliche Jahresmitteltemperatur der Station Faggenbach mit einem Faktor von  $-0.65^{\circ}\text{C}/100\text{m}$  auf die Höhe der Station Obergurgl um, so kommt man auf einen Wert von  $2.62^{\circ}\text{C}$ . Im Vergleich zu den  $2.2^{\circ}\text{C}$  (1971-2000) bzw.  $2.8^{\circ}\text{C}$  (1961-1990) der Station Obergurgl ergibt sich also durchaus ein realistischer Wert. Umgerechnet auf die Höhe der Gletscherzunge des Gepatschferners in 2070m ergibt das nach THOMAS (1994), dass von Oktober/November bis April die Tageshöchsttemperaturen unter  $0^{\circ}\text{C}$  liegen, die frostfreie Phase mit Tagesminima über  $0^{\circ}\text{C}$  dagegen von Mai bis Oktober stattfindet. Mit Zunahme der Höhe nimmt die frostfreie Phase dementsprechend ab. Wobei allerdings zu beachten ist, dass die Beschattung im Laufe eines Tages an der Station Faggenbach und auch im Bereich der Gletscherzunge einen deutlichen Einfluss hat, wohingegen dieser Einfluss im recht ebenen Firnbecken des Gepatschferners stark abnimmt.

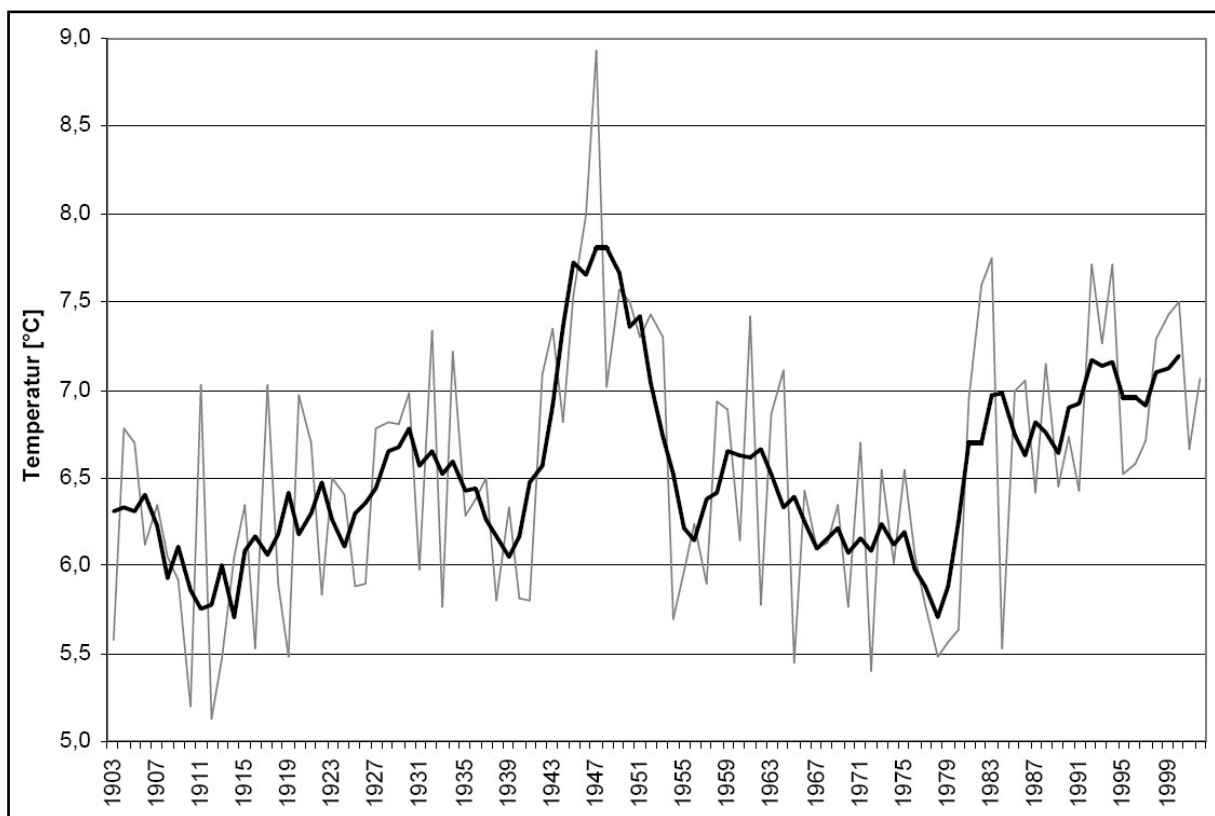


Abb. 2.4.6: Zeitreihe der Sommertemperaturen (April – September) der Station Vent für die Jahre 1903 – 2002. Die dünne Linie zeigt die Mittelwerte der einzelnen Jahre und die dicke Linie das übergreifende fünfjährige Mittel (ISOLA, 2003).

Wegen der flächenhaft größeren Kohärenz der Lufttemperaturen gegenüber den Niederschlägen, kann die Zeitreihe der Sommertemperaturen der Station Vent (Abb.

2.4.6) tendenziell auch für den Bereich des Gepatschferners angenommen werden. Vergleicht man den Verlauf der Temperaturkurve mit den Vorstoß- und Rückzugsphasen des Gepatschferners (siehe Kap. 2.8) erkennt man eine viel deutlichere Übereinstimmung als beim Vergleich mit der Zeitreihe der Winterniederschläge der Station Vent (Abb. 2.4.5). Der Anstieg der Sommertemperatur seit Beginn des 20. Jahrhunderts dauerte etwa bis in die 1950er Jahre und war nur durch kleinere Depressionen zur Zeit des 1. WK und des 2. WK unterbrochen. Bis Ende der 1970er Jahre sank die Temperatur wieder deutlich ab, was die bisher letzte Vorstoßphase der Gletscher der Alpenregion verursachte. Seit dieser Temperaturdepression ist wieder ein bisher ununterbrochener Anstieg der sommerlichen Lufttemperatur zu verzeichnen. Im Großen und Ganzen entspricht die Zeitreihe der Sommertemperaturen der Station Vent damit der allgemeinen Entwicklung der Sommertemperaturen auf der Nordhemisphäre.



## 2.5 Böden und Vegetation

### **Böden:**

Die in der Region des Talschlusses des Kaunertals zu erwartenden Böden spiegeln die typische Verbreitung von Böden in Hochgebirgslagen wider. In der Höhenlage des Umfeldes des Gepatschferners ist in erster Linie physikalische Verwitterung vorherrschend. Erst in tieferen Lagen kann chemische Verwitterung der Entwicklung von Böden Vorschub leisten. Auch die Vegetationsdecke hat einen entscheidenden Einfluss auf die Bodenbildung. Im unmittelbaren Umfeld des Gepatschferners ist nicht mit dem Vorhandensein nennenswerter Flächen von Böden zu rechnen, was auf die klimatischen Bedingungen und vor allem auf das Relief zurückzuführen ist. In günstig gelegenen Nischen kann es durchaus zu Initialstadien der Bodenentwicklung kommen.

In der subnivalen Stufe sind in erster Linie geringmächtige Syroseme (russ. = rohe Erde) über Silikatgestein zu erwarten. In geschützten und tieferen Lagen gehen diese in verschiedene Ranker (nach Rank, österr. für Berghalde, Steilhang) und Podsole über (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 1998, KÖLBEL 1984).

### **Vegetation:**

Die Vegetationsbedeckung ist vor allem an die klimatische Höhenstufung gebunden, spiegelt aber auch die Mächtigkeit der vorhandenen Böden wider. In der nivalen Höhenstufe, welche durch die klimatische Schneegrenze von der alpinen Stufe abgegrenzt wird, kommen hauptsächlich Flechten und Moose vor. Diese sind auf dauerhaft schneefrei bleibende Stellen, wie wind- und sonnenexponierte Grate, Vorsprünge, Halden oder Felsflächen, angewiesen. In der subnivalen und subalpinen Höhenstufe gehen diese allmählich in Flächen aus Pionier-Rasen über. Die hochalpine Höhenstufe ist von geschlossenen alpinen Rasen geprägt. In der mittelalpinen Höhenstufe finden sich vereinzelt Baumkrüppel und Zwergsträucher. Die Waldgrenze teilt die mittelalpine Stufe von der niederalpinen Stufe. In der niederalpinen Stufe breitet sich allmählich Krummholz und lichter Wald aus, welcher in der hochmontanen Höhenstufe in dichten Hochwald übergeht (ELLENBERG 1996). Die obere montane Stufe wird im Kaunertal unter anderem von dem Hochwald westlich des Gepatschstausees repräsentiert. Bis in eine Höhe von etwa 2200 m folgt, je nach Exposition, die niederalpine Stufe. Diese ist vom Übergang des

## 2. Geologische und Geographische Beschreibung des Untersuchungsgebiets

Hochwaldes in aufgelockerte Bestände und Zwergstrauchheide geprägt. Im Vorfeld des Gepatschferners findet sich diese Stufe unterhalb der Trogschulter (siehe hierzu auch Abb. A 2.1, A 2.2 und A 2.3 im Anhang). Beachtet werden muss auch der anthropogene Einfluss auf die Vegetation. So sind im Kaunertal die unteren alpinen Stufen, die mit ihren Zwergstrauchheiden und Hochstaudenfluren bis in 2500 m Höhe vordringen können, durch den Einfluss des Menschen kaum mehr vorhanden. Dies wurde vermutlich durch Beweidung und der Mahd von Talgrundwiesen und Berghängen verursacht.

## 2.6 Klima- und Gletscherrekonstruktionen mit Hilfe von Dendrochronologie

### Dendrochronologie:

Nach KÖLBEL (1984) kommt für dendrochronologische Untersuchungen in erster Linie Vegetation der oberen montanen, der subalpinen und der unteren alpinen Stufe in Frage. Nach NICOLUSSI und PATZELT (1996) hat sich für dendroklimatologische Untersuchungen besonders die Zirbe (*Pinus cembra*) bewährt, da sich deren dendrochronologische Reihe, mit wenigen Unterbrechungen, bis zur Zeitenwende zurückverfolgen lässt. Zwar sind in den höchsten Waldstufen der Öztaler Alpen auch die Lärche (*Larix decidua*), die Fichte (*Picea abies*) und die Tanne (*Abies alba*) weit verbreitet, doch haben sich diese im Vergleich zu *Pinus cembra* als weniger brauchbar für dendrochronologische Untersuchungen erwiesen. Dies könnte an den Standortvorteilen von *Pinus cembra* liegen, welche diese in den kontinentalen, niederschlagsarmen und strahlungsintensiven höchsten Waldstufen der Inneralpen gegenüber ihren Konkurrenten innehat. NICOLUSSI (2009) merkt an, dass vor allem Hölzer von extremen Standorten, wie z. B. der alpinen Waldgrenze, für Klimarekonstruktionen besonders geeignet seien, da ihr Wachstum eindeutig klimagesteuert sei.

Dendroklimatologische Untersuchungen haben sich als Methode zur Rekonstruktion des Klimas und des Verhaltens von Gletschern bewährt. Dabei ist die Bestimmung rezenter und historischer Waldgrenzen ebenso von Bedeutung wie die dendrochronologische Untersuchung von in geomorphologisch datierbaren Moränen aufgefundenen oder aus dem Gletscher ausgeaperten oder ausgespülten Baumresten. Für die Untersuchungen von Bedeutung sind dabei sowohl Bäume, welche von der Tätigkeit der Gletscher in Mitleidenschaft gezogen wurden, als auch Bäume welche sich in sicherem Abstand zum Eis befinden und so in ihrem Wuchs lokalklimatisch nicht vom Eis beeinflusst werden.

In den letzten Jahren ist es gelungen eine durchgehende kalenderdatierte Jahrringchronologie für die letzten ca. 9100 Jahre aufzubauen. Diese basiert vor allem auf Hölzern aus den Hoch- und Waldgrenzbereichen des mittleren Ostalpenraums. Weitere Jahrringchronologien reichen bis etwa 10800 vor heute zurück. Diese basieren allerdings auf  $^{14}\text{C}$ -Datierungen und sind daher

„schwimmend“. Aufgrund dieser Chronologie gelang die Kalibrierung vieler vormals schwimmender Jahrringchronologien, so dass ein ganzes Netzwerk von Jahrringchronologien für den Alpenraum etabliert werden konnte (NICOLUSSI 2009).

### **Baumgrenzen:**

Nach NICOLUSSI und PATZELT (2006, aktualisiert 2008) lag die Baum- und Waldgrenze im Kaunertal in der Mitte des 19. Jahrhunderts in einer Höhe von 2180 Metern. Heute findet sich erster Jungwuchs von Zirben bereits in einer Höhe von 2370 Metern und es ist anzunehmen, dass sich diese Höhe in naher Zukunft als Baumgrenze etablieren wird. Der Anstieg der Baumgrenze verlief in dieser Zeit aber keineswegs kontinuierlich sondern folgte nahezu synchron den Vorstoß- und Rückzugsphasen des Gletschers, wobei man allerdings den Zeitraum beachten muss, welchen Pflanzen benötigen um sich auszubreiten.

Dendrochronologische Untersuchungen im zentralen Ostalpenraum, welche bis etwa 9.000 Jahre vor heute zurückreichen, haben ferner ergeben, dass es bereits in früheren Zeiten klimatische Gunstphasen gab, welche die Baumgrenze auf Höhen ansteigen lies, in denen heute kein Baum existieren könnte. So ist beispielsweise ein Baum aus dem Kaunertal bekannt, welcher im Zeitraum von 4674 bis 4377 v. Chr. In einer Höhe von 2400 Metern wuchs.

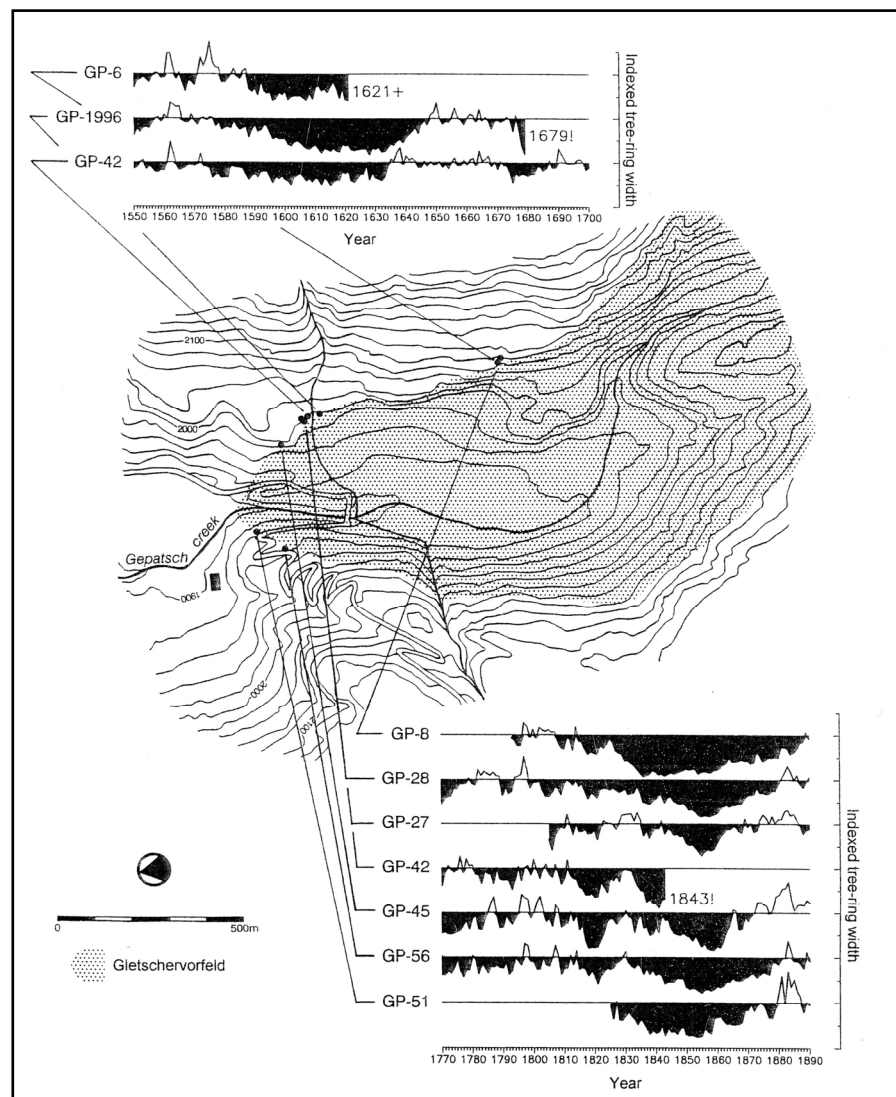
### **Rekonstruktion des Klimas und des Gletscherverhaltens:**

Die Erforschung des Klimas des Holozäns ist ein wichtiger Anwendungsbereich der Ostalpinen Nadelholz-Chronologie (EACC). Der Vorteil gegenüber anderen Datierungsmethoden ist, dass eine durchgehende Jahrringchronologie eine kalendarische Datierung ermöglicht. Dabei lassen sich Rückschlüsse auf das jeweilige Sommerklima nicht nur aus der Breite der Jahrringe, sondern auch aus der Breite des Früh- und Spätholzes und aus der Dichte des Holzes ziehen. Das Holz selbst kann nach bestimmten chemischen Inhaltsstoffen und nach instabilen Isotopen untersucht werden.

Ergebnisse aus dendrochronologischen Untersuchungen fließen schon seit Jahren in Rekonstruktionen des Paläoklimas mit ein (siehe dazu auch Abb. 2.4.1 und 2.4.2). Die bereits erwähnte Etablierung der EACC ermöglicht nun eine kalendarisch datierte Rekonstruktion. So konnten z. B. eine Reihe von Vorstößen des Gepatschferners in den letzten 4000 Jahren präzise Datiert werden (NICOLUSSI und

PATZELT 2001, NICOLUSSI 2009). Bereits FINSTERWALDER (1928) bemerkte den Waldbewuchs im unmittelbaren Bereich der Endmoräne des 1850er Hochstandes. Seine Äußerung legt den Schluss nahe, dass dieser Waldbewuchs bereits während seiner ersten Kartierung in den Jahren 1886/87 vorhanden war. Allerdings geht er in seiner Veröffentlichung von 1888 nicht auf diesen Umstand ein. In dem Begleitwort zur Karte des Gepatschferners (1928) schließt er aus diesem Waldbewuchs, dass die Gletscherzunge seit längerer Zeit nicht größer war als die Moräne anzeigt.

Abb. 2.6.1: Das Gletschervorfeld des Gepatschferners mit den Fundstellen von Baumresten. Die Gletscherzunge in der Ausdehnung von ca. 1850 ist dunkel eingefärbt (NICOLUSSI und PATZELT, 1996).



NICOLUSSI und PATZELT (1996) erwähnen Holz- und Borkenresten eines Baumes, welcher in dem geomorphologisch datierbaren Doppelwall der 1850er Endmoräne aufgefunden wurde. Dieser scheint um 1850 von der noch leicht vorrückenden Gletscherzunge des Gepatschferners ausgerissen und teilweise verschüttet worden zu sein. Noch etwas weiter nördlich, in der Endmoräne des ersten Maximalstandes der Kleinen Eiszeit, fanden NICOLUSSI und PATZELT Baumreste die sich etwa auf das

## 2. Geologische und Geographische Beschreibung des Untersuchungsgebiets

Jahr 1680 datieren ließen. Die Fundstellen von Baumresten und deren Baumringsequenz im Bereich der Endmoräne von 1850 sind aus Abb. 2.6.1 ersichtlich.

Eine weitere Fundquelle für Baumreste ist, wie bereits erwähnt, das direkte Vorfeld der rezenten Gletscherzunge. So wurden Baumreste, die in den letzten Jahren aus dem Eis des Gepatschferners ausgeapert waren, auf ein Alter von 8000 – 9000 Jahre datiert (PATZELT 1997). Daraus kann geschlossen werden, dass diese Bäume in dieser Zeit auf Standorten wuchsen, welche noch heute mit Eis bedeckt sind.

Die im Bereich der Ostalpen im unmittelbaren Gletschervorfeld gefundenen Baumreste sind fast ausnahmslos älter als 4000 Jahre. Bemerkenswert ist auch das Alter der gefundenen Baumreste. Deren Lebenszeit betrug bis zu 800 und mehr Jahre. Dies lässt auf lang anhaltende Rückzugsphasen der Gletscher bis jenseits der heutigen Gletscherausdehnung im frühen und mittleren Holozän schließen (NICOLUSSI 2009).

Eine genauere, teilweise dendrochronologisch rekonstruierte, Chronologie der Vorstoß- und Rückzugsphasen des Gepatschferners befindet sich in Kap. 2.8.

## 2.7 Vergletscherung im Kaunertal / Öztaler Alpen im ausgehenden Pleistozän und Holozän

### Alpenraum:

Nach dem Hochstand der würmzeitlichen Vereisung begann vor etwa 17000 Jahren eine Phase kontinuierlicher Erwärmung, die im gesamten Alpenraum zu einem deutlichen Rückgang der Vergletscherung führte (siehe dazu auch Abb. 2.4.1). Die maximale Vereisung des Alpenraums und die Vereisung während der Würmzeit sind aus Abb. 2.7.1 ersichtlich.

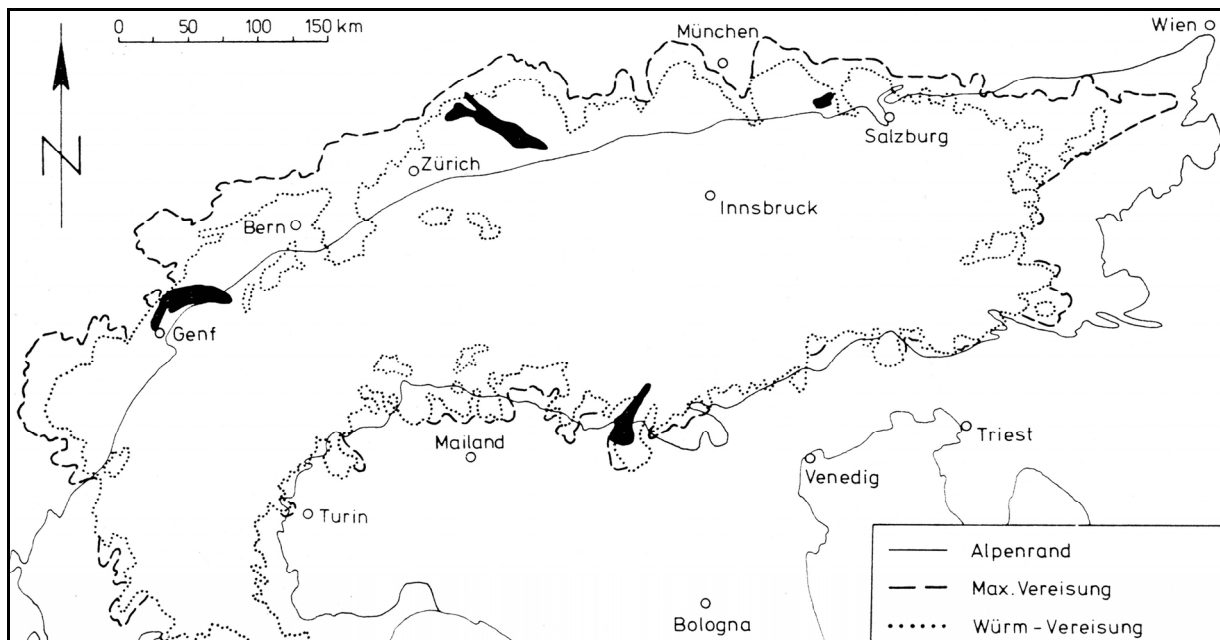


Abb. 2.7.1: Vergletscherung des Alpenraums während des Pleistozäns (BÖGEL und SCHMIDT, 1976).

Nach HEUBERGER (1968) fing das Eisstromnetz bereits im älteren Spätglazial ausgangs des Bühl an zu zerfallen. Die späteren Vorstöße des Steinach-Stadiums waren bis zum Gschnitz-Stadium wieder restlos verschwunden. Die Daun- (ca. 13000 v. h.) und Egesen-Stadien (ca. 11000-10300 v. h.) sind als die letzten Klimarückschläge der späten Würmzeit anzusehen. Das endgültige Abschmelzen der Gletscher auf neuzeitliche Größenordnungen kann als Beginn des Postglazials definiert werden. Bereits um 10000 v. h. waren die Gletscher bis auf den Stand der neuzeitlichen Vorstoßphasen zurückgeschmolzen. Um 9.500 v. h. hatten sich die

## 2. Geologische und Geographische Beschreibung des Untersuchungsgebiets

Gletscher sogar schon weiter zurückgezogen als während der Vorstoßphase von 1850 (PATZELT 1980, RÖTHLISBERGER, 1986). Der Rückgang der Vergletscherung und die Veränderung der Schneegrenze, beginnend im Spätglazial, können aus Abb. 2.7.2 nachvollzogen werden.

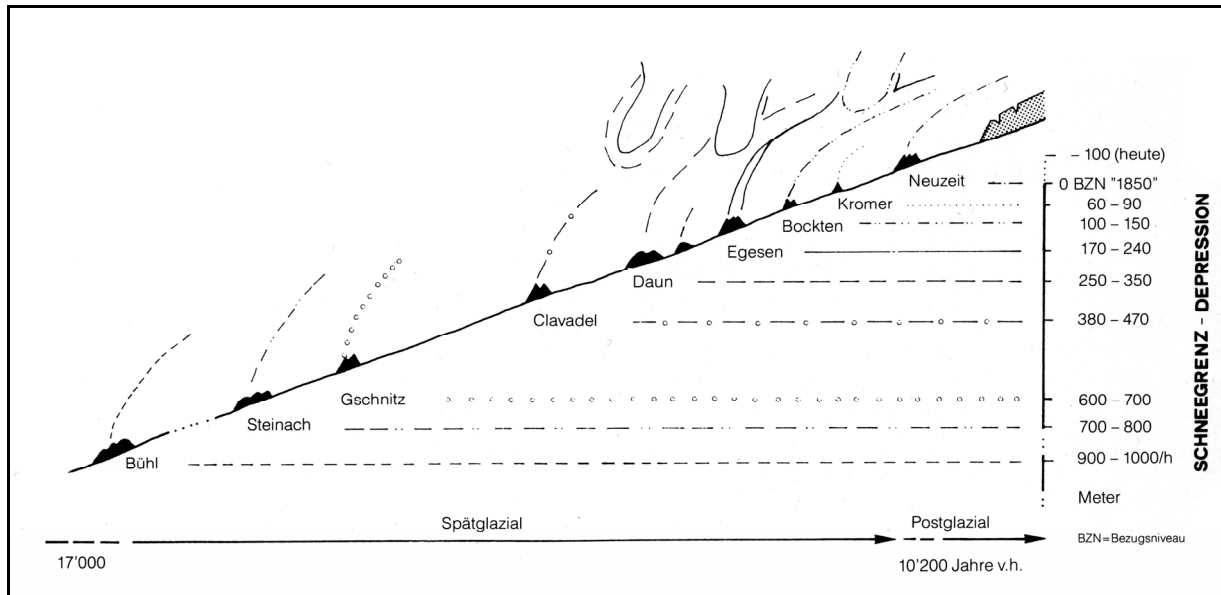


Abb. 2.7.2: Spätglaziale Gletscherstände und Schneegrenzen Depression nach MAISCH 1981 (RÖTHLISBERGER 1986).

Auch in der postglazialen Wärmezeit (6750 – 900 v. Chr.) kam es zu mehreren Gletschervorstoßphasen. Nach HEUBERGER (1968) können für die späte Warmzeit und die frühe Nachwarmzeit Gletschervorstoßphasen für die Zeiträume von 1400 – 1200 v. Chr., 900 – 300 v. Chr. und 100 v. Chr. bis 750 n. Chr. eingegrenzt werden. Mittelalterliche Gletschervorstöße lassen sich für die Jahre 1150, 1230 und das 15. Jahrhundert nachweisen. Diese erreichten jedoch nicht die Hochstände der neuzeitlichen Gletschervorstöße. HEUBERGER (1968) führt als wichtigste neuzeitliche Gletschervorstöße die Vorstöße von 1600, 1640, 1680, 1770/80, 1820 und 1850 auf. Kleinere Vorstöße und Halte gab es um 1875, 1890/1900, 1920 und 1980. Die meisten Gletscher erreichten um 1850 sogar ihren postglazialen Maximalstand. Seit 1850 kann man von einem allgemeinen Rückgang der Vergletscherung ausgehen. So hatte die Vergletscherung in den Ötztaler Alpen um 1850 eine Ausdehnung von etwa 350 km<sup>2</sup>. Bis 1969 war diese Fläche auf 173,77 km<sup>2</sup> zurückgegangen (bei 208 vermessenen Gletschern). Nach PURTSCHELLER (1971) kann man die heutigen Gletscher nicht als die Reste der pleistozänen Vereisung ansehen, da diese in der



postglazialen Wärmezeit bis auf wenige Reste abgeschmolzen seien. Vielmehr haben sich die heutigen Gletscher erst im Laufe des Holozäns wieder neu gebildet.

### **Öztaler Alpen und Kaunertal:**

Im Bereich der Öztaler Alpen sind nach PURTSCHELLER (1971) die Spuren der älteren Mindel- und Rißvereisungen durch die jüngere Würmvereisung verwischt worden. Erst in der Nähe von Innsbruck lassen sich Merkmale aller drei Vereisungen nachweisen. In den Öztaler Alpen herrschte in der Zeit der maximalen würmzeitlichen Vereisung eine Vergletscherung in Form eines Eisstromnetzes vor. Grate und Kämme ragten nur vereinzelt aus der Eismasse heraus. In den höchstgelegenen Gebieten, dort wo sich die Firnfelder der heutigen Gletscher befinden, dürften die Verhältnisse ganz ähnlich gewesen sein als zur Zeit der maximalen postglazialen Vereisung um 1850. Noch während des Bühl-Stadials waren das Kaunertal und seine benachbarten Täler von mächtigen Talgletschern erfüllt, welche in den Inntalgletscher mündeten. Nach dem Gletscherrückgang während des Bölling-Interstadials stießen die Gletscher während des Steinach-Stadials wieder vor. Ähnliche Gletscherrückzüge und anschließende Vorstöße gab es auch während des Alleröd-Interstadials und des Gschnitz-Stadials. Der Kaunertalgletscher dürfte aber seit des Bühl-Stadials nicht mehr das Inntal erreicht haben (PURTSCHELLER 1971). Nach KERSCHNER (1979) bestand im Kaunertal auch während des Daun- und des Egesen-Stadials eine ausgeprägte Vergletscherung. Die Endlage der Daunvergletscherung konnte leider nicht mehr rekonstruiert werden. Gesichert ist nur, dass während des Daun-Stadials eine zusammenhängende Vergletscherung bestand, bei der auch die kleineren Gletscher der Seitenkare bis in Höhe des Wurmetals und des Kaiserbergtals Verbindung zum Hauptgletscher hatten. KERSCHNER (1979) konnte allerdings den egesenzeitlichen Kaunertalgletscher weitgehend rekonstruieren, dessen Ausdehnung aus Abb. 2.7.3 ersichtlich wird. Dieser endete etwas nördlich der Staumauer des heutigen Gepatschstausees in einer Höhe von etwa 1600 m. Die Schneegrenze lag dabei etwa 250 – 350 m tiefer als heute bzw. 150 – 250 m tiefer als während des neuzeitlichen Gletscherhochstandes um 1850. Nach KERSCHNER (1979) wurde der egesenzeitliche Kaunertalgletscher vor allem vom Weißseeferner, vom Krummgampenferner, vom Riffferner aber auch vom Gepatschferner und Wannetferner gespeist.

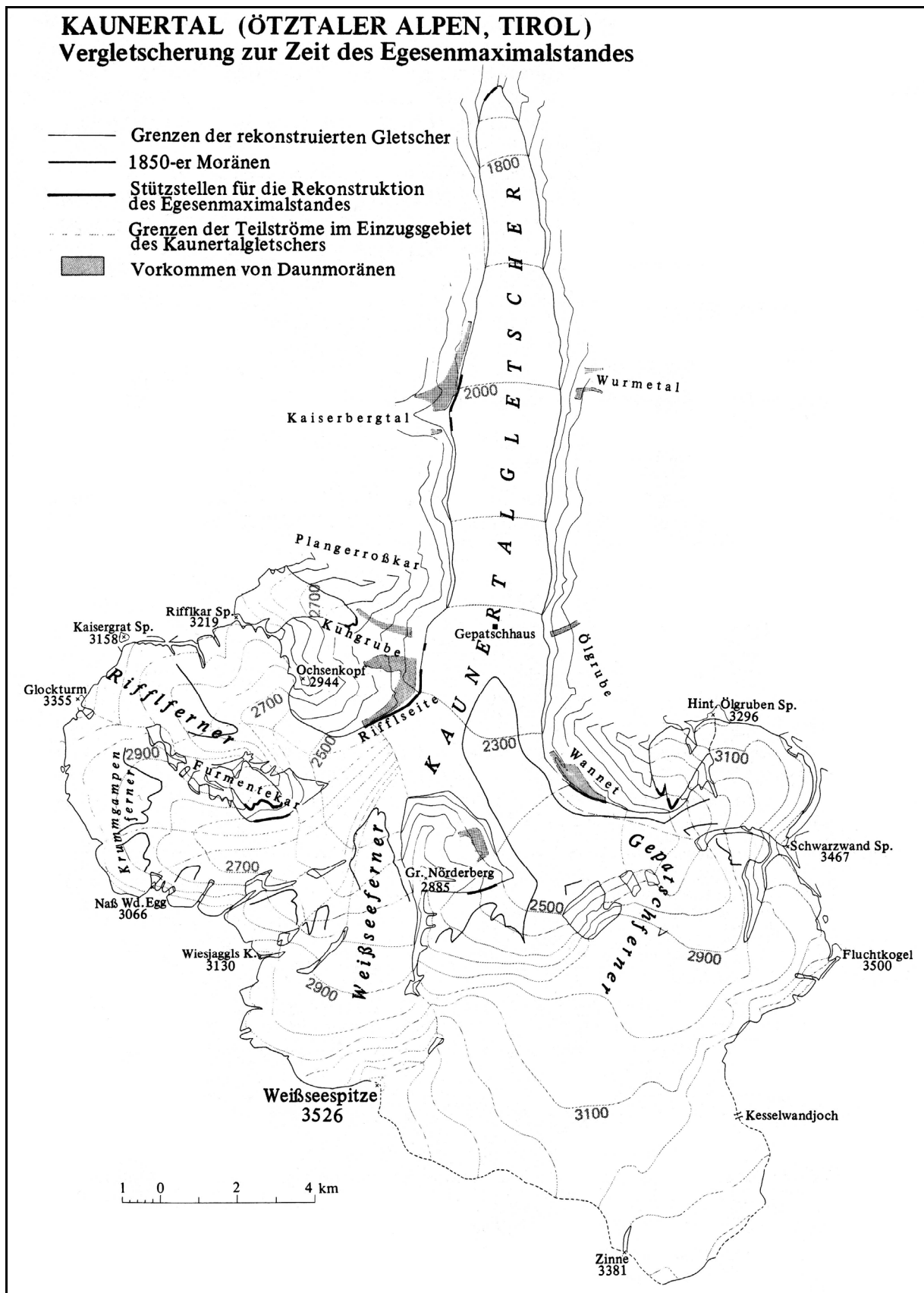


Abb. 2.7.3: Vergletscherung des Kautertals während des Egesen-Maximalstandes (KERSCHNER, 1979).

Die Kargletscher in der Kuhgrube, dem Planggeroßkar, dem Furmentekar, dem Wannetkar und dem Kaiserbergtal erreichten in der Egesenzeit aber nicht mehr den Kaunertalgletscher (siehe hierzu auch Abb. A 2.2, A 2.7 und A 2.9 im Anhang). KERSCHNER (1979) gibt die Ausdehnung des Kaunertalgletscher der Egesenzeit mit 60.62 km<sup>2</sup> an. Des Weiteren beziffert er die Fläche des Kuhgrubenferners mit 0.82 km<sup>2</sup>, des Furmentekarferners mit 0.30 km<sup>2</sup> und des Wannetkarferners mit 0.54 km<sup>2</sup>.

Die bereits für den Alpenraum erläuterten Rückzugs- und Vorstoßphasen der Vergletscherung seit Ende der Egesenzeit sind mehr oder weniger auch auf die Gletscher des Kaunertals übertragbar. Deutlich stärker ist der Rückgang bei tiefer gelegenen und kleineren Gletschern feststellbar. Höher gelegene und größere Gletscher mit ausgedehnten Nährgebieten scheinen weniger stark vom Rückgang betroffen zu sein. So sind zum Beispiel die Riff- und Krummgampenferner, welche während des Egesen-Stadials noch Verbindung zum Kaunertalgletscher hatten, heute kaum mehr vorhanden (vergleiche dazu auch Abb. 2.7.3 mit Abb. A 2.2 im Anhang). Die meisten kleineren Kargletscher sind gänzlich verschwunden. Dies liegt daran, dass die Nährgebiete dieser Gletscher heute kaum oder gar nicht mehr über die Schneegrenze hinausragen.

Mit Abstand ist der Gepatschferner heute der größte Gletscher im Einzugsgebiet des Kaunertals. Ebenfalls erwähnenswert sind die dem Gepatschferner benachbarten Weißseeferner und Wannetferner. Im Bereich des Talschlusses des Kaunertals gibt es noch eine ganze Reihe kleiner und kleinster Gletscher, welche in den Gebieten des westlich vom Kaunertal gelegenen Glockturmgrats und des östlich gelegenen Kaunergrats zu finden sind. Nicht alle diese Gletscher entwässern in Richtung des Kaunertals.

Im weiteren Umfeld des Gepatschferner gibt es noch eine ganze Reihe von Gletschern, die zum Teil im Einzugsgebiet des Täschachtals liegen, wie zum Beispiel der Täschachferner, zum größten Teil aber über das Rofental mit dem Ötztal in Verbindung stehen. Hier sind vor allem der bekannte und gut erforschte Vernagtferner zu nennen, aber auch der Hintereisferner, der Kesselwandferner, der Hochjochferner und der Mittelbergferner. Darüber hinaus gibt es auch in dieser Region noch viele weitere kleinere und kleinste Gletscher. Eine Satellitenaufnahme des Gepatschferners und seiner Umgebung mit den wichtigsten, benachbarten Gletschern findet sich im Anhang (Abb. A 2.2). Das Verhalten der Gletscher in den südlichen Öztaler Alpen kann man durchaus als recht unterschiedlich

## 2. Geologische und Geographische Beschreibung des Untersuchungsgebiets

charakterisieren. So war das Oszillieren der Gletscherzunge des Gepatschferners in den vergangenen Jahrhunderten für den Menschen recht uninteressant, da es keine Schäden verursachte. Anders das Verhalten der benachbarten Vernagtferner und Guslarferner. Deren Gletscherzungen stießen in den vergangenen Jahrhunderten mehrmals bis in das Rofental vor und stauten die Rofen Ache auf. Mehrmals kam es zu Ausbrüchen der aufgestauten Seen, welche verheerende Verwüstungen im Rofental und dem anschließenden Ötztal zur Folge hatten. Dies erklärt die seit langer Zeit betriebene genaue Erforschung des Vernagtferners.

Diese Beispiele machen bereits deutlich, dass man das Verhalten der Gletscher in den südlichen Öztaler Alpen keinesfalls verallgemeinern kann, wenn auch die Vorstoß- und Rückzugsphasen bei den meisten Gletscher dieser Region in etwa zur gleichen Zeit auftreten.

## 2.8 Der Gepatschferner

### Beschreibung des (rezenten) Gepatschferners:

Der Gepatschferner, welcher im hinteren Kautertal gelegen ist, ist mit einer Fläche von ca. 20.8 km<sup>2</sup> und einer Länge von 8.7 km (Stand 1997) der flächenmäßig zweitgrößte Gletscher Österreichs. Typisiert wird der Gepatschferner als Talgletscher mit zusammengesetztem Firngebiet.

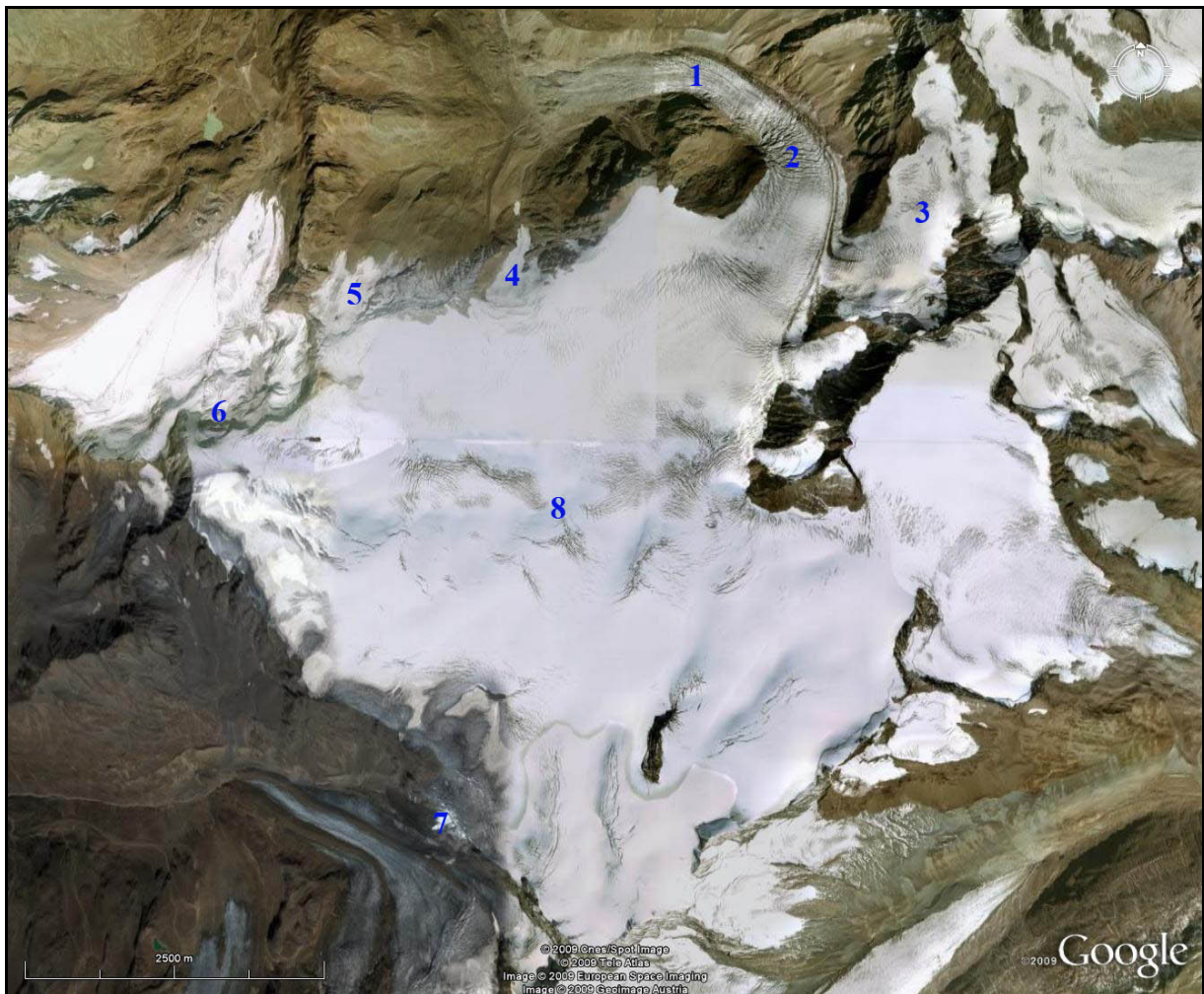


Abb. 2.8.1: Satellitenaufnahme des Gepatschferners. 1: Hauptzunge, 2, 6, 7: Eisbrüche, 3: Seitengletscher, 4: östl. Nebenzunge, 5: westl. Nebenzunge, 8: Firnbecken (Google Earth, 2009, verändert).

Die Ausdehnung und Form des Gepatschferners wird aus Abb. 2.8.1 deutlich. Das große, fast rautenförmige Firnbecken des Gepatschferners, welches zum größten Teil als Akkumulationsfläche anzusehen ist, erstreckt sich von einer Höhe von etwa

2900 m südlich und südöstlich des Rauhen Kopfes bis zu maximal etwa 3500 m bei der Weißsee Spitze. Der südwestliche Teil, der im Wesentlichen dem Staatsgebiet von Italien entspricht, ergießt sich über einen Eisbruch in den benachbarten Langtauferer Ferner. Der weitaus größte Teil des Gepatschferners fließt in der schmalen Gletscherzunge östlich des Rauhen Kopfes zusammen. In diesem Bereich mündet auch der nordöstliche Seitengletscher des Gepatschferners, welcher durch die Schwarze Wand, den Felsgrat, der sich von der Schwarzwandspitze über das Gepatschjoch bis hoch zum Fluchtkogel erstreckt, umrahmt wird, in die Wurzel der Gletscherzunge. Die Gletscherzunge selbst fließt zunächst in nördlicher, dann nordwestlicher Richtung und zuletzt in westlicher Richtung um den Rauhen Kopf herum und endet in einer Höhe von etwa 2070 m (Stand 1997). Mittlerweile dürfte die Gletscherzunge des Gepatschferners die am tiefsten herabreichende Gletscherzunge der Ostalpen sein. Zwischen Nördergrat im Westen und Rauher Kopf im Osten ergießen sich zwei kleine Nebenzungen in Richtung Norden. Die westliche Nebenzunge bezeichnete SONNKLAR (1861) als Weisswandferner und bemerkt, dass dieser dem Hauptstrom nicht mehr „tributär“ sei. Die weiter östlich gelegene Nebenzunge mündete noch bis in die 1920er Jahre in die Hauptzunge. Es gibt aber Hinweise darauf, dass diese Verbindung um 1890 bereits verloren gegangen war, FINSTERWALDER (1888) weist auf einen bevorstehenden Kontaktverlust hin, und bei späteren Vorstoßphasen wieder geschlossen wurde. Es ist anzunehmen, dass beide Nebenzungen bei früheren Hochphasen verbunden waren und Kontakt zur Hauptgletscherzunge hatten. Da sie ohnehin aus der Eismasse des Gepatschferners gespeist werden, werden sie diesem auch zugerechnet.

Im Nordwesten ist der Gepatschferner zwischen der Weißsee Spitze und dem Zahn über einen Eisbruch, der spektakulär von der 3510 m hohen Weißsee Spitze über 500 m tief steil abfällt, mit dem Weißseeferner verbunden. Im Süden ist der Gepatschferner mit dem Vernaglwandferner und im Osten mit dem Kesselwandferner verbunden. Beide Übergänge befinden sich aber wenig spektakulär in recht ebenem Gelände. Auch mit dem im Osten gelegenen Guslarferner ist der Gepatschferner verbunden und zwar über einen schmalen, eisbedeckten Kamm nordöstlich des Fluchtkogels. Der nordöstlich der Linkskurve der Gletscherzunge gelegene Wannetferner war beim Höchststand von 1850 noch mit der Gletscherzunge des Gepatschferners verbunden. Aber bereits auf der AV-Karte

Ausg. 1893 klafft eine breite Lücke zwischen der Gletscherzunge des Gepatschferners und des Wannetferners. An verschiedenen Stellen ragen aus dem Gepatschferner scharfkantige Grate heraus, welche in früheren Höchstständen größtenteils von Eis bedeckt waren. Sowohl in der Verebnungsfläche des Gepatschferners, als auch in der Gletscherzunge, finden sich Spaltensysteme. Zwischen 2650 m und 2800 m Höhe befindet sich ein ausgeprägter Eisbruch in der Gletscherzunge. Sowohl die Spaltensysteme als auch die Eisbrüche sind im Wesentlichen auf die Topographie des Gletscherbetts zurückzuführen. Die genaue Lage der benachbarten Gletscher und der erwähnten Gipfel können aus den Abb. A 2.2 bis A 2.10 im Anhang ersehen werden.

### **Chronologie der Gletscherstände des Gepatschferners:**

In Kap. 2.7 wurde bereits auf die daun- und egesenzeitliche Vergletscherung des Kaunertals eingegangen (siehe dazu auch Abb. 2.7.3). So werden hier nur noch den Gepatschferner berührende Aspekte angesprochen. So finden sich nach KERSCHNER (1979) im Bereich des Nährgebietes des Gepatschferners praktisch keine morphologischen Hinweise auf eine Eisdickendifferenz zwischen der egesenzeitlichen Vergletscherung und dem Gletscherhochstand von 1850. Er geht davon aus, dass zu beiden Zeiten das Firnbecken maximal gefüllt war. Auch während der Vorstoßphase von 1920 sei das Firnbecken weitgehend gefüllt gewesen. KERSCHNER (1979) sieht erst beim Zufluss des Wannetferners einen Unterschied. So habe der Egesengletscher im Bereich des Zuflusses des Wannetferners den Stand von 1850 um etwa 40 m in der Eismächtigkeit übertroffen.

Nach dem egesenzeitlichen Hochstand schmolz die Vergletscherung stark ab. Die holozäne Gletscherentwicklung des Gepatschferners und der Pasterze wird aus Abb. 2.8.2 deutlich. NICOLUSSI und PATZELT (2000) geben für den Zeitraum von 7000 v. Chr. bis 2000 v. Chr. insgesamt 5 kleinere Gletschervorstöße an. Diese sind in ihrer Ausdehnung in etwa mit dem Gletscherstand von 1950 vergleichbar. Unterbrochen waren diese kurzfristigen Gletschervorstöße durch lange Phasen mit geringer Gletscherausdehnung. Diese dauerten oftmals mehrere Jahrhunderte, gar Jahrtausende. Nach NICOLUSSI und PATZELT (2000) kam es erst im 17. und 16. Jh. v. Chr. wieder zu nennenswerten Gletschervorstößen. Diese erreichten in etwa den Stand von 1930. Funde von Holzresten, die von diesen Gletschervorstößen begraben wurden, belegen, dass das Gletschervorfeld zu dieser Zeit bewaldet war.

## 2. Geologische und Geographische Beschreibung des Untersuchungsgebiets

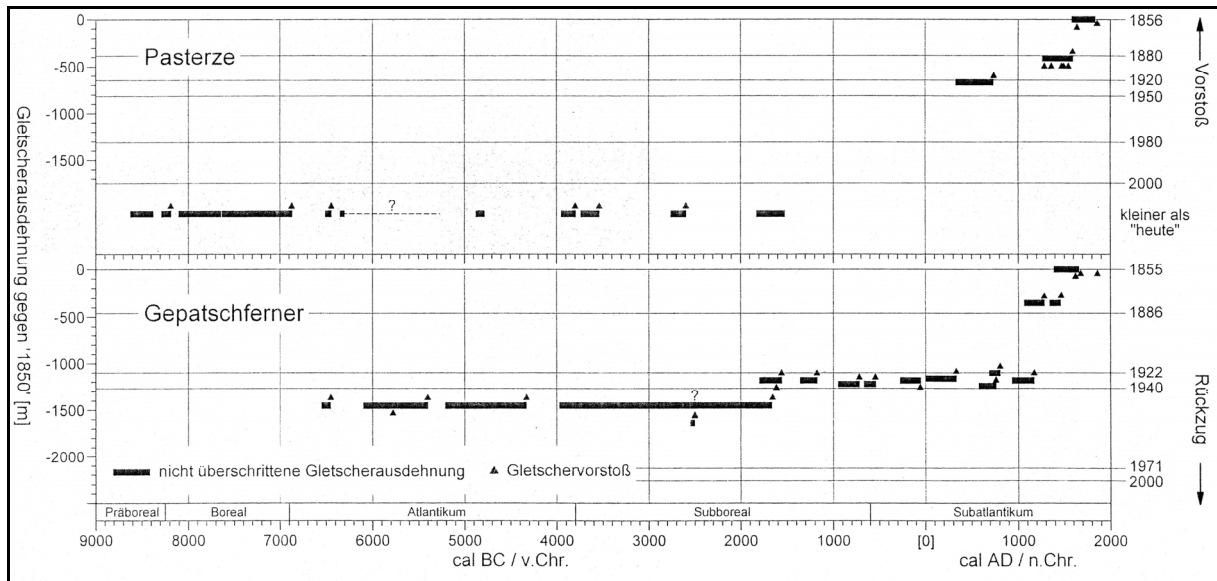


Abb. 2.8.2: Holozäne Gletscherentwicklung von Pasterze und Gepatschferner (NICOLUSSI und PATZELT, 2000).

Von 1500 v. Chr. bis zur Zeitenwende kam es neuerlich zu mehreren Vorstoßphasen, welche aber den Stand von 1930 nicht überschritten sowie zu Phasen geringerer Gletscherausdehnung. Nach dem letzten Vorstoß 50 v. Chr. schmolz der Gepatschferner wieder zurück und erreichte etwa 400 Jahre lang nicht mehr diese Ausdehnung. Erst im Jahr 336 kam es wieder zu einem Vorstoß, welcher wiederum in etwa den Stand von 1930 erreichte. Weitere Vorstöße datierten NICOLUSSI und PATZELT (2000) im 6. Jh. und im ausgehenden 8. Jh. Um 809 erreichte der Gepatschferner in etwa den Stand von 1920. Nach der anschließenden Rückzugsphase erreichte er 1140/45 und 1172 wieder den Stand von 1920. Auch bei diesem Vorstoß wurden wieder Bäume verschüttet, die zur Datierung herangezogen werden konnten. Dieser Vorstoßphase schloss sich eine Phase der Stagnation und des Rückzugs an. Bis 1284 war der Gepatschferner allerdings wieder weit vorgestoßen und überschritt sogar den Stand von 1870. In dieser Zeit erreichte er seine maximale Ausdehnung im Hochmittelalter. Diesen Stand erreichte der Gepatschferner, nach einer Phase des Rückgangs, wieder um 1462. Etwa 1630/35 erreichte er beinahe seinen neuzeitlichen Höchststand. 1679 dürfte die Ausdehnung des Gepatschfernners in etwa den Maximalstand von 1855 erreicht haben. Im 18. Jh. dagegen dürfte er die Ausdehnung von 1870 nicht überschritten haben. Nach Vorstößen um 1803 und 1835/40 erreichte der Gepatschferner 1855 seine neuzeitliche maximale Ausdehnung. Vermutlich stellt diese Ausdehnung des



Gepatschferners sogar die maximale postglaziale Ausdehnung dar. Seit 1850 befindet sich die Zunge des Gepatschferners nahezu kontinuierlich im Rückzug. Unterbrochen war dieser Rückzug nur durch kleinere Vorstoß- und Stagnationsphasen um 1870/71, 1920 und von 1977 bis 1988. Verschiedene Stadien des Gletscherrückgangs von 1850 bis 2004 können aus der Beilage „Ausdehnung der Zunge des Gepatschferners 1850 – 2004“ ersehen werden.

### **Ein Blick in die Zukunft:**

Den aktuellen Klimaszenarien folgend, muss auch im Bereich des Gepatschferners mit einer Veränderung der Temperaturen und der Niederschläge gerechnet werden. Im Rahmen des StartClim2007.E Projektes wurde am Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck eine Simulation der Auswirkungen veränderter Klimaparameter auf die Eisdicke des Gepatschferners anhand eines gängigen Klimamodells durchgeführt. Das Modell gibt wärmere, trockenere Sommer (Mai-Oktober: Niederschlag -20%, Temperatur +2°C) und geringfügig wärmere aber niederschlagsreichere Winter (November-April: Niederschlag +15%, Temperatur +1°C) vor. Die Verringerung der Eisdicke richtet sich nach den Verlusten der Referenzperiode 1997 – 2006. Dazu wird ein weiterer Verlust mit einer Sensitivität von -800 mm w.e. / °C angenommen.

Das angenommene Gletscherbett basiert auf der Radarsondierung im Jahr 1997, welches auch Basis meiner eigenen Untersuchungen ist. Für das Jahr 2006 wurde eine Analyse der Eisdicke durchgeführt, die die Basis für die Veränderung des Volumens unter veränderten Klimabedingungen darstellt. Die Höhen des Gepatschferners 2006 entstammen einem Laser Scann der Tiroler Landesregierung. Basierend auf der Eisdickenbestimmung 2006 wurden die Szenarios 2006 + 1°C bis 2006 + 4°C durchgerechnet (KUHNER 2007).

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Abb. 2.8.3 zusammengefasst. Bei einer Temperaturzunahme von 1°C verändert sich die Gletscherfläche und das Volumen nur wenig gegenüber dem Stand 2006. Bei weiter zunehmender Temperatur werden die Randbereiche mit geringerer Eisdicke eisfrei. Auch die Gletscherzunge zieht sich weiter stark zurück. Aber selbst bei einer Erhöhung der Temperatur um 4°C verbleibt in den Senken des Gletscherbetts noch ein Eisvolumen von über 200 m Dicke. Anzunehmen ist, dass die Ausdehnung und das Volumen des Gepatschferners während des Holozänen Optimums in ähnlicher Weise zurückgegangen waren.

## 2. Geologische und Geographische Beschreibung des Untersuchungsgebiets

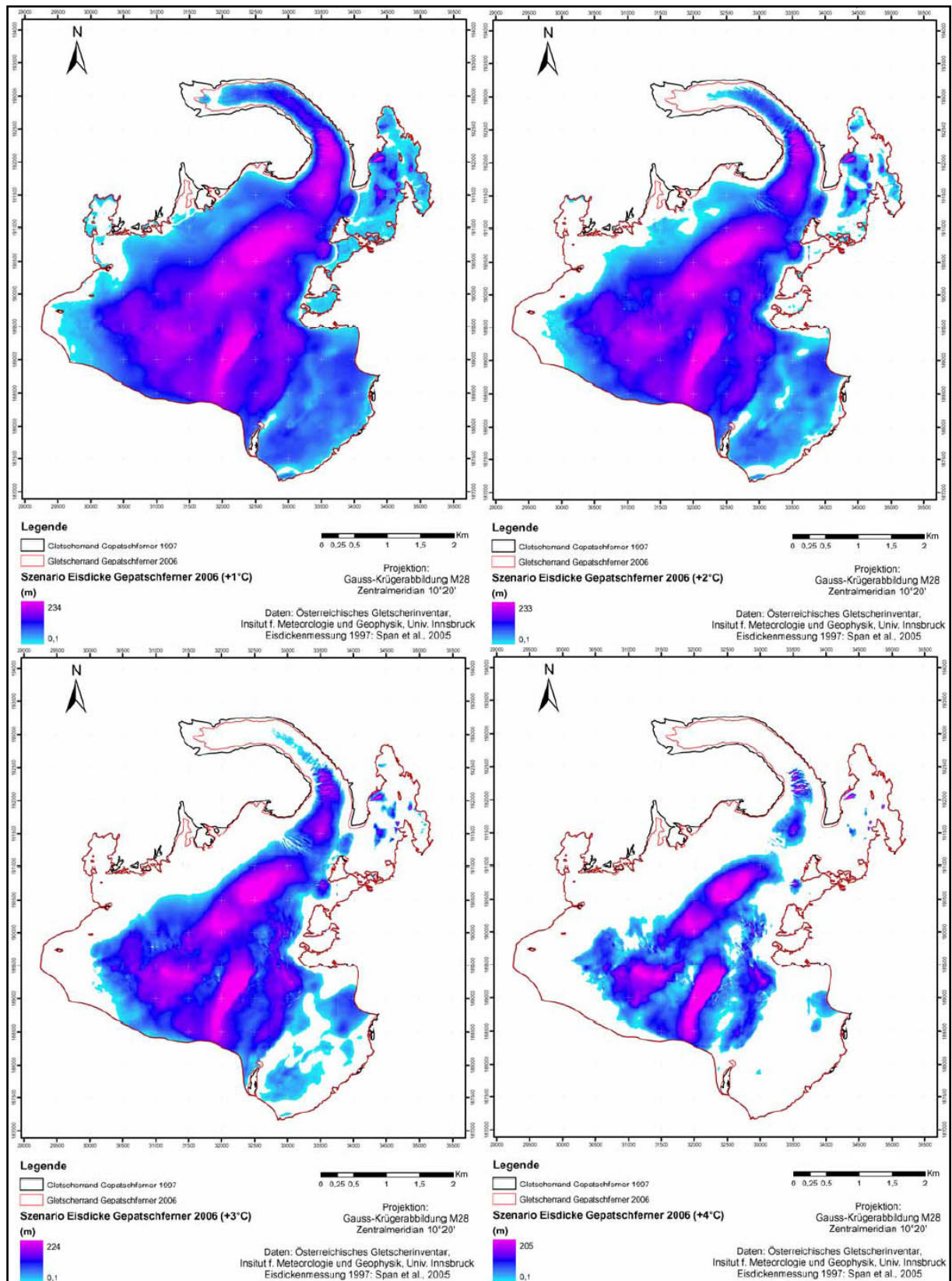


Abb. 2.8.3: Szenarios Eisdicke Gepatschferner 2006 + 1°C bis 2006 + 4°C (KUH, 2007, leicht verändert).

## Kapitel 3:

# Forschungsstand und Datengrundlagen

## 3.1 Forschungsstand am Gepatschferner (Kaunertal)

Befasst man sich mit den wissenschaftlichen Veröffentlichungen in den Themenbereichen der Geographie und Glaziologie, welche das Kaunertal und den Gepatschferner behandeln, stößt man auf eine Reihe von Namen, welche immer wieder auftauchen. Diese Personen sollen aus diesem Grund hier besondere Erwähnung finden.

Der Erste der sich bei der Erforschung des Gepatschfernens einen Namen gemacht hat war SEBASTIAN FINSTERWALDER (1862-1951). Er war wesentlich an der Erstellung der ersten wirklich exakten Kartenwerke vom Gepatschferner (1886/87, 1922/23) beteiligt. Zu den Kartenwerken verfasste er Aufsätze, die zum Teil geomorphologische und glaziologische Fragen behandelten. Auch auf die Längen-, Flächen- und Volumenabnahme des Gepatschfernens ging S. FINSTERWALDER ein.

Sein Sohn RICHARD FINSTERWALDER (1899-1963), welcher seinem Vater schon bei der Kartierung von 1922/23 zur Hand ging, führte dessen Arbeit fort. RICHARD FINSTERWALDER verfasste Anfang der 1950er Jahre diverse Artikel zur Vermessung des Gepatschfernens und über den Gletscherrückgang in den Ostalpen. Unter seiner Leitung wurde der Gepatschferner in den 1950er und 1960er Jahren mehrmals neu vermessen.

Fortgeführt wurde die Familientradition von dem Neffen RICHARD FINSTERWALDERS, RÜDIGER FINSTERWALDER (1930-heute). Dieser veröffentlichte in den 1970er, 1980er und 1990er Jahren diverse Beiträge zur Vermessung des Gepatschfernens und zu der Höhenänderung von Ostalpengletschern.

Auch KURT BRUNNER verfasste Artikel zur Vermessung des Gepatschfernens. Diese befassten sich auch mit der Längen-, Flächen- und Volumenabnahme des Gepatschfernens. Darüber hinaus war er maßgeblich an der Erstellung der Karte Gepatschferner 1971 beteiligt.

Der Innsbrucker Glaziologe GERNOT PATZELT lieferte eine ganze Reihe von Artikeln zu den Gletschern der Ostalpen, darunter auch der Gepatschferner. Hier sind vor allem die jährlichen Gletscherzustandsberichte zu nennen. Weitere interessante Arbeiten zur holozänen Gletscherentwicklung, welche teilweise auf dendrochronologischen und geomorphologischen Befunden basieren, und Arbeiten zur Veränderung der Baumgrenzen verfasste er zusammen mit KURT NICOLUSSI. Die meisten dieser Arbeiten haben einen direkten Bezug zum Kaunertal und zum Gepatschferner.

Weitere Beiträge zur Vergletscherung im Kaunertal lieferten S. MORAWETZ (1956), W. SENARCLENS-GRANCY (1956) und H. KERSCHNER (1978).

Per Radioecholotung wurde im Rahmen einer Diplomarbeit (MASSIMO 1997) eine Eisdickenbestimmung am Gepatschferner durchgeführt. Daraus abgeleitet entstand auch eine Karte des Gletscherbetts, die in dieser Arbeit verwendet wurde. In einer weiteren Diplomarbeit (KEUTTERLING 1998) wurde eine Untersuchung von Änderungen der Höhe des Gepatschferners im Vergleich von 1971 zu 1990 durchgeführt.

Einen kurzen Artikel zum Abfluss, zur Temperatur und zum Niederschlag am Gepatschferner verfasste THOMAS (1994).

Weitere Arbeiten, welche sich zum Beispiel mit der Geologie und der Klimatologie befassen, sind großflächiger angesetzt (z.B. Öztaler Alpen, Tirol, Ostalpen) und behandeln das Kaunertal und den Gepatschferner, wenn überhaupt, nur mit wenigen Sätzen.

Der größte Teil dieser Veröffentlichungen ging in diese Arbeit ein. Eine genauere Übersicht der Veröffentlichungen kann daher aus dem Literaturverzeichnis entnommen werden.

## **3.2 Chronologie der Vermessung am Gepatschferner**

Wegen der großen Abhängigkeit dieser Arbeit von dem vorhandenen Kartenmaterial ist es unerlässlich, sich einen Überblick über die Chronologie der Vermessung am Gepatschferner und den daraus entstandenen Kartenwerken zu verschaffen. Eine gute wenn auch lückenhafte Übersicht über Vermessungen und daraus entstandenen Kartenwerken gibt BRUNNER (1987). ARNBERGER (1970) gibt einen Überblick über die Kartographie im Alpenverein bis 1970. Weite Informationen über Kartenwerke des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins wurden aus neueren Alpenvereinskarten entnommen. Des Weiteren lag mir eine Übersicht der Kartenwerke der österreichischen Landesvermessung vor.

### **3.2.1 Kartenaufnahmen des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins**

In den 1860er Jahren begann der Deutsche und Österreichische Alpenverein Gebirgskarten herzustellen und zu veröffentlichen. Schon sehr bald nach dem Beginn der kartographischen Arbeit übertrafen die entstandenen Kartenwerke in Punkto Genauigkeit und Detailverliebtheit die amtlichen Werke der Landesvermessung bei Weitem. Dies war notwendig um dem Bergsteiger eine ausreichend genaue Orientierungshilfe im Hochgebirge an die Hand zu legen (diese Bereiche waren von der Landesvermessung nur ungenügend erfasst worden), aber auch um wissenschaftlichen Bedürfnissen gerecht zu werden. Die geodätischen Grundlagen stellten sowohl die staatlichen Aufnahmen der 2. Landesaufnahme (2. LA) und 3. Landesaufnahme (3. LA) als auch Aufnahmen des Militärgeographischen Instituts dar. Anfangs wurden meist ergänzende topographische Aufnahmen und Höhenbestimmungen durchgeführt. Erst nach 1884 kam es vermehrt zur gezielten Aufnahme von Gletschern.

In den Jahren 1886 und 1887 wurde die erste exakte Kartierung am Gepatschferner durchgeführt. An der Aufnahme waren S. FINSTERWALDER, K. SCHUNK und 1887 auch A. BLÜMCKE beteiligt. Die Vermessung erfolgte durch Tachymetrie, welche zu dieser Zeit nur bei Vermessungen für Ingenieurzwecke angewendet wurde. Des Weiteren wurde zur Bestimmung der Fließgeschwindigkeit eine Steinlinie gesetzt. Aus dieser

### 3. Forschungsstand und Datengrundlagen

Aufnahme entstand die Karte „Die Zunge des Gepatschferners. Original-Aufnahme von Dr. S. FINSTERWALDER, Dr. H. SCHUNK u. Dr. A. BLÜMCKE“ im Maßstab ca. 1:10750 und einer Äquidistanz der Höhenlinien von 10 m, welche in der Zeitschrift des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins im Jahr 1888 veröffentlicht wurde (siehe Abb. 3.2.1).

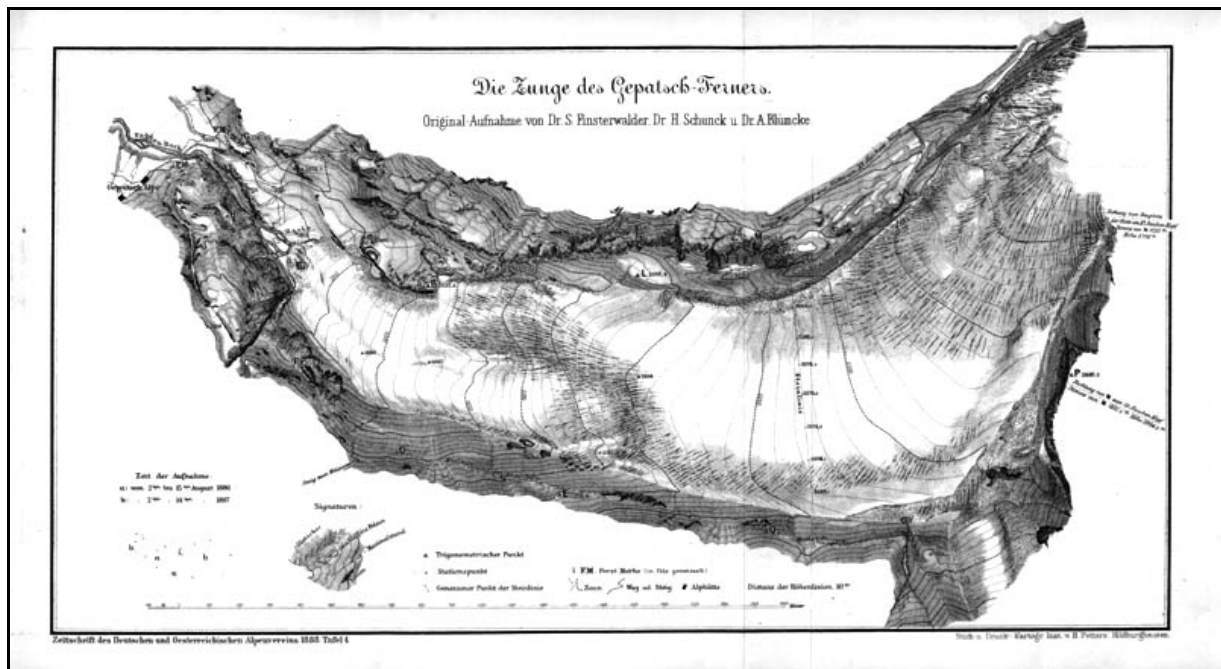


Abb. 3.2.1: Die Zunge des Gepatschferners. Original-Aufnahme von Dr. S. FINSTERWALDER, Dr. H. SCHUNK u. Dr. A. BLÜMCKE. Maßstab ca. 1:10750. (Zeitschrift des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins, 1888).

Die ausgesprochen gut gelungene Karte zeigt leider nur den vorderen Teil der Gletscherzunge. Wiederholungsmessungen wurden 1891 (G. KERSCHENSTEINER) und 1896 (S. FINSTERWALDER, A. FORSTER) durchgeführt. Die Auswertung der Aufnahme von 1896 wurde von W. KUTTA durchgeführt.

1893 erschien beim Deutschen und Österreichischen Alpenverein die Karte „Oetzthal & Stubai, Blatt IV, S. Weisskugel“ im Maßstab 1:50000, mit einer Äquidistanz der Höhenlinien von 50 m (Abb. 3.2.2). Das Kartenwerk Oetzthal & Stubai (4 Blätter) war das zweite Kartenwerk in der Reliefkartenperiode (1892 – 1899). Die Karte entstand auf Grundlage der Originalaufnahme des K. u. K. Militär-geographischen Instituts, die vom Schweizer Ingenieur S. SIMON neu bearbeitet wurde. Vermutlich basiert diese Karte bereits auf dem 1874 begonnenen Präzisionsnivellement des Militärgeographischen Instituts, welches sich am Pegel von Triest orientierte, und über eine

außerordentliche Genauigkeit verfügte (ARNBERGER 1970). Die Geometrie scheint aber nach wie vor auf der fehlerhaften 3. LA basiert zu haben.

Abb. 3.2.2:  
Gepatschferner um  
1893. Ausschnitt aus  
der Karte: Oetzthal &  
Stubai, Blatt IV, S.  
Weisskugel. Maßstab  
1:50000. (Zeitschrift  
des Deutschen und  
Österreichischen  
Alpenvereins, 1893).



Der genaue Zeitpunkt des Gletscherstandes ist leider nicht vermerkt. Die Aufnahme muss aber nach der Aufnahme von FINSTERWALDER / SCHUNK / BLÜMCKE gemacht worden sein, da die zwischen Nörderberg und Rauhekopf gelegene Gletscherzunge bereits den Kontakt zur Hauptgletscherzunge verloren hatte. Nach den Ausführungen von SIMON (1893) scheinen die terrestrisch photogrammetrischen Aufnahmen rund um den Gepatschferner im Herbst 1891 oder - weniger wahrscheinlich - 1892 durchgeführt worden zu sein. In den 1920er Jahren erschien diese Karte erneut beim Deutschen und Österreichischen Alpenverein mit Nachträgen von 1921. Die Vergletscherung weist jedoch den gleichen Stand auf wie in der Originalausgabe. Nach der allgemeinen Einführung der terrestrischen Stereophotogrammetrie leitete der Deutsche und Österreichische Alpenverein ein umfangreiches Programm zur Herstellung von Alpenvereinskarten (AV-Karten) im Maßstab 1:25000 ein. Die Auswertung erfolgte dabei im Maßstab 1:12500, so dass sie auch glaziologischen

Untersuchungen genügen. Später wurde diese Methode durch die Aerophotogrammetrie ergänzt. Nach dem 2. WK trat die terrestrische Photogrammetrie hinter die Luftbildphotogrammetrie zurück, wurde aber nie ganz ersetzt. Die terrestrisch-photogrammetrische Aufnahme des Gepatschferners wurde von E. SCHNEIDER im Jahre 1939 durchgeführt. Auch die Auswertung wurde noch im gleichen Jahr durchgeführt (FINSTERWALDER 1951). Die Arbeiten für das ganze Blatt Weißkugel dauerten aber noch bis 1943. Trotz der widrigen Kriegsbedingungen führte E. SCHNEIDER die Auswertung für das Blatt Weißkugel am Institut für Photogrammetrie an der Technischen Universität Berlin durch. 1945 konnten diese Unterlagen noch vor der Besetzung Berlins durch die Rote Armee gerettet werden. Nach einigen Nachträgen durch E. SCHNEIDER erschien im Jahr 1951 die AV-Karte 30/2 „Öztaler Alpen, Blatt Weißkugel“ in der ersten Ausgabe.

Die zweite Ausgabe erschien 1962 mit Ergänzungen von F. EBSTER. R. BLANKE führte die Ergänzungen der dritten Ausgabe von 1971 durch und G. MOSER die Ergänzungen der vierten Ausgabe von 1977. Erst für die fünfte Ausgabe von 1980 wurde eine vollständige kartographische Ergänzung und Geländebegehung nach Unterlagen des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen in Wien durch G. MOSER durchgeführt. Der Gletscherstand entsprach nun dem von 1969. Die Ergänzungen der sechsten Ausgabe von 1986 führte A. INGENHAEFF durch. Für die siebte Ausgabe von 1993 wurde eine Geländebegehung durch B. BERGER, G. MOSER und Ch. WÜHRER durchgeführt. Die kartographische Bearbeitung führte wieder G. MOSER durch. Im Jahr 2001 erschien die achte Ausgabe, nun aber in UTM/WGS84 Koordinaten. Dazu fand eine Geländebegehung durch B. BERGER, H. KUDRNOVSKY und G. MOSER statt. Die vollständige Karte wurde durch G. MOSER digital nachgeführt. Die Höhenlinien der Gletscher wurden nach Unterlagen des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen in Wien angefertigt. Der Gletscherstand entspricht dem von 1997. Die bisher letzte Ausgabe (Ausgabe 9) erschien 2003. Diese beinhaltet einige Nachträge von G. MOSER und aktualisierte Gletscherstände auf italienischer Seite.

#### **3.2.2 Kartenaufnahmen der österreichischen Landesvermessung**

In den Jahren 1869 bis 1887 wurde, beginnend in Tirol, die dritte amtliche österreichische Landesaufnahme (3. LA) durchgeführt (ARNBERGER 1970). Die



daraus im Maßstab 1:25000 entstandenen Kartenwerke weisen eine deutlich bessere Geometrie auf als das 1856er Werk von SONKLAR. Auch die Gletscher weisen nun Höhenlinien auf. Die Äquidistanz der Höhenlinien beträgt 100 m. Allerdings standen für die Auswertung nur 1-2 Höhenmessungen pro km<sup>2</sup> zur Verfügung, so dass der Verlauf der Höhenlinien teilweise recht ungenau interpoliert wurde. Die Kartenblätter 5245/2 und /4, auf denen der Gepatschferner zu finden ist, entstanden 1870/72. 1885 bis 1896 wurde die 3. LA reambuliert (Kartenblatt 5245/4 reambuliert 1888) und 1896 bis 1914 revidiert (ARNBERGER 1970). Nach S. FINSTERWALDER (1897) weist dieses Kartenwerk einen mittleren Höhenfehler von +/- 21 m auf, und ist somit kaum zu einem Vergleich mit modernen Kartenwerken geeignet.

In schwarz-weiß gedruckt, entstand durch die österreichische Landesvermessung eine so genannte Spezialkarte im Maßstab 1:75000. Abgeleitet war sie von den Karten der 3. LA in 1:25000. Diese erschien in der Ausgabe 1902, 1908, 1915, 1926 und 1936. Zu den jeweiligen Gletscherständen liegen keine Informationen vor. Nach Aussage des BEV beinhalten die Gletscherflächen aber keine Höhenlinien. Anzunehmen ist, dass diese Spezialkarten immer die gleiche Kartenaufnahme wiedergeben.

Im Jahr 1944 entstand die Karte der Alpen- und Donau-Reichsgaue im Maßstab 1:50000. Diese ist aber nur eine Vergrößerung der Spezialkarte im Maßstab 1:75000. Ab 1936 hatte diese Karte in schwarz-weiß Druck einen grünfarbigen Aufdruck der Waldgebiete. Unter dem Namen Provisorische Ausgabe der Österr. Karte 1:50000 wurde diese Karte 1950 und 1965 fortgeführt, wobei die Ausgabe 1965 durch einige Nachträge aktualisiert wurde. Der Gletscherstand ist mit 1888 angegeben. Im Jahr 1976 entstand durch die österreichische Landesvermessung die Österreichische Karte 1:50000 durch eine vollständige Neuaufnahme. Der Gletscherstand ist mit 1976 angegeben und die Karte ist nun mehrfarbig gehalten. Diese Karte wurde mit einzelnen Nachträgen, aber gleichem Gletscherstand, in den Jahren 1982 und 1984 fortgeführt. 1991 erfolgte eine erneute Fortführung, nun aber mit dem Gletscherstand von 1991. Mit der Kartenfortführung von 1998 wurde auch der Gletscherstand auf den Stand von 1998 gebracht. Gleiches gilt auch für die bislang letzte Fortführung von 2004 (Gletscherstand 2004), welche nun aber in UTM/WGS84 Koordinaten verfasst ist. Nach einer Nachfrage beim BEV ergab sich, dass die Angaben zu den Gletscherständen ungenau sind. So wurden die

Luftaufnahmen zur Aktualisierung der Gletscherstände meist ein bis zwei Jahre vor der Aktualisierung gemacht.

#### 3.2.3 Sonstige Kartenaufnahmen

Nach BRUNNER wurde der Gepatschferner erstmals in der Karte von Tirol von WARMUND YGL (gest. 1611) dargestellt, welche 1604/05 in einem Maßstab von 1:250000 erschien (siehe Abb. 3.2.3).

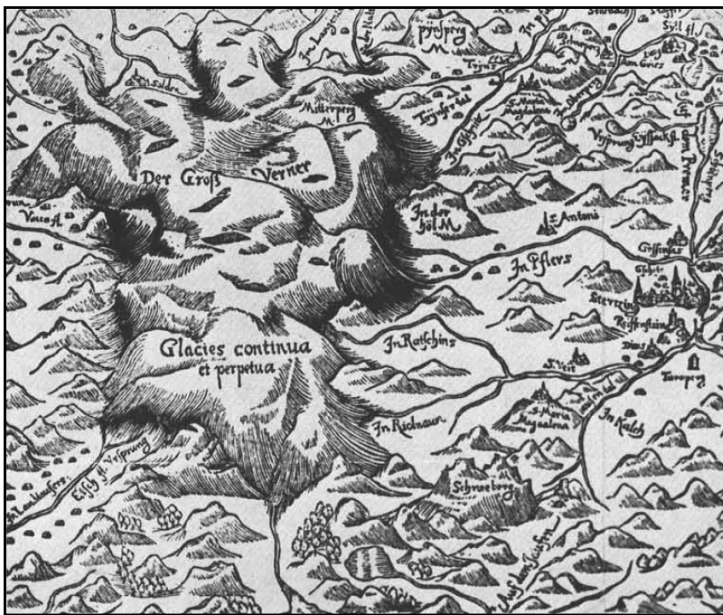


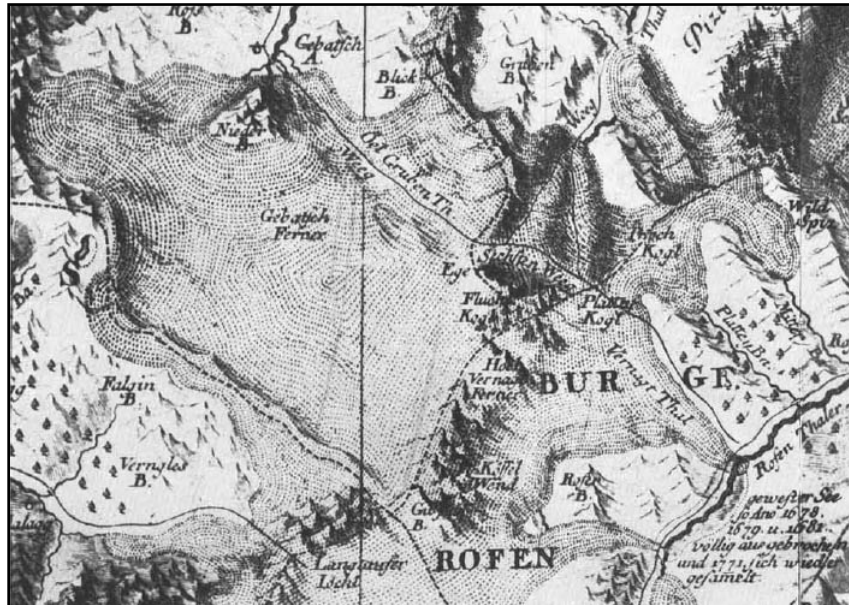
Abb. 3.2.3: Vergletscherung der Ötztaler Alpen nach WARMUND YGL 1604/05 (KINZL 1955).

In dieser durch Holzschnitt entstandenen Karte wurde die Vergletscherung der Ötztaler Alpen in noch primitiver Weise als eine mit riesigen Spalten durchsetzte Eiskappe dargestellt. Sie ist jedoch bemerkenswert, da sie die erste Karte ist, in der überhaupt Alpengletscher erfasst sind. Die „Karte von Tirol“ von PETER ANICH, welche 1750 bis 1765 entstand, brachte eine deutlich bessere kartographische Darstellung (siehe Abb. 3.2.4). Insgesamt entstanden 20 Kartenblätter in einem Maßstab von annähernd 1:100000. ANICH gilt als der beste Hochgebirgskartograph seiner Zeit. Dieser legte eine Art Triangulationsnetz über das ganze Land Tirol. Nach HARTL (1885) weisen die Vermessungspunkte zwar Ungenauigkeiten von bis zu 1 km auf, dennoch ist die Darstellung der Landschaft stimmig. Sehr genau wurden die vielen Ortschaften und Weiler dargestellt. Auch die Vielzahl der geographischen Namen war zu dieser Zeit einzigartig. Die Gletscher waren zumindest in einer Grundrissdarstellung vorhanden, die die damalige Vergletscherung weitgehend

richtig wiedergibt. Hier sind dennoch Unterschiede zu finden. So kann die Vergletscherung im Rofental als recht gut wiedergegeben angesehen werden. Im Kaunertal ist diese aber weniger genau dargestellt. Dies mag auch damals schon an der Gefährlichkeit der Gletscher im Rofental gelegen haben.

Abb. 3.2.4:

Der Gepatschferner um 1765. Ausschnitt aus der Karte von Tirol von PETER ANICH (KINZL 1955).



Eine „Karte des Gepatschferners im Kaunerthale“ findet sich im Atlas „Die Oetzthaler Gebirgsgruppe mit besonderer Rücksicht auf Orographie und Gletscherkunde“ des KARL SONKLAR, welche den Gletscherstand des Gepatschferners von 1856 wiedergibt. Dieses Kartenwerk ist als fehlerhaft anzusehen, denn lediglich die Ausdehnung des Gletschers scheint weitgehend richtig zu sein.

Nach den Kartenwerken des Alpenvereins (1886/87 und 1893) erfolgte 1922 eine erneute Aufnahme des Gepatschferners. Die längere Pause war unter Anderem auf den 1. Weltkrieg (1914 – 1918) zurückzuführen. Die Aufnahme wurde durch SEBASTIAN, ULRICH und RICHARD FINSTERWALDER unter ungünstigen finanziellen Bedingungen durchgeführt. Anders als 1886/87 wurde diesmal der gesamte Gepatschferner samt einiger benachbarter Gletscher aufgenommen. Dies wurde durch die Anwendung der terrestrischen Stereophotogrammetrie ermöglicht. Nach 17 Tagen des Aufenthalts, wovon 12 Arbeitstage waren, konnten die Arbeiten abgeschlossen werden. Die in diesem Jahr vorherrschende Trockenheit und der daraus resultierenden Ausaperung bis in größere Höhen ermöglichte eine sehr genaue Erfassung der Spaltensysteme. Geringe Lücken in der Aufnahme konnten 1923 geschlossen werden. Die Auswertung erfolgte durch G. HEß und J. SARTORIUS

am Zeißschen Stereoautographen im Maßstab 1:10000 bei einer Äquidistanz der Höhenlinien von 10 m. Aus finanziellen Gründen erschien die Karte erst 1928 unter dem Namen „Der Talschluß des Kaunsertals in den Oetztaler Alpen mit dem Gepatsch- und Weißseeferner“ in einem Maßstab von 1:20000 mit einer Äquidistanz der Höhenlinien von 20 m. Die Reproduktion wurde mit Geldern des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins unterstützt.

Neben der Arbeit durch den Alpenverein und der österreichischen Landesvermessung kam es noch zu weiteren Untersuchungen. So führte R. FINSTERWALDER, welcher 1949 an die Technische Hochschule München berufen worden war, von 1953 bis 1962 eine Reihe von terrestrisch-photogrammetrischen Aufnahmen durch. So kam es 1953, 1956 und 1958 zur vollständigen Aufnahme des Gepatschferners. In den Jahren 1957, 1959, 1961 und 1962 wurde nur die Gletscherzunge erfasst. Unterstützt wurde R. FINSTERWALDER dabei von einer Reihe von Geodäten und Photogrammeter. Diese Aufnahmen führten aber nicht zur Herstellung von Karten.

Im Jahr 1978 erschien die Karte „Gepatschferner 1971“ im Maßstab 1:10000 mit einer Äquidistanz der Höhenlinien von 10 m. Als Grundlage dienten die Luftbilder (Maßstab ca. 1:15000) der Befliegung des Österreichischen Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen vom August 1971. Da der Bildflug nur den österreichischen Teil des Gepatschferners abdeckte, mussten einige südlich gelegene Teile durch terrestrische Photogrammetrie aufgenommen werden. Dies wurde 1973 durchgeführt. Bereiche im Gletschervorfeld, welche ebenfalls nicht im Bildflug von 1971 enthalten waren, wurden einem Bildflug von 1969 entnommen. Die Auswertung im Maßstab 1:7500 führte K. BRUNNER durch. Eine erste Nachmessung erfolgte im August 1977. Diese ergab, dass die seit Jahrzehnten andauernde Rückzugsphase unterbrochen war. Im August 1979 kam es zu einer weiteren Befliegung des Gepatschferners. Die Auswertung führte jedoch nur zu Höhenänderungen für 100 m Stufen gegenüber der Karte von 1971.

1996 wurde im Rahmen des österreichischen Gletscherinventars eine Eisdickenmessung am Gepatschferner mittels Radar durchgeführt. Entlang von 19 Profilen mit einer Gesamtlänge von 33 km wurden an insgesamt 355 Punkten Messungen durchgeführt. Die Höhe des Untergrundes wurden aus den Werten der Eisdicke anhand der Karte Gepatschferner 1971 ermittelt (SPAN et al. 2005). Daraus entstanden 1997 in der Diplomarbeit von MASSIMO Karten der Eisdicke und des

Gletscherbetts. Die Orientierung der Messprofile der Radarmessungen kann Abb. 3.2.5 entnommen werden. Abb. 3.2.6 stellt die errechnete Höhe des Gletscherbetts dar.

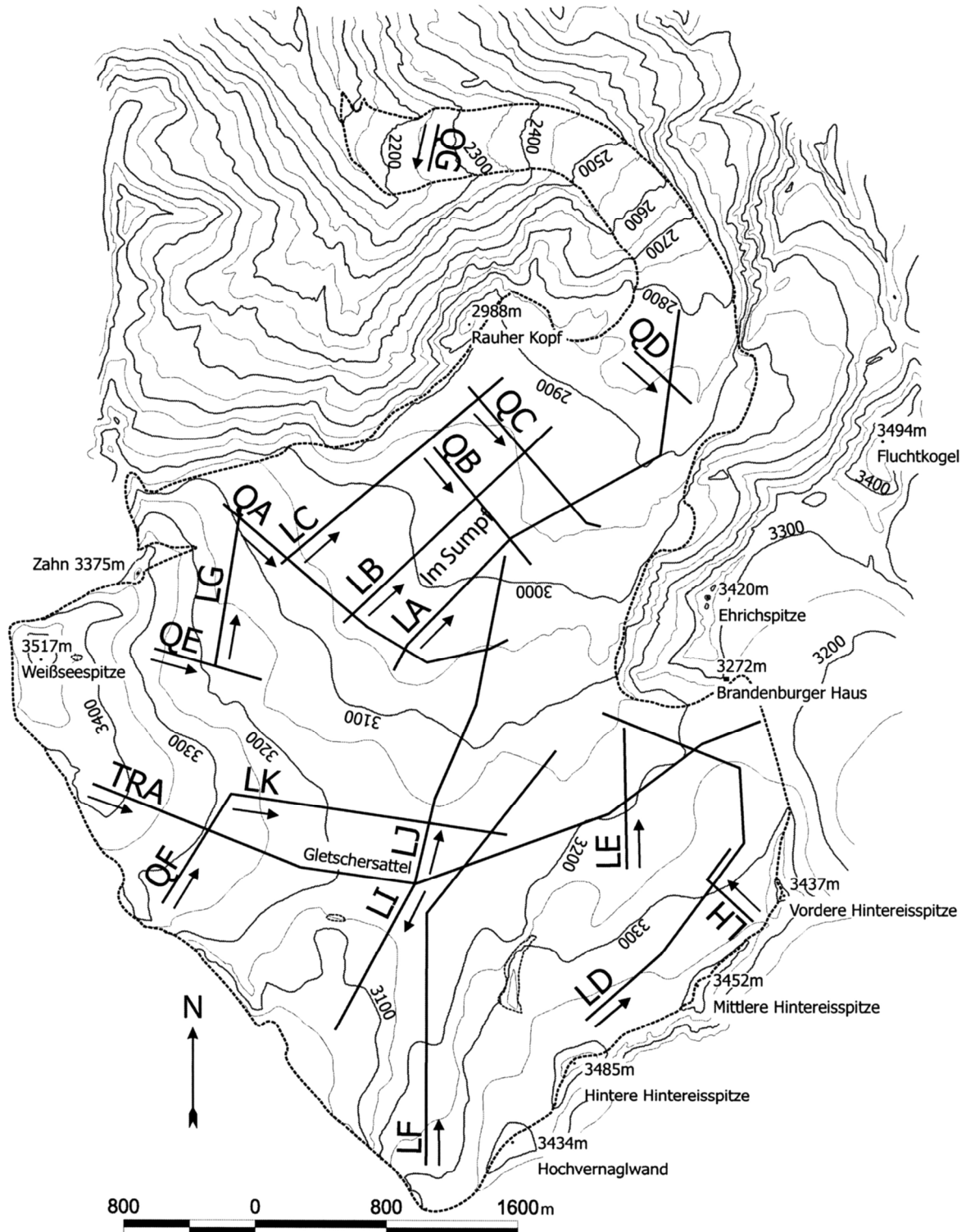


Abb. 3.2.5: Orientierung der Messprofile der Eisdickenbestimmung 1996 (SPAN et al. 2005).

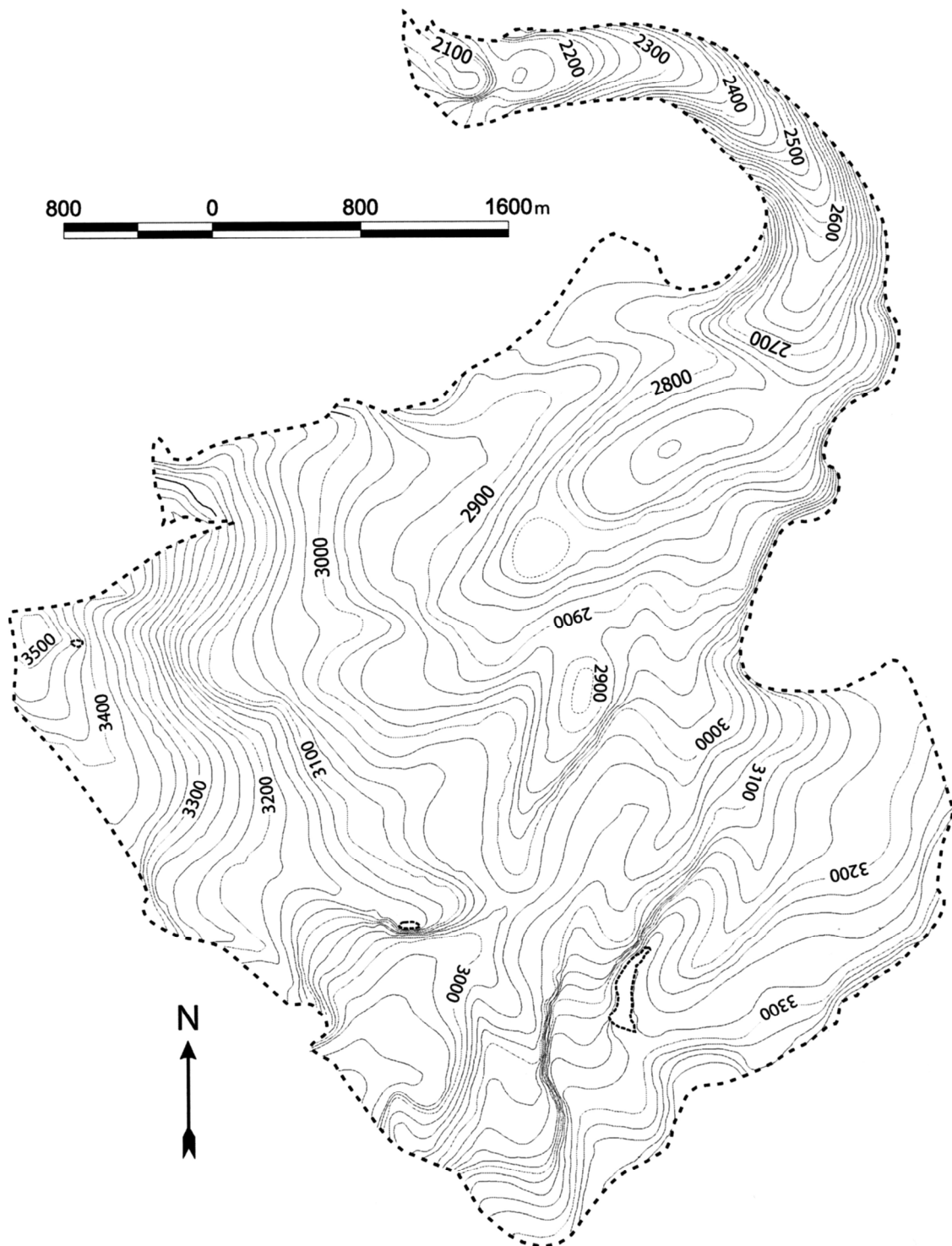


Abb. 3.2.6: Gletscherbett des Gepatschferners 1996 mit 20 m Höhenlinien (SPAN et al. 2005).

Im Rahmen der Diplomarbeit von KEUTTERLING entstand 1997 die „Orthophotokarte Gepatschferner 1990“ im Maßstab 1:10000 bei einer Äquidistanz der Höhenlinien von 10 m. Basis war ein Orthophoto vom Bildflug vom 5. August 1990. Die digitale photogrammetrische Auswertung wurde von A. KEUTTERLING durchgeführt.

## **3.3 Datengrundlagen**

### **3.3.1 GIS Daten**

Einige wenige Daten lagen von der Diplomarbeit von A. KEUTTERLING bereits in Form von GIS-Daten vor, welche mir freundlicherweise von Herrn PD. Dr. A. THOMAS zur Verfügung gestellt wurden. Diese Daten sind in der österreichischen Austria Ferro West Zone Projektion georeferenziert. Folgende Dateien lagen vor und wurden teilweise verwendet:

Festpunkte Gepatschferner 1971

DHM (Grid) Gepatschferner 1990

TIN Gepatschferner 1990

Höhenlinien Gepatschferner 1990

Grenze Gepatschferner 1990

Polygon Gepatschferner 1990

Die verwendeten Daten mussten teilweise nachgearbeitet werden. Mehr dazu in Kap. 4.2.4.

Vom BEV wurde ein DHM (Grid) des Gepatschferners 2004 geliefert. Auch hier passte das DHM nicht exakt zu den von mir georeferenzierten Daten. Auch erschien mir die Ausformung der vorderen Gletscherzunge im Vergleich zur TK 1:50000 Ausg. 2004 fragwürdig. Da auch der italienische Teil des Gepatschferners im DHM fehlte, erstellte ich das DHM 2004 aus der TK 1:50000 neu. Nach einer weiteren Anfrage beim BEV bestätigte sich der erwähnte Verdacht. So stellt das DHM 2004 den Gletscherstand 1997 dar. Die Daten des BEV wurden freundlicherweise von Herrn PD. Dr. A. THOMAS beschafft.

### **3.3.2 Topographische Karten**

Vom Deutschen Alpenverein wurden mir mehrere Karten zur Verfügung gestellt. Diese lagen als Scanns im 24-Bit Farbmodus bei einer Auflösung von 200 dpi vor. Gespeichert waren diese als hochqualitative JPG Dateien. Da mir die Bearbeitung dieser Kartenscanns wegen der niedrigen Auflösung als zu schwierig erschien, habe

ich letztendlich die benötigten AV-Karten über das Antiquariat im Original erworben. So erwarb ich die AV-Karte „Oetzthal & Stubai, Blatt IV, S. Weisskugel“ in der Originalausgabe von 1893. Auch die AV-Karte „Öztaler Alpen 1:25000, Blatt Weißkugel“ in der Originalausgabe von 1951 besorgte ich über den antiquarischen Buchhandel. Gescannt wurde die Karte, wie auch die Karte des Gepatschferners von 1928, auf dem Großformat-Scanner der Firma GIS-Service GmbH.

Das Kartenblatt „Der Talschluß des Kaunsertals in den Oetztaleralpen mit dem Gepatsch-Weißseeferner. 1:20000“, welche den Gletscherstand von 1922/23 repräsentiert, wurde aus der Zeitschrift für Gletscherkunde Band XVI von 1928 gescannt, welche als Originalausgabe in der UB-Gießen vorhanden ist.

Auch die Karte „Veränderungen der Zungenlage des Gepatschferners seit 1886/87, 1:20000“, welche in Heft 2 1987 der Zeitschrift für Vermessungswesen erschienen war, lag im Original vor. Die einzelnen Karten der Zungenlagen waren nicht größer als Din A4, so dass ich sie selber scannen konnte. Am Ende wurden aber nur die Zungenstände von 1886/87 und 1953 verwendet.

Die Karten „Gepatschferner 1971“ (aus Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band XIV, 1978) und die AV-Karte 30/2 Öztaler Alpen, Blatt Weißkugel (Ausgabe 2003) lagen ebenfalls als Original vor, und wurden von mir in mehreren Teilen gescannt. Erstere wurde mir von Herrn PD. Dr. THOMAS zur Verfügung gestellt, letztere wurde privat beschafft.

Die Karten der 3. LA Ausg. 1872 und der TK 1:50000 Ausg. 1976 und 2004 wurden mir vom BEV als georeferenzierte Scanns (JPG Format, 300 dpi) zur Verfügung gestellt.



## **Kapitel 4:**

# **Erstellung digitaler Geländemodelle aus topographischen Karteninformationen**

## **4.1 Arbeitsschritte**

Grundlage der Untersuchungen über die Veränderung des Volumens, der Fläche und der Masse des Gepatschferners, welche im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, bilden verschiedene topographische Karten aus dem Zeitraum von 1886 bis 1997. Während der Bearbeitung der Fragestellung konnten noch weitere Karten beschafft werden. Durch die Genehmigung der Verlängerung der Abgabefrist durch den Prüfungsausschuss, konnten auch diese Karten mit in die Arbeit aufgenommen werden. So konnte insgesamt ein Zeitraum von 1872 bis 2003 abgedeckt werden.

Aus den Höheninformationen dieser topographischen Karten in Form von Höhenlinien und Höhenpunkten wurden digitale Höhenmodelle (DHM) abgeleitet, die die Grundlagen für die anschließenden Berechnungen darstellen.

Als erstes müssen die Karten mit Hilfe eines Scanners digital erfasst werden. Alle nicht für die Untersuchung relevanten Signaturen müssen anschließend, mit Hilfe eines normalen Bildbearbeitungsprogramms (z. B. Adobe Photoshop), entfernt werden. Die so bearbeiteten Bilddateien können anschließend nach ArcGIS importiert werden. In ArcGIS wird den Bilddateien zunächst ein Raumbezug zugewiesen, d. H. sie werden georeferenziert. Anschließend werden aus den Bilddateien Höhenlinien, Höhenpunkte, Grenzen und Flächenpolygone abgeleitet.

Die so entstandenen Shape Dateien bilden die Grundlage für die Erstellung der digitalen Höhenmodelle. Zunächst werden aus den Shape Dateien TIN's erstellt, da diese ein genaueres Abbild der Geländeoberfläche erlauben. Aus den TIN's werden anschließend Rasterdateien, so genannte Grids, erstellt. Mit diesen werden die notwendigen Berechnungen durchgeführt. Die TIN's werden darüber hinaus auch zur Visualisierung der Ergebnisse herangezogen.



## **4.2 Datenaufbereitung**

### **4.2.1 Scannen der Karten**

Zunächst mussten die vorliegenden Karten mit Hilfe eines Scanners digitalisiert werden. Die Scans führte ich zu Hause mit einem Epson Perfection V 200 Photo durch. Nur die Originalkarten der Gletscherzunge von 1888 und die Gletscherkarten von 1928 und 1951 wurden durch die Firma GIS-Service GmbH gescannt.

Einige der Karten, welche von mir zu Hause gescannt wurden, mussten anschließend aus mehreren Teilen zusammengeschnitten werden. Dies trifft auf die Karten Gepatschferner 1971 und die AV-Karte 30/2 Ausg. 2003 zu. Um die Scans der Karten später besser bearbeiten zu können, sollte eine recht hohe Auflösung beim Scannen gewählt werden. Da die Höhenlinien des Geländes aus der AV-Karte 30/2 abgeleitet werden sollten, wurde diese im 24-Bit Farbmodus bei einer Auflösung von 1200 dpi eingescannt. Bei der späteren Bearbeitung der Signaturen der steilen Felswände erwies sich diese hohe Auflösung als absolut erforderlich. Auch die AV-Karte Ausg. 1893 wurde mit einer Auflösung von 1200 dpi eingescannt. Alle anderen Karten wurden im 24-Bit Farbmodus bei einer Auflösung von 600 dpi eingescannt. Abgespeichert wurden die so erfassten Karten im TIFF Modus ohne Komprimierung.

### **4.2.2 Kartenbearbeitung**

Die Bearbeitung der Karten erfolgte mit Hilfe von Adobe Photoshop CS2. Zuerst wurden die Karten ausgerichtet und zusammengeschnitten. Die AV-Karte 30/2 Ausg. 2003 musste aus lediglich 2 Teilen (oberer und unterer Teil) zusammengeschnitten werden. Die Größe der Karte Gepatschferner 1971 erforderte jedoch das Zusammenschneiden aus 11 Einzelteilen. Die Ausrichtung der Einzelteile erfolgte anhand der Breitengrade. Bei den Karten der Zungenstände, welche nicht zusammengeschnitten werden mussten, war dies die 192000 Linie. Die Ränder der Karten wurden nun anhand von Breiten- und Längengraden beschnitten. Bei allen gescannten Karten fiel dabei auf, dass das Gradnetz nicht exakt rechtwinklig gedruckt war. Die AV-Karten Ausg. 1893 und 1951 konnten nur grob ausgerichtet werden, da kein Gradnetz aufgedruckt ist. Als nächstes wurden alle nicht benötigten Signaturen wie Beschriftungen, Schraffuren usw. entfernt. So entstanden erste

#### 4. Erstellung digitaler Geländemodelle aus topographischen Karteninformationen

Arbeitsgrundlagen, die nur noch Höhenlinien, Höhenpunkte, die Grenzlinie von Gletscher zu Gelände und die Schnittpunkte des Gradnetzes enthielten. Höhenlinien, welche durch Beschriftungen und Signaturen unterbrochen waren, wurden zumeist per Hand vervollständigt.

Aus diesen Arbeitsgrundlagen wurden weitere Bilddateien mit den jeweils benötigten Signaturen erstellt. Die Schnittpunkte des Gradnetzes wurden aber bei allen weiteren Bilddateien beibehalten.

Aufgrund der gemachten Erfahrungen wurde bei den später bearbeiteten Karten nur noch je eine Bilddatei erstellt. Diese enthielt die Höhenlinien des Gletschers, die Gletschergrenze, die Höhenpunkte des Geländes und, wenn vorhanden, die Höhenpunkte des Gletschers.

Die Gletschergrenze wurde bei der Karte von 1928 und der AV-Karte Ausg. 1951 komplett per Hand nachgezogen. Auch bei den BEV Karten Ausg. 1872, 1976 und 2004 wurde die Gletschergrenze per Hand nachgezogen. Auch die Höhenpunkte des Geländes wurden in blauer Farbe nachgezogen. Wegen dem geringen Kontrast mussten die Höhenlinien des Gletschergebiets der BEV Karte 1872 ebenfalls nachgezogen werden. Bei der späteren Vektorisierung erwies sich dieser Aufwand jedoch als sehr hilfreich.

Ebenso bei der AV-Karte Ausg. 1893 wurde lediglich die Gletschergrenze nachgezogen. Wegen der nicht immer eindeutig identifizierbaren Signaturen war dies stellenweise recht schwierig. Auch fiel bei diesem Arbeitsschritt bereits die stellenweise fehlerhafte Geometrie der Karte auf. Die nicht benötigten Signaturen wurden in diesem Fall allerdings nicht entfernt. Da diese deutlich heller gedruckt waren als die Höhenlinien des Gletschers, konnten diese bei der Bearbeitung in ArcGIS herausklassifiziert werden.

Probleme bereitete die Kartenabbildung des Gletscherbettes nach MASSIMO, welche aus der Diplomarbeit von KEUTTERLING (1998) entnommen werden musste. Leider schlugen alle Versuche der Kontaktaufnahme mit Herrn MASSIMO fehl und es misslang zunächst, diese Kartengrundlage in besserer Qualität von einer anderen Quelle zu beschaffen.

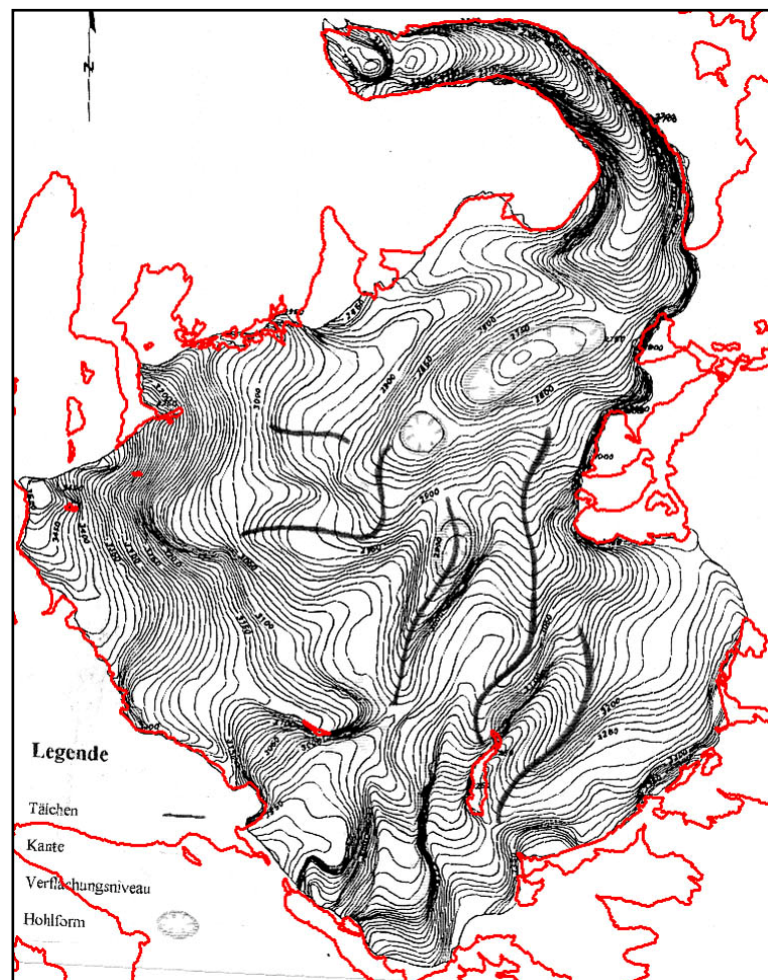
So musste der Druck aus der Diplomarbeit von KEUTTERLING eingescannt werden. Leider sind die Höhenlinien drucktechnisch recht dick geraten, so dass sie in steilen Bereichen ineinander verlaufen sind. Auch fehlen jegliche Bezugspunkte und Koordinatenangaben. Der Nordpfeil ist so unsauber gedruckt, so dass auch er nicht

#### 4. Erstellung digitaler Geländemodelle aus topographischen Karteninformationen

zur Ausrichtung herangezogen werden konnte. Ebenfalls unklar blieben die Projektion und das Koordinatensystem. Lediglich die Höhenangaben der Höhenlinien (Äquidistanz 10m) waren vorhanden.

Da aber sowohl die Darstellung des Gletscherbetts nach MASSIMO als auch der Gletscherstand der AV Karte 30/2 Ausg. 2003 von etwa 1997 stammen, konnte das Gletscherbett anhand der sehr typischen Form des Gepatschferners in die Bilddatei der Höhenlinien des Geländes (erstellt aus AV-Karte 30/2 Ausg. 2003) eingepasst werden. Die recht gute Passgenauigkeit des Gletscherbetts im Vergleich zur Gletschergrenze von 1997 (abgeleitet aus AV-Karte 30/2, Ausg. 2003) wird aus Abb. 4.2.1 ersichtlich.

Abb. 4.2.1: Passgenauigkeit des Gletscherbetts (nach MASSIMO) im Vergleich zur Gletschergrenze von 1997 (Abb. ohne Maßstab).



Wie schon erwähnt, waren die Höhenlinien des Gletscherbetts in steilen Bereichen ineinander verlaufen. Dies traf vor allem auch für die Randbereiche der Gletscherzunge zu. Auch diese Bereiche kann man in Abb. 4.2.1 gut erkennen. Diese Bereiche mussten per Hand nachbearbeitet werden. So wurden die Höhen-

#### 4. Erstellung digitaler Geländemodelle aus topographischen Karteninformationen

linien so weit wie möglich nachgezogen und die unkenntlichen Bereiche herausgelöscht. Danach wurden neue Höhenlinien eingezeichnet. Auf diese Weise wurde auch eine Verbindung mit den Höhenlinien des umliegenden Geländes hergestellt. Dabei musste penibel darauf geachtet werden, dass sich nur Höhenlinien gleicher Höhe trafen. Erstaunlich war, dass die Höhenlinien von Gelände und Gletscherbett im Großen und Ganzen gut zueinander passten, an vielen Stellen sogar ganz exakt. Alle anderen Verbindungen wurden durch manuelle Interpolation nach bestem Wissen und Gewissen hergestellt. Dabei ist zu beachten, dass auch die Höhenlinien des Gletscherbetts in großem Maße durch Interpolation zustande gekommen sind. So dürfte sich die Ungenauigkeit durch diese manuelle Interpolation in akzeptablen Grenzen halten.

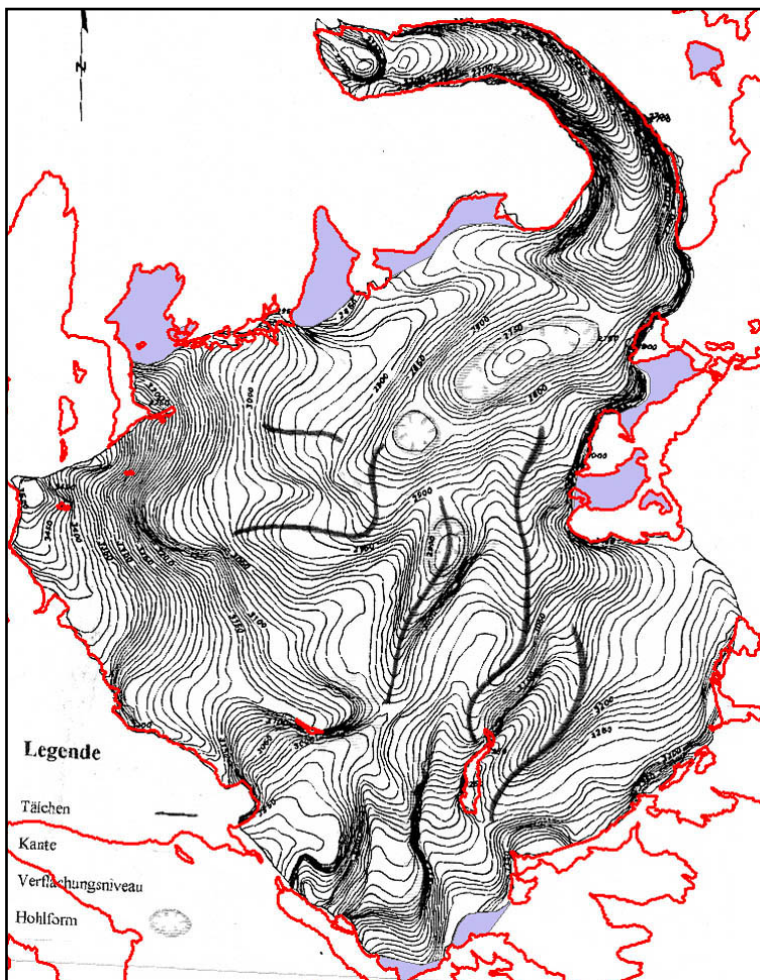


Abb. 4.2.2: Lage der per Hand interpolierten Randbereiche des Gletscherbetts (Abb. ohne Maßstab).

In einigen Randbereichen fehlen Höheninformationen in der Kartenabbildung des Gletscherbetts. Hierbei handelt es sich meist um kleine Seitenausläufer des Hauptgletschers. Da diese in der Realität nur über eine geringe Eismächtigkeit

#### 4. Erstellung digitaler Geländemodelle aus topographischen Karteninformationen

verfügen, wurden auch diese fehlenden Bereiche per Hand interpoliert. Die Lage der interpolierten Randbereiche Abb. 4.2.2 entnommen werden. Alleine die Arbeiten an den Höhenlinien des Geländes und des Gletscherbetts haben mehrere Wochen in Anspruch genommen. Erst kurz vor Abschluss dieser Diplomarbeit konnte eine sauberer gedruckte Abbildung der Höhenlinien des Gletscherbetts gefunden werden (SPAN et al. 2005). Aber auch in dieser Abbildung fehlen jegliche Bezugspunkte zur geographischen Orientierung. So wurde am bestehenden DHM des Gletscherbetts keine Änderung mehr vorgenommen. Zur Ableitung der Vektordatensätze wurden aus den Kartengrundlagen folgende Bilddateien erstellt:

Höhenlinien der Gletscherzungen für 1886/87, 1922, 1940, 1953, 1971

Zungenrand 1886/87, 1922, 1940, 1953, 1971

Gelände für Zungenstände mit Gletscheruntergrund 1971 (später verworfen)

Höhenlinien Gepatschferner 1971

Höhenpunkte Gepatschferner 1971

Gletscherrand 1971

Höhenlinien Gepatschferner 1997

Gletscherrand Gepatschferner 1997

Gelände mit Gletscheruntergrund des Gepatschferners 1997

Gipfelpunkte des Geländes 1997

Später entstanden durch die Bearbeitung weiterer Kartenblätter folgende Bilddateien:

Gepatschferner 1872

Gepatschferner 1893

Gepatschferner 1922

Gepatschferner 1939

Gepatschferner 1976

Gepatschferner 1990

Gepatschferner 2004

Die erstellten Bilddateien wurden anschließend zur weiteren Bearbeitung nach ArcGIS importiert.

### 4.2.3 Georeferenzierung

#### Allgemeines zum Georeferenzieren:

Bei der Georeferenzierung wird z. B. einer Bilddatei (gescannte Karte, Orthophoto usw.) ein Raumbezug zugewiesen. Dies geschieht in der Regel über die Zuweisung von Realweltkoordinaten und einer Projektion. Die Georeferenzierung einer gescannten Karte kann dabei über die Koordinaten des Gradnetzes erfolgen oder über die Koordinaten bekannter Bezugspunkte wie z. B. Berggipfel.

In ArcGIS erfolgt die Georeferenzierung über die Erweiterung *Georeferencing*. Bevor eine Kartenabbildung importiert wird, sollte im Datenrahmen (*Data Frame*) zuerst das gewünschte Koordinatensystem und die gewünschte Projektion ausgewählt werden. Ist die Kartenabbildung eingeladen, können die benötigten Kontrollpunkte gesetzt werden. Die Option *Auto Adjust* sollte vor dem setzen der Kontrollpunkte deaktiviert werden. Den gesetzten Kontrollpunkten können anschließend x und y Koordinaten zugewiesen werden. Dabei sollte immer wieder überprüft werden, ob die Georeferenzierung die gewünschte Genauigkeit erreicht hat. Diese wird aus den RMS Fehlern (*residuals*) der gesetzten Kontrollpunkte ersichtlich. Ebenfalls hilfreich ist, wenn als Referenz eine bereits georeferenzierte Datei hinzugezogen wird. Sobald das gewünschte Ergebnis erreicht ist, kann der Vorgang des Georeferenzierens abgeschlossen werden.

Probleme können auftauchen, sobald die verwendeten Kartengrundlagen in unterschiedlichen Koordinatensystemen vorliegen. Eine Herangehensweise ist, alle Karten zunächst in dem Koordinatensystem zu georeferenzieren in denen sie vorliegen und die so georeferenzierten Daten später in ein einheitliches Koordinatensystem zu konvertieren.

Für die Daten meiner Arbeit wählte ich auf Anraten von Herrn Dr. THOMAS österreichische Gauß-Krüger Koordinaten im Meridianstreifen M 28 (in ArcGIS: *Austria Ferro West Zone*) aus. Alle älteren Kartengrundlagen befinden sich in diesem Koordinatensystem. Leider liegt aber die AV-Karte 30/2 Ausg. 2003 und die Österreichische Karte 1:50.000 Ausg. 2004 in UTM/WGS84 Koordinaten vor. Aus bislang ungeklärten Gründen schlug der oben beschriebene Weg der Georeferenzierung und späteren Konvertierung fehl. So entschloss ich mich, diese Karten anhand bekannter Festpunkte zu georeferenzieren. Aus der Diplomarbeit von Herrn KEUTTERLING (1998) lag mir eine Datei mit eingemessenen Festpunkten vor.



##### **Höhenpunkte und trigonometrische Punkte:**

Zwischen einfachen Höhenpunkten und trigonometrischen Festpunkten muss eindeutig unterschieden werden. Wirklich verlässlich sind nur die trigonometrischen Punkte. Zwar werden auch Höhenpunkte trigonometrisch bestimmt, durch spätere Nachmessungen kann es hier aber zu Korrekturen und somit Lageabweichungen kommen. Ferner muss zwischen Höhenpunkten des Geländes und Höhenpunkten des Gletschers unterschieden werden. So können sich die Lage und die Höhe von Höhenpunkten des Gletschers im Laufe der Zeit verändern. Etwas Verwirrung stifteten die Festpunkte, welche bereits in digitaler Form aus der Diplomarbeit von KEUTTERLING (1998) vorlagen. So war in diesem Datensatz auch die Weißseespitze vorhanden, welche aber einen Höhenpunkt des Gletschers darstellt. Zwar wurde in dem Datensatz nach Zahlen zwischen verschiedenen Typen von Höhenpunkten unterschieden, eine Erklärung der Zahlen war aber nicht vorhanden. Auf der Karte Gepatschferner 1971 wird farblich zwischen Höhenpunkten des Gletschers und des Geländes unterschieden, nicht aber in den AV-Karten. Vor allem bei der Weißseespitze führt dies zu Verwirrungen. Offensichtlich wird hier die Höhe der Eiskappe angegeben. Da diese aber mit der Zeit Veränderungen unterworfen ist, kommt es zu Abweichungen in der Lage und der Höhe im Vergleich von verschiedenen Kartenwerken.

Auch die Höhe des Fluchtkogels scheint in den AV-Karten der Höhe der Eiskappe zu entsprechen. In der Karte Gepatschferner 1971 dagegen handelt es sich um einen trigonometrischen Punkt des Geländes, was die dortige Abweichung erklärt. Offensichtlich wurde dieser Umstand bei den AV-Karten nicht berücksichtigt da der Fluchtkogel in der AV-Karte Ausg. 2003 mit der gleichen Höhe angegeben ist, wie in der AV-Karte Ausg. 1951. Die Eiskappe ist in diesem Zeitraum aber stark zurückgegangen. Die trigonometrischen Punkte, welche sich im Bereich des Gepatschfeners befinden, können aus Tab. 4.2.1 entnommen werden.

Name	Rechtswert	Hochwert	Höhe (in m)
Großer Rauher Kopf	32195,73	191864,17	2986,32
Zahn	29950,82	190284,82	3374,99
Fluchtkogel	35025,68	191110,19	3493,50
Hintere Hintereisspitze	32894,25	187163,60	3484,50

Tab. 4.2.1: Trigonometrische Punkte im Bereich des Gepatschfeners.

Wenn möglich, sollten diese Punkte bei der Georeferenzierung mit einbezogen werden. Die ursprüngliche Datei mit den Festpunkten wurde noch um weitere Höhenpunkte aus der AV-Karte 30/2 Ausg. 2003 ergänzt. Vor allem bei der Georeferenzierung der AV-Karte 30/2 Ausg. 1951 haben sich diese Höhenpunkte als sehr nützlich erwiesen da diese Karte auf dem gleichen Geländemodell beruht.

##### **AV-Karte 30/2 Ausg. 2003 mit Gletscherbett nach MASSIMO:**

Zur Georeferenzierung wurde der unveränderte Datensatz aus der Diplomarbeit von KEUTTERLING (1998) herangezogen. Insgesamt kommen 7 Festpunkte bzw. trigonometrische Punkte zur Georeferenzierung in Frage, die folgend aufgelistet werden: die Rauhekopf Hütte, der Große Rauhe Kopf, der Zahn, die Weißseespitze, das Brandenburger Haus, die Zinne und die Hintere Hintereisspitze. Dabei erhöht die Anzahl der Festpunkte die Fehlerwahrscheinlichkeit, eine zu geringe Anzahl aber die Genauigkeit der Georeferenzierung. Es wurden Versuche mit 4, 5 und 7 Festpunkten unternommen. Die 4-Punkt Lösung aus Gr. Rauher Kopf, Zahn, Brandenburger Haus und Zinne ergab einen RMS-Fehler von 5.09901. Bei der 5-Punkt Methode wurde zu den 4 Punkten der 4-Punkt Methode noch die Rauhekopf Hütte hinzugenommen. Dies ergab einen RMS-Fehler von 11.83402. Bei der 7-Punkt Methode ergab sich ein RMS-Fehler von 16.30998. Die 4-Punkt Methode ergab den geringsten Fehlerwert. Dafür dürfte jedoch die Abweichung von der Realität am Größten sein. Bei der 7-Punkt Methode ergab sich der größte Fehler. Gerade bei den dicht beieinander liegenden Referenzpunkten ergaben sich hier größere Verzerrungen im Kartenbild. Am Ende entschied ich mich für die 5-Punkt Methode. Der RMS-Fehler liegt hier noch in einem akzeptablen Bereich und es treten in der Karte kaum Verzerrungen auf. Die RMS-Fehlerwerte im Einzelnen können aus Tab. A 4.2.1 entnommen werden.

Die Rauhekopf Hütte sollte unbedingt mit einbezogen werden, um größere Abweichungen bei der nördlich des Rauhen Kopfes verlaufenden Gletscherzunge zu vermeiden, in deren Region es keine weiteren Referenzpunkte gibt. Interessant sind die großen Fehler bei relativ nahe beieinander liegenden Punkten.

Beim Vergleich der 1971er und der 1997er Karte ergab sich im Kartenbild eine sichtbare Lageabweichung der Weißseespitze. Wie schon weiter oben erwähnt, liegt dies vermutlich an der Tätigkeit des Gletschers. So sollte die Weißseespitze nicht zur Georeferenzierung herangezogen werden.

##### **Karten der Zungenlagen:**

Die Karten, welche in den österreichischen Gauß-Krüger Koordinaten vorlagen, ließen sich über die Koordinatenkreuze georeferenzieren. Bei den Kartenabbildungen der Zungenstände wurden Kontrollpunkte an allen 4 Koordinatenkreuzen gesetzt. Da bei der Zungenkarte 1886/87 nur ein Koordinatenkreuz vorhanden war, mussten hier die Gradlinien verlängert werden um weitere Koordinatenkreuze zu schaffen. Beim Eintragen der Koordinatenwerte in die Tabelle muss zu dem Wert des Breitengrades 100000 addiert werden. Die RMS-Fehler waren dabei sehr gering.

##### **Karte Gepatschferner 1971:**

Die große Karte des Gepatschferners 1971 erforderte eine andere Herangehensweise. Da diese Karte aus 11 Einzelteilen zusammengeschnitten werden musste, kann es zu leichten Verschiebungen oder Verdrehungen der Einzelteile gekommen sein. So entschied ich mich, nur die Koordinatenkreuze mit den geringsten RMS Fehlern zur Georeferenzierung heranzuziehen. Auf den Kartenabbildungen waren insgesamt 36 Koordinatenkreuze vorhanden. Zunächst wurden alle Koordinatenkreuze zur Georeferenzierung herangezogen. Dies ergab RMS-Fehler von 0.xxx bis etwa 3.5 bei den einzelnen Koordinatenkreuzen. Durch Weglassen der Punkte mit den höchsten RMS-Fehlern wurde die Genauigkeit Schritt für Schritt erhöht. Zur endgültigen Georeferenzierung wurden schließlich 17 Koordinatenpunkte ausgewählt, welche in allen Regionen der Karte verteilt sind. Diese hatten RMS-Fehler von 0.3xxx bis weniger als 2.0. Dies ergab einen gesamt RMS-Fehler von nur ca. 1.18. Die verwendeten Koordinaten und die entsprechenden RMS-Fehler dieser Punkte bei den einzelnen Georeferenzierungen können aus Tabelle A 4.2.2 entnommen werden.

Die mit den beschriebenen Vorgehensweisen georeferenzierten Kartenblätter wurden zur Kontrolle mit den bereits georeferenziert vorliegenden Daten (Festpunkte 1971) überprüft. Es ergab sich eine relativ genaue Übereinstimmung, so dass diese Karten zur weiteren Bearbeitung verwendet werden konnten. Später wurde die Karte Gepatschferner 1971 zur Kontrolle ein weiteres Mal georeferenziert, dieses Mal aber anhand von Festpunkten. Ein Vergleich mit den bereits abgeleiteten Höhenlinien und der Gletschergrenze ergab praktisch keine Abweichung. Dies belegt die Tauglichkeit der Georeferenzierung anhand von Festpunkten.

##### **Karte Gepatschferner 1922/23:**

Bei der Georeferenzierung der später aufgenommenen Kartenblätter gingen die zuvor gemachten Erfahrungen mit ein. Da die Koordinatenkreuze der Karte mit dem Gletscherstand 1922/23 nicht den österreichischen Gauß-Krüger Koordinaten entsprachen, wurde auch diese Karte anhand von Festpunkten und trigonometrischen Punkten georeferenziert. Eine Verwendung der bereits vorhandenen Gletscherzungengrenze von 1922 wurde wegen zu großen Ungenauigkeiten verworfen. Die verwendeten Bezugspunkte und deren RMS-Fehler sind in Tab. A 4.2.3 wiedergegeben. Der gesamt RMS-Fehler liegt insgesamt niedriger als bei der Georeferenzierung der AV-Karte Ausg. 2003. Man kann daher von einer großen Genauigkeit der Georeferenzierung ausgehen.

##### **AV-Karte Gepatschferner 1893:**

Schwieriger stellte sich die Georeferenzierung der AV-Karte Ausg. 1893 dar. Da auch auf dieser Karte keine Koordinatenkreuze aufgedruckt waren, musste diese anhand von Festpunkten und trigonometrischen Punkten georeferenziert werden. Aufgrund des Alters der Karte und der nicht mit heutigen Aufnahmen vergleichbaren Genauigkeit finden sich viele Bereiche mit fehlerhafter Geometrie. So wurde versucht möglichst viele Referenzpunkte mit einzubeziehen. Die Koordinaten der verwendeten Punkte und die dazugehörigen RMS-Fehler sind in Tab. A 4.2.4 aufgelistet. Deutlich fallen drei Punkte mit RMS-Fehlern von über 100 Auf. Diese Punkte befinden sich in Bereichen mit fehlerhafter Geometrie und dienen in erster Linie dazu, diese Bereiche in eine realistischere Form zu ziehen. Die bei den anderen Georeferenzierungen angewandte Methode Polynom 1sten Grades brachte hier kein vernünftiges Ergebnis. So wurde das Polynom 2ten Grades angewandt. Mit dieser Methode lassen sich Bereiche mit fehlerhafter Geometrie in Form bringen. Für die Ausrichtung wurde die Gletschergrenze von 1922 mit herangezogen, da diese von der Form her am ehesten vergleichbar ist.

##### **AV-Karte 30/2 Ausg. 1951:**

Auch die AV-Karte 30/2 Ausg. 1951 wurde anhand von Festpunkten und trigonometrischen Punkten georeferenziert. Da diese auf dem gleichen Geländemodell basiert wie die AV-Karte 30/2 Ausg. 2003 wurden möglichst viele Punkte zur Georeferenzierung herangezogen. Dadurch konnte ein gesamt RMS-Fehler von

unter 8 erreicht werden. Die Koordinaten der verwendeten Höhenpunkte und deren RMS-Fehler sind aus Tab. A 4.2.5 ersichtlich.

### **Karten des BEV:**

Die Karten Ausg. 1872, 1976 und 2004 des BEV lagen als Scans in bereits georeferenzierter Form vor. Leider waren diese aber entgegen der Bestellung in UTM Koordinaten georeferenziert. Aus diesem Grund mussten die Karten von mir neu georeferenziert werden. Die Karte der 3. LA Ausg. 1872 weist nahezu die gleichen Geometriefehler auf wie die AV-Karte Ausg. 1893. Vermutlich basiert auch die Militärgeographische Karte, auf welcher die AV-Karte Ausg. 1893 basiert, auf der 3. LA. Mit den üblichen Methoden war hier wenig zu erreichen. Bei der Georeferenzierung wurde daher die Interpolationsmethode *Spline* angewandt. Die RMS-Fehler bei dieser Methode liegen generell bei 0. Das Kartenblatt wird bei dieser Methode allerdings stark gestreckt bzw. gestaucht.

Die Karten Ausg. 1976 und 2004 wurde nach der herkömmlichen Methode anhand von Festpunkten und trigonometrischen Punkten georeferenziert. Die verwendeten Punkte und deren RMS-Fehler können aus Tab. A 4.2.6 und A 4.2.7 entnommen werden.

### **4.2.4 Vektorisierung**

#### **Grundsätzliches zum Arbeiten mit ArcScan:**

Um die in den nun georeferenzierten Kartenabbildungen enthaltenen Informationen in ArcGIS verwenden und weiter bearbeiten zu können, müssen diese von einfachen Rasterinformationen einer Bilddatei zu Vektordaten umgewandelt werden, in denen auch qualitative Informationen gespeichert werden können.

Sämtliche Informationen könnten z. B. per Hand digitalisiert werden. Die von ESRI angebotene Erweiterung ArcScan bietet aber die Möglichkeit, linien- und punktförmige Strukturen auf Raster-Bilddateien zu erkennen und größtenteils automatisiert in Vektordaten umzuwandeln. Voraussetzung dafür ist, dass sich auf der Bilddatei nur die benötigten Strukturen befinden. Eine Reduzierung der Bilddatei auf nur 2 Farbtöne hat sich als unnötig erwiesen, da sich der gleiche Effekt durch

eine Reklassifizierung unter ArcGIS erreichen lässt. Allerdings kann Arc-Scan nur zweierlei Informationen erkennen: Struktur (Linie, Punkt) und keine Struktur.

Je gründlicher die Bilddateien bearbeitet werden, umso weniger Nacharbeit ist notwendig. In der Regel ist es aber trotzdem notwendig die Bilddatei während des Arbeitens mit ArcScan nachzubearbeiten, um unnötige Fehler zu vermeiden. Prinzipiell erkennt ArcScan verschiedene Bild-Rasterdatei Formate. Es zeigte sich jedoch, dass bei Dateien im JPG-Format, das zur Nacharbeit zwingend erforderliche *Raster Cleanup* Werkzeug nicht funktionierte. Aus diesem Grund wurden die Bilddateien im TIFF-Format abgespeichert. Sehr hilfreich erwies sich die Vorschau-Funktion. Diese simuliert die *Raster to Feature* Operation. Fehler lassen sich so leichter erkennen und beseitigen.

Vor dem Einsatz von ArcScan müssen Shape-Dateien, in welche die aus den Rasterdateien gewonnenen Informationen geschrieben werden sollen, erstellt werden. Den Shape-Dateien müssen einige sehr wichtige Informationen zugewiesen werden. Generell sollte man einen zutreffenden Name wählen, welcher das Wiedererkennen der Dateien erleichtert. Auch muss festgelegt werden, ob die Shape-Datei Linien (*Polyline*), Punkte (*Point*) oder Flächen (*Polygone*) enthalten soll. Für eine spätere dreidimensionale Darstellung von Daten mit Höheninformationen muss ebenso die Option *Coordinates will contain Z value* ausgewählt werden. Als Koordinatensystem wird *Austria Ferro West Zone* zugewiesen.

#### **Vektorisieren mit ArcScan:**

Zum extrahieren der gewünschten Informationen (*Polyline, Polygon, Point*) mit ArcScan muss zunächst die zu bearbeitende, georeferenzierte Bilddatei eingeladen und manuell in 2 Klassen (z.B. 0-150 und 150-255) reklassifiziert werden. Durch variieren der Bandbreite der Klassen, lassen sich ungewünschte Pixel auf der Bilddatei eventuell beseitigen.

Aber Vorsicht: Manche Höhenlinien können in helleren Farben gedruckt sein als andere und ebenfalls verschwinden! Anschließend muss die Shape-Datei eingeladen werden, in die die zu erstellenden Informationen geschrieben werden sollen. Als etwas problematisch hat sich die Tatsache erwiesen, dass das manuell eingepasste Gletscherbett sehr breite Höhenlinien aufweist. In den *Vectorization Settings* des Arc-Scan Moduls kann durch Variation der Einstellungen die Fehlerzahl minimiert

#### 4. Erstellung digitaler Geländemodelle aus topographischen Karteninformationen

---

werden, ohne die Bilddatei mit dem *Raster Cleanup* Werkzeug bearbeiten zu müssen. Als brauchbar haben sich folgende Einstellungen erwiesen:

Intersection Solution	None
Maximum Line Width	20-30
Noise Level	65-80
Compression Tolerance	0,15-0,25
Smoothing Weight	1-4
Gap Closure Tolerance	5-20
Fan Angle	90-180
Hole Size	3-10
Resolve Corners / Maximun Angle	55

Je nach den Eigenschaften der zu bearbeitenden Bilddatei können die Werte variiert werden, um ideale Einstellungen zu finden. Die meisten Fehlerquellen können mit den angegebenen Einstellungen beseitigt werden. Die Breite der Linien (*Maximum Line Width*) kann bei Karten mit einheitlich dünnen Linien entsprechend kleiner gewählt werden.

Nicht hundertprozentig gesäuberte Bereiche des Hintergrundes können nach der Klassifizierung in zwei Klassen plötzlich schwarze Bildpunkte enthalten. Befinden sich diese nahe an Höhenlinien, können diese die von ArcScan interpolierten Höhenlinien ablenken oder gar unterbrechen. Auch kleine Löcher in den Höhenlinien können eine Unterbrechung zur Folge haben. Mit den Einstellungen unter Rauschen (*Noise Level*) und Lochgröße (*Hole Size*) können diese Probleme minimiert werden.

Gestrichelte Linien können automatisch verbunden werden. Dazu muss die Option Unterbrechungen schließen (*Gap Closure Tolerance*) aktiviert werden.

Unter Fächerwinkel (*Fan Angel*) kann der Winkel eingestellt werden, unter der eine Verbindung gesucht werden soll. Aber wieder Vorsicht vor kleinen Pixelresten zwischen den gestrichelten Linien. Diese können eine Verbindung behindern oder sogar die ganze Vektorlinie ablenken.

Unter Abrundung (*Smoothing Weight*) kann eingestellt werden, ob die abgeleiteten Höhenlinien eher spitze oder abgerundete Ecken aufweisen sollen.

Die Option Schnittpunkt (*Intersektion Solution*) muss deaktiviert werden, da sich Höhenlinien weder kreuzen noch ineinander übergehen dürfen.

Die Kompression (*Compression Tolerance*) beeinflusst, wie viele Wegmarkierungen (*Vertexes*) eine Vektorlinie enthält. Bei kurvigen Höhenlinien sollte dieser Wert nicht zu hoch eingestellt werden, da das Ergebnis sonst zu eckig wird. Nach der Veränderung von Einstellungen, sollte unbedingt eine Vorschau angezeigt werden, um die Auswirkungen der veränderten Einstellungen zu überprüfen.

Trotz der Vielzahl der möglichen Einstellungen ist bei größeren Dateien in der Regel eine Nacharbeit der Bilddatei mit dem *Raster Cleanup* Werkzeug unabdingbar. Fehler werden zwar meist angezeigt, man sollte aber trotzdem die Datei bei entsprechender Vergrößerung systematisch nach Fehlern absuchen. Gerade bei größeren Bilddateien ist regelmäßiges zwischenspeichern notwendig, da ArcGIS gerade bei solchen Operationen zum Abstürzen neigt!

Sind alle Fehler beseitigt, können die Rasterdaten in Vektordaten umgewandelt werden. Die so neu erstellten Shape-Dateien sollten noch einmal nach möglichen Fehlern untersucht werden. Sollten noch Fehler enthalten sein, können die vorhergehenden Schritte ein weiteres Mal durchgegangen werden. Die Vektordaten lassen sich aber auch nachträglich bearbeiten.

#### **Manuelles Vektorisieren mit ArcScan:**

Bei der Vektorisierung der zuletzt bearbeiteten Karten verwendete ich das *Trace Between Points* Werkzeug (siehe dazu auch: Nachträgliches Anfügen fehlender Bereiche). Mit diesem Werkzeug können sowohl Höhenlinien als auch Gletschergrenzen und Polygone aus einer Bilddatei abgeleitet werden. Man erspart sich so die Bearbeitung und Erstellung verschiedener Bilddateien. Auch muss so nur eine Bilddatei georeferenziert werden. Da jede Höhenlinie einzeln erstellt wird, können Problemstellen einfach überbrückt werden, so dass aufwändige Nacharbeiten entfallen.

Bei der AV-Karte Ausg. 1893 zog ich lediglich die Gletschergrenze farbig nach. Da die meisten Signaturen in recht hellen Farben gedruckt waren, wurde eine andere Herangehensweise möglich. So erscheinen die blauen Höhenlinien des Gletschers und der in blau nachgezogene Gletscherrand in schwarzweiß sehr dunkel, wohingegen die in braun gehaltenen Signaturen des Fels und des Geländes recht hell erscheinen. Diese hellen Grautöne lassen sich nun einfach herausklassifizieren, so dass nur noch die dunklen Höhenlinien des Gletschers, der Gletscherrand und die Beschriftungen übrig bleiben. Mit dem *Trace Between Points* Werkzeug können die



Gletscherhöhenlinien und die Gletschergrenze zügig abgeleitet werden. Wenn auch der Arbeitsaufwand des manuellen Vektorisierens etwas größer ist als bei der automatisierten Vektorisierung, erbrachte diese Methode wegen der geringeren notwendigen Nacharbeiten dennoch eine Zeitersparnis.

##### **Nachbearbeitung der Shape-Dateien:**

Sind alle Shape-Dateien erstellt, müssen den Höhenlinien die entsprechenden Höhen in Meter zugewiesen werden. Diese müssen in der Attributtabelle für jede Höhenlinie manuell eingetragen werden.

Zur Kontrolle des Ergebnisses wurden aus den so bearbeiteten Shape-Dateien versuchsweise dreidimensionale Geländemodelle in Form von TIN's erstellt. Unter ArcScene lassen sich diese TIN Modelle dreidimensional darstellen. Sollten Höhenlinien bei der Zuweisung von Höhen übersehen worden sein, kann dies an unnormalen Geländeformen erkannt werden. Auch stellte sich heraus, dass das Gletscherbett in einigen Bereichen aus der Gletscherfläche herauschaute, wo dies nicht der Fall sein sollte. Dies machte eine weitere Korrektur der Shape-Dateien notwendig.

Am einfachsten lädt man die zu bearbeitenden Shape-Dateien des Geländes mit dem Gletscherbett, der Gletscherhöhenlinien (1997) und der Gletschergrenze (1997) und legt diese übereinander. So können die Höhenwerte der einzelnen Höhenlinien kontrolliert werden. Bei genauerer Begutachtung stellte ich fest, dass in vielen Bereichen, welche ich per Hand interpolieren musste, das Gelände etwas zu hoch angesetzt war. Im Prinzip war die Interpolation per Hand durchaus stimmig. Nur in einigen Bereichen mussten die Höhenlinien etwas verschoben werden, um nicht aus dem Gletscher herauszuschauen. Diese Korrekturen können mit Hilfe des Editors durchgeführt werden. Auch Fehler in den Shape-Dateien der Gletscherhöhenlinien und der Gletschergrenze können in diesem Arbeitsschritt korrigiert werden. Nach Beendigung der Korrekturen wurden zur Kontrolle neue TIN's erstellt. Die Grenze des Gletschers kam nun besser zur Geltung und es schauten auch keine ungewollten Bereiche des Gletscherbetts mehr aus der Gletscherfläche heraus.

Die Shape-Dateien der anderen Gletscherstände erforderten nur minimale nacharbeiten. Bei der automatischen Vektorisierung neigen die Enden von Linien zum Hakenschlagen, welche manuell beseitigt wurden. Größere Korrekturen erforderten die aus der AV-Karte Ausg. 1893 abgeleiteten Daten. Zwar konnten

#### 4. Erstellung digitaler Geländemodelle aus topographischen Karteninformationen

---

einige Bereiche mit fehlerhafter Geometrie durch die Georeferenzierung deutlich verbessert werden, manche Abweichungen waren jedoch so stark, dass sie manuell bearbeitet werden mussten (siehe Abb. 4.2.3).

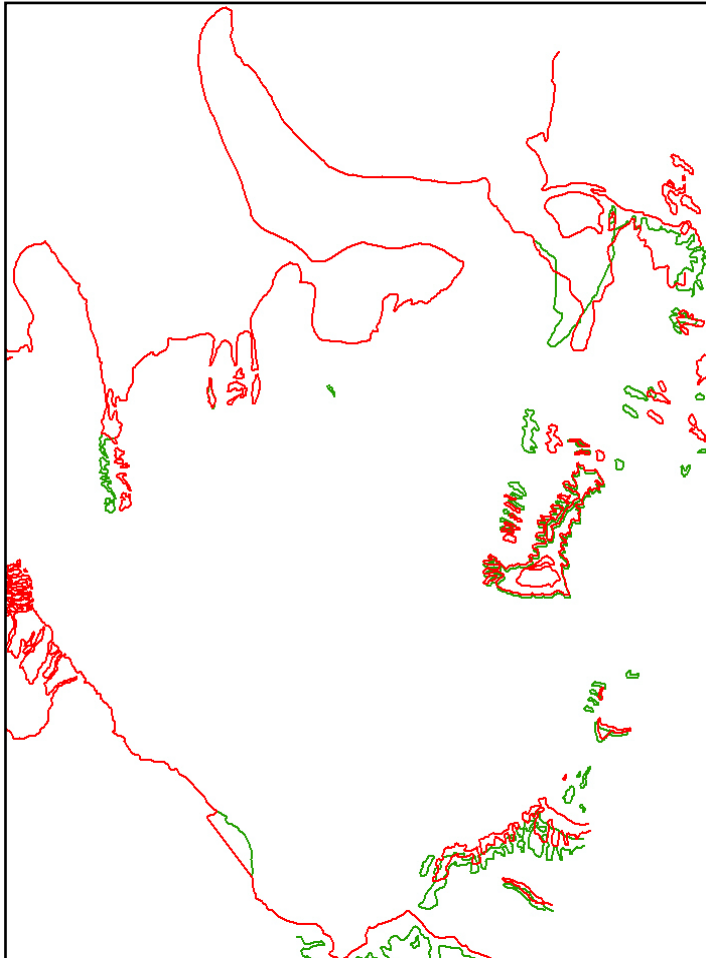


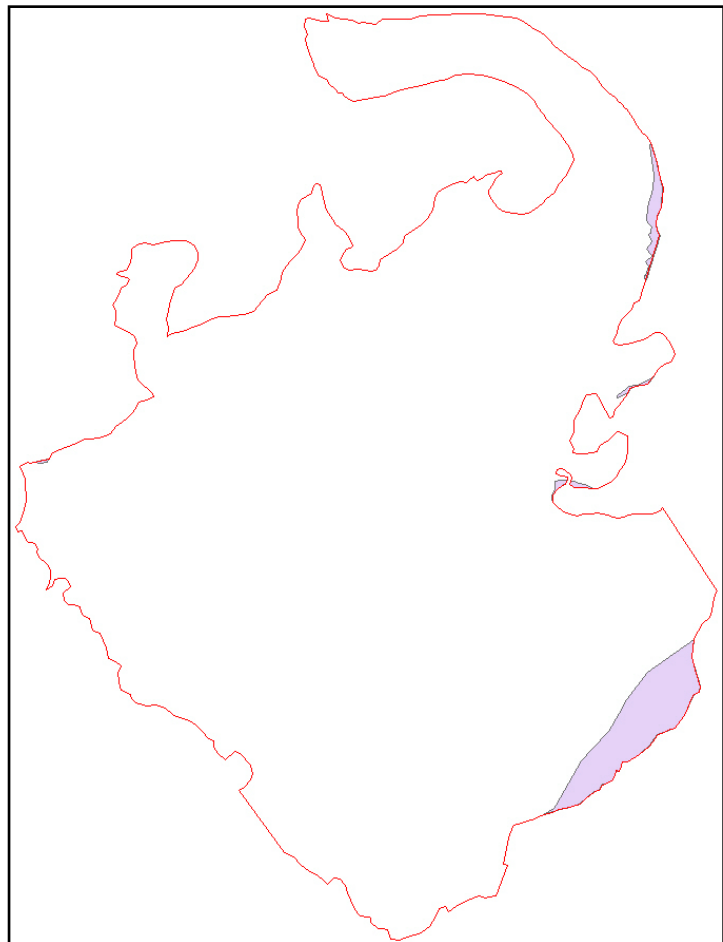
Abb. 4.2.3: Veränderte Bereiche der Daten Gepatschferner 1890. Die ursprüngliche Gletschergrenze ist in Grün gehalten, die veränderte Grenze dagegen in Rot (Abb. ohne Maßstab).

Der überwiegende Teil der Gletschergrenze war durchaus stimmig, nur einige Randbereiche mussten überarbeitet werden. Vor allem der Bereich um den Seitengletscher erforderte etwas Nacharbeit. Dieser Bereich ist auf photogrammetrischen Aufnahmen wohl nur schwer einsehbar, so dass sich aus diesem Umstand die Abweichungen erklären lassen. Die Form des oberen Bereiches des Seitengletschers mit seinen typischen Felsvorsprüngen war durchaus adäquat. Nur musste dieser Bereich etwas eingedrückt werden. Die Schwarze Wand zwischen dem Seitengletscher und der Hauptzunge musste etwas nach Osten gerückt werden. Auch der Grat zwischen Zahn und Nörderberg wurde etwas nach Osten verschoben. Die anderen Bereiche mussten nur minimal korrigiert werden. Einzelne Felsbereiche wiesen ebenfalls Lagefehler auf und wurden komplett herausgelöscht. Diese

Bereiche fallen später aus der Berechnung heraus, sofern sie tatsächlich mit dem Gletscherbett kollidieren. Die veränderten Bereiche lassen sich aus Abb. 4.2.3 ersehen.

Auch die aus der Diplomarbeit von A. KEUTTERLING (1998) bereits digital vorliegenden Dateien mussten nachträglich überarbeitet werden. So wurde die Datei mit den Festpunkten von mir durch weitere Gipfelpunkte aus der AV-Karte 30/2 ergänzt. Des Weiteren mussten die Höhenlinien des Gepatschferners 1990 um fehlende Bereiche ergänzt werden, die bei den DHM's interessanterweise vorhanden waren. Ebenso mussten fehlende Bereiche per Hand interpoliert werden, um den Gletscherstand von 1990 mit den anderen Gletscherständen vergleichen zu können. Die per Hand interpolierten Flächen sind aus Abb. 4.2.4 ersichtlich.

Abb. 4.2.4: Per Hand interpolierte Bereiche des Gletscherstandes von 1990 mit der angepassten Gletschergrenze (Abb. ohne Maßstab).



Auch das Flächenpolygon und die Gletschergrenze mussten dementsprechend angepasst werden. Anschließend wurden die DHM's neu erstellt. Die vorherige Entstehung dieser Daten lies sich aber nicht mehr rekonstruieren.

##### **Erstellung von Polygonen:**

Für die Erstellung der digitalen Höhenmodelle ist es notwendig, Flächenpolygone vom Gelände und den verschiedenen Gletscher- und Zungenstände zu erstellen. Die einfache Form des Flächenpolygons des Geländes konnte per Hand erstellt werden. Bei den Polygonen der Gletscherstände war eine aufwändigere Methode notwendig, die im Folgenden erläutert wird.

Unter ArcInfo gibt es mehrere Möglichkeiten aus Vektorlinien Polygone zu erstellen. Da mir leider keine ArcInfo Lizenz zur Verfügung stand, musste ein Umweg gegangen werden. Als Grundlage wählte ich die georeferenzierten Bilddateien mit den Gletschergrenzen. Erste Versuche dies relativ automatisiert mit dem *Vectorization Trace* Werkzeug durchzuführen, führten nicht zu den gewünschten Ergebnissen. Gerade bei den Gletscherständen, bei denen das Hauptpolygon zahlreiche Löcher aufweist, funktionierte dies nicht wie gewünscht. Als besser geeignet erwies sich das *Vectorization Trace Between Points* Werkzeug. Hierbei wird die Richtung der Vektorisierung manuell vorgegeben. Dies dauert zwar etwas länger, Problemstellen können aber leichter überbrückt werden. Selbst eine so komplizierte Form wie die Form eines Gletschers kann mit diesen Werkzeugen noch innerhalb von Minuten erstellt werden. Bei Polygonen mit Löchern (in der ESRI Hilfe interessanterweise als *Donat Hole* bezeichnet), sollte ein Multi Part Polygon aus mehreren Einzelteilen erstellt werden. Wurden Löcher vergessen, können diese auch nachträglich herausgeschnitten werden. Da diese Polygone aus zu vielen *Vertexes* besteht, sollte die Form anschließend mit der Option *Generalize* vereinfacht werden. Wer es sehr genau haben möchte, kann später noch die Form des Polygons manuell an den Gletscherrand angleichen.

##### **Nachträgliches Anfügen fehlender Bereiche:**

Im Laufe der Arbeit entschloss ich mich, den nordöstlichen Seitengletscher des Gepatschferners doch in die Untersuchung mit einzubeziehen. Dieser Bereich war jedoch in den Datensätzen des Geländes und des Gletscherstandes von 1971 noch nicht vorhanden. Dieser Umstand machte es notwendig, die fehlenden Bereiche nachträglich anzufügen. Auch bei dieser Anwendung hat sich das *Trace Between Points* Werkzeug aufs Beste bewährt. Zunächst wurde der fehlende Kartenbereich des 1971er Gletscherstandes eingescannt. Beim Gelände war dies nicht notwendig, da der fehlende Bereich in der bereits georeferenzierten Kartengrundlage vorhanden

war. Dieser war lediglich noch nicht bearbeitet worden. So musste nur der neu gescannte Bereich der 1971er Karte georeferenziert werden. Am schnellsten ging dies über typische Geländeformen. Da es sich nur um einen kleineren Bereich handelt, führte ich nur eine grobe Nachbearbeitung der Bilddatei durch. Über diese Grundlagen wurden die bereits vorhandenen und zu ändernden Vektordatensätze gelegt. Die fehlenden Bereiche der Höhenlinien konnten einfach angefügt werden oder, wie in meinem Fall, unvollständige Höhenlinien wurden aus dem bestehenden Datensatz herausgelöscht und durch neue ersetzt. Dies war möglich geworden, da die meisten gelöschten Höhenlinien wegen der Geländeform sehr kurz waren. Mit dem *Trace Between Points* Werkzeug konnten die fehlenden Höhenlinien schnell erstellt werden. Bei Unterbrechungen in den Höhenlinien, oder querenden Strukturen, kann zum *Create New Feature* Werkzeug des Editors umgeschaltet werden um diese zu überbrücken. Anschließend kann mit dem *Trace Between Points* Werkzeug fortgefahren werden. Die fehlenden Höhenlinien konnten auf diese Weise zügig erstellt werden.



## 4.3 Erstellung digitaler Geländemodelle

### 4.3.1 Erstellung von TIN Geländemodellen

Um aus den Shape-Dateien mit den Höhenlinien des Geländes und der Gletscherstände TIN's erstellen zu können, waren noch weitere Zwischenschritte notwendig. Diese rühren hauptsächlich daher, dass z. B. bei den Gletscherständen die Interpolationsverfahren nach dem Verlassen des von den Höhenlinien abgedeckten Gletscherbereiches ins Leere hinein interpolieren müssen. Wegen diesem Umstand kann kein vernünftiger Gletscherrand interpoliert werden.

Beim Gelände stellen diese Interpolationsfehler kein Problem dar. Das Gelände kann mit einem Flächenpolygon ausgeschnitten werden, da die Randbereiche ohnehin nicht in die Volumenberechnungen mit eingehen.

Um einen vernünftigen Übergang vom Gletscher zum Gelände interpolieren zu können, wird eine Unterbrechungslinie (*Breakline*) benötigt. Diese *Breakline* erbringt aber nur bei Flächen mit durchgehenden Höheninformationen den gewünschten Effekt. Aus diesem Grund müssen Shape-Dateien mit den Höhenlinien des Geländes erstellt werden, aus denen der jeweilige Gletscherbereich, also das jeweilige Gletscherbett, herausgeschnitten wurde. In diesen ausgeschnittenen Bereich können anschließend die Höhenlinien des entsprechenden Gletscherstandes hineinkopiert werden. Bei der Erstellung der TIN's kann dann der Gletscherrand als *Breakline* (in ArcGIS *hard line*) mit einbezogen werden.

Das Ausschneiden der jeweiligen Gletscherfläche führte ich auf Anraten von Herrn Dr. THOMAS mit dem *Trim Tool* des Editors durch. Mit diesem können Bereiche einer Vektorlinie, welche sich zwischen Begrenzungslinien (z. B. Gletschergrenze) befinden, herausgelöscht werden. Dieses Werkzeug stößt aber an seine Grenzen, sobald die zu bearbeitende Vektorlinie mehr als 2-4 Mal die Begrenzungslinie schneidet. Dann kann es zu dem unerwünschten Effekt kommen, dass zu viele Bereiche der Vektorlinie gelöscht werden. Gerade bei der komplizierten Form eines Gletschers ist dies leider sehr häufig der Fall. Abhilfe schafft das *Split Tool*. Mit diesem können Vektorlinien zerschnitten werden, so dass diese nicht mehr so oft den Rand schneiden. In den Bereichen mit vielen sehr kleinen Seitenverästelungen des Gletschers, hat es sich als vorteilhafter erwiesen, die zu löschenden Bereiche des Gletscheruntergrundes manuell mit dem *Split Tool* herauszuschneiden. Dies

geht schneller als immer wieder die fehlerhaften Operationen des *Trim Tool's* rückgängig machen zu müssen. Bei den einfachen Formen der Zungenstände hat sich das *Trim Tool* aber als brauchbar erwiesen.

Ein weiterer Nachteil ist, dass das *Trim Tool* die Vektorlinien nicht in mehrere Teile zerlegt, sondern nur einen Bereich herauslöscht. Aus Gründen der Arbeitersparnis habe ich die Shape-Dateien mit den Gletscherausschnitten für alle Gletscherstände aus der veränderten 1997er Shape-Datei erstellt. Für die meist in der Ausdehnung größeren älteren Gletscherstände mussten in den Randbereichen viele kleine Bruchstücke von Höhenlinien entfernt werden. Wurden diese mit dem *Trim Tool* bearbeitet, konnten diese nicht ohne Weiteres gelöscht werden, da die gesamte Höhenlinie noch zusammenhängend war und gelöscht würde. Die Vektorlinie kann nur nachträglich aufgeteilt, oder die Knotenpunkte (*Vertex*) des Bruchstücks manuell gelöscht werden. Wird eine Grunddatei für mehrere Abwandlungen verwendet, kann es sinnvoll sein, von Anfang an auf das *Trim Tool* zu verzichten.

Leider fand ich erst bei der Bearbeitung des zweiten Kartensatzes eine deutlich vereinfachte Methode um die Fläche des jeweiligen Gletscherstandes aus den Höhenlinien des Geländes herauszuschneiden. ArcGIS bietet die Möglichkeit, Höhenlinien anhand der Fläche eines Polygons auszuschneiden. Dies funktioniert aber nur bei Vektoren, welche sich innerhalb eines Polygons befinden. Leider werden in diesem Fall die Höhenlinien außerhalb des Gletscherflächenpolygons benötigt. Polygone lassen sich aber nicht einfach in eine Negativform umwandeln. So muss ein kleiner Umweg gegangen werden. Wie bereits unter Punkt 4.2.4 beschrieben, lassen sich in Polygone nachträglich Löcher schneiden. So wurde ein großes rechteckiges Polygon erstellt, welches die ganze Fläche des benötigten Gebietes abdeckt. Die bereits vorhandenen Polygone der Gletscherfläche konnten nun als Vorlage zum Ausschneiden hinzugezogen werden. Das Ausschneiden erfolgte mit Hilfe der *Clip* Funktion des Editors.

Nachdem alle benötigten Komponenten vorhanden waren, konnten die TIN Modelle mit Hilfe des 3D-Analyst erstellt werden. Dazu mussten die benötigten Shape-Dateien und die richtigen Optionen ausgewählt werden. Grundsätzlich wurden zuerst TIN's der vollständigen Gletscherflächen mit dem umliegenden Gelände erstellt, aus denen dann die benötigten TIN's abgeleitet wurden. Die erstellten TIN's sind Tab. A 4.3.1 zu entnehmen. Die TIN Modelle des Geländes konnten in diesem Arbeitsschritt bereits fertig gestellt werden.



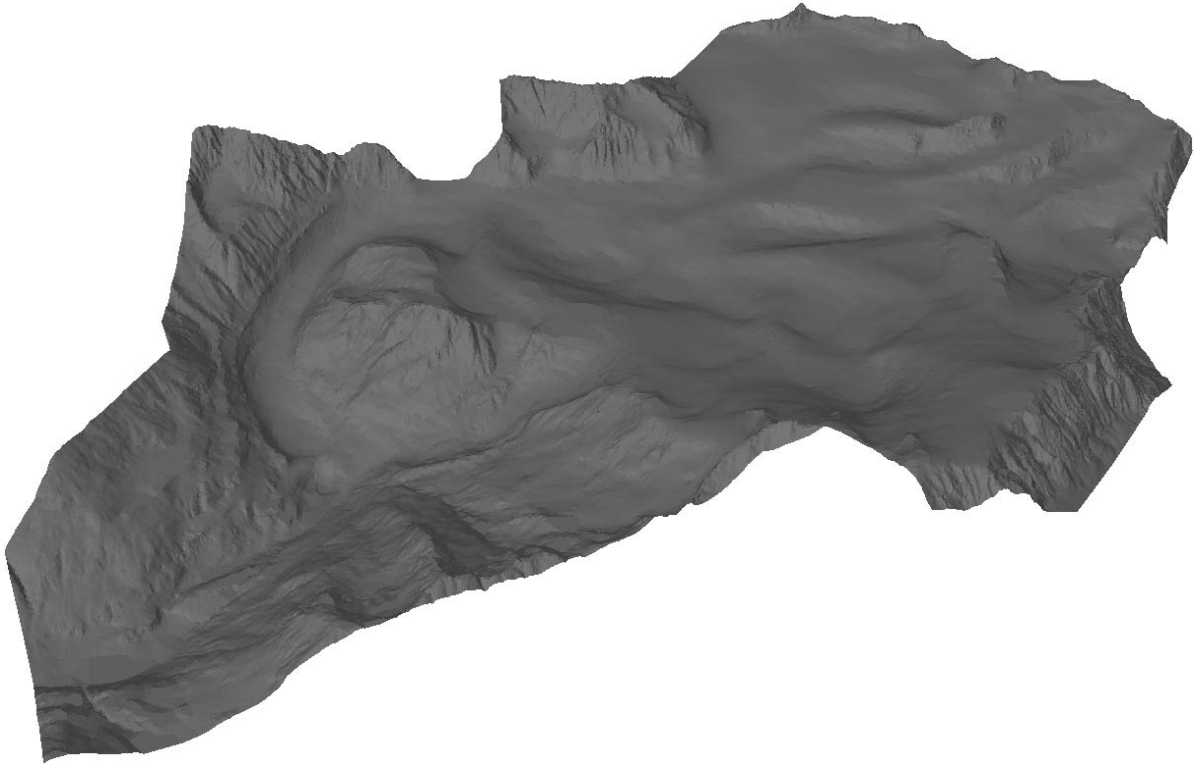


Abb. 4.3.1: TIN des Geländes mit Gletscherbett. (Erstellt aus AV-Karte 30/2 und Karte des Gletscherbetts nach MASSIMO, Abb. ohne Maßstab, Blickrichtung aus NW).

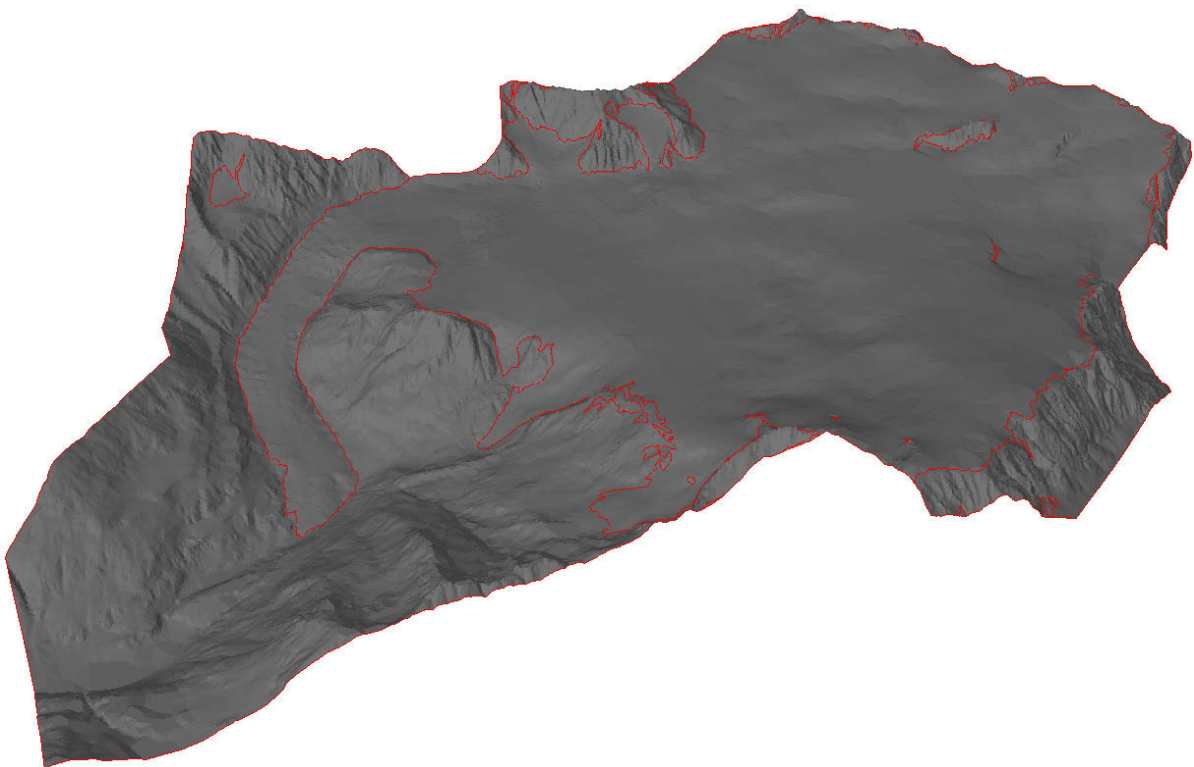


Abb. 4.3.2: TIN des Geländes mit dem Gletscherstand von 1997. Die Gletschergrenze ist in rot abgesetzt. (Erstellt aus AV-Karte 30/2 Ausg. 2003, Abb. ohne Maßstab, Blickrichtung aus NW).

#### 4. Erstellung digitaler Geländemodelle aus topographischen Karteninformationen

---

Abb. 4.3.1 zeigt das TIN des Geländes (ohne Bereich des Seitengletschers) mit dem Gletscherbett. Die Gletschermodelle werden zunächst noch zusammen mit dem umliegenden Gelände und dem Seitengletscher erstellt. Nur die äußere Form des Untersuchungsgebiets, wie auch beim Gelände, kann bereits ausgeschnitten werden. Aus diesen Gesamt-TIN's wurden anschließend die TIN's des Zungenbereichs, des Seitengletschers und des Gesamtgletschers ohne den Seitengletscher abgeleitet, welche später für die Erstellung der Raster DHM's verwendet wurden. Ein solches TIN mit dem Gesamtgletscher (ohne den Seitengletscher) und dem umliegenden Gelände ist in Abb. 4.3.2 abgebildet.

Die TIN's für die visuelle Darstellung der Gletscherstände wurden ebenfalls aus diesen Gesamt-Tin's abgeleitet. Dazu mussten die Gletscher- und Zungenstände mit den entsprechenden Clip-Polygone der Gletscher- und Zungenstände ausgeschnitten werden. Solch ein TIN mit dem Seitengletscher in der ausgeschnittenen Form (Gletscherstand 1997) ist in Abb. 4.3.3 abgebildet.

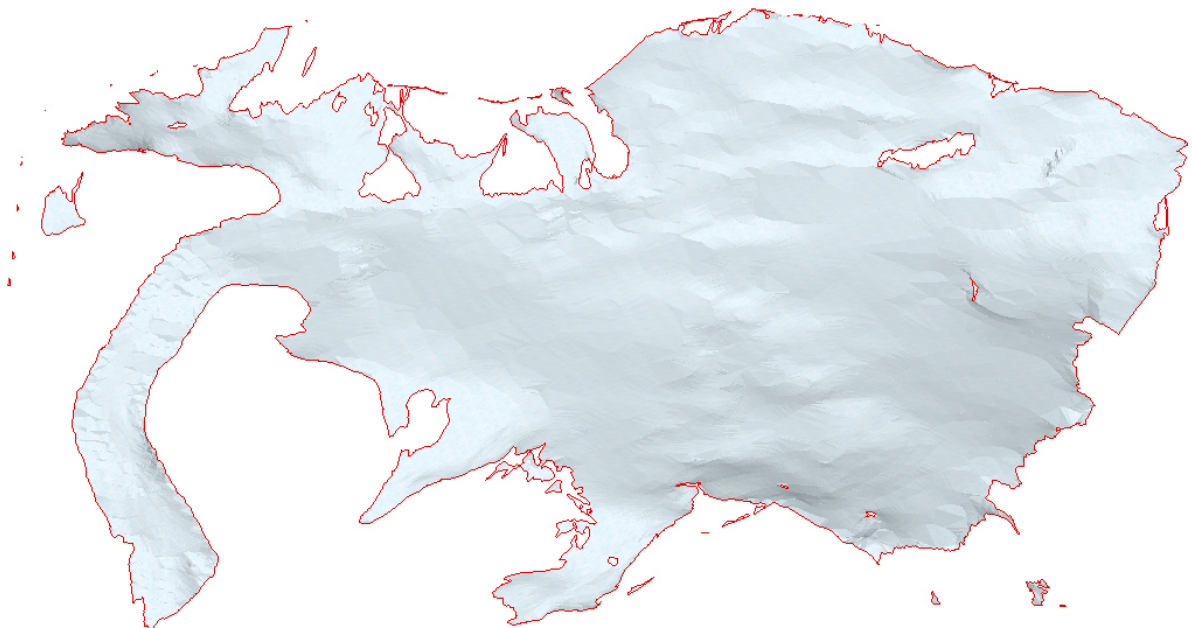


Abb. 4.3.3: TIN des Gepatschferners mit Seitengletscher Stand 1997 (Erstellt aus AV-Karte 30/2 Ausg. 2003, Abb. ohne Maßstab, Blickrichtung aus NW).

Auf jeden Fall sollten die so ausgeschnittenen TIN-Modelle als separate Dateien abgespeichert werden.

Weitere TIN Modelle wurden aus den Rasterdateien der Volumenberechnungen erstellt. Diese dienen der Visualisierung der Eisdicken der Gletscher- und

Zungenstände. Solch ein TIN der Eisdicke (Gletscherstand 1997) ist in Abb. 4.3.4 abgebildet.

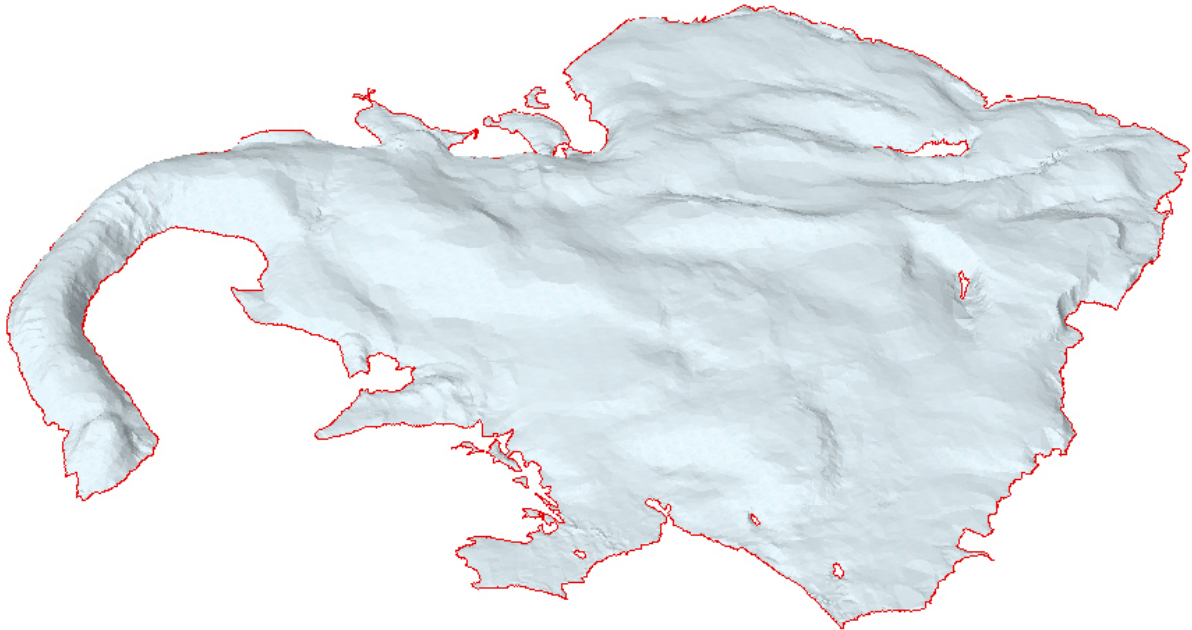


Abb. 4.3.4: TIN der Eisdicke des Gepatschfernners 1997 (Erstellt aus AV-Karte 30/2 Ausg. 2003, Abb. ohne Maßstab, Blickrichtung aus NW).

Generell ist bei der TIN Erstellung darauf zu achten, dass der in Form der Polygone ausgewählte Bereich etwas kleiner sein sollte als die Ausdehnung der Höhenlinien ist. So werden unschöne Ausfransungen an den Randbereichen vermieden. Auch konnten die Zungenstände nicht ohne Weiteres mit dem umliegenden Gelände des Gesamtgletschers erstellt werden, da am unteren Rand der Zungenbereiche die Höhenlinien des Gletschers direkt in die Höhenlinien des Gletscheruntergrundes übergehen würden. Hierbei würde eine unschöne, unregelmäßige Steilkante entstehen. Aus diesem Grund muss das Gelände mit den Ausschnitten der Zungenstände erst der Form der Zungenstände angepasst werden. Interessanterweise lies sich den TIN Modellen nicht das verwendete Koordinatensystem *Austria Ferro West Zone* zuweisen. Offensichtlich unterstützt ArcGIS dieses System nicht bei TIN Modellen.

#### 4.3.2 Erstellung von Raster (Grid) Geländemodellen

Die Rasterdatensätze wurden mit Hilfe des 3D-Analyst aus den TIN Modellen konvertiert. Als Z-Faktor sollte 1 gewählt werden, es sei denn, man möchte ein

überhöhtes Geländemodell erstellen. Bei der Rasterweite (*Cell Size*) hat sich eine Einstellung von 5 als brauchbar erwiesen. Bei kleineren Einstellungen wie z. B. 1 vergrößert sich der Speicherplatzbedarf der Datensätze ganz erheblich. Bei größeren Einstellungen ab etwa 10 nimmt der Treppenstufeneffekt in unschöner Weise zu. Wie schon erwähnt, sollten die Gletscher- bzw. Zungenstände mit dem umliegenden Gelände zu Rasterdatensätzen umgewandelt werden. Nur so wird eine bestmögliche Umsetzung der Gletscherränder erreicht. Nach der Umwandlung in Rasterdaten muss das umliegende Gelände mit den entsprechenden Clip Polygonen ausgeschnitten werden um mit den Rasterdaten die entsprechenden Berechnungen durchführen zu können. Solch eine ausgeschnittene Rasterdatei (Gletscherstand 1997) ist in Abb. 4.3.5 zu sehen.



Abb. 4.3.5: Grid (Rasterweite 5m) des Gepatschfernens 1997. Die Meereshöhe steigt von hellen zu dunklen Bereichen an (Erstellt aus AV-Karte 30/2 Ausg. 2003, Abb. ohne Maßstab, in N Richtung ausgereichtet).

Beim Ausschneiden ist darauf zu achten, dass Bereiche der benachbarten Gletscher, welche nicht in die Berechnung mit eingehen sollen, ebenfalls ausgeschnitten

#### 4. Erstellung digitaler Geländemodelle aus topographischen Karteninformationen

werden. Bei diesem Arbeitsschritt wird gleichzeitig die Projektion der Clip-Polygone für die Rasterdaten übernommen. Den Rasterdaten des Geländes muss eine Projektion manuell zugewiesen werden, da diese nicht mehr mit einem Clip-Polygon ausgeschnitten werden müssen. Dies muss über die Arc-Toolbox mit den Data Management Tools durchgeführt werden, da anderen Methoden bei Rasterdaten nicht funktionieren. In diesem Zusammenhang ist festzustellen, dass es in ArcGIS mehrere Methoden gibt, Daten eine Projektion und ein Koordinatensystem zuzuweisen. Allerdings funktioniert bei verschiedenen Datenformaten meist nur eine Methode, was die Arbeit nicht erleichtert.



## 4.4 Berechnungen

### 4.4.1 Volumenberechnungen

Ein Ziel dieser Arbeit ist die Berechnung der Volumenänderung des Gepatschferners. Dafür gibt es zwei verschiedene Herangehensweisen.

Die erste Möglichkeit ist die Berechnung einer reinen Volumenänderung aus DHM's der Gletscheroberfläche. Im Prinzip wird dabei berechnet, inwiefern die Höhe der Gletscheroberfläche zwischen zwei oder mehreren Zeitpunkten zu- oder abgenommen hat. Diese Herangehensweise lässt aber keine Rückschlüsse zwischen der errechneten Volumenänderung und dem Gesamtvolumen des Gletschers zu.

Die zweite Möglichkeit ist, das Gesamtvolumen eines Gletschers zu einem bestimmten Zeitpunkt zu berechnen und dieses dann mit dem Gesamtvolumen anderer Zeitpunkte zu vergleichen. Diese Herangehensweise setzt allerdings Kenntnisse über das Gletscherbett voraus.

Da nicht für das gesamte Gebiet des Gepatschferners Informationen über das Gletscherbett vorliegen, kommen beide Methoden zur Anwendung.

Für den Seitengletscher des Gepatschferners wird eine Volumenänderungsanalyse anhand der Höhe der Oberfläche durchgeführt, da hier keine Informationen über das Gletscherbett vorliegen. In diesem Fall werden die DHM's der Gletscherstände verschiedener Zeitpunkte samt dem umliegenden Gelände voneinander subtrahiert. Die Differenz stellt dabei die Volumenänderung dar.

Bei der Berechnung des Gesamtvolumens wird ähnlich vorgegangen. Bei dieser Methode wird das DHM des Geländes (inklusive des Gletscherbetts) von dem DHM des Gletscherstandes subtrahiert. Übrig bleibt das Volumen des Eises, welches im Prinzip auf eine ebene Fläche projiziert wird. Aus diesen Eisdicken-DHM's kann anschließend das Volumen berechnet werden.

Wegen der unterschiedlichen Kartengrundlagen kommt es in den Randbereichen zu Ungenauigkeiten. So weisen manche Höhenwerte einen negativen Betrag von -200 m und mehr auf. Dies wird dadurch verursacht, dass an manchen Stellen das Gelände in der 1997er Karte höher angesetzt ist als in anderen Karten der Zungen- bzw. Gletscherstände. Bei den älteren Karten von 1872 und 1890 wird dies durch teilweise gravierende Geometriefehler des Geländemodells verursacht. Bei der

Berechnung des Volumens muss deshalb die Berechnungsebene (*Height of Plane*) generell auf 0 Meter gesetzt werden. Der Z Faktor bleibt bei dem Wert 1. Für die Bereiche unter 0 Meter wird eine gesonderte Volumenberechnung durchgeführt, um Anhaltswerte für die Abweichungen zu erhalten.

Die Änderung des Volumens zwischen zwei Zeitpunkten kann nun durch einfaches Subtrahieren der ermittelten Werte berechnet werden. Diese Ergebnisse werden weiters mit dem Gesamtvolumen in Beziehung gesetzt, um auch Aussagen über die prozentuale Veränderung tätigen zu können.

#### **4.4.2 Flächenberechnungen**

Die Berechnung der Fläche ist automatisch bei der Volumenberechnung mit integriert. Es wird sowohl die zweidimensionale (Grundfläche) als auch die dreidimensionale (Oberfläche) Fläche berechnet. Da die Oberfläche sehr stark von der Qualität der Kartenaufnahme abhängig ist, wird nur die Berechnung der Grundfläche verwendet. Bei Gletschern mit sehr unterschiedlichem und teilweise sehr steilem Relief, kann dies aber auch unschöne Nebeneffekte haben. Schmilzt beispielsweise ein Gletscher an einer Steilstelle ab, kann es zu deutlich negativen Volumenbilanzen kommen, ohne dass sich dabei die Grundfläche wesentlich ändert. Auch bei sehr flachen Gletschergebieten kann es zu deutlichen Volumenschwankungen kommen, ohne dass sich dabei die Grundfläche und die Oberfläche wesentlich verändern. Dies trifft beispielsweise auf die scharf umgrenzte Firnfläche des Gepatschferners zu. Veränderungen der Grundfläche und der Oberfläche stehen also nicht automatisch mit Änderungen des Volumens in Zusammenhang. Aus diesem Grund wird in Kap. 5.2 auch ein kurzer Vergleich zwischen Grundfläche und Oberfläche dargestellt.

Zu beachten ist auch, dass zur Bestimmung der Gesamtfläche noch die Fläche des Seitengletschers mit einbezogen werden muss. Auch bei der Flächenbestimmung kann die Änderung durch einfaches Subtrahieren der Gesamtgletscherflächen unterschiedlicher Zeitpunkte ermittelt werden.

Da die Flächenänderungen der Hauptzunge, der Nebenzungen, des Seitengletschers und der Firnfläche deutliche Unterschiede aufweisen können, werden diese gesondert berechnet.



### 4.4.3 Berechnungen der Massenbilanzen

In die Berechnung der Gesamt-Nettomassenbilanz (*total net mass balance*, TNMB) eines Gletschers geht sowohl das Volumen als auch die Dichte eines Gletschers ein. Die TNMB errechnet sich aus der Multiplikation der Dichte mit der Volumenänderung des Gletschers. Nach KASER et al. (2003) soll das Ergebnis in [m<sup>3</sup> w.e.] angegeben werden. Dies ist aber irreführend. Zum besseren Vergleich wird das Eisvolumen in ein Volumen umgerechnet, welches der Dichte von Wasser entspricht. Das Ergebnis wird international üblich in Meter Wasseräquivalenten (m w.e.) angegeben. Dabei gibt die Höhenangabe (m) die Höhe der Wasseräquivalente pro Quadratmeter an. Daraus ergibt sich: 1 t Wassere = 1 m<sup>3</sup> Wasser = 1m w.e.

Die Angabe [m<sup>3</sup> w.e.] ist eine Kombination aus Volumen und Wasseräquivalenten und daher überflüssig. In dieser Arbeit wird in den Massenbilanzen demnach generell die Größe [m w.e.] verwendet. Als Wert für die Dichte, wird die Dichte des Eises mit 0.9g/cm<sup>3</sup> angenommen.

Nach KASER et al. (2003) wird die Mittlere Spezifische Massenbilanz (*mean specific mass balance*, MSMB) berechnet, wenn die Massenbilanzen verschiedener Gletscher miteinander verglichen werden sollen. Dazu wird die Gesamt-Nettomassenbilanz durch die Gesamtgletscherfläche dividiert. Das Ergebnis wird in [m w.e.] oder [kg m<sup>-2</sup>] angegeben.

### 4.4.4 Berechnung der VBP, ELA und AAR

#### VBP:

Das Vertikale Massenbilanz-Profil (*vertical mass balance profile*, VBP) wird berechnet, um Aussagen über die Massenbilanz bestimmter Höhenintervalle tätigen zu können. Dazu werden die TNMB und die MSMB für bestimmte Höhenintervalle berechnet. Üblicherweise werden dafür Höhenintervalle von 50 oder 100 m verwendet. Typischerweise zeigt das VBP von Jahr zu Jahr die gleiche Form und nur der Achsenabschnitt ist Variationen unterworfen. Aus diesem Grund wird das VBP zur Charakterisierung des Klima-Gletscher Regimes verwendet.

Die Berechnung der VBP's hat sich als recht aufwändig erwiesen. Da keine Möglichkeit gefunden wurde, die Berechnungen automatisiert durchzuführen, mussten diese für jedes 50m Höhenintervall manuell durchgeführt werden. Durch

Reklassifizieren wurden aus den Rasterdatensätzen der Gletscherstände Rasterdatensätze für alle 50 m Intervalle erstellt. Aus diesen Rasterdatensätzen konnte dann die jeweilige Masse und die Fläche errechnet werden, aus denen wiederum die TNMB und die MSMB für jedes 50 m Höhenintervalle berechnet werden konnte.

#### **ELA:**

Die Höhe der Gleichgewichtslinie (*equilibrium line altitude*, ELA) ist definiert als die Höhe, in der das VBP gleich Null ist. Dabei teilt die ELA das Zehrgebiet vom Nährgebiet. Steigt die ELA an, befindet sich der Gletscher im Rückzug. Sinkt sie ab, befindet sich der Gletscher in einer Vorstoßphase.

Im Falle des Gepatschferners entsprachen die VBP's meist nicht der idealisierten Form. So konnte die ELA meist nicht direkt abgeleitet werden. Unter Einbeziehung der absoluten Massenwerte der TNMB mussten benachbarte Höhenintervalle mit positiver und negativer Bilanz gegen gerechnet werden, um die ELA annäherungsweise bestimmen zu können.

#### **AAR:**

Die AAR (*accumulation area ratio*) beschreibt das Verhältnis zwischen der Fläche des Nährgebiets und der Gesamtfläche des Gletschers. Dabei wird die Fläche des Nährgebietes (bestimmt durch die Lage der ELA) durch die Gesamtfläche des Gletschers dividiert (KASER et al., 2003).

#### **4.4.5 Definition der Teilbereich des Gepatschferners**

Um die Veränderungen in verschiedenen Teilbereichen des Gepatschferners gesondert interpretieren zu können, ist es erforderlich, gesonderte Berechnungen für die verschiedenen Teilbereiche des Gepatschferners durchzuführen.

Gesonderte Berechnungen waren auch für den Seitengletscher von Nöten, da in diesem Bereich keine Informationen über das Gletscherbett vorliegen. So konnte für diesen Bereich keine Berechnung des Volumens durchgeführt werden, sondern nur eine Berechnung der Volumen- und Flächenänderung. Da der Zungenbereich über eine ausgeprägte Dynamik verfügt, ist eine gesonderte Betrachtung dieses Bereichs unumgänglich. Ebenfalls von Interesse ist das Verhalten der Hauptzunge, im

Vergleich zu den Nebenzungen. Die Verteilung der verschiedenen Berechnungsgebiete kann Abb. 4.4.1 entnommen werden.

## Teilgebiete des Gepatschferners (1939)

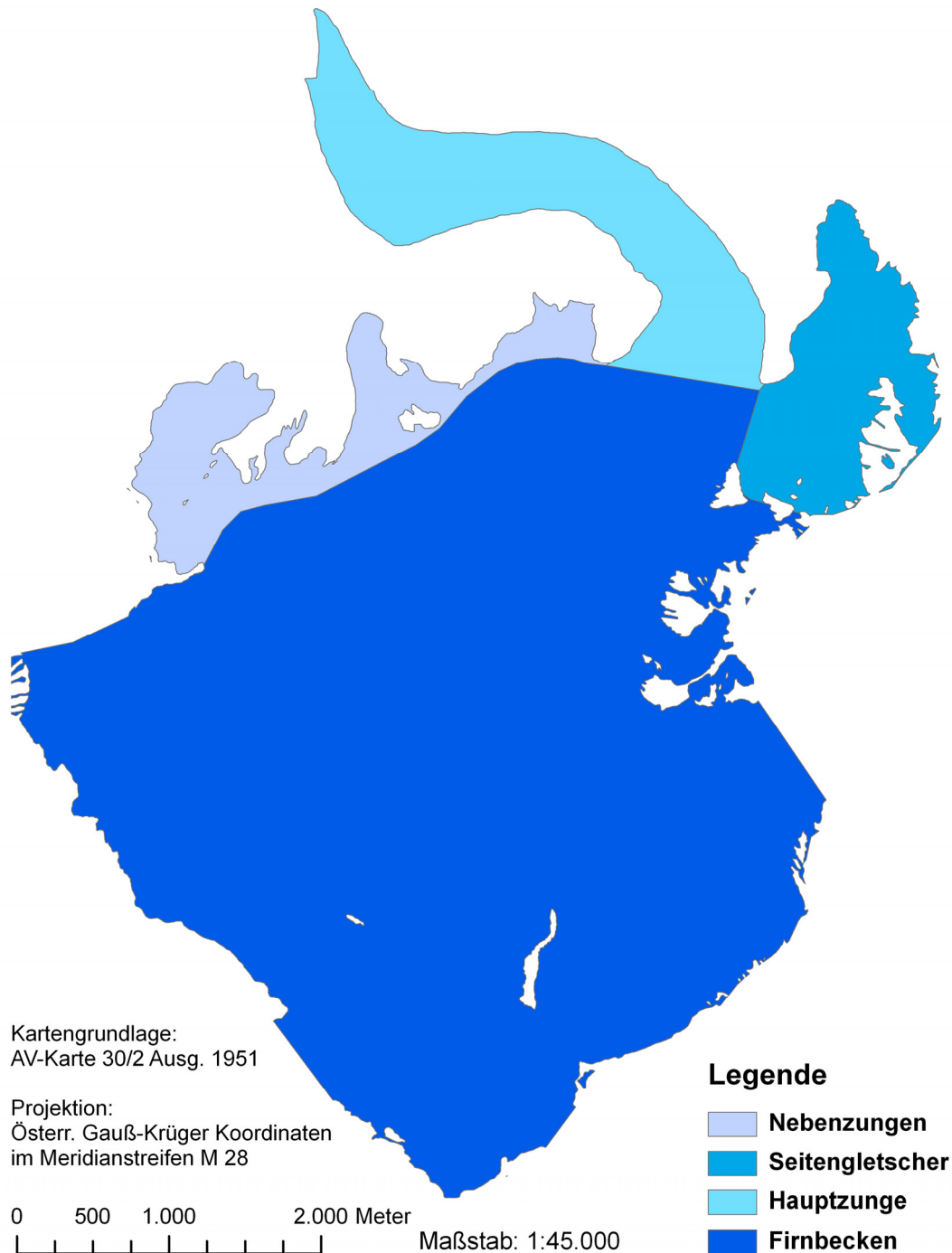


Abb. 4.4.1: Verteilung der Teilgebiete des Gepatschferners am Beispiel Gletscherstand 1939 (abgeleitet aus AV-Karte 30/2 Ausg. 1951).



## 4.5 Fehlerdiskussion

Wegen der vielen notwendigen Arbeitsschritte bei der Geodätischen Massenbilanzierung und der unterschiedlichen Qualität der Kartengrundlagen gibt es dementsprechend viele potentielle Fehlerquellen. Diese sollen im Folgenden erläutert werden.

### **Fehlerquellen der Kartengrundlagen:**

Bereits die Kartengrundlagen können Aufnahmefehler aufweisen. S. FINSTERWALDER bezifferte 1897 beispielsweise den mittleren Höhenfehler der 3. LA mit  $\pm 21$  m. Im Fall dieser Arbeit, trifft dies auf die Karte des Gepatschferners von 1872 zu. Für einen reinen Vergleich der Gletscherstände, anhand der Höhe der Oberfläche, wäre diese Kartengrundlage daher nicht geeignet. Etwas besser scheint eine Bestimmung des Gesamtvolumens zu sein. Da die Höhenlinien teils zu hoch, aber auch teils zu niedrig angesetzt sind, kommt es bei einer Volumenbestimmung zu einem gewissen ausgleichenden Effekt. Trotzdem sollten die Ergebnisse, in diesem Fall für nicht zu genau angesehen werden, da die wirkliche Abweichung nicht genau beziffert werden kann. Gerade im Bereich der Hauptzunge weisen die Höhenangaben deutliche Fehler auf (bis über 100 m), so dass die Höhe der Hauptzunge als deutlich zu niedrig anzusehen ist. Die Ausdehnung dieses Bereichs scheint aber relativ zutreffend wiedergegeben zu sein. Leider wird so die Massenbilanz von einer realistischen negativen Bilanz bis 1890 zu einer positiven verkehrt.

Auch die AV-Karte Ausg. 1893 weist unklare Höhenangaben und eine stellenweise fehlerhafte Geometrie auf. Die berechneten Werte für den Gletscherstand dieser Karte und die daraus errechneten Bilanzen können demnach als fehlerhaft angesehen werden. Kann das Volumen des Gesamtgletschers und der daraus errechneten Bilanzen noch als recht zutreffend angesehen werden, so ist das Volumen der Zunge für sich alleine genommen ebenfalls als zu gering anzusehen. Grund dafür sind die in der Kartengrundlage deutlich zu niedrig angesetzten Bereiche der vorderen Hauptzunge, der westlichen Nebenzunge und des südöstlichen Bereiches des Rauhen Kopfes (siehe Kartenbeilagen „Eisdicke des Gepatschferners 1872 – 2003“ und Höhenänderung des Gepatschferners 1890 – 2003). Die Berechnung der Fläche wird durch diese Geometriefehler in noch stärkerer Weise beeinflusst. Die ermittelten Flächenfehler (Bereiche unter 0 m)

geben einen Anhaltswert dafür, welche Flächen der Zunge und dem Hauptgletschers noch zugerechnet werden müssten.

Aufgrund dieser Fehler des Volumens und der Fläche ergibt sich, dass die Bilanzen der Zunge von 1890 bis 1922 positiv ausfallen und demnach als falsch anzusehen sind. Bei einem angenommenen tatsächlich größeren Volumen müsste die Bilanz von 1890 bis 1922 negativ sein.

Die Werte des Seitengletschers sind jedoch als zutreffend anzusehen, da dieser Bereich, anhand der durch die Felsgrate vorgegebenen Ausdehnungsgrenzen, korrigiert wurde.

Dazu ist noch anzumerken, dass die Höhenangaben der AV-Karte Ausg. 1893 deutlich genauer sind, als die der 3. LA. Die Höhenangaben der Kartenwerke ab 1922 sind dagegen als sehr exakt anzusehen.

Eine weitere Fehlerquelle kann die drucktechnische Umsetzung der Kartenaufnahmen darstellen. So kann es drucktechnisch zu geringen Abweichungen kommen. Da die vorliegenden Karten aber in größeren Maßstäben von 1:50000, 1:25000, 1:20000 und 1:10000 vorliegen, kann diese Fehlerquelle vernachlässigt werden.

Auch durch die unterschiedlichen Maßstäbe kann es zu gewissen Abweichungen kommen. So dürften Karten mit größeren Maßstäben exakter umgesetzt sein, als Karten mit kleineren Maßstäben.

Größere Probleme bereitete die Karte des Gletscherbetts nach MASSIMO, welche aus der Diplomarbeit von A. KEUTTERLING entnommen werden musste. Leider wies diese Abbildung weder einen Maßstab noch irgendwelche Koordinaten auf. Auch waren die Höhenlinien sehr dick gedruckt und daher in steileren Bereichen ineinander verlaufen. Wie bereits in Kap. 4.2.2 beschrieben, musste diese Kartengrundlage massiv per Hand überarbeitet werden. Durch die frei Hand Einpassung des Gletscherbetts in das umliegende Gelände, kann es zu Lagefehlern gekommen sein. Allerdings belegen zahlreiche Höhenlinien vom umliegenden Gelände und des Gletscherbetts, welche exakt ineinander übergingen, dass der mögliche Lagefehler nicht sehr groß sein kann (siehe dazu auch Abb. 4.2.1). Diese exakten Übergänge befinden sich rund um das ganze Gletschergebiet, so dass man von einer ausreichenden Genauigkeit ausgehen kann. Weniger gut passende Übergänge sind auf die schlechte drucktechnische Umsetzung der Karte des Gletscherbetts, fehlerhafte Interpolation des Gletscherbetts und die unterschiedliche kartographische

Umsetzung zurückzuführen. In den flachen Randbereichen des Gletscherbetts können Fehler aber auch bereits bei der Interpolation des Gletscherbetts durch MASSIMO entstanden sein. So wurde die Sondierung der Eisdicke 1996 durchgeführt. Die Errechnung des Gletscherbetts erfolgte aber mit Hilfe der Karte Gepatschferner 1971. Gerade in höheren Lagen hat sich die Höhe der Gletscherfläche von 1971 bis 1996 verringert, so dass das Gletscherbett in diesen Bereichen zu hoch angesetzt sein dürfte. Einige kleinere Randbereiche des Gletscherbetts fehlen in der vorliegenden Abbildung. Diese wurden nach wissenschaftlicher Kenntnis per Hand interpoliert (siehe Abb. 4.2.2). Wegen des geringen Volumens dieser Randbereiche, kann die möglicherweise dadurch entstandene Abweichung als gering eingestuft werden. Auf eine Interpolation des fehlenden nordöstlichen Gletscherbereichs wurde wegen zu weniger Anhaltspunkte verzichtet.

Auch beim Scannen und gegebenenfalls beim Zusammenschneiden der Karten kann es zu Lagefehlern gekommen sein. Wie bereits in Kap. 4.2.1 beschrieben, war das Gradnetz bei nahezu allen Karten nicht hundertprozentig rechtwinklig gedruckt. Dies scheint durch die drucktechnische Umsetzung verursacht worden zu sein. Des Weiteren kann es durch das Falten der Karten zu gewissen Ungenauigkeiten bei der digitalen Erfassung gekommen sein. Alle diese Fehler lassen sich aber beim Georeferenzieren minimieren, da hier einen gewissen Verzerrungsfehler ausgeglichen werden kann. Allerdings kann es auch beim Georeferenzieren zu Abweichungen kommen, vor allem, wenn Kartengrundlagen mit unterschiedlichen Koordinatensystemen und Projektionen verwendet werden. Wie in Kap. 4.2.3 dargelegt, mussten die meisten Karten anhand von Festpunkten georeferenziert werden, da eine Georeferenzierung anhand des UTM Gradnetzes fehlschlug bzw. kein Gradnetz vorhanden war. Auch hier kam es zu gewissen Lagefehlern, welche sich aber vor allem in Randbereichen bemerkbar machten. Hierauf wird im Verlaufe der vorliegenden Arbeit noch näher eingegangen. Bei der Georeferenzierung der Karte des Gepatschfeners 1971, die aus insgesamt 11 Einzelteilen zusammengeschnitten werden musste, konnten die Abweichungen, welche beim Zusammenschneiden entstanden waren, deutlich minimiert werden. Dies wurde bereits in Kap. 4.2.3 ausführlich dargelegt.

##### **Fehlerquellen bei der Vektorisierung und der DHM Erstellung:**

Bei der Vektorisierung kann es ebenfalls zu minimalen Abweichungen kommen. Da diese aber meist genauer ist, als die drucktechnische Umsetzung der Kartengrundlagen, kann die mögliche Abweichung absolut vernachlässigt werden. Lediglich an den Endabschnitten der Höhenlinien neigt die automatische Vektorisierung zum Hakenschlagen. Auch gab es unerwünschte Unterbrechungen in Höhenlinien, Begrenzungslinien usw. Aus diesem Grund wurden sämtliche Vektordateien per Hand durchgesehen und korrigiert. Die Umsetzung der Kartengrundlagen in Vektordaten kann also als äußerst exakt angesehen werden.

Interessanterweise fehlten bei den Vektorhöhenlinien des Gletscherstandes von 1990, welche aus der Arbeit von A. KEUTTERLING vorlagen, einzelne Bereiche. Diese waren bei den ebenfalls vorliegenden DHM's allerdings vorhanden. So leitete ich von den DHM's Höhenlinien ab, welche dann zur Vervollständigung der reduziert vorliegenden Höhenlinien herangezogen wurden. In einigen wenigen Bereichen fehlten Höheninformationen gänzlich. Da sich jedoch in diesen Bereichen des Nährgebiets in der Vergangenheit recht wenig getan hat, interpolierte ich auch diese Bereiche per Hand (siehe dazu Abb. 4.2.4). Andererseits hat Herr KEUTTERLING Bereiche des Geländes fälschlicherweise in die Gletscherfläche mit aufgenommen. Diese wurde soweit es ging entfernt. In weniger klaren Bereichen wurden diese belassen. Anzunehmen ist, dass diese Bereiche dann bei den Volumenberechnungen unter 0 Metern liegen und demnach nicht mit in die Volumenbestimmung eingehen.

Der Genauigkeit der Vektordaten entsprechend, sollten auch die digitalen Höhenmodelle in Form von TIN's und Grids entsprechend exakt sein, da alle verfügbaren Höheninformationen und Grenzen bei deren Erstellung mit einbezogen wurden.

Trotzdem kam es bei den Volumenberechnungen zu Ungenauigkeiten. So kam es zu größere Abweichungen zwischen dem Gelände, welches aus der AV-Karte 30/2 Ausg. 2003 abgeleitet wurde, und den älteren Zungen- bzw. Gletscherständen. Hier kommen mehrere Faktoren zusammen. So lag die AV-Karte 30/2 Ausg. 2003 in UTM Koordinaten vor, wohingegen die älteren Karten in österreichischen Gauß-Krüger Koordinaten (*Austria Ferro*) vorlagen. Auch wiesen die Kartengrundlagen unterschiedliche Maßstäbe auf. Beim direkten Vergleich des Geländes der älteren Karten mit dem der AV Karte 30/2 Ausg. 2003 fielen stellenweise erhebliche Unterschiede auf, deren Ursachen nicht geklärt werden konnten. So kommt es vor,



dass gerade bei den älteren Gletscherständen Randbereichen bis unter das Gelände reichen. Um vergleichbare Werte zu erhalten, wurde generell der Eisbereich, welcher sich durch diese Lagefehler unter dem Gelände befindet, gesondert berechnet und als mögliche Fehlerquelle dokumentiert.

Auffallend war, dass sich diese fehlerhaften Bereiche überwiegend im Bereich der Nebenzungen und im Bereich der Kesselwände befanden. Im Bereich der Nebenzungen kann es nach dem Rückzug des Gletschers im Laufe der Jahrzehnte zu einer Umlagerung von Moränenmaterial gekommen sein. Darauf weist zumindest ein Vergleich der Karte Ausgabe 1928 mit der AV-Karte 30/2 Ausg. 2003. Gegenüber der Karte von 1928 waren in der Karte von 2003 die Moränen etwas niedriger dargestellt und die angrenzenden Bereiche höher. Diese Umlagerung (möglicherweise auch ein Problem der Kartendarstellung) war die Ursache der Passungengenauigkeit des 1922er Gletscherstandes zum 2003er Geländemodell. Da sich dieser Bereich aber außerhalb der jüngeren Gletscherstände befindet, wurde das Gelände an dieser Stelle minimal angepasst.

Weitere Abweichungen, welche für die maximalen negativen Werte von um -40 m verantwortlich sind, finden sich im Bereich der Kesselwände (Steilwand zwischen dem Fluchtkogel und dem Brandenburger Haus). Gerade in solch steilen Bereichen kann es schon durch minimale Lageabweichungen zu deutlichen Fehlerwerten kommen. Da in diesem Bereich als Fehlerquelle keine Umlagerung von Moränenmaterial in Frage kommt, können die Fehler nur durch Unterschiede bei den verschiedenen Kartenaufnahmen und bei der Vektorisierung verursacht worden sein. Da diese winzigen Seitenverästelungen aber nahezu keinen Einfluss auf das Gesamtvolumen des Gletschers haben, können die Abweichungen in diesem Bereich vernachlässigt werden.

Die errechneten Werte des Bereiches unter 0 Meter sind darüber hinaus auch eine gute Möglichkeit, die Passgenauigkeit der verschiedenen Gletscherstände zum Gelände zu überprüfen. Da die AV-Karte 30/2 Ausg. 2003 anhand von Festpunkten georeferenziert wurde, befürchtete ich größere Abweichungen der älteren Gletscherstände vor allem im Bereich der Hauptzunge. Diese Befürchtung bewahrheitete sich jedoch nicht. Die Abweichungen befanden sich überwiegend in den weiter oben beschriebenen Gebieten. Im Bereich der Gletscherzunge kam es nur stellenweise zu minimalen Anweichungen. Insgesamt können die Abweichungen als relativ gering angesehen werden. Diese befinden sich größtenteils in den

volumenarmen Randbereichen des Gletschers. Der mögliche Lagefehler des Gletscherbetts mag einen gewissen Einfluss auf die Berechnungen des Gesamtvolumens der Gletscherstände haben und dieses minimal verfälschen, da es aber die Grundlage für die Volumenberechnungen aller Gletscherstände ist, bleiben die Ergebnisse absolut vergleichbar. Auch die händischen Interpolationen haben wegen der recht gleichmäßigen Oberflächenform des Gepatschferners nur ein geringes Fehlerpotential.

#### **Fehlerquellen bei der Berechnung der Masse:**

Die Dichte eines Gletschers kann eine große Variabilität aufweisen. Diese ist unter anderem abhängig vom Alter und der Tiefe des Eises. Auch die Auflage von Neu- und Altschnee in den Akkumulationsgebieten weisen deutlich niedrigere Dichtewerte auf als Eis. Da mir keine Untersuchungen der Dichte des Gepatschferners vorliegen, musste für die Dichte, der Wert der Dichte des Eises mit  $0.9\text{g/cm}^3$  angenommen werden. Dabei muss nun beachtet werden, dass dieser angenommene Dichtewert vermutlich zu große Ergebnisse bei der Berechnung der Masse liefert. Ein entscheidender Faktor für die Abweichung von der Realität ist der Zustand der Ausaperung des Gletschers während der Kartenaufnahmen. Bei starker Ausaperung fehlen die Auflagen aus Neu- und teilweise auch aus Altschnee. In diesen Fällen liefert die angenommene Dichte von  $0.9\text{g/cm}^3$  deutlich realistischere Werte als bei mächtigen Auflagen aus Alt- und Neuschnee. LANG und PATZELT (1971) bestätigen diese Vermutung durch ihre Untersuchung am Hintereisferner. So lieferte die Geodätische Volumenänderungsanalyse, welche mit der Dichte des Eises von  $0.9\text{g/cm}^3$  in Masse umgerechnet wurde, eine sehr gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Glaziologischen Methode. Die der Geodätischen Methode zugrunde liegenden Schichtpläne waren in einer Periode starker Ausaperung aufgenommen worden. In Kap. 6 soll daher noch genauer auf den Zustand der Ausaperung während der dieser Arbeit zugrunde liegenden Kartenaufnahmen eingegangen werden.

#### **Zur Genauigkeit der Ergebnisse:**

Schon aufgrund der minimalen Ungenauigkeit der topographischen Kartenaufnahmen kann keine Genauigkeit der Ergebnisse im cm oder dm Bereich erwartet werden. Dazu kommen noch die beschriebenen möglichen Fehlerquellen durch die

#### 4. Erstellung digitaler Geländemodelle aus topographischen Karteninformationen

Bearbeitung, die Georeferenzierung und die Vektorisierung. Auch bei der Interpolation der Vektordaten in TIN's wird die tatsächliche Geländeoberfläche nur durch Interpolation annäherungsweise erreicht. Weitere Ungenauigkeiten entstehen durch die Umwandlung der TIN's in Grids mit einer Rasterweite von 5 m. Es wurde aber alles getan, um mögliche Abweichungen bei den Bearbeitungsschritten möglichst gering zu halten.

Die Genauigkeit in der Lage und der Höhe ist demnach in einem Bereich zwischen 1 und 5 m anzusiedeln. Minimale Veränderungen der Höhe der Oberfläche, wie sie meist im Bereich von wenigen Jahren auftreten, lassen sich so kaum erfassen. Die Veränderung der Tendenzen über längere Zeiträume dagegen lassen sich gut nachvollziehen. Dies bestätigen auch die errechneten Ergebnisse, welche nun in Kapitel 5 dargestellt werden.



## Kapitel 5:

## Ergebnisse

### 5.1 Volumenbilanz

Volumenbestimmung:

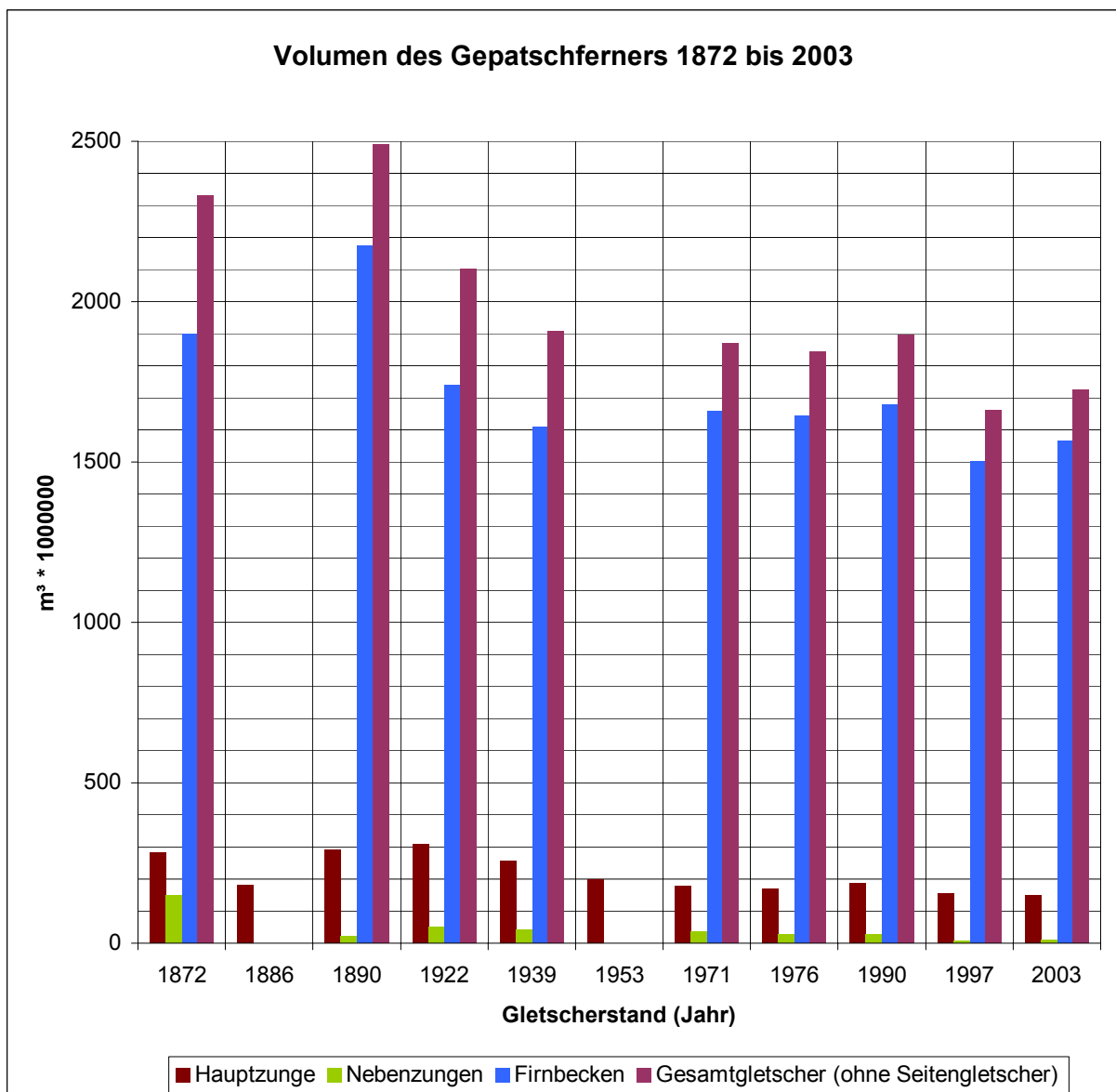


Abb. 5.1.1: Volumen der Teilbereiche des Gepatschferners 1872 – 2003 (1886 nur vorderer Bereich der Gletscherzunge).

Die Berechnungen des Volumens und der Fläche werden unter ArcGIS in einer Operation ausgeführt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird in Kap. 5.1 die Volumenbilanz und in Kap. 5.2 die Flächenbilanz abgehandelt.

Die Berechnungen des Volumens wurden für das Firnbecken, die Hauptzunge und die Nebenzungen gesondert durchgeführt. Für den Seitengletscher wurde eine Berechnung der Volumenänderung anhand der Höhe der Oberfläche durchgeführt, da hier keine Informationen über das Gletscherbett vorliegen. Die errechneten Volumina der Teilbereiche des Gepatschferners sind in Abb. 5.1.1 dargestellt. Die errechneten Volumenwerte und die dazugehörige Fehlerbestimmung (Bereiche unter 0 m) befinden sich in Tab. A 5.1.1, A 5.1.2 und A 5.1.3.

Wie schon in Kap. 4.5 erwähnt, sind die errechneten Werte für die Gletscherstände 1872 und 1890 nur bedingt verwendbar, da diese Kartenaufnahmen deutliche Geometriefehler aufweisen. Die erste wirklich exakte Kartenaufnahme des Gepatschferners wurde 1922 durchgeführt. Aus Abb. 5.1.1 wird die fast kontinuierliche Volumenabnahme des Gepatschferners ersichtlich. Deutlich wird die nahezu Stagnation zwischen 1939 und 1976 sowie die Vorstoßphase in den 1980er Jahren, welche 1990 aber bereits wieder zu Ende war. Erkennbar ist die Volumenzunahme des Firnbeckens, welche bereits in den 1950er Jahren begann. Dagegen war der Rückzug der Gletscherzunge nur von 1976 bis 1988 durch eine Vorstoßphase unterbrochen. Von 1997 bis 2003 hat das Volumen des Gepatschferners wieder minimal zugenommen. Lediglich die Hauptzunge befindet sich weiterhin im Rückzug.

### **Volumenbilanz:**

Die ermittelten Volumina bilden die Grundlage für die Volumenbilanzen des Gepatschferners von 1872 bis 2003. Die Bilanzen wurden sowohl für den Zeitraum zwischen zwei Aufnahmen als auch jährlich erstellt. Die absolute Volumenbilanz ist in Abb. 5.1.2 dargestellt, wohingegen die prozentuale Volumenbilanz in Abb. 5.1.3 abgebildet ist. Zu beachten ist, dass die untersuchten Zeitspannen vom Zeitpunkt der jeweiligen Kartenaufnahmen abhängig sind. Diese lassen aber keine Aussage über Gletschervorstöße oder Rückzugsphasen zwischen den Aufnahmen zu. Gerade bei langen Zeitintervallen können so nur Gesamttendenzen ausgedrückt werden. Die errechneten Werte der Bilanzen können aus Tab. A 5.1.4 und A 5.1.5 entnommen werden. Auch die Volumenbilanz des Seitengletschers ist in den Bilanzen enthalten.

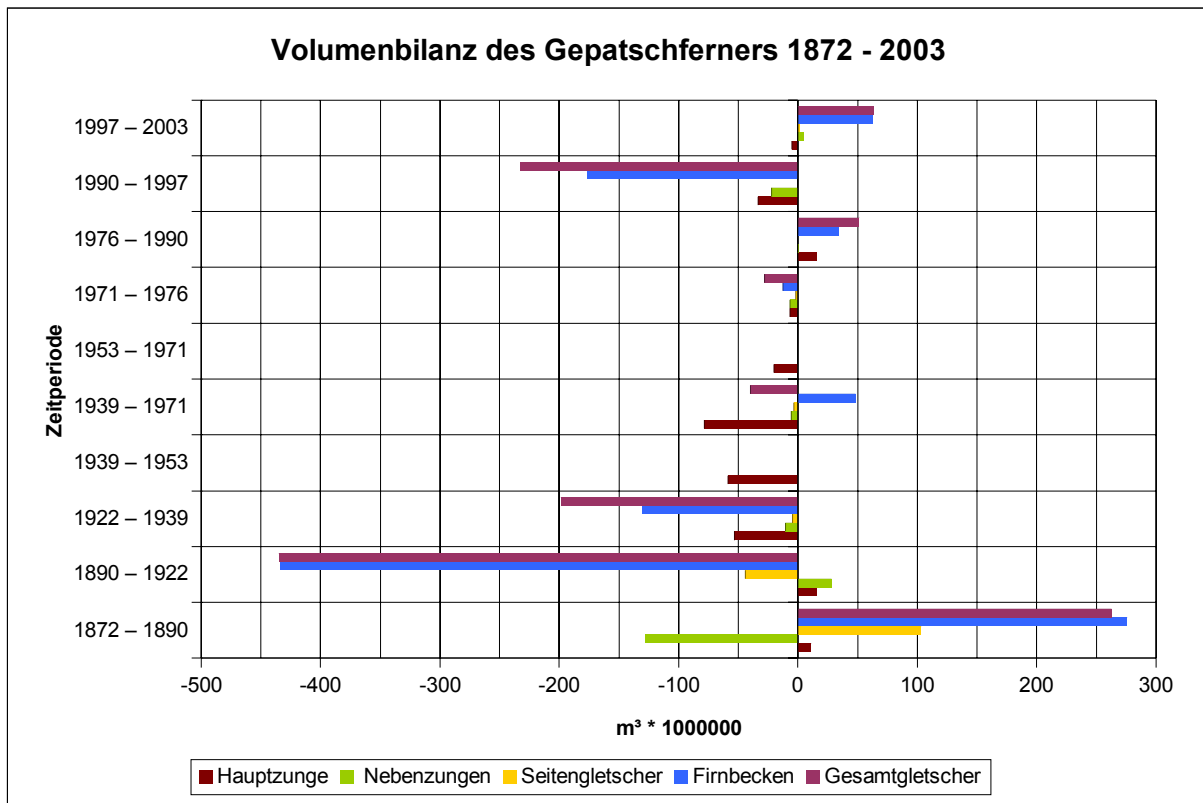


Abb. 5.1.2: Volumenbilanz der Teilbereiche des Gepatschferners 1872 – 2003.

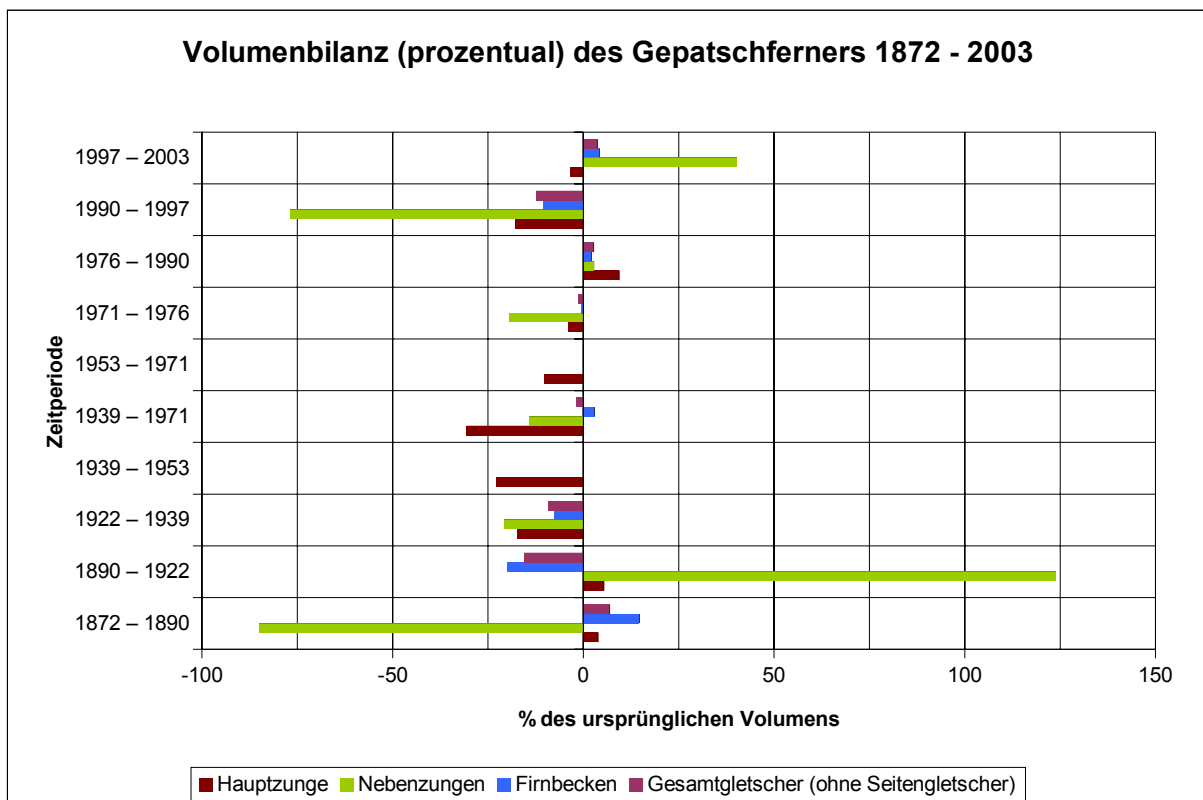


Abb. 5.1.3: Volumenbilanz (prozentual) der Teilbereiche des Gepatschferners 1872 – 2003.

## 5. Ergebnisse

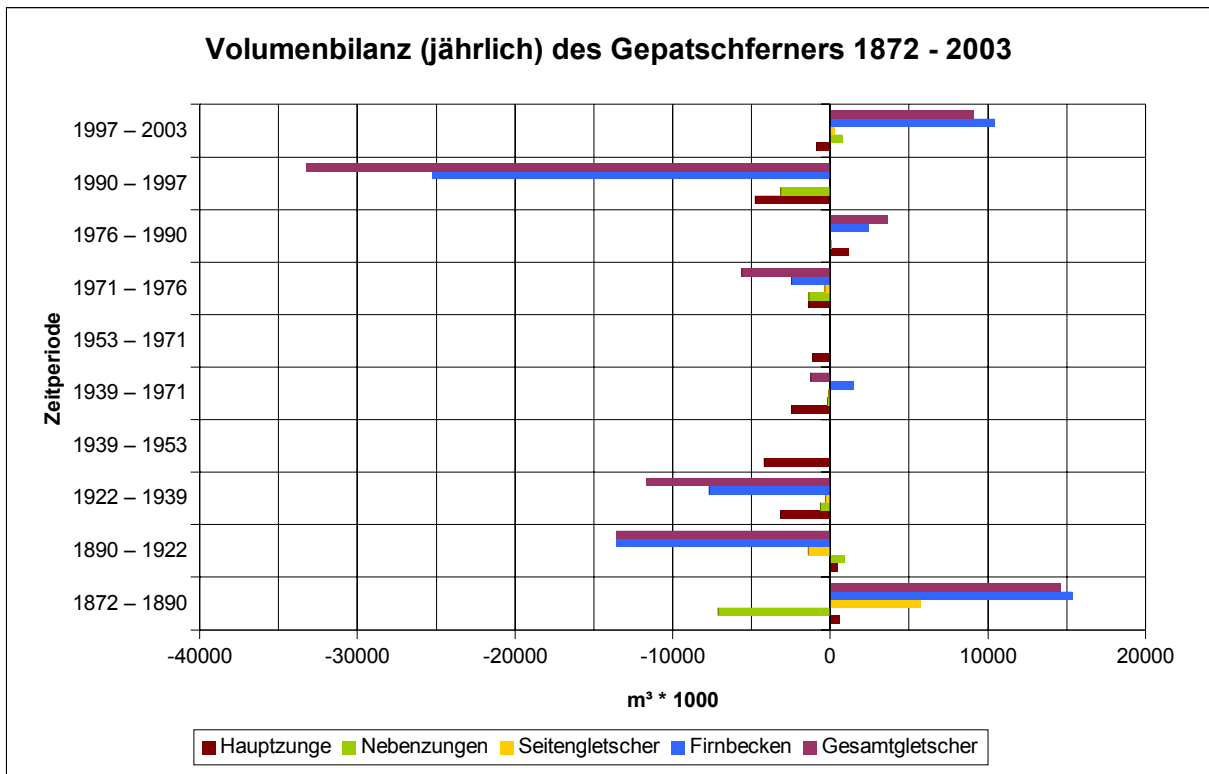


Abb. 5.1.4: Volumenbilanz (jährlich) der Teilbereiche des Gepatschferners 1872 – 2003.

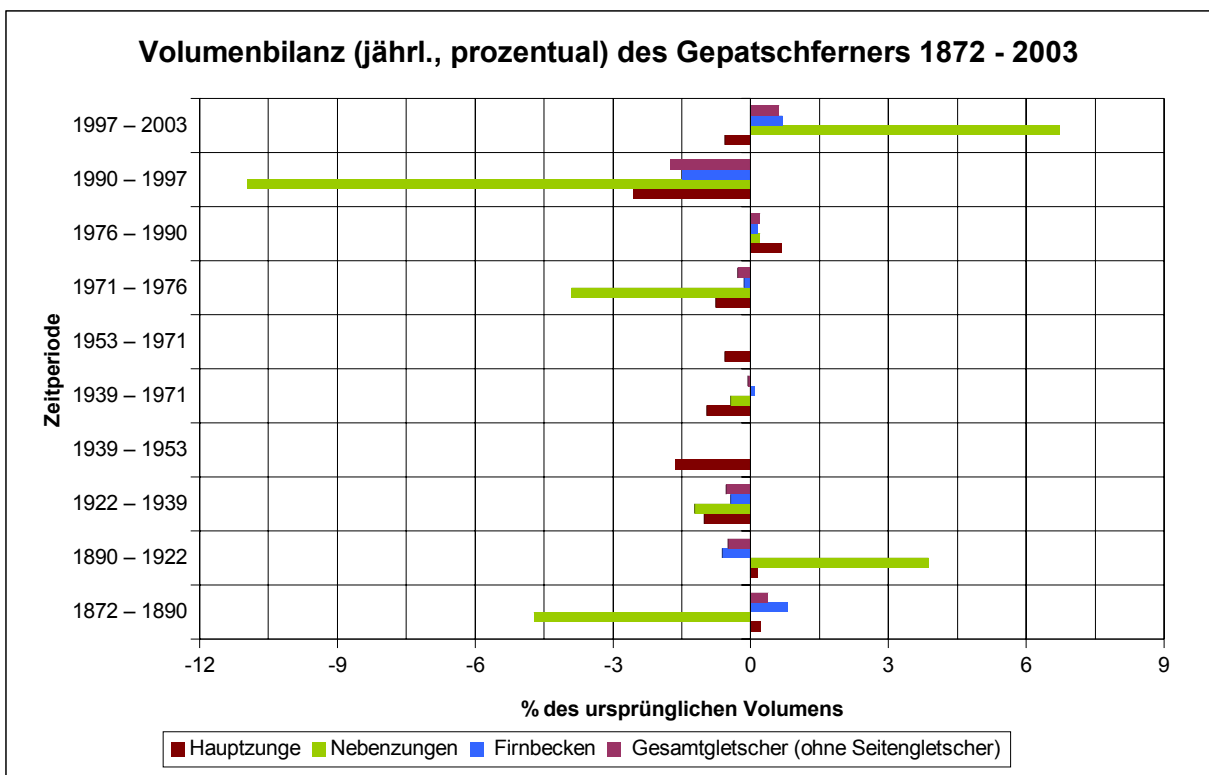


Abb. 5.1.5: Volumenbilanz (jährlich, prozentual) der Teilbereiche des Gepatschferners 1872 – 2003.



Auffallend ist die große Variabilität im Bereich der Hauptzunge und den Nebenzungen. Gerade bei den Nebenzungen ist eine starke Volumenabnahme erkennbar. Diese wird vermutlich durch die Orographie des Gletscherbetts verursacht. So scheint dieser Bereich überproportional von den Volumenänderungen des Firnbeckens abhängig zu sein (vergleiche dazu auch Abb. 2.8.3 in Kap. 2.8).

Um eine bessere Vergleichsmöglichkeit zwischen den Gletscherständen zu haben, wurden die Bilanzen auch auf jährliche Intervalle umgerechnet. Dabei ist zu beachten, dass es sich hier nur um Mittelwerte handelt und nicht der tatsächlichen Volumenbilanz der jeweiligen Jahre entspricht. Bei jährlichen Intervallen können jedoch präzisere Rückschlüsse auf die Dynamik des Gletscherverhaltens gezogen werden. Die absolute jährliche Volumenbilanz wird aus Abb. 5.1.4 ersichtlich, wohingegen die prozentuale jährliche Volumenbilanz in Abb. 5.1.5 dargestellt ist. Die dazugehörigen Werte befinden sich in Tab. A 5.1.6 und A 5.1.7.

Auch in den jährlichen Volumenbilanzen wird die starke Volumenabnahme der Hauptzunge und der Nebenzungen deutlich. Auffallend ist die überproportional starke Volumenabnahme aller Teilgebiete des Gepatschferners im Zeitraum von 1990 bis 1997. Von 1997 bis 2003 ist eine minimale Erholung der Volumenbilanz erkennbar. Lediglich die Bilanz der Hauptzunge ist nach wie vor negativ. Weiterhin fällt die überproportional starke Erholung im Bereich der Nebenzungen auf. Da diese mit einer Volumenzunahme des Firnbeckens einhergeht, könnte dies die weiter oben genannte Theorie bestätigen.



## 5.2 Flächenbilanz

### Flächenbestimmung:

Bei der Berechnung der Fläche unterscheidet ArcGIS zwischen der zwei-dimensionalen und dreidimensionalen Fläche, also der Grundfläche und der Oberfläche. Da die Oberfläche aber sehr stark von der Qualität und dem Maßstab der Kartenaufnahme abhängig ist, wird nur die Grundfläche für die Flächenbestimmung herangezogen. Als Orientierung für die Unterschiede zwischen der 2D und 3D Fläche werden einige ausgewählte Beispiele dargestellt.

Zur genaueren Beurteilung der Veränderungen der Fläche wurden, genau wie bei der Volumenbestimmung, die Flächen der Hauptzunge, der Nebenzungen, des Seitengletschers und des Firnbeckens gesondert berechnet.

Aus diesen Teilbereichen errechnet sich die Gesamtfläche des Gepatschferners. Die Fläche der Hauptzunge 1886 umfasst nur den vorderen Teil der Zunge.

Zu beachten ist, dass die komplette Firnfläche und alle Nebenzungen mit in die Berechnung eingehen (siehe Abb. 4.4.1 in Kap. 4.4.5). S. FINSTERWALDER (1928) rechnete nur die Teilbereiche, welche der Hauptzunge zufließen, dem Gepatschferner zu. Er weist darauf hin, dass in früherer Zeit das gesamte Firnbecken dem Gepatschferner zugerechnet wurde. BRUNNER (1978) unterscheidet einen nördlichen Teil und einen südlichen Teil, wobei der südliche Teil in etwa dem italienischen Anteil des Gepatschferners entspricht. Diese Unterteilung ist bei einer hydrologischen Massenbilanzierung sinnvoll, da der südliche Teil in Richtung des Langtauferer-Ferners entwässert. Das Ausschließen von Teilen der Nebenzungen durch S. FINSTERWALDER (1928) erscheint dagegen weniger schlüssig, da diese Nebenzungen in früherer Zeit Verbindung mit der Hauptzunge hatten und noch heute in Richtung der Hauptzunge entwässern. Bei der Geodätischen Bilanzierung sind solche hydrologischen Überlegungen aber weniger von Belang. Da sich der südliche Teil innerhalb des topographisch recht scharf abgegrenzten Firnbeckens des Gepatschferners befindet und es keine Hinweise darauf gibt, dass dieser südliche Teil in historischer Zeit jemals eine andere Bezeichnung trug als Gepatschferner, wird der südliche Teil in dieser Arbeit auch dem Gepatschferner zugerechnet. Die Fläche der Teilbereiche des Gepatschferners kann aus Abb. 5.2.1 abgelesen werden. Die ermittelten Werte befinden sich in Tab. A 5.2.1. Die dazugehörigen Flächenfehler (Gebiet unter 0 m) befinden sich dagegen in Tab. A 5.2.2 und A 5.2.3.

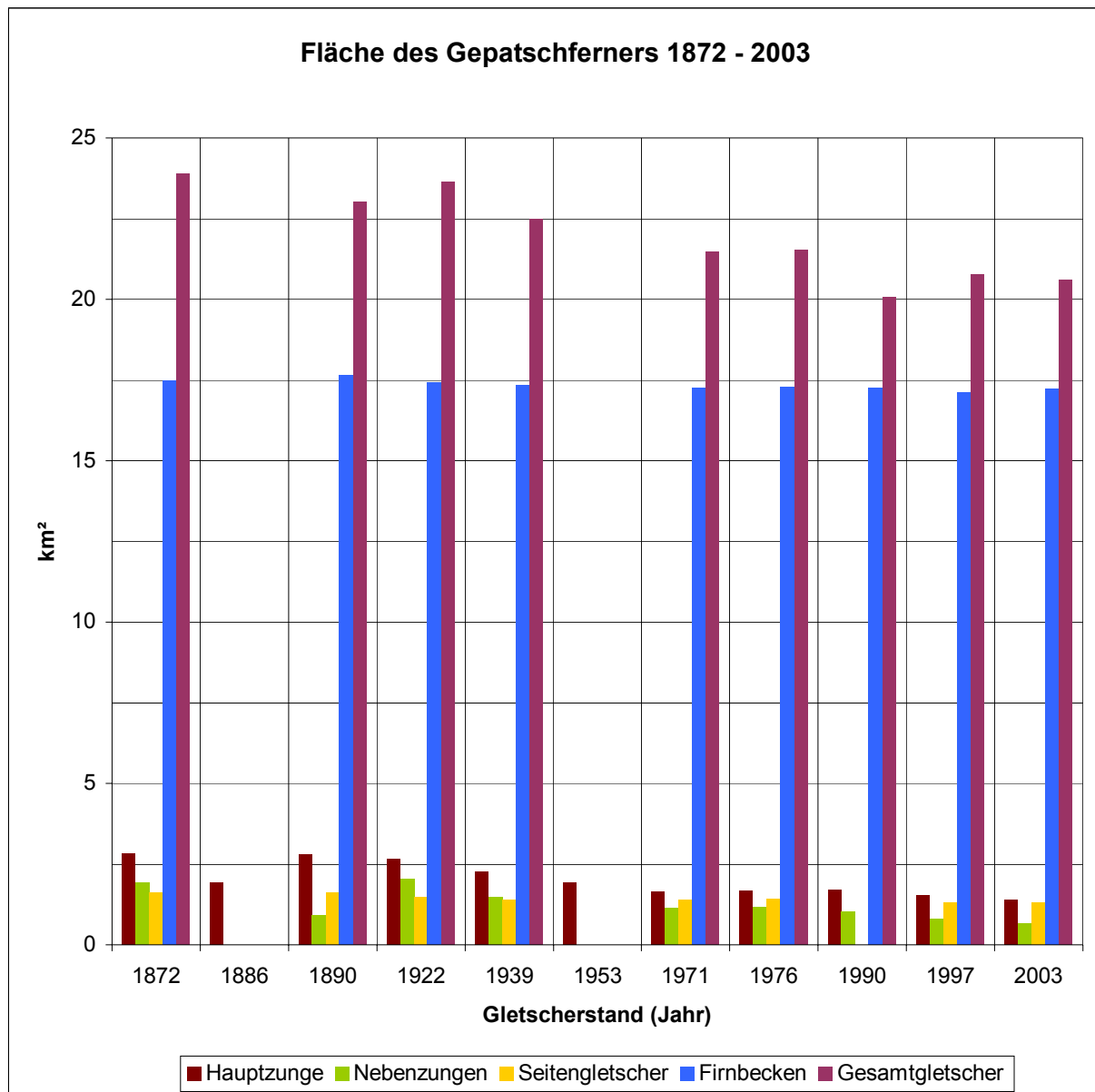


Abb. 5.2.1: Fläche der Teilbereiche des Gepatschferners 1872 – 2003.

Ähnlich dem Volumen, ist ein deutlicher Flächenrückgang der Hauptzunge und der Nebenzungen erkennbar. Dieser war nur durch eine minimale Vorstoßphase in den 1970er und 1980er Jahre unterbrochen. Die Flächen des Seitengletschers und des Firnbeckens lassen dagegen nur geringe Schwankungen erkennen. Zu beachten ist, dass die Flächen der Gletscherstände 1872 und 1890 wegen der angesprochenen Geometriefehler der Kartenaufnahmen, deutlich zu niedrig ausfallen. Dies trifft vor allem auf den Bereich der Hauptzunge und der Nebenzungen zu.

### Flächenbilanz:

Basierend auf den ermittelten Flächen des Gepatschferners von 1872 bis 2003 wurden die Flächenbilanzen errechnet. Dabei wurden die Bilanzen sowohl für den Zeitraum zwischen zwei Aufnahmen als auch jährlich erstellt. Zu beachten ist, dass die untersuchten Zeitspannen von den Zeitpunkten der Kartenaufnahmen abhängig sind. Diese lassen aber keine Aussage über Gletschervorstöße oder Rückzugsphasen zwischen den Aufnahmen zu. Gerade bei langen Zeitintervallen können so nur Gesamttendenzen ausgedrückt werden. Die Bilanz der Fläche bezieht sich auf die gesamte Fläche (Hauptzunge, Nebenzungen, Seitengletscher und Firnbecken) des Gepatschferners, da hierfür das fehlende Gletscherbett des Seitengletschers nicht von Belang ist. Die absolute Bilanz ist in Abb. 5.2.2 dargestellt, die prozentuale Bilanz dagegen in Abb. 5.2.3. Die dazugehörigen Werte befinden sich in Tab. A 5.2.4 und A 5.2.5.

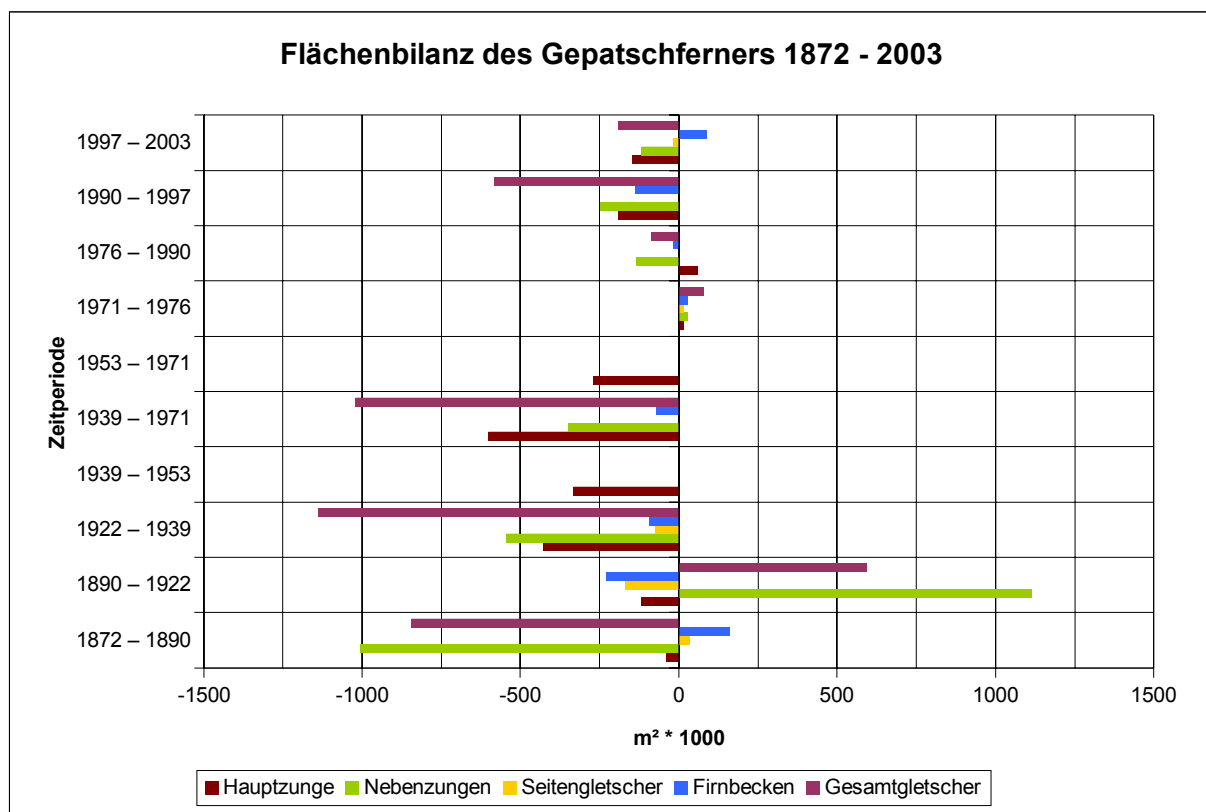


Abb. 5.2.2: Flächenbilanz der Teilbereiche des Gepatschferners 1872 bis 2003.

Die extremen Flächenänderungen der Nebenzungen in den Bilanzen für 1872 – 1890 und 1890 – 1922 sind auf die fehlerhafte Geometrie der Kartenaufnahmen 1872 und 1890 zurückzuführen. Deutlich wird, dass gerade die Hauptzunge und die Neben-

## 5. Ergebnisse

zungen von den Flächenverlusten betroffen sind. Die Flächenverluste des Seitengletschers und des Firnbeckens sind dagegen minimal.

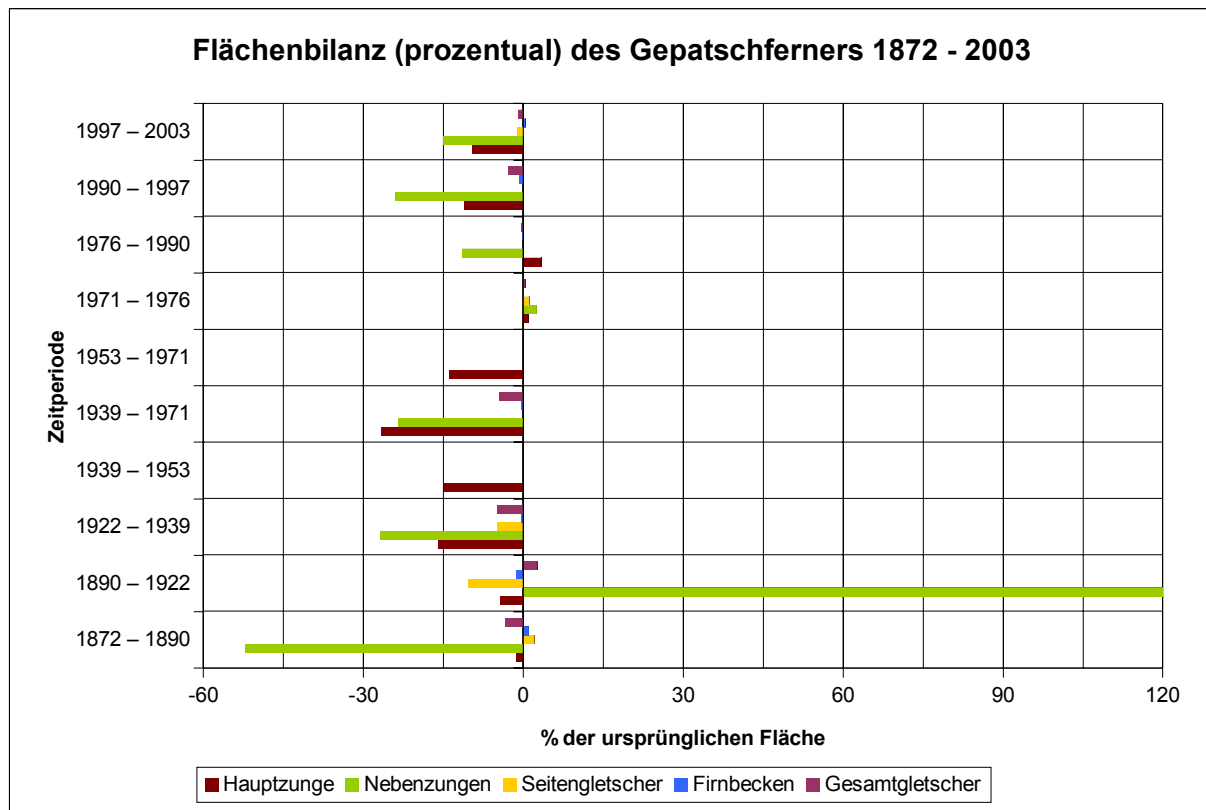


Abb. 5.2.3: Flächenbilanz (prozentual) der Teilbereiche des Gepatschferners 1872 bis 2003.

Zur genaueren Einordnung der Dynamik der Flächenentwicklung wurden jährliche Bilanzen erstellt. Diese sind in Abb. 5.2.4 und 5.2.5 dargestellt. Die entsprechenden Werte sind dagegen in Tab. A. 5.2.6 und A 5.2.7 enthalten.

Die jährlichen Bilanzen verdeutlichen die verhältnismäßig großen Flächenverluste der Hauptzunge und der Nebenzungen. Auffallend sind vor allem die großen Flächenverluste in den Zeiträumen 1922 – 1939 und 1990 – 1997. Beide Phasen befinden sich direkt nach dem Ende zweier Vorstoßphasen. So sind die großen Verlusten vermutlich auf das Abschmelzen der Zugwinne der Vorstoßphasen zurückzuführen. Ebenfalls deutlich erkennbar ist die Vorstoßphase während der 1970er und 1980er Jahre, wobei die Flächenzunahme zeitlich der Volumenzunahme vorausgeht.

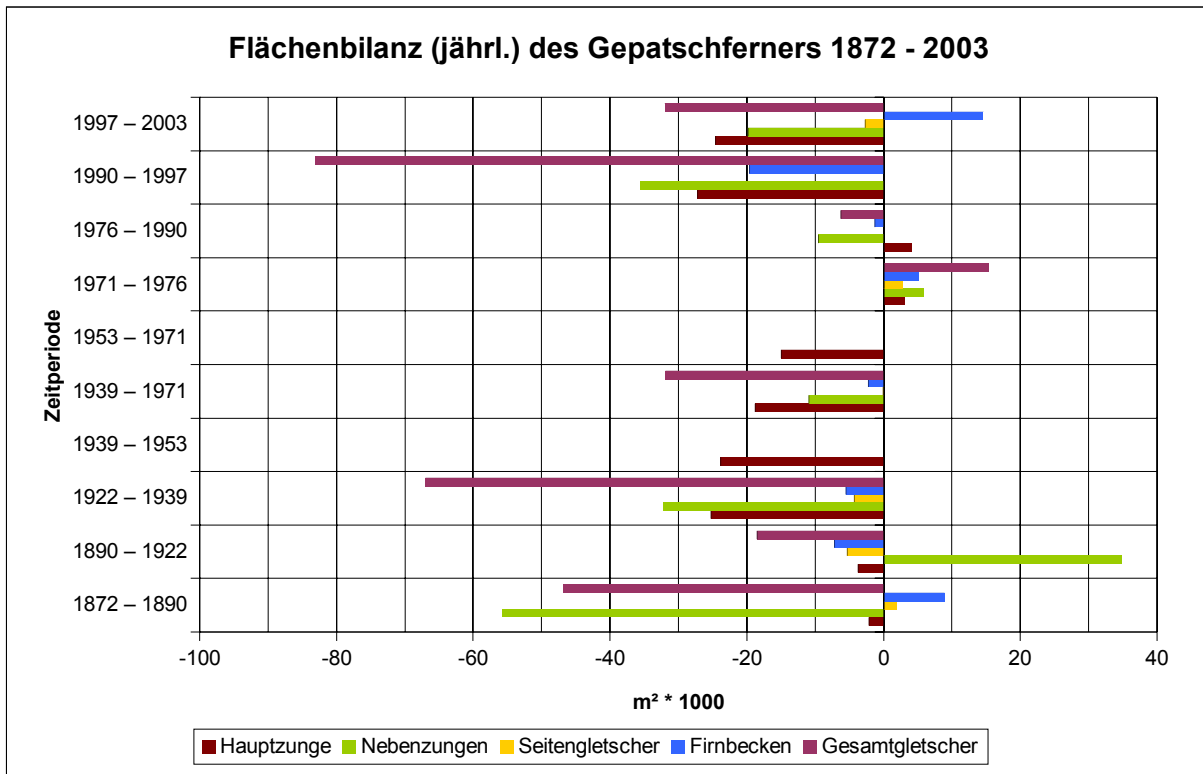


Abb. 5.2.4: Flächenbilanz (jährlich) der Teilbereiche des Gepatschferners 1872 – 2003.

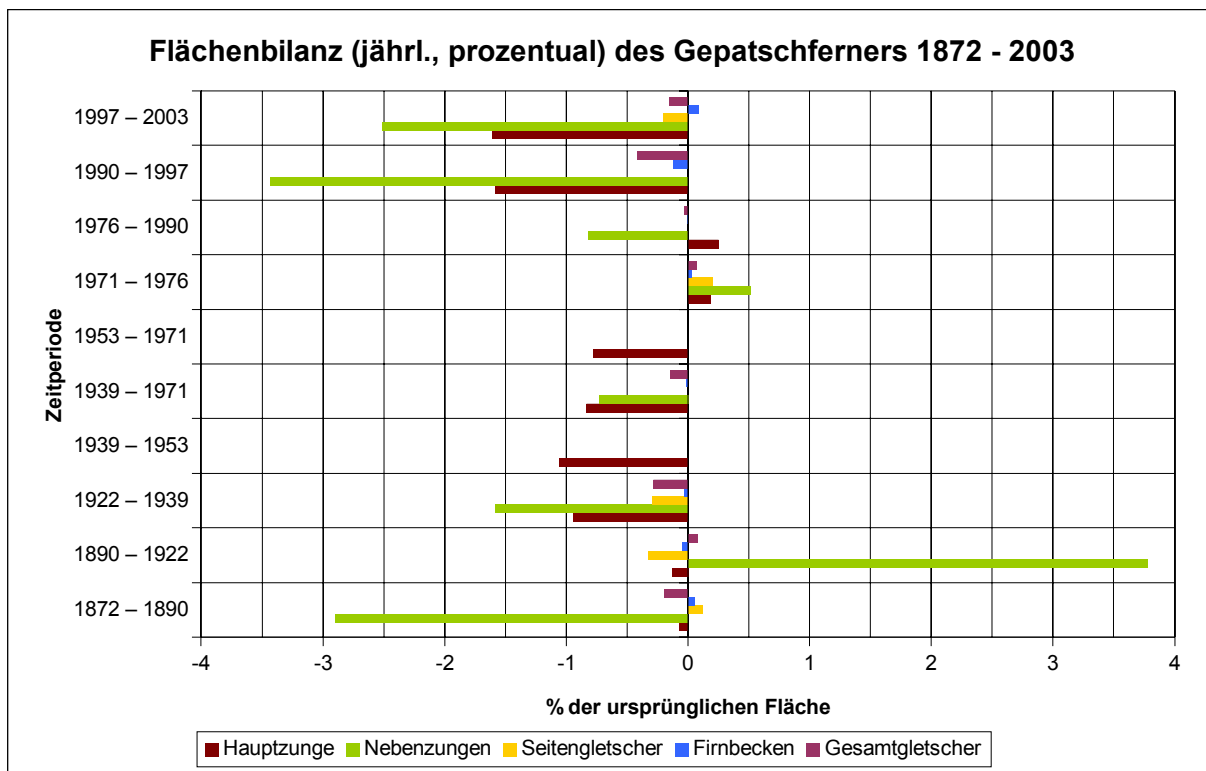


Abb. 5.2.5: Flächenbilanz (jährlich, prozentual) der Teilbereiche des Gepatschferners 1872 – 2003.

### Vergleich zweidimensionaler zu dreidimensionaler Fläche:

Zum Vergleich wurden drei Gletscherstände herangezogen. Der Gletscherstand 1890 basiert auf einer Kartengrundlage im Maßstab 1:50000 und einer Äquidistanz der Höhenlinien von 50m. Diese Kartenaufnahme repräsentiert eine weniger genaue kartographische Aufnahme. Eine typische Kartenaufnahme des Alpenvereins repräsentiert der Gletscherstand 1997, welcher auf einer Kartengrundlage im Maßstab 1:25000 mit einer Äquidistanz der Höhenlinien von 20m basiert. Der Gletscherstand 1971 hingegen, basiert auf einer wissenschaftlichen Kartengrundlage im Maßstab 1:10000 mit einer Äquidistanz der Höhenlinien von 10m.

Im Bereich der Hauptzunge ist die 3D Fläche 20-25% größer als die der 2D Fläche (max. 25%, 1971). Bei allen anderen Teilbereichen zeigt der Gletscherstand 1890 die größte Abweichung zwischen 2D und 3D Fläche und der Gletscherstand 1997 die geringste. Bezogen auf die gesamte Gletscherfläche weicht die 3D Fläche des Gletscherstandes 1890 um ca. 9.5%, des Gletscherstandes 1971 um ca. 6.5% und des Gletscherstandes 1997 um ca. 5.5% von der 2D Fläche ab. Die Abweichung wird durch die Genauigkeit der Kartenaufnahme, aber vor allem durch die Neigung der Gletscheroberfläche verursacht. Dementsprechend finden sich die größten Abweichungen bei Steilhängen und im gewölbten und zergliederten Bereich der Gletscherzunge. Eine genaue Übersicht der Teilbereiche findet sich in Abb. 5.2.6.

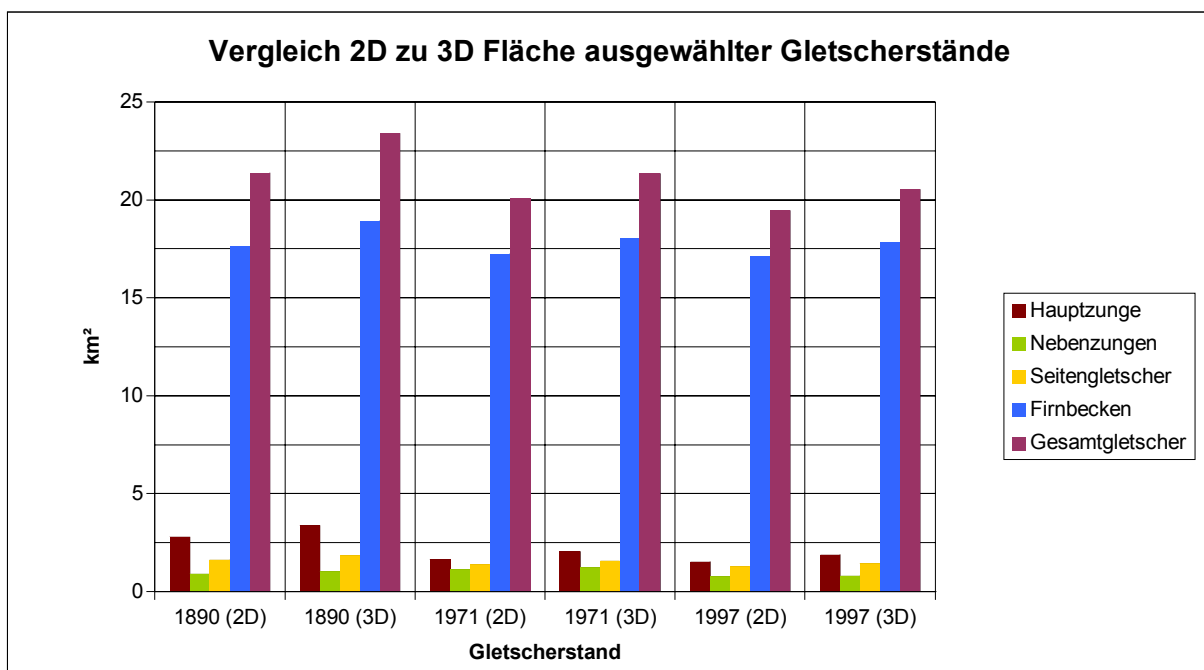


Abb. 5.2.6: Vergleich 2D zu 3D Fläche ausgewählter Gletscherstände.



### 5.3 Massenbilanzen

Da sich die Masse aus dem Volumen und der Dichte eines Gletschers errechnet, entsprechen die Diagramme in ihrer Form und ihrer Aussagekraft den Diagrammen der Volumenbilanzen (siehe Kap. 5.1). Aus diesem Grund werden die Diagramme der Masse, der TNMB (absolut & prozentual) und der TNMB (jährlich) (absolut & prozentual) hier nicht aufgeführt. Die Aussagen, welche im Zusammenhang mit den Volumenbilanzen getroffen wurden, sind so auch für die Massenbilanzen gültig. Die errechneten Werte der Masse des Gepatschferners finden sich in Tab. A 5.3.1, die der TNMB (absolut & prozentual) und der TNMB (jährlich) (absolut & prozentual) finden sich dagegen in Tab. A 5.3.2, A 5.3.3, A 5.3.4 und A 5.3.5.

Um die Massenbilanzen verschiedener Gletscher vergleichen zu können, wird die MSMB errechnet. Die MSMB und die MSMB (jährlich) für den Gepatschferner 1872 – 2003 sind in Abb. 5.3.1 dargestellt.

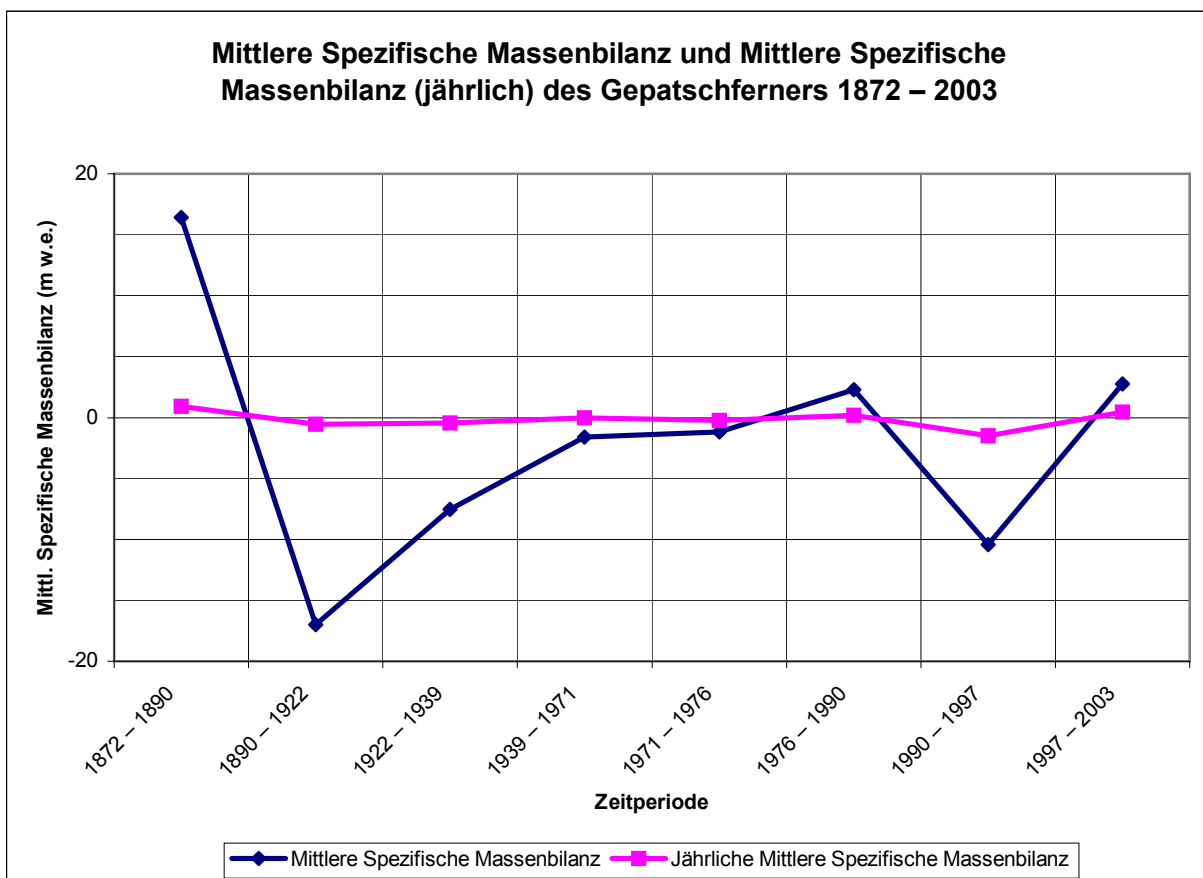


Abb. 5.3.1: Mittlere Spezifische Massenbilanz und Mittlere Spezifische Massenbilanz (jährlich) des Gepatschferners 1872 – 2003.

## 5. Ergebnisse

Die MSMB (jährlich) entspricht in ihrer Aussagekraft der MSMB, nur ist sie durch die Berücksichtigung der Länge der Zeitintervalle zwischen den Aufnahmen stark geglättet. Die deutlich positive Bilanz von 1872 – 1890, aber auch die deutlich negative Bilanz von 1890 bis 1922 rührt wiederum von den Ungenauigkeiten der Kartenaufnahmen von 1872 und 1890 her. Deutlich erkennbar ist die positive Bilanz des Gepatschferners während der Vorstoßphase in den 1980er Jahren. Im Vergleich zu den verlässlichen Daten ab 1922 ist die deutlich negative Bilanz von 1990 bis 1997 auffallend.

Wegen der großen Dynamik im Bereich der Gletscherzungen wurde die Mittlere Spezifische Massenbilanz und die Jährliche Mittlere Spezifische Massenbilanz für die Hauptzunge gesondert berechnet. Diese ist in Abb. 5.3.2 dargestellt.

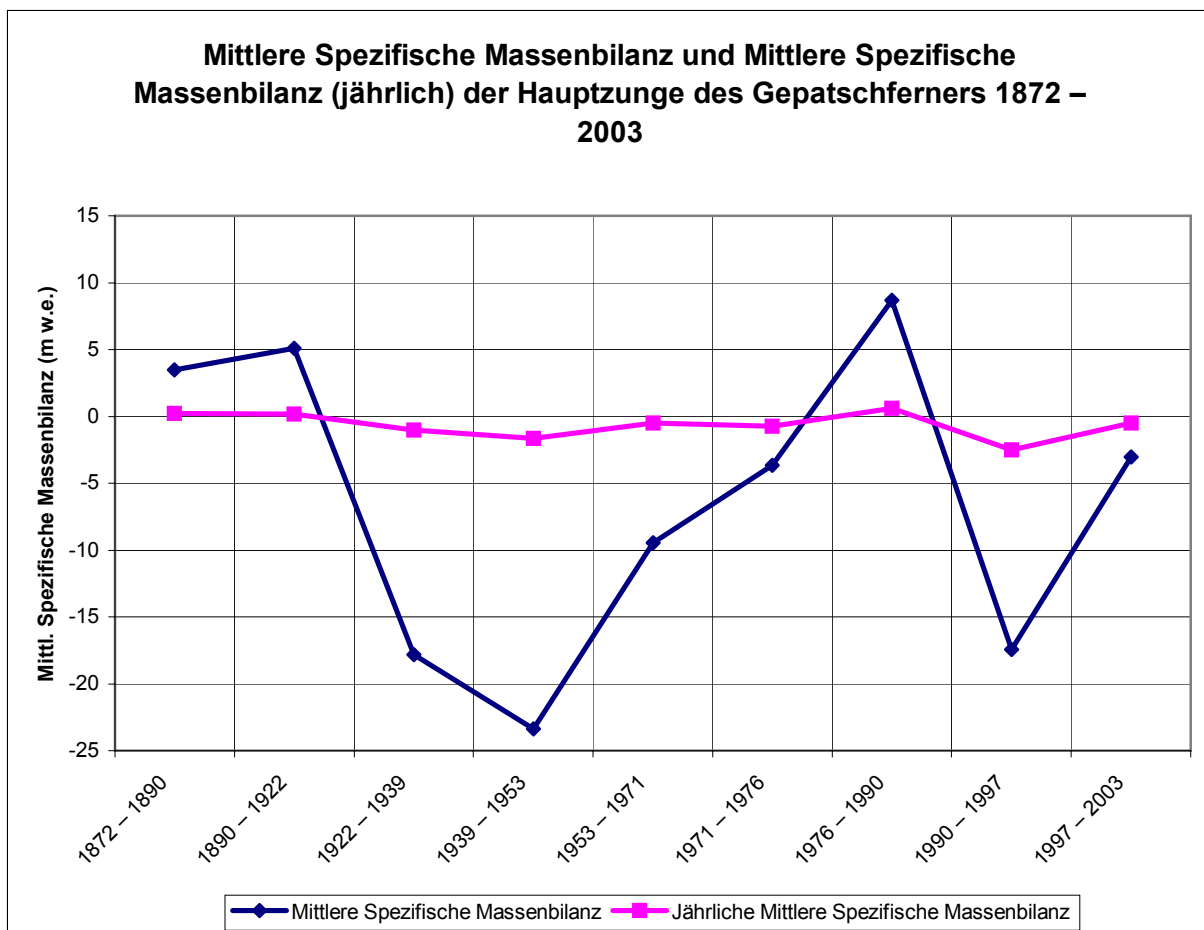


Abb. 5.3.2: Mittlere Spezifische Massenbilanz und Mittlere Spezifische Massenbilanz (jährlich) der Hauptzunge des Gepatschferners 1872 – 2003.

Wie auch bei der MSMB des Gesamtgletschers wird die positiven Bilanzen von 1872 – 1890 und 1890 – 1922 im Bereich der Hauptzunge von den Ungenauigkeiten der

Kartenaufnahmen verursacht. Alles in allem zeigen die Bilanzen der Hauptzunge ein anderes Bild als die des Gesamtgletschers. Gerade im Zeitraum von 1922 bis 1971 weist diese deutlich größere Verluste auf. Im Vergleich dazu wirken die Verluste der Hauptzunge für den Zeitraum 1990 – 1997 deutlich weniger dramatisch. Die Massenzunahme während der Vorstoßphase in den 1970er und 1980er Jahren kommt auch bei der Bilanz der Hauptzunge deutlich zur Geltung.

In Tab. A 5.3.6 und 5.3.7 finden sich die errechneten Werte für die MSMB und die MSMB (jährlich) des Gepatschferners und der Hauptzunge des Gepatschferners von 1872 – 2004.

#### **Zur Darstellungsweise der Massenbilanz Diagramme:**

Bei den Werten der Gesamt-Nettomassenbilanz, der Mittleren Spezifischen Massenbilanz, der vertikalen Massenverteilung und der Fläche der 50 m Höhenintervalle, welche in Kap. 5.3 und 5.4 dargestellt werden, handelt es sich um diskrete Werte. Diese müssten richtigerweise als Balken oder Säulen dargestellt werden. Im überwiegenden Teil der Veröffentlichungen werden solche Bilanzen, vor allem die VBP's, aber als Diagramme mit vertikal verlaufenden Linien dargestellt. Diese Darstellungsweise suggeriert kontinuierliche Daten, was aber nicht der Fall ist. Aufgrund der Übersichtlichkeit und der Einheitlichkeit der Darstellung in Kap. 5.3 und 5.4 werden diese Diagramme dennoch als Liniendiagramme dargestellt.



## 5.4 VBP, ELA und AAR

Da das VBP, die ELA und die AAR in einer engen Beziehung zueinander stehen, werden diese in diesem Kapitel gemeinsam behandelt.

Um genaue Aussagen über das Gletscher-Klima Regime treffen zu können, sollte das VBP jährlich erstellt werden. Dies ist aber bei einer Geodätischen Massenbilanzierung nicht möglich, da Kartenaufnahmen zumeist nicht jährlich durchgeführt werden. Oftmals vergehen zwischen zwei Kartenaufnahmen 5, 10, 20 oder mehr Jahre. Der Gehalt solcher Bilanzen ist daher weniger aussagekräftig als bei jährlichen Bilanzen.

Auch im Bezug auf das VBP, die ELA und die AAR weisen die Daten von 1872 – 1890 und 1890 – 1922 wegen der deutlichen Geometriefehler der Kartenaufnahmen von 1872 und 1890 deutliche Unsicherheiten auf. Die Daten ab 1922 sind dagegen als sehr verlässlich anzusehen.

Um das VBP erstellen zu können, ist es zunächst notwendig eine Analyse der Masse und der Fläche für 50m Höhenintervalle durchzuführen. Die Vertikale Massenverteilung für 50m Höhenintervalle findet sich in Abb. 5.4.1 und die Fläche der 50m Höhenintervalle in Abb. 5.4.2. Die entsprechenden Werte finden sich in Tab. A 5.4.1a & b und A 5.4.2a & b. Auffallend ist das recht typische und einheitliche Gesamtbild der Verteilung der Masse und der Fläche der 50m Höhenintervalle. Lediglich die Daten von 1872 und 1890 weisen deutliche Abweichungen auf. Kleinere Abweichungen können auf Intervallverschiebungen durch Höhenänderungen und die Bewegung des Gletschers zurückgeführt werden.

Die TNMB und MSMB für 50m Höhenintervalle 1872 – 2003 werden in Abb. 5.4.3 und 5.4.4 gegenübergestellt. Zur besseren Übersichtlichkeit werden die TNMB und MSMB für 50m Höhenintervalle ein weiteres Mal ohne die extremen und vermutlich fehlerhaften Werte von 1872 – 1922 in Abb. 5.4.5 und 5.4.6 gegenübergestellt. Die dazugehörigen Werte befinden sich in Tab. A 5.4.3a & b und A 5.4.4.a & b.

Die extremen Werte der Bilanzen 1872 – 1890 und 1890 – 1922 werden in diesen Diagrammen sehr deutlich.

Die MSMB für 50m Höhenintervalle (VBP) wird in Abb. 5.4.7 umgerechnet auf jährliche Werte gesondert dargestellt. Die dazugehörigen Werte der MSMB (jährlich) befinden sich dagegen in Tab. A 5.4.6.a & b.

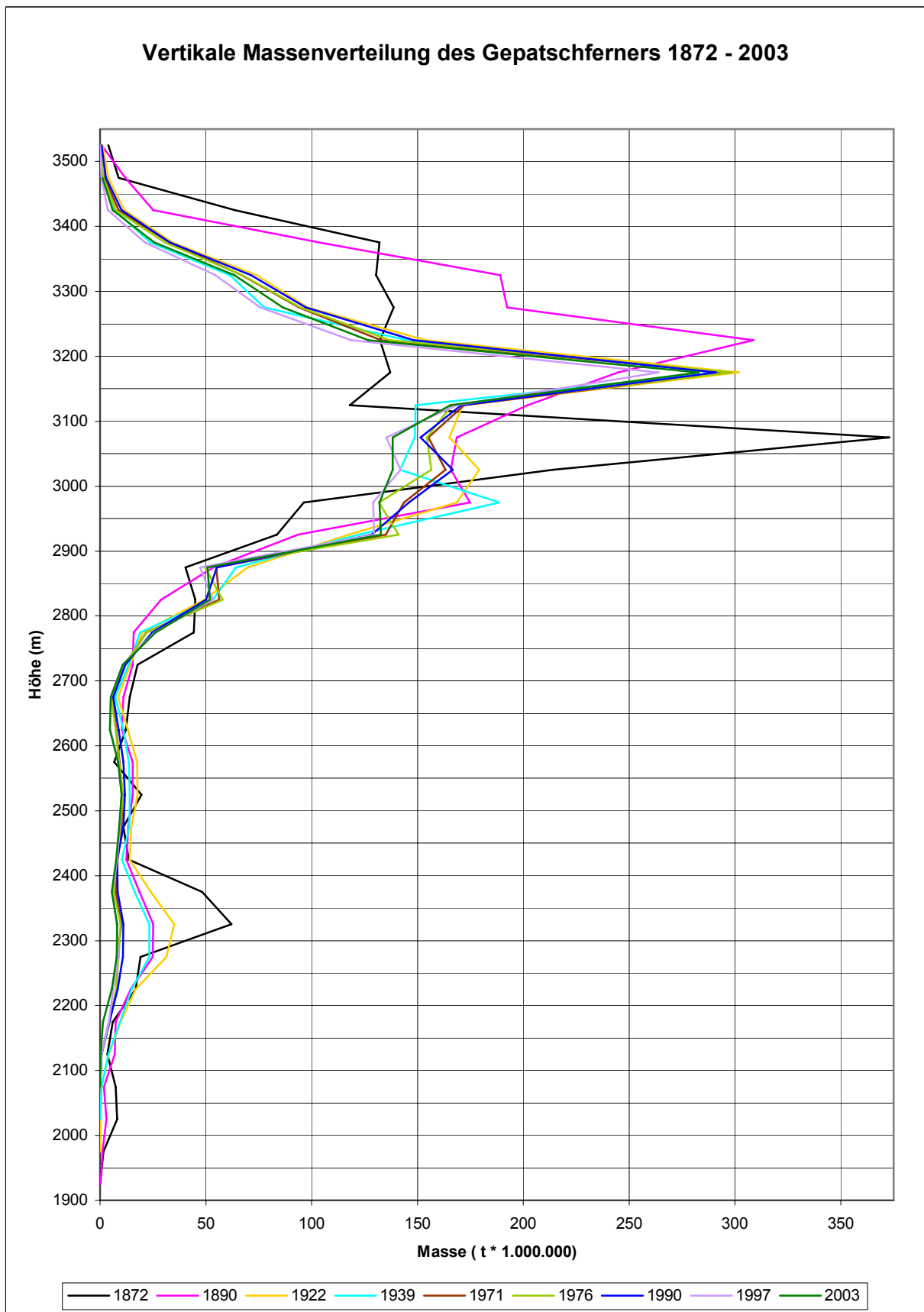


Abb. 5.4.1: Vertikale Massenverteilung des Gepatschferners für 50m Höhenintervalle 1872 – 2003 (1990 ohne Seitengletscher).

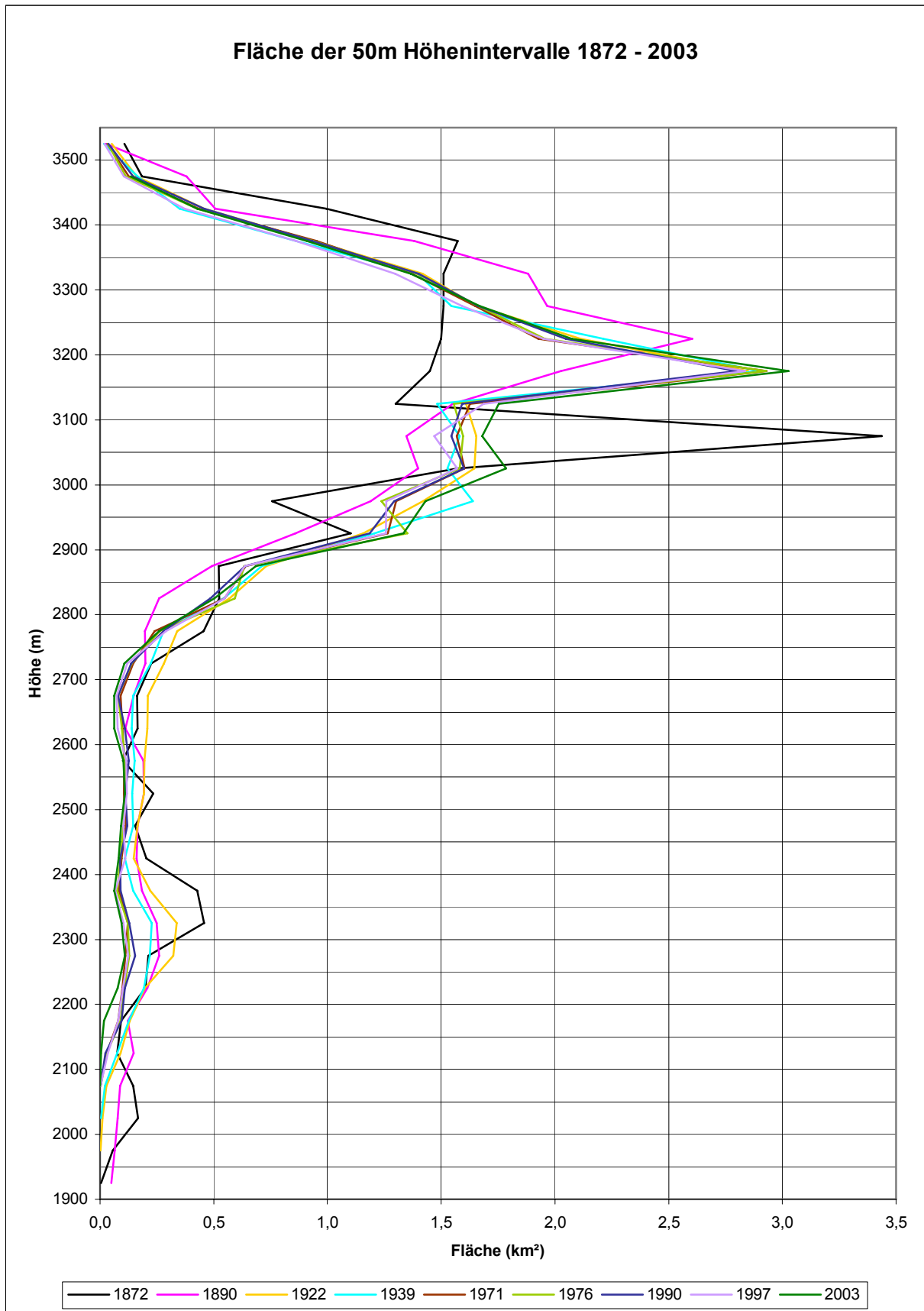


Abb. 5.4.2: Fläche der 50m Höhenintervalle des Gepatschferners 1872 – 2003 (1990 ohne Seitengletscher).

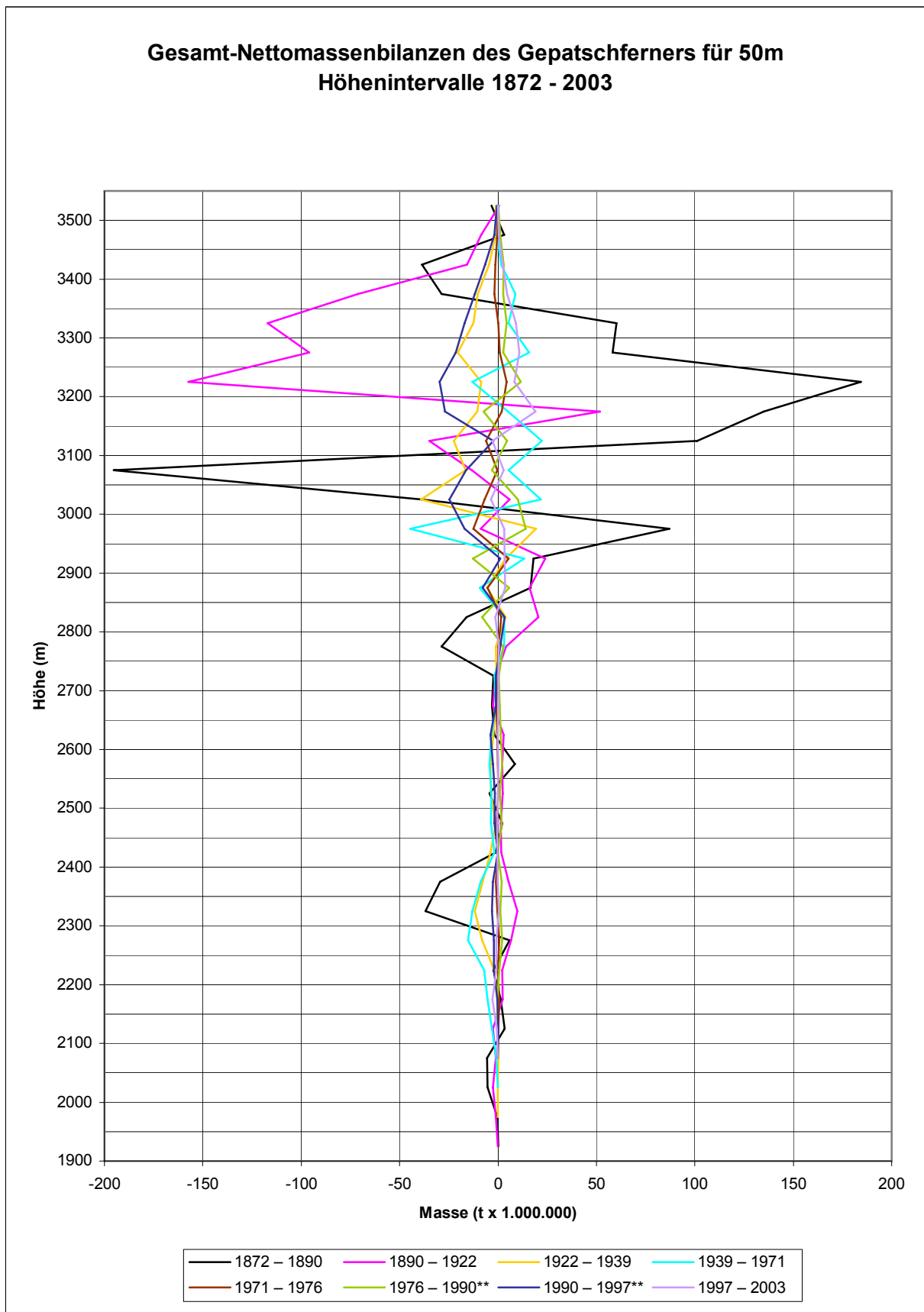


Abb. 5.4.3: Gesamt-Nettomassenbilanzen des Gepatschferners für 50m Höhenintervalle 1872 – 2003 (\*\* ohne Seitengletscher).



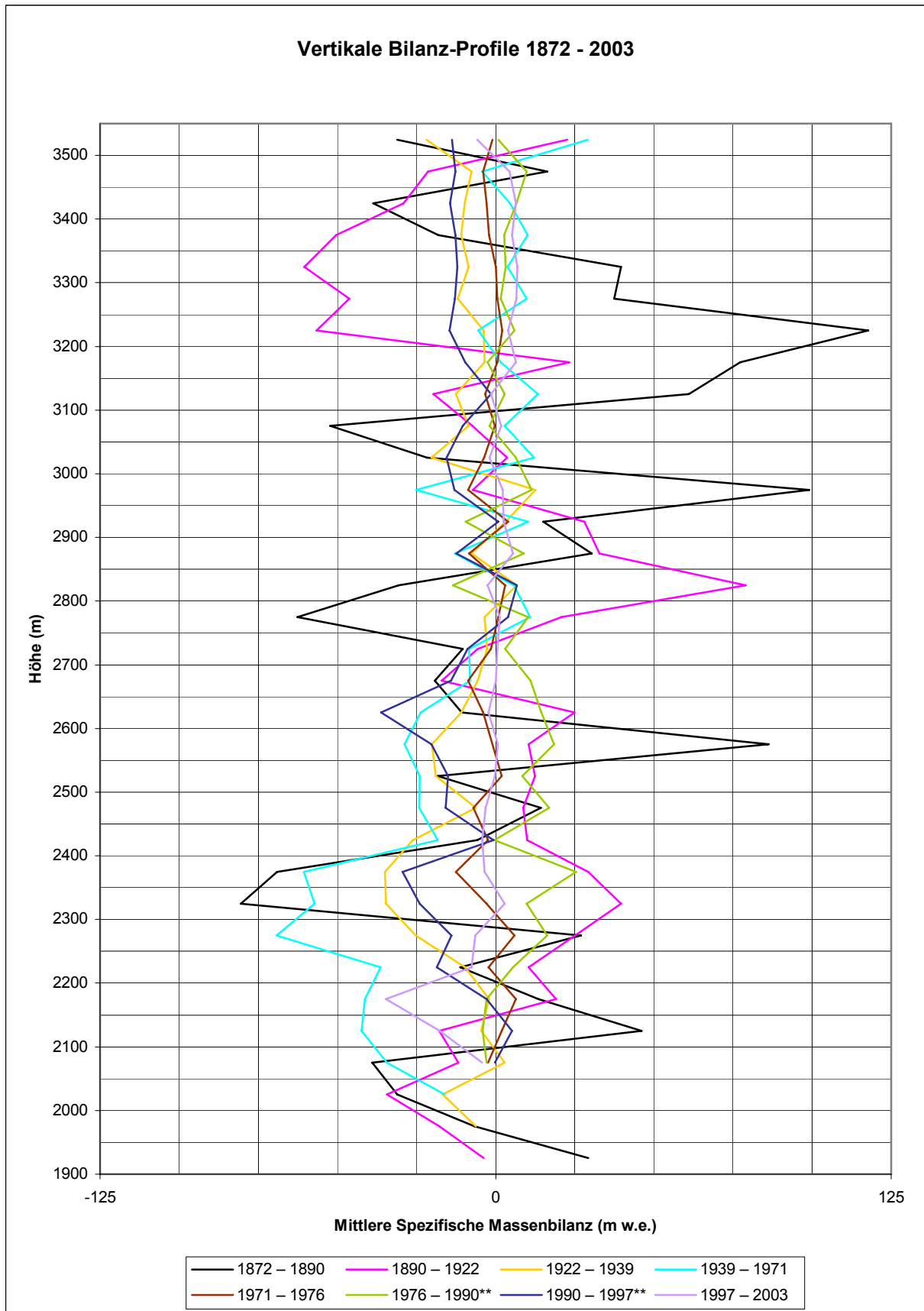


Abb. 5.4.4: Vertikale Bilanz-Profile des Gepatschferners 1872 – 2003 (\*\* ohne Seitengletscher).

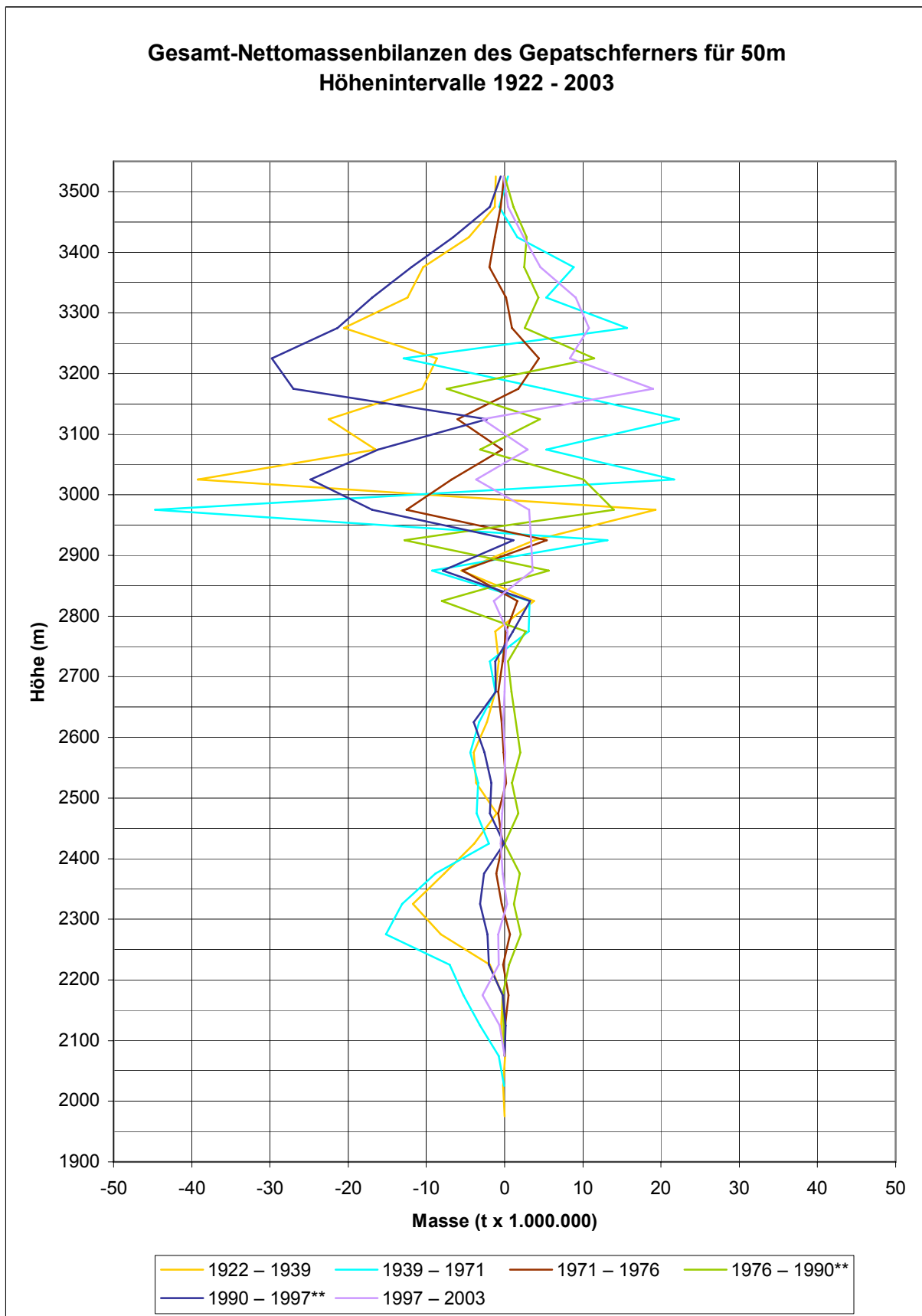


Abb. 5.4.5: Gesamt-Nettomassenbilanzen des Gepatschferners für 50m Höhenintervalle 1922 – 2003 (\*\* ohne Seitengletscher).

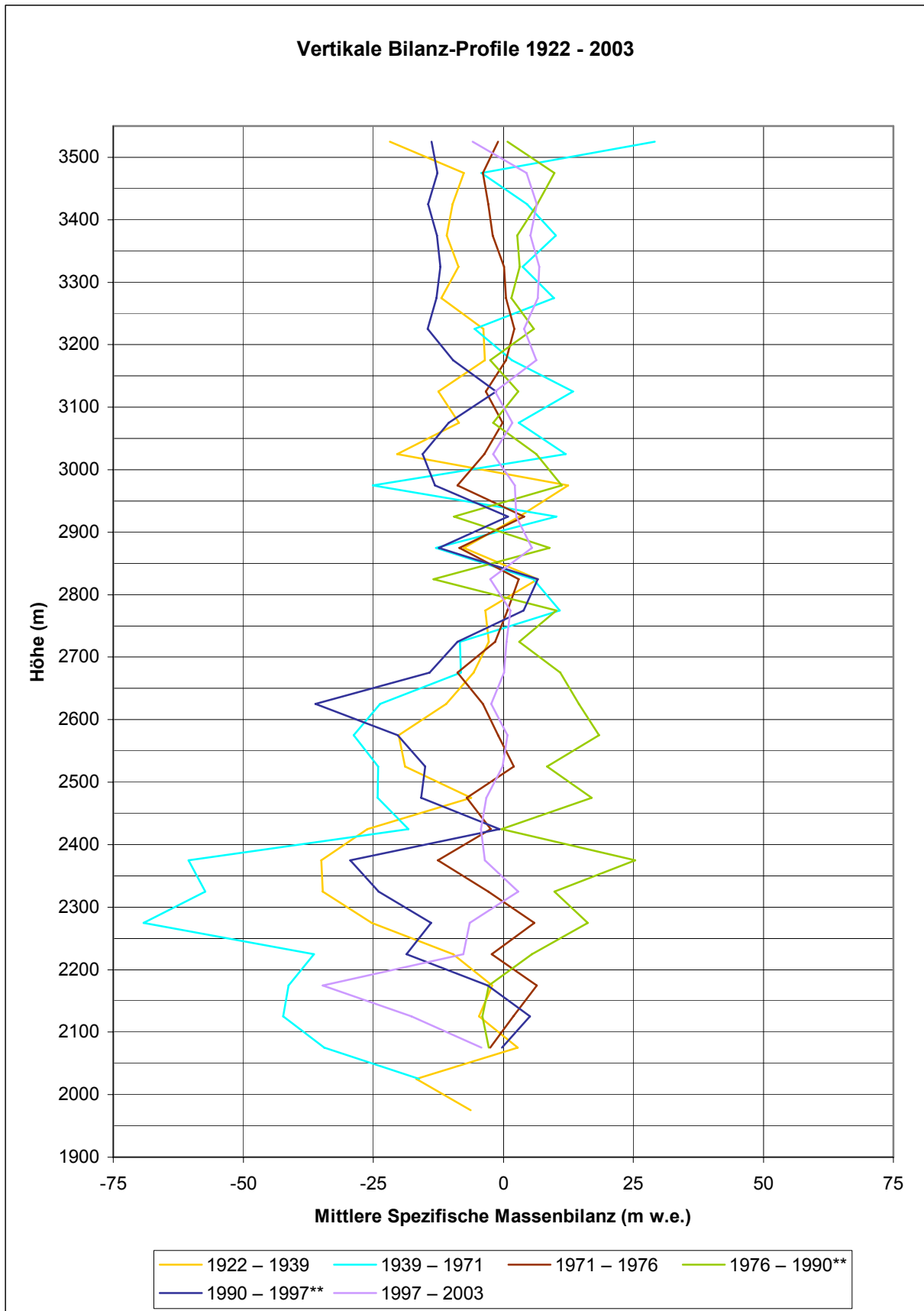


Abb. 5.4.6: Vertikale Bilanz-Profile des Gepatschferners 1922 – 2003 (\*\* ohne Seitengletscher).

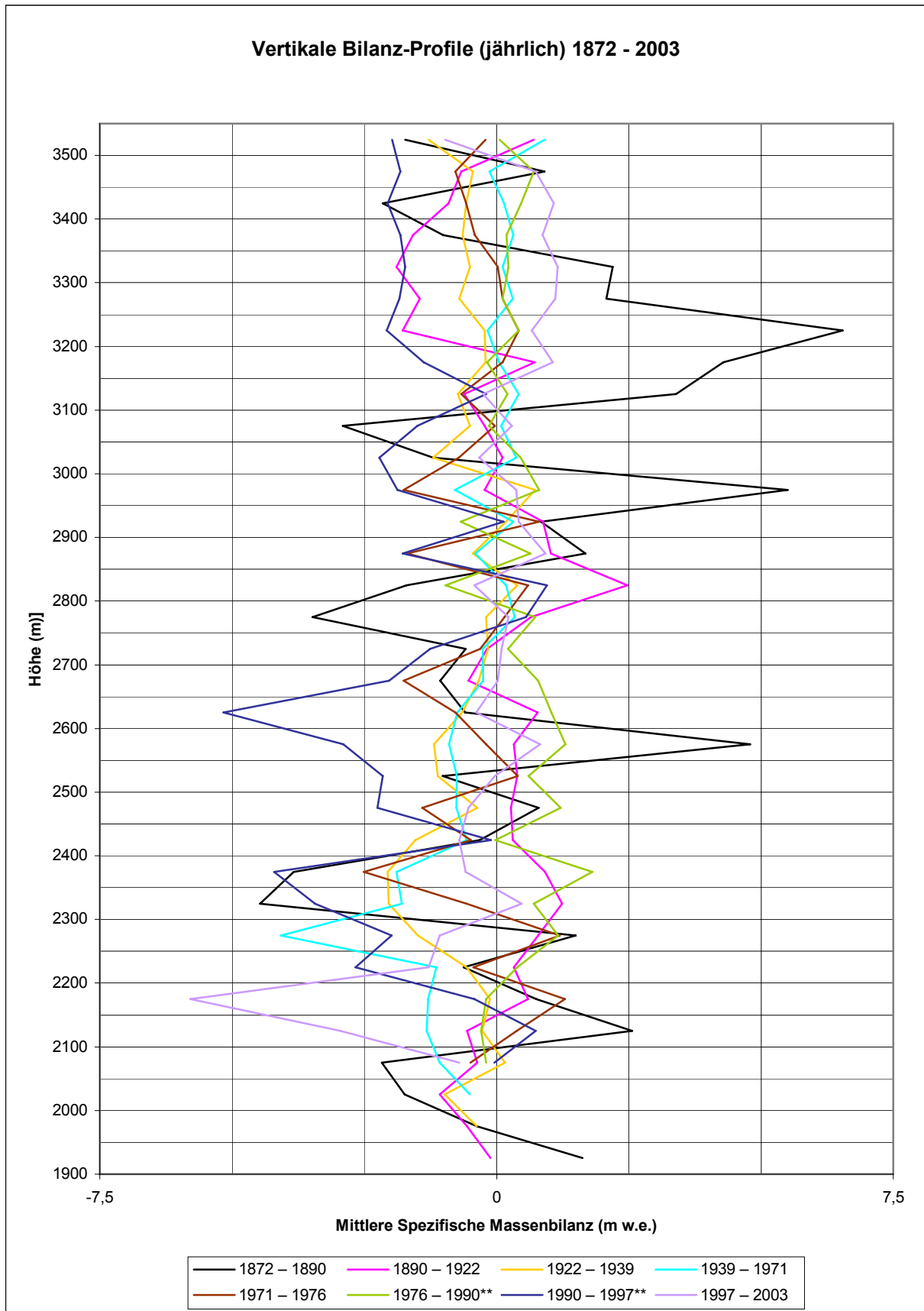


Abb. 5.4.7: Vertikale Bilanz-Profile (jährlich) des Gepatschferners 1872 – 2003 (\*\* ohne Seitengletscher).

Durch die unterschiedlich langen Zeitintervalle werden die Tendenzen in den VBP's verfälscht. Eine Umrechnung auf jährliche Intervalle verdeutlicht die tatsächlichen Tendenzen der einzelnen Zeitintervalle. Dabei muss beachtet werden, dass eine Umrechnung auf jährliche Werte nur Mittelwerte liefert, welche nicht mit den tatsächlichen jährlichen Bilanzen gleichzusetzen sind.

Auf diese Weise werden Bilanzen langer Zeitintervalle relativiert, wohingegen Bilanzen kürzerer Zeitintervalle deutlicher hervortreten. Auffällig sind die extremen Sprünge zwischen positiven und negativen Werten der VBP's von 1872 – 1890 und 1890 – 1922. Diese verdeutlichen die Unsicherheiten bei den errechneten Werten, welche durch die Ungenauigkeit der damaligen Kartenaufnahmen verursacht werden. In diesem Zusammenhang muss aber auch festgestellt werden, dass die Kartenaufnahme des AV (Gletscherstand 1890) deutlich bessere Höhenwerte liefert als die 3. LA (Gletscherstand 1872). Nachteilig wirkt sich aber aus, dass auch die AV Kartenaufnahme auf der fehlerhaften Geometrie der 3. LA aufbaut. Im Folgenden werden nun die VBP's jedes Zeitintervalls einzeln betrachtet.

**VBP 1872 – 1890:**

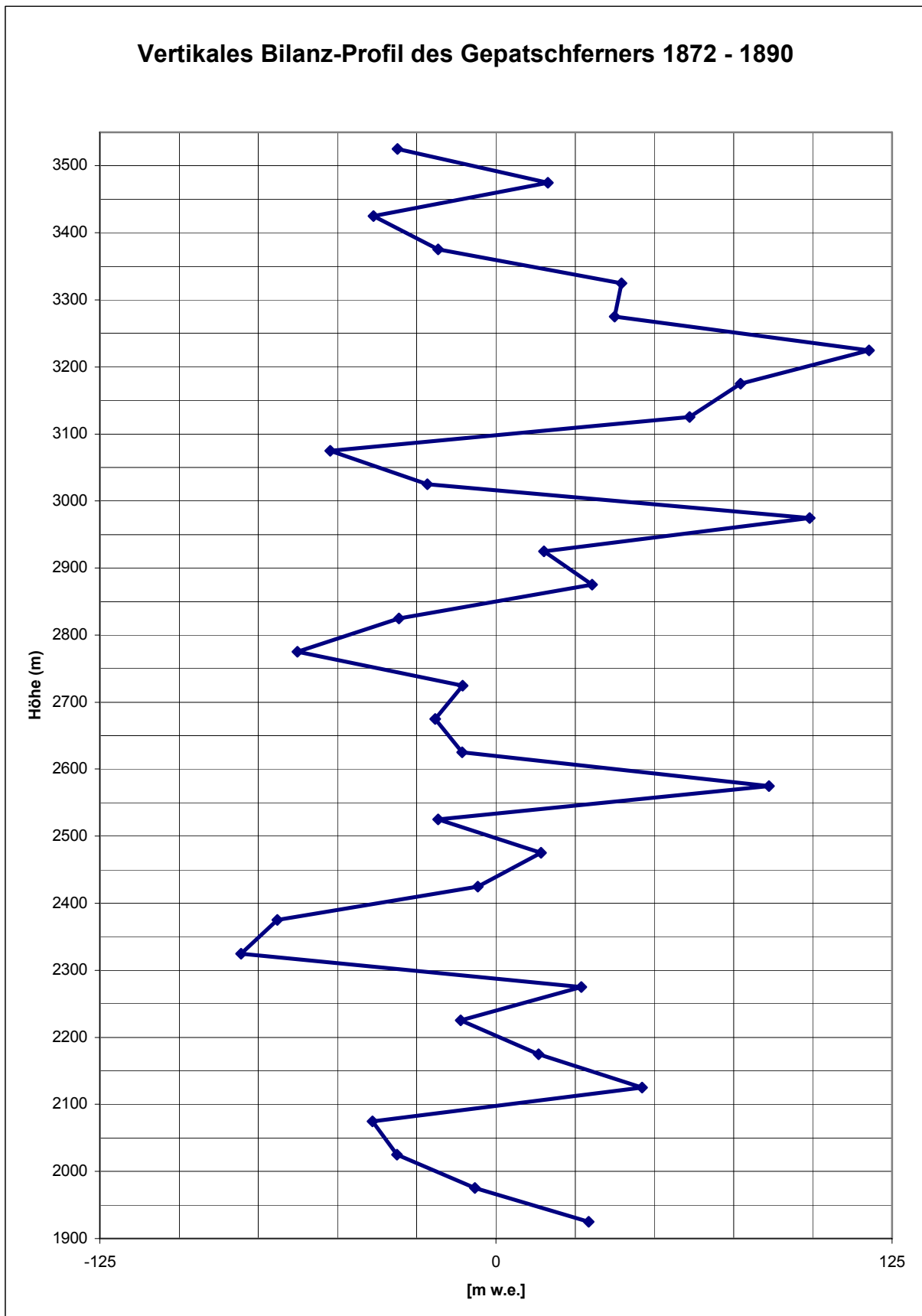


Abb. 5.4.8: Vertikales Bilanz-Profil des Gepatschferners 1872 – 1890.

Das VBP von 1872 – 1890 weist ein sehr uneinheitliches Bild auf. Dies ist teilweise auf die Ungenauigkeiten der Kartenaufnahmen zurückzuführen. Insgesamt kann aber eine negative Bilanz im Bereich der Gletscherzunge und eine positive Bilanz im Bereich des Firnbeckens abgeleitet werden. Dies würde gut zu der um 1890 einsetzenden Vorstoßphase des Gepatschferners passen. Einzelne positive wie negative Werte können auch durch Verschiebungen der Höhenintervalle verursacht worden sein.

### **ELA 1872 – 1890:**

Die Höhe der Gleichgewichtslinie kann aus dem vorliegenden VBP wegen des sehr heterogenen Gesamtbildes nur schwer abgeleitet werden. Deutet man einzelne negative Bilanzen im Bereich des Firnbeckens als Intervallverschiebungen und Ungenauigkeiten der Kartenaufnahmen, kann die ELA in einer Höhe von etwa 2850 m angesetzt werden.

### **AAR 1872 – 1890:**

Aus der angenommenen ELA von 2850 m Höhe ergibt sich eine AAR von 0.8218.

**VBP 1890 – 1922:**

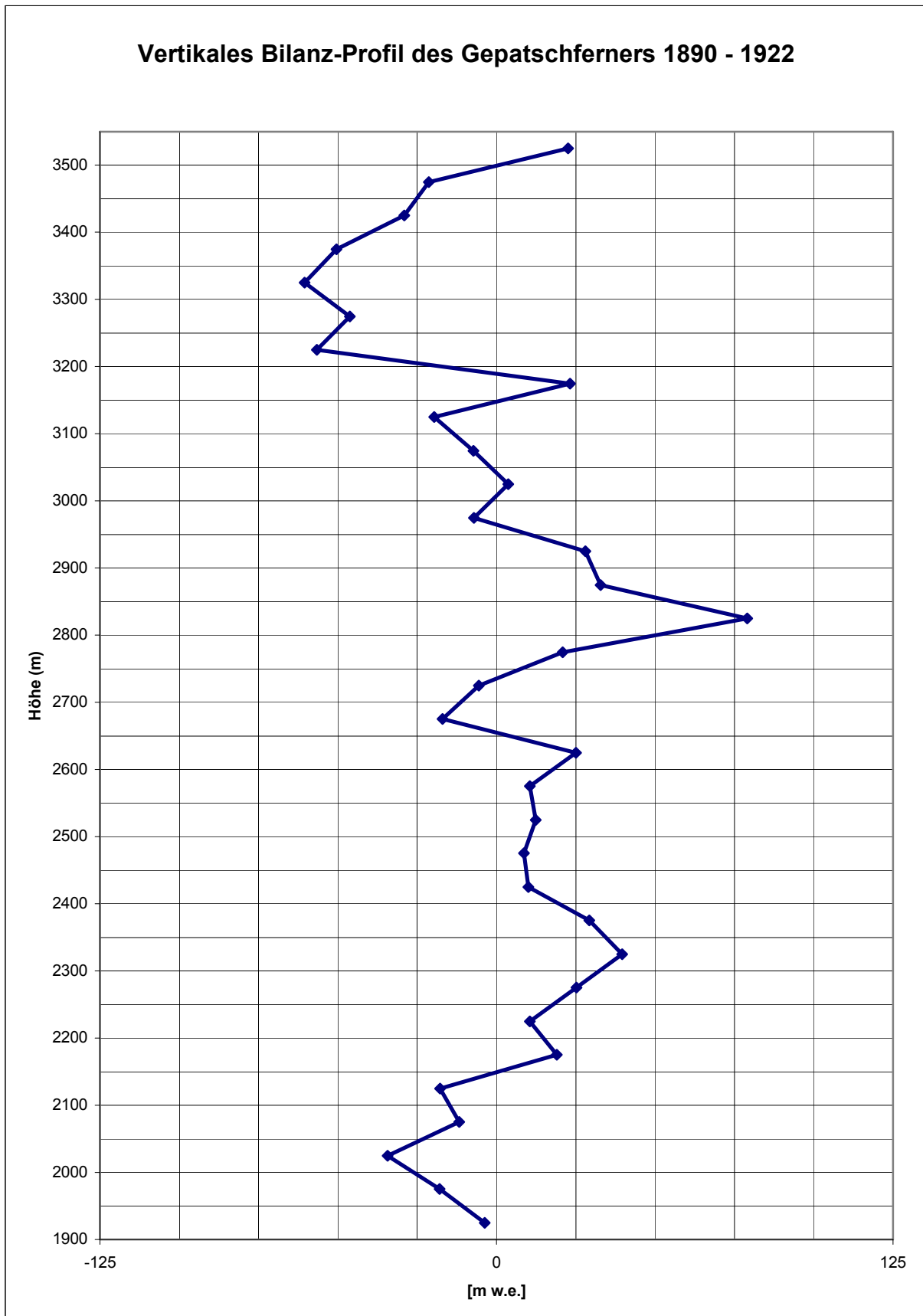


Abb. 5.4.9: Vertikales Bilanz-Profil des Gepatschferners 1890 – 1922.



Auch das VBP von 1890 – 1922 weist ein recht heterogenes Gesamtbild auf. Die positive Bilanz im oberen Bereich der Gletscherzunge könnte auf die Vorstoßphase zu Anfang der 1920er Jahre zurückzuführen sein. Die deutlich negative Bilanz im oberen Bereich des Firnbeckens könnte aber bereits auf das Ende dieser Vorstoßphase hinweisen. Die positiven Massenbilanzen unterhalb von 3000 m Höhe werden von den negativen Massenbilanzen oberhalb 3000 m bei weitem übertroffen. Erst ab 3500 m Höhe ergibt sich wieder eine positive Bilanz.

### **ELA 1890 – 1922:**

Die ELA lässt sich nur schwer aus dieser Konstellation ableiten. Da die Gesamt Nettomassenbilanz aber deutlich negativ ist, kann man von einer Rückzugsphase in diesem Zeitraum ausgehen. Die ELA kann daher in einer Höhe von 3500 m angesetzt werden.

### **AAR 1890 – 1922:**

Aus dem sehr kleinen Nährgebiet, definiert durch die ELA von 3500 m Höhe, ergibt sich eine AAR von 0.0011.

**VBP 1922 – 1939:**

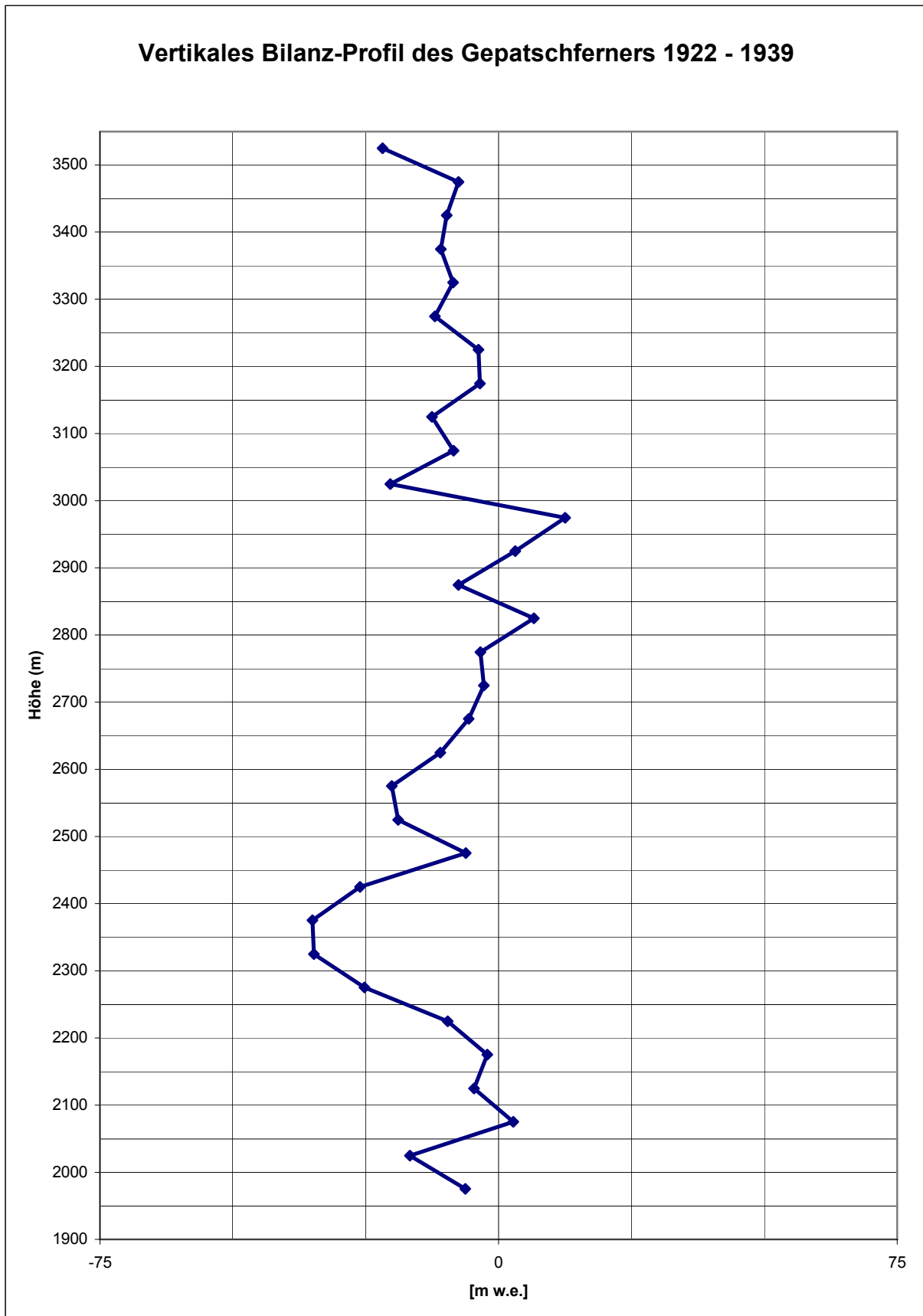


Abb. 5.4.10: Vertikales Bilanz-Profil des Gepatschferners 1922 – 1939.

Bis auf wenige Höhenintervalle weist das VBP von 1922 – 1939 eine durchweg negative Massenbilanz auf. Diese wenigen positiven Massenbilanzen können teilweise auf die Verschiebung von Intervallflächen und die Bewegung des Eises in Kombination mit der Orographie des Gletscherbetts zurückzuführen sein.

**ELA 1922 – 1939:**

Da sich die negativen Massenbilanzen des VBP bis in die höchsten Regionen des Gletschers hinziehen, ist die ELA außerhalb der Höhenerstreckung des Gletschergebietes zu vermuten, also höher als 3550 m. Der Gepatschferner befand sich zwischen 1922 und 1939 vollständig im Rückzug.

**AAR:**

Da sich die ELA für den Zeitintervall von 1922 bis 1939 außerhalb der Höhenerstreckung des Gepatschfernens befand, kann kein Nährgebiet definiert werden. Dementsprechend ergibt sich eine AAR von 0.

**VBP 1939 – 1971:**

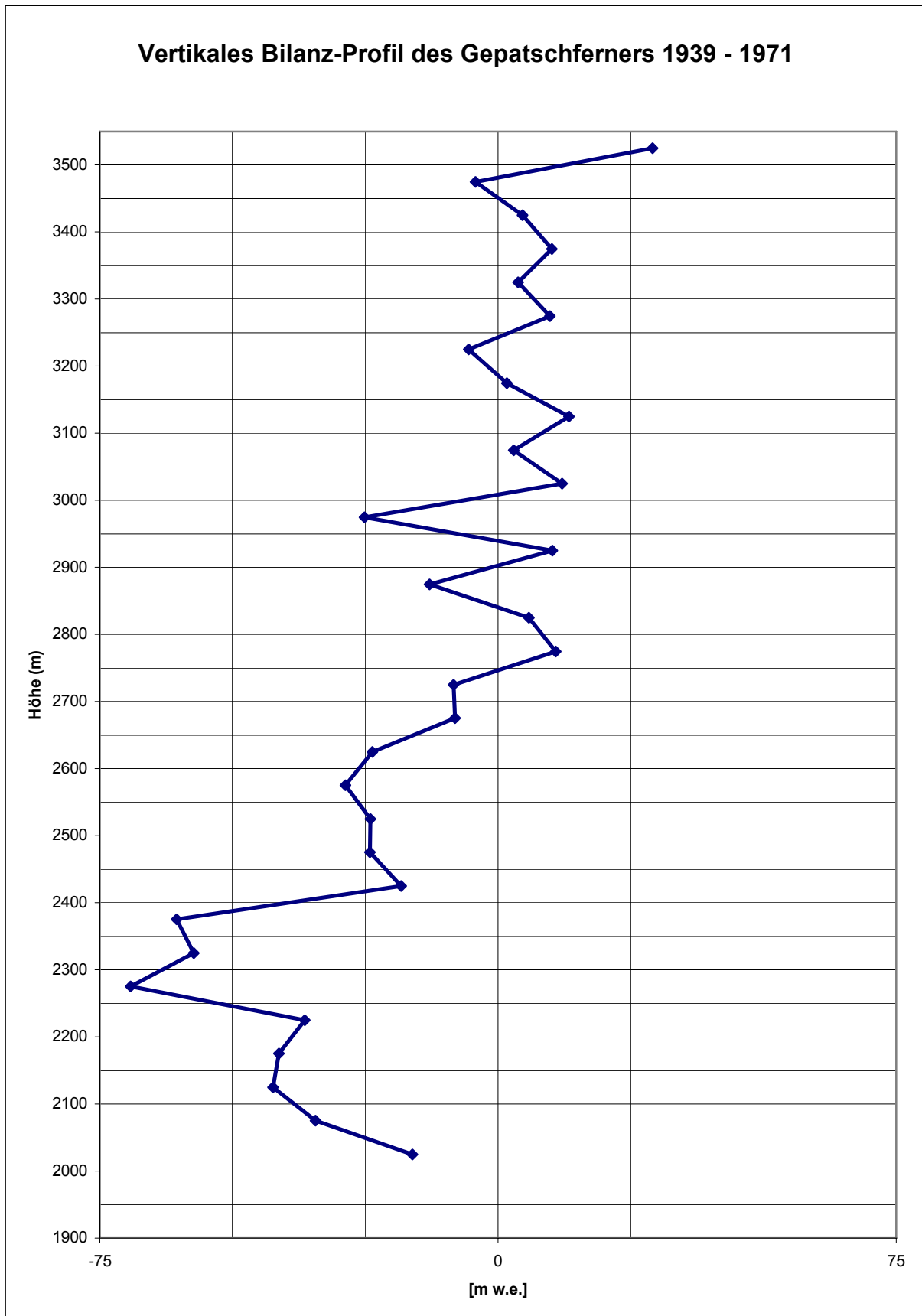


Abb. 5.4.11: Vertikales Bilanz-Profil des Gepatschferners 1939 – 1971.

Das VBP 1939 – 1971 weist eine deutliche Zweiteilung auf. Während sich der Zungenbereich weiterhin im Rückzug befindet, ist eine deutliche Massenzunahme des Firnbeckens erkennbar. Nach FINSTERWALDER, RÜ. (1976) begann die Aufhöhung des Firnbeckens bereits in den frühen 1950er Jahren. Einzelne negative Ausreißer in diesem Bereich sind vermutlich wieder auf die Verschiebung von Höhenintervallen und der Bewegung der Eismassen zurückzuführen.

**ELA 1939 – 1971:**

Die ELA für den Zeitraum 1939 – 1971 kann verhältnismäßig eindeutig auf eine Höhe von 2750 m definiert werden. Einzelne negative Massenbilanzen, welche sich in höher gelegenen Bereichen befinden, können durch die positiven Massenbilanzen der Nachbarintervalle ausgeglichen werden. Diese Bereiche liegen im Gebiet der relativ flachen Wurzel der Hauptzunge. Bereits geringe Änderungen der Höhe können hier zu deutlichen Flächenänderungen der Höhenintervalle führen.

**AAR 1939 - 1971:**

Aus der ELA von 2750 m ergibt sich eine AAR von 0.9039.

**VBP 1971 – 1976:**

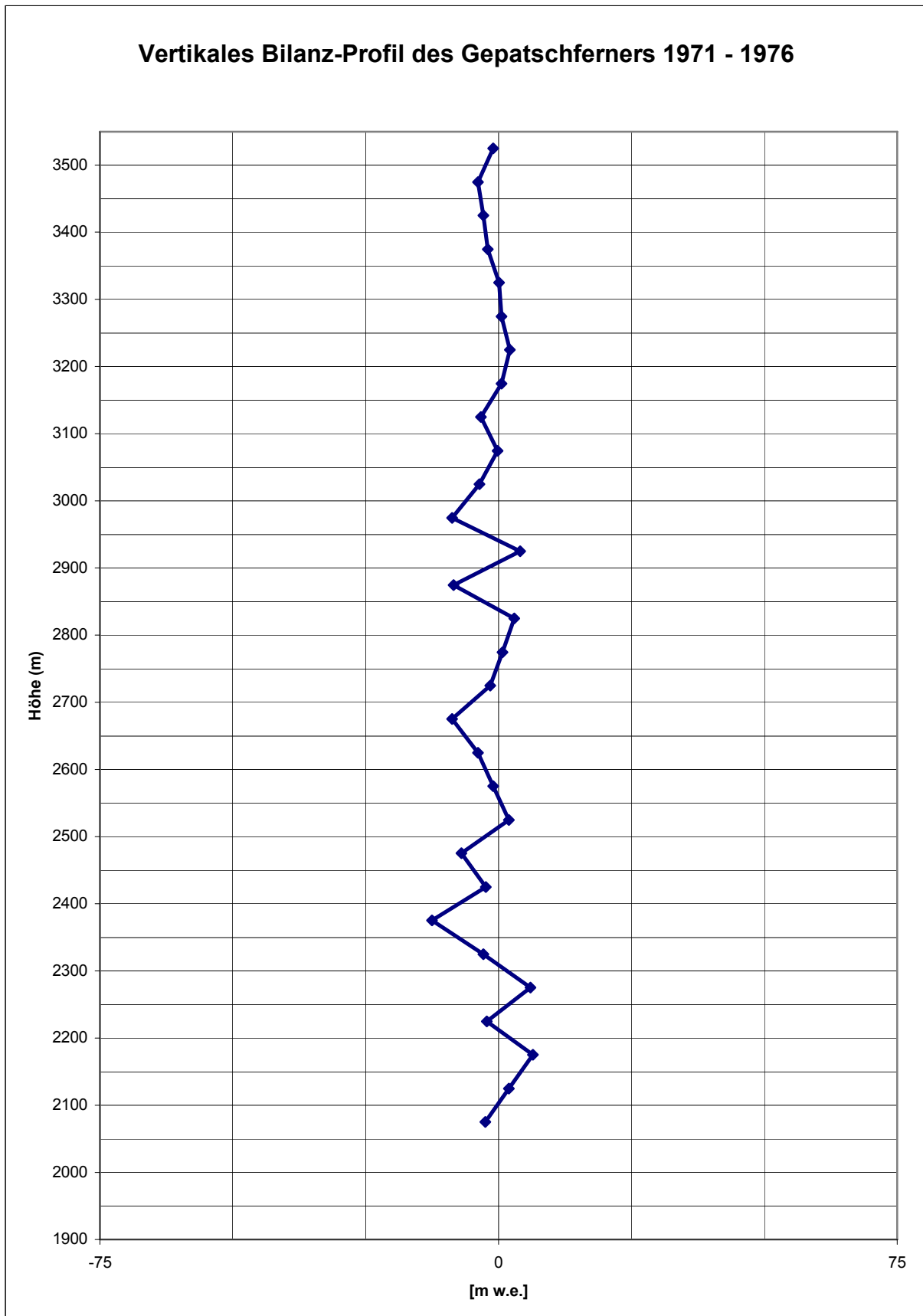


Abb. 5.4.12: Vertikales Bilanz-Profil des Gepatschferners 1971 – 1976.

Das VBP für die Jahre 1971 – 1976 weist ein sehr heterogenes Gesamtbild auf. Gewisse Ungenauigkeiten können durch den unterschiedlichen Maßstab der Kartengrundlagen verursacht worden sein (1971: 1:10000; 1976: 1:50000). Das Jahr 1976 war allerdings durch eine ausgeprägte Hitzeperiode mit geringen Niederschlägen und einer entsprechend starker Ausaperung sowie dem daraus resultierenden Angriff auf die Masse der Gletscher geprägt. So können diese negativen Massenbilanzen auch als kurze Schwächephase während der allgemeinen Vorstoßphase gedeutet werden.

**ELA 1971 – 1976:**

Von 1971 – 1976 weist der Gepatschferner eine minimal negative Gesamt Nettomassenbilanz auf. Selbst in den höchsten Regionen treten negative Bilanzen auf. Diese umfassen aber nur einen geringen Massenverlust, so dass sie von den Massenzunahmen niedrigerer Höhenintervalle ausgeglichen werden können. Dies ist aber nur bis in eine Höhe von etwa 3150 m möglich. So sollte auch die ELA in einer Höhe von 3150 m angesetzt werden.

**AAR 1971 – 1976:**

Durch die auf 3150 m angesetzte ELA ergibt sich eine AAR von 0.4702.

**VBP 1976 – 1990 (Auswertung ohne Seitengletscher):**

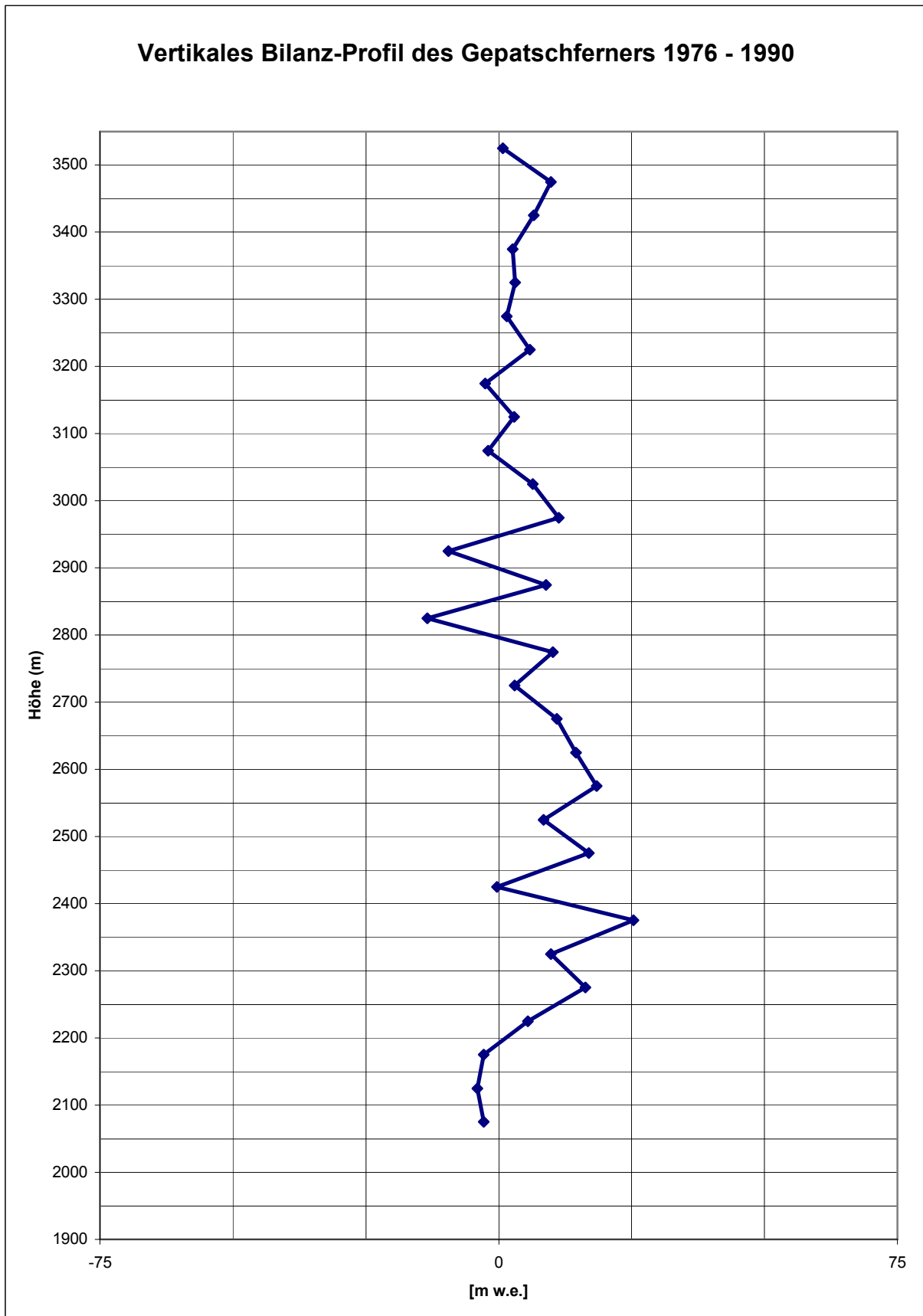


Abb. 5.4.13: Vertikales Bilanz-Profil des Gepatschferners 1976 – 1990.



Bis auf wenige Ausnahmen weist das VBP 1976 – 1990 eine durchgehend positive Massenbilanz auf. Ab 1977 befand sich die Zunge des Gepatschferners wieder im Vorstoß. Diese Phase endete 1988, so dass sich die Gletscherzunge im Jahr 1990 bereits wieder im Rückzug befand. Die positive Massenbilanz der Gletscherzunge deckt sich mit den Ergebnissen von KEUTTERLING (1998). KEUTTERLING errechnete aber von 1971 – 1990 eine insgesamt negative Massenbilanz für den Gepatschferner. Auch RÜ. FINSTERWALDER (1980 und 1991/92) stellte von 1971 – 1979 eine leichte Aufhöhung und von 1979 - 1990 ein deutliches Einsinken im Bereich des Firnbeckens fest. Zur Kontrolle der Ergebnisse wurde ein DHM für die Oberflächenänderung von 1971 – 1990 erstellt (siehe Abb. 6.3 in Kap. 6). Im Vergleich zu der Höhenänderungskarte des Gepatschferners von 1971 – 1990 aus der Arbeit von KEUTTERLING (1998) zeigt dieses DHM nahezu das gleiche Verteilungsmuster von eingesunkenen und aufgehöhten Gebieten. Trotzdem wurde eine positive Massenbilanz errechnet. Die Ursache dieser Diskrepanz zu den Ergebnissen KEUTTERLINGS und RÜ. FINSTERWALDERS konnten bislang nicht geklärt werden.

**ELA 1976 – 1990:**

Die ELA für den Zeitraum 1976 – 1990 kann in einer Höhe von 2200 m angesetzt werden. Die wenigen Höhenintervalle mit negativer Massenbilanz, welche sich oberhalb der ELA befinden, können problemlos durch die positive Massenbilanz der Nachbarintervalle ausgeglichen werden. Wegen den oben genannten Gründen, bestehen aber Unsicherheiten bezüglich der Festlegung der ELA.

**AAR 1976 – 1990:**

Die AAR von 0.9937 ergibt sich aus der ELA von 2200 m.

**VBP 1990 – 1997 (Auswertung ohne Seitengletscher):**

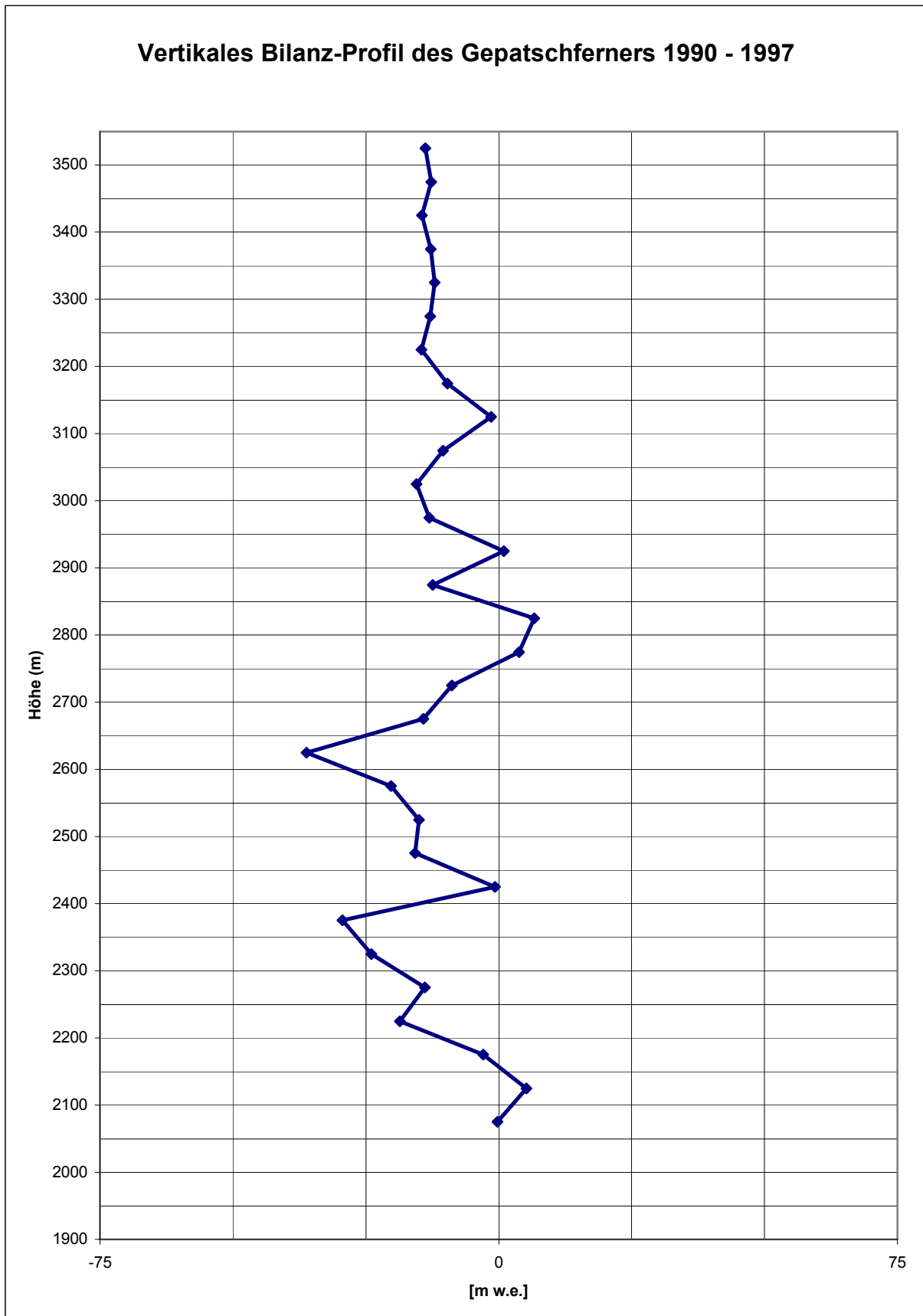


Abb. 5.4.14: Vertikales Bilanz-Profil des Gepatschferners 1990 – 1997.

Das VBP 1990 – 1997 weist eine nahezu durchgehend negative Massenbilanz auf. Die wenigen Höhenintervalle mit positiver Massenbilanz können wiederum teilweise von Intervallverschiebungen und der Bewegung der Eismassen verursacht worden sein. Der dramatische Massenverlust ist auf eine überdurchschnittlich warme und trockene Klimaphase in den 1990er Jahren zurückzuführen.

Allerdings bestehen gewisse Unsicherheiten bezüglich der tatsächlichen Masse des Gepatschferners im Jahr 1990. Nach den Ergebnissen von KEUTTERLING und RÜ. FINSTERWALDER könnte die Masse niedriger gewesen sein als die von mir errechnet. So würde der Massenverlust von 1990 – 1997 weniger dramatisch ausfallen.

### **ELA 1990 – 1997:**

Wegen der durchweg negativen Massenbilanz des VBP's bis in die Höhenlagen des Gepatschferners, muss die ELA außerhalb der Höhenerstreckung des Gepatschferners angesetzt werden. So befindet sich die ELA jenseits von 3550 m Höhe.

### **AAR 1990 – 1997:**

Ein Nährgebiet für den Zeitraum 1990 – 1997 kann nicht definiert werden, da sich die ELA jenseits von 3550 m Höhe befindet. Daraus ergibt sich eine AAR von 0.

**VBP 1997 – 2003:**

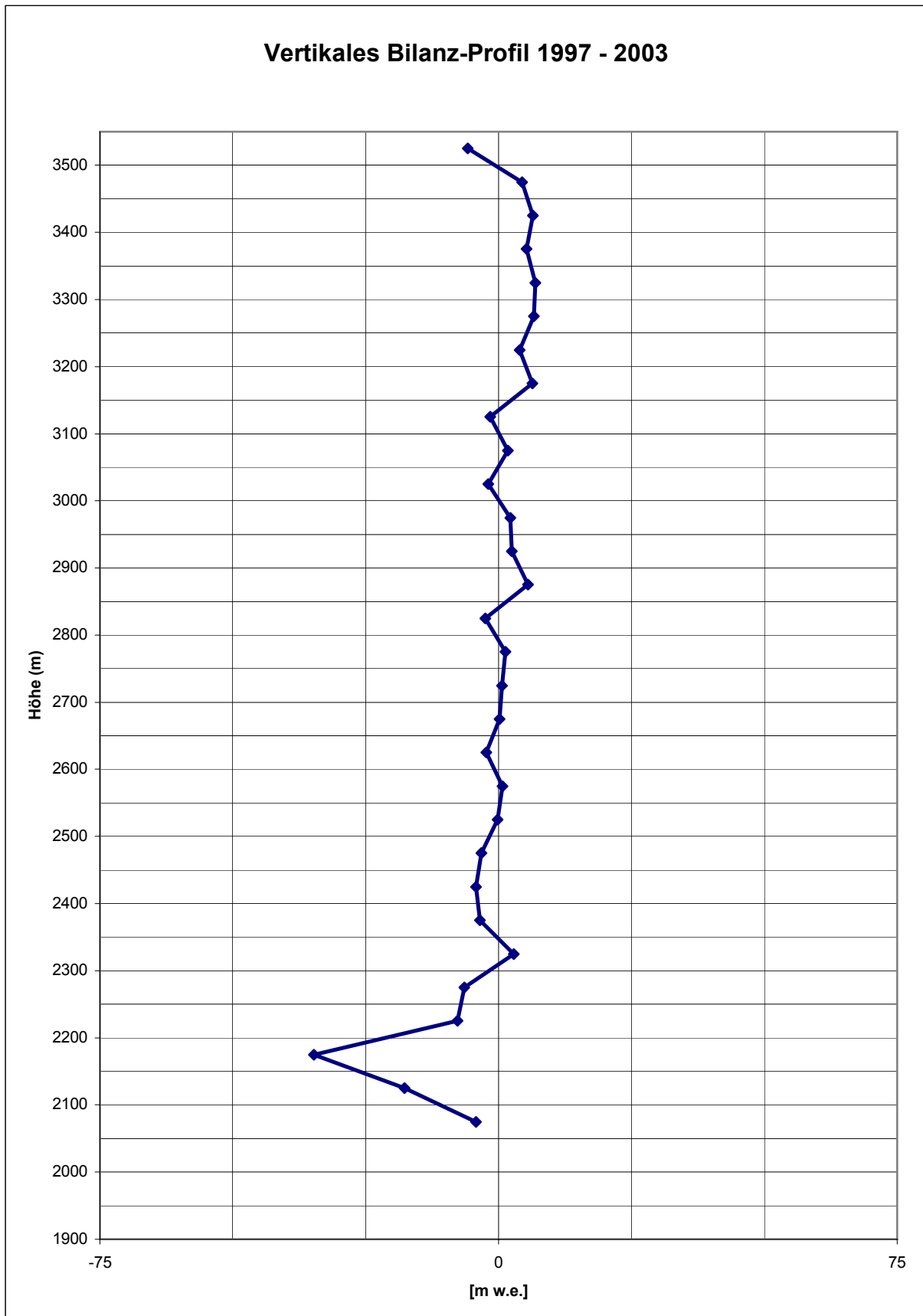


Abb. 5.4.15: Vertikales Bilanz-Profil des Gepatschferners 1997 – 2003.

Trotz des sehr warmen und trockenen „Jahrhundertssommers“ im Jahr 2003 weist das VBP des Gepatschferners für die Jahre 1997 – 2003 im Bereich über 2500m eine, wenn auch minimale, nahezu durchgehend positive Massenbilanz auf. Der untere Bereich der Gletscherzunge dagegen weist eine überdurchschnittlich negative Massenbilanz auf, welche mit Sicherheit auf das extrem warme und trockene Jahr 2003 zurückzuführen ist. Auffallend ist auch die negative Massenbilanz über 3500m. Allerdings bestehen gewisse Zweifel bezüglich des italienischen Teils des Gepatschferners da nicht geklärt werden konnte, welchen Gletscherstand die dortigen Höhenlinien repräsentieren. Ein größerer Teil der Massenzunahme findet sich aber gerade in diesem Bereich (siehe Kartenbeilage „Höhenänderungen des Gepatschferners 1890 – 2003“).

**ELA 1997 – 2003:**

Wie schon bei den VBP's der vergangenen Zeitintervalle, weist auch das VBP für die Jahre 1997 – 2003 keine idealisierte Bilanzverteilung auf. Dies scheint typisch für den Gepatschferner zu sein. Ab einer Höhe von 2650m ist die Tendenz der Massenbilanz allerdings eindeutig positiv. Die einzelnen negativen Massenbilanzen über 2650m Höhe können durch verschiedene Mechanismen erklärt werden. So könnte die Orographie des Gletscherbetts in Zusammenhang mit der Bewegung des Gletschers eine Rolle spielen. Auch die Verschiebung von Höhenintervallen in Folge der Aufhöhung der Gletscheroberfläche könnte eine Ursache sein. Verrechnet man anhand der Gesamt Nettomassenbilanz (siehe Tab. A 5.4.3b) die negativen Bilanzen der betreffenden Höhenintervalle mit den positiven Bilanzen der Nachbarintervalle, lassen sich diese ausgleichen. Die ELA kann daher in einer Höhe von etwa 2650m angesetzt werden.

**AAR 1997 – 2003:**

Die AAR für den Zeitraum 1997 – 2003 von 0.9495 ergibt sich aus der ELA von 2650 m Höhe.



## 5.5 Visualisierung der Ergebnisse

Neben der Darstellung von Ergebnissen in Form von Zahlen, Tabellen und Diagrammen bieten die heutigen Geographischen Informationssysteme auch die Möglichkeit Ergebnisse zweidimensional und dreidimensional zu präsentieren. Gerade bei Daten mit Raumbezug verbessern diese die Anschaulichkeit der Ergebnisse.

### **Zweidimensionale Visualisierung:**

Eine zweidimensionale Darstellung von Daten mit Raumbezug ist die klassische Darstellungsweise der Kartographie. Im Falle dieser Arbeit könnten so Höhenschichtpläne der Gletscherstände und des Geländes erstellt werden. Dies wäre aber weniger sinnvoll, da sie im Wesentlichen den Höhenlinien der topographischen Karten entsprechen, welche die Grundlage dieser Daten darstellen.

Eine zweidimensionale Darstellung erscheint eher sinnvoll, wenn die Ausdehnungen verschiedener Gletscherstände miteinander verglichen werden sollen. Dies kann in Form von Ausdehnungsgrenzen und Flächenpolygonen erfolgen.

Beim Vergleich der Gletschergrenzen des Gesamtgletschers, sollte die Größe der Abbildung größer ausgewählt werden als beim Vergleich der Gletscherzunge, da im Bereich des Firnbeckens nur relativ geringe Unterschiede sichtbar sind. So kommt es bei kleineren Abbildungen zum Überlagern von Grenzlinien, welche dann kaum noch unterscheidbar sind. Wegen der deutlich größeren Schwankungen der Ausdehnung der Gletscherzunge, kann hier schon mit einer geringeren Kartengröße ein gutes Ergebnis erzielt werden. Als Beispiele dieser Art der Ergebnispräsentation dienen die Karten der Ausdehnung der Gletscherzunge des Gepatschferners und des Nährgebietes mit der ELA des Gepatschferners. Auch die verschiedenen kleinen Kartenabbildungen in Kap. 2, 3 und 4 sind der zweidimensionalen Visualisierung zuzurechnen.

### **Dreidimensionale Visualisierung:**

Ganz genau genommen würde nur ein plastisches, räumliches Geländemodell einer echten dreidimensionalen Visualisierung entsprechen. Man spricht aber auch bei eigentlich zweidimensionalen Abbildungen, welche durch Belichtung und Schattierung einen dreidimensionalen Effekt erzielt, von einer dreidimensionalen

Visualisierung. Diese Darstellungsweise ist nicht neu. So wurden beispielsweise schon gegen Ende des 19. Jahrhunderts in der Schweiz und später auch im Alpenverein Gebirgskarten mit einer Schummerung versehen, die ein erstaunlich plastisches Gesamtbild ergaben (siehe dazu Abb. 3.2.2).

Das Computerzeitalter bietet dazu noch weitere Möglichkeiten der dreidimensionalen Darstellungsweise. TIN Geländemodelle lassen sich nicht nur in ArcGIS mit entsprechender 3D Schattierung darstellen, sondern auch in ArcScene als frei rotierbare Geländedarstellungen im Raum (siehe dazu Abb. 4.3.1 – 4.3.4).

Da es nicht sinnvoll erscheint, solche 3D Ansichten aus ArcScene in gedruckter Form zu präsentieren, liegen diese TIN-Geländemodelle dieser Arbeit auf DVD bei.

Zweckmäßiger ist es dagegen, die dreidimensionale Darstellungsweise der TIN's in ArcGIS für die Erstellung von Karten zu nutzen. Gegenüber herkömmlichen topographischen Karten wirken diese Darstellungen deutlich plastischer und dadurch realistischer. Aufgrund dieser Überlegungen entstanden die beiden großen Kartenbeilagen der Gletscherstände des Gepatschferners 1872 – 2003 und der Eisdicke des Gepatschferners 1872 – 2003.

Solche TIN's können in verschiedener Art und Weise präsentiert werden. So kann das Gelände und die Gletscherfläche jeweils einfarbig gestalten werden, aber auch mit einer Höhenschichtung mit verschiedenen Farbabstufungen wiedergegeben werden. Gletschergrenzen lassen sich ebenfalls farblich hervorheben. Ein weiterer Vorteil dieser Darstellungsweise ist die Projektions- und Maßstabstreue, welche bei Abbildungen aus ArcScene nicht gewährleistet ist.

Mit Hilfe von TIN-Geländemodellen lässt sich auch die Zuverlässigkeit der DHM's und der Kartengrundlagen überprüfen. Bezieht man beispielsweise die Gletschergrenzen bei der Erstellung der TIN-Modelle des Geländes mit ein, lassen sich diese später in ArcScene farblich absetzen. Nun kann anhand dieser Grenzen überprüft werden, ob die Höhen der entsprechenden TIN-Modelle der Gletscherstände den Höhen der Grenzen entsprechen. Im Fall des Gepatschferners ergab sich mit dieser Methode eine sehr gute Übereinstimmung bei den Gletscherständen ab 1922, aber auch eine schlechte Übereinstimmung des Gletscherstandes 1872. Der Gletscherstand 1890 weist brauchbare Höhen auf, leidet jedoch unter der fehlerhaften Geometrie der Kartengrundlage.



**Kartenbeilage „Gletscherstände des Gepatschferners 1872 – 2003“:**

Alle 9 bearbeiteten Gletscherstände werden in Form von TIN's in dieser Kartenbeilage präsentiert. Die TIN's des Geländes sind mit einer 100 m Höhengschichtung in Brauntönen dargestellt. Die Darstellung der Gletscherflächen erfolgt ebenfalls in einer 100 m Schichtung, in diesem Fall aber in einer pastellfarbenen Abstufung von rot, gelb, grün und blau. Über der Gletscherfläche werden Höhenlinien in 50 m Schichtabständen dargestellt. Die 100 m Höhenlinien sind dabei dicker dargestellt und mit Höhenangaben versehen.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde auf die Darstellung von Höhenlinien im Bereich des Geländes verzichtet. Der Abstand der Höhenlinien von 50 m wurde ausgewählt, da auch die Auswertung der vertikalen Massenverteilung in 50 m Schritten erfolgte. Die farbliche Höhengschichtung wurde dagegen in 100 m Schritten vollzogen, da bei 50 m Schritten kaum noch ein farblicher Unterschied erkennbar wäre.

Über die Kartenabbildungen wurde ein Netz aus Koordinatenkreuzen gelegt. Diese zeigen österreichische Gauß-Krüger Koordinaten im Meridianstreifen M 28 an. Die Abstände zwischen den Koordinatenkreuzen betragen in der Länge und der Breite jeweils 1000 m. Die einzelnen Kartenabbildungen sind dabei in einem Maßstab von 1:50000 dargestellt.

Am unteren Rand des Kartenblatts befinden sich neben der Legende auch Erläuterungen zu den Kartengrundlagen, der Projektion und dem Bearbeiter. Eine Maßstabsangabe und eine Maßstabsleiste vervollständigen das Kartenblatt.

**Kartenbeilage „Eisdicke des Gepatschferners 1872 – 2003“:**

Diese Kartenbeilage entstand als Abwandlung aus der oben beschriebenen Kartenbeilage. Bereits Erwähntes gilt also auch für diese Kartenbeilage. Dargestellt werden die TIN's der Eisdicke der 9 bearbeiteten Gletscherstände. Die Höhengschichtung erfolgt dabei in 25 m Schritten. Der positive Bereich wird in blau (0 – 100 m), violett (100 – 200 m) und rotviolett (> 200 m) dargestellt, während negative Bereiche in gelb (0 - -100 m) bis rot (< - 100 m) gehalten sind. Dazu ist anzumerken, dass die negativen Werte der Eisdicke auf Fehler in den Kartengrundlagen zurückzuführen sind. Diese entsprechen nicht der Realität, sondern sollen einen Eindruck über die fehlerhaften Bereiche der Kartenaufnahmen vermitteln. Auf die

Darstellung von Höhenschichtlinien wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

### **Kartenbeilage „Höhenänderungen des Gepatschferners 1890 – 2003“:**

Um die tatsächliche Änderung der Höhe des Gepatschferners sichtbar zu machen, entstand die Kartenbeilage Höhenänderungen des Gepatschferners 1890 – 2003. Wegen der schlechten Qualität der Kartenaufnahme von 1872 wurde ein Vergleich mit dieser Aufnahme weggelassen. Aber auch die Höhenänderung von 1890 – 1922 leidet an der Fehlerhaftigkeit der AV-Karte Ausg. 1893. Die bereits angesprochenen unnatürlichen Zuwachs- bzw. Verlusten in manchen Teilbereichen können so aber sehr gut sichtbar gemacht werden.

Die Höhenänderungen sind farblich dargestellt. Bis +25 und -25 m wurden 5 m Intervalle gewählt. Die Bereiche unter -25 m und über +25 m dagegen wurden in jeweils einen Intervall zusammengefasst. Dabei wurden möglichst auffällige Farben ausgewählt. Eingesunkene Bereiche werden mit gelben und roten Farbtönen dargestellt, wohingegen Bereiche mit Höhenzuwachsen in blauen und violetten Farbtönen dargestellt werden.

Die einzelnen Kartenabbildungen sind im Maßstab 1:50000 gehalten. Das Netz aus Koordinatenkreuzen, welche in der Länge und der Breite einen Abstand von je 1000 m aufweisen, zeigt österreichische Gauß-Krüger Koordinaten im Meridianstreifen M 28 an.

Die üblichen Angaben zu den Kartengrundlagen, der Projektion, dem Maßstab und dem Kartenbearbeiter vervollständigen neben der Legende und einer Maßstabsleiste das Kartenblatt.

### **Kartenbeilage „Ausdehnung der Zunge des Gepatschferners 1850 – 2003“:**

Aufgrund der deutlichen Veränderung der Ausdehnung der Zunge des Gepatschferners im Zeitraum von 1850 – 2003 entstand zur Veranschaulichung diese Kartenbeilage. Dargestellt sind nur die Ausdehnungsgrenzen des Zungenbereiches. Die Darstellung umfasst die Ausdehnungsgrenzen von 1850, 1890, 1922, 1939, 1971 und 2003. Auf die Darstellung der Ausdehnungsgrenzen von 1976, 1990 und 1997 wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet. Im Zeitraum von 1971 bis 1997 hat sich die Ausdehnungsgrenze des Gepatschferners

nur minimal verändert, so dass sich diese Grenzen in der Kartenabbildung zu stark überlagern würden.

Die Farben der Ausdehnungsgrenzen wurden an die Farben in den Ergebnisdigrammen angeglichen, um diese schneller miteinander vergleichen zu können.

Auch diese Kartenbeilage weist österreichische Gauß-Krüger Koordinaten im Meridianstreifen M 28 auf. Der Abstand der Koordinatenkreuze in der Breite und der Länge beträgt jeweils 1000 m. Die Karte ist im Maßstab 1: 17500 gehalten.

#### **Kartenbeilage „Nährgebiete des Gepatschferners 1872 – 2003“:**

Die Verteilung der Nährgebiete des Gepatschferners ist eines der Ergebnisse, welches sich vorzugsweise kartographisch darstellen lässt. Dargestellt werden nur die Zeitintervalle, in denen sich auch ein Nährgebiet ausweisen lässt. Die einzige Ausnahme stellt der Zeitraum 1976 – 1990 dar. Wegen der Unsicherheiten bezüglich der Massenbilanz im Vergleich zu anderen Untersuchungen, wurde dieser Zeitintervall nicht mit in die Kartendarstellung aufgenommen.

In den einzelnen Kartenabbildungen wird farblich zwischen dem Nährgebiet und dem Zehrgebiet unterschieden. Als Grenze ist die mittlere Höhe der Gleichgewichtslinie (ELA) in rot farblich abgehoben. Die Grundflächen der Kartenabbildungen entsprechen jeweils dem älteren Gletscherstand.

Über die Kartenabbildungen ist jedes Mal ein Netz aus Koordinatenkreuzen in österreichischen Gauß-Krüger Koordinaten im Meridianstreifen M 28 gelegt. Der Abstand zwischen den Koordinatenkreuzen entspricht in der Breite und der Höhe jeweils 2000 m. Dabei sind die Kartenabbildungen stets im Maßstab 1:75000 gehalten. Angaben zu den Kartengrundlagen, zur Projektion zum Verfasser usw. vervollständigen das Kartenblatt.



## Kapitel 6:

### Diskussion und Interpretation

Die Bestimmung des Massenhaushalts eines Gletschers mit der Geodätischen-Methode ist dazu geeignet den Massenhaushalt über längere Zeiträume zu verfolgen, aber auch um die Ergebnisse anderer Massenhaushaltsstudien zu überprüfen. Sie ist jedoch nicht dazu geeignet, jährliche Massenbilanzen aufzustellen oder gar die anderen Methoden zur Bestimmung des Massenhaushalts eines Gletschers wie z. B. die Glaziologische- oder die Hydrologische-Methode zu ersetzen.

Der große Vorteil der Geodätischen-Methode liegt in dem verhältnismäßig geringen Arbeitsaufwand. Gegenüber der ursprünglichen Methode des rechnerischen Vergleiches zweier Höhenschichtpläne (Flächenplanimetrierung und Volumensberechnung mittels Kegelstumpfmethode) nach FINSTERWALDER, RI (1953), hat sich diese Methode in neuerer Zeit deutlich weiterentwickelt. Die Einführung computerbasierter Geographischer-Informationssysteme (GIS) ermöglicht die Erstellung digitaler Höhenmodellen aus topographischen Karteninformationen und deren Vergleich. Diese Möglichkeiten verringern den Arbeitsaufwand ganz beträchtlich. Neuerdings besteht sogar die Möglichkeit, digitale Höhenmodelle direkt mittels terrestrischer und flugzeuggebundener Lasersysteme sowie mittels satellitengestützter Laser- und Radarsysteme zu erstellen. Die Geodätische-Massenbilanzierung stellt somit eine attraktive Methode zur Massenbilanzierung über größere Zeiträume dar, welche insbesondere für große und/oder abgelegene Gletschergebiete geeignet erscheint.

In dieser Arbeit wurde eine Geodätische-Massenbilanzierung des Gepatschferners von 1872 – 2003, anhand mehrerer historischer Kartenaufnahmen, durchgeführt. In Kap. 4.5 wurde bereits auf mögliche Fehlerquellen hingewiesen. Es ist aber unerlässlich, einige der genannten Punkte hier noch ein weiteres Mal aufzugreifen. So bereiteten gerade die alten Kartenaufnahmen von 1872 (3. LA) und 1890 (AV) Probleme. Beide Aufnahmen weisen die gleichen gravierenden Geometriefehler des

Geländemodells auf. Auch die Höhenangaben der Kartenaufnahme 1872 dürften deutliche Fehler aufweisen. Beim Vergleich des DHM 1872 mit der relativ realistischen Zungengrenze sind fehlerhafte Höhen von 100 – 200 m aufgefallen. Das Höhenmodell der Kartenaufnahme 1890 weist dagegen deutlich bessere Höhenwerte auf, wobei aber beachtet werden muss, dass zum Zeitpunkt der photogrammetrischen Aufnahmen eine dichte Neuschneedecke bestand (SIMON 1893). Trotzdem sind beide Aufnahmen nicht zu einem exakten Vergleich mit neueren Kartenaufnahmen geeignet. Die unterschiedliche Qualität der Kartenaufnahmen 1872 und 1890 spiegelt sich auch in den regionalen Volumenbilanzen wieder (siehe Kap. 5.1). Nach S. FINSTERWALDER (1928) ist die Zunge des Gepatschferners von 1856 bis 1891 um etwa 615 m zurückgeschmolzen, mit den größten negativen Werten von 1886 bis 1891. So ist die positive Volumenbilanz im Bereich der Hauptzunge von 1872 – 1890 eindeutig auf die Höhenfehler in der Kartenaufnahme 1872 zurückzuführen, welche deutlich zu niedrig angesetzt ist. Die Höhe der Hauptzunge, vor allem aber der Nebenzungen, scheint auch in der Kartenaufnahme 1890 zu gering angesetzt zu sein. Dies würde die extreme negative Bilanz der Nebenzungen von 1872 – 1890 und die noch deutlichere positive Bilanz in diesem Bereich von 1890 – 1922 erklären. Die positive Bilanz der Hauptzunge von 1890 – 1922 könnte ebenfalls auf diesen Umstand zurückzuführen sein. Diese fehlerhaften Bereiche fallen insbesondere in der Kartenbeilage „Höhenänderungen des Gepatschferners 1890 – 2003“ auf. Denkbar wäre aber auch eine Aufwölbung der Hauptzunge während der Vorstoßphase Anfang der 1920er Jahren. Fakt ist jedoch, dass die Hauptzunge des Gepatschferners im Zeitraum von 1891 – 1922 fast 490 m an Länge verloren hat (FINSTERWALDER, S. 1928).

Wirklich verlässliche Ergebnisse liefert erst die Kartenaufnahme von 1922. In diesem Jahr war die Ausaperung besonders stark und reichte bis 3300 m Höhe (FINSTERWALDER, S. 1928), so dass die in Kap. 4.5 angesprochene Problematik in Bezug auf den angenommenen Wert der Dichte bei der Massenberechnung nur minimal sein dürfte.

Die durchweg negative Volumen- und Massenbilanz von 1922 bis 1939 und 1953 (nur Hauptzunge) tragen dem allgemeinen Anstieg der Mitteltemperatur Rechnung, was aus Abb. 6.1 nachvollziehbar ist (siehe dazu auch Abb. 2.4.6 in Kap. 2.3). Die Abnahme des Volumens und der Masse fällt aber mit zunehmender Höhe geringer aus. Dies deckt sich mit den Ergebnissen der Analyse der Höhenänderungen von

FINSTERWALDER, RI (1953). Dieser Trend setzt sich bis 1976 fort, aber nur für die Bereiche der Haupt- und Nebenzungen. Auch fällt die Abnahme des Volumens und der Masse deutlich geringer aus als zuvor. Nach FINSTERWALDER, RÜ. (1976) begann sich das Firnbecken bereits in den frühen 1950er Jahren wieder zu füllen. Die errechnete positive Volumen- und Massenbilanz im Bereich des Firnbeckens von 1939 – 1971 bestätigen diese Ergebnisse. Auch dies lässt sich anhand der Temperaturkurve in Abb. 6.1 (siehe dazu auch Abb. 2.4.6) recht gut einordnen.

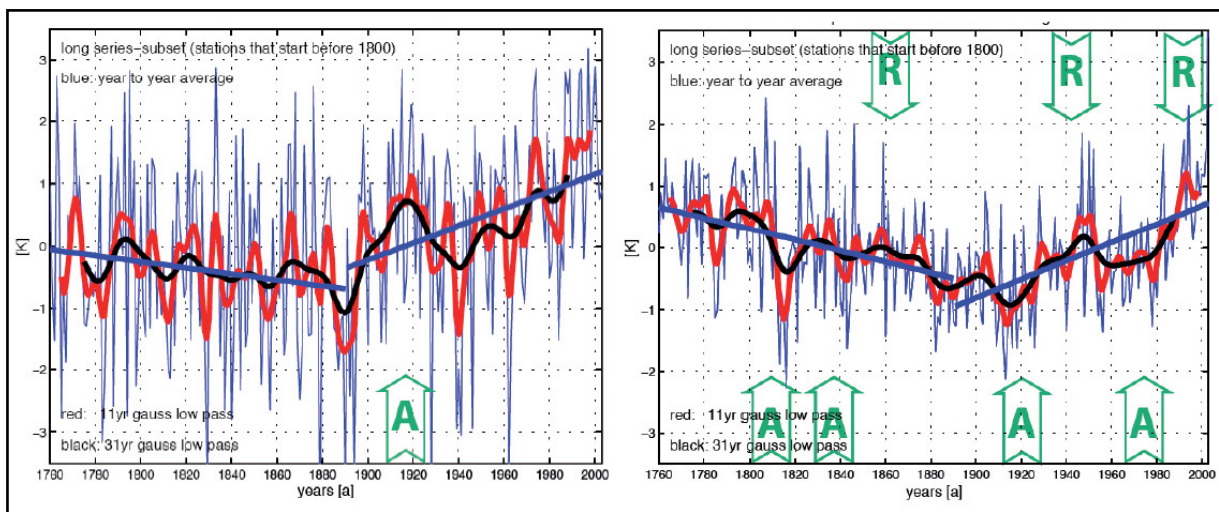


Abb. 6.1: Lufttemperatur im Alpenraum (links Dezember-Februar, rechts Juni-August) im Vergleich zu Gletschervorstößen (A) und Gletscherrückzügen (R). Blaue Kurve: Einzelwerte, rote Kurve: 11-jährig gefilterte Werte, schwarze Kurve: 31-jährig gefilterte Werte (SCHÖNER 2009).

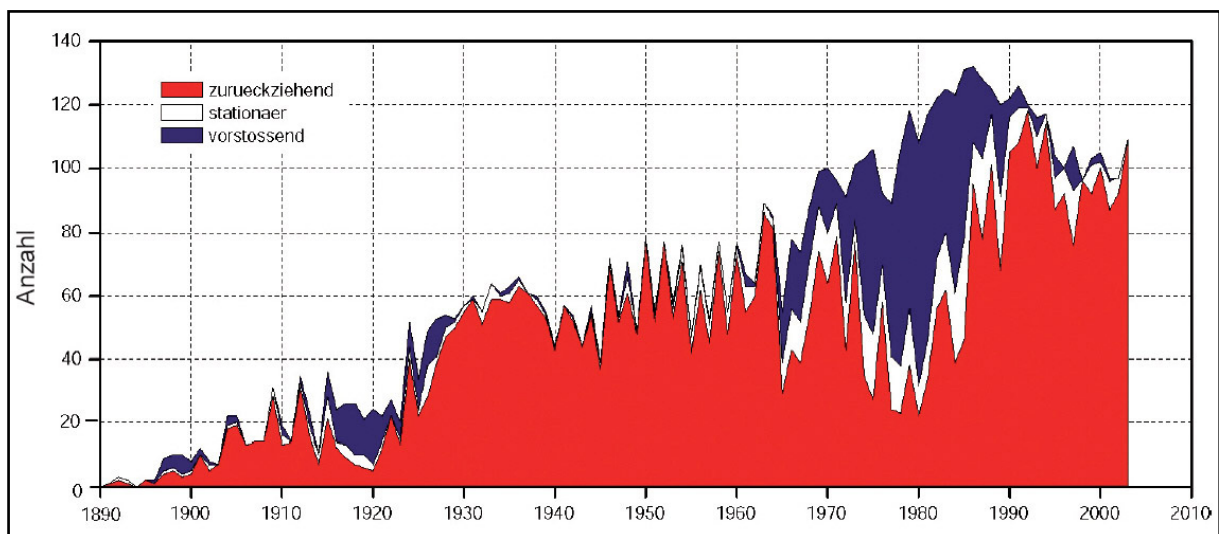


Abb. 6.2: Längenmessungen an österreichischen Gletschern (SCHÖNER 2009).

Eine Rolle könnten dabei gestiegene Niederschläge spielen, doch fehlen zu diesem Schluss entsprechende Messreihen vom Gebiet des Gepatschferners.

Die positive Entwicklung des Volumens und der Masse des Firnbeckens lässt sich gut in die allgemeine Vorstoßphase der Alpengletscher einordnen, die etwa von Mitte der 1960er Jahre bis Anfang der 1990er Jahre anhielt. Bereits seit den 1950er Jahren sank die ELA kontinuierlich ab, was sich in einer talabwärts gerichteten, schrittweise Aufhöhung im Bereich der Hauptzunge bemerkbar machte. Eine Ausdehnung der Länge der Hauptzunge des Gepatschferners wurde aber erst 1977 gemessen (FINSTERWALDER, RÜ. 1978, KINZL 1978). Die Vorstoßphasen des Gepatschferners in den 1920er und 1970/80er Jahren fügen sich ebenso in die allgemeine Tendenz der Alpengletscher ein, die aus Abb. 6.2 nachvollzogen werden kann.

Die Volumen/Massenbilanz für die Jahre 1971 – 1976 weist dagegen ein recht heterogenes Bild auf. Positive Einzelbilanzen finden sich vor allem im Bereich der unteren Hauptzunge. Auf den gesamten Gletscher bezogen, ergibt sich daraus eine minimal negative Bilanz. Diese Schwächeperiode während der Vorstoßphase könnte auf den außergewöhnlich heißen und trockenen Sommer im Jahr 1976, welcher damals als Jahrhundertssommer in die Klimaaufzeichnungen einging, zurückzuführen sein. Möglicherweise spielen aber auch Unterschiede in den Maßstäben (1971 = 1:10000, 1976 = 1:50000) und der daraus resultierenden unterschiedlichen Genauigkeit der Kartengrundlagen eine Rolle. Auch die nur minimal negative Bilanz ist ein Beleg dafür, dass sich in der Volumen/Massenbilanz in dieser Zeit tatsächlich nur wenig getan hat. Dieses Beispiel verdeutlicht eine Problematik bei der Geodätischen Massenbilanzierung, wenn Kartengrundlagen mit kurzem zeitlichem Abstand zwischen den Aufnahmen und deutlich unterschiedlichen Maßstäben verwendet werden müssen.

Alles in Allem bestätigen die Ergebnisse der Volumenänderungen im Bereich der Hauptzunge des Gepatschferners von 1872 – 1976 aber die Ergebnisse der Höhenänderungsanalyse von FINSTERWALDER, RÜ. (1978).

Von 1976 – 1990 wurden für alle Teilbereiche des Gepatschferners positive Volumenbilanzen errechnet. KEUTTERLING (1998) weist dagegen von 1971 – 1990 eine negative Volumenbilanz für den Gepatschferner aus. RÜ. FINSTERWALDER (1980 und 1991/92) stellte von 1971 – 1979 eine leichte Aufhöhung und von 1979 - 1990 ein deutliches Einsinken im Bereich des Firnbeckens fest. Daraus müsste sich von



1971 – 1990 ebenfalls eine negative Volumenbilanz ergeben. Zur Kontrolle wurde ein zusätzliches DHM der Höhenänderung von 1971 – 1990 erstellt, um dieses mit den Ergebnissen KEUTTERLINGS (1998 und 2006) vergleichen zu können. Eine Gegenüberstellung der eigens ermittelten Oberflächenänderung und der von KEUTTERLING ermittelten Oberflächenänderung findet sich in Abb. 6.3.

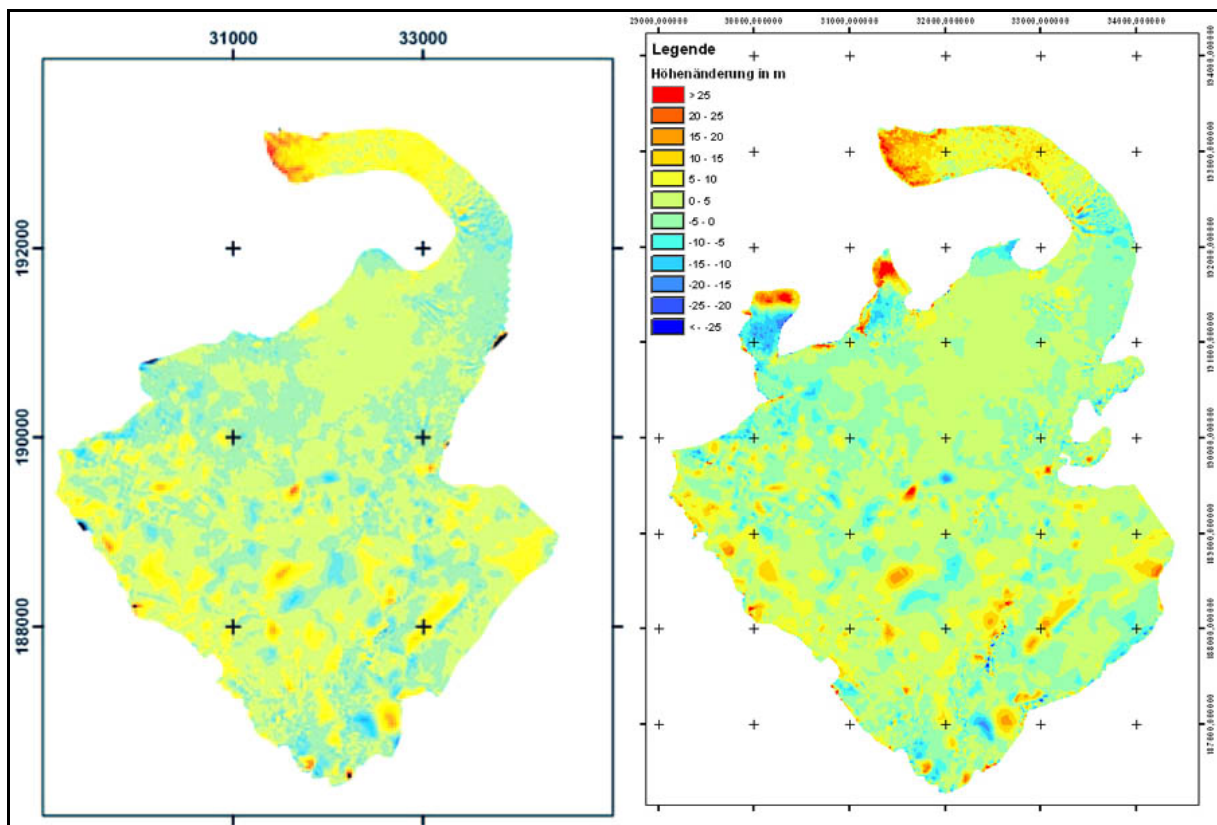


Abb. 6.3: Gegenüberstellung der Oberflächenänderung des Gepatschfernens von 1971 – 1990. Links das Ergebnis von KEUTTERLING (KEUTTERLING und THOMAS 2006), rechts das eigene Ergebnis (Abb. ohne Maßstab).

Um die beiden Abbildungen besser miteinander vergleichen zu können wurde versucht, die Farbskala des eigenen DHM's an die der Abbildung aus KEUTTERLING und THOMAS (2006) anzupassen, was recht gut gelungen ist. Rein visuell sind nur geringe Unterschiede in der Form der Einsink- und Aufhöhungsgebiete zwischen den Ergebnissen KEUTTERLINGS und der eigenen Untersuchung erkennbar. Bei der Verteilung der Einsink- und Aufhöhungsgebiete sind klare Übereinstimmungen erkennbar. Auch die ermittelten Werte des Einsinkens und der Aufhöhung passen im Großen und Ganzen zu den Ergebnissen KEUTTERLINGS. Trotzdem brachte die eigene Volumenbestimmung ein eindeutig positives Gesamtergebnis, welches den in

Kap. 5.1 und 5.4 dargelegten, errechneten Volumen- und Massenbilanzen von 1971 – 1976 und 1976 – 1990 entspricht. Da mir aus der Arbeit KEUTTERLINGS nur die Daten von 1990, nicht aber die von 1971, vorlagen, konnte dessen Ergebnis nicht mehr nachvollzogen werden. In welcher der beiden Berechnungen nun ein Fehler verborgen liegt konnte leider nicht mehr zweifelsfrei geklärt werden.

Außer Frage steht jedoch, dass sich die Zunge des Gepatschferners ab 1988 wieder im Rückzug befindet (PATZELT 1990). In den darauf folgenden 1990er Jahren war das Klima von einem deutlichen Anstieg der Mitteltemperaturen und relativ niedrigen Niederschlägen geprägt. Daraus resultieren die deutlich negativen Werte aller Teilbereiche des Gepatschferners in der Volumen- und Massenbilanzen von 1990 – 1997. Auf jährliche Durchschnittswerte umgerechnet, stehen diese Werte in der ganzen Bilanzreihe von 1922 – 2003 deutlich hervor (aus oben genannten Gründen werden die Werte von 1872 – 1922 aus diesem Vergleich ausgeklammert).

Trotz einem weiteren Anstieg der Mitteltemperaturen weist die Volumen- und Massenbilanz für die Jahre 1997 – 2003 eine minimal positive Gesamtbilanz auf. Dies könnte durch neuerlich gestiegene Niederschläge erklärt werden. Zumindest der weitere Rückzug der Hauptzunge lässt sich durch die weiter gestiegenen Temperaturen erklären. Die Nebenzungen dagegen haben in diesem Zeitraum wieder an Volumen gewonnen, was vermutlich auf die Volumenzunahme des Firnbeckens zurückzuführen ist.

Aufgrund bereits erwähnter Ungenauigkeiten der Geodätischen Massenbilanzierung sollte dieser errechnete Volumen- bzw. Massenzuwachs jedoch nicht überbewertet werden. So dürfte die lange Hitze- und Trockenperiode im Jahr 2003, die noch mehrere Wochen nach dem Zeitpunkt der Aufnahme des Gepatschferners andauerte, einen großen Teil des Zuwachses wieder aufgezehrt haben. Auch konnte nicht mehr in Erfahrung gebracht werden, welchem Gletscherstand der italienische Teil des Gepatschferners in der Österr. Karte 1:50000, Ausg. 2004 entspricht. Ein großer Teil des Volumenzuwachses entfällt aber gerade auf diesen Teilbereich, was sehr gut in der Kartenbeilage der Höhenänderungen des Gepatschferners 1890 – 2003 zur Geltung kommt. Nach KUHN (2007) war die Volumenbilanz des Gepatschferners von 1997 – 2006 jedenfalls negativ.

Die Problematik der unbestimmten Dichte des Eises wurde bereits in Kap. 4.5 hervorgehoben. Aus diesem Grund wurde bereits auf Kartenaufnahmen bei besonderer Ausaperung hingewiesen, da bei solchen Aufnahmen die Fehlerquelle

Dichte als gering einzustufen ist. Andererseits steigt das Fehlerpotential bei der Berechnung der Masse bei Kartenaufnahmen mit ausgeprägter Neuschneeauflage. So berichtet FINSTERWALDER, Ri. (1951) über eine deutliche Neuschneeauflage in vielen Teilen des Firngebiets während der Kartenaufnahme im Jahr 1939. Dies könnte die Massenbilanzen derart beeinflussen, dass der errechnete Massenverlust von 1922 – 1939 etwas zu gering ausfällt, im Gegenzug aber der Massenzugewinn von 1939 – 1971 ebenfalls zu gering ausfällt. Für die bisher nicht explizit erwähnten Kartenaufnahmen liegen keine Informationen zur Neuschneeauflage vor. 1971 scheint diese nicht erwähnenswert gewesen zu sein, sonst hätte BRUNNER (1978) darauf hingewiesen. Angesichts der warmen Klimaperioden und der entsprechenden Volumenbilanzen kann in den Jahren 1997 und 2003 wieder von einer deutlichen Ausaperung ausgegangen werden.

Die Bilanz der Fläche stellt sich ganz ähnlich dar wie die Bilanzen des Volumens und der Masse. Einige Unterschiede fallen aber während Phasen positiver Volumen/Massenbilanzen auf. So ist die Flächenbilanz von 1939 – 1971, anders als die Volumen/Massenbilanz, durchgehend negativ. Andererseits fällt die Flächenbilanz von 1971 – 1976 positiv aus, im Gegensatz zur Volumen/Massenbilanz. Insgesamt passt dies zu der Vorstoßphase, welche ihren Ursprung bereits in den 1950er Jahren hatte. Die negative Volumenbilanz der Jahre 1971 – 1976 kann auf den heißen und trockenen Sommer 1976 zurückgeführt werden. Denkbar ist, dass in diesem Sommer vor allem das Volumen des Gletschers in Mitleidenschaft gezogen wurde, nicht aber die Fläche. Die negative Flächenbilanz von 1976 – 1990 passt wiederum zum sich abzeichnenden Ende der Vorstoßphase. Nur im Bereich der Hauptzunge war noch ein Flächenzuwachs messbar. Allerdings stammt die Kartenaufnahme 1990 aus der Diplomarbeit von KEUTTERLING (1998), so dass es zu gewissen Ungenauigkeiten in Bezug auf die Abgrenzung der Gletscherfläche von dem umliegenden Gelände gekommen sein kann.

Von 1997 – 2003 weist lediglich das Firnbecken eine geringe Flächenzunahme auf, welche in Zusammenhang mit der Aufhöhung der Firnfläche stehen dürfte. Alle anderen Bereiche weisen negative Beträge auf, die zum Teil im Widerspruch zur errechneten Volumenbilanz stehen. Die errechneten Flächenzunahmen bzw. – abnahmen sind in den meisten Fällen jedoch sehr gering. Nur im Bereich der Hauptzunge und der Nebenzungen sind diese von größerer Bedeutung.

Die vertikalen Bilanz-Profile verdeutlichen zumeist das oben gesagte. So verfälschen Bilanzen einzelner Höhenintervalle oftmals das Gesamtbild. Dies kann mehrere Ursachen haben. So kommt es schon alleine durch die Bewegung des Eises zu Änderungen der Oberfläche des Gletschers. Dabei kann die Veränderung der Höhe der Gletscheroberfläche ganze Bereiche in andere Höhenintervalle verschieben, was wiederum in den Berechnungen Auswirkungen auf die Bilanz der jeweiligen Höhenintervalle haben kann. Die Bestimmung der ELA wurde dadurch wesentlich erschwert. Die Vorgehensweise bei der Bestimmung der ELA wurde bereits in Kap. 4.4.4 erläutert.

Die VBP's von 1872 – 1890 und 1890 – 1922 weisen ein sehr heterogenes Gesamtbild auf, was auf die bereits mehrfach erwähnten Kartenfehler zurückzuführen ist. Das VBP 1922 – 1939 dagegen weist eine nahezu durchgehende negative Bilanz auf, was sehr gut zu der Gesamttendenz des Gepatschferners in dieser Zeit passt. Auch das VBP 1939 – 1971 spiegelt die Gesamttendenz gut wider. Das relativ heterogene VBP 1971 – 1976 verdeutlicht die Auswirkungen der starken Ausaperung des Sommers 1976, so dass die Aussage dieses VBP's nicht eindeutig sein kann. Eine relativ eindeutige Aussage liefert das VBP von 1976 – 1990, welches aber, wie anfangs erwähnt, im Widerspruch zu den Ergebnissen anderer Untersuchungen steht. Das VBP 1990 – 1997 entspricht der allgemein negativen Tendenz dieser Periode. Etwas weniger eindeutig ist das VBP von 1997 – 2003. Insgesamt kann aber auch hier die negative Bilanz im Bereich der Gletscherzunge und die minimal positive Bilanz des Firnbeckens nachvollzogen werden.

Abschließend kann festgestellt werden, dass im Zuge dieser Arbeit die Vorzüge der Geodätischen Massenbilanzierung deutlich wurden, aber auch deren Probleme und mannigfaltigen Fehlerquellen. Sollen Gletschergebiete mit der Geodätischen Methode überwacht werden, muss sichergestellt sein, dass Höhenschichtpläne (oder neuerdings Laser-DHM's) in regelmäßigen Zeitabständen und in gleichbleibender Qualität aufgenommen werden. Gerade bei Gletschergebieten, welche durch ihre Größe und ihr Volumen nur mit geringen Höhenänderungen auf Klimaänderungen reagieren, ist dies absolut von Nöten.

## Kapitel 7:

### Zusammenfassung

Aufgrund deutlicher Reaktionen vergletschter Gebiete auf Änderungen klimatischer Größen nehmen Massenhaushaltsbilanzierungen in ihrer Bedeutung zu. Die meisten Methoden der Massenhaushaltsstudien setzen allerdings genaue Kenntnisse von klimatischen Größen oder Abflussspenden voraus oder sie sind sehr zeitaufwändig und dementsprechend teuer. Auch die Größe sowie Abgeschlossenheit von Gletschern können solche Untersuchungen behindern. Stehen solche Informationen nicht in ausreichender Menge zur Verfügung, bietet sich eine Geodätische Massenbilanzierung an. Ferner hat sich die Geodätische Massenbilanzierung in den letzten Jahrzehnten als kostengünstigere und zeitsparendere Methode bewährt. Durch die Einführung geographischer Informationssysteme hat sich der Arbeitsaufwand weiter verringert und die Möglichkeiten der Bilanzierung verbessert. Über den Gepatschferner existieren im Großen und Ganzen bislang nur einzelne Untersuchungen der Oberflächenänderung. Aus diesem Grund soll in dieser Arbeit eine Analyse der Masse und deren Veränderung mit der Geodätischen Methode über einen möglichst langen Zeitraum durchgeführt werden. Insgesamt konnte der Zeitraum von 1872 – 2003 abgedeckt werden, also einen Zeitraum von gut 130 Jahren.

Während der Untersuchung traten viele Probleme in Bezug auf die Geodätische Massenbilanzierung auf. So konnten einige wichtige Kartenaufnahmen, welche in der TU-München verwahrt werden, aufgrund mangelnder Kooperationsbereitschaft des dortigen Instituts nicht beschafft werden. So mussten topographische Karten mit kleineren Maßstäben von geringerer Genauigkeit verwendet werden. Gerade bei Kartenaufnahmen unterschiedlicher Genauigkeit und geringem Zeitabstand der Aufnahmen besteht dann die Gefahr, dass die ermittelte Massenbilanz eher von der unterschiedlichen Genauigkeit der Kartengrundlagen herrührt als von einer tatsächlichen Änderung der Masse. Dazu weisen die älteren Kartenaufnahmen vor 1922 eine große Ungenauigkeit auf, so dass sie zur Massenbilanzierung nur bedingt

in Frage kommen. Die Ergebnisse des Zeitraums von 1922 – 2003 können dagegen als zuverlässig angesehen werden und bestätigen im Allgemeinen die früheren Untersuchungen der Oberflächenänderung. Diskrepanzen gegenüber den Untersuchungen von FINSTERWALDER (1980 und 1991/2) und KEUTTERLING (1998) treten allerdings im Zeitraum von 1971 – 1990 auf, deren Ursache bislang noch nicht geklärt werden konnte. So weisen diese Untersuchungen eine negative Gesamtbilanz auf. Dem gegenüber steht eine positive Gesamtbilanz der eigenen Berechnung.

Die Ergebnisse der Arbeit bestätigen den fast kontinuierlichen Rückgang der Masse des Gepatschferners von den 1850er Jahren bis heute. Unterbrochen war dieser Rückgang von den Vorstoßphasen um 1920 und in den 1970er und 1980er Jahren. Beide Vorstoßphasen lassen sich bedingt aus den Ergebnissen ablesen.

Mehr oder minder hat die Geodätische Massenbilanzierung des Gepatschferners von 1872 – 2003 brauchbare Ergebnisse geliefert. Unsicherheiten bestehen jedoch bei Vergleichen von Daten von unterschiedlicher Qualität. Auch können mit dieser Methode minimale Höhenänderungen der Oberfläche und der daraus resultierenden geringfügigen Veränderung der Masse über kurze Zeiträume mit den vorhandenen Kartengrundlagen kaum erfasst werden.

## Summary:

Due to notable reactions of glaciated areas on changed climatic parameters, mass balances of glaciers are gaining significance. Most methods of mass balance studies require either profound knowledge of climatic parameters or drainage donations or they are very time-consuming and thus expensive. The extent and seclusion of glaciers can obstruct such studies as well. Geodetic mass balances are an alternative if such information is not available in sufficient amount and quality. Over the last decades the geodetic mass balance has proven to be a more cost-effective and time-saving method. With the introduction of geographic information systems (GIS), the necessary effort has decreased and the possibilities of balancing have been improved.

Overall, there are only individual studies of surface elevation changes of the Gepatschferner, Austria. Therefore, an analysis of the mass and its variation is to be done within this thesis with the geodetic method over a considerable lapse of time. In total, the time period from 1872 – 2003 could be covered – a time period of around 130 years.

During the preparation of this thesis, many problems related to the geodetic mass balance occurred. Some important contour line maps could not be obtained due to the lack of cooperativeness of the responsible institute of the TU-Munich where these maps are preserved. Therefore, topographic maps with smaller scales and therefore minor accuracy had to be used. The problem of using topographic maps of different accuracy and little time intervals between the recordings is that the calculated mass balance may originate rather from the different accuracy of the maps than from a real change of the mass. To this, the older topographic maps from the pre-1922 period show large inaccuracies. Therefore, they are only partly useful for mass balances. However, the results from the 1922 – 2003 period are more accurate and confirm in general the results from the past studies of surface elevation changes. Discrepancies compared to the studies of FINSTERWALDER (1980 and 1991/92) and KEUTTERLING (1998) occur for the period of 1971 – 1990. These studies feature a negative total mass balance. In opposite, there is the positive total mass balance of the current study. The reason for this could not be clarified, so far.

The results of this thesis prove the almost continuous decrease of the mass of the Gepatschferner from the 1850s until today. This retreat was interrupted by the advance periods in the 1920s and 1970/80s. Both advance periods are partly shown by the results.

The geodetic mass balance of the Gepatschferner from 1872 – 2003 has generated more or less useful results. Uncertainties still exist when comparing data of too different quality. Minimal changes of the elevation of the surface of a glacier and the resulting minimal changes in mass balances over short time periods can barely be conceived with the available maps when using this method.



## 8. Quellen und Hilfsmittel

### Literatur:

ARNBERGER, E.: Die Kartographie im Alpenverein. Wissenschaftliche Alpenvereinshefte, Ausgabe 22, Wien 1970.

BÖGEL, H. und SCHMIDT, K.: Kleine Geologie der Ostalpen. Ott Verlag Thun, 1. Auflage, 1976.

BÖHM, R.: Geschichte der Temperatur. In: Historicum, Frühling 1993.

BÖHM, R., JURKOVIC, A. und AUER, I.: Regionale Klimazukunft. Bericht zu Zielvereinbarung 2008/32, 2007. ([http://www.zamg.ac.at/a-tale-of-two-valleys/documents/ZV\\_32.pdf](http://www.zamg.ac.at/a-tale-of-two-valleys/documents/ZV_32.pdf))

BÖHM, R., SCHÖNER, W., AUER, I. HYNEK, B., KROISLEITNER, CH. und WESS, G.: Gletscher im Klimawandel, Eigenverlag des ZAMG, Wien, 2007.

BRUNNER, K.: Zur neuen Karte Gepatschferner 1971, Maßstab 1:10000. In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band 14, 1978.

BRUNNER, K.: Hundert Jahre Gletschervermessung am Gepatschferner (Tirol). In: Zeitschrift für Vermessungswesen (DVW) e.V., 112. Jahrgang, Heft 2, 1987.

BRUNNER, K.: Exakte großmaßstäbige Karten von Alpengletschern – ein Säkulum ihrer Bearbeitung. In: PGM-Kartographie und Geofernerkundung, Ausgabe 2, 1988.

BRUNNER, K.: Kartographische Darstellung von Gletschern. In: Geographische Rundschau, Band 40, 1988.

BRUNNER, K und WELSCH, W.: Untersuchungen zur Georeferenzierung von Alpenvereinskarten. Wissenschaftliche Alpenvereinshefte, Ausgabe 34, 2001.

CUBASCH, U. und KASANG, D.: Die globale Mitteltemperatur im 20. und 21. Jahrhundert. In PGM 144, 2000.

DONGUS, H.: Grundformen des Reliefs der Alpen. In: Geographische Rundschau, Band 36, 1984.

EBSTER, F.: Blatt Weißkugel. Begleitwort des Kartographen. In: Jahrbuch des deutschen Alpenvereins, Band 76, 1951.

ELLENBERG, H.: Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen. Verlag: UTB Stuttgart, 5. Auflage 1996

ELLENRIEDER, T.: Abfluss und Gletschermassenbilanz im Einzugsgebiet des Vernagtferners: Eine Rekonstruktion für die Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert. Diplomarbeit Universität Würzburg, 2002. ([http://www.lrz-muenchen.de/~a2901ad/webserver/webdata/download/vernagtferner\\_1895-1915.pdf](http://www.lrz-muenchen.de/~a2901ad/webserver/webdata/download/vernagtferner_1895-1915.pdf))

FINSTERWALDER, Ri.: Zur Geschichte der Gepatschferner Vermessung. In: Jahrbuch des deutschen Alpenvereins, Band 76, 1951.

FINSTERWALDER, Ri.: Die zahlenmäßige Erfassung des Gletscherrückgangs an Ostalpengletschern. In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band 2, 1953.

FINSTERWALDER, Rü.: Beiträge zur Gepatschgletschervermessung. In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band 14, 1978.

FINSTERWALDER, Rü. und RENTSCH, H.: Die Erfassung der Höhenänderung von Ostalpengletschern in den Zeiträumen 1950-1959-1969. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band 12, 1976.

FINSTERWALDER, Rü. und RENTSCH, H.: Zur Höhenänderung von Ostalpengletschern im Zeitraum 1969-1979. In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band 16, 1980.

FINSTERWALDER, Rü.: Die Alpenvereinskarte und ihr Gebrauch. Herausgegeben im Rahmen der Alpenvereinskartographie vom Deutschen Alpenverein, München 1984.

FINSTERWALDER, Rü. und RENTSCH, H.: Zur Höhenänderung von Ostalpengletschern im Zeitraum 1979-1989. In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band 27/28, 1991/92

FINSTERWALDER, S. und SCHUNCK, H.: Der Gepatschferner. In: Zeitschrift des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins, Band 19, 1888.

FINSTERWALDER, S.: Begleitwort zur Karte des Gepatschferners. In: Zeitschrift für Gletscherkunde, Band 16, 1928.

FLIRI, F.: Niederschlag und Lufttemperatur im Alpenraum. Wissenschaftliche Alpenvereinshefte, Ausgabe 24, Wien 1974.

FORMAYER, H. et al.: Auswirkungen einer Klimaveränderung in Österreich: Was aus bisherigen Untersuchungen ableitbar ist. Universität für Bodenkultur Wien, 2001. ([https://forschung.boku.ac.at/fis/suchen.person\\_uebersicht?sprache\\_in=de&menue\\_id\\_in=101&id\\_in=4149](https://forschung.boku.ac.at/fis/suchen.person_uebersicht?sprache_in=de&menue_id_in=101&id_in=4149))

GLASER, R., BECK, C. und BEYER, U.: Vom mittelalterlichen Wärmeoptimum über die Kleine Eiszeit ins moderne Treibhausklima. In: PGM 144, 2000.

GROSS, G., KERSCHNER, H. und PATZELT, G.: Methodische Untersuchung über die Schneegrenze in alpinen Gletschergebieten. In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band 12, 1976.

GROSS, G.: Der Flächenverlust der Gletscher in Österreich 1850 – 1920 – 1969. In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band 23, 1987.

HARTL, H.: Die Aufnahme von Tirol durch Peter Anich und Blasius Huber. In: Mitteilungen des Militärgeographischen Instituts, Wien, 1885.

HAUG, T. et al.: Geodetic mass balance of the western Svartisen ice cap, Norway, in the periods 1968-1985 and 1985-2002. In: Annals of Glaciology, Band 50, 2009.

HEUBERGER, H.: Die Alpengletscher im Spät- und Postglazial. In: Eiszeitalter und Gegenwart, Band 19, 1968.

HOINKES, H.: Methoden und Möglichkeiten von Massenhaushaltsstudien auf Gletschern. In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band 6, 1970.

ISOLA, G. H.: Untersuchung von Zirkulationsänderungen im Europäisch-Nordatlantischen Raum mit besonderer Betrachtung der Auswirkungen auf die Gletscher in den Öztaler Alpen. Diplomarbeit Universität Innsbruck, 2003. ([http://imgi.uibk.ac.at/sekretariat/diploma\\_theses/Isola\\_Georg\\_2003\\_Dipl.pdf](http://imgi.uibk.ac.at/sekretariat/diploma_theses/Isola_Georg_2003_Dipl.pdf))

KÄÄB, A., et al.: Glaziale und periglaziale Prozesse: Von der statistischen zur dynamischen Visualisierung. In: Kartographische Nachrichten 5, 2003.

KAMP, U, BLOCH, T. und OLSENHOLLER, J.: Qualitätsanalyse digitaler ASTER-Geländemodelle von Hochgebirgsregionen. In: Kartographische Nachrichten, Heft 5, 2003.

KASER et al.: A manual for monitoring the mass balance of mountain glaciers. Technical Documents in Hydrology No. 59, UNESCO, Paris, 2003. (<http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001295/129593e.pdf>)

KERSCHNER, H.: Spätglaziale Gletscherstände im inneren Kaunertal (Öztaler Alpen). In: Innsbrucker geographische Studien, Band 6, 1978.

KERSCHNER, H.: Methoden der Schneegrenzbestimmung. In: Eiszeitforschung, Wiss. Buchgesellschaft Darmstadt, 1990.

KERSCHNER, H.: Gletscher und Klima im Alpen Spätglazial und frühen Holozän. In: Alpine Space – Man & Environment, Vol. 6, 2009.

KEUTTERLING, A.: Untersuchungen am Gepatschferner – Beschreibung und Analyse des Gletscherverhaltens mit Hilfe digitaler Photogrammetrie und GIS. Diplomarbeit Universität Mainz, unveröffentlicht, 1998.

KEUTTERLING, A. und THOMAS, A.: Monitoring glacier elevation and volume changes with digital photogrammetry and GIS at Gepatschferner glacier, Austria. In: International Journal of Remote Sensing Vol. 27, No. 19, 2006.

KEUTTERLING, A. und THOMAS, A.: Bemerkungen zur digitalen Orthophotokarte Gepatschferner 1990. In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band 39, 2003/2004.

KINZL, H.: Die Darstellung der Gletscher im Atlas Tyrolensis von Peter Anich und Blasius Hueber (1774). In: Mitteilungen der Geologischen Gesellschaft Wien, Band 48, 1955.

KINZL, H.: Die Gletscher der Österreichischen Alpen 1962/63; 1963/64; 1964/65; 1965/66; 1966/67; 1967/68; 1968/69; 1969/70; 1975/76; 1976/77; 1977/78. In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band 5, 6, 7, 12, 14 & 15, 1968 - 1979.

KLEBELSBERG, R. v.: Handbuch der Gletscherkunde und Glazialgeologie. Band 2 – Historisch - regionaler Teil. Verlag Springer, Wien 1949.

KLEBELSBERG, R. v.: Die Gletscher der österreichischen Alpen 1958/59; 1959/60; 1960/61; 1961/62. In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band 4 & 5, 1964 – 1968.

KÖLBEL, H.: Die Schnee-Ausaperung im Gurgler Tal (Ötztal/Tirol). In: Salzburger geographische Arbeiten, Band 12, 1984.

KUHN, M. et al.: Auswirkung von Klimaänderungen auf das Abflussverhalten von vergletscherten Einzugsgebieten im Hinblick auf Speicherkraftwerke. Abschlussbericht Teilprojekt von StartClim2007 (<http://www.austroclim.at/startklim/>).

KUTTLER, W. und ZMARSLY, E.: Natürlicher und anthropogener Treibhauseffekt – Ursachen und Auswirkungen, In: PGM 144, 2000.

MARKL, G.: Neue Massenhaushaltswerte von Hintereisferner und Kesselwandferner. In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band 15, 1979.

MATULLA, CH.: Das Klima der nächsten 100 Jahre. In: Alpine Space – Man & Environment, Vol. 6, 2009.

MORAWETZ, S.: Klimabeziehung des Gletscherverhaltens in den Ostalpen. In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band 2, 1952/53.

MORAWETZ, S.: Die Vergletscherung des inneren Kauner-, Pitz- und Rofentals. In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 1956.

NICOLUSSI, K. und PATZELT, G.: Reconstructing glacier history in Tirol by means of tree-ring investigations. In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band 32, 1996.

NICOLUSSI, K. und PATZELT, G.: Untersuchungen zur holozänen Gletscherentwicklung von Pasterze und Gepatschferner (Ostalpen). In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band 36, 2000.

NICOLUSSI, K. und PATZELT, G.: Klimawandel und Veränderung an der alpinen Waldgrenze - aktuelle Entwicklung im Vergleich zur Nacheiszeit. In: BFW-Praxisinformation 10, Wien 2006 (Online-Version Stand 2008)..

([http://www.waldwissen.net/themen/waldbau/schutzwald\\_gebirgswald/bfw\\_klima\\_waldgrenze\\_2006\\_DE](http://www.waldwissen.net/themen/waldbau/schutzwald_gebirgswald/bfw_klima_waldgrenze_2006_DE))

NICOLUSSI, K.: Alpine Dendrochronologie – Untersuchungen zur Kenntnis der holozänen Umwelt- und Klimaentwicklung. In: Alpine Space – Man & Environment, Vol. 6, 2009.

PATERSON, W. S. B.: The Physics of Glaciers. Oxford, 1981.

PATZELT, G.: Die Längenmessungen an den Gletschern der Österreichischen Ostalpen 1890 - 1969. In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band 6, 1970.

PATZELT, G.: The Period of Glacier Advances in the Alps, 1965 to 1980. In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band 21, 1985.

PATZELT, G.: Statistik der Längenmessung an den österreichischen Gletschern 1960 bis 1975. In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band 12, 1976.

PATZELT, G.: Die Gletscher der österreichischen Alpen 1978/79. In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band 15, 1979.

PATZELT, G.: Die Gletscher der österreichischen Alpen 1988/89. In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band 26, 1990.

PATZELT, G.: Die Gletscher der österreichischen Alpen 1989/90. In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band 27/28, 1991/92.

PATZELT, G.: Gletscherbericht (Verschiedene). In: Zeitschrift des Deutschen u. Österreichischen Alpenvereins, 2002, 2006, 2007, 2008, 2009.

PEIPE, J., REIß, P. und RENTSCH, H.: Zur Anwendung des Digitalen Geländemodells in der Gletscherforschung. In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band 14, 1978.

PURTSCHELLER, F.: Ötztaler und Stubai Alpen. Sammlung geologischer Führer, Bd. 53, Berlin, Stuttgart, 1971.

RICHTER, D.: Grundriß der Geologie der Alpen. Verlag: de Gruyter Berlin, 1974.

RICHTER, E.: Bericht über die Schwankungen der Gletscher der Ostalpen, 1888 – 1892. In: Zeitschrift des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins, Band 24, 1893.

ROST, H.: Zur Geologie, Petrographie und Tektonik des Pennins, der Matreier Zone und des Altkristallins. Diplomarbeit, Universität Erlangen-Nürnberg, 1989.  
([http://sprengtechnik.com/rost\\_h\\_1989/index.htm](http://sprengtechnik.com/rost_h_1989/index.htm))

RÖTHLISBERGER, F.: 10.000 Jahre Gletschergeschichte der Erde. Verlag Sauerländer, Aargau, 1986.

SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL: Lehrbuch der Bodenkunde. Verlag: Enke, Stuttgart, 14. Auflage 1998.

SCHABLEGER, K.: Statistische Analyse klimatologischer Zeitreihen. In: Historical Social Research, Vol. 21, 1996.  
([http://hsr-trans.zhsf.uni-koeln.de/hsrretro/docs/artikel/hsr/hsr1996\\_395.pdf](http://hsr-trans.zhsf.uni-koeln.de/hsrretro/docs/artikel/hsr/hsr1996_395.pdf))

SCHÖNER, W.: Massenhaushaltsbestimmung Alpiner Gletscher. Arbeitsunterlagen für die Lehrveranstaltung Gletschermassenhaushaltsuntersuchungen. 3. überarbeitete Ausgabe, 2003.  
([www.wau.boku.ac.at/uploads/media/MassenHausHaltsbestimmungen.pdf](http://www.wau.boku.ac.at/uploads/media/MassenHausHaltsbestimmungen.pdf))

SCHÖNER, W.: Paläoklimainformationen aus Kenngrößen der Gletschermassenbilanz – Beispiele für die Alpen seit der ausgehenden Kleinen Eiszeit. In: Alpine Space – Man & Environment, Vol. 6, 2009.

SENARCLENS-GRANCY, W.: Zur Glazialgeologie des Oetztals und seiner Umgebung. In: Mitteilungen der Geologischen Gesellschaft in Wien, Band 49, 1956.

SIMON, S.: Alpine Plaudereien eines Kartographen. In: Zeitschrift des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins, Band 24, 1893.



SPAN, N., FISCHER, A., KUHN, M. und MASSIMO, M.: Radarmessungen der Eisdicke österreichischer Gletscher. Band I: Messungen 1995 bis 1998. Österreichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik, Heft 33, 2005.

THOMAS, A.: Abfluss, Temperatur und Niederschlag am Gepatschferner (Öztaler Alpen) von 1988-1993. In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band 30, 1994.

THOME, K. N.: Einführung in das Quartär. Verlag:Springer, Berlin etc., 1997.

WAKONIGG, H.: Gletscherverhalten und Witterung. In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band 7, 1971.

WANNER, H., LUTERBACHER, J. et al.: Variabilität von Temperatur und Niederschlag in den europäischen Alpen seit 1500. In: Jahrbuch der Universität Bern, 2003.

WIPF, A., HUBER, S. und SIEBER, R.: Multimedia in der Gebirgskartographie – Anwendungen aus dem „Atlas der Schweiz – interaktiv“. In: Kartographische Nachrichten, Heft 5, 2003.

ZEMP, M.: Glaciers and Climate Change – Spatio-temporal Analysis of Glacier Fluctuations in the European Alps after 1850. Dissertation, Universität Zürich, 2006. (<http://www.dissertationen.unizh.ch/2006/zemp/diss.pdf>)

## **Internet:**

Umweltbundesamt Wien: [www.naturschutz.at/](http://www.naturschutz.at/)

Universität für Bodenkultur Wien: [www.wau.boku.ac.at/](http://www.wau.boku.ac.at/)

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien: [www.zamg.ac.at/](http://www.zamg.ac.at/)

Projekt StartClim: [www.austroclim.at/startclim/](http://www.austroclim.at/startclim/)

## **Karten:**

Die Zunge des Gepatschferners

Original-Aufnahme von Dr. S. FINSTERWALDER, Dr. H. SCHUNCK u. Dr. A. BLÜMCKE

Maßstab 1:10.750, Äquidistanz der Höhenlinien 10 m

Gletscherstand 1886/87

Aus Zeitschrift des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins, Ausg. 19, München 1888

Oetzthal & Stubai, Blatt IV, S. Weisskugel

Auf Grundlage der Originalaufnahme des K. u. K. Militärgeographischen Instituts

Maßstab 1:50.000, Äquidistanz der Höhenlinien 50 m

Gletscherstand ca, 1890 – 1893

Herausgegeben vom Deutschen und Österreichischen Alpenverein 1893

Der Talschluß des Kaunsertals in den Oetztaleralpen mit dem Gepatsch- u. Weißseeferner

Maßstab 1:20.000, Äquidistanz der Höhenlinien 20 m

Gletscherstand 1922

Aus Zeitschrift für Gletscherkunde, Bd. XVI, 1928

AV-Karte 30/2: Ötztaler Alpen, Blatt Weißkugel

Maßstab 1:25.000, Äquidistanz der Höhenlinien 20 m

Gletscherstand 1939

Herausgegeben vom Deutschen und Österreichischen Alpenverein 1951 (1. Ausgabe)

Gepatschferner 1971

Maßstab 1:10.000, Äquidistanz der Höhenlinien 10 m

Gletscherstand 1971

Aus Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band XIV, Heft 2, 1978

Veränderungen der Zungenlage des Gepatschferners seit 1886/87

Entwurf und Originalherstellung: ROLAND HENNINGER, Karlsruhe, 1985

Maßstab 1:20.000, Äquidistanz der Höhenlinien 20 m

Zungenstand 1886/87, 1922, 1940, 1953, 1971

Aus Zeitschrift für Vermessungswesen 112. Jahrgang, Heft 2, 1987

AV-Karte 30/2: Öztaler Alpen, Blatt Weißkugel

Maßstab 1:25.000, Äquidistanz der Höhenlinien 20 m

Gletscherstand 1997

Herausgegeben vom Deutschen und Österreichischen Alpenverein 2003 (9. Ausgabe)

## **Software:**

Microsoft® Office 2003

Adobe Photoshop CS2

ESRI™ ArcView 9.2

Google Earth (kostenlose Version)



## Anhang:

### Abbildungen:

A 2.1: Blick in das Kaunertal Richtung Süden . . . . .	228
A 2.2: Hinteres Kaunertal mit Gepatschferner . . . . .	229
A 2.3: Talschluss des Kaunertals mit Gepatschferner 1 . . . . .	230
A 2.4: Talschluss des Kaunertals mit Gepatschferner 2 . . . . .	230
A 2.5: Gepatschferner mit Fluchtkogel und Kesselwänden . . . . .	231
A 2.6: Gepatschferner aus Richtung Weißkugel . . . . .	231
A 2.7: Zunge des Gepatschfernens und Glockturmkamm . . . . .	232
A 2.8: Eisbruch der Zunge und Fluchtkogel . . . . .	232
A 2.9: Talschluss des Kaunertals mit Gepatschstausee . . . . .	233
A 2.10: Gepatschferner und Nachbargletscher . . . . .	233

### Tabellen:

A 3.2.1: Karten des Gepatschfernens . . . . .	180
A 4.2.1: RMS-Fehlerwerte verschiedener Georeferenzierungsmethoden . . . . .	186
A 4.2.2: Koordinaten und RMS-Fehler der Georeferenzierung der Karte Gepatschferner 1971 . . . . .	187
A 4.2.3: Bezugspunkte und RMS-Fehler der Georeferenzierung der Karte Gepatschferner 1922 . . . . .	188
A 4.2.4: Bezugspunkte und RMS-Fehler der Georeferenzierung der AV- Karte Oetzthal-Stubai Ausg. 1893 . . . . .	189
A 4.2.5: Bezugspunkte und RMS-Fehler der Georeferenzierung der AV- Karte 30/2 Ausg. 1951 . . . . .	190
A 4.2.6: Bezugspunkte und RMS-Fehler der Georeferenzierung der BEV Karte Ausgabe 1976 . . . . .	191
A 4.2.7: Bezugspunkte und RMS-Fehler der Georeferenzierung der BEV Karte Ausg. 2004 . . . . .	192
A 4.3.1: Erstellte TIN's mit den verwendeten Shape-Dateien und den verwendeten Interpolationseinstellungen . . . . .	192
A 5.1.1: Volumen des Gepatschfernens 1872 – 2003 (Angabe in m <sup>3</sup> ) . . . . .	194

A 5.1.2: Fehler (Bereiche unter 0 m) bei der Berechnung des Volumens des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in m <sup>3</sup> ) . . . . .	195
A 5.1.3: Fehler (Bereiche unter 0 m) bei der Berechnung des Volumens des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in % des jeweiligen Volumens) . . . . .	196
A 5.1.4: Volumenbilanz des Gepatschferners 1872 – 2003 (Ang. in m <sup>3</sup> ) . . . . .	197
A 5.1.5: Volumenbilanz des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in % des jeweiligen ursprünglichen Volumens) . . . . .	198
A 5.1.6: Jährliche Volumenbilanz des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in m <sup>3</sup> ) . . . . .	199
A 5.1.7: Jährliche Volumenbilanz des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in % des jeweiligen ursprünglichen Volumens) . . . . .	200
A 5.2.1: Fläche des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in m <sup>2</sup> ) . . . . .	201
A 5.2.2: Fehler (Bereiche unter 0 m) bei der Berechnung der Fläche des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in m <sup>2</sup> ) . . . . .	202
A 5.2.3: Fehler (Bereiche unter 0 m) bei der Berechnung der Fläche des Gepatschferners 1872 – 2003 (Ang. in % der jeweiligen Fläche) . . . . .	203
A 5.2.4: Flächenbilanz des Gepatschferners 1872 – 2003 (Ang. in m <sup>2</sup> ) . . . . .	204
A 5.2.5: Flächenbilanz des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in % der jeweiligen ursprünglichen Fläche) . . . . .	205
A 5.2.6: Jährliche Flächenbilanz des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in m <sup>2</sup> ) . . . . .	206
A 5.2.7: Jährliche Flächenbilanz des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in % der jeweiligen ursprünglichen Fläche) . . . . .	207
A 5.3.1: Masse des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in m w.e.) . . . . .	208
A 5.3.2: Gesamt Nettomassenbilanz des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in m w.e.) . . . . .	209
A 5.3.3: Gesamt Nettomassenbilanz des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in % der jeweiligen ursprünglichen Masse) . . . . .	210
A 5.3.4: Jährliche Gesamt Nettomassenbilanz des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in m w.e.) . . . . .	211
A 5.3.5: Jährliche Gesamt Nettomassenbilanz des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in % der jeweiligen ursprünglichen Masse) . . . . .	212

---

A 5.3.6: Mittlere Spezifische Massenbilanz und Jährliche Mittlere Spezifische Massenbilanz des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in m w.e.)	213
A 5.3.7: Mittlere Spezifische Massenbilanz und Jährliche Mittlere Spezifische Massenbilanz der Zunge (Hauptzunge) des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in m w.e.)	213
A 5.4.1a: Vertikale Massenverteilung des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in m w.e.)	214
A 5.4.1b: Vertikale Massenverteilung des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in m w.e.)	215
A 5.4.2a: Fläche der 50m Höhenintervalle 1872 – 2003 (Angabe in m <sup>2</sup> )	216
A 5.4.2b: Fläche der 50m Höhenintervalle 1872 – 2003 (Angabe in m <sup>2</sup> )	217
A 5.4.3a: Gesamt Nettomassenbilanz des Gepatschferners für 50m Höhenintervalle von 1872 – 2003 (Angabe in m w.e.)	218
A 5.4.3b: Gesamt Nettomassenbilanz des Gepatschferners für 50m Höhenintervalle von 1872 – 2003 (Angabe in m w.e.)	219
A 5.4.4a: Mittlere Spezifische Massenbilanz des Gepatschferners für 50m Höhenintervalle von 1872 – 2003 (Angabe in m w.e.)	220
A 5.4.4b: Mittlere Spezifische Massenbilanz des Gepatschferners für 50m Höhenintervalle von 1872 – 2003 (Angabe in m w.e.)	221
A 5.4.5a: Jährliche Gesamt Nettomassenbilanz des Gepatschferners für 50m Höhenintervalle von 1872 – 2003 (Angabe in m w.e.)	222
A 5.4.5b: Jährliche Gesamt Nettomassenbilanz des Gepatschferners für 50m Höhenintervalle von 1872 – 2003 (Angabe in m w.e.)	223
A 5.4.6a: Jährliche Mittlere Spezifische Massenbilanz des Gepatschferners für 50m Höhenintervalle von 1872 – 2003 (Angabe in m w.e.)	224
A 5.4.6b: Jährliche Mittlere Spezifische Massenbilanz des Gepatschferners für 50m Höhenintervalle von 1872 – 2003 (Angabe in m w.e.)	225

**Tab. A 3.2.1: Karten des Gepatschferners (Zusammenstellung H. ERDMANN).**

Gletscherstand	Veröffentlichung	Titel
?	1604/05	Karte von Tirol
?	ca. 1765	Karte von Tirol
Ca. 1860	1856	Karte des Gepatschferners im Kaunerthale, im Atlas: Die Oetzthaler Gebirgsgruppe mit besonderer Rücksicht auf Orographie und Gletscherkunde.
1872	?	3. LA, Blatt 5245/2 u. /4
1886/87	ZDÖAV 1888	Die Zunge des Gepatschferners. Öztaler Gruppe.
verm. 1888	?	Reambulierung der 3. LA, Blatt 5245/4.
ca. 1890/91	ZDÖAV 1893	Oetzthal & Stubai, Blatt IV, S. Weisskugel
ca. 1888	1902	Spezialkarte, Blatt 5245.
ca. 1888	1908	Spezialkarte, Blatt 5245.
ca. 1888	1915	Spezialkarte, Blatt 5245.
ca. 1890/91	1921	Oetzthal & Stubai, Blatt IV, S. Weisskugel
1922/23	ZG 1928	Der Talschluß des Kaunsertals in den Oetzaleralpen mit dem Gepatsch-Weißseeferner.
ca. 1888	1926	Spezialkarte, Blatt 5245.



<b>Maßstab</b>	<b>Kartograph. Bearbeitung</b>	<b>Kartographische Ausführung</b>
1:250000	W. YGL	Erste kartographische Darstellung, welche auch Gletscher enthält. Holzschnitt
ca. 1:100000	P. ANICH, B. HUEBER	Gletscher zumeist als Grundrissdarstellung vorhanden.
?	K. SONKLAR	?
1:25000	Landesvermessung	Farbdruck.
ca. 1:10750	S. FINSTERWALDER, A. BLÜMCKE und H. SCHUNCK	Felsdarstellung und Böschungsschraffen; 20 m-Höhenlinien im Fels nicht durchgezogen; Böschungsplastik der Gletscher durch Niveaulinien. Schwarzdruck.
1:25000	Landesvermessung	Farbdruck.
1:50000	S. SIMON	Felsdarstellung ohne Höhenlinien, 50 m-Höhenlinien, Schummerung gelblichgrau bis grünlichgelb, Reliefkarte. Mehrfarbdruck.
1:75000	Landesvermessung	Abgeleitet aus 3. LA 1:25.000. Schwarzweiß Druck.
1:75000	Landesvermessung	Abgeleitet aus 3. LA 1:25.000. Schwarzweiß Druck.
1:75000	Landesvermessung	Abgeleitet aus 3. LA 1:25.000. Schwarzweiß Druck.
1:50000	S. SIMON	Felsdarstellung ohne Höhenlinien, 50 m-Höhenlinien, Schummerung gelblichgrau bis grünlichgelb, Reliefkarte. Mehrfarbdruck. Nachträge von 1921.
1:20.000	G. HESS und J. SARTORIUS	Keine Felszeichnung, aber Moränenmaterial dargestellt; 20 m-Höhenlinien am Gletscher blau, sonst überall schwarz durchgezogen; Gletschernamen, -spalten und Gewässer blau; Höhenangaben und Bergnamen schwarz. Zweifarben-Steindruck.
1:75000	Landesvermessung	Abgeleitet aus 3. LA 1:25.000. Schwarzweiß Druck.

Gletscherstand	Veröffentlichung	Titel
ca. 1888	1936	Spezialkarte, Blatt 5245.
ca. 1888	1944	Karten der Alpen- und Donau Reichsgaue, Blatt 5245/ost.
1888	1950	Provisorische Ausgabe der Österr. Karte 1:50.000. Blatt 172.
1939	JDAV 1943-1951	Alpenvereinskarte 30/2 Öztaler Alpen, Blatt Weißkugel.
1939	1962	Alpenvereinskarte 30/2 Öztaler Alpen, Blatt Weißkugel.
1888	1965	Provisorische Ausgabe der Österr. Karte 1:50.000. Blatt 172.
1939 od. 1969	1971	Alpenvereinskarte 30/2 Öztaler Alpen, Blatt Weißkugel.
1976	1976	Österr. Karte 1:50.000, Blatt 172. (BMN)
1969	1977	Alpenvereinskarte 30/2 Öztaler Alpen, Blatt Weißkugel.
1969	1980	Alpenvereinskarte 30/2 Öztaler Alpen, Blatt Weißkugel.
1976	1882	Österr. Karte 1:50.000, Blatt 172. (BMN)
1976	1884	Österr. Karte 1:50.000, Blatt 172. (BMN)

<b>Maßstab</b>	<b>Kartograph. Bearbeitung</b>	<b>Kartographische Ausführung</b>
1:75000	Landesvermessung	Abgeleitet aus 3. LA 1:25000. Schwarzweiß Druck mit grünem Waldaufdruck.
1:50000	Landesvermessung	Vergrößerung der Spezialkarte 1:75000. SW Druck mit grünem Waldaufdruck.
1:50000	Landesvermessung	Vergrößerung der Spezialkarte 1:75000. SW Druck mit grünem Waldaufdruck. Einzelne Nachträge 1950.
1:25000	E. SCHNEIDER, F. EBSTER	Haarstrich Felszeichnung mit Höhenlinien, 20 m-Höhenlinien, Signaturen für Moränen und Blockschutt, keine Geländeschummerung, 5-Farbdruck.
1:25000	E. SCHNEIDER, F. EBSTER Nachträge: F. EBSTER	Haarstrich Felszeichnung mit Höhenlinien, 20 m-Höhenlinien, Signaturen für Moränen und Blockschutt, keine Geländeschummerung, 5-Farbdruck.
1:50000	Landesvermessung	Vergrößerung der Spezialkarte 1:75000. SW Druck mit grünem Waldaufdruck. Einzelne Nachträge 1965.
1:25000	E. SCHNEIDER, F. EBSTER Nachträge: R. BLANKE	Haarstrich Felszeichnung mit Höhenlinien, 20 m-Höhenlinien, Signaturen für Moränen und Blockschutt, keine Geländeschummerung, 5-Farbdruck.
1:50000	Landesvermessung	Vollständige Neuaufnahme, Farbdruck.
1:25000	E. SCHNEIDER, F. EBSTER Nachträge: G. MOSER	Haarstrich Felszeichnung mit Höhenlinien, 20 m-Höhenlinien, Signaturen für Moränen und Blockschutt, keine Geländeschummerung, 5-Farbdruck.
1:25000	E. SCHNEIDER, F. EBSTER Nachträge: G. MOSER	Haarstrich Felszeichnung mit Höhenlinien, 20 m-Höhenlinien, Signaturen für Moränen und Blockschutt, keine Geländeschummerung, 5-Farbdruck. Vollständige kartographische Ergänzung u. Geländebegehung.
1:50000	Landesvermessung	Farbdruck. Einzelne Nachträge 1982.
1:50000	Landesvermessung	Farbdruck. Kartenrevision 1984.

<b>Gletscherstand</b>	<b>Veröffentlichung</b>	<b>Titel</b>
1969	1986	Alpenvereinskarte 30/2 Öztaler Alpen, Blatt Weißkugel.
1886 - 1971	1987	Veränderungen der Zungenlage des Gepatschferners seit 1886/87.
1990	1991	Österr. Karte 1:50.000, Blatt 172. (BMN)
1969	1993	Alpenvereinskarte 30/2 Öztaler Alpen, Blatt Weißkugel.
1997	1998	Österr. Karte 1:50.000, Blatt 172. (BMN)
1990	1998	Orthofotokarte Gepatschferner 1990.
1997	2001	Alpenvereinskarte 30/2 Öztaler Alpen, Blatt Weißkugel.
1997	2003	Alpenvereinskarte 30/2 Öztaler Alpen, Blatt Weißkugel.
2003	2004	Österr. Karte 1:50.000, Blatt 2103. (UTM)

<b>Maßstab</b>	<b>Kartograph. Bearbeitung</b>	<b>Kartographische Ausführung</b>
1:25000	F. EBSTER Nachträge: A. INGENHAEFF	Haarstrich Felszeichnung mit Höhenlinien, 20 m-Höhenlinien, Signaturen für Moränen und Blockschutt, keine Geländeschummerung, 5-Farbdruck.
1:20000	R. HENNINGER	Mehrfarbdruck, Äquidistanz der Höhenlinien 20 m. Zungenlagen von 1886/87, 1922, 1940, 1953, 1971.
1:50000	Landesvermessung	Farbdruck. Kartenfortführung 1991.
1:25000	E. SCHNEIDER, F. EBSTER Nachträge: G. MOSER	Haarstrich Felszeichnung mit Höhenlinien, 20 m-Höhenlinien, Signaturen für Moränen und Blockschutt, keine Geländeschummerung, 5-Farbdruck.
1:50000	Landesvermessung	Farbdruck. Kartenfortführung 1998.
1:10000	A. KEUTTERLING u. Dr. A. THOMAS	10 m-Höhenlinien über Orthophoto. SW Druck.
1:25000	E. SCHNEIDER, F. EBSTER Nachträge: G. MOSER	Haarstrich Felszeichnung mit Höhenlinien, 20 m-Höhenlinien, Signaturen für Moränen und Blockschutt, keine Geländeschummerung, 5-Farbdruck. Vollst. digitale Nachführung.
1:25000	E. SCHNEIDER, F. EBSTER Nachträge: G. MOSER	Haarstrich Felszeichnung mit Höhenlinien, 20 m-Höhenlinien, Signaturen für Moränen und Blockschutt, keine Geländeschummerung, 5-Farbdruck.
1:50000	Landesvermessung	Farbdruck. Aktualisierung 2004.

**Tab. A 4.2.1: RMS-Fehlerwerte verschiedener Georeferenzierungsmethoden.**

Methode / Bezugspunkt	RMS-Fehler:
4-Punkt Methode:	
Großer Rauher Kopf	5.34402
Zahn	4.05784
Brandenburger Haus	6.03511
Zinne	4.74893
	Gesamt RMS-Fehler: 5.09901
5-Punkt Methode	
Rauhekopf Hütte	16.53694
Großer Rauher Kopf	11.63694
Zahn	4.78344
Brandenburger Haus	12.68208
Zinne	10.37376
	Gesamt RMS-Fehler: 11.83402
7-Punkt Methode	
Rauhekopf Hütte	19.10560
Großer Rauher Kopf	13.40339
Zahn	25.62444
Weißseespitze	20.62538
Brandenburger Haus	8.93552
Zinne	8.19442
Hintere Hintereisspitze	9.40331
	Gesamt RMS-Fehler: 16.30998

**Tab. A 4.2.2: Koordinaten und RMS-Fehler der Georeferenzierung der Karte Gepatschferner 1971.**

Koordinaten (x,y)	RMS-Fehler Gletscherfläche	RMS-Fehler Höhenlinien Glet.	RMS-Fehler Höhenpunkte Glet.
1: 32000, 193000	1.29954	1.25145	0.97522
2: 34000, 193000	0.38311	0.46300	0.44290
3: 32000, 192000	1.35088	1.06964	1.16853
4: 34000, 192000	1.62619	1.34654	1.47169
5: 33000, 191000	0.45223	0.46074	0.16473
6: 35000, 191000	0.88918	0.96524	0.94308
7: 30000, 190000	1.26291	0.78296	0.97323
8: 33000, 190000	1.33751	1.24317	1.27938
9: 35000, 190000	1.46424	1.40102	1.03862
10: 30000, 189000	0.92860	0.86177	0.75033
11: 32000, 189000	1.52556	1.37367	1.39284
12: 33000, 189000	1.30318	1.41714	1.43358
13: 35000, 189000	1.04399	0.89727	0.97487
14: 33000, 188000	1.15688	1.25499	1.08969
15: 35000, 188000	0,63093	0.89436	0.83034
16: 31000, 187000	0.63121	1.32186	1.44572
17: 33000, 187000	1.62585	0.30411	0.51751
	Gesamt: 1.17784	Gesamt: 1.07542	Gesamt: 1.05723

**Tab. A 4.2.3: Bezugspunkte und RMS-Fehler der Georeferenzierung der Karte Gepatschferner 1922.**

Bezugspunkt:	RMS-Fehler:
Großer Rauher Kopf	13.3046
Rauhekopf Hütte	9.4637
Zahn	4.0559
Schwarzwandspitze	11.5571
Brandenburger Haus	9.2772
Zinne	11.1845
Vernagl	12.8021
	Gesamt RMS-Fehler: 10.2350



**Tab. A 4.2.4: Bezugspunkte und RMS-Fehler der Georeferenzierung der Karte Gepatschferner 1893.**

Koordinaten (x, Y)	RMS-Fehler:
32192.259, 191858.390	25.34361
29946.962, 190281.293	114.39025
29894.178, 192545.435	19.54864
33807.731, 189873.531	6.88782
33827.938, 190133.986	51.13997
34999.983, 191079.256	53.09931
34320.367, 188237.236	23.77003
29954.516, 188099.765	78.35232
31887.196, 186292.204	57.12869
34179.259, 190548.891	35.02138
33720.114, 187597.793	68.30574
34147.514, 191879.609	152.69099
28807.622, 189255.270	20.60834
32786.785, 192407.633	110.58968
	Gesamt RMS-Fehler: 71.42485

**Tab. A 4.2.5: Bezugspunkte und RMS-Fehler der Georeferenzierung der AV-Karte 30/2 Ausg. 1951.**

Koordinaten (X, Y)	RMS-Fehler:
32192.900, 191862.419	19.32854
29897.318, 192551.460	1.61608
29949.852, 190285.199	4.74827
34322.331, 188238.844	3.14268
32490.996, 187616.997	7.35021
33812.880, 189882.036	13.05340
33832.428, 190138.594	13.95756
33412.161, 189662.129	12.48813
34179.392, 190555.195	3.13457
35002.820, 191084.193	6.60041
35112.774, 192024.905	8.98355
34996.712, 192382.865	4.38225
34630.200, 192990.052	0.45859
34390.746, 192735.937	1.17492
32614.388, 192199.609	2.28651
29875.328, 192088.434	1.01443
29865.554, 191907.622	2.22842
30289.485, 191772.013	3.63800
29754.379, 191073.198	3.48392
29954.738, 188103.235	3.88477
30701.200, 187620.662	1.30743
31887.474, 186304.886	4.35602
32480.001, 186594.430	14.75136
33876.176, 190889.338	2.66474
33943.562, 189569.815	2.07826
33962.689, 187810.120	7.18013
33725.110, 187606.769	3.06750
32788.888, 192413.715	16.69870
	Gesamt RMS-Fehler: 7.97296

**Tab. A 4.2.6: Bezugspunkte und RMS-Fehler der Georeferenzierung der BEV Karte Ausg. 1976.**

Koordinaten (X, Y)	RMS-Fehler:
29815.989934, 193093.903699	7.40901
29896.016924, 192553.031633	4.44991
29873.940513, 192086.667453	9.29543
29949.828175, 190284.680416	5.13514
29955.347278, 188101.875292	16.80128
31887.585139, 186303.751627	15.44479
32480.336771, 186591.848788	10.98682
32892.061833, 187162.524009	16.96703
33724.342523, 187606.259868	9.80435
34323.717078, 188239.852860	11.19062
33811.544346, 189883.441649	5.60763
33831.413116, 190138.424194	6.59059
34628.371548, 192992.904119	8.67327
34151.521073, 191882.460653	14.58156
32193.343429, 191863.695703	12.93590
32789.406523, 192413.398334	6.40175
29751.461303, 191072.411296	20.24179
30701.388238, 187394.794480	17.76835
	Gesamt RMS-Fehler: 12.09852

**Tab. A 4.2.7: Bezugspunkte und RMS-Fehler der Georeferenzierung der BEV Karte Ausg. 2004.**

Koordinaten (X, Y)	RMS-Fehler:
32195.263307, 191863.468210	4.44451
29873.404224, 192086.880440	6.09728
29897.825804, 192552.699461	5.28498
29816.420538, 193093.592227	8.63363
29950.286975, 190285.110555	15.54970
29956.618496, 188102.544927	7.51923
31887.732303, 186303.488552	11.17107
32480.181737, 186594.738503	6.46934
33725.682305, 187606.877309	8.43968
34323.558758, 188240.029376	1.53115
33813.419092, 189881.702238	13.66376
33946.381026, 189567.839713	11.39975
34152.607699, 191884.271778	7.13883
34629.280756, 192991.383394	3.65019
	Gesamt RMS-Fehler: 8.77859

**Tab. A 4.3.1: Erstellte TIN's mit den verwendeten Shape-Dateien und den verwendeten Interpolationseinstellungen.**

Shapefile:	Heigh source:	Triangulate as:	Output TIN:
Gelände (ohne Seitengletscher):			gelaende_tin
Gelände_mit_Untergrund	Hoehe	mass points	
Festpunkte_Gepatsch_1971	Hoehe	mass points	
Gelaende_Poly_Clip	none	hard clip	

Shapefile:	Heigh source:	Triangulate as:	Output TIN:
Gelände (mit Seitengletscher):			gelaende_komp_tin
Gelände_mit_Untergrund	Hoehe	mass points	
Festpunkte_Gepatsch_1971	Hoehe	mass points	
Gelaende_Poly_Clip_Seitengl	none	hard clip	
Gelände für Gletscherzunge			gelaende_zunge_tin
Gelände_mit_Untergrund	Hoehe	mass points	
Festpunkte_Gepatsch_1971	Hoehe	mass points	
Gelaende_Poly_Clip_Zunge	none	hard clip	
Gletscherstand 1922, 1976 & 1997:			gepatsch_19xx_tin
Gletscherstand_xxxx	Hoehe	mass points	
Gelände_cut_xxxx	Hoehe	mass points	
Festp_Gl_xxxx	Hoehe	mass points	
Gletschergrenze_xxxx	none	hard line	
Gelaende_Poly_Clip_komplett_Vis	none	hard clip	
Gletscherstand 1872, 1890, 1939 & 1971:			gepatsch_1xxx_tin
Gletscherstand_xxxx	Hoehe	mass points	
Gelände_cut_xxxx	Hoehe	mass points	
Festp_Gl_xxxx	Hoehe	mass points	
HöhenpunkteGl_xxxx	Hoehe	mass points	
Gletschergrenze_xxxx	none	hard line	
Gelaende_Poly_Clip_komplett_Vis	none	hard clip	
Gletscherzungen 1886/87 & 1953:			zunge_xxxx_tin
Zungenstand_xxxx	Hoehe	mass points	
Gelaende_Zunge_cut_xxxx	Hoehe	mass oints	
Festp_Gl_xxxx	Hoehe	mass points	
Zungengrenze_xxxx	none	hard line	
Gelaende_Poly_Clip_Zunge	none	hard clip	
Alle anderen TIN's (Gletscher ohne Seitengletscher, Zungenstände, Seitengletscher und die TIN's für die Visualisierung) wurden aus den Gesamt-TIN's mit den entsprechenden Polygonen abgeleitet.			

**Tab. A 5.1.1: Volumen des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in m<sup>3</sup>).**

Gletscherstand	Hauptzunge	Nebenzungen	Firnbecken	Gesamtgletscher**
1872	282159429	150857836	1897480269	2332121136
1886*	181293660	-	-	-
1890	293109250	22725881	2173594727	2491620464
1922	308928395	50861145	1739674980	2101014771
1939	255804270	40355332	1609249163	1907215253
1953	197322364	-	-	-
1971	177164311	34652547	1657249756	1870903269
1976	170421897	27901473	1644907462	1844545763
1990	186450473	28684906	1678771547	1895512135
1997	153102609	6660717	1501874170	1663090117
2003	147957500	11158013	1564443132	1725003100

\* nur Bereich der Zungenspitze

\*\* ohne Seitengletscher

**Tab. A 5.1.2: Fehler (Bereiche unter 0 m) bei der Berechnung des Volumens des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in m<sup>3</sup>).**

Gletscherstand	Hauptzunge	Nebenzungen	Firnbecken	Gesamtgletscher**
1872	54764607	26327474	11114936	93167115
1886*	33439	-	-	-
1890	4960914	49680466	2915592	57818956
1922	72963	281532	1065040	1424169
1939	13337	15029	552891	581256
1953	64743	-	-	-
1971	54182	74799	880237	995468
1976	140991	211894	1453222	1822037
1990	34668	36349	539659	607724
1997	32	1062	4805	5907
2003	6541	2262	323738	330314

\* nur Bereich der Zungenspitze

\*\* ohne Seitengletscher

**Tab. A 5.1.3: Fehler (Bereiche unter 0 m) bei der Berechnung des Volumens des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in % des jeweiligen Volumens).**

Gletscherstand	Hauptzunge	Nebenzungen	Firnbecken	Gesamtgletscher**
1872	19.4091	17.4518	0.5858	3,9950
1886*	0.0184	-	-	-
1890	1.6925	218.6074	0.1341	2,3205
1922	0.0236	0.5535	0.0612	0,0678
1939	0.0052	0.0372	0.0344	0,0305
1953	0.0328	-	-	-
1971	0.0306	0.1564	0.0531	0,0532
1976	0.0827	0.7594	0.0883	0,0988
1990	0.0186	0.1267	0.0321	0,0320
1997	0.0000	0.0159	0.0003	0,0000
2003	0.0044	0.0203	0.0207	0,0191

\* nur Bereich der Zungenspitze

\*\* ohne Seitengletscher



Tab. A 5.1.4: Volumenbilanz des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in m<sup>3</sup>).

Zeitraum	Volumendifferenz Hauptzunge	Volumendifferenz Nebenzungen	Volumendifferenz Seitengletscher	Volumendifferenz Firnbekken	Volumendifferenz Gesamtgletscher
1872 – 1890	+10949821	-128131955	+103390633	+276114458	+262889961
1890 – 1922	+15819145	+28135264	-44249474	-433919747	-434855167
1922 – 1939	-53124125	-10505813	-4726289	-130425817	-198525807
1939 – 1953	-58481906	-	-	-	-
1939 – 1971	-78639959	-5702785	-3545625	+48000593	-39857609
1953 – 1971	-20158053	-	-	-	-
1971 – 1976	-6742414	-6751074	-1778493	-12342294	-28135999
1976 – 1990	+16028576	+783433	-11421257***	+33864085	+50966372**
1990 – 1997	-33347864	-22024189		-176897377	-232422018**
1997 – 2003	-5145109	+4497296	+1739750	+62568962	+63652733

\*\* ohne Seitengletscher

\*\*\* 1976 – 1997

**Tab. A 5.1.5: Volumenbilanz des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in % des jeweiligen ursprünglichen Volumens).**

Zeitraum	Volumendifferenz Hauptzunge	Volumendifferenz Nebenzungen	Volumendifferenz Firnbecken	Volumendifferenz Gesamtgleitscher**
1872 – 1890	+3.8807	-84.9356	+14.5516	+6.8392
1890 – 1922	+5.3970	+123.8027	-19.9632	-15.6768
1922 – 1939	-17.1963	-20.6559	-7.4971	-9.2241
1939 – 1953	-22.8620	-	-	-
1939 – 1971	-30.7422	-14.1314	+2.9828	-1.9039
1953 – 1971	-10.2158	-	-	-
1971 – 1976	-3.8057	-19.4822	-0.7447	-1.4088
1976 – 1990	+9.4052	+2.8079	+2.0587	+2.7631
1990 – 1997	-17.8856	-76.7797	-10.5373	-12.2617
1997 – 2003	-3.3606	+40.3055	+4.1661	+3.7228

\*\* ohne Seitengleitscher

Tab. A 5.1.6: Jährliche Volumenbilanz des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in m<sup>3</sup>).

Zeitraum	Volumendifferenz Hauptzunge	Volumendifferenz Nebenzungen	Volumendifferenz Seitengletscher	Volumendifferenz Firnbekken	Volumendifferenz Gesamtgletscher
1872 – 1890	+608323	-7118441	+5743924	+15339692	+14604998
1890 – 1922	+494348	+879227	-1382796	-13559992	-13589224
1922 – 1939	-3124949	-617989	-278017	-7672107	-11677989
1939 – 1953	-4177279	-	-	-	-
1939 – 1971	-2457499	-178212	-110801	+1500019	-1245550
1953 – 1971	-1119892	-	-	-	-
1971 – 1976	-1348483	-1350215	-355699	-2468459	-5627200
1976 – 1990	+1144898	+55960	-543869***	+2418863	+3640455**
1990 – 1997	-4763981	-3146313		-25271054	-33203145**
1997 – 2003	-857519	+749550	+289959	+10428160	+10608789

\*\* ohne Seitengletscher

\*\*\* 1976 – 1997

**Tab. A 5.1.7: Jährliche Volumenbilanz des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in % des jeweiligen ursprünglichen Volumens).**

Zeitraum	Volumendifferenz Hauptzunge	Volumendifferenz Nebenzungen	Volumendifferenz Firnbecken	Volumendifferenz Gesamtgleitscher**
1872 – 1890	+0.2156	-4.7186	+0.8084	+0.3800
1890 – 1922	+0.1687	+3.8688	-0.6239	-0.4899
1922 – 1939	-1.0115	-1.2151	-0.4410	-0.5426
1939 – 1953	-1.6330	-	-	-
1939 – 1971	-0.9607	-0.4416	+0.0932	-0.0595
1953 – 1971	-0.5675	-	-	-
1971 – 1976	-0.7611	-3.8964	-0.1489	-0.2818
1976 – 1990	+0.6718	+0.2006	+0.1471	+0.1974
1990 – 1997	-2.5551	-10.9685	-1.5053	-1.7517
1997 – 2003	-0.5601	+6.7176	+0.6944	+0.6204

\*\* ohne Seitengletscher

Tab. A 5.2.1: Fläche des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in m<sup>2</sup>).

Gletscherstand	Hauptzunge	Nebenzungen	Seitengletscher	Firnbecken	Gesamtgletscher
1872	2837476	1924315	1597600	17488165	23875888
1886*	1924270	-	-	-	-
1890	2799033	920979	1632425	17648781	23032305
1922	2679281	2034311	1464225	17419298	23624222
1939	2251246	1488111	1391700	17326363	22484210
1953	1918194	-	-	-	-
1971	1649989	1139040	1391175	17254739	21464611
1976	1665119	1168098	1405250	17280168	21541180
1990	1722762	1035200	-	17262469	20048605**
1997	1532226	786623	1312450	17125444	20779894
2003	1384839	668068	1296500	17212758	20587905

\* nur Bereich der Zungenspitze

\*\* ohne Seitengletscher

**Tab. A.5.2.2: Fehler (Bereiche unter 0 m) bei der Berechnung der Fläche des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in m<sup>2</sup>).**

Gletscherstand	Hauptzunge	Nebenzungen	Firnbecken	Gesamtgletscher**
1872	967524	625035	498060	2102362
1886*	19904	-	-	-
1890	277766	1546820	249018	2078019
1922	16993	44338	110476	172902
1939	3153	8813	101636	113139
1953	16855	-	-	-
1971	16735	17159	113310	143963
1976	24456	51727	217106	296070
1990	9262	10749	70455	89894
1997	173	3151	9905	12980
2003	3361	2607	87592	92820

\* nur Bereich der Zungenspitze

\*\* ohne Seitengletscher

**Tab. A 5.2.3: Fehler (Bereiche unter 0 m) bei der Berechnung der Fläche des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in % der jeweiligen Fläche).**

Gletscherstand	Hauptzunge	Nebenzungen	Firnbecken	Gesamtgletscher**
1872	34.0981	32.4809	2.8480	9.4368
1886*	1.0344	-	-	-
1890	9.9236	167.9539	1.4110	9.7104
1922	0.6342	2.1795	0.6342	0.7802
1939	0.1401	0.5922	0.5866	0.5364
1953	0.8787	-	-	-
1971	1.0142	1.5064	0.6567	0.7172
1976	1.4687	4.4283	1.2564	1.4704
1990	0.0054	1.0384	0.4081	0.4483
1997	0.0113	0.4006	0.0578	0.0667
2003	0.2427	0.3902	0.5089	0.4508

\* nur Bereich der Zungenspitze

\*\* ohne Seitengletscher

**Tab. A.5.2.4: Flächenbilanz des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in m<sup>2</sup>).**

Zeitraum	Flächendifferenz Hauptzunge	Flächendifferenz Nebenzungen	Flächendifferenz Seitengletscher	Flächendifferenz Firnbecken	Flächendifferenz Gesamtgletscher
1872 – 1890	-38443	-1003336	+34825	+160616	-843583
1890 – 1922	-119752	+1113332	-168200	-229483	+591917
1922 – 1939	-428035	-546200	-72525	-92935	-1140012
1939 – 1953	-333052	-	-	-	-
1939 – 1971	-601257	-349071	-525	-71624	-1019599
1953 – 1971	-268205	-	-	-	-
1971 – 1976	+15130	+29058	+14075	+25429	+76569
1976 – 1990	+57643	-132898	-92800***	-17699	-87325**
1990 – 1997	-190536	-248577		-137025	-581161**
1997 – 2003	-147387	-118555	-15950	+87314	-191989

\*\* ohne Seitengletscher

\*\*\* 1976 – 1997



**Tab. A 5.2.5: Flächenbilanz des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in % der jeweiligen ursprünglichen Fläche).**

Zeitraum	Flächendifferenz Hauptzunge	Flächendifferenz Nebenzungen	Flächendifferenz Seitengletscher	Flächendifferenz Firnbecken	Flächendifferenz Gesamtgletscher
1872 – 1890	-1.3548	-52.1399	+2.1798	+0.9184	-3.5332
1890 – 1922	-4.2783	+120.8857	-10.3037	-1.3003	+2.5699
1922 – 1939	-15.9757	-26.8494	-4.9531	-0.5335	-4.8256
1939 – 1953	-14.7941	-	-	-	-
1939 – 1971	-26.7077	-23.4573	-0.0377	-0.4134	-4.5347
1953 – 1971	-13.9822	-	-	-	-
1971 – 1976	+0.9170	+2.5511	+1.0117	+0.1474	+0.3567
1976 – 1990	+3.4620	-11.3773	-6.6038***	-0.1024	-0.4337**
1990 – 1997	-11.0599	-24.0125		-0.7938	-2.8952**
1997 – 2003	-9.6191	-15.0714	-1.2153	+0.5098	-0.9239

\*\* ohne Seitengletscher

\*\*\* 1976 – 1997

**Tab. A.5.2.6: Jährliche Flächenbilanz des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in m<sup>2</sup>).**

Zeitraum	Flächendifferenz Hauptzunge	Flächendifferenz Nebenzungen	Flächendifferenz Seitengletscher	Flächendifferenz Firnbecken	Flächendifferenz Gesamtgletscher
1872 – 1890	-2136	-55741	+1935	+8923	-46866
1890 – 1922	-3742	+34792	-5256	-7171	-18497
1922 – 1939	-25179	-32129	-4266	-5467	-67060
1939 – 1953	-23789	-	-	-	-
1939 – 1971	-18789	-10908	-16	-2238	-31862
1953 – 1971	-14900	-	-	-	-
1971 – 1976	+3026	+5812	+2815	+5086	+15314
1976 – 1990	+4117	-9493	-4419***	-1264	-6238**
1990 – 1997	-27219	-35511		-19575	-83023**
1997 – 2003	-24564	-19759	-2659	+14552	-31998

\*\* ohne Seitengletscher

\*\*\* 1976 – 1997

**Tab. A 5.2.7: Jährliche Flächenbilanz des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in % der jeweiligen ursprünglichen Fläche).**

Zeitraum	Flächendifferenz Hauptzunge	Flächendifferenz Nebenzungen	Flächendifferenz Seitengletscher	Flächendifferenz Firnbekken	Flächendifferenz Gesamtgletscher
1872 – 1890	-0.0753	-2.8967	+0.1211	+0.0510	-0.1963
1890 – 1922	-0.1337	+3.7777	-0.3220	-0.0406	+0.0803
1922 – 1939	-0.9397	-1.5794	-0.2914	-0.0314	-0.2839
1939 – 1953	-1.0567	-	-	-	-
1939 – 1971	-0.8346	-0.7330	-0.0012	-0.0129	-0.1417
1953 – 1971	-0.7768	-	-	-	-
1971 – 1976	+0.1834	+0.5102	+0.2023	+0.0295	+0.0713
1976 – 1990	+0.2473	-0.8127	-0.3145***	-0.0073	-0.0310**
1990 – 1997	-1.5800	-3.4304		-0.1134	-0.4136**
1997 – 2003	-1.6032	-2.5120	-0.2025	+0.0849	-0.1540

\*\* ohne Seitengletscher

\*\*\* 1976 – 1997

**Tab. A 5.3.1: Masse des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in m w.e.).**

Gletscherstand	Hauptzunge	Nebenzungen	Firnbecken	Gesamtgletscher**
1872	253943486	135772052	1707732242	2098909022
1886*	163164294	-	-	-
1890	263798325	20453293	1956235254	2242458418
1922	278035556	45775031	1565707482	1890913294
1939	230223843	36319799	1448324247	1716493728
1953	177590128	-	-	-
1971	159447880	31187292	1491524780	1683812942
1976	153379707	25111326	1480416716	1660091187
1990	167805426	25816415	1510894392	1705960922
1997	137792348	5994645	1351686753	1496781105
2003	133161750	10042212	1407998819	1552502790

\* nur Bereich der Zungenspitze

\*\* ohne Seitengletscher

Tab. A 5.3.2: Gesamt Nettomassenbilanz des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in m w.e.).

Zeitraum	Massendifferenz Hauptzunge	Massendifferenz Nebenzungen	Massendifferenz Seitengletscher	Massendifferenz Firnbekken	Massendifferenz Gesamtgletscher
1872 – 1890	+9854839	-115318759	+93051570	+248503012	+392052408
1890 – 1922	+14237231	+25321738	-39824527	-390527772	-391369651
1922 – 1939	-47811713	-9455232	-4253660	-117383235	-178673226
1939 – 1953	-52633715	-	-	-	-
1939 – 1971	-70775963	-5132507	-3191063	+43200533	-35871849
1953 – 1971	-18142248	-	-	-	-
1971 – 1976	-6068173	-6075966	-1600644	-11108064	-25322399
1976 – 1990	+14425719	+705089	-10279131***	+30477676	+45869735**
1990 – 1997	-30013078	-19821770		-159207639	-209179817**
1997 – 2003	-4630598	+4047566	+1565775	+56312066	+57287460

\*\* ohne Seitengletscher

\*\*\* 1976 – 1997

**Tab. A 5.3.3: Gesamt Nettomassenbilanz des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in % der jeweiligen ursprünglichen Masse).**

Zeitraum	Massendifferenz Hauptzunge	Massendifferenz Nebenzungen	Massendifferenz Firnbecken	Massendifferenz Gesamtgleitscher**
1872 – 1890	+3.8807	-84.9356	+14.5516	+6.8392
1890 – 1922	+5.3970	+123.8027	-19.9632	-15.6768
1922 – 1939	-17.1963	-20.6559	-7.4971	-9.2241
1939 – 1953	-22.8620	-	-	-
1939 – 1971	-30.7422	-14.1314	+2.9828	-1.9039
1953 – 1971	-10.2158	-	-	-
1971 – 1976	-3.8057	-19.4822	-0.7447	-1.4088
1976 – 1990	+9.4052	+2.8079	+2.0587	+2.7631
1990 – 1997	-17.8856	-76.7797	-10.5373	-12.2617
1997 – 2003	-3.3606	+40.3055	+4.1661	+3.7228

\*\* ohne Seitengleitscher

Tab. A 5.3.4: Jährliche Gesamt Nettomassenbilanz des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in m w.e.).

Zeitraum	Massendifferenz Hauptzunge	Massendifferenz Nebenzungen	Massendifferenz Seitengletscher	Massendifferenz Firnbecken	Massendifferenz Gesamtgletscher
1872 – 1890	+547491	-6406598	+5169532	+13805723	+21780689
1890 – 1922	+444913	+791304	-1244516	-12203993	-12230302
1922 – 1939	-2812454	-556190	-250215	-6904896	-10510190
1939 – 1953	-3759551	-	-	-	-
1939 – 1971	-2211749	-160391	-99721	+1350017	-1120995
1953 – 1971	-1007903	-	-	-	-
1971 – 1976	-1213635	-1215193	-320129	-2221613	-5064480
1976 – 1990	+1030409	+50364	-489482***	+2176977	+3276410**
1990 – 1997	-4287583	-2831681		-22743948	-29882831**
1997 – 2003	-771766	+674595	+260962	+9385345	+9547910

\*\* ohne Seitengletscher

\*\*\* 1976 – 1997

**Tab. A 5.3.5: Jährliche Gesamt Nettomassenbilanz des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in % der jeweiligen ursprünglichen Masse).**

Zeitraum	Massendifferenz Hauptzunge	Massendifferenz Nebenzungen	Massendifferenz Firnbecken	Massendifferenz Gesamtgleitscher**
1872 – 1890	+0.2156	-4.7186	+0.8084	+0.3800
1890 – 1922	+0.1687	+3.8688	-0.6239	-0.4899
1922 – 1939	-1.0115	-1.2151	-0.4410	-0.5426
1939 – 1953	-1.6330	-	-	-
1939 – 1971	-0.9607	-0.4416	+0.0932	-0.0595
1953 – 1971	-0.5675	-	-	-
1971 – 1976	-0.7611	-3.8964	-0.1489	-0.2818
1976 – 1990	+0.6718	+0.2006	+0.1471	+0.1974
1990 – 1997	-2.5551	-10.9685	-1.5053	-1.7517
1997 – 2003	-0.5601	+6.7176	+0.6944	+0.6204

\*\* ohne Seitengletscher



**Tab. A 5.3.6: Mittlere Spezifische Massenbilanz und Jährliche Mittlere Spezifische Massenbilanz des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in m w.e.).**

Zeitraum	Mittlere Spezifische Massenbilanz	Jährliche Mittlere Spezifische Massenbilanz
1872 – 1890	+16.4204	+0.9122
1890 – 1922	-16.9922	-0.5310
1922 – 1939	-7.5631	-0.4449
1939 – 1971	-1.5954	-0.0499
1971 – 1976	-1.1797	-0.2359
1976 – 1990**	+2.2780	+0.1627
1990 – 1997**	-10.4336	-1.4905
1997 – 2003	+2.7569	+0.4595

\*\* ohne Seitengletscher

**Tab. A 5.3.7: Mittlere Spezifische Massenbilanz und Jährliche Mittlere Spezifische Massenbilanz der Zunge (Hauptzunge) des Gepatschferners 1872 – 2003 (Angabe in m w.e.).**

Zeitraum	Mittlere Spezifische Massenbilanz	Jährliche Mittlere Spezifische Massenbilanz
1872 – 1890	+3.4731	+0.1930
1890 – 1922	+5.0865	+0.1590
1922 – 1939	-17.8450	-1.0497
1939 – 1953	-23.3798	-1.6700
1953 – 1971	-9.4580	-0.5254
1971 – 1976	-3.6777	-0.7355
1976 – 1990	+8.6635	+0.6188
1990 – 1997	-17.4215	-2.4888
1997 – 2003	-3.0221	-0.5037

**Tab. A 5.4.1a: Vertikale Massenverteilung des Gepatschferners 1872 – 2003  
(Angabe in m w.e.).**

Höhe	1872**	1890**	1922**	1939**	1953**
1900-1950	36932	186990	0	0	
1950-2000	1549652	1168812	19925	0	
2000-2050	8187623	2947556	256711	78426	
2050-2100	7433588	1756090	709878	789255	
2100-2150	3446176	6876992	4256405	3838522	
2150-2200	6078139	7336900	9643372	9366636	
2200-2250	16872798	14633594	16825576	14920760	
2250-2300	19122197	24855359	31375536	23219059	
2300-2350	62035192	25140661	34994811	23254355	
2350-2400	48228346	18686209	24091443	16353520	
2400-2450	13716475	12536013	14154585	10278441	
2450-2500	11134854	13334782	14776697	13750386	
2500-2550	19669442	15375202	17763970	14125730	
2550-2600	6800740	15446603	17451577	13524856	
2600-2650	12248665	10471495	13258406	10983251	
2650-2700	14131324	10980231	8438280	7246996	
2700-2750	17847071	15475688	14351123	13581387	
2750-2800	44445253	15860239	19992386	18829205	
2800-2850	45055543	28944734	49470544	53246169	
2850-2900	40442647	53680325	69788603	64253577	
2900-2950	83647134	93442687	117504976	122116581	
2950-3000	96312464	174817386	168560091	188727645	
3000-3050	214031115	165703258	179119317	141790791	
3050-3100	372973475	168538795	165155435	148770127	
3100-3150	117954415	201996229	171255536	149069787	
3150-3200	137255738	244778959	301807929	291584150	
3200-3250	132427188	308692049	153895180	145111998	
3250-3300	138859232	192347241	98251109	77600394	
3300-3350	130509862	189172768	73949823	61476485	
3350-3400	132099730	103505261	34205681	23744555	
3400-3450	63628592	25124006	11582854	6960357	
3450-3500	8874796	11894376	3924279	2698817	
3500-3550	4012450	673254	1260619	159444	

\*\* ohne Seitengletscher

**Tab. A 5.4.1b: Vertikale Massenverteilung des Gepatschferners 1872 – 2003  
(Angabe in m w.e.).**

Höhe	1971**	1976**	1990**	1997**	2003**
1900-1950	0	0	0	0	0
1950-2000	0	0	0	0	0
2000-2050	0	0	0	0	0
2050-2100	22778	15689	10782	10314	635
2100-2150	692915	749281	627483	749695	148875
2150-2200	4096340	4617595	4363708	4089299	1296590
2200-2250	7897975	7680247	8274982	6239444	5468394
2250-2300	8059162	8727017	10818504	8652940	7846985
2300-2350	10154145	9806360	11006014	7901288	8196666
2350-2400	7500701	6453258	8376150	5750496	5514602
2400-2450	8295568	8070153	8039953	7978152	7507943
2450-2500	10203482	9398525	11150799	9264746	8934021
2500-2550	10714819	10921273	11885944	10191318	10170447
2550-2600	9141543	9033622	11043334	8483496	8570393
2600-2650	7699608	7315502	8730030	4806086	4626076
2650-2700	6063227	5274264	6155265	5022990	5033488
2700-2750	11718697	11492215	11916003	10710055	10783701
2750-2800	21885888	22073084	24745637	25825240	26211346
2800-2850	56418522	58047001	50050523	53288086	51923622
2850-2900	54956971	49555544	55222329	47299640	50903056
2900-2950	134974755	141192715	128428106	129524940	132836718
2950-3000	143632452	131934892	145924335	128978495	132069041
3000-3050	163216273	156656745	166768165	141970126	138308339
3050-3100	155144894	154517895	151391166	135223699	138226717
3100-3150	172081301	166188899	170669652	168430754	165556276
3150-3200	296544715	298274630	290885845	263884079	282924220
3200-3250	132781154	136846252	148335408	118588722	126867136
3250-3300	93883611	94627235	97204794	75839561	86449076
3300-3350	67033196	67082792	71430913	54499482	63470342
3350-3400	32684704	30600672	33101549	21220940	25687487
3400-3450	8742244	7428515	10232088	3643957	6008108
3450-3500	2026509	1536854	2666003	803734	1225510
3500-3550	629181	595976	622855	115069	0

\*\* ohne Seitengletscher

**Tab. A 5.4.2a: Fläche der 50m Höhenintervalle 1872 – 2003 (Angabe in m<sup>2</sup>).**

Höhe	1872	1890	1922	1939	1953
1900-1950	5129	49575	0	0	
1950-2000	56673	64242	3173	0	
2000-2050	168023	78254	10670	4865	
2050-2100	145454	89021	28508	22294	
2100-2150	74454	147510	90471	74247	
2150-2200	93257	121422	132003	127708	
2200-2250	200497	208881	197913	192925	
2250-2300	213101	259148	323060	219100	
2300-2350	458405	248666	338158	228750	
2350-2400	427794	184755	221049	146225	
2400-2450	205118	161652	148522	108753	
2450-2500	154184	165559	165343	146671	
2500-2550	235077	192612	192961	141650	
2550-2600	100301	191235	195459	152361	
2600-2650	165334	111446	207528	138602	
2650-2700	164190	149296	210355	145862	
2700-2750	225850	200625	281190	222955	
2750-2800	456416	198534	339382	280133	
2800-2850	525009	259743	568507	543867	
2850-2900	543942	491067	730727	716433	
2900-2950	1192874	859095	1223755	1285587	
2950-3000	879149	1234453	1543325	1776790	
3000-3050	1787409	1582690	1926689	1799226	
3050-3100	3733618	1812647	1937907	1822491	
3100-3150	1657469	1774803	1797438	1667082	
3150-3200	1747589	2226542	3010206	3049923	
3200-3250	1566827	2776927	2268831	2354069	
3250-3300	1555263	2069336	1718388	1602562	
3300-3350	1518439	1934277	1449674	1418585	
3350-3400	1572578	1411766	953814	870573	
3400-3450	993948	545406	466787	360719	
3450-3500	184875	399222	162857	168441	
3500-3550	107425	25975	50500	16125	

Tab. A 5.4.2b: Fläche der 50m Höhenintervalle 1872 – 2003 (Angabe in m<sup>2</sup>).

Höhe	1971	1976	1990**	1997	2003
1900-1950	0	0	0	0	0
1950-2000	0	0	0	0	0
2000-2050	0	0	0	0	0
2050-2100	2880	1750	1691	2303	131
2100-2150	29521	30266	23614	33946	4150
2150-2200	80385	90885	93681	80464	18047
2200-2250	99736	108416	109199	100080	77500
2250-2300	111806	128402	155674	124982	108675
2300-2350	122145	121563	129475	103365	93900
2350-2400	83566	75908	89222	67524	62939
2400-2450	93662	89504	87181	110966	82318
2450-2500	114605	103242	119635	103252	91375
2500-2550	104265	114310	112700	118170	108510
2550-2600	106871	109330	126321	115150	103099
2600-2650	98920	97497	108595	78233	62378
2650-2700	89951	80357	79782	72854	61283
2700-2750	147049	140086	136813	121385	107964
2750-2800	240797	261293	278734	289802	259590
2800-2850	547231	593910	485969	548228	503575
2850-2900	641078	634774	637996	649161	684775
2900-2950	1340907	1351090	1185782	1346167	1333328
2950-3000	1432532	1238251	1293695	1410943	1431425
3000-3050	1885733	1581566	1600957	1856755	1785852
3050-3100	1820696	1596172	1544208	1684587	1679599
3100-3150	1796078	1555850	1592865	1843292	1752332
3150-3200	3084919	2927631	2798410	2975194	3026301
3200-3250	2086315	1954376	2047498	2083754	2072940
3250-3300	1702366	1663847	1663584	1624974	1668798
3300-3350	1390050	1395427	1401818	1309603	1366134
3350-3400	964422	937537	931812	872865	909832
3400-3450	443520	427000	456677	375982	426840
3450-3500	126993	114864	146545	105283	135271
3500-3550	32225	33775	36725	19700	0

\*\* ohne Seitengletscher

**Tab. A 5.4.3a: Gesamt Nettomassenbilanz des Gepatschferners für 50m Höhenintervalle von 1872 – 2003 (Angabe in m w.e.).**

Höhe	1872 – 1890	1890 – 1922	1922 – 1939	1939 – 1971
1900-1950	+150058	-186990	0	0
1950-2000	-380840	-1148887	-19925	0
2000-2050	-5240067	-2690845	-178285	-78426
2050-2100	-5677498	-1046212	+79377	-766477
2100-2150	+3430816	-2620587	-417883	-3145607
2150-2200	+1258761	+2306472	-276736	-5270296
2200-2250	-2239204	+2191982	-1904816	-7022785
2250-2300	+5733162	+6520177	-8156477	-15159897
2300-2350	-36894531	+9854150	-11740456	-13100210
2350-2400	-29542137	+5405234	-7737923	-8852819
2400-2450	-1180462	+1618572	-3876144	-1982873
2450-2500	+2199928	+1441915	-1026311	-3546904
2500-2550	-4294240	+2388768	-3638240	-3410911
2550-2600	+8645863	+2004974	-3926721	-4383313
2600-2650	-1777170	+2786911	-2275155	-3283643
2650-2700	-3151093	-2541951	-1191284	-1183769
2700-2750	-2371383	-1124565	-769736	-1862690
2750-2800	-28585014	+4132147	-1163181	+3056683
2800-2850	-16055889	+20525810	+3775625	+3172353
2850-2900	+16488228	+16108278	-5535026	-9256951
2900-2950	+18011859	+24062289	+3795839	+13172471
2950-3000	+87066738	-8785265	+19310637	-44645263
3000-3050	-38750298	+5764326	-39224720	+21679890
3050-3100	-195229905	-13220391	-16494641	+5333311
3100-3150	+101172622	-34869080	-22503694	+22314637
3150-3200	+134966346	+51824280	-10522412	+5077173
3200-3250	+184443995	-157272557	-8649683	-12930266
3250-3300	+58137140	-95852979	-20538905	+15692488
3300-3350	+60135266	-117071791	-12422509	+5300461
3350-3400	-28594469	-71233792	-10394021	+8835415
3400-3450	-38504586	-15882103	-4559240	+1654604
3450-3500	+3019580	-8537288	-1234779	-709637
3500-3550	-3339196	+587365	-1101175	+469737

**Tab. A 5.4.3b: Gesamt Nettomassenbilanz des Gepatschferners für 50m Höhenintervalle von 1872 – 2003 (Angabe in m w.e.).**

Höhe	1971 – 1976	1976 – 1990**	1990 – 1997**	1997 – 2003
1900-1950	0	0	0	0
1950-2000	0	0	0	0
2000-2050	0	0	0	0
2050-2100	-7089	-4907	-468	-9679
2100-2150	+56366	-121798	+122212	-600820
2150-2200	+521255	-253887	-274409	-2792709
2200-2250	-217701	+594735	-2035538	-771050
2250-2300	+667855	+2091487	-2165564	-805955
2300-2350	-347785	+1199654	-3104726	+295378
2350-2400	-1047443	+1922892	-2625654	-235894
2400-2450	-225415	-30200	-61801	-470209
2450-2500	-804957	+1752274	-1886053	-330725
2500-2550	+206454	+964671	-1694626	-20871
2550-2600	-107921	+2009712	-2559838	+86897
2600-2650	-384106	+1414528	-3923944	-180010
2650-2700	-788963	+881001	-1132275	+10498
2700-2750	-226482	+423788	-1205948	+73646
2750-2800	+187196	+2672553	+1079603	+386106
2800-2850	+1628479	-7996478	+3237563	-1364464
2850-2900	-5416507	+5666785	-7922689	+3593127
2900-2950	+5374579	-12764609	+1096834	+3390498
2950-3000	-12553120	+13989443	-16945840	+3132770
3000-3050	-6757489	+10111420	-24798039	-3637497
3050-3100	-302358	-3126729	-16167467	+2968397
3100-3150	-6017029	+4480753	-2238898	-2815903
3150-3200	+1739904	-7388785	-27001766	+18964738
3200-3250	+4373741	+11489156	-29746686	+8322776
3250-3300	+957774	+2577559	-21365233	+10782960
3300-3350	+179841	+4348121	-16931431	+9078497
3350-3400	-1963103	+2500877	-11880609	+4552844
3400-3450	-1267896	+2803573	-6588131	+2430667
3450-3500	-494334	+1129149	-1862269	+467750
3500-3550	-33205	+26879	-507786	-115069

\*\* ohne Seitengletscher

**Tab. A 5.4.4a: Mittlere Spezifische Massenbilanz des Gepatschferners für 50m Höhenintervalle von 1872 – 2003 (Angabe in m w.e.).**

Höhe	1872 – 1890	1890 – 1922	1922 – 1939	1939 – 1971
1900-1950	+29.2568	-3.7719	0	0
1950-2000	-6.7200	-17.8837	-6.2795	0
2000-2050	-31.1866	-34.3860	-16.7090	-16.1205
2050-2100	-39.0329	-11.7524	+2.7844	-34.3804
2100-2150	+46.0797	-17.7655	-4.6190	-42.3668
2150-2200	+13.4978	+18.9955	-2.0964	-41.2683
2200-2250	-11.1683	+10.4939	-9.6245	-36.4016
2250-2300	+26.9035	+25.1601	-25.2476	-69.1917
2300-2350	-80.4846	+39.6281	-34.7188	-57.2687
2350-2400	-69.0569	+29.2562	-35.0055	-60.5424
2400-2450	-5.7550	+10.0127	-26.0981	-18.2328
2450-2500	+14.2682	+8.7094	-6.2072	-24.1827
2500-2550	-18.2674	+12.4020	-18.8548	-24.0799
2550-2600	+86.1992	+10.4843	-20.0897	-28.7693
2600-2650	-10.7490	+25.0068	-10.9631	-23.6912
2650-2700	-19.1917	-17.0262	-5.6632	-8.1157
2700-2750	-10.4998	-5.6053	-2.7374	-8.3546
2750-2800	-62.6293	+20.8133	-3.4274	+10.9115
2800-2850	-30.5821	+79.0235	+6.6413	+5.8330
2850-2900	+30.3125	+32.8026	-7.5747	-12.9209
2900-2950	+15.0995	+28.0089	+3.1018	+10.2463
2950-3000	+99.0352	-7.1167	+12.5124	-25.1270
3000-3050	-21.6796	+3.6421	-20.3586	+12.0496
3050-3100	-52.2897	-7.2934	-8.5116	+2.9264
3100-3150	+61.0404	-19.6467	-12.5199	+13.3854
3150-3200	+77.2300	+23.2757	-3.4956	+1.6647
3200-3250	+117.7182	-56.6355	-3.8124	-5.4927
3250-3300	+37.3809	-46.3206	-11.9524	+9.7921
3300-3350	+39.6033	-60.5248	-8.5692	+3.7364
3350-3400	-18.1832	-50.4572	-10.8973	+10.1490
3400-3450	-38.7390	-29.1198	-9.7673	+4.5870
3450-3500	+16.3331	-21.3848	-7.5820	-4.2130
3500-3550	-31.0840	+22.6127	-21.8054	+29.1310



**Tab. A 5.4.4b: Mittlere Spezifische Massenbilanz des Gepatschferners für 50m Höhenintervalle von 1872 – 2003 (Angabe in m w.e.).**

Höhe	1971 – 1976	1976 – 1990**	1990 – 1997**	1997 – 2003
1900-1950	0	0	0	0
1950-2000	0	0	0	0
2000-2050	0	0	0	0
2050-2100	-2.4615	-2.8040	-0.2768	-4.2028
2100-2150	+1.9094	-4.0243	+5.1754	-17.6993
2150-2200	+6.4845	-2.7935	-2.9292	-34.7076
2200-2250	-2.1828	+5.4857	-18.6406	-7.7043
2250-2300	+5.9733	+16.2886	-13.9109	-6.4486
2300-2350	-2.8473	+9.8686	-23.9793	+2.8576
2350-2400	-12.5343	+25.3319	-29.4283	-3.4935
2400-2450	-2.4067	-0.3374	-0.7089	-4.2374
2450-2500	-7.0238	+16.9725	-15.7651	-3.2031
2500-2550	+1.9801	+8.4391	-15.0366	-0.1766
2550-2600	-1.0098	+18.3821	-20.2645	+0.7546
2600-2650	-3.8830	+14.5084	-36.1337	-2.3009
2650-2700	-8.7710	+10.9636	-14.1921	+0.1441
2700-2750	-1.5402	+3.0252	-8.8146	+0.6067
2750-2800	+0.7774	+10.2282	+3.8732	+1.3323
2800-2850	+2.9759	-13.4641	+6.6621	-2.4889
2850-2900	-8.4491	+8.9272	-12.4181	+5.5350
2900-2950	+4.0082	-9.4476	+0.9250	+2.5186
2950-3000	-8.7629	+11.2977	-13.0988	+2.2203
3000-3050	-3.5835	+6.3933	-15.4895	-1.9591
3050-3100	-0.1661	-1.9589	-10.4697	+1.7621
3100-3150	-3.3501	+2.8799	-1.4056	-1.5276
3150-3200	+0.5640	-2.5238	-9.6490	+6.3743
3200-3250	+2.0964	+5.8787	-14.5283	+3.9941
3250-3300	+0.5626	+1.5492	-12.8429	+6.6358
3300-3350	+0.1294	+3.1160	-12.0782	+6.9323
3350-3400	-2.0355	+2.6675	-12.7500	+5.2160
3400-3450	-2.8587	+6.5657	-14.4262	+6.4648
3450-3500	-3.8926	+9.8303	-12.7078	+4.4428
3500-3550	-1.0304	+0.7958	-13.8267	-5.8411

\*\* ohne Seitengletscher

**Tab. A 5.4.5a: Jährliche Gesamt Nettomassenbilanz des Gepatschferners für 50m Höhenintervalle von 1872 – 2003 (Angabe in m w.e.).**

Höhe	1872 – 1890	1890 – 1922	1922 – 1939	1939 – 1971
1900-1950	+8337	-5843	0	0
1950-2000	-21158	-35903	-1172	0
2000-2050	-291115	-84089	-10487	-2451
2050-2100	-315417	-32694	+4669	-23952
2100-2150	+190601	-81893	-24581	-98300
2150-2200	+69931	+72077	-16279	-164697
2200-2250	-124400	+68499	-112048	-219462
2250-2300	+318509	+203756	-479793	-473747
2300-2350	-2049696	+307942	-690615	-409382
2350-2400	-1641230	+168914	-455172	-276651
2400-2450	-65581	+50580	-228008	-61965
2450-2500	+122218	+45060	-60371	-110841
2500-2550	-238569	+74649	-214014	-106591
2550-2600	+480326	+62655	-230984	-136979
2600-2650	-98732	+87091	-133833	-102614
2650-2700	-175061	-79436	-70076	-36993
2700-2750	-131744	-35143	-45279	-58209
2750-2800	-1588056	+129130	-68422	+95521
2800-2850	-891994	+641432	+222096	+99136
2850-2900	+916013	+503384	-325590	-289280
2900-2950	+1000658	+751947	+223285	+411640
2950-3000	+4837041	-274540	+1135920	-1395164
3000-3050	-2152794	+180135	-2307336	+677497
3050-3100	-10846106	-413137	-970273	+166666
3100-3150	+5620701	-1089659	-1323747	+697332
3150-3200	+7498130	+1619509	-618965	+158662
3200-3250	+10246889	-4914767	-508805	-404071
3250-3300	+3229841	-2995406	-1208171	+490390
3300-3350	+3340848	-3658493	-730736	+165639
3350-3400	-1588582	-2226056	-611413	+276107
3400-3450	-2139143	-496316	-268191	+51706
3450-3500	+167754	-266790	-72634	-22176
3500-3550	-185511	+18355	-64775	+14679

**Tab. A 5.4.5b: Jährliche Gesamt Nettomassenbilanz des Gepatschferners für 50m Höhenintervalle von 1872 – 2003 (Angabe in m w.e.).**

Höhe	1971 – 1976	1976 – 1990**	1990 – 1997**	1997 – 2003
1900-1950	0	0	0	0
1950-2000	0	0	0	0
2000-2050	0	0	0	0
2050-2100	-1418	-351	-67	-1614
2100-2150	+11273	-8700	+17459	-100136
2150-2200	+104251	-18135	-39201	-465451
2200-2250	-43540	+42481	-290791	-128508
2250-2300	+133571	+149392	-309366	-134325
2300-2350	-69557	+85690	-443532	+49230
2350-2400	-209489	+137349	-375093	-39316
2400-2450	-45083	-2157	-8829	-78369
2450-2500	-160991	+125132	-269436	-55120
2500-2550	+41291	+68905	-242089	-3479
2550-2600	-21584	+143551	-365691	+14483
2600-2650	-76821	+101038	-560563	-30002
2650-2700	-157793	+62929	-161754	+1750
2700-2750	-45296	+30271	-172278	+12275
2750-2800	+37439	+190897	+154229	+64351
2800-2850	+325696	-571177	+462509	-227410
2850-2900	-1083301	+404770	-1131813	+598855
2900-2950	+1074916	-911758	+156691	+565083
2950-3000	-2510624	+999246	-2420834	+522129
3000-3050	-1351498	+722244	-3542577	-606249
3050-3100	-60472	-223338	-2309638	+494733
3100-3150	-1203406	+320054	-319843	-469317
3150-3200	+347981	-527770	-3857395	+3160789
3200-3250	+874748	+820654	-4249527	+1387129
3250-3300	+191555	+184111	-3052176	+1797160
3300-3350	+35968	+310580	-2418776	+1513083
3350-3400	-392621	+178634	-1697230	+758807
3400-3450	-253579	+200255	-941162	+405111
3450-3500	-98867	+80654	-266038	+77958
3500-3550	-6641	+1920	-72541	-19178

\*\* ohne Seitengletscher

**Tab. A 5.4.6a: Jährliche Mittlere Spezifische Massenbilanz des Gepatschferners für 50m Höhenintervalle von 1872 – 2003 (Angabe in m w.e.).**

Höhe	1872 – 1890	1890 – 1922	1922 – 1939	1939 – 1971
1900-1950	+1.6254	-0.1179	0	0
1950-2000	-0.3733	-0.5589	-0.3694	0
2000-2050	-1.7326	-1.0746	-0.9829	-0.5038
2050-2100	-2.1685	-0.3673	+0.1638	-1.0744
2100-2150	+2.5600	-0.5552	-0.2717	-1.3240
2150-2200	+0.7500	+0.5936	-0.1233	-1.2896
2200-2250	-0.6205	+0.3279	-0.5661	-1.1376
2250-2300	+1.4946	+0.7863	-1.4852	-4.0701
2300-2350	-4.4714	+1.2384	-2.0423	-1.7896
2350-2400	-3.8365	+0.9143	-2.0591	-1.8920
2400-2450	-0.3197	+0.3129	-1.5352	-0.5698
2450-2500	+0.7927	+0.2722	-0.3651	-0.7557
2500-2550	-1.0149	+0.3876	-1.1091	-0.7525
2550-2600	+4.7888	+0.3276	-1.1817	-0.8990
2600-2650	-0.5972	+0.7815	-0.6449	-0.7404
2650-2700	-1.0662	-0.5321	-0.3331	-0.2536
2700-2750	-0.5833	-0.1752	-0.1610	-0.2611
2750-2800	-3.4794	+0.6504	-0.2016	+0.3410
2800-2850	-1.6990	+2.4695	+0.3907	+0.1823
2850-2900	+1.6840	+1.0251	-0.4456	-0.4038
2900-2950	+0.8389	+0.8753	+0.1825	+0.3202
2950-3000	+5.5020	-0.2224	+0.7360	-0.7852
3000-3050	-1.2044	+0.1138	-1.1976	+0.3766
3050-3100	-2.9050	-0.2279	-0.5007	+0.0915
3100-3150	+3.3911	-0.6140	-0.7365	+0.4183
3150-3200	+4.2906	+0.7274	-0.2056	+0.0520
3200-3250	+6.5399	-1.7700	-0.2243	-0.1716
3250-3300	+2.0767	-1.4475	-0.7031	+0.3060
3300-3350	+2.2002	-1.8914	-0.5041	+0.1168
3350-3400	-1.0102	-1.5768	-0.6410	+0.3172
3400-3450	-2.1522	-0.9100	-0.5745	+0.1433
3450-3500	+0.9074	-0.6683	-0.4460	-0.1317
3500-3550	-1.7269	+0.7066	-1.2827	+0.9103

**Tab. A 5.4.6b: Jährliche Mittlere Spezifische Massenbilanz des Gepatschferners für 50m Höhenintervalle von 1872 – 2003 (Angabe in m w.e.).**

Höhe	1971 – 1976	1976 – 1990**	1990 – 1997**	1997 – 2003
1900-1950	0	0	0	0
1950-2000	0	0	0	0
2000-2050	0	0	0	0
2050-2100	-0.4923	-0.2003	-0.0395	-0.7005
2100-2150	+0.3819	-0.2875	+0.7393	-2.9499
2150-2200	+1.2969	-0.1995	-0.4185	-5.7846
2200-2250	-0.4366	+0.3918	-2.6629	-1.2840
2250-2300	+1.1947	+1.1635	-1.9873	-1.0747
2300-2350	-0.5695	+0.7049	-3.4256	+0.4762
2350-2400	-2.5069	+1.8094	-4.2040	-0.5823
2400-2450	-0.4813	-0.0241	-0.1013	-0.7062
2450-2500	-1.4048	+1.2123	-2.2522	-0.5339
2500-2550	+0.3960	+0.6028	-2.1481	-0.0294
2550-2600	-0.2020	+1.3030	-2.8949	+0.8258
2600-2650	-0.7766	+1.0363	-5.1620	-0.3835
2650-2700	-1.7542	+0.7831	-2.0274	+0.0240
2700-2750	-0.3080	+0.2161	-1.2592	+0.1012
2750-2800	+0.1555	+0.7306	+0.5533	+0.2220
2800-2850	+0.5952	-0.9617	+0.9517	-0.4149
2850-2900	-1.6898	+0.6377	-1.7740	+0.9225
2900-2950	+0.8016	-0.6748	+0.1321	+0.4198
2950-3000	-1.7526	+0.8070	-1.8713	+0.3701
3000-3050	-0.7167	+0.4567	-2.2128	-0.3266
3050-3100	-0.0332	-0.1399	-1.4957	+0.2937
3100-3150	-0.6700	+0.2057	-0.2008	-0.2546
3150-3200	+0.1128	-0.1803	-1.3784	+1.0624
3200-3250	+0.4193	+0.4199	-2.0755	+0.6657
3250-3300	+0.1125	+0.1107	-1.8347	+1.1060
3300-3350	+0.0259	+0.2226	-1.7255	+1.1554
3350-3400	-0.4071	+0.1905	-1.8214	+0.8693
3400-3450	-0.5717	+0.4690	-2.0609	+1.0774
3450-3500	-0.7785	+0.7022	-1.8154	+0.7405
3500-3550	-0.2061	+0.0568	-1.9752	-0.9735

\*\* ohne Seitengletscher

## **Legende zu den Abbildungen A 1 – A 10:**

### **Gletscher:**

- 1: Gepatschferner
- 2: Gletscherzunge Gepatschferner
- 3: Weißseeferner
- 4: Falgin Ferner
- 5: Milanzer Ferner
- 6: Langtauferer Ferner
- 7: Bärenbart Ferner
- 8: Langtauferer Joch Ferner
- 9: Vernaglwandferner
- 10: Kesselwandferner
- 11: Vernagtferner
- 12: Westlicher Wannetferner
- 13: Östlicher Wannetferner
- 14: Hintereisferner
- 15: Hinterer Ölgrubenferner
- 16: Täschachferner
- 17: Krumgampenferner
- 18: Riffferner
- 19: Kaiserbergferner
- 20: Bliggferner

### **Berggipfel und Berghütten:**

- 1: Gepatsch Alpe
- 2: Großer Nörderberg (2885 m)
- 3: Großer Rauher Kopf (2990 m)
- 4: Rauhekopf Hütte
- 5: Fluchtkogel (3500 m)
- 6: Ehrich Spitze (3425 m)
- 7: Zinne (3381 m)
- 8: Schwarzwand Spitze (3467 m)
- 9: Hochvernagt Spitze (3530 m)

- 10: Dahmann Spitze (3401 m)
- 11: Brandenburger Haus
- 12: Weißsee Spitze (ca. 3510 m)
- 13: Vernagl (3355 m)
- 14: Hoch Vernagl Wand (3435 m)
- 15: Hintere Hintereis Spitze (3486 m)
- 16: Mittlere Hintereis Spitze (3451 m)
- 17: Vordere Hintereis Spitze (3437 m)
- 18: Langtauferer Spitze (3529 m)
- 19: Weißkugel (3739 m)
- 20: Glockturm (3355 m)

### **Moränenwälle, Kare, Täler**

- 1: Riffital
- 2: Vorderer Nörderberg
- 3: Mittlerer Nörderberg
- 4: Hinterer Nörderberg
- 5: Bereich der Endmoräne von 1850
- 6: Seitenmoräne 1850
- 7: Wannetkar
- 8: Ochsenkar
- 9: Roßkar
- 10: Kuhgrube
- 11: Planggerosskar
- 12: Furmentekar
- 13: Krummgampental
- 14: Kaiserbergtal
- 15: Innere Ölgrube
- 16: Äußere Ölgrube
- 17: Steinigkarle
- 18: Schwarzseekar
- 19: Hinteres Glockhaus
- 20: Vorderes Glockhaus
- 21: Auf Bligg

22: Wurmatal

23: Im Kar

24: Neederkarle

25: Atemskar

**Abb. A 2.1: Blick in das Kautertal Richtung Süden.**

Links der Kaunergrat, rechts der Glockturmkamm. Hinter dem Gepatschstausee der Gepatschferner. (Google Earth, 2009)

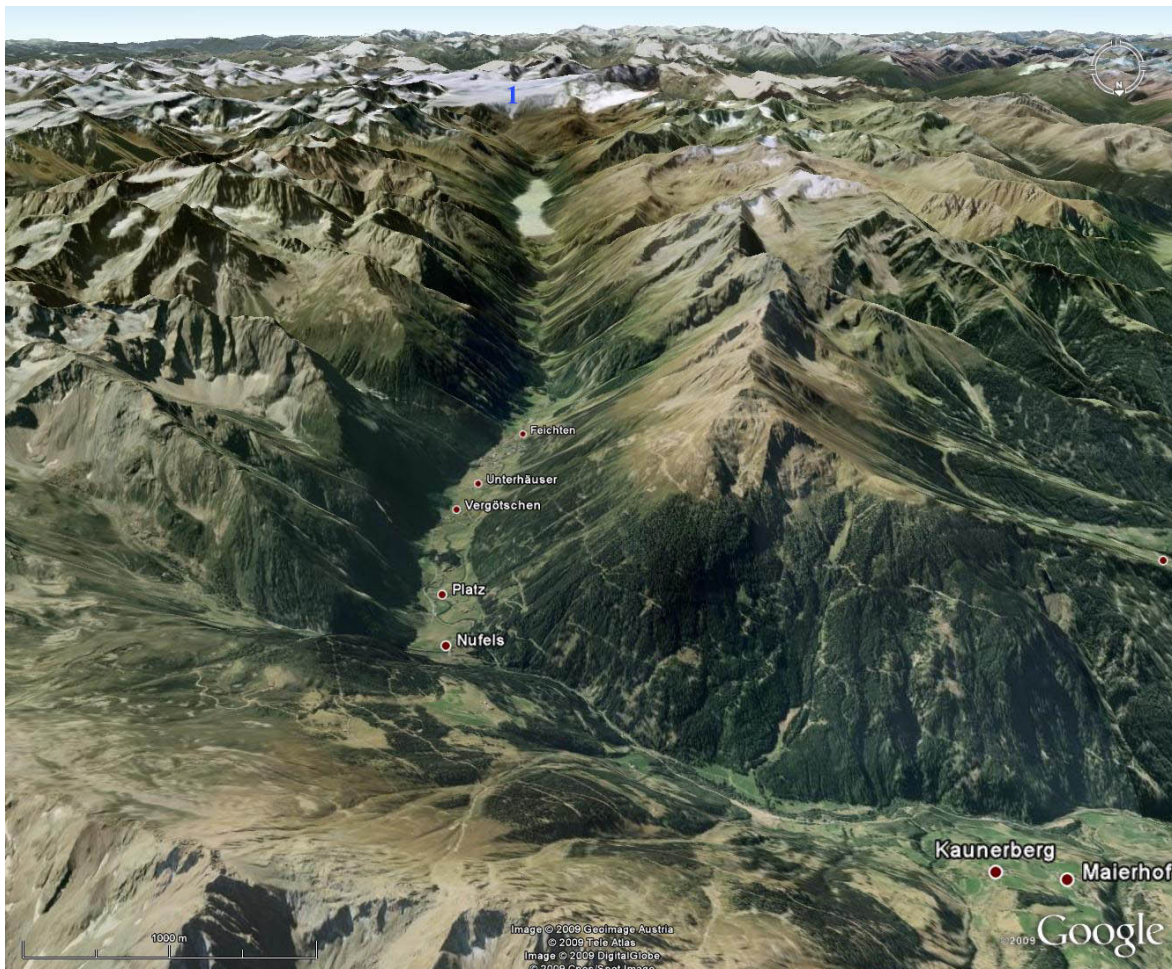




Abb. A 2.2: Hinteres Kautertal mit Gepatschferner (Google Earth, 2009).

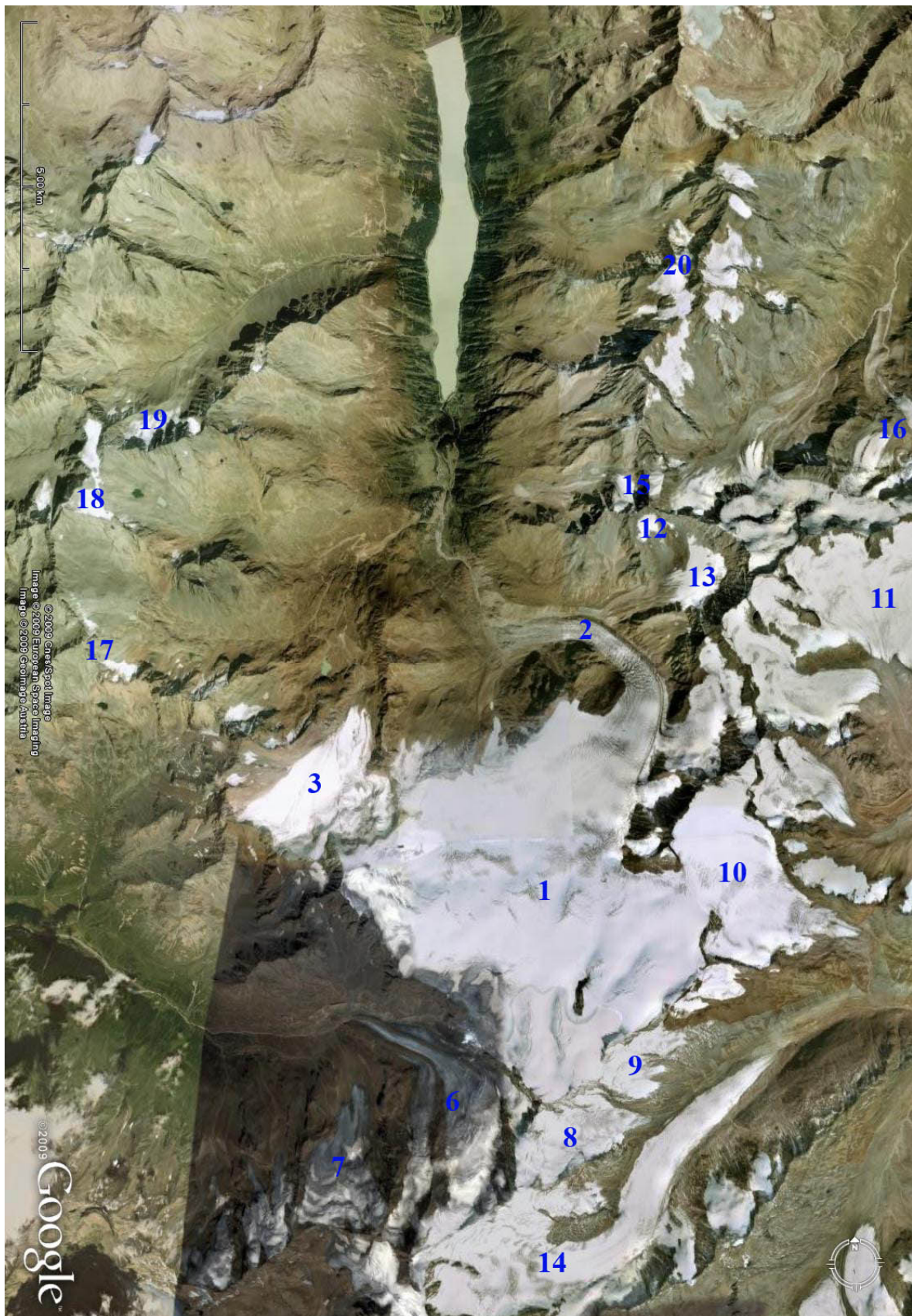


Abb. A 2.3: Talschluss des Kautertals mit Gepatschferner.

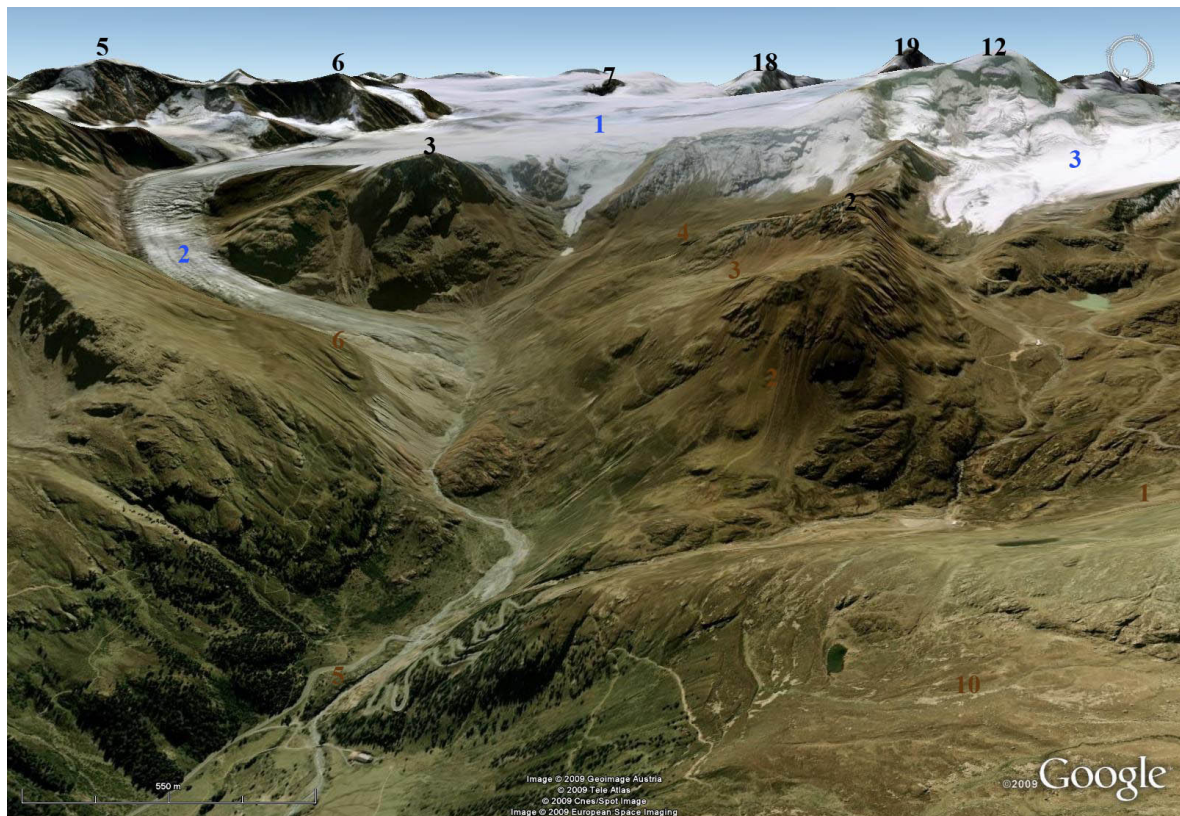
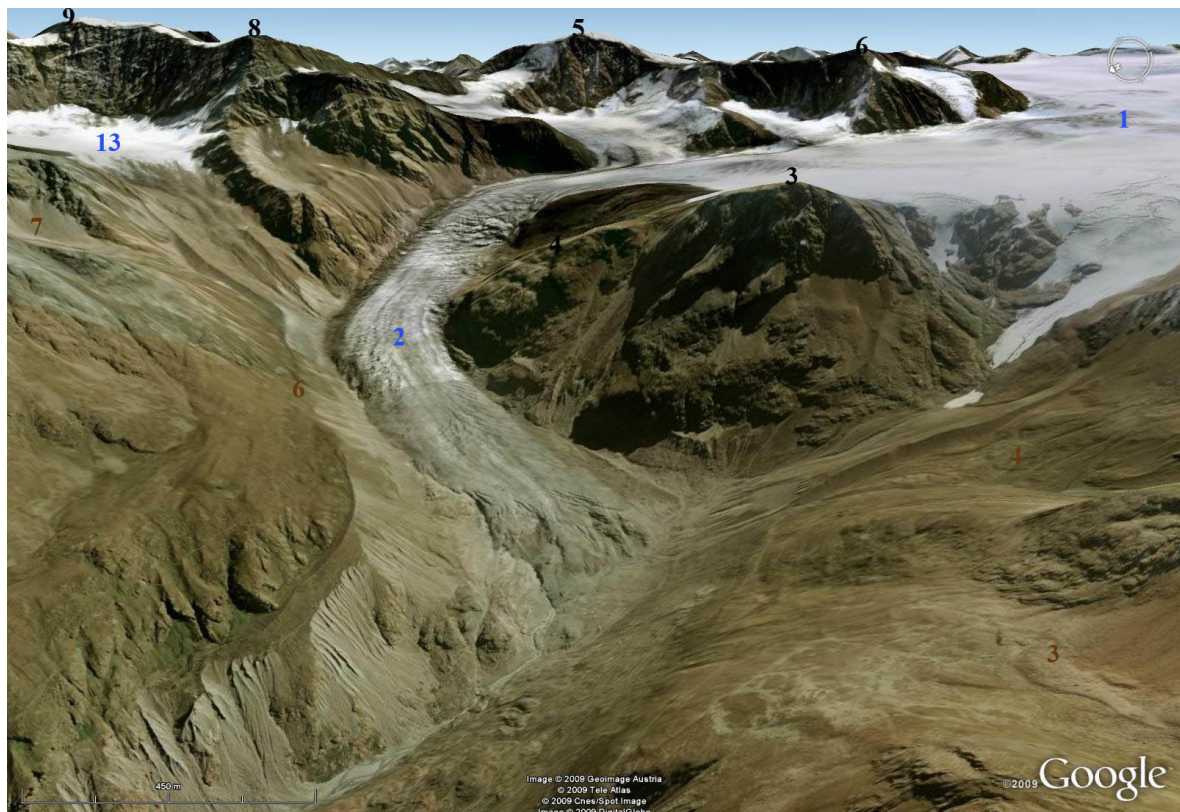
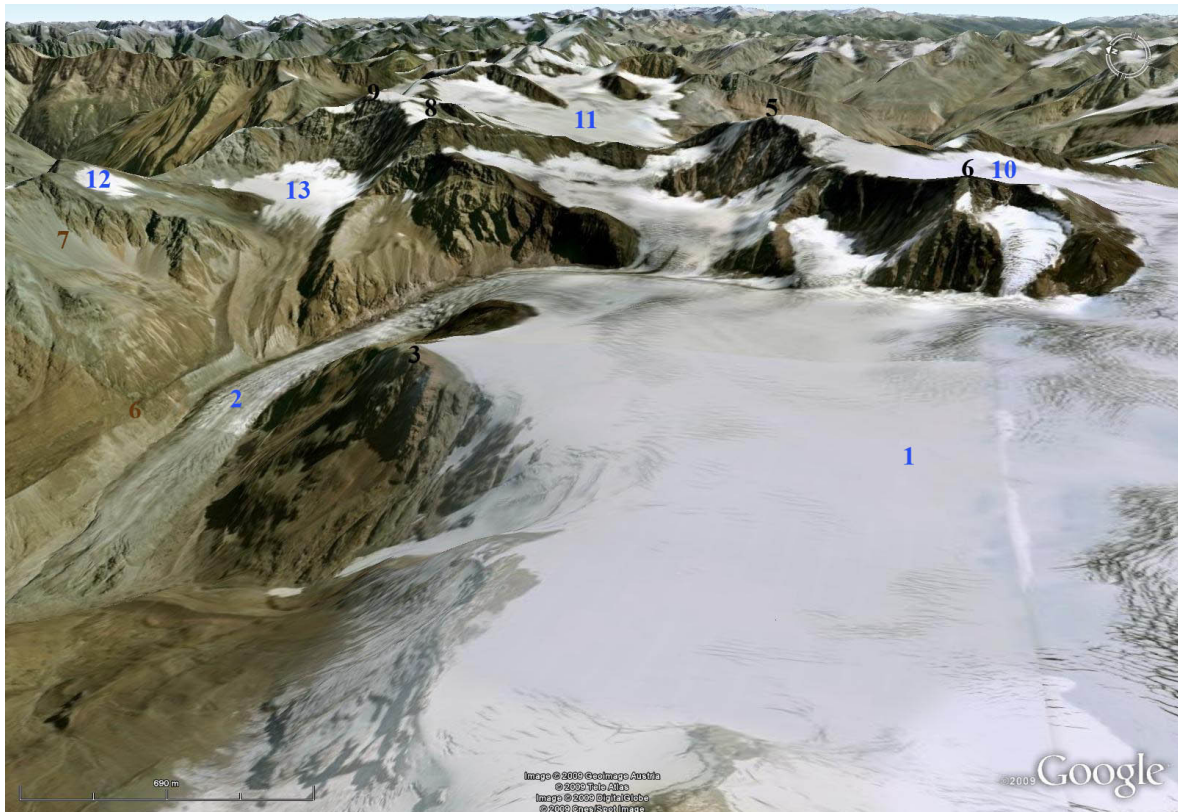


Abb. A 2.4: Talschluss des Kautertals mit Gepatschferner 2 (beide Abb. Google Earth, 2009).



**Abb. A 2.5: Gepatschferner mit Fluchtkogel und Kesselwänden (Google Earth, 2009).**



**Abb. A 2.6: Gepatschferner aus Richtung Weißkugel (Google Earth, 2009).**

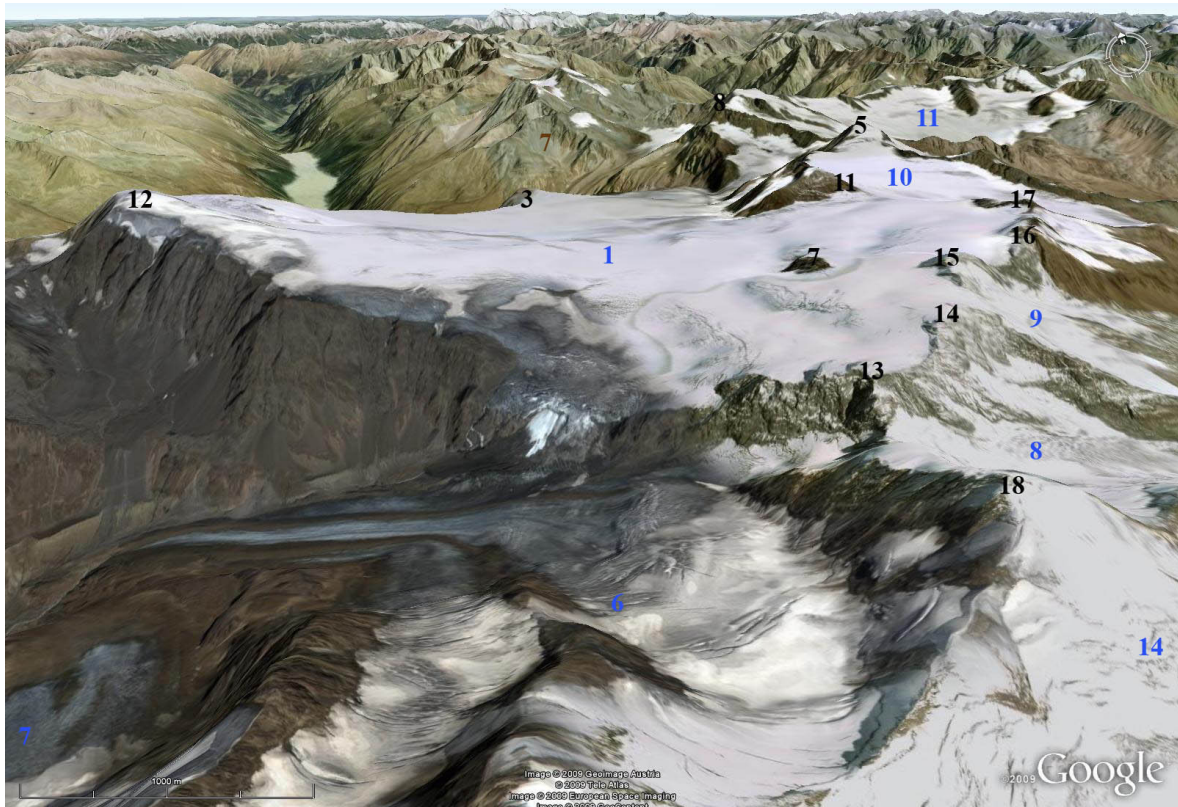


Abb. A 2.7: Zunge des Gepatschferners und Glockturmkamm (Google Earth, 2009).

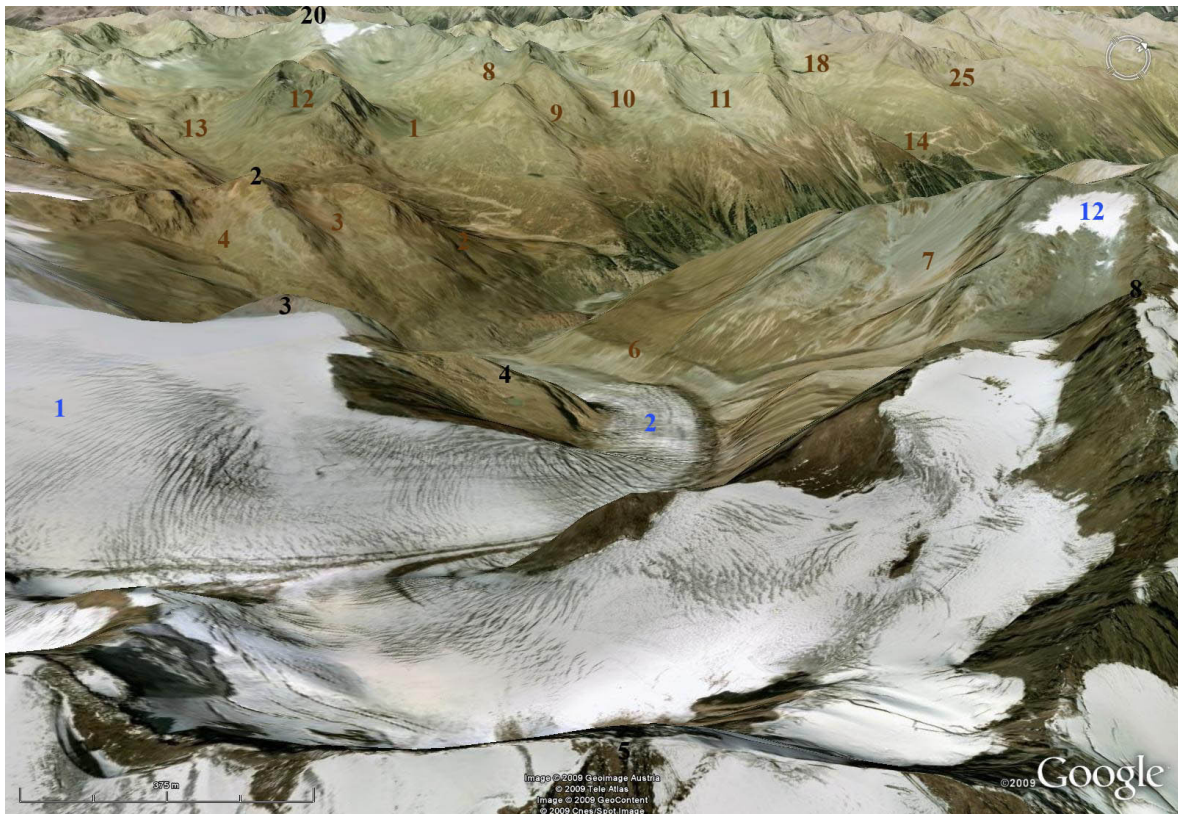


Abb. A 2.8: Eisbruch der Zunge und Fluchtkogel (Google Earth, 2009).

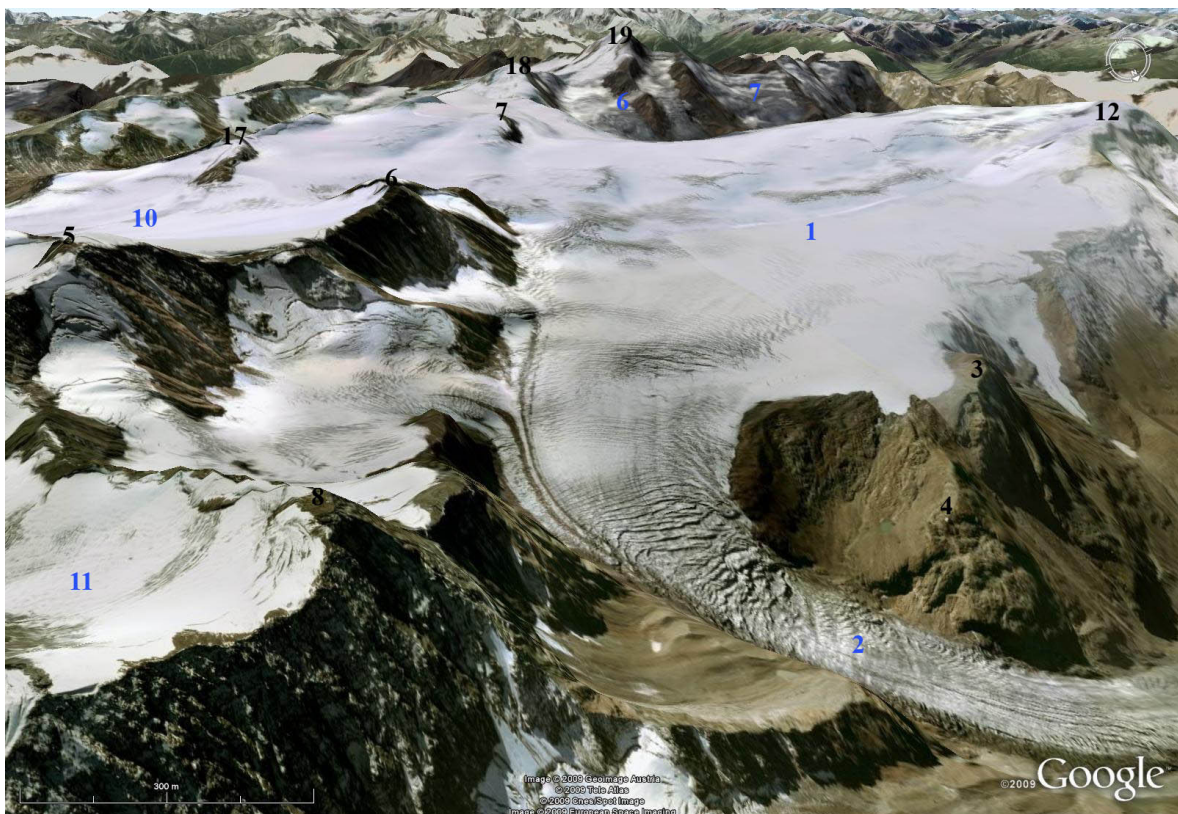


Abb. A 2.9: Talschluss des Kaunertals mit Gepatschstausee (Google Earth, 2009).

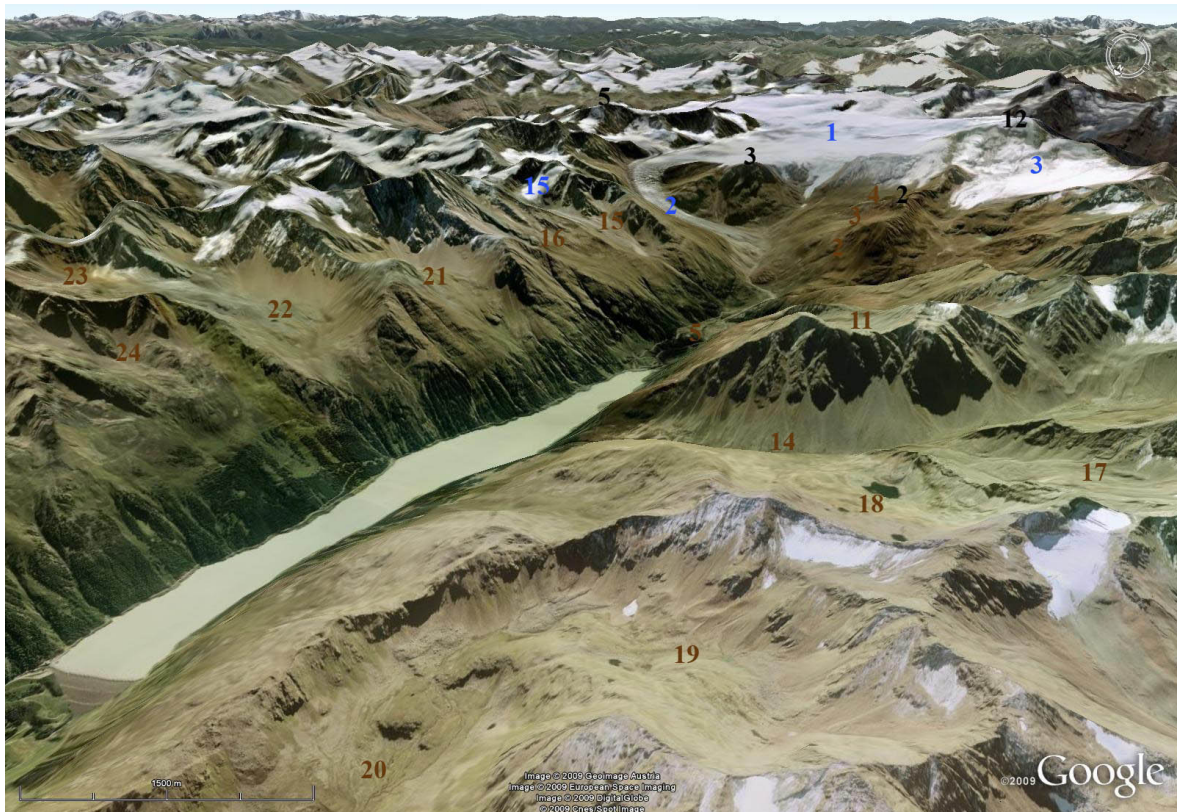
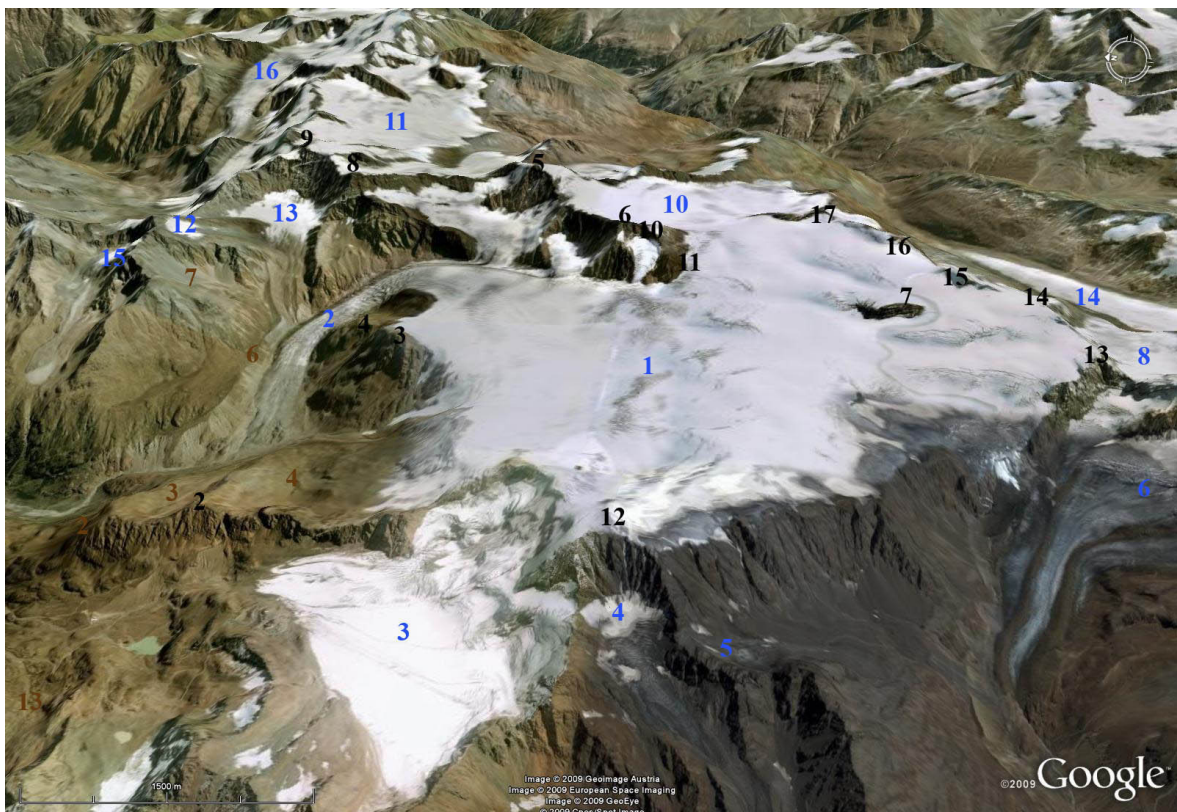


Abb. A 2.10: Gepatschferner und Nachbargletscher (Google Earth, 2009).





## Danksagung:

Zunächst möchte ich dem Betreuer dieser Arbeit, Herrn PD Dr. Axel Thomas, ganz herzlich danken. Dieser bot mir das interessante Thema an, stellte mir wichtiges Kartenmaterial und Quellenliteratur zur Verfügung und stand mir während der gesamten Dauer der Arbeit mit fachlichem Rat und Tat zur Seite. Auch stellte Herr Dr. Thomas den Kontakt zum Österr. Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen her und beschaffte von dort wichtiges Kartenmaterial. Trotz des Umstandes, dass die Betreuung fast ausschließlich per Post und Email möglich war, hat diese doch ganz hervorragend funktioniert.

Des Weiteren vermittelte Herr Dr. Thomas den Kontakt zur GIS-Service GmbH in 55263 Wackernheim, auf deren großformatigem Scanner mehrere Karten digitalisiert werden konnten. Auch dafür meinen herzlichsten Dank an Herrn Dr. Thomas und die GIS-Service GmbH.

Des Weiteren möchte ich Herrn Dr. Thomas für das Plotten der großformatigen (A1) Kartenbeilagen danken. Eine Realisierung dieser Kartenbeilagen wäre sonst aus finanziellen Gründen fraglich gewesen.

Meiner Cousine Iris Erdmann möchte ich für die Hilfe bei der Beschaffung eines großen Teils der Quellenliteratur danken, was dank ihrer Position an der UB-Gießen immer schnell und reibungslos von statten ging.

Für das Korrekturlesen dieser Arbeit möchte ich Frau Katja Fleischer danken, die sich trotz ihrer Mutterzeit dafür Zeit genommen hat.

Danken möchte ich auch Frau Mareike Henß, die sich kurzfristig dazu bereit erklärte, die englischsprachige Zusammenfassung zu korrigieren.

Zuletzt gilt mein Dank meinen Eltern, welche mich während des gesamten Studiums und vor allem während der Zeit der Diplomarbeit finanziell und mit viel Verständnis unterstützt haben. Ohne sie wären das Studium und diese Arbeit nicht möglich gewesen.





## **Eidesstattliche Erklärung:**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig verfasst und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Mücke, im Oktober 2009

Holger Erdmann

