

Zum Massenumsatz der Pasterzengunge zwischen 1979 und 1994

Herwig Wakonigg & Wolfgang Tintor

Eingelangt am 15.02.1999

1 Zusammenfassung

Der seit fast eineinhalb Jahrhunderten anhaltende Gletscherschwund an der Pasterze hat sich seit 1982 neuerlich beschleunigt. Bezogen auf die 4,09 km² große Fläche der Gletschergunge (1985) gab es zwischen 1979/80 und 1993/94 etwa 293·10⁶ m³ Eisabschmelzung, von welcher nur 156·10⁶ m³ durch Eiszufuhr aus dem Nährgebiet ersetzt wurden, was einen effektiven Massenschwund von 137·10⁶ m³ bzw. ein Einsinken der Oberfläche um 32,8 m (durchschnittlich 2,2 m pro Jahr) bedeutet.

Dabei zeigt der lineare Trend eine Zunahme der Ablation von 16,6 auf 22,6·10⁶ m³ und eine Abnahme des Eisersatzes von 13,2 auf 7,6·10⁶ m³. Solcherart verstärkte sich auch der effektive Massenschwund von 3,8·10⁶ m³ auf 14,0·10⁶ m³ im genannten Zeitraum (ausgenommen das Jahr 1991/92). Das bedeutet, daß anfangs noch 80 % (durchschnittlich 55 %) und zuletzt nur mehr 34 % der Ablation durch Eiszufuhr ersetzt wurden. Aus den Jahreswegen des Eises wurde die Mächtigkeit am oberen Beginn der Zunge auf rund 310 m geschätzt.

2 Summary

About the mass turnover of the tongue of the Pasterze glacier between 1979 and 1994

The retreat and volume loss of the Pasterze glacier for nearly 150 years has intensified again since 1982. In relation to the area of the glacier tongue of 4.09 km² (1985) the ablation between 1979/80 and 1993/94 amounted to 293·10⁶ m³, of which only 156·10⁶ m³ were replaced by ice flowing down from the accumulation area, resulting in a net loss of 137·10⁶ m³ ice and a lowering of the glacier surface elevation by 32.8 m (on the average 2.2 m per year).

On the other hand ablation increased from 16.6 to 22.6·10⁶ m³ while the ice transport decreased from 13.2 to 7.6·10⁶ m³, thus raising the net loss of ice from 3.8 to 14.0·10⁶ m³ in the above mentioned period (excluding the year 1991/92). This means, that at the beginning still 80% (on the average 55 %) and finally only 34 % of the ablation was replaced by ice transport from above. The thickness of the glacier at the upper end of the tongue was estimated to be approximately 310 m using the annual ice velocity for the calculation.

3 Keywords

Pasterze, Hohe Tauern, Carinthia, glacier, glacial variation, glacier retreat, mass turnover, ablation

4 Einleitung

Ein grober Überblick über das Verhalten der Alpengletscher im 20. Jahrhundert zeigt, daß es nach einer relativ gletschergünstigen Phase mit dem Höhepunkt um 1920 zu einer starken Abschmelz- und Rückzugsperiode im wesentlichen zwischen 1928 und 1964 gekommen ist (Hauptrückzugsphase des 20. Jahrhunderts), worauf wieder ein deutlich günstigerer Abschnitt ab 1965 mit dem Höhepunkt um 1980 folgte. Jedoch schon ab 1982 dominierten Jahre mit einer stark negativen Haushaltsbilanz, die schließlich zu einer neuerlichen Beschleunigung des Gletscherschwundes führten, welcher in seinen relativen Ausmaßen zum Teil sogar jenen der Hauptrückzugsphase übertrifft (z.B. CHEN 1991, PATZELT 1987).

Diese „Gletscherschwankungen“ sind aber nur indirekter Ausdruck von Klimaschwankungen, wobei die letzte Rückzugsphase natürlich im Zusammenhang mit der jüngsten, medial stark beachteten, allgemeinen Erwärmung zu sehen ist.

Es gibt allerdings recht unterschiedliche Möglichkeiten, Gletscherschwankungen quantitativ zu erfassen: Die Ermittlung der Längenänderung (d.h. des Vorstoßes oder „Rückzugs“ der Gletscherstirn) ist methodisch und logistisch am einfachsten, weil dazu nur ein Maßband und eine Bussole vonnöten sind, weshalb diesbezüglich auch die größte Datendichte erzielbar und verfügbar ist. Allein in Österreich werden jährlich über hundert Gletscher bezüglich ihrer Längenänderung nachgemessen.

Erheblich aufwendiger und nur über die Auswertung von Luftbildern oder genauen Karten herzuleiten ist dagegen die Ermittlung der Flächenänderung, weshalb diese für eine laufende Beobachtung von Jahr zu Jahr (Monitoring) wohl kaum in Frage kommt, ganz zu schweigen von der Volumsänderung, zu deren Erfassung (etwa über die mittlere Höhe des Gletschers und seine Fläche) ein unvergleichlich aufwendiger meßtechnischer Aufwand erforderlich wäre.

Dazu kommt, daß die drei genannten Parameter zum Teil nur sehr indirekt von der jeweiligen Witterung abhängen, da sie meist erst um Jahre verzögert auf Witterungsänderungen reagieren. Demgegenüber ist der Gletscherhaushalt, d.h. der Massenumsatz des Gletschers, direkt und ohne Verzögerung von der Witterung der Einzeljahre abhängig.

5 Methodik und Datengrundlagen

5.1 Die Komponenten des Massenhaushaltes

Der Massenhaushalt eines Gletschers setzt sich aus den Komponenten „Einnahmen“ und „Ausgaben“ zusammen, wobei unter Einnahmen die Summe aller auf den Gletscher gelangenden festen Niederschläge (in den Alpen hauptsächlich direkter Schneefall und Trieb Schnee), unter Ausgaben die Summe jeglicher Abtragung (Abschmelzung, Abwehung, Verdunstung, Kalbung) verstanden wird. Damit handelt es sich aber um die „Totalakkumulation“ und die „Totalablation“, welche aus naheliegenden Gründen in der Natur so gut wie gar nicht befriedigend genau meßbar bzw. erfäßbar sind.

Direkt auf dem Gletscher meßbar sind dagegen „Nettoakkumulation“ und „Nettoablation“. Erstere ist sozusagen der Restbetrag an Akkumulation (meist Altschnee), welcher am Ende des natürlichen Haushaltsjahres oberhalb der Gleichgewichtslinie im „Akkumulationsgebiet“ übrig geblieben ist, d.h. den Sommer überdauert hat. Das Ende des natürlichen Haushaltsjahres ist der Zeitpunkt des Minimums im Massenhaushalt irgendwann am Ende des Sommers vor dem ersten größeren Schneefall. Das ist am ehesten gegen Ende September zu erwarten, kann aber sehr weit zwischen Ende August und Ende Oktober streuen.

Die Nettoablation ist dagegen der Betrag an Ablation (auf der Pasterze fast ausschließlich in Form der Abschmelzung an der Oberfläche) unterhalb der Gleichgewichtslinie im Ablationsgebiet. Die das Akkumulations- und das Ablationsgebiet trennende, meist sehr unregelmäßig und auch in nicht gleichbleibender Höhe auf dem Gletscher verlaufende Gleichgewichtslinie hat definitionsgemäß einen ausgeglichenen Massenhaushalt, d.h. Akkumulation und Ablation halten sich die Waage. Das langjährige Mittel ihrer Höhenlage ergibt schließlich die Schneegrenze eines Gletschers.

Die Ermittlung von Nettoakkumulation und Nettoablation erfolgt mit Hilfe der „direkten glaziologischen Methode“, welche auf W. AHLMANN zurückgeht und von HOINKES weiterentwickelt wurde (HOINKES 1970).

Auf der Pasterze wurden solche Messungen bisher nicht flächendeckend durchgeführt, sondern jeweils nur in Form von Stichprobenmessungen. Dabei wurde die Nettoakkumulation in den hochgelegenen Firmmulden etwa zwischen 1948 und 1968 von TOLLNER (u.a. TOLLNER 1969) ermittelt, wobei hier auf die Methodik und Problematik dieser Messungen nicht näher eingegangen werden kann, sowie von 1979 bis 1992 durch die TAUERNKRAFT AG (TKW).

Die Nettoablation wurde zuerst durch PATZELT (von 1967 bis 1977), später von Seiten der TKW (ab 1979) ermittelt (PATZELT & SLUPETZKY 1970, TINTOR & WAKONIGG 1991, TINTOR 1997). Dabei wurden an bestimmten Punkten der Gletscheroberfläche sogenannte Ablationspegel gesetzt, das sind Stangen (ursprünglich Holzstangen, später Aluminiumrohre), welche in vertikale, mittels Dampfbohrer in das

Eis gebohrte Löcher gesteckt werden und an denen das Abschmelzen der Eisoberfläche abgelesen werden kann. Die Tiefe der Bohrlöcher muß natürlich mindestens dem Erwartungswert der Ablationshöhe bis zur nächsten Neubohrung entsprechen. Das sind auf der Pasterze im Extremfall, d.h. im stärksten Abschmelzbereich während einer ausnehmend warmen Ablationsperiode, fast neun Meter.

Für flächendeckende Aussagen sind natürlich zahlreiche solche Pegel vonnöten. HOINKES (1970: 48) empfiehlt zehn Pegel pro km², wobei am Hintereisferner (Ötztaler Alpen) diese Zahl sogar noch überboten wurde. Für die Pasterze wären demnach bei einem Ablationsgebiet bis 2900 m Höhe 75 Pegelstangen nötig, (Fläche 1985: 7,46 km²), für die Gletscherzunge allein, d.h. bis zum Fuß des nur schwer begehbaren „Hufeisenbruches“ (bis 2600 m), immer noch 46 (Fläche 1985: 4,56 km²). Von PATZELT wurden seinerzeit aber nur elf, von der TKW später vierzehn, seit 1992 gar nur sechs Pegel eingesetzt, weshalb auch hier nur von Stichprobenmessungen gesprochen werden kann.

5.2 Gletscherbewegung und Massentransport

Der sich im Nährgebiet ansammelnde Massenüberschuß wird durch die Gletscherbewegung ins Zehrgebiet transportiert, wo er schließlich abschmilzt. Die Eisbewegung vollzieht sich nun aber entlang von Stromlinien, welche in Beziehung zur Eisoberfläche aus longitudinalen (parallel zur Oberfläche), transversalen (quer zur Oberfläche) und vertikalen (senkrecht zur Oberfläche) Komponenten zusammengesetzt zu denken sind. Dabei verläuft die vertikale Bewegungskomponente im Nährgebiet nach unten, d.h. in den Gletscher „eintauchend“ (= Submergenzbewegung), im Zehrgebiet dagegen nach oben, d.h. aus dem Gletscher „auftauchend“ (= Emergenzbewegung), wobei ihr Ausmaß vergleichsweise um eine Größenordnung unter jener der longitudinalen Bewegungskomponenten liegt. An der Schneegrenze ist die Vertikalkomponente definitionsgemäß Null, d.h. das Eis bewegt sich dort im wesentlichen nur parallel zu seiner Oberfläche.

Bei einem Gletscher im Gleichgewichtszustand, d.h. bei einem über mehrere Jahre ausgeglichenen Massenhaushalt, ist die Summe des Massenzuwachses im Nährgebiet (Nettoakkumulation) gleich dem dortigen „Einsinken“ (Submergenzbewegung), diese gleich dem longitudinalen Eisabfluß durch die Schneegrenze und schließlich gleich dem „Aufquellen“ (Emergenzbewegung) und der dieser entgegenwirkenden Abschmelzung (Nettoablation) im Zehrgebiet. In allen Fällen wird dabei eine absolute Massengröße (am besten Kubikmeter Wasserwert) zugrunde gelegt. So ein Idealzustand, der in der Realität kaum jemals über mehrere Jahre verwirklicht ist, wird auch (nicht ganz zutreffend) als „stationär“ bezeichnet.

Die Pasterze, seit fast eineinhalb Jahrhunderten im Rückzug, erreichte einen solchen stationären Zustand höchstens um 1920 und kam diesem um 1980 noch einmal nahe, während die kleineren Gletscher in der Umgebung wesentlich variabler reagierten. So gab es am Hofmannskees im Zeitraum der letzten „Vorstoßphase“ (1965-1980) einen kräftigen und am Freiwandkees einen bescheidenen Vorstoß, während das Wasserfallwinkelkees wenigstens den stationären Zustand erreichte (WAKONIGG 1991b: 296f).

Der Zusammenhang zwischen der vertikalen Bewegungskomponente und der Massenänderung des Gletschers läßt sich durch die Formel $b = V + a$ in den Dimensionen eines Längenmaßes (cm oder m) ausdrücken. Dabei ist b die tatsächliche Höhenänderung der Gletscheroberfläche, a ist entweder die Nettoablation (als negativer Wert zu behandeln) oder die Nettoakkumulation (als positiver Wert zu behandeln) und V ist die vertikale Bewegungskomponente. Für die solcherart errechnete Änderung der Höhe der Gletscheroberfläche zeigt dann ein positiver Wert eine Aufhöhung an, ein negativer sinngemäß ein Einsinken. Je nach verfügbaren Ausgangsgrößen und gesuchter Restgröße läßt sich diese Beziehung auch in den Formeln $a = b - V$ und $V = b - a$ anwenden.

Alle drei Komponenten sind auch direkt auf dem Gletscher meßbar, wobei die Höhenänderung der Gletscheroberfläche geodätisch oder tachymetrisch, die Ablation mittels der genannten Pegel (die Akkumulation mittels der Grabung von Schneeschächten oder Bohrungen) und die vertikale Bewegungskomponente wiederum geodätisch gemessen wird. Dabei mißt man, wie weit die Spitze einer in das Eis eingehohten Stange gegenüber einer bloß oberflächenparallelen Wanderung

emporgehoben (Ablationsgebiet) oder eingesunken (Akkumulationsgebiet) ist (SCHRAM 1966). Die direkte Ermittlung der vertikalen Bewegungskomponente im Zehrgebiet eines Gletschers wird durch Abbildung 1 veranschaulicht. (Anmerkung: Um die Abbildung nicht zu überladen, wurde für die Zeitpunkte 1 und 2 dieselbe Höhe der Gletscheroberfläche angenommen ($a = V$) und auf die Darstellung der fiktiven Höhe zum Zeitpunkt 2 bei fehlender Ablation verzichtet.)

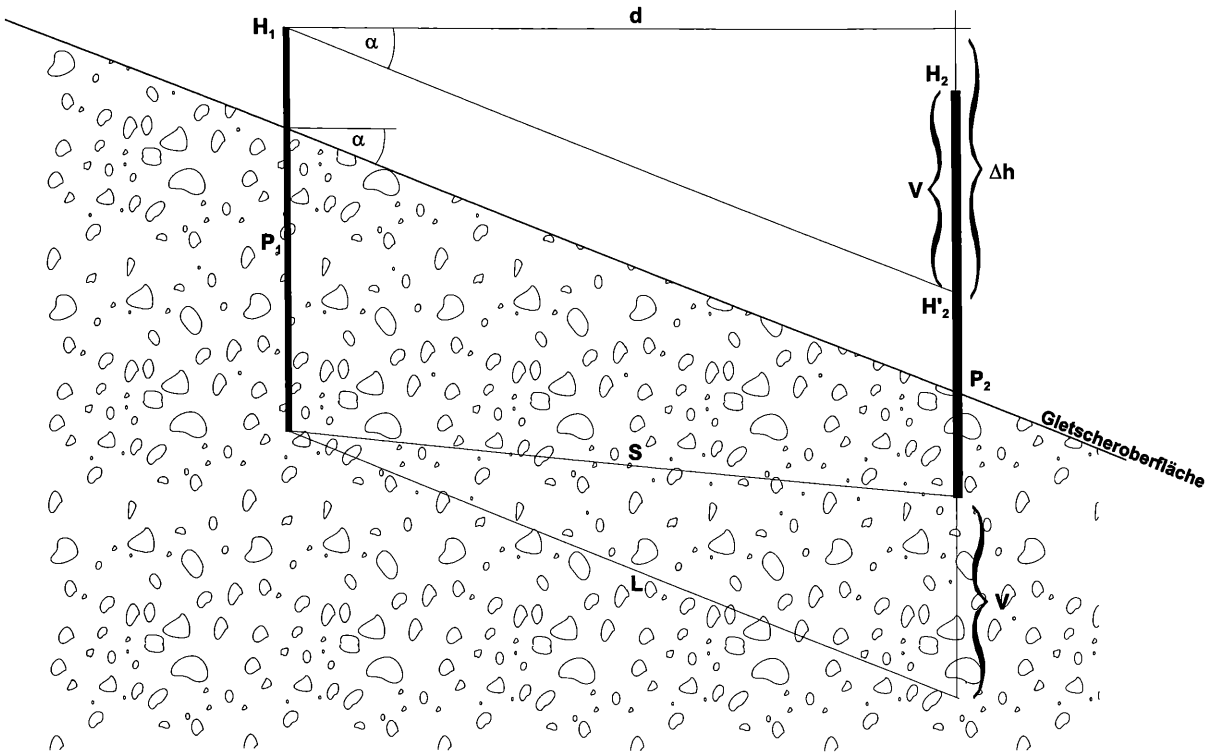


Abb. 1: Direkte Bestimmung der aufwärts gerichteten vertikalen Bewegungskomponente im Zehrgebiet:

P1 = Lage der Pegelstange zum Zeitpunkt 1

P2 = Lage der Pegelstange zum Zeitpunkt 2 (ein Jahr später)

S = Weg der Unterseite der Pegelstange zwischen Zeitpunkt 1 und Zeitpunkt 2 entlang einer Stromlinie

L = longitudinale (oberflächenparallele) Bewegungskomponente

H1 = Höhe der Oberkante der Pegelstange zum Zeitpunkt 1

H2 = Höhe der Oberkante der Pegelstange zum Zeitpunkt 2

H'2 = fiktive Höhe der Oberkante der Pegelstange zum Zeitpunkt 2 ohne vertikale Bewegungskomponente

α = Neigung der Gletscheroberfläche

V = vertikale Bewegungskomponente zu berechnen als $V = H_2 - H'_2$

($H'_2 = H_1 - \Delta h$; $\Delta h = d \cdot \tan \alpha$; H2, L und d sind direkt meßtechnisch zu ermitteln)

Fig. 1: Calculation of emergence velocity in the ablation area:

P1 = position of the pole, year 1

P2 = position of the pole, year 2

S = movement of the foot of the pole along a streamline between year 1 and 2

L = surface (longitudinal) velocity

H1 = level of the top of the pole, year 1

H2 = level of the top of the pole, year 2

H'2 = theoretical level of the top of the pole without emergence velocity, year 2

α = slope of the glacier surface

$V = H_2 - H'_2$

($H'_2 = H_1 - \Delta h$; $\Delta h = d \cdot \tan \alpha$; H2, L, α are based on direct measurements)

An der Pasterze wurde die vertikale Bewegungskomponente bisher noch nicht auf direktem Weg gemessen, wohl aber die Änderung der Höhe der Gletscheroberfläche entlang von Stichprobenprofilen im Zuge der vom Österreichischen Alpenverein (OeAV) betriebenen Gletschernachmessungen (u.a. WAKONIGG & LIEB 1996, WAKONIGG 1991b) sowie im Zuge der Ablationsmessungen durch die TKW. In Bezug auf die ersteren Messungen erfolgte erstmals durch PATZELT eine Berechnung der vertikalen Bewegungskomponente auf der Gletscherzunge der Pasterze (PATZELT & SLUPETZKY 1970), wobei die Ergebnisse - wie sich erst später herausstellte - wegen grober Meßfehler bei den Profilmessungen der „OeAV-Gruppe“ nur einen Durchschnittswert von 1,27 m ergaben, was höchstens der Hälfte des realistisch einzuschätzenden Wertes entsprach. (TINTOR & WAKONIGG 1991: 131).

Demgegenüber wurde von TINTOR & WAKONIGG (1991: 134) als Durchschnitt der Jahre 1979/80 bis 1985/86 ein Wert von 2,96 m berechnet und mittels anderer quantitativer Parameter (longitudinale Jahreswege) auf seine Sinnhaftigkeit überprüft. Schon während der genannten Jahre, aber insbesondere in den Folgejahren, war eine markante Abschwächung der gesamten Bewegungsdynamik der Pasterze zu beobachten, welche es nahelegte, die verfügbaren Meßwerte nun auch in ihrer zeitlichen Beziehung zu analysieren, wie es auch schon für den oben genannten Zeitraum angeregt worden war (SLUPETZKY, mündlich).

Als Beobachtungsdaten stehen nun die Ergebnisse der jährlichen Ablationsmessungen an den 14 Pegeln der TAUERNKRAFT AG von 1979/80 bis 1990/91 sowie die Ergebnisse an sechs Pegeln für 1991/92 bis 1993/94 zur Verfügung (TAUERNKRAFT AG 1997). Die Verteilung der Ablationspegel ist in Abbildung 2 dargestellt. Gleichzeitig liegen auch die ebenfalls von der TKW ermittelten Werte für die geodätisch ermittelte Änderung der Höhe der Gletscheroberfläche (durchwegs Einsinkwerte) mit Ausnahme von 1991/92 vor, wodurch sich für einen 15-jährigen Zeitraum die vertikale Bewegungskomponente für die Gletscherzunge nach der Beziehung $V = b - a$ errechnen läßt.

6 Ergebnisse und Diskussion

6.1 Nettoablation und Massenverlust

Die Werte für die ersten sechs Jahre wurden zur Gänze von TINTOR & WAKONIGG 1991 veröffentlicht und werden hier nicht wiederholt. Auch für die Folgezeit werden nur mehr Durchschnittswerte mitgeteilt. Für den gesamten Zeitraum ergeben sich die in Tabelle 1 dargestellten Mittelwerte.

	1979/80	/81	/82	/83	/84	/85	/86	/87	/88	/89	/90	/91	/92	/93	/94	Mittel
a	335	450	448	522	402	441	531	403	549	444	472	500	640	497	551	479
b	- 13	-152	-113	-309	- 95	-129	-243	-169	-318	-204	-259	-247		-280	-413	- 210
V	+ 322	+298	+335	+213	+307	+312	+288	+243	+231	+240	+213	+253		+217	+138	+258

Tab.1: Mittlere Werte (in cm) für die Nettoablation (a), die Änderung der Höhe der Gletscheroberfläche (b) und die vertikale Bewegungskomponente (V) von 14 bzw. 6 Ablationspegeln zwischen ca. 2150 m und 2500 m Höhe auf der Zunge der Pasterze (Lage der Pegel siehe Abb. 2)

Table 1: Mean values for net ablation (a), alteration of the height of the glacier surface (b) and vertical movement component (V) from 14 respectively 6 levels of ablation in an altitude between ca. 2150 m and 2500 m on the tongue of the Pasterze glacier (position of the levels see fig. 2)

Erachtet man diese Werte als zutreffend für eine Höhe bis 2500 m, so erhält man für eine 1985 gültige Fläche von 4,09 km² (TINTOR & WAKONIGG 1999) eine durchschnittliche Nettoablation von 19,59.10⁶ m³, einen durchschnittlichen Eisersatz durch die vertikale Bewegungskomponente von nur

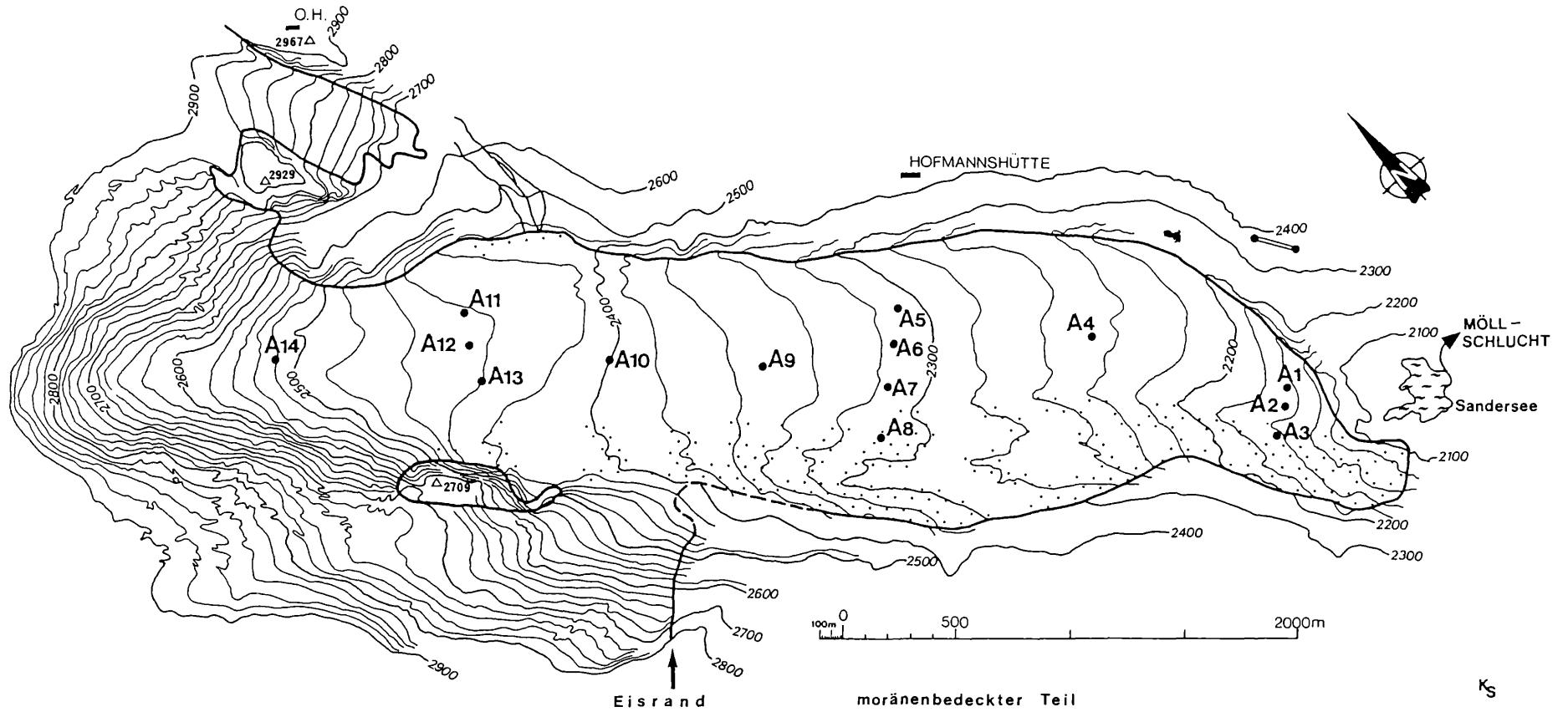


Abb. 2: Übersicht über die Lage der Ablationspegel auf der Pasterze (nach dem „Grundlagenplan“ der TKW 1969, modifiziert)

Fig. 2: Positions of the ablation stakes on the Pasterze glacier (on the basis of the plan of the TKW, 1969, modified)

$10,55 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (= 55 %) und einen effektiven Massenschwund von $8,59 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ Eis pro Jahr. Für die Jahre ab 1981/82, d.h. nach Ende der gletschergünstigeren Phase von 1965 bis 1981, beträgt der Ersatz der durchschnittlichen Ablation von $20,14 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ nur mehr $9,41 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ oder 47 %. Im Extremjahr 1993/94 waren es sogar nur mehr 25 % bei $22,52 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ Nettoablation und $16,88 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ effektivem Massenverlust.

6.2 Die zeitliche Veränderung

Die mitgeteilten Zahlen zeigen schon im groben Überblick, daß sich die bewegungsdynamische Situation während dieser 15 Jahre sehr zum Negativen verändert hat. Bei einer genaueren Analyse der Daten wird dies aber noch erhärtet. So läßt sich der lineare Trend der Zunahme der Nettoablation für die Gletscherzunge (ohne den Wert für 1991/92) durch die Beziehung $a = 10,36x - 422,07$ darstellen (x = Jahreszahl minus 1900). Demnach beträgt die Zunahme der Ablation für diese 14 Jahre knapp 145 cm oder im Durchschnitt 10,4 cm pro Jahr, das sind bezogen auf den Durchschnittswert der Ablation von 467,5 cm (ohne den Wert für 1991/92) insgesamt 31 % oder 2,2 % pro Jahr.

Gleichzeitig erfolgte aber eine ähnlich starke Abnahme der vertikalen Bewegungskomponente und damit des Eisersatzes, wofür sich ein linearer Trend in der Formel $V = -9,80x + 1107,37$ (x = Jahreszahl minus 1900) errechnen läßt. Solcherart ermittelt beträgt die gesamte Abnahme der 14 Jahre 137 cm oder im Durchschnitt 9,8 cm pro Jahr, das sind insgesamt 53 % oder 3,8 % pro Jahr bezogen auf den Mittelwert von 258 cm.

Bei linearer Fortschreibung dieses Trends würde die vertikale Bewegungskomponente und damit der Eisersatz spätestens im Jahr 2013, also nach weiteren 19 Jahren, den Wert Null erreichen. Diese in der Realität wohl auszuschließende Vision zeigt aber, daß der betrachtete Zeitraum im Zuge der langfristigen Änderungen eine Phase mit besonders negativem Bewegungstrend gewesen sein muß, was auch durch den Vergleich mit den Bewegungswerten an der Gletscheroberfläche bestätigt wird (siehe unten) und weiters nahelegt, daß der eklatante Massenschwund der Gletscherzunge im genannten Zeitraum etwa gleichermaßen auf den verringerten Eisnachschub wie auf die vermehrte Abschmelzung zurückging.

Für die Änderung der Höhe der Oberfläche (und damit für die effektive Massenänderung der Gletscherzunge) ergibt sich ein linearer Trend in der Beziehung $b = -17,77x + 1329,50$ (x = Jahreszahl minus 1900), d.h. daß die Änderung der Höhe von -93 cm auf -341 cm oder um 248 cm abnahm, das sind 118 % des Mittelwertes von -210 cm oder -17,7 cm (8,4 %) pro Jahr.

In Summe ergab sich eine Verstärkung des Einsinkens der Gletscheroberfläche in 14 Jahren um 248 cm, eine Zunahme der Ablation um 145 cm und eine Abnahme der vertikalen Bewegungskomponente um 137 cm. (Die aus den linearen Trends ermittelten Werte und die in Tabelle 1 dargestellten Werte müssen nicht notwendigerweise zusammenpassen.) Jedenfalls war für die Zunahme des Massenschwundes der Gletscherzunge die dynamische Komponente (Abnahme des Eisnachschubs) etwa gleichermaßen verantwortlich wie die direkt witterungsabhängige Haushaltskomponente (Zunahme der Ablation).

6.3 Zusammenhang mit der Oberflächenbewegung

Da das „Aufquellen“ der Gletscherzunge ja nur Ausdruck des Eisnachschubs von oben ist und dieser auch indirekt über die Longitudinalbewegung an der Gletscheroberfläche beschrieben werden kann, ist auch zwischen diesen beiden Größen ein Zusammenhang zu erwarten.

Für die Beschreibung des Eisnachschubs in die Gletscherzunge sind am besten die Werte der Oberflächenbewegung an der „Burgstalllinie“ zwischen dem Mittleren und Kleinen Burgstall in einer Höhe von 2380 m bis 2440 m geeignet. Die Werte wurden für die Jahre 1979/80 bis 1988/89 aus WAKONIGG (1981-1993) und für die Folgejahre den Originalberichten über die Nachmessungen an der Pasterze (WAKONIGG 1991a, LIEB 1992-1995) entnommen (Tab. 2).

	1979/80	/81	/82	/83	/84	/85	/86	/87	/88	/89	/90	/91	/92	/93	/94	Mittel
m	52,8	55,2	55,2	53,0	47,4	48,1	44,5	41,9	40,1	38,6	37,0	35,8	31,2	30,3	30,4	42,8
max	74,5	75,7	78,1	73,6	66,4	67,1	63,6	60,2	56,0	56,3	52,2	51,6	44,5	43,2	42,3	60,4

Tab.2.: Mittlere (m) und maximale (max) Jahreswege der Gletscheroberfläche an der Burgstalllinie (in Metern)

Table 2: Mean (m) and maximal (max) annual movement of the glacier surface at the "Burgstalllinie" (meters)

Auch hier ist der negative Trend unübersehbar. Beim Mittel ergibt sich zwischen 1980/81 und 1993/94 eine Abnahme auf 55 %, beim Maximum auf 54 %.

Die Formel für den linearen Trend lautet beim Mittel $d = 217,31 - 2,005x$, beim Maximum $d = 297,58 - 2,727x$ ($d =$ Jahresweg in Metern, $x =$ Jahreszahl minus 1900). Danach nahm der mittlere Jahresweg in 14 Jahren um 28 m oder 66 % des Mittels von 56,9 auf 28,8 m ab, das sind 2 m oder 4,7 % pro Jahr. Bei Fortschreibung des linearen Trends ergibt sich sowohl beim Mittel wie beim Maximum der Wert Null etwa für das Jahr 2009 (die Trendberechnung erfolgte aus Vergleichsgründen zur vertikalen Bewegungskomponente wieder ohne das Jahr 1991/92). Somit wird der negative Bewegungstrend auch anhand der Jahreswege an der Eisoberfläche bestätigt.

Der Zusammenhang zwischen den Jahreswegen an der Burgstalllinie und der vertikalen Bewegungskomponente der Gletscherzunge wird in Abbildung 3 veranschaulicht.

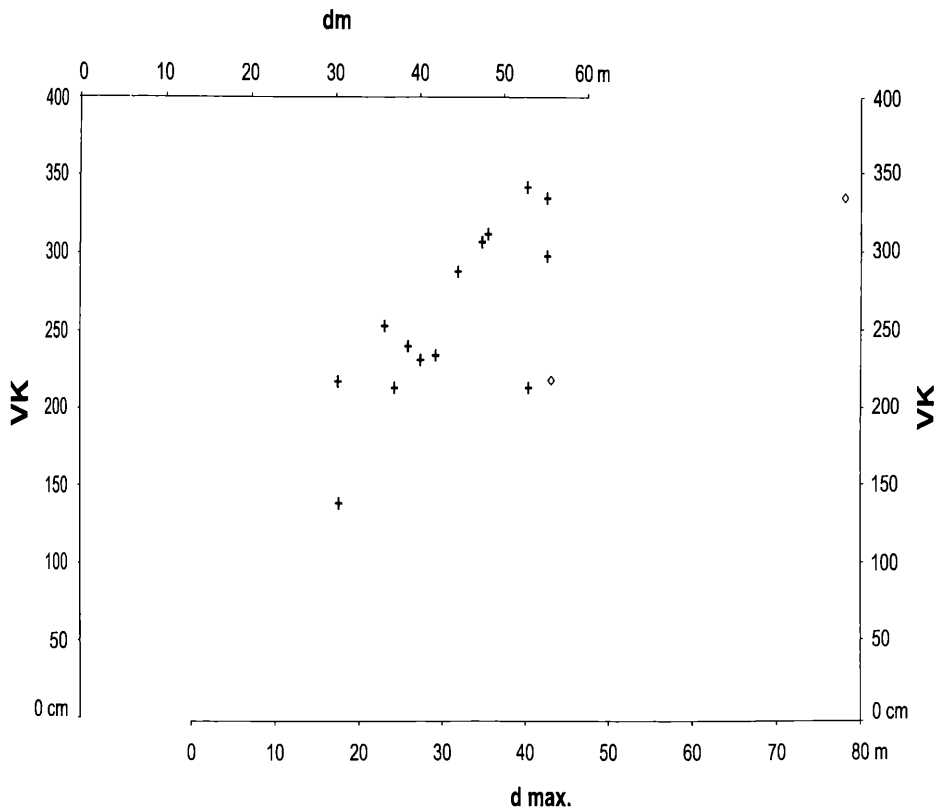


Abb. 3: Zusammenhang zwischen der mittleren vertikalen Bewegungskomponente der Gletscherzunge (VK) und dem mittleren (dm) sowie maximalen (d max.) Jahresweg an der Burgstalllinie 1979/80 - 1993/94 (ohne 1991/92)

Fig. 3: Correlation between mean emergence velocity of the glacier tongue (VK) and mean (dm) as well as maximal (d max.) annual movement at the "Burgstalllinie" 1979/80 - 1993/94 (without 1991/92)

Der Korrelationskoeffizient zwischen VK und dm beträgt $+0,75$, jener zwischen VK und d max. $+0,78$. Das ist zwar eine gute, aber längst nicht zwingende oder gar funktionale Übereinstimmung. Die Ursachen für die Abweichungen dürften in Unterschieden bei den Meßterminen bzw. ganz allgemein in Meßfehlern in Einzeljahren zu suchen sein. Jedenfalls wird der Zusammenhang zwischen beiden Komponenten recht gut bestätigt.

Er bietet auch die Möglichkeit, über die quantitative Abschätzung der Massenzufuhr in die Gletscherzunge Rückschlüsse auf die Eismächtigkeit im Bereich der Burgstalllinie zu ziehen. Unter bestimmten Bedingungen, die auch bei der Pasterze weitgehend erfüllt sein dürften, ist nämlich die mittlere Oberflächengeschwindigkeit gleich der mittleren Querschnittsgeschwindigkeit eines Gletschers (PATERSON 1969, zitiert bei WILHELM 1975: 163).

Bei einer Gletscherfläche von $3,55 \text{ km}^2$ unterhalb der Burgstalllinie ergibt sich unter Annahme der Gültigkeit der mittleren vertikalen Bewegungskomponente für diese Fläche eine mittlere jährliche Massenzufuhr von $9,16 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ bzw. unter Zugrundelegung des linearen Abnahmetrends eine Massenzufuhr von $11,47 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ zu Beginn und $6,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ am Ende des Beobachtungszeitraumes. Bei Jahreswegen von anfangs $56,9$, durchschnittlich $42,8$ und zuletzt $28,8$ Metern erfordert das in dieser Reihenfolge eine nur wenig veränderte Querschnittsfläche von 202000 , 214000 und 229000 Quadratmetern.

Bei vereinfachter Annahme einer trapezförmigen Querschnittsfläche mit einer Länge der Decklinie (Gletscheroberfläche) von 950 m und einer Neigung der Seitenflanken (Trapezseiten) von 50° erhält man für eine Querschnittsfläche von 202000 m^2 eine mittlere Eismächtigkeit (Trapezhöhe) von 284 m , bei 214000 m^2 310 m und bei 229000 m^2 366 m , wobei die Länge der Basislinie (ebener Untergrund) in der selben Reihenfolge von 475 m über 430 m auf 366 m abnehmen müßte.

Obwohl alle zugrundegelegten Annahmen recht grobe Vereinfachungen sind, sind die resultierenden Eismächtigkeiten in ihrer Größenordnung real und in ihren Ausmaßen überraschend.

6.4 Vergleich mit den Profilmessungen des OeAV-Gletschermessdienstes

In Summe der Jahre 1979/80 bis 1993/94 (ohne 1991/92) beträgt das durchschnittliche Einsinken der Oberfläche der Gletscherzunge der Pasterze nach den Werten der TAUERNKRAFT AG (1997) $29,44 \text{ m}$, nach den Werten des Gletschermessdienstes des OeAV $29,48 \text{ m}$, was eine geradezu perfekte Übereinstimmung bedeutet. Zusammen mit den $3,29 \text{ m}$ des Jahres 1991/92 (OeAV-Werte) sind es sogar $32,77 \text{ m}$ oder $2,18 \text{ m}$ pro Jahr, in den letzten neun Jahren (ab 1985/86) allein $25,54 \text{ m}$ oder $2,84 \text{ m}$ pro Jahr.

Die Übereinstimmung der Einzeljahre ist mit einem Korrelationskoeffizient von $+0,88$ zwar deutlich, aber längst nicht befriedigend. Vor allem bis 1984 war die Übereinstimmung eher schlecht ($r = +0,66$), ab 1985 aber recht befriedigend ($r = +0,94$).

Auch hier sind die Ursachen in ungleichen Meßterminen und eventuellen Meßfehlern in Einzeljahren zu suchen, welche sich aber in Summe über den gesamten Zeitraum wieder ausgleichen müssen. Wegen dieser guten Übereinstimmung des Gesamtergebnisses erscheint der Versuch, nachträglich die Abweichungen in den Einzeljahren korrigieren zu wollen, wenig zielführend.

Sichtbare Kennzeichen dieses auch bis 1998 ungebrochenen Massenschwundes sind neben der Schrumpfung der Fläche der Gletscherzunge und ihrer sich ununterbrochenen verringernden Mächtigkeit auch mehrere große eisfreie Stellen („Felsfenster“) im Hufeisenbruch oberhalb der Zunge, welche sich von Jahr zu Jahr zusehends vergrößern.

6.5 Zusammenfassende Übersicht

In den Jahren von 1979/80 bis 1993/94 ist die Zunge der Pasterze im Durchschnitt um fast 33 m ($2,2 \text{ m}$ pro Jahr) eingesunken und hat bei Gültigkeit dieses Wertes für eine $4,1 \text{ km}^2$ große Fläche (bis 2500 m auf Basis der Höhenlinien von 1981) 134 Millionen m^3 ($8,94$ Mill. m^3 pro Jahr) an Eismasse

verloren. Dieser Verlust geht im Durchschnitt aller Jahre zu fast genau gleichen Teilen auf das Konto einer zu starken Abschmelzung (in Summe etwa 293 Mill. m³), sowie eines zu geringen Eisnachschubs von oben (in Summe etwa 156 Mill. m³), womit nur 53 % des Abschmelzverlustes durch Eisnachschub ersetzt wurden. Dieser Ersatz war im für den Gletscherhaushalt extremen Jahr 1993/94 sogar auf 25 % zurückgegangen. Auch die starke Zunahme des Massenschwundes während dieser Periode geht gleichermaßen auf die abnehmende Ernährung von oben wie auf die gleichzeitig zunehmende Abschmelzung an der Gletscheroberfläche zurück.

7 Dank

Wir danken der „TAUERNKRAFT AG“ (Herrn P. KIRCHLECHNER) für die Überlassung der Meßdaten ihres Ablations-Meßnetzes.

8 Literatur

CHEN, J. (1991): Changes of Alpine Climate and Glacier Water Resources. - Zürcher Geographische Schriften 46: 1-196.

HOINKES, H. (1970): Methoden und Möglichkeiten von Massenhaushaltsstudien auf Gletschern. Ergebnisse der Meßreihe Hintereisferner (Ötztaler Alpen) 1953-1968. Zeitschr. f. Gletscherkunde und Glazialgeologie IV: 37-90.

LIEB, G.K. (1992-1995): Originalberichte zu den Nachmessungen an der Pasterze der Jahre 1990/91, 1992/93 und 1993/94. Unveröff. Originalberichte (in Kurzform veröff. v. G. PATZELT i. d. Mitt. d. OeAV 2/1992: 20, 2/1994: 16, 3/1995: 20).

PATZELT, G. (1987): Die gegenwärtigen Veränderungen an Gebirgsgletschern der Erde. - Frankfurter Beiträge zur Didaktik der Geographie, Bd. 10: 41-50.

PATZELT, G. & SLUPETZKY, H. (1970): Die Vertikalkomponente der Gletscherbewegung auf der Pasterze 1968-1969 und ihr Einfluß auf die Berechnung der Massenbilanz. - Zeitschr. f. Gletscherkunde und Glazialgeologie VI: 119-127.

SCHRAM, K. (1966): Untersuchungen der vertikalen Komponente der Gletscherbewegung und der Deformation des Eises im Zungengebiet des Hintereisferners. - Ber.Nat.-Med.Ver. Innsbruck, Bd. 54: 75-150.

TAUERNKRAFT AG (1997): Originalberichte über die Gletschermessung - Untere Pasterze 1987 bis 1994. - Unveröff. Bericht, Abt. Hydrologie (Berichter: P. KIRCHLECHNER).

TINTOR, W. (1997): Witterung und Ablation an der Pasterze von 1990 bis 1994. - Carinthia II 187/107: 583-590.

TINTOR, W. & WAKONIGG, H. (1991): Ein Beitrag zur Kenntnis der vertikalen Bewegungskomponente und des Eisnachschubs an der Pasterze. - Zeitschr. f. Gletscherkunde und Glazialgeologie 25 (für 1989): 131-137.

TINTOR, W. & WAKONIGG, H. (1999): Höhen- und Volumsänderung der Pasterze im Zeitraum 1964-1981. Zeitschr. f. Gletscherkunde und Glazialgeologie (in Druck).

TOLLNER, H. (1969): Das Verhalten von Gletschern in der Großglocknergruppe in den letzten Jahrzehnten. - In: BÜDEL, J. & GLASER, U. (Hrsg.): Neue Forschungen im Umkreis der Glocknergruppe. Wissenschaftl. Alpenvereinshefte, Deutscher Alpenverein, München 21: 181-197.

WAKONIGG, H. (1981-1993): Originalberichte zu den Nachmessungen an der Pasterze der Jahre 1980-1989. Zeitschr. f. Gletscherkunde und Glazialgeologie 16: 281-285, 17: 241-246, 18: 191-197, 19: 189-194, 20: 223-228, 22: 185-190, 23: 191-200, 24: 193-198, 25: 231-237, 26: 203-209.

WAKONIGG, H. (1991a): Originalbericht zu den Nachmessungen an der Pasterze des Jahres 1989/90. - Unveröff. Originalbericht (in Kurzform veröff. v. G. PATZELT i. d. Mitt. d. OeAV 2/1991: 17).

WAKONIGG, H. (1991b): Die Nachmessungen an der Pasterze von 1879 bis 1990. - Arb. aus d. Inst. f. Geographie der Univ. Graz 30 (Festschr. f. H. PASCHINGER): 271-307.

WAKONIGG, H. & LIEB, G.K. (1996): Die Pasterze und ihre Erforschung im Rahmen der Gletschermessungen. - Kärntner Nationalpark-Schriften, Bd. 8: 99-115.

WILHELM, F. (1975): Schnee- und Gletscherkunde. Lehrbuch der Allgemeinen Geographie Bd. III/3, Berlin-NewYork, 434pp.

Adresse der Autoren

Univ.Prof. Dr. Herwig Wakonigg
Institut für Geographie
Universität Graz
Heinrichstraße 36
A-8010 Graz

Mag.Dr. Wolfgang Tintor
Korpitsch 26
A-9587 Riegersdorf

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Nationalpark Hohe Tauern - Wissenschaftliche Mitteilungen Nationalpark Hohe Tauern](#)

Jahr/Year: 1999

Band/Volume: [5](#)

Autor(en)/Author(s): Wakonigg Herwig, Tintor Wolfgang

Artikel/Article: [Zum Massenumsatz der Pasterzenzunge zwischen 1979 und 1994 193-203](#)