

JAHRRINGE UND MASSENBILANZ

Dendroklimatologische Rekonstruktion der Massenbilanzreihe des Hintereisferners bis zum Jahr 1400 mittels *Pinus cembra*-Reihen aus den Öztaler Alpen, Tirol

Von K. NICOLUSSI, Innsbruck

Mit 16 Figuren und 7 Abbildungen

ZUSAMMENFASSUNG

Es wurden *Pinus cembra*-Reihen für Frühholz und Spätholz mit Bäumen von waldgrenznahen Standorten in den Öztaler Alpen erstellt. Die Reihen decken den Zeitraum von 1356 bis 1988 ab. Sowohl die Frühholz- als auch die Spätholzbreiten von *Pinus cembra* weisen eine gute Übereinstimmung mit den Massenhaushaltskennziffern, und hier vornehmlich mit den Massenbilanzdaten, des Hintereisferners auf. Die Korrelationen werden hauptsächlich durch von Jahr zu Jahr stark schwankende Bilanzergebnisse und die Resultate extremer Haushaltsjahre negativ beeinflusst. Die verschiedenen Kennzahlen für die Beziehung zwischen den *Pinus cembra*-Frühholz- und Spätholzreihen und den Massenhaushaltswerten des Hintereisferners verbessern sich bei einer Mittelung der indizierten Werte dieser beiden Jahrringbreitenelemente.

Die dendroklimatologische Rekonstruktion der Massenbilanzreihe des Hintereisferners bis zum Jahr 1400 wurde nach den Ergebnissen einer Regressionsanalyse durchgeführt. Der Vergleich zwischen den dadurch erhaltenen sogenannten Dendro-Massenbilanzen und den Volums- und Größenänderungen von Alpengletschern zeigt eine gute Übereinstimmung sowohl in qualitativer als auch quantitativer Hinsicht. Nach der Summenkurve der Dendro-Massenbilanzen kann der Zeitraum ab dem Jahr 1400 in drei Perioden unterteilt werden: Der jüngste Abschnitt, nach „1850“, ist gekennzeichnet durch einen nur zeitweise unterbrochenen Rückgang der Summe der Dendro-Massenbilanzen auf ein im Vergleich zu den vorhergehenden rund 500 Jahren singular niedriges Niveau. Die neuzeitliche Gletscherhochstandsperiode des 17. bis 19. Jahrhunderts ist durch mehrere Summenmaxima auf etwa ähnlichem Niveau markiert. Die Resultate der Rekonstruktion für den Abschnitt des Spätmittelalters und der frühen Neuzeit liegen auf einem insgesamt mittleren bis hohen Niveau, die Maxima und Minima der Dendro-Massenbilanzsummen entsprechen den Werten von ca. 1870 bzw. 1940. Einen zur Ausdehnung zur Mitte des 20. Jahrhunderts vergleichbar kleinen Stand erreichten die Alpengletscher letztmals um das Jahr 1445.

TREE RINGS AND GLACIER MASS BALANCE

Dendroclimatological reconstruction of the mass balance series of the Hintereisferner back to the year 1400 using *Pinus cembra* series from the Öztal Alps, Tirol

SUMMARY

Pinus cembra series for earlywood and latewood have been elaborated using trees from locations near the timberline in the Öztal Alps. These series extend from the year 1356 to 1988. Both the earlywood and

the latewood series of *Pinus cembra* have a good conformity with the mass balance series of the Hintereisferner. The correlation is reduced in periods with extreme values or high interannual variability of the mass balance. The relation between the earlywood and latewood series of *Pinus cembra* and the mass budget series of the Hintereisferner is improved by averaging the indexed values of these two tree ring elements.

The dendroclimatological reconstruction of the mass balance series of the Hintereisferner back to the year 1400 is based on a regression analysis. The comparison of the so called "Dendro mass balances" and the volume and length changes of alpine glaciers shows a conformity in qualitative and quantitative respect. The time since 1400 can be subdivided into three periods by the cumulated curve of the Dendro mass balances:

1. The youngest period since "1850" is marked by a decline of the Dendro mass balance sum, which was only temporarily interrupted, to a singularly low level in comparison with about 500 years before.

2. During the Little Ice Age from the 17th to the 19th century the cumulative Dendro mass balance curve has several maxima of comparable magnitude.

3. In the 15th and the 16th century values fluctuated around a somewhat lower mean level. Extreme values of the past centuries did not exceed that of 1870 and did not go below that of 1940. An extent of the glaciers, which is comparable to the extent in the middle of the 20th century, was not reached since about 1445 AD.

1. EINLEITUNG

Das Wissen über die holozäne Gletschergeschichte ist ungleichmäßig verteilt. Relativ viel ist aufgrund von Untersuchungen an Moränen über Gletscherhochstände bekannt, vergleichsweise gering ist hingegen das Wissen über die Minimalausdehnungen zwischen zwei Hochständen bzw. über Gletschervorstöße, die kein Hochstandsniveau erreichten. Ausgenommen von dieser Diskrepanz sind nur die letzten Jahrhunderte. Hier liegen für einzelne Alpengletscher (Patzelt 1973, Zumbühl 1980, Zumbühl und Holzhauser 1988) nahezu lückenlose Rekonstruktionen vor. Für frühere Zeiten, und dies gilt bereits für die frühe Neuzeit und das Mittelalter, sind konkrete Aussagen über Minimalstände selten (Holzhauser 1984) möglich. Faßbar sind hier meist nur Zeitabschnitte, in denen die Gletscherausdehnung ein bestimmtes Ausmaß nicht überschritt.

Um die Lücken zu schließen, werden andere klimageschichtliche Informationen zur Rekonstruktion der Gletschergeschichte verwendet. Ab etwa dem Spätmittelalter können bereits historische Nachrichten über Witterungsverhältnisse (Pfister 1985) herangezogen werden, für frühere Zeiten finden aus pollenanalytisch bestimmten Waldgrenzschwankungen abgeleitete Annahmen über das Sommertemperaturniveau (Patzelt und Borten-schlager 1973) Verwendung.

Vermeehrt werden auch dendrochronologische Informationen für gletschergeschichtliche Rekonstruktionen benützt. Hauptsächlich werden dabei bekannte Größen- und Längenänderungen der Gletscher den Jahrringbreitenschwankungen gegenübergestellt. So zeigen La Marche und Fritts (1971) eine hohe Übereinstimmung zwischen den Jahrringbreitenschwankungen von *Pinus cembra* und der österreichischen und schweizerischen Statistik der Gletscherlängenänderung auf. Matthews (1976) verweist am Beispiel des Storbreen, Norwegen, auf die Korrespondenz zwischen schmalen Jahrringen von *Pinus sylvestris* und Gletscherhochständen. In der Sierra Nevada, Kalifornien, kann Scuderi (1987) diese Gleichzeitigkeit anhand einer 1200jährigen *Pinus balfouriana*-Chronologie ebenfalls belegen. Auch Grabherr (1980) weist auf die Gleichzeitigkeit von Jahrringbreitendepressionen bei *Pinus cembra* und Gletscherhochstandsphasen hin. Ähnliche Parallelisierungen nehmen auch Frenzel und Maisch (1981) sowie Serre (1978) vor. Bircher (1982) und Renner (1982) versuchten,

einen Zusammenhang zwischen Spätholzdichtekurven von Bäumen und Gletscherschwankungen aufzuzeigen. Solche Gegenüberstellungen zwischen Jahrringbreitenschwankungen und Längenänderungen von Gletschern lassen letztlich nur qualitative Aussagen zur Gletschergeschichte zu. Eine Quantifizierung der Gletscherschwankungen erscheint auf diesem Wege nicht möglich.

Einen anderen dendroklimatologischen Ansatz stellt der Vergleich zwischen Jahrringbreiten und Massenbilanzwerten von Gletschern dar. Das Massenbilanzergebnis eines Jahres integriert im wesentlichen die Klimaentwicklung eines Jahres, modelliert durch das physikalische System „Gletscher“. So wird der Bilanzwert eines Jahres vor allem durch die Temperaturverhältnisse in der Ablationsperiode, die Winterniederschlagssumme und die Häufigkeit sommerlicher Schneefälle während des Haushaltsjahres bestimmt (Hoinkes 1971, Fliri 1964). Auch der Jahrring reflektiert die klimatischen Bedingungen, modelliert allerdings durch das biologische System „Baum“. Das die Jahrringentwicklung bestimmende klimatische Element variiert ebenso wie die relative Bedeutung der klimatischen Bedingungen im Verhältnis zu anderen Wachstumsfaktoren mit der ökologischen Situation. Bei Hochlagenbäumen wird das Jahrringwachstum ganz wesentlich von der Sommertemperatur gesteuert (Becker 1991).

Ansätze zu einem Vergleich von Massenbilanz- und Jahrringreihen liegen vor. Röthlisberger et al. (1980:111–112) zeigen in einem Vergleich zwischen der Abflußkurve der Massa für Juli und August, zu deren etwa zu 60 % vergletschertem Einzugsgebiet auch der Aletschgletscher gehört, und verschiedenen Dichtekurven von *Larix decidua* Gleichlaufwerte zwischen 73 % und 83 % auf. Karlén (1984) untersuchte anhand der Massenbilanzreihe des Storglaciären, Schweden, die Beziehung zwischen Massenhaushalt und Jahrringbreiten von Kiefern. Die errechnete Korrelation erwies sich als gering; daher beschränkt sich Karlén (1984) auf die Aussage, daß schmale Jahrringe mit positiven, breite Jahrringe mit negativen Massenbilanzen verbunden sind. Entsprechend werden Perioden mit unterdurchschnittlichen Jahrringbreiten mit Gletscherhochständen, Phasen mit überdurchschnittlichen Breitenwerten mit kleinen Gletscherständen in Zusammenhang gebracht. Eine genauere Quantifizierung der Beziehung Jahrring – Massenbilanz wird nicht durchgeführt.

Eine solche Quantifizierung mit einer daraus abgeleiteten langjährigen Massenbilanzrekonstruktion ist das Anliegen dieser Arbeit. Da längerfristige Massenbilanzänderungen die wesentliche Ursache für die Größenschwankungen von Gletschern darstellen, sind die Resultate der Massenbilanzrekonstruktion auch bis zu einem bestimmten Ausmaß mit ausgewiesenen Gletscherschwankungen kontrollierbar. Die kumulativen Bilanzwerte müssen die aus der Gletschergeschichte bekannten Maxima bzw. Minima der Gletscherausdehnung bis zu einem gewissen Maß widerspiegeln. Diese in Grenzen mögliche Überprüfung einer Massenbilanzrekonstruktion auf Jahrringbasis stellt einen wesentlichen Vorzug gegenüber anderen dendroklimatologischen Ansätzen, beispielsweise Rekonstruktionen der Sommertemperatur, dar, deren Resultate nur schwer kontrollierbar sind.

2. MATERIAL UND METHODEN

2.1 MASSENHAUSHALTSDATEN

In den Ostalpen ist es naheliegend, für die Untersuchung der Massenbilanz-Jahrring-Beziehung die Massenhaushaltsreihe des Hintereisferners (Abb. 1) zu verwenden. Dieser Gletscher liegt in unmittelbarer Nähe von Vernagt- und Kesselwandferner im hintersten

Rofental (Fig. 1), einem Seitental des Ötztales an der Nordabdachung des Alpenhauptkammes. Der Hintereisferner belegt mit einer Fläche von 9,5 km² und einer Länge von 7,7 km (Österr. Gletscherinventar, Stand 1969) den 7. bzw. 4. Platz in der Rangliste der österreichischen Gletscher. Dieser Gletscher weist die längste gemessene Massenbilanzreihe in den Ostalpen auf. Seit 1952 werden am Hintereisferner mit der direkten glaziologischen Methode Massenhaushaltswerte ermittelt. Für die vorliegende Untersuchung wurden die Ergebnisse für die Massenbilanz, die Nettoakkumulation, die Nettoablation und die Höhe der Gleichgewichtslinie eines Haushaltsjahres (Kuhn et al. 1985a, freundl. persönl. Mitteil. G. Markl) verwendet. Mit der TS-Methode (Hoinkes und Steinacker 1975) wurden von Steinacker (1979) die spezifischen Massenbilanzwerte bis zum Haushaltsjahr 1934/35 berechnet. Diese TS-Werte wurden im Hinblick auf die Verlängerung der Vergleichsperiode z. T. auch in die Untersuchung mit eingeschlossen.

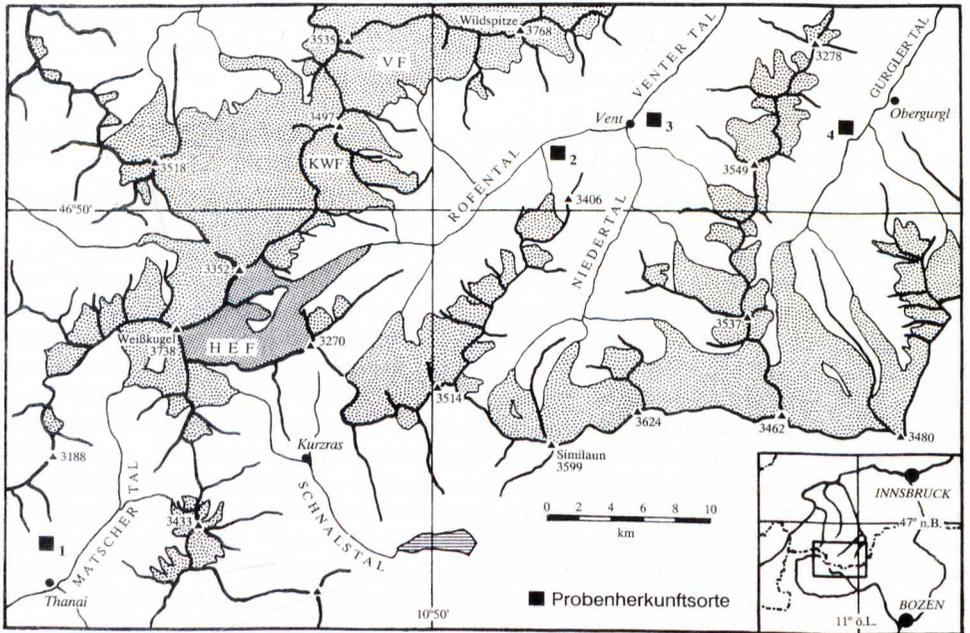


Fig. 1: Lageskizze des Hintereisferners und seiner Umgebung mit den *Pinus cembra*-Probengebieten
HEF: Hintereisferner, KWF: Kesselwandferner, VF: Vernagtferner
1 Waldgrenzbereich bei Thanai – 2 Rofen-Wald – 3 Waldgrenzbereich bei Vent – 4 Am Beilstein

2.2 JAHRRINGDATEN

Die dem Hintereisferner nächstgelegenen Baumbestände beidseits des Alpenhauptkammes werden von *Pinus cembra* dominiert. Diese Baumart bildet im Bereich der Zentralalpen in Reinbeständen die Waldgrenze. Die relative Nähe zum Hintereisferner sowohl in räumlicher Hinsicht als auch bezüglich der Höhenlage der Baumbestände war der wesentliche Grund für die Wahl von *Pinus cembra* als Jahrringmaterial für diese Studie. *Pinus cembra* ist für dendroklimatologische Untersuchungen gut geeignet und wurde für solche Arbeiten bereits mehrfach verwendet. LaMarche und Fritts (1971) sowie Grab-



Abb. 1: Hintereisferner, 25. 10. 1985. Photographie von G. Patzelt

herr (1980) verwiesen, wie oben erwähnt, auf die Synchronität von Jahringbreitenschwankungen dieser Baumart und Gletscherschwankungen. Eckstein und Aniol (1981) verwendeten neben einer *Larix decidua*- und einer *Picea abies*-Reihe auch eine *Pinus cembra*-Reihe aus dem Ötztal für eine Rekonstruktion der Sommermitteltemperatur bis ins Spätmittelalter zurück.

Das für den Vergleich mit den Massenhaushaltsdaten verwendete Jahrringmaterial stammt von insgesamt vier Lokalitäten aus dem Matscher, Venter und Gurgler Tal und somit aus der weiteren Umgebung des Hintereisferners (Fig. 1). Das Matscher Tal schließt südlich des Alpenhauptkammes unmittelbar an den Hintereisferner an. Die Beprobung der lebenden Bäume wurde in den Sommern 1986 und 1990 unter Verwendung eines Zuwachsbohrers, der Bohrkerne mit einer Stärke von 4 mm liefert, durchgeführt. In der Regel wurden zwei Radien je Baum entnommen. Die im Matscher Tal beprobten Bäume stehen ausnahmslos im Waldgrenzbereich an der orographisch rechten Talseite nördlich des Weilers Thanai. Die Waldgrenze im Matscher Tal verläuft heute in ca. 2400 m Seehöhe. Alle angebohrten Bäume wurzeln über 2260 m Seehöhe. Es wurden sowohl Einzelbäume als auch in kleinen Gruppen bzw. im Übergang zu geschlossenen Waldflächen stehende Zirben beprobt. Die Exposition des Standortes ist Südost. Insgesamt 13 Baumreihen aus dem Matscher Tal wurden für den Aufbau der Frühholz- bzw. der Spätholzmittelreihe verwendet.

Aus dem Venter Tal stammen insgesamt 20 Baumreihen. Die Feldarbeiten wurden in den Sommern 1986, 1987 und 1989 durchgeführt. Im Venter Tal verläuft die aktuelle Waldgrenze in etwa 2340 m Seehöhe. Die beprobten Bäume der Lokalität „Rofen-Wald“ stehen auf der orographisch rechten Talseite im äußeren Rofental in Höhen ab 2185 m. Weitere Bohrkerne von lebenden Bäumen stammen ab 2170 m Seehöhe aus dem Wald über Vent. Die Exposition beider Standorte ist Nordwest.

Die von lebenden Bäumen stammende Jahrringreihe endet im Jahr 1600. Die *Pinus cembra*-Serie konnte jedoch mit Balkenscheiben eines Stadels aus dem Gurgler Tal bis ins Spätmittelalter verlängert werden. Die aufgrund von Auswertungen an 14 Stammscheiben aufgebaute lokale Mittelkurve deckt die Jahre von 1356 bis 1661 ab. Bei den Balkenscheiben wurden, analog zum Rezentmaterial, jeweils zumindest zwei Radien ausgewertet. Der beprobte Heustadel steht an der Lokalität „Am Beilstein“ in etwa 2150 m Seehöhe rund 2,5 km südlich von Obergurgl an der orographisch linken, südost-exponierten Talseite. Die Lage des Stadels, die Wegsituation, die teilweise sehr engen Jahrringe sowie einzelne, gegenwärtig in der Umgebung stockende Bäume lassen es als sicher erscheinen, daß die für den Stadelbau verwendeten Zirben in relativer Nähe und damit im Waldgrenzbereich wuchsen. Die aktuelle Waldgrenze verläuft im Gurgler Tal in etwa 2300 m Höhe.

Am Jahrringmaterial wurde sowohl die Frühholz- als auch die Spätholzbreite ausgewertet. Da die Abgrenzung dieser beiden Jahrringbestandteile visuell erfolgte, bleibt sie zwangsläufig subjektiv (Grabherr 1980: 17). Die Grenze zwischen Früh- und Spätholz wurde dort gezogen, wo eine deutliche Abflachung der Tracheiden (Grosser 1977: 76) festzustellen war. Die Jahringbreiten von *Pinus cembra* von Waldgrenzstandorten sind relativ gering. Im Mittel sind, abhängig vom Kambialalter, Breitenwerte von 0,4 bis 1,5 mm zu erwarten. Der Anteil des Spätholzes am Jahrring beträgt – bei mittleren Absolutbeträgen von 0,03 bis 0,05 mm – durchschnittlich etwa 5 % (Nicolussi 1990). Da die Frühholzbreite von der Breite des gesamten Jahrringes nur wenig differiert und somit die jeweiligen Ergebnisse praktisch übertragbar sind, wurden in weiterer Folge nur die Frühholz- und Spätholzwerte von *Pinus cembra* in die Untersuchungen einbezogen.

Zur Ausschaltung des Alterstrends wurden die einzelnen Frühholz- und Spätholz-Einzelbaumreihen indiziert (Schweingruber 1983). Für die Berechnung der hierzu nötigen Ausgleichskurven wurden Kombinationen aus Polynom-, Exponential- und Linearfunktionen verwendet. Da die Eliminierung des Alterstrends aus den Breitenreihen durch eine Division erfolgt, beinhalten die indizierten Frühholz- bzw. Spätholzreihen dimensionslose Werte.

Figur 2 weist die auf der Basis der indizierten Breitenreihen erstellten Mittelkurven für Frühholz und Spätholz sowie die jeweilige Belegzahl aus. Die Mittelreihen sind bis zu 25fach belegt, vor 1408 ist nur ein Baum erfaßt. Die indizierten Breitenwerte der Frühholz- bzw. der Spätholzreihe sind in den Tabellen 1 bzw. 2 wiedergegeben. Die Serien decken den Zeitraum von 1356 bis 1988 ab. Entsprechend der Holzart *Pinus cembra* werden die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Mittelreihen für Frühholz und Spätholz im folgenden mit dem Kürzel „Pc“ gekennzeichnet.

Offensichtlich gestörte Jahrringabschnitte einzelner Baumreihen wurden bei der Erstellung der Mittelreihen für Früh- bzw. Spätholz nicht berücksichtigt. Dies gilt speziell für die Periode um 1820. Die Klimaverschlechterung in diesen Jahren schädigte manche der untersuchten Bäume derart, daß die Frühholz- bzw. Spätholzweite erst nach Jahren bzw. Jahrzehnten wieder ein normales Breiteniveau erreichten. Teilweise traten auch Jahrringausfälle auf. Entsprechend konnten nur wenige Baumreihen für den Zeitabschnitt um 1820 verwendet werden, was sich auch in der Belegzahl (Fig. 2) niederschlägt. Eine weitere Phase mit einer relativ geringen Zahl von zur Verfügung stehenden Breitenreihen ist zur Mitte des 17. Jahrhunderts festzustellen. Hier nimmt die Anzahl der von lebenden Zirben stammenden Reihen bereits ab, die an Hölzern des Stadels im Gurgler Tal ausgewerteten Serien enden hingegen um 1660.

Wird aus mehreren Einzelbaumreihen eine Mittelreihe gebildet, so ist die Standardabweichung dieser Mittelreihe z. T. erheblich geringer als das Mittel der Standardabweichungen der zugrunde liegenden Einzelreihen. Diese Beobachtung ist beim hier verwendeten Jahrringmaterial vor allem an den Spätholzreihen zu machen, weniger hingegen an den Frühholzserien. Da die Mittelreihen für Früh- und Spätholz verschieden dicht belegt sind (vgl. Fig. 2), würde dieser dämpfende Effekt bei einer dendroklimatologischen Rekonstruktion zu Verfälschungen führen. Um dies zu vermeiden, wurde die Standardabweichung der Mittelreihe unter Verwendung eines Exponenten – da die indizierten Frühholz- und Spätholzbreiten um den Wert 1 schwanken – auf den Betrag des Mittels der Standardabweichungen der in die Bildung der Mittelreihe eingehenden Einzelbaumreihen reduziert (Gleichung 1). Diese Reduktion wurde für jeden Abschnitt der Frühholz- sowie Spätholz-Mittelreihe mit wechselnder Belegzahl getrennt durchgeführt. Tabelle 1 und Tabelle 2 geben die *Pinus cembra* Reihen mit den reduzierten Werten wieder.

$$MR_r = MR \exp \left(\left(\frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i / n}{\sigma_{MR}} \right) \right) \quad (1)$$

MR:	Mittelreihe, nicht reduziert
σ_i :	Standardabweichung Einzelbaumreihe
σ_{MR} :	Standardabweichung der nicht-reduzierten Mittelreihe
n:	Anzahl der Einzelbaumreihen

Tabelle 1: Die indizierten Breitenwerte der *Pinus cembra*-Frühholzreihe, 1356–1988

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1350 AD							.61	.48	.69	.79
1360 AD	.97	1.08	1.01	1.18	1.39	1.59	1.36	1.68	1.14	.88
1370 AD	.93	.99	.83	.73	.92	.91	.89	.81	.93	.96
1380 AD	1.19	1.21	1.36	1.20	1.37	1.25	1.21	1.01	1.24	1.39
1390 AD	1.15	1.08	.95	.79	.73	.78	.77	.91	.83	1.25
1400 AD	1.25	1.29	1.18	1.18	1.16	1.17	.87	.85	1.11	.91
1410 AD	1.08	1.11	1.11	1.00	1.04	1.09	.72	.82	.75	.86
1420 AD	.73	.85	1.00	.96	.93	.71	.88	1.02	1.01	1.06
1430 AD	.74	1.00	1.05	1.17	1.46	1.55	1.11	1.17	1.05	1.01
1440 AD	1.01	.81	1.14	1.11	1.00	1.18	1.10	1.04	1.03	.91
1450 AD	1.12	.87	.83	.82	.80	.81	.75	.75	.83	.76
1460 AD	.96	1.05	.65	.93	.87	.70	.61	.64	.64	.50
1470 AD	.59	.60	.58	.73	.99	.98	1.12	1.12	.94	1.20
1480 AD	1.17	1.22	.82	1.13	1.35	1.08	1.44	1.53	1.25	1.14
1490 AD	1.04	.97	.84	.77	1.02	.89	.86	.78	.98	1.01
1500 AD	.98	1.15	1.46	1.21	1.04	1.25	1.18	1.61	1.54	1.26
1510 AD	1.47	1.10	1.41	1.14	1.14	.80	.82	.61	.73	.62
1520 AD	.79	.91	1.00	.86	1.04	1.12	1.38	1.09	.84	.91
1530 AD	.78	.81	.74	.81	.83	.85	.64	.80	.73	.93
1540 AD	1.02	.87	.92	.89	.90	.81	.90	.93	.98	.80
1550 AD	.86	1.15	1.19	1.32	1.13	1.21	1.41	1.16	1.10	1.28
1560 AD	1.19	1.63	1.60	1.10	.98	1.04	1.07	.98	1.14	1.06
1570 AD	1.05	1.05	1.22	1.32	1.11	1.11	.98	.89	.86	.65
1580 AD	.64	.76	.93	1.20	1.03	1.17	1.08	.96	.54	.87
1590 AD	.93	.79	.93	.90	.82	.69	.47	.60	.52	.60
1600 AD	.67	.48	.59	.74	.97	.94	.73	.72	.78	.69
1610 AD	.91	1.05	.71	1.12	1.13	1.07	.95	1.00	.91	1.13
1620 AD	1.08	1.30	1.13	1.16	1.16	1.21	1.02	1.33	.69	1.05
1630 AD	.63	.66	.52	.57	.65	.85	.74	.99	1.23	.75
1640 AD	1.26	1.25	1.36	1.45	1.04	1.13	1.33	.92	1.15	1.31
1650 AD	1.02	.95	.94	.92	.77	1.12	1.17	.83	.91	1.20
1660 AD	1.00	1.19	1.13	.97	1.19	1.06	1.32	1.17	.87	.97
1670 AD	.71	.91	.94	1.16	1.00	.40	.99	.59	.46	.79
1680 AD	.74	.96	.97	1.21	1.24	1.06	1.46	1.71	1.25	1.05
1690 AD	1.11	1.20	.94	.89	.92	.73	.59	.59	.59	.52
1700 AD	.66	.55	.57	.61	.76	.90	.92	.77	.80	1.04
1710 AD	1.25	1.14	1.22	1.04	.92	.77	.66	.33	.42	.52
1720 AD	.66	.57	.87	.85	.93	.93	1.17	1.15	1.20	1.36
1730 AD	1.51	1.20	1.11	1.31	1.21	1.20	1.41	1.19	1.36	1.36
1740 AD	1.16	.65	1.23	.64	.68	.70	.86	.70	1.01	1.02
1750 AD	.81	.91	.86	.93	1.02	1.02	.93	1.10	.69	.92
1760 AD	.90	.75	.60	.98	1.05	.66	.81	.95	.67	.82
1770 AD	.58	.70	.66	.71	.72	.80	.83	.71	1.03	.62
1780 AD	.99	1.14	.93	1.14	1.47	1.06	1.10	1.54	1.39	1.19
1790 AD	1.08	1.27	.92	1.05	1.32	.86	1.31	1.46	1.60	1.26
1800 AD	1.31	1.00	1.41	1.10	.88	.85	.80	1.28	1.12	.69
1810 AD	.68	.96	1.01	.51	.56	.30	.37	.47	.34	.44
1820 AD	.45	.33	.68	1.00	.89	1.00	.96	1.01	.99	1.05
1830 AD	.91	.82	.77	.91	1.15	1.28	.58	.77	.68	1.04
1840 AD	1.13	1.12	1.30	.59	1.05	.99	1.00	1.25	1.01	.92
1850 AD	.86	.71	.79	.81	.64	.65	1.07	1.13	.81	1.07
1860 AD	.97	1.18	1.24	1.33	1.25	1.07	1.07	1.04	1.04	1.53
1870 AD	1.34	.97	.92	.92	1.40	1.44	1.01	1.00	.87	1.26
1880 AD	1.08	1.27	.87	1.10	1.10	1.08	.77	.81	.58	1.17
1890 AD	.74	.72	.89	.89	.95	.84	.77	.69	.65	.66
1900 AD	.81	.86	.92	1.09	1.31	1.11	.78	.96	1.17	1.02
1910 AD	.89	1.31	1.06	.51	.83	.80	.66	.91	.72	.63
1920 AD	.54	1.37	.93	1.16	1.20	1.02	.73	1.37	1.38	1.37
1930 AD	1.06	1.42	1.15	.83	.83	1.13	1.16	.79	1.32	1.00
1940 AD	.67	.75		.81	1.07	1.00	.94	1.28	1.56	.98
1950 AD	1.41	1.43	1.38	1.06	1.24	.99	.87	.84	1.24	1.03
1960 AD	.97	.93	1.01	.70	.80	.73	.79	.97	.94	1.23
1970 AD	1.31	1.27	1.01	.97	.82	.43	.88	.69	.70	.77
1980 AD	.69	.64	1.13	1.20	.99	1.07	1.04	1.09	1.13	

Tabelle 2: Die indizierten Breitenwerte der *Pinus cembra*-Spätholzreihe, 1356–1988

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1350 AD							1,04,	,90	,96	,76
1360 AD	1,28	1,03	,83	,83	,89	1,16	,95	1,17	1,13	1,14
1370 AD	,77	1,33	1,06	,84	,91	1,08	,86	,98	,99	1,00
1380 AD	,89	1,25	1,62	1,69	1,15	1,04	,80	1,17	1,30	1,18
1390 AD	1,19	1,01	,95	,96	1,02	1,22	,90	1,04	,91	1,31
1400 AD	1,25	,99	,93	1,13	1,00	1,01	1,42	1,02	1,06	,99
1410 AD	,85	1,25	,95	,82	1,23	,80	,96	,86	,59	,67
1420 AD	,84	,92	,97	,71	,96	,98	,87	,95	,78	,74
1430 AD	1,05	,76	1,23	1,63	1,48	1,21	1,43	1,12	1,20	1,01
1440 AD	1,17	,82	,97	1,05	1,06	1,35	,86	,98	,57	,87
1450 AD	,92	,66	,86	,88	,69	,99	,78	,89	1,08	,89
1460 AD	1,05	1,02	1,15	,86	,98	,73	,80	,80	,84	,72
1470 AD	,62	,68	,89	1,25	,66	,97	1,11	,78	1,20	1,46
1480 AD	,71	,75	,88	1,38	1,35	,86	,94	,90	1,28	,89
1490 AD	,98	,74	,92	1,03	,91	1,03	,86	,76	,93	1,39
1500 AD	1,18	,74	1,31	1,21	1,02	1,23	1,22	1,28	,78	1,23
1510 AD	1,08	1,15	1,26	,75	,93	,75	,97	,67	,89	,76
1520 AD	,90	1,10	1,10	,97	,80	,93	1,07	,67	,88	,67
1530 AD	1,17	1,02	,87	,89	,89	,95	1,33	,99	,64	,95
1540 AD	1,33	,89	,92	,82	1,06	1,02	,83	1,14	,70	1,20
1550 AD	,70	1,33	,95	1,03	,94	1,10	1,24	1,00	1,19	1,44
1560 AD	1,45	1,27	1,78	,89	1,08	1,47	1,19	1,17	1,11	,90
1570 AD	,92	1,21	1,21	1,00	1,07	,93	,90	,91	,84	,81
1580 AD	,63	,89	,74	1,12	,99	1,00	1,00	,67	,85	1,18
1590 AD	1,14	,67	,83	1,07	,83	,81	,80	,59	,71	,72
1600 AD	,82	,74	,60	,80	,96	,54	,54	,78	,79	,83
1610 AD	,85	,85	1,36	,97	,97	1,19	1,16	1,04	1,05	,75
1620 AD	1,31	1,00	,94	,99	1,11	1,41	1,06	,71	,77	,84
1630 AD	,61	,58	,56	,89	,75	,75	1,08	1,03	1,00	,90
1640 AD	1,20	1,00	,87	,68	,53	1,02	1,06	1,33	1,35	1,05
1650 AD	1,11	1,12	,95	,86	1,23	1,05	,72	1,25	1,53	1,35
1660 AD	1,71	1,14	1,05	1,35	1,48	1,15	1,32	,74	,94	,95
1670 AD	1,02	,82	1,04	1,38	1,00	,66	1,08	,73	,80	1,03
1680 AD	,98	1,06	,84	1,12	1,26	1,11	1,13	1,12	1,07	1,08
1690 AD	1,30	1,23	1,08	1,29	,73	,75	,64	,82	,59	,66
1700 AD	,76	,95	,82	,97	1,00	,53	1,60	,81	1,28	1,00
1710 AD	,89	,88	1,04	,92	,82	,69	,46	,64	,71	,77
1720 AD	,84	,83	1,05	1,33	1,03	,65	1,03	1,28	1,14	1,34
1730 AD	1,03	,89	1,26	,99	,92	,94	,89	,75	1,36	,88
1740 AD	1,20	1,11	,82	,99	,71	,77	,75	1,03	,86	,94
1750 AD	1,00	,79	,97	,95	1,31	,67	,87	1,21	1,15	,85
1760 AD	,85	,84	1,17	1,75	,90	,84	1,08	,65	,85	,72
1770 AD	,79	,89	,72	,76	1,42	,80	,97	1,35	,95	1,10
1780 AD	1,19	1,50	1,16	,94	1,07	,82	1,14	,87	,77	,90
1790 AD	,95	,95	,93	,95	,85	1,70	,93	1,25	1,22	1,15
1800 AD	1,49	1,27	1,58	,83	,95	,77	,87	1,29	,79	1,15
1810 AD	1,02	1,15	,75	,83	,55	,61	,50	,70	,63	,60
1820 AD	,88	,77	,93	1,08	,86	1,06	1,31	,93	1,30	,70
1830 AD	1,31	,84	1,16	,72	1,32	,83	,84	1,21	,78	,98
1840 AD	1,16	1,12	1,20	,82	,83	,64	1,22	,85	1,29	1,06
1850 AD	,84	,99	,77	,91	,86	1,06	1,49	1,05	1,01	1,14
1860 AD	1,17	1,53	1,29	1,27	,91	1,54	,83	1,44	1,28	,92
1870 AD	,94	,96	1,00	1,24	,94	1,66	1,19	1,13	,92	1,39
1880 AD	,78	1,21	,91	1,16	,98	1,17	,88	,92	1,10	1,14
1890 AD	,90	,69	1,01	1,01	1,01	,94	,50	,76	,97	,83
1900 AD	,61	1,02	,91	1,26	1,59	,99	1,26	1,64	1,12	1,02
1910 AD	,98	1,18	,54	,75	1,14	,84	,89	1,00	,68	1,42
1920 AD	1,00	,99	,93	1,01	,75	1,27	,70	1,34	1,18	1,25
1930 AD	1,03	1,08	1,67	,87	1,09	1,05	,89	1,12	1,04	,89
1940 AD	,93	,65	,88	1,54	1,11	1,23	1,19	1,75	1,65	1,46
1950 AD	1,22	1,18	1,40	1,52	1,00	,88	1,33	,82	1,47	,90
1960 AD	,90	1,04	1,07	,88	1,24	,92	,83	,87	,78	1,21
1970 AD	,98	1,25	,95	1,16	1,19	,81	,66	,64	,81	,93
1980 AD	,82	,91	1,03	1,07	,69	1,55	1,10	1,06	1,17	

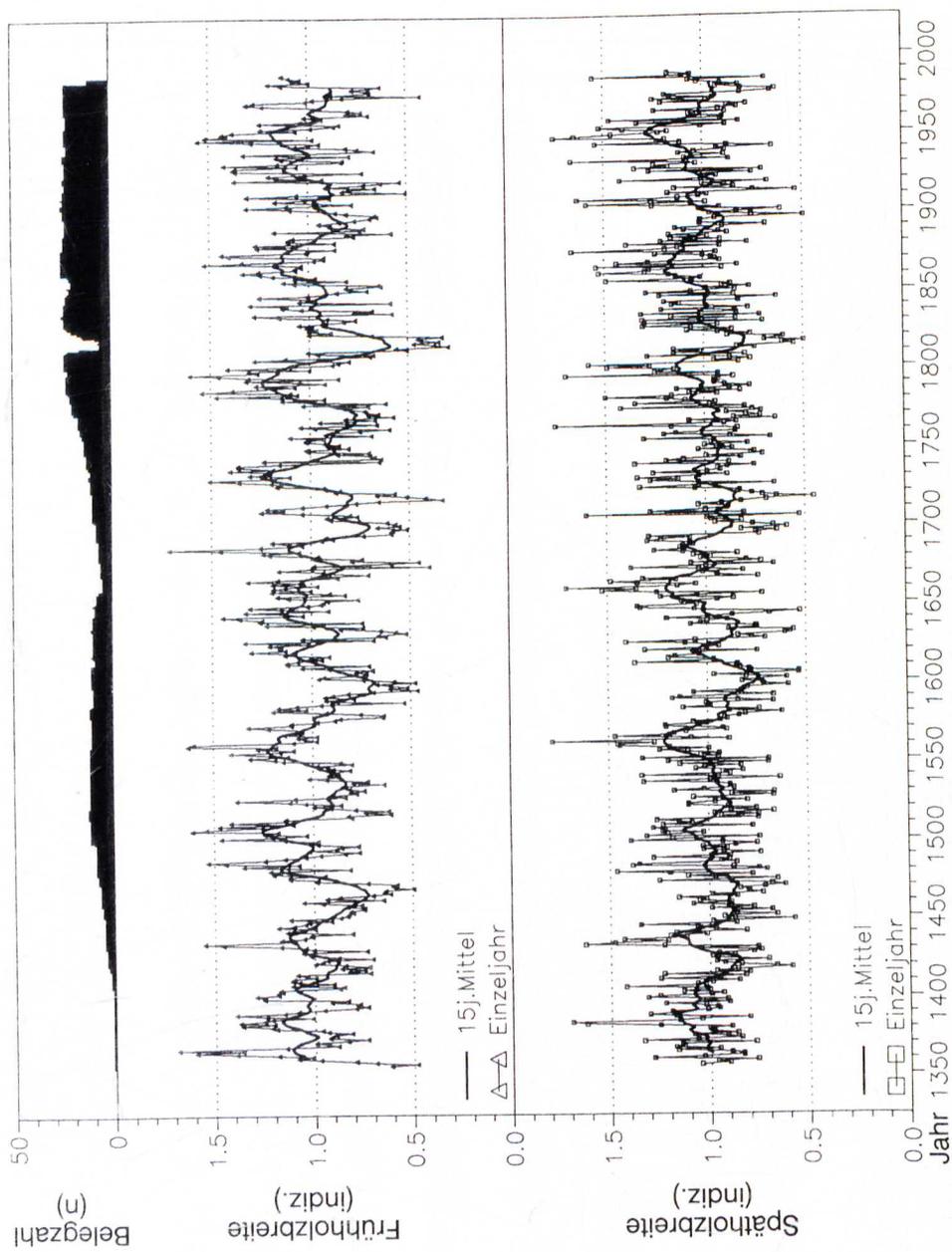


Fig. 2: Mittelkurven der indizierten Frühholz- und Spätholzbreite von *Pinus cembra*, 1356–1988

Das Ausmaß der Übereinstimmung der hier erarbeiteten Frühholz- und Spätholz-Breitenreihen mit anderen *Pinus cembra*-Reihen aus den Ostalpen zeigt Tabelle 3. Bei den Vergleichsreihen handelt es sich durchwegs um Jahrringbreitenserien. Während beim Vergleich Frühholz-Jahrring wegen der geringen Breitendifferenz zwischen diesen beiden Werten gute Übereinstimmungen zu erwarten sind, ist beim Vergleich Spätholz-Jahrring mit einer geringeren Kongruenz zu rechnen. Als Maß für die Übereinstimmung der verschiedenen Reihen dient die „Gleichläufigkeit“, die gerade in der Dendrochronologie ein wesentliches Vergleichsmaß für zwei Zeitreihen ist (Schweingruber 1983). Die Gleichläufigkeit gibt an, inwieweit Wertänderungen von einem Zeitpunkt zum nächsten bei beiden Zeitreihen gleichsinnig erfolgen. Das Ergebnis wird für einen Vergleichszeitraum in Prozent angegeben. Entsprechend nennt die Gegenläufigkeit den prozentuellen Betrag der gegensinnigen Änderungen. Zwei Jahrringreihen sollten möglichst hohe Gleichläufigkeitsbeträge aufweisen, um eine große Übereinstimmung zu belegen. Der Vergleich der Pc-Frühholz- bzw. Pc-Spätholzreihe mit der von Siebenlist-Kerner (1984) gleichfalls mit Proben aus dem Ötztal erstellten Jahrringreihe Zirbe-Ötztal zeigt für das Frühholz solch hohe Gleichläufigkeitswerte an. Deutlich geringer fällt das Ergebnis der Gleichläufigkeitsberechnung für die Gegenüberstellung mit der Spätholzreihe aus. Dieses liegt auf dem gleichen Niveau wie die Gleichläufigkeit zwischen der Pc-Frühholz- und der Pc-Spätholzreihe. Die Gleichläufigkeit mit anderen *Pinus cembra*-Serien aus dem Ostalpenraum, der Jahrringreihe vom Glungezer bei Innsbruck (Frenzel und Maisch 1981) bzw. der Reihe Fodara Vedla, Pragser Dolomiten, Südtirol (Hüsken 1994), nimmt mit zunehmender räumlicher Distanz deutlich ab. Zu einem diesbezüglich analogen Ergebnis gelangt Hüsken (1994: 135).

Tabelle 3: Vergleich der Gleichläufigkeit der Pc-Frühholz- und der Pc-Spätholzreihe mit *Pinus cembra*-Jahrringreihen aus den Ostalpen. Gl.: Gleichläufigkeit

	Pc-Frühholz		Pc-Spätholz	
	Gl.	n	Gl.	n
Pc-Frühholz	–	–	57 %	632
Zirbe-Ötztal	79 %	504	58 %	504
Glungezer	74 %	394	52 %	394
Fodara Vedla	67 %	514	54 %	514

3. ERGEBNISSE

3.1 DIE BEZIEHUNG DER FRÜHHOLZ- UND SPÄTHOLZBREITE VON *PINUS CEMBRA* ZU DEN GLETSCHERMASSESHAUSHALTSWERTEN

In Figur 3 ist die Serie der gemessenen und mit der TS-Methode rückgerechneten Massenbilanzen des Hintereisferners der Pc-Frühholz- bzw. Pc-Spätholzreihe gegenübergestellt. Um einen sinnvollen Vergleich zu ermöglichen, erfolgt die Darstellung mit standardisierten Werten, wobei 0 dem Mittelwert und die Einheit 1 einer Standardabweichung der jeweiligen Zeitreihe entspricht. Die Massenbilanzreihe wurde zur besseren Veranschaulichung um den Wert 0 gespiegelt; hohe Werte sind somit große Frühholz- und Spätholzbeträge bzw. deutlich negative Massenbilanzen. Figur 3 zeigt auch die auf der Basis der standardisierten Werte errechneten 5jährigen gleitenden Mittel.

Der generelle Trend aller drei Zeitreihen stimmt gut überein (Fig. 3). Auch die Vorzeichen der jährlichen Änderungen sind in hohem Maße gegenläufig (Tabelle 4). Dabei fallen

diese Gegenläufigkeitswerte für die Spätholzreihe beim Vergleich mit den unterschiedlichen Abschnitten der Massenbilanzreihe jeweils deutlich höher aus als die entsprechenden Werte für die Frühholzserie. Umgekehrt ist es meist bei den Korrelationskoeffizienten, die für die Beziehung zwischen Frühholz und Massenbilanz, ausgenommen die Vergleichsperiode 52/53–87/88, signifikanter ausfallen. Ergänzend zu den angeführten Korrelationskoeffizienten (Tabelle 4) sind in Tabelle 5 die Angaben für die entsprechenden Regressionsgleichungen zusammengestellt.

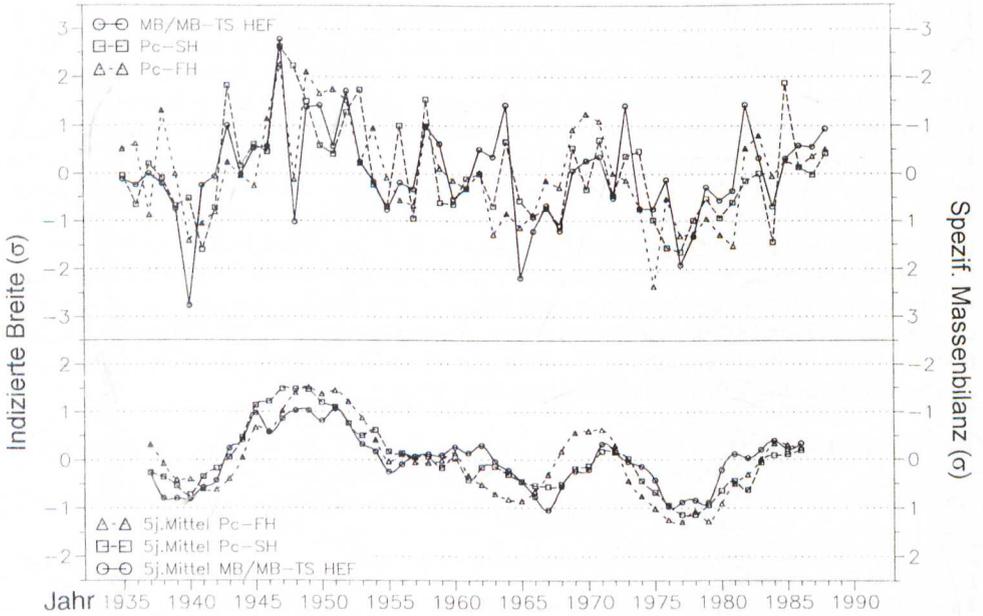


Fig. 3: Die Frühholz- und die Spätholzreihe von *Pinus cembra* sowie die Reihe der gemessenen (MB, 52/53–87/88) und mit der TS-Methode rückgerechneten spezifischen Massenbilanzen (MB-TS, 34/35–51/52) des Hintereisferners. Einzeljahre und 5jährige Mittel, in Standardabweichungen

Tabelle 4: Korrelations- und Gleichläufigkeits- bzw. Gegenläufigkeitswerte der Massenhaushaltsdaten des Hintereisferners und den Breitenwerten von *Pinus cembra*. FH/SH: 1:1-Mittel von indizierter Frühholz- und Spätholzbreite; FH: indizierte Frühholzbreite; SH: indizierte Spätholzbreite; r: Korrelationskoeffizient; P: Signifikanz des Korrelationskoeffizienten; Gl.: Gleichläufigkeits- (Höhe der GWL, Nettoablation) bzw. Gegenläufigkeitswert (spezif. Massenbilanz, Nettoakkumulation); MB: mit der direkten glaziologischen Methode bestimmte Massenbilanzwerte; MB-TS: mit der TS-Methode rückgerechnete Massenbilanzwerte

	Periode	FH			SH			FH/SH		
		r	P	Gl.	r	P	Gl.	r	P	Gl.
MB/MB-TS	34/35–87/88	–.65	<.001	70 %	–.60	<.001	77 %	–.70	<.001	83 %
MB	52/53–87/88	–.52	.001	75 %	–.58	<.001	82 %	–.64	<.001	83 %
MB-TS	34/35–51/52	–.75	<.001	61 %	–.59	.005	72 %	–.76	<.001	82 %
Nettoablation	52/53–87/88	.45	.003	64 %	.56	<.001	71 %	.59	<.001	74 %
Nettoakkumulation	52/53–87/88	–.55	<.001	72 %	–.55	<.001	79 %	–.64	<.001	83 %
Höhe GWL	52/53–87/88	.48	.001	67 %	.47	.002	74 %	.55	<.001	77 %

Tabelle 5: Regressionsgleichungen für die Beziehung der Breitenreihen von *Pinus cembra* zu den Massenhaushaltsdaten des Hintereisferners: FH/SH: 1:1-Mittel von indizierter Frühholz- und Spätholzbreite; FH: indizierte Frühholzbreite; SH: indizierte Spätholzbreite; r: Korrelationskoeffizient; P: Signifikanz des Korrelationskoeffizienten; Gl.: Gleichläufigkeits- (Höhe der GWL, Nettoablation) bzw. Gegenläufigkeitswert (spezif. Massenbilanz, Nettoakkumulation); ; MB: mit der direkten glaziologischen Methode bestimmte Massenbilanzwerte, mm w.e.; MB-TS: mit der TS-Methode rückgerechnete Massenbilanzwerte, mm w.e.; Nettoablation, Nettoakkumulation: $10^3 \text{ m}^3 \text{ w.e.}$; Höhe GWL: m.ü.M.

	Periode	FH		SH		FH/SH	
		b	konst.	b	konst.	b	konst.
MB/MB-TS	34/35–87/88	-1590	1214	-1376	1080	-1886	1568
MB	52/53–87/88	-1319	940	-1316	1019	-1771	1425
MB-TS	34/35–51/52	-1979	1683	-1454	1172	-2193	1982
Nettoablation	52/53–87/88	5873	675	6535	-356	8389	-1973
Nettoakkumulation	52/53–87/88	-6320	9329	-5751	9144	-8076	11246
Höhe GWL	52/53–87/88	267	2731	235	2747	335	2655

Eine deutliche und durchgehende Verbesserung der Ergebnisse ergibt sich, wenn die indizierten Frühholz- und Spätholzreihen zu einer Mittelkurve vereint werden und diese als Basis für den Vergleich mit der Massenbilanzreihe des Hintereisferners dient. Dabei gehen Frühholz und Spätholz im Verhältnis 1:1 in diese FH/SH-Mittelkurve ein. Erklärbar ist die Beziehungsverbesserung durch diese Mittelbildung dadurch, daß das Frühholz im ersten Teil, das Spätholz aber im zweiten Teil der Vegetationsperiode gebildet wird.

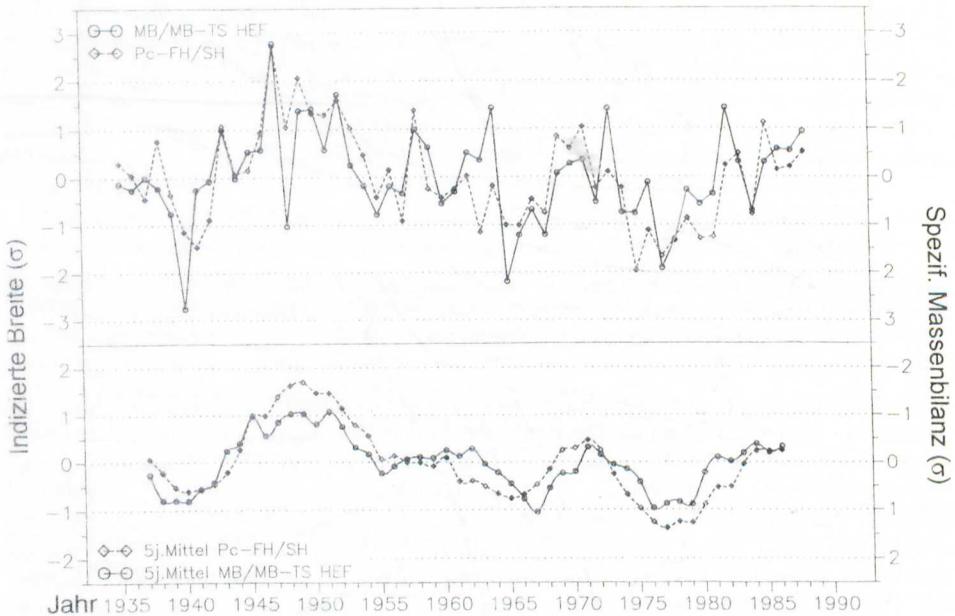


Fig. 4: Die Reihe des 1:1-Frühholz/Spätholz-Mittels von *Pinus cembra* und die Reihe der gemessenen (MB, 52/53–87/88) und mit der TS-Methode rückgerechneten spezifischen Massenbilanzen (MB-TS, 34/35–51/52) des Hintereisferners, Einzeljahre und 5jährige Mittel, in Standardabweichungen

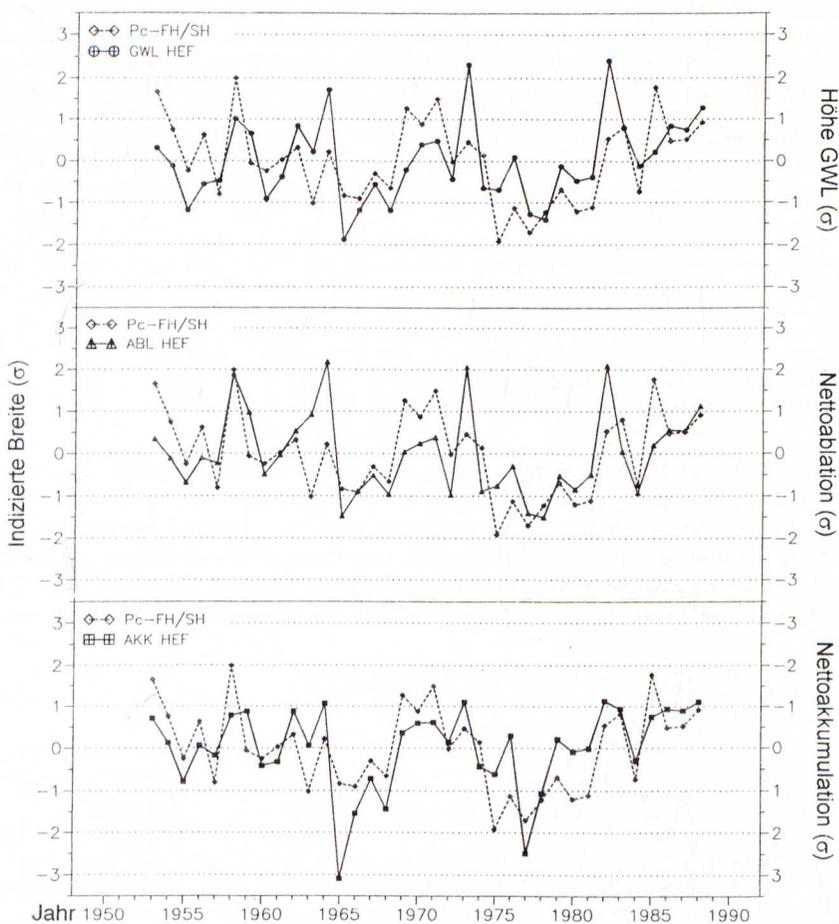


Fig. 5: Die Reihe des 1:1-Frühholz/Spätholz-Mittels von *Pinus cembra* und die Reihen der Höhe der Gleichgewichtslinie, der Nettoablation und der Nettoakkumulation des Hintereisferners, in Standardabweichungen

Somit kann durch ein Zusammenfügen der indizierten Frühholz- und Spätholzreihen das klimatische Signal der Vegetationsperiode, die in den Hochlagen etwa von Mai bis September reicht (Müller 1980, Havranek 1981) und somit gut mit der Ablationsperiode zusammenfällt, besser erfaßt werden. Der Gegenläufigkeitswert zwischen der 1:1-Frühholz/Spätholz-Mittelreihe und der Massenbilanzreihe liegt nun für alle Vergleichsperioden bei über 80 % (Tab. 4). Diese sehr gute Übereinstimmung in den jährlichen Änderungen zeigt auch Figur 4 deutlich. Dort ersichtliche Differenzen bei der an sich hohen Gegenläufigkeit sind hauptsächlich auf eine gewisse Trägheit des biologischen Systems Baum gegenüber Trendänderungen, was sich auch in der Frühholz/Spätholz-Mittelkurve niederschlägt, zurückzuführen. Dies trifft auf die Jahre um 1940 und um 1983 zu. Hier hinkt die Änderung der *Pinus cembra*-Breitenreihe der Massenbilanzserie nach. Weiters treten scheinbar

eher zufällige Differenzen in der Gegenläufigkeit bei nur geringen Schwankungen der Massenbilanzwerte, wie sie etwa um 1970 und 1986 zu beobachten sind, auf. Die 5jährigen Mittel der Zeitreihen zeigen gleichfalls einen stark ähnlichen Verlauf (Fig 4). Auch die Korrelationskoeffizienten liegen für die 1:1-Frühholz/Spätholz-Mittelreihe höher als für die einzelne Pc-Frühholz- bzw. Pc-Späthholzreihe (Tab. 4). Für die 5jährig gemittelten Serien von Massenbilanz und Frühholz/Spätholz beträgt der Korrelationskoeffizient $r = -0,86$.

Zum Vergleich mit den Breitenreihen von *Pinus cembra* können außer der Massenbilanzserie auch andere wesentliche Massenhaushaltskennzahlen, wie Nettoablation, Nettoakkumulation und Höhe der Gleichgewichtslinie, herangezogen werden. Entsprechende Angaben liegen allerdings nur für die Periode 1952/53–1987/88 vor (Kuhn et al. 1985a, freundl. persönl. Mitt. G. Markl). Bei diesen Zeitreihen liegen die Gleichläufigkeits- bzw. Gegenläufigkeitswerte durchgehend für das Spätholz höher als für das Frühholz (Tab. 4). Bei den Korrelationswerten bezüglich der Nettoablation weist das Spätholz auch ein besseres Ergebnis auf als das Frühholz. Dies steht im Gegensatz zu den Serien der Höhe der Gleichgewichtslinie und der Nettoakkumulation, hier liefern Frühholz- und Spätholzreihe praktisch das gleiche Resultat.

Die Beziehung der Frühholz/Spätholz-Mittelreihe zu den Serien der Nettoakkumulation, der Nettoablation und der Höhe der Gleichgewichtslinie ist – analog zur Massenbilanzserie – jeweils besser als jene der einzelnen Frühholz- bzw. Spätholzreihe (Tab. 4). Da die Frühholzbreite praktisch dem gesamten Jahrring entspricht, gilt dies auch für entsprechende Vergleiche zwischen Massenhaushaltswerten und Jahrringreihen. Bezüglich Korrelation und Gegenläufigkeit erreicht die Reihe der Nettoakkumulation das Niveau der Massenbilanzserie. Die Relation des Frühholz/Spätholz-Mittels zu den Ablationsbeträgen fällt vergleichsweise ungünstiger aus. Dies überrascht insofern, als anzunehmen wäre, daß die hauptsächlich von der Sommerwitterung beeinflussten Ablationswerte gut mit den gleichfalls im Sommer gebildeten Frühholz- bzw. Spätholzbreiten übereinstimmen. Möglicherweise wird dieses Ergebnis durch eine größere Zahl von Jahren mit extrem hohen Ablationsbeträgen gegenüber Jahren mit starker Akkumulation mitbestimmt (Fig. 5).

Von allen Kennzahlen der Massenbilanz weist die mittlere spezifische Bilanz die beste statistische Beziehung mit den *Pinus cembra*-Reihen auf. Die Übereinstimmung zwischen Massenbilanz und Mittel von indizierter Frühholz- und Spätholzbreite läßt sich noch verbessern. Gleichung 2 weist das aufgrund einer Regressionsanalyse optimierte Verhältnis bei der Frühholz/Spätholz-Mittelbildung aus. Gleichung 3 gibt die entsprechende Regressionsgleichung für die Beziehung zur Reihe der gemessenen und mittels TS-Methode rückgerechneten Massenbilanzwerte 1934/35 bis 1987/88 wieder.

$$FH/SH_{opt} = FH + 0,76 \cdot SH \quad (2)$$

$$MB_{FH/SH} = -1110 \cdot FH - 791 \cdot SH + 1573 \quad (3)$$

Die Verringerung des Gewichts der Spätholzreihe hat aber kaum Auswirkungen. Der Korrelationskoeffizient der Periode 34/35–87/88 bleibt bei $-0,70$, jener von 34/35–51/52 steigt leicht auf $-0,77$, jener der Phase 52/53–87/88 sinkt geringfügig auf $-0,63$. Diese ungleich gewichtete Pc-Frühholz/Spätholz-Mittelreihe bildet die Grundlage für das Regressionsdiagramm in Figur 6. Diese Grafik zeigt deutlich eine Hauptursache für die Differenzen zwischen Breitenreihen und Massenhaushaltsreihen auf. Massenbilanzresultate, die mehr als eine Standardabweichung vom Mittel – das Mittel der Massenbilanzreihe 34/35–87/88 beträgt -387 mm w. e., die Standardabweichung 599 mm w. e. – abweichen, werden

vom jeweiligen Pc-Frühholz/Spätholz-Mittel meist deutlich unterschätzt. Dies gilt besonders für die extrem positiven Massenbilanzwerte.

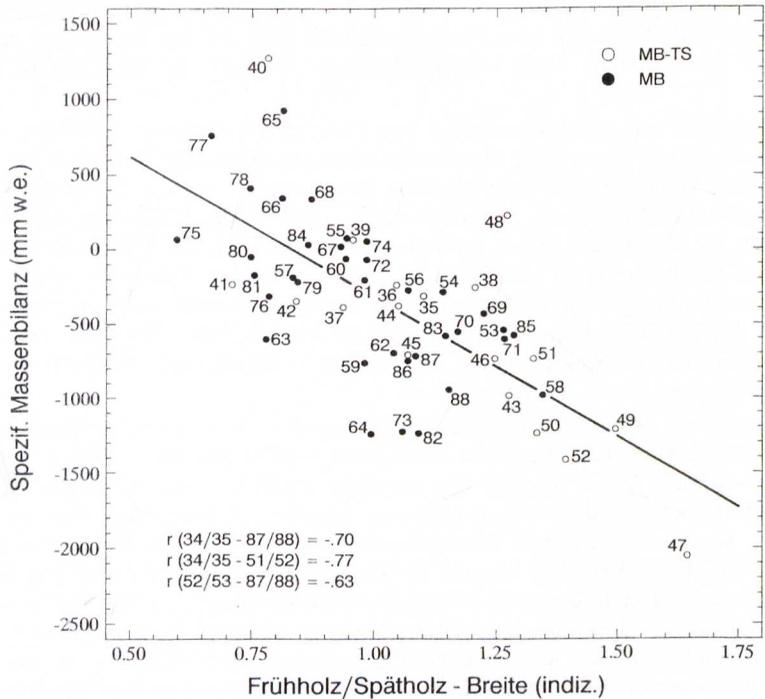


Fig. 6: Regressionsdiagramm des gewichteten Frühholz/Spätholz-Mittels von *Pinus cembra* (Gleichung 2) und die Reihe der gemessenen (MB, 52/53–87/88) und mit der TS-Methode rückgerechneten spezifischen Massenbilanzen (MB-TS, 34/35–51/52) des Hintereisferners

Eine deutliche Steigerung der Korrelation zwischen den *Pinus cembra*-Breitenreihen und der Massenbilanzserie des Hintereisferners ist durch die Einbeziehung des in den Jahren vor bzw. nach dem aktuellen Jahr gebildeten Früh- und Spätholzes möglich. Das Breitenwachstum der Bäume wird nicht nur von der aktuellen ökologischen Situation geprägt, auch früher gebildete Reservestoffe wirken sich aus, und gute Wachstumsbedingungen wirken in den Folgejahren nach (Eckstein und Aniol 1981). Teilweise wird dieses Nachwirken von Wachstumsbedingungen beim Reihenvergleich (Fig. 4) deutlich: den Trend zu negativen Massenbilanzen nach 1940 und nach 1980 zeichnet die Frühholz/Spätholzreihe nur verzögert nach, gleiches gilt für die umgekehrte Entwicklung in der Periode nach 1952.

Durch Einbezug der Breitenwerte des vorhergehenden bzw. folgenden Jahres steigt der Korrelationskoeffizient auf $r = -0.76$ für die gesamte Vergleichsperiode 34/35–86/87, auf $r = -0.70$ für die gemessene Massenbilanzserie 52/53–86/87, und auf $r = -0.85$ für die mit der TS-Methode rückgerechnete Massenbilanzreihe 34/35–51/52. Eine Einbeziehung von Frühholz- und Spätholzwerten, die mehr als ein Jahr vor bzw. nach dem aktuellen Jahr gebildet wurden, führt nur noch zu einer leichten Steigerung der Beziehung bei allerdings sinkender Signifikanz des Ergebnisses. Wegen des letztgenannten Punktes wurden für die

dendroklimatologische Rekonstruktion der Massenbilanzreihe des Hintereisferners nur die Frühholz- und Spätholzweite des jeweils aktuellen, des vorangegangenen und des nachfolgenden Jahres der Periode 1934–1988 herangezogen. Gleichung 4 gibt die entsprechende, mittels Regressionsanalyse bestimmte Formel wieder.

$$MB_{\text{tek}} = 744 \cdot FH_{-1} - 89 \cdot SH_{-1} - 1280 \cdot FH_0 - 906 \cdot SH_0 + 376 \cdot FH_{+1} - 605 \cdot SH_{+1} + 1492 \quad (4)$$

Der Frühholzwert des aktuellen Jahres geht mit dem größten Gewicht in die Gleichung ein, gefolgt vom Spätholzwert des gleichen Jahres. Die Extremwerte der Massenbilanzserie werden von den rekonstruierten Bilanzbeträgen (Gleichung 4) trotz einer Verbesserung gegenüber den Resultaten, die auf der Basis des optimierten Pc-Frühholz/Spätholz-Mittels (Gleichung 3) errechnet wurden, weiter deutlich unterschätzt (Tab. 6). Dies gilt wiederum insbesondere für die extrem positiven Bilanzwerte. Entsprechend verdeutlichen die Standardabweichungen die im Gegensatz zur Massenbilanzreihe des Hintereisferners geringere Variabilität der mit Gleichung 4 errechneten Bilanzwerte. Deutlich verbessert sind die letztgenannten Beträge gegenüber den Ergebnissen nach Gleichung 3 vor allem bezüglich den extrem negativen Massenbilanzen (Tab. 6).

Tabelle 6: Vergleich von statistischen Kennzahlen der Massenbilanzreihe des Hintereisferners (MB/MB-TS) mit jenen der dendroklimatologischen Rekonstruktionen (Gleichung 3, Gleichung 4)

	Periode	Mittel	σ	Min.	Max.	n
MB/MB-TS	34/35–87/88	– 387	599	– 2056	1269	54
MB	52/53–87/88	– 312	521	– 1244	925	36
MB-TS	34/35–51/52	– 538	725	– 2056	1269	18
Gleichung 3	34/35–87/88	– 387	423	– 1538	455	54
Residuen	34/35–87/88	–	425	– 947	1168	54
Gleichung 4	52/53–87/87	– 377	456	– 1865	647	53
Residuen	52/53–87/87	–	390	– 745	914	53

In Figur 7 wird die Reihe der gemessenen und mit der TS-Methode rückgerechneten Massenbilanzen des Hintereisferners der Serie der nach Gleichung 4 rekonstruierten Bilanzwerte gegenübergestellt. Daneben sind auch die Differenzen dieser Reihen sowie die Massenbilanzdifferenz zweier aufeinander folgender Jahre – als Maß für relativ stabile bzw. instabile Klimaverhältnisse – dargestellt. Die Massenbilanzserien weisen insgesamt einen ähnlichen Verlauf auf. Größere Differenzen und damit größere Fehler der dendroklimatologisch rekonstruierten Massenbilanzen (Gleichung 4) treten in den Jahren um 1940, um 1948, um 1975 und vor allem um 1965 auf. Die Serie der Massenbilanzdifferenz zweier aufeinander folgender Jahre (Fig. 7) gibt einen Hinweis auf die Ursachen. Es läßt sich eine Parallelität der Jahresabschnitte mit den größten Fehlern der rekonstruierten Massenbilanzreihe (Gleichung 4) und starken Sprüngen in der Massenbilanzreihe des Hintereisferners erkennen. Daneben treten größere Fehler hauptsächlich noch bei der Rekonstruktion extremer Massenhaushaltsjahre, wie etwa 1963/64, auf. Der durchschnittliche Fehler der dendroklimatologisch rekonstruierten Massenbilanzen beträgt mit 390 mm w. e. ca. zwei Drittel der Standardabweichung der Massenbilanzserie des Hintereisferners (Tab. 6). Die Bildung mehrjähriger Mittel reduziert die Fehler zwischen Massenbilanzreihe und Bilanzreihe nach Gleichung 4. Der Korrelationskoeffizient liegt bei Verwendung von 5jährigen Mitteln bei $r = - ,89$.

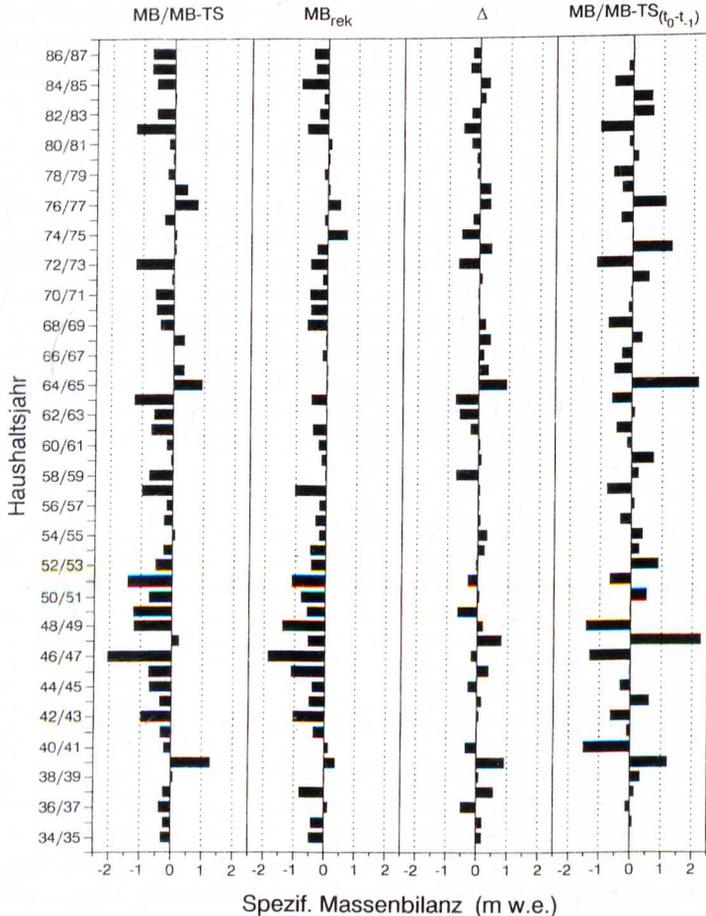


Fig. 7: Serien der gemessenen (MB) und mit der TS-Methode rückgerechneten spezifischen Massenbilanzen (MB-TS) des Hintereisferners, der dendroklimatologisch rekonstruierten Massenbilanzen nach Gleichung 4 (MB_{rek}), der Differenz zwischen $MB/MB-TS$ und MB_{rek} (Δ) und der Massenbilanzdifferenz zweier aufeinanderfolgender Jahre ($MB/MB-TS_{(t_0-t_1)}$)

Insgesamt erscheint *Pinus cembra* für eine Massenbilanzrekonstruktion am geeignetsten unter den am weitesten verbreiteten alpinen Nadelhölzern. Diese Einschätzung legen zumindest vergleichende Korrelations- und Gegenläufigkeitsberechnungen verschiedener Jahringreihen aus dem Bereich der Ötztaler Alpen mit der Massenbilanzreihe des Hintereisferners nahe (Tab. 7). Einbezogen wurden in den Vergleich die von Siebenlist-Kerner (1984) erarbeiteten *Picea abies*- und *Larix decidua*-Reihen aus dem Ötztal, sowie eine *Pinus sylvestris*-Serie aus dem am Westrand der Ötztaler Alpen gelegenen Reschenpaß-Gebiet. Da die *Picea abies*- und *Larix decidua*-Reihen 1974 enden, mußte der Vergleichszeitraum entsprechend eingengt werden. Für die *Larix decidua*-, *Picea abies*- und *Pinus sylvestris*-Reihen liegen jeweils Jahringbreitenwerte vor. Analog zur starken Abhängigkeit des Jahringwachstums von der Mai- bzw. Junimitteltemperatur (vgl. Hüsken 1994)

erscheint *Larix decidua* vergleichsweise für Massenbilanzrekonstruktionen wenig geeignet. Ähnliches gilt für die *Pinus sylvestris*-Reihe. Den nach den *Pinus cembra*-Serien höchsten Korrelationskoeffizienten weist *Picea abies* auf, der Prozentsatz der Gegenläufigkeit liegt jedoch auf relativ niederem Niveau. Den höchsten Korrelationskoeffizienten und auch besten Gegenläufigkeitswert erreicht das 1:1-Mittel der indizierten Frühholz- und Spätholzreihe von *Pinus cembra*. Zumindest bei dieser Baumart ist es somit sinnvoll, bei einer Gegenüberstellung von Jahrringwerten und Massenhaushaltsdaten jeweils Frühholz- und Spätholzbreiten in die Untersuchung mit einzubeziehen. Bei den übrigen alpinen Nadelholzarten fehlt noch eine entsprechende Untersuchung.

Tabelle 7: Korrelationskoeffizienten und Gegenläufigkeitswerte der Massenbilanzreihe des Hintereisferners der Haushaltsjahre 1934/35–1973/74 mit Jahrring-, Frühholz- und Spätholzreihen aus den Ötztaler Alpen. MB/MB-TS: Massenbilanzreihe des Hintereisferners; Pc-FH: *Pinus cembra* Frühholz; Pc-SH: *Pinus cembra* Spätholz; Pc-JR: *Pinus cembra* Jahrring; Pc-FH/SH: *Pinus cembra* 1:1-Mittel-Frühholz/Spätholz; Fichte Ötztal: *Picea abies* Jahrring; Lärche Ötztal: *Larix decidua* Jahrring; Föhre Reschen: *Pinus sylvestris* Jahrring; r: Korrelationskoeffizient, Gl.: Gegenläufigkeit

	r	n	MB/MB-TS Hintereisferner	
			Gl.	n
Pc-FH	–,62	40	67 %	39
Pc-SH	–,59	40	74 %	39
Pc-JR	–,64	40	67 %	39
Pc-FH/SH	–,69	40	82 %	39
Fichte Ötztal	–,53	40	66 %	39
Lärche Ötztal	–,37	40	66 %	39
Föhre Reschen	–,24	40	70 %	39

3.2 DIE BEZIEHUNG DER FRÜHHOLZ- UND SPÄTHOLZBREITE VON *PINUS CEMBRA* ZU EINZELNEN KLIMAELEMENTEN

Die das Massenbilanzergebnis bestimmenden klimatischen Faktoren sind gut bekannt. Neben der Winterniederschlagssumme sind dies die Sommertemperatur und die Häufigkeit sommerlicher Schneefälle während eines Haushaltsjahres (Hoinkes 1971, Fliri 1964). Auch das Jahrringwachstum von Bäumen an der Waldgrenze gilt als stark von den sommerlichen Temperaturverhältnissen abhängig (Becker 1991). Die Abhängigkeit vom großräumig ausgebildeten Temperaturfeld erklärt die hohen Ähnlichkeiten, die sich im Alpenraum für Jahrringreihen von Hochlagenstandorten (Siebenlist-Kerner 1984, Hüsken 1994) nachweisen lassen. Kaltlufteinbrüche während der Vegetationsperiode, im Hochgebirge oftmals mit Neuschneefällen verbunden, führen zu Unterbrechungen und Störungen im Jahrringwachstum (Müller 1980, Loris 1981).

Grundsätzlich ist somit ein ähnliches allgemeines Muster an steuernden klimatischen Bedingungen sowohl bei Jahrringen von Hochlagenbäumen als auch beim Gletschermassenhaushalt anzunehmen. Im folgenden soll der Frage nachgegangen werden, inwieweit sich die gefundene statistische Beziehung zwischen den Frühholz- und Spätholzerien von *Pinus cembra* von Waldgrenzstandorten aus den zentralen Ötztaler Alpen und der Massenbilanzreihe des Hintereisferners durch einen Vergleich der Breitenreihen mit einzelnen Klimaelementen nachvollziehen und erklären läßt.

Dazu werden die Reihen der Monatsmittel der Temperatur bzw. der Monatssummen des Niederschlags der Station Vent verwendet. Aus Gründen der Vergleichbarkeit mit der

Serie der gemessenen und mit der TS-Methode rückgerechneten Massenbilanzen des Hinterschneefens wurde der Zeitraum 1935–1988 herangezogen. An Jahringwerten wurden Frühholz, Spätholz und das 1:1-Mittel dieser beiden Breitenwerte in die Untersuchung einbezogen. Aufgrund der geringen Differenz zwischen Frühholz- und gesamter Jahringbreite können die das Frühholz betreffenden Ergebnisse entsprechend auf den Jahring übertragen werden.

Zum einen wurde jeweils die Korrelation zwischen Breitenwert und Monatswert für Temperatur und Niederschlag bestimmt. Bei den Monatswerten wurde dabei der Zeitraum vom Mai des vorangegangenen Jahres bis zum Oktober des aktuellen Jahres berücksichtigt. Zusätzlich wurden auch die Frühholz- und die Spätholzweite bzw. das Frühholz/Spätholz-Mittel der beiden vorangegangenen Jahre – beim Spätholz auch der Frühholzwert des aktuellen Jahres – in die Untersuchung miteinbezogen. Zum anderen wurde mit einer Regressionsanalyse die partielle Korrelation von Breitenwert und einzelner Klimawert unter Einbezug der anderen Temperatur- und Niederschlagsdaten sowie der Breitenwerte des aktuellen und der beiden vorangegangenen Jahre berechnet. Die gleichen Berechnungen wurden auch für Saisonmittelwerte von Temperatur und Niederschlag durchgeführt. Dabei wurden für den Sommer in Anlehnung an die Vegetationsperiode die Monate Mai bis September, für den Winter die Monate Oktober bis April verwendet. Die Ergebnisse sind in den Figuren 8 bis 10 dargestellt.

Die Frühholzbreite von *Pinus cembra* weist eine positive Beziehung zu den Sommertemperaturen des aktuellen bzw. des vorangegangenen Jahres auf (Fig. 8). Insgesamt erscheint aber der Einfluß des Klimas während der eigentlichen Vegetationsperiode auf die Entwicklung der Frühholzbreite als gering. Da die klimatischen Verhältnisse der Monate ab September auf die Frühholzentwicklung wohl kaum mehr einen Einfluß haben (Loris 1981), zeigen die Korrelationswerte für September und Oktober demnach den zufälligen Bereich der Korrelation auf. Die Ergebnisse der Regressionsanalyse fallen für den Niederschlag im Winterhalb-

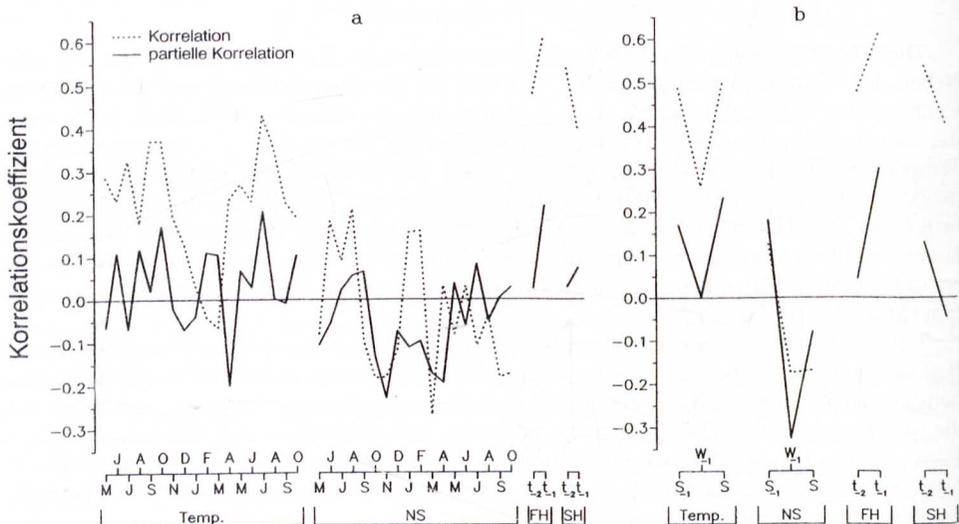


Fig. 8: Korrelationen und partielle Korrelationen der Reihe Pc-Frühholz mit Klimadaten der Station Vent:
a: Monatswerte, b: Saisonmittel

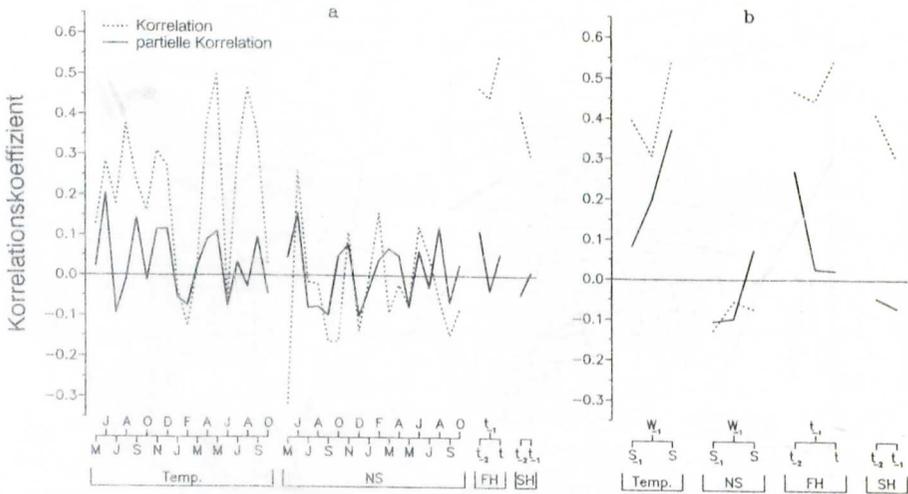


Fig. 9: Korrelationen und partielle Korrelationen der Reihe Pc-Spättholz mit Klimadaten der Station Vent; a: Monatswerte, b: Saisonmittel

jahr durchgehend negativ aus. Dieser das Frühholzwachstum bremsende Einfluß wird besonders deutlich bei der Untersuchung bezüglich der Saisonwerte. Positive Relationen weist die Frühholzbreite hingegen zu den Sommer-Temperaturmitteln und zur Frühholzbreite des vorangegangenen Jahres auf. Die Korrelationswerte liegen allerdings alle auf niedrigem Niveau. Insgesamt weist die Frühholzbreite, und damit auch die Jahrringbreite, keine herausragende Beziehung mit einem einzelnen Monats- oder Saisonwert auf. Entsprechend stellt Hüsken (1994: 91–102) bei seiner nur auf Monatswerten von Temperatur und Niederschlag beruhenden Analyse der Wachstumsabhängigkeit der *Pinus cembra*-Jahrringbreite auch keine herausragenden Werte fest. Dieses Fehlen eines das Jahrringwachstum von *Pinus cembra* eindeutig steuernden Klimafaktors vermerken auch andere Autoren (Renner 1982, Grabherr 1980, Frenzel und Maisch 1981, Hüsken 1994).

Die Spättholzbreite weist positive Korrelationen zu den Monatsmitteln der Temperatur in den Sommerhalbjahren sowie im Herbst des jeweils vorangegangenen Jahres auf (Fig. 9). Die Ergebnisse der Regressionsanalyse zur Berechnung der partiellen Korrelation liegen auf einem deutlich niedrigeren Niveau als jene der Korrelationsberechnungen. Praktisch bedeutungslos scheint der Niederschlag für die Spättholzbreite zu sein. Dies gilt auch für die Untersuchung der Saisonmittel. Besonders deutlich wird hier die Wichtigkeit der Sommermitteltemperatur des aktuellen Jahres für das Spättholzwachstum.

Die Ergebnisse für das Frühholz/Spättholz-Mittel stellen auch eine Kombination der Untersuchungsergebnisse für die beiden einzelnen Breitenelemente dar (Fig. 10). Es ergeben sich wiederum positive Beziehungen zu den in den Vergleich einbezogenen Sommer-Temperaturmitteln, speziell zum Sommer des aktuellen Jahres, und negative Beziehungen zu den Niederschlagssummen, hier wiederum speziell zum Winterhalbjahr. Die Relationen des Frühholz/Spättholz-Mittels zu den Breitenwerten der beiden vorangegangenen Jahre sind ebenfalls positiv.

Die Gegenüberstellung von *Pinus cembra*-Reihen und einzelnen Klimaparametern vermag die Ähnlichkeit der Breitenreihen zur Massenbilanzserie des Hintereisferners gut zu er-

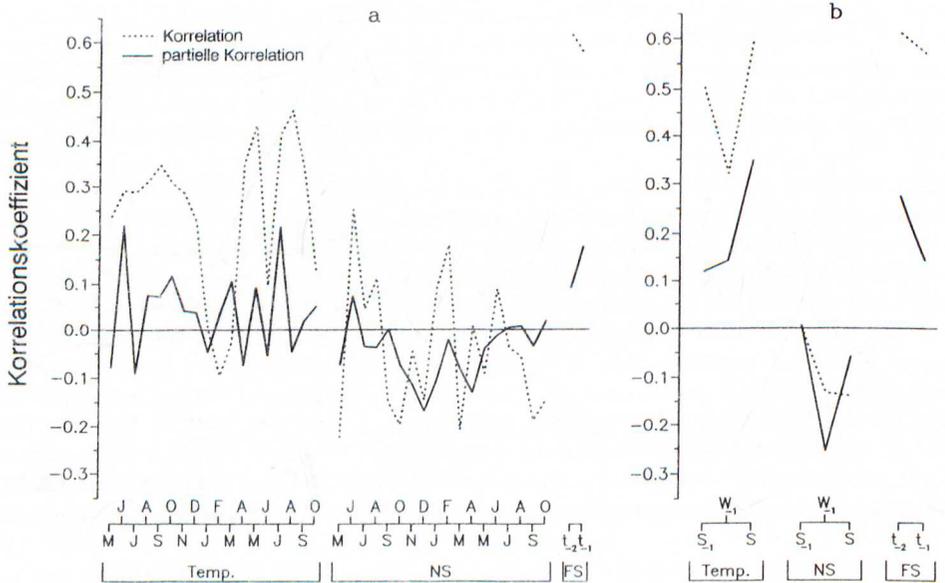


Fig. 10: Korrelationen und partielle Korrelationen der Reihe des 1:1-Frühholz/Spätholz-Mittels von *Pinus cembra* mit Klimadaten der Station Vent; a: Monatswerte, b: Saisonmittel

klären. Sommertemperatur und Winterniederschlag sind auch für die *Pinus cembra*-Reihen die dominanten klimatischen Faktoren. Es läßt sich für *Pinus cembra* kein zeitlich eng begrenzter Klimaparameter als wachstumsdominierender Faktor feststellen. Bemerkenswert ist, daß die Korrelation zur Massenbilanzserie (Tab. 4) besser ist als zu jedem Monats- bzw. Saisonmittel der zum Vergleich herangezogenen Klimaparameter.

3.3 REKONSTRUKTION DER MASSENBILANZREIHE BIS ZUM JAHR 1400

Massenbilanzdaten eines Gletschers sind in einem gewissen Sinn relative Angaben, da sie sich auf eine bestimmte Gletscherausdehnung bzw. -geometrie beziehen. Gleiche klimatische Bedingungen führen bei einer veränderten Gletschergröße und -form zu differierenden Ergebnissen. Prinzipiell stellt sich daher die Frage, inwieweit Berechnungen, die „heute“ bei einem relativ kleinen Gletscherstand durchgeführt werden, überhaupt auf Zeiten mit erheblich größeren Gletscherausdehnungen übertragbar sind.

Figur 11 stellt die Gletscherflächen des Hintereisferners je 100-m-Höhenstufe „heute“ (Stand 1969) jenen von „1850“ sowohl absolut als auch in Prozent der Gletschergesamtfläche gegenüber. Die Fläche des Hintereisferners betrug „1850“ 15.112 km², im Jahr 1969 war die Fläche mit 9.467 km² um 37 % geringer (Österr. Gletscherinventar). Bezieht man die nach „1850“ vom Hintereisferner abgetrennten Gletscher mit ein, so beträgt der Flächenrückgang noch immer 28 %. Dies ist für einen Gletscher dieser Größenordnung ein relativ hoher Wert (Groß 1987, Maisch 1992). Gering differiert hingegen zwischen „1850“ und „heute“ die prozentuelle Verteilung der Gletscherflächen je Höhenstufen. Auch das Gletscherende hat sich nur um eine Höhenstufe und damit relativ geringfügig nach oben verlegt. Für eine Rückrechnung der Massenbilanzreihe eignet sich der Hintereisferner aufgrund seiner zwischen Hochstandszeiten und Perioden kleinen Standes nicht besonders

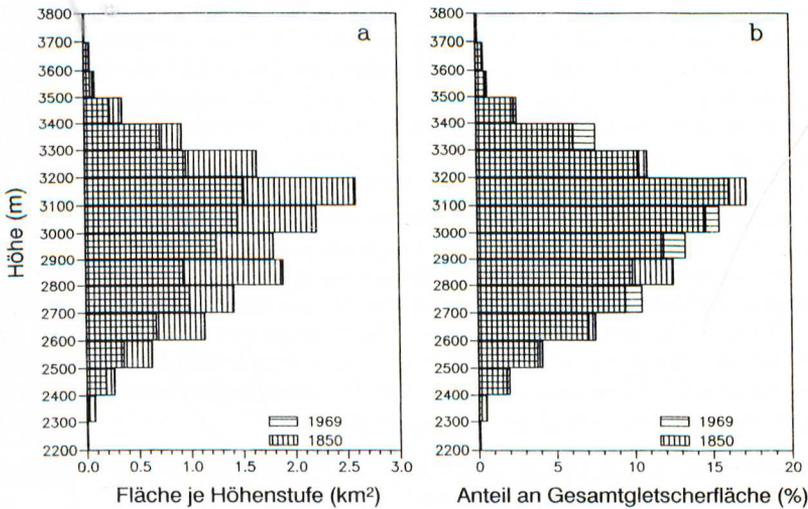


Fig. 11: Die Flächenverteilung des Hintereisferners in 100-m-Höhenstufen, „1850“ und 1969; a: absolut; b: in Prozent der Gesamtgletscherfläche

stark schwankenden Geometrie somit relativ gut. Der Hintereisferner unterscheidet sich hier deutlich vom benachbarten Kesselwandferner, dessen gegenwärtige Flächengeometrie stark von jener von „1850“ differiert (Nicolussi 1990) und der heute ca. 400 m höher als „1850“ endet (Österr. Gletscherinventar).

Die beim Hintereisferner nach Prozenten der Gesamtgletscherfläche relativ geringe Differenz zwischen heutiger und „1850“er Geometrie bewirkt allerdings, daß unter den wenig gletscherfreundlichen Klimabedingungen der letzten Jahre dieser Gletscher weit von seinem Gleichgewichtszustand entfernt ist. Das schlägt sich auch in der Massenbilanzreihe nieder. Für die Periode 1952/53–1987/88 ist der durchschnittliche jährliche Bilanzwert mit -312 mm w. e. bei einer Standardabweichung von 521 mm w. e. deutlich negativ (Tab. 6). Diese durchschnittlich um über eine halbe Standardabweichung negativen Bilanzen sind gletscherspezifisch (Kuhn et al. 1985b). Der benachbarte Kesselwandferner weist für den gleichen Zeitabschnitt eine mit $+32$ mm w. e. pro Jahr leicht positive durchschnittliche Massenbilanz auf. Der Hintereisferner fällt auch im Vergleich mit anderen Gletschern, die bezüglich mehrjähriger Massenänderungen untersucht wurden, aus dem Rahmen. Er weist als einziger von über zehn solcherart beobachteten Gletschern für die 1970er Jahre einen Volumsverlust auf (Finsterwalder u. Rentsch 1980).

Die Mittelwerte der verwendeten Frühholz- und Spätholzreihen von *Pinus cembra* entsprechen für den Zeitabschnitt 1952/53–1987/88 hingegen praktisch dem Mittel der Gesamtreihen. Dieses unter Berücksichtigung der heute gegenüber früheren Jahrhunderten klimatisch günstigeren und auch das Breitenwachstum der Waldgrenzbäume fördernden Bedingungen (Nicolussi et al. 1995) überraschende Ergebnis ist auf die Indexierung der Jahrringreihen zurückzuführen. Denn mit der Eliminierung des Alterstrends der Breitenreihen wird gleichzeitig auch jeder andere längerfristig wirkende Trend, hier sind vor allem längere Zeit andauernde Klimaänderungen zu nennen, entfernt.

Eine Rückrechnung der gefundenen Jahrring-Massenbilanz-Beziehung (Gleichung 4) hätte somit, da während der Eichperiode die Massenbilanzreihe im Mittel deutlich negativ,

die Breitenreihen jedoch fast ausgeglichen sind, ohne Korrektur einen praktisch andauernden Massenbilanzverlust für die letzten knapp 600 Jahre als Resultat. Demgegenüber müßte zumindest für die Periode zwischen ca. 1600 und etwa 1850, als die Alpengletscher jeweils ähnliche Dimensionen aufwiesen und somit auch das Eisvolumen ähnlich war, die Massenbilanzsumme praktisch 0 sein. Um dieses Ergebnis und damit eine sinnvolle Rekonstruktion zu erreichen, wurden die *Pinus cembra*-Reihen der Periode 1953/1988 um rund ein Viertel ihrer Standardabweichungen – Frühholz: +0,064, Spätholz: +0,062 – angehoben. Diese Erhöhung der Breitenwerte wurde langsam bis zum Jahr 1920, als der Hintereisferner aufgrund seines Vorstoßes einen einem Gleichgewicht zumindest nahen Zustand anzeigte, abgeschwächt. Diese relativ geringfügigen Korrekturen an den Reihen Pc-Frühholz und Pc-Spätholz führen auch gegenüber Gleichung 4 zu leichten Änderungen an der für die dendroklimatologische Rekonstruktion verwendeten Regressionsgleichung. Die veränderten Werte hält Gleichung 5 fest. Wie Gleichung 4 basiert auch Gleichung 5 auf der Periode 1934/35–1987/88. Die Korrekturen an der Frühholz- bzw. Spätholzreihe bewirken eine unbedeutende Steigerung des Korrelationskoeffizienten auf $-0,77$.

$$\text{Dendro-MB}_{\text{HEF}} = 756 \cdot \text{FH}_{-1} - 124 \cdot \text{SH}_{-1} - 1318 \cdot \text{FH}_0 - 939 \cdot \text{SH}_0 + 359 \cdot \text{FH}_{+1} - 675 \cdot \text{SH}_{+1} + 1915 \quad (5)$$

Die aufgrund der dendroklimatologischen Rekonstruktion (Gleichung 5) erhaltenen Bilanzwerte werden im folgenden, um sie deutlich gegenüber auf anderer Datengrundlage rekonstruierten Beträgen abzugrenzen, kurz als „Dendro-Massenbilanzen“ bezeichnet. Die Dendro-Massenbilanzen (Gleichung 5) bilden die Grundlage für die Figuren 12, 13, 15 und 16.

Die Darstellung der Reihe der jährlichen Dendro-Massenbilanzen (Fig. 12) zeigt zu Beginn des 15. Jahrhunderts – nach einigen Jahren mit negativen Bilanzwerten – um 1420 eine Periode positiver Massenhaushaltsjahre, die um 1430 endet. Ab 1445 beginnt wiederum ein Zeitabschnitt mit positiven Dendro-Massenbilanzen, der, nach einem ersten Höhepunkt um 1470 und einer daran anschließenden kurzen Unterbrechung, einen weiteren Höhepunkt um 1490 hat. Um 1500/1510 werden deutlich negative Massenhaushaltsjahre verzeichnet. Eine Phase mit klar positiven Dendro-Massenbilanzen um 1515 geht in eine Periode mit längerfristig eher ausgeglichenen Bilanzwerten über. Um 1560 weisen die Dendro-Massenbilanzen klar negative Werte auf. Der folgende Trend zu positiven Haushaltsjahren ist nur um 1585 unterbrochen und weist um 1600 einen Höhepunkt auf. Einer Phase leicht negativer Bilanzwerte folgt um 1630 wiederum eine Periode deutlich positiver Haushaltsjahre. Der anschließende Trend zu negativen Bilanzwerten erreicht um 1660 seinen Höhepunkt, gefolgt wiederum von einer Phase mit zunehmend positiven Dendro-Massenbilanzen, die etwa 1680 endet. Nach einem Zeitraum mit wiederum negativen Haushaltswerten folgt um 1695/1700 ein erster und, nach einigen negativen Haushaltsjahren, bis etwa 1720 ein zweiter Abschnitt mit klar positiven Massenbilanzen. Die anschließende Phase negativer Dendro-Massenbilanzen endet etwa 1740. Nach in den folgenden Jahren zuerst positiven und anschließend eher negativen Bilanzwerten ist um 1770 eine Periode mit deutlich positiven Haushaltswerten zu verzeichnen.

Der anschließende Zeitabschnitt mit überwiegend negativen Haushaltsjahren erreicht, nach einer Unterbrechung um 1785/1790, seinen Höhepunkt um 1800. Es schließen sich im Mittel ausgeglichene Haushaltsjahre an, denen stark positive Massenbilanzen um 1815/20 folgen. Abgelöst wird diese Phase durch im Mittel durchschnittliche Dendro-Massenbilanzen. Um 1850 sind einige Jahre mit durchgehend positiven Bilanzwerten zu verzeichnen. Der Periode deutlich negativer Dendro-Massenbilanzen um 1860 schließt sich ein

Zeitabschnitt mit einem Trend zu positiveren Haushaltsjahren – mit einem Höhepunkt um 1900 – an. Nach einigen klar negativen Bilanzwerten sind in den 1910er Jahren überwiegend positive Massenhaushaltswerte zu verzeichnen. Es folgen bis zum Ende der Reihe überwiegend negative Dendro-Massenbilanzen – um 1940 und 1975/80 kurz unterbrochen – mit den bekannten Phasen stark negativer Haushaltsjahre um 1950 und in den 1980er Jahren.

Figur 12 ist somit gekennzeichnet von einem stetigen Wechsel zwischen Phasen mit überwiegend positiven bzw. negativen Dendro-Massenbilanzen. Dabei treten bekannte Gletschervorstoß- und -hochstandsphasen, etwa um 1600 oder 1820, als Folgen positiver Massenhaushaltsjahre hervor. Die Kurve der kumulierten Dendro-Massenbilanzen verdeutlicht dieses Bild (Fig. 13). Die bekannten Gletscherhochstände des 17. bis 19. Jahrhunderts er-

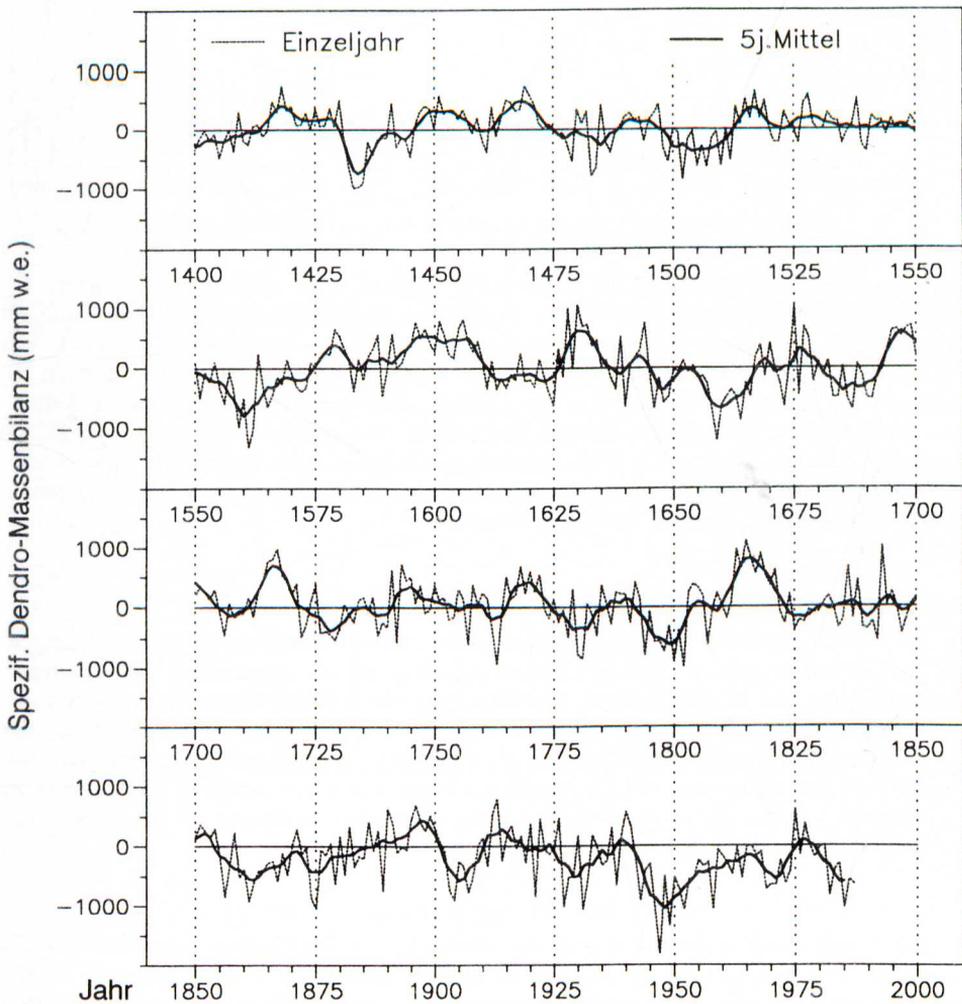


Fig. 12: Die Reihe der Dendro-Massenbilanzen des Hintereisferners, 1400–1987

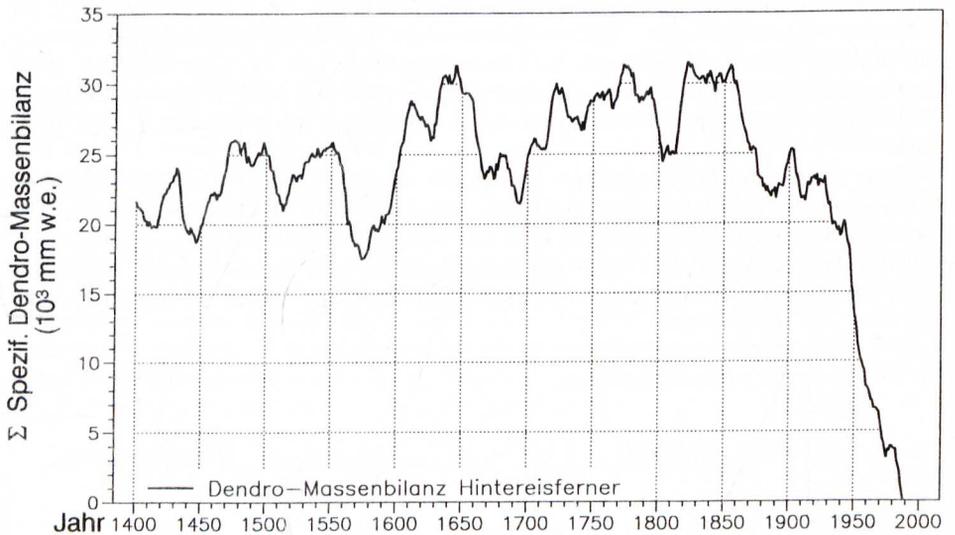


Fig. 13: Die Summenkurve der Dendro-Massenbilanzen des Hintereisferners, 1400–1987

scheinen jeweils als Spitzen in der Bilanzkurve. Weitere, aber auf einem niedrigeren Niveau liegende Spitzen der Summenkurve der Dendro-Massenbilanzen um 1470/90 und zur Mitte des 16. Jahrhunderts lassen gleichzeitig erfolgte Gletschervorstöße annehmen. Für die Jahre um 1445 und um 1565 sind auch die markantesten Minima der kumulierten Bilanzkurve vor dem 20. Jahrhundert zu verzeichnen. Die Werte liegen dabei etwa auf einem dem Stand von ca. 1940 entsprechenden Niveau. Das 20. Jahrhundert ist, nach einer letzten deutlichen Massenzunahme vor 1920, gekennzeichnet durch einen kaum mehr unterbrochenen Rückgang der kumulierten Dendro-Massenbilanzen auf ein bezüglich der vorhergehenden Jahrhunderte unvergleichlich niedriges Niveau.

4. DISKUSSION

Für die Überprüfung der Massenbilanzrekonstruktion stehen Angaben über Längen- und Volumsänderungen des Hintereisferners seit dem letzten allgemeinen Gletscherhochstand zur Mitte des 19. Jahrhunderts zur Verfügung. Auch Volumsänderungen anderer Alpengletscher für die Periode nach „1850“ werden zu Vergleichszwecken herangezogen. Für die Zeit vor „1850“ kann eine Diskussion der Ergebnisse der dendroklimatologischen Massenbilanzrekonstruktion nur mit den Größenschwankungen verschiedener Alpengletscher durchgeführt werden. Dabei liegt das Hauptaugenmerk der Kontrolle auf der Frage nach der zeitlichen Übereinstimmung der Schwankungen.

4.1 DER HINTEREISFERNER SEIT „1850“

Die Situation im inneren Rofental zur Mitte des 19. Jahrhunderts vermittelt die aus dem Jahr 1852 stammende aquarellierte Bleistiftzeichnung von F. Simony (Abb. 2). Sie zeigt den Hintereisferner kurz vor Erreichung seines „1850“er Maximalstandes. Dargestellt ist aufgrund der Talkrömmung nur die vom Hintereisferner und dem benachbarten Kessel-

wandferner gemeinsam gebildete Gletscherzunge. Diese liegt zwischen dem im Vordergrund zu sehenden, das Rofental als Eisdamm absperrenden Vernagtferner und dem im Bild links sich befindenden Hochjochferner. Nahe der Zunge des Hintereisferners, auf der orographisch liaken Talseite, ist die Rofenbergalm, an die der Gletscher im Zuge des Vorstoßes bis auf etwa 50 m heranrückte, eingezeichnet. Die gemeinsame Zunge von Hintereisferner und Kesselwandferner wird bei mittleren bis großen Gletscherständen ausgebildet. Erst seit 1933, sieht man von einer kurzen Phase in den Jahren 1913 bis 1917 (Hess 1917:



Abb. 2: „Mittlere Gruppe der Oetzthaler Ferner vom Venter Berg aus aufgenommen“ (Ausschnitt). Gezeichnet von F. Simony vom 28.–30. 8. 1852. Bleistift, mit Farben, 28 × 108 cm, Simony-Nachlaß, Archiv NHM Wien

158) ab, sind die beiden Gletscher vollständig getrennt. An der von Simony fein gezeichneten Mittelmoräne (Abb. 2) lassen sich die beiden von Hintereis- bzw. Kesselwandferner stammenden Eismassen unterscheiden. Der Eisstrom des Kesselwandfeners, in der Abbildung rechts der Mittelmoräne, endet etwas früher als der Eisstrom vom Hintereisferner. In Rückzugsphasen ist die Gletscherzunge oftmals gänzlich (Abb. 4 und Abb. 5) schuttbedeckt. Die auf der Simony-Darstellung zu sehende geringe Schuttbedeckung ist entsprechend ein Zeichen für eine anhaltende Vorstoßaktivität des Hintereisfeners.

Der Zeitpunkt, zu dem der Hintereisferner seinen Maximalstand zur Mitte des letzten Jahrhunderts erreichte, ist nicht exakt bekannt. In den Jahren 1856 (Sonklar 1860: 166) und 1857 (Tiroler Schützenzeitung 1857: 510) stieß die Gletscherzunge jedenfalls noch vor. Vermutlich erreichte der Hintereisferner seinen „1850“er Maximalstand noch vor 1860, denn Ende der 1860er Jahre war der Hintereisferner bereits deutlich eingesunken. Dies veranschaulicht die bisher älteste bekanntgewordene photographische Aufnahme des Hintereisfeners aus dem Jahr 1869 von Ernest Lamy (Abb. 3). Das Bild zeigt den Abbruch des Kesselwandfeners und dessen Zusammenfluß mit dem Hintereisferner. Eine mächtige Mittelmoräne trennt die beiden Eisströme. Die klare Erniedrigung der Gletscheroberfläche gegenüber dem Hochstand ist an den Moränen unterhalb des Kesselwandfernerzuflusses deutlich erkennbar. Das Einsinken gegenüber der maximalen neuzeitlichen Ufermoräne beträgt ca. 60 Höhenmeter, jenes gegenüber der „1850“er Gletscheroberfläche ist etwas geringer (freundl. persönl. Mitteil. G. Patzelt), da diese das neuzeitliche Maximum nicht ganz erreichte.

Im Vergleich zu diesem markanten Einsinken war die Längenreduktion des Hintereisfeners aufgrund der Eisdicke am Gletscherende anfangs relativ gering. Das Zungenende war

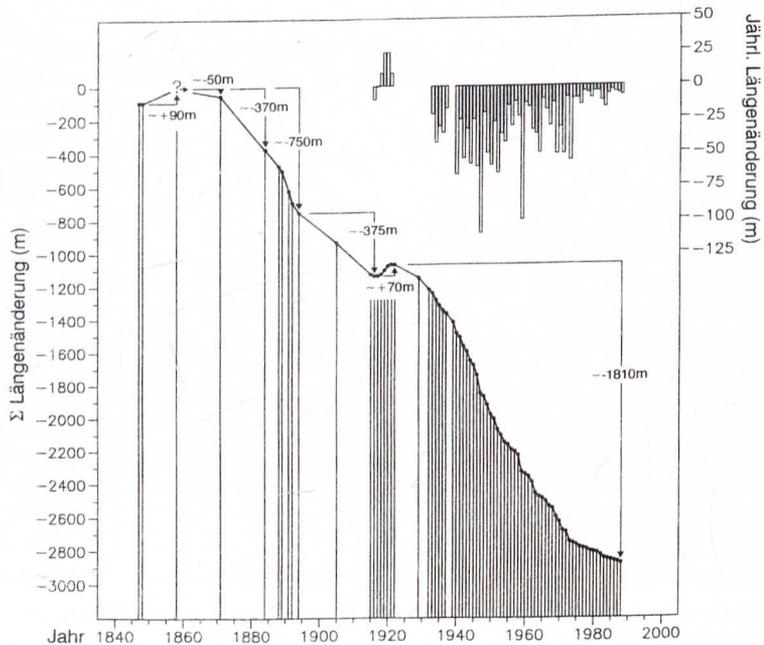


Fig. 14: Die Längenänderungen des Hintereisfeners, „1850“–1988; Einzeljahre und Summenkurve



Abb. 3: „Tyrol par E. Lamy: 31. – Glacier de Kesselwand, Route du Hochjoch, près Fend (Oetzthal)“. Photographie von E. Lamy, 1869, ca. $7,8 \times 7,7$ cm, Archiv Nicolussi

1871/72 (Abb. 4) nur um ca. 50 m von der vermutlich kurz nach 1857 aufgeschobenen Endmoräne zurückgewichen.

Nach erfolgter Ausdünnung der gemeinsamen Zunge von Hintereis- und Kesselwandferner ging der weitere Längenverlust rasch vonstatten. Die Photoaufnahme von Gustav Jägermayer aus dem Jahr 1884 (Abb. 5) zeigt das stark schuttbedeckte Gletscherende bereits deutlich zurückgeschmolzen. Das große Gletschertor verdeutlicht das Anhalten der Rückzugsphase. Zwischen 1871/72 und 1894, dem Aufnahmejahr der Hintereisferner-Karte von Blümcke und Hess (1899), verlor der Gletscher jährlich durchschnittlich ca. 30 m an Länge.

Der Längenverlust des Hintereisferners hielt bis 1916 an (Fig. 14). Der folgende „1920“er Vorstoß blieb mit insgesamt ca. 70 m bescheiden und endete bereits 1922 (Hess

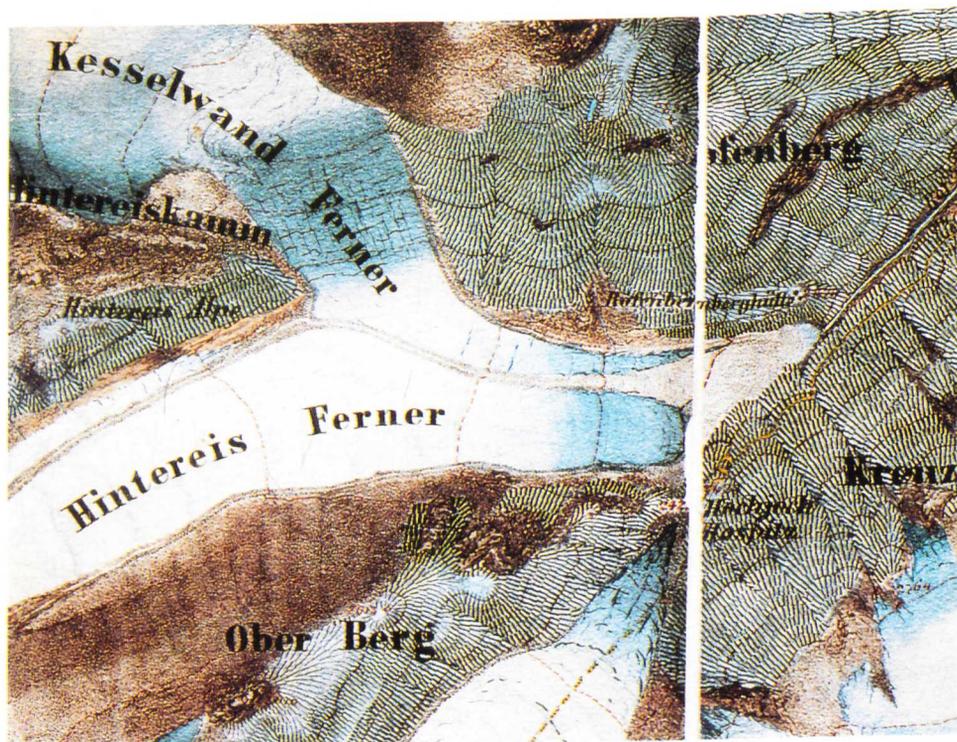


Abb. 4: Der untere Abschnitt des Hintereisferners 1871/72. Dritte Landesaufnahme 1: 25 000: Ausschnitt aus den kolorierten Blättern Zone 18 – Colonne III – Section S.O. und Zone 18 – Colonne IV – Section S.W., Archiv des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen, Wien

1924: 152). Seither dauert der Rückgang des Hintereisferners ohne Unterbrechung an. Die stärksten Längenverluste wurden dabei um 1950 mit jährlichen Durchschnittsbeträgen von knapp 50 m (Nicolussi 1990: 112) registriert. Die gletscherfreundlicheren Jahre von ca. 1965 bis 1980 führten beim Hintereisferner nur zu einer Reduktion des jährlichen Rückzugsbetrages, jedoch zu keinem Vorstoß. Insgesamt verlor der Hintereisferner in den rund 130 Jahren vom „1850“er Hochstand bis 1988 knapp 2900 m an Länge (Fig. 14).

Der Verlauf der Summenkurve der Dendro-Massenbilanzen (Fig. 13) stimmt gut mit dem aus Messungen, Kartenauswertungen und historischen Nachrichten zusammengestellten Ablauf der Längenänderungen des Hintereisferners überein. Das Ende der nach „1850“ einzigen Phase mit längerfristig ausgeglichenen bis positiven Bilanzen – ca. 1890/1920 – fällt wiederum mit dem Ende des im gleichen Zeitraum einzigen Wiedervorstoßes dieses Gletschers (Fig. 14) zusammen.

Das Bild der kumulierten Dendro-Massenbilanzen stimmt gleichfalls gut mit dem von Groß (1987) gezeigten Verlauf der Flächenänderungen der österreichischen Gletscher seit „1850“ überein. Demnach erfolgte nach diesem Hochstand eine erste Abschmelzphase der Gletscher bis etwa 1895, daran anschließend war bis etwa 1925 kein weiterer Flächenverlust zu vermerken, worauf bis um 1969, dem Aufnahmejahr des Österreichischen Gletscherinventars, ein gegenüber der ersten Periode leicht verstärkter Rückgang der Gletscherflä-



Abb. 5: Die Zunge des Hintereisferners. Photographie von G. Jägermayer, 1884, hrsg. von C. A. Czichna, Innsbruck, 14,8 × 10,0 cm, Tiroler Landesmuseum Ferdinandeum, FB 26.020

chen erfolgte. Während sich jedoch die Flächenverluste der österreichischen Gletscher zwischen der 1. und 3. Periode wie etwa 4:5 verhalten, liegt dieses Verhältnis bei den Dendro-Massenbilanzwerten bei etwa 1:2.

4.2 DENDRO-MASSENBILANZEN UND GLETSCHERVOLUMSÄNDERUNGEN SEIT „1850“

Angaben über die Volumsänderungen von Gletschern, vor allem was die Jahrzehnte nach dem letzten Gletscherhochstand betrifft, liegen, sieht man von der kürzlich vorgelegten Studie von Maisch (1992) ab, nur vereinzelt vor, da bis zum Ende des 19. Jahrhunderts keine genügend genauen Karten hergestellt wurden und Rekonstruktionen einer „1850“er Gletscheroberfläche problematisch sind.

Die Dendro-Massenbilanzberechnungen ergeben für den Hintereisferner vom „1850“er Hochstand bis zum Jahr 1987 einen spezifischen Massenbilanzverlust von $31,3 \times 10^3$ mm w. e. Für den Eichzeitraum 1934/35–1986/87 ist mit 20×10^3 mm w. e. der Großteil des Rückgangs zu verzeichnen.

Zum Vergleich sind in Figur 15 mehrere Angaben über Volumsänderungen von Alpengletschern zusammengestellt. Verglichen werden jeweils die jährlichen Höhenänderungen der Gletscheroberfläche. Die Dendro-Massenbilanzwerte wurden in Eisvolumen umgerechnet und stellen somit nur eine Minimumsangabe zur Volumsänderung dar. Für Vergleiche bezüglich des Volumsverlustes seit dem Hochstand von „1850“ ist für die Dendro-Massenbilanzen das Haushaltsjahr 1854/55 der Ausgangspunkt. Für dieses Jahr weist die dendro-

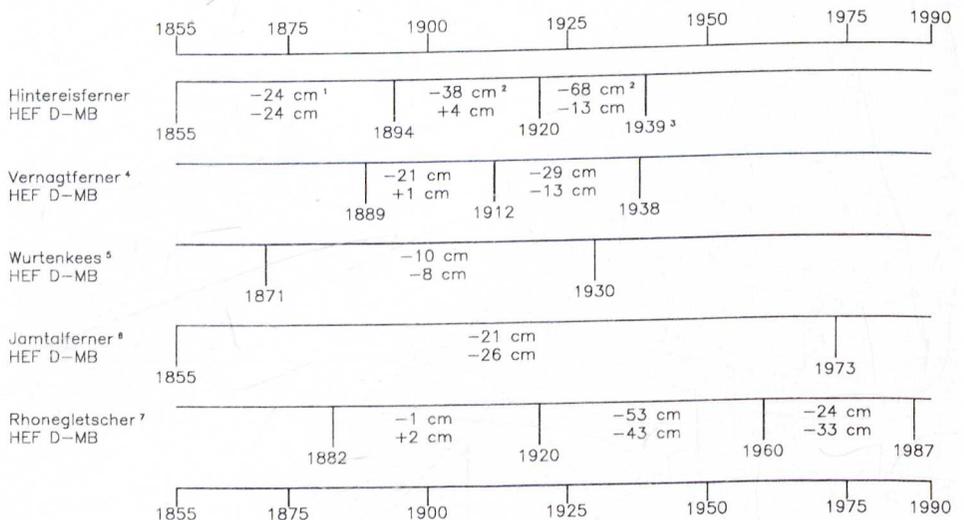


Fig. 15: Vergleich der mittleren jährlichen Höhenänderungen ausgewählter Alpengletscher mit den in Eisvolumina umgerechneten Dendro-Massenbilanzen des Hintereisfernens (HEF D-MB)

¹ Blümcke und Hess (1899) ² Finsterwalder, Rich. (1953) ³ Das Aufnahmejahr des Hintereisfernens war nicht 1940, wie Rich. Finsterwalder (1953) angibt, sondern 1939 (freundl. persönl. Mitteil. G. Patzelt) ⁴ Brunner und Rentsch (1972) ⁵ Böhm, Hammer und Strobl (1983) ⁶ Maisch (1992) ⁷ Chen und Funk (1990)

klimatologische Rekonstruktion erstmals eine leicht negative Bilanzsumme nach „1850“ (Fig. 12) aus.

Auswertungen zu den Volumsänderungen des Hintereisferners auf der Basis großmaßstäbiger Karten (Finsterwalder 1953) bzw. einer Rekonstruktion des „1850“er Standes (Blümcke und Hess 1899) sind vor allem für den großteils vor dem Eichzeitraum 1934/35–1986/87 liegenden Zeitabschnitt von Interesse. Hier liegen Angaben für die Perioden „1850“–1894, 1894–1920 und 1920–1939 vor (Fig. 15). Die Dendro-Massenbilanzen und der von Blümcke und Hess (1899: 32) errechnete Volumsverlust stimmen überein. Demgegenüber läßt sich aus den von Span (1993) mitgeteilten Beträgen zur Volumsänderung des Hintereisferners ein Einsinken zwischen „1850“ und 1894 von ca. 55 cm a^{-1} ableiten. Ein Teil der Differenz ist mit aller Wahrscheinlichkeit durch den Einbezug des untersten Abschnittes des Kesselwandferners in die Volumsberechnung von Span (1993: 24) zu erklären. Blümcke und Hess (1899) hingegen berechneten den Volumsverlust von Hintereis- und Kesselwandferner getrennt.

Die berechneten Einsinkbeträge (Finsterwalder 1953) für die Vergleichszeiträume 1894–1920 und 1920–1939 – das Aufnahmejahr des Hintereisferners für die AV-Karte der Ötztaler Alpen war nicht 1940, wie Rich. Finsterwalder mitteilt, sondern 1939 (freundl. persönl. Mitteil. G. Patzelt) – übertreffen deutlich die Ergebnisse der Dendro-Massenbilanzen. Allerdings weist die von Rich. Finsterwalder (1953) verwendete Karte von 1894 teilweise deutliche Fehler auf. Beispielsweise wird der Felsgipfel der Weißkugel gegenüber der Hintereisferner-Karte von 1979 (Kuhn 1980) um ca. 8 m zu hoch angegeben. Wie Span (1993) bezieht auch Rich. Finsterwalder (1953: 239) den untersten Abschnitt des Kesselwandferners in die Berechnungen zur Volumsänderung des Hintereisferners mit ein. Zusätzlich scheint ein jährliches Einsinken von 38 cm zwischen 1894 und 1920 in Anbetracht des Vorstoßes des Hintereisferners um 1920 ein hoher Betrag. Eine Überprüfung der Dendro-Massenbilanzen unter Verwendung der von Rich. Finsterwalder (1953) vorgenommenen Auswertungen der Hintereisferner-Karten muß aufgrund der aufgezeigten Ungereimtheiten somit als wenig zielführend bezeichnet werden. Eine kritische Neuauswertung des von Finsterwalder (1953) verwendeten Kartenmaterials erscheint notwendig.

Mit den bei anderen Gletschern festgestellten Einsinkbeträgen (Fig. 15) stimmen die Dendro-Massenbilanzwerte hingegen teilweise sehr gut überein. Ausgenommen ist davon nur der Vernagtferner (Brunner und Rentsch 1972), für den ein deutlich höheres Einsinken der Gletscheroberfläche nachweisbar ist, als es sich für die Vergleichszeiträume 1889–1912 und 1912–1938 am Hintereisferner mit den Dendro-Massenbilanzen errechnen läßt. Am Wurtenkees, Goldberggruppe, wurde für den Zeitraum 1870–1930 auf der Basis von Kartenauswertungen (Böhm et al. 1983) eine negative jährliche Höhenänderung ermittelt, die in etwa jener nach den Dendro-Bilanzen des Hintereisferners errechneten entspricht. Der von Maisch (1992) festgestellte Einsinkbetrag für den Jamtalferner ist etwas geringer als jener aus den Dendro-Massenbilanzen abgeleitete Betrag. Bemerkenswert gering sind die Differenzen zwischen Dendro-Massenbilanzen und Volumsänderungen am Rhonegletscher (Chen und Funk 1990) während der Periode 1882–1920.

Maisch (1992) führte für die Gletscher Graubündens, Schweiz, die erste regionale Studie über die Volumsänderungen seit dem Hochstand von „1850“ durch. Dabei wurden erstmals auch die bisher in diesem Zusammenhang vernachlässigten kleineren Gletscher miteinbezogen. Der Betrag für das mittlere Einsinken der Gletscher Graubündens für die Periode „1850“–1973 liegt mit -13 cm a^{-1} deutlich unter dem für den gleichen Zeit-

raum aus den Dendro-Massenbilanzen bestimmten Einsinken des Hintereisferners von -25 cm a^{-1} .

Insgesamt stimmen die Angaben über Volumsänderungen von Gletschern nach dem „1850“er Hochstand gut – ausgenommen seien die Angaben von Rich. Finsterwalder (1953) – mit den Dendro-Massenbilanzen überein. Somit erscheint der durch die Dendro-Massenbilanz gegebene spezifische Massenbilanzverlust von rund $31,3 \times 10^3 \text{ mm w. e.}$ der wirklichen Bilanzsumme für den Zeitraum „1850“–1987 hinreichend gut zu entsprechen.

4.3 DIE PERIODE VOR „1850“

Massenbilanzänderungen sind die Grundlage für die Größenschwankungen der Gletscher. Allerdings ist bei einem Vorstoß oder Rückzug eines Gletschers jeweils auch dessen individuelle Dynamik mit einzubeziehen. Darum ist ein Vergleich von Massenbilanzdaten und Größenänderungen nur in groben Zügen möglich.

Das hier zusammengestellte historische Material zur Geschichte des Hintereisferners läßt vor „1850“ nur einen punkthaften Einblick in den Ablauf der Vorstoß- und Abschmelzphasen zu. Die detailliertesten Informationen über die neuzeitlichen Schwankungen eines Alpengletschers liegen wohl für den Unteren Grindelwaldgletscher, Schweiz, vor (Zumbühl 1980, Zumbühl et al. 1983). Deshalb wurde dieser Gletscher als wichtigstes Vergleichsbeispiel zu den Dendro-Massenbilanzen ausgewählt. Den Längenänderungen des Unteren Grindelwaldgletschers – verwendet wird dabei eine mittlere Kurve aus den angegebenen Minimal- bzw. Maximalwerten (Zumbühl et al. 1983) – wird die Summenkurve der Den-



Abb. 6: „Das Ende des Hintereisferners.“ Aufgenommen von Hermann Schlagintweit, 1847, Bleistift, Aquarell, $17 \times 24 \text{ cm}$, Bayer. Staatsbibliothek, Schlagintweitiana I. 1. 75



Abb. 7: Die Zunge des Hintereisferner im Jahr 1817. Franiszeische Landesaufnahme 1:28800; Ausschnitt aus dem Originalblatt Sektion 68 „Ober Gurgl“, aufgenommen von Franz v. Hauslab, Kriegsarchiv Wien

dro-Massenbilanzen gegenübergestellt (Fig. 16) Ein solcher Vergleich erscheint gerechtfertigt, da der Untere Grindelwaldgletscher aufgrund seiner Topographie schnelle Reaktionen auf Bilanzschwankungen erwarten läßt. Dabei können allerdings nur der zeitliche Ablauf und – mit Einschränkungen – das relative Ausmaß der Längen- und der Massenbilanzschwankungen einander gegenübergestellt werden. Neben den Informationen über den Hintereisferner und den Unteren Grindelwaldgletscher werden auch Angaben über die Schwankungen anderer Alpengletscher herangezogen.

Für die erste Hälfte des 19. Jahrhunderts ist eine ausgezeichnete Übereinstimmung zwischen der Kurve der Dendro-Massenbilanzen und den Längenvariationen des Unteren Grindelwaldgletschers festzustellen. Beide Kurven weisen in diesem Zeitraum zwei Maxima, um 1820 und um 1850, auf. Dieses Bild zweier Maxima gibt auch die auf der Basis von Klimadaten für den Hintereisferner durchgeführte Massenbilanzrekonstruktion von Greuell (1989: 145) wieder. In den Jahren zwischen „1820“ und „1850“ verzeichnen die

Dendro-Massenbilanzen nur eine geringe Massenabnahme. Dem entspricht das mehrfach beobachtete fast stationäre Gletscherverhalten nahe der neuzeitlichen Maximalausdehnung (Zumbühl und Holzhauser 1988) in diesem Zeitraum. Für die Mitte des 19. Jahrhunderts lassen die Dendro-Bilanzwerte erst ab 1842/43 einen insgesamt relativ geringen Massenzuwachs erkennen. Wahrscheinlich unterschätzt aber die dendroklimatologische Rekonstruktion mit einer Bilanzsumme von ca. $+2 \times 10^3$ mm w. e. zwischen 1842 und 1854 den wirklichen Massenzuwachs, der zum allgemein feststellbaren Gletscherhochstand von „1850“ führte.

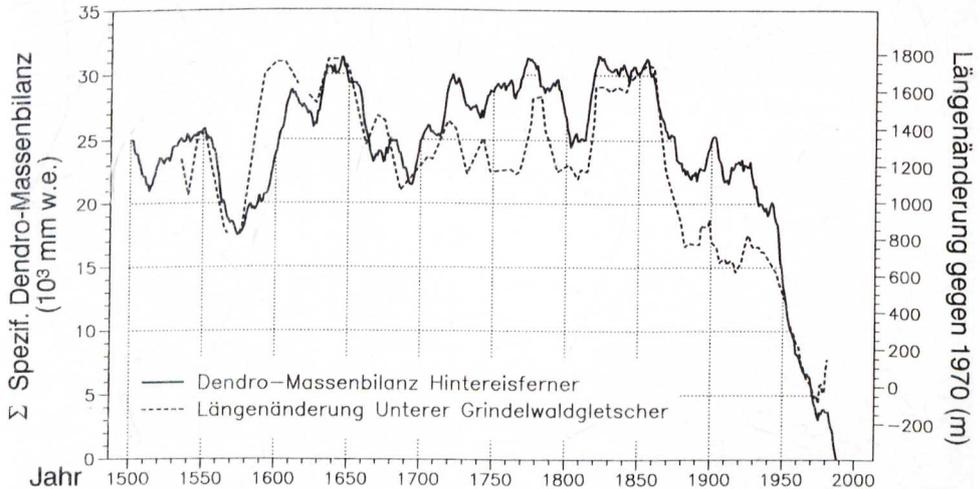


Fig. 16: Die Summenkurve der Dendro-Massenbilanzen des Hintereisferners und die Kurve der Längenänderungen des Unteren Grindelwaldgletschers, 1500–1987

Für den Hintereisferner selbst liegen aus den Jahren 1847 und 1848 Beobachtungen der Brüder Schlagintweit (1850) vor. Die Gletscherzunge lag rund 90 m hinter dem ca. 10 Jahre später erreichten „1850“er Maximum. Der Hintereisferner war 1847/48 praktisch stationär (Schlagintweit 1850: 126). Die Dendro-Massenbilanzen weisen für die Mitte der 1840er Jahre, besonders 1842/43: $+1017$ mm w. e., überwiegend positive Beträge aus (Fig. 12). Die Haushaltsjahre 1846/47 und 1847/48 fielen hingegen mit -433 und -170 mm w. e. negativ aus. Somit kann das von den Brüdern Schlagintweit 1848 beobachtete stationäre Verhalten des Hintereisferners gut erklärt werden, wenn von einem unmittelbar vorher stattgefundenen, möglicherweise nur kleinen Vorstoß ausgegangen wird. Gestützt wird die Annahme eines Gletschervorstoßes durch die Darstellung der Zunge des Hintereisferners, die von Hermann Schlagintweit im Jahr 1847 aufgenommen wurde (Abb. 6). Das Fehlen eines markanten Gletschertores und die am Eis anliegende Moräne zeigen an, daß der Gletscher zum Zeitpunkt der Bildaufnahme einem aktiven Zustand zumindest nahe war.

Der Beginn der Periode stark positiver Massenbilanzen, die zum „1820“er Vorstoß führten, ist nach der dendroklimatologischen Rekonstruktion auf das Jahr 1812 festzusetzen. Diese gletscherfreundliche Periode führte an einer Reihe von Alpengletschern zu kräftigen Vorstößen, manche erreichten „1820“ auch ihren Maximalstand im 19. Jahrhundert. Auch

der Hintereisferner wies im Jahr 1817, dem Aufnahmejahr des den Hintereisferner betreffenden Kartenblattes der Franziszeischen Landesaufnahme (Abb. 7), einen sehr großen Stand auf und war noch im Vorrücken begriffen. Die Mittelmoräne zwischen den Eisströmen vom Hintereis- bzw. Kesselwandferner ist nur sehr schmal ausgebildet. Zum Aufnahmezeitpunkt lag die Gletscherzunge noch ca. 110 m vom später erreichten Maximalstand des 19. Jahrhunderts entfernt. Führt man dieses aus der Karte ersichtliche Vorrücken auf die erst fünf Jahre zuvor einsetzende Periode positiver Massenhaushaltsjahre zurück, so muß ein surgetartiger Vorstoß des Hintereisfernens angenommen werden, denn vor dem Jahr 1812 weisen die Dendro-Massenbilanzen ein Jahrzehnt mit durchschnittlich ausgeglichenen Haushaltsjahren aus. Daß ein solch schneller Vorstoß denkbar ist, belegen die von Span (1993) aufgezeigten raschen Änderungen der Fließgeschwindigkeit des Hintereisfernens in den 1910er Jahren. Der Endstand des „1820“er Vorstoßes des Hintereisfernens ist nicht bekannt. Für die Zeit zwischen „1820“ und 1847 ist, analog zu den Dendro-Massenbilanzen, von einem wahrscheinlich nur geringfügigen Rückschmelzen des Hintereisfernens auszugehen.

Das Niveau der Dendro-Bilanzkurve entspricht um 1810 in etwa jenem von 1870. Dies stimmt gut mit dem Befund am Frosnitzkees überein, wonach dieses im Jahr 1808 etwa 600–650 Meter hinter seiner „1850“er Ausdehnung, aber nur rund 200 Meter vor dem späteren „1920“er Stand lag; für das Schlatenkees kann für den selben Zeitpunkt ein Stand wie um 1890 beschrieben werden (Patzelt 1973). Auch der Untere Grindelwaldgletscher wies um 1810 eine etwa der Größe von 1870 entsprechende Ausdehnung auf (Fig. 16).

Das Minimum der Dendro-Massenbilanzsummenkurve zwischen „1770/80“ und „1820“ wurde im Haushaltsjahr 1801/02 erreicht. Davor liegt eine 1775/76 begonnene Serie mit negativen Bilanzwerten, nur unterbrochen von einer Phase mit positiven Haushaltsjahren um 1790. Dieser Rückgang der Bilanzkurve nach „1770/80“ stimmt sehr gut mit einem von verschiedenen Alpengletschern bekannten Abschmelzen (Zumbühl und Holzhauser 1988) überein. Der Darstellung der Massenbilanzrekonstruktion von Greuell (1989: 145) ist für den diskutierten Zeitraum weder eine besondere Massenbilanzzunahme noch eine -abnahme zu entnehmen.

Auch der vorher stattgefundenene „1770/80“er Hochstand ist in Greuell's Kurve (1989: 145) nicht zu finden. Dieser neuzeitliche Gletscherhochstand ist nach der Bilanzsummenkurve auf eine ab dem Jahr 1740 zuerst langsame, zu Beginn der 1760er Jahre kurz unterbrochene, dann aber beschleunigte Massenzunahme von insgesamt knapp 5 m w. e. zurückzuführen. Die Phase deutlich positiver Haushaltsjahre ab 1765 stimmt zeitlich genau mit einem markanten Vorstoß des Unteren Grindelwaldgletschers überein (Fig. 16, Zumbühl 1980). Die Nachrichten von vorstoßenden Alpengletschern um 1740 (Richter 1891: 10–11) lassen auch die insgesamt positiven Dendro-Massenbilanzen während des gleichen Zeitraums als durchaus realistisch erscheinen. Am Hintereisferner selbst läßt sich mit Flechtenmessungen ein „1770/80“er Hochstand, der in seinen Ausmaßen praktisch jenem von „1850“ entsprach (freundl. persönl. Mitteil. G. Patzelt), nachweisen.

Die kumulierten Dendro-Massenbilanzen (Fig. 13) weisen um 1720 einen weiteren Gipfel auf, der vom Niveau nur wenig hinter den anderen neuzeitlichen Hochständen zurückbleibt. Die Periode positiver Haushaltsjahre begann bereits 1694 und erreichte ein erstes Maximum um 1704, dem bis 1712 einige eher negative Bilanzjahre folgten. Vom Gurgler Ferner ist für 1716/17 ein starker Vorstoß mit einem Hochstand, der bis mindestens 1724 andauerte, bekannt (Richter 1891: 9). Der Gurgler Ferner erreichte während dieser Periode fast die Ausmaße des neuzeitlichen Maximalstandes (Patzelt 1990). Die Grindelwaldgletscher waren 1705 im Vorrücken, dieser Vorstoß erreichte seinen Höhepunkt erst 1720.

Dabei geht Zumbühl (1980) von einer Unterbrechung des Vorstoßes des Unteren Grindelwaldgletschers um 1710 aus (Fig. 16), womit eine Übereinstimmung mit den Dendro-Massenbilanzen gegeben ist. Für das Mer de Glace ist für das Jahr 1730 ein Stand bekannt, der die Gletscherausdehnung zur Mitte des 19. Jahrhunderts übertraf (Reynaud 1977, zitiert nach Grove 1988).

Im Vergleich zu den anderen Gletscherhochständen relativ klein fällt in Figur 13 der Gipfel von „1680“ aus. Zwar liegt der Hintereisferner im Jahr 1681 weit hinter seinen neuzeitlichen Maximalausdehnungen (Nicolussi 1993), und auch Zumbühl (1980) nimmt für den Unteren Grindelwaldgletscher nur einen relativ kleinen Vorstoß um 1670 an, andererseits ist für den Vernagtferner „1680“ einer seiner großen Vorstöße verzeichnet, und auch der Gepatschferner, Kaunertal, erreichte um 1680 einen seiner neuzeitlichen Maximalstände. Somit unterschätzen die Dendro-Massenbilanzen den „1680“er Hochstand vermutlich deutlich. Grund hierfür ist wahrscheinlich zum einen eine relativ geringe Belegdichte der Breitenreihen in diesem Zeitabschnitt (Fig. 2), zum anderen enden in den 1660er Jahren die aus dem Gurgler Tal stammenden Jahrringserien, womit die Frühholz- und Spätholzreihen in diesem Zeitabschnitt eine gewisse Inhomogenität aufweisen.

In der ersten Hälfte des 17. Jahrhunderts ist eine im Verlauf ausgezeichnete Übereinstimmung zwischen der Kurve der kumulierten Dendro-Massenbilanzen und den von Zumbühl (1980) rekonstruierten Längenänderungen des Unteren Grindelwaldgletschers festzustellen. Das erste Maximum, bei Zumbühl um 1600, bei den Dendro-Massenbilanzen um 1610, ist zeitlich allerdings etwas verschoben. Möglicherweise liegt hier eine verzögerte Zuwachsreaktion von *Pinus cembra* vor. Allerdings liegt auch der Hintereisferner im Jahr 1601 klar hinter seinem neuzeitlichen Maximalstand (Nicolussi 1993). Nach einem leichten Rückgang des Gletschervolumens bis etwa 1625 weisen die Dendro-Massenbilanzen im Haushaltsjahr 1643/44 ihr kumulatives Maximum in 17. Jahrhundert auf. Dies stimmt gut, bezieht man eine gewisse verzögerte Reaktion mit ein, mit den von Holzhauser (1984) für etwa 1650 festgestellten Maximalständen am Fiescher- und Großen Aletschgletscher überein.

Das 15. und 16. Jahrhundert weist ein insgesamt etwas niedrigeres Schwankungsniveau, als es für die neuzeitliche Hochstandsperiode von ca. 1600 bis 1850 kennzeichnend ist, auf. Die Dendro-Massenbilanzkurve erreicht im 15. Jahrhundert um 1445 ein Minimum, entsprechend einem Niveau wie um 1940 (Fig. 13). Zumbühl und Holzhauser (1988) gehen ebenfalls von einem – bis in die Mitte des 20. Jahrhunderts nicht mehr erreichten – Minimum in der Ausdehnung des Großen Aletschgletschers in der Mitte des 15. Jahrhunderts aus.

Diesem Minimum der kumulierten Dendro-Massenbilanzen um 1445 folgt eine kaum unterbrochene Serie positiver Haushaltsjahre bis 1474/75. Dabei erreicht die Summenkurve ein Niveau vergleichbar jenem von ca. 1870. Vorstöße, die kein Hochstandsniveau erreichten, lassen sich im Gelände nur selten nachweisen. Entsprechend gering ist die Zahl der auch zeitlich genügend aufgelösten Vergleichsinformationen. Patzelt (1973) kann am Simonykees, Venedigergruppe, mit einem Radiokarbondatum für ca. 1470 einen Gletschervorstoß bis zu einer dem Stand von 1870 etwa entsprechenden Dimension belegen. Am Gepatschferner wurde ein Baum, dessen letzter Jahrring 1462 gebildet wurde, vom vorstoßenden Gletscher auf einer Höhe, die der Gletscheroberfläche von ca. 1870/80 entspricht, begraben.

Nach 1475 sind bis 1496/97 keine deutlichen Änderungen der kumulierten Dendro-Massenbilanzen festzuhalten. Dieser Periode folgt bis 1511/12 eine Abnahme der Dendro-

Massenbilanzsumme auf ein dem Betrag von 1930 entsprechendes Niveau. Für die Jahre um 1500 kann Holzhauser (1984) einen kleinen Vorstoß des Großen Aletschgletschers bis zu einem der Rückzugsausdehnung von etwa 1926/27 entsprechenden Ausmaß belegen. Zieht man, wie Holzhauser, eine verzögerte Reaktion des Aletschgletschers in Betracht, so unterstützt dieser Befund die Annahme einer vorhergehenden gletscherfreundlichen Periode. Auch das kurz nach 1504 erfolgte Ende des Vorstoßes bestätigt das durch die Dendro-Massenbilanzen erhaltene Bild eines gletscherungünstigen Zeitabschnittes um 1500/1510.

Die folgende Periode positiver Massenhaushaltsjahre mit einem Bilanzsummenmaximum um 1540/50, das dem Niveau von ca. 1870 entspricht (Fig. 13), wird durch Nachrichten vom Rhone- und Unteren Grindelwaldgletscher bestätigt. Der Rhonegletscher hatte in den 1540er Jahren eine Größe, die vermutlich jene von 1874 übertraf, jedoch kleiner war als 1856 (Zumbühl und Holzhauser 1988); für den Unteren Grindelwaldgletscher (Fig. 16) wird von einem Vorstoß im Jahr 1547 berichtet, dessen maximales Ausmaß etwa vergleichbar den Gletscherdimensionen von 1870 war (Zumbühl et al. 1983).

Nach 1550 nehmen die kumulierten Dendro-Massenbilanzen innerhalb von ca. zwei Jahrzehnten rasch auf etwa das Niveau von 1940 ab. Die Gletscherausdehnung sank aber aufgrund des nur kurzen Zeitraums bis zu neuerlich positiven Haushaltsjahren vermutlich kaum auf ein entsprechendes Ausmaß ab. Die den „1600“er Gletscherhochstand vorbereitende Massenzunahme begann nach der dendroklimatologischen Rekonstruktion in den 1570er Jahren und wurde nur in den 1580er Jahren kurz unterbrochen. Pfister (1985: 145) konstatiert in guter zeitlicher Übereinstimmung für die Jahre 1568–1579 schneereiche Winter, kalte Frühjahre und nasse Sommer. Die Abfolge der Dendro-Massenbilanzen in diesem Zeitraum entspricht auch den von Zumbühl (1980) rekonstruierten Lagenänderungen des Unteren Grindelwaldgletschers (Fig. 16).

4.4 ZUSAMMENFASSUNG

Der Vergleich der dendroklimatologisch rekonstruierten Massenbilanzreihe des Hintereisferners mit Volums- und Größenänderungen von Alpengletschern seit dem Spätmittelalter belegt eine insgesamt gute Übereinstimmung. Alle bekannten Gletscherhochstandsphasen zeichnen sich auch in der Summenkurve der Dendro-Massenbilanzen als Spitzen ab. Auch die quantitative Abschätzung der Gletscherschwankungen, besonders die Feststellung der Gletscherminima, erscheint zufriedenstellend. Anzunehmen ist allerdings, daß die Volumsschwankungen des Hintereisferners während der neuzeitlichen Gletscherhochstandsperiode durch die dendroklimatologische Rekonstruktion etwas unterschätzt werden.

Der Zeitraum ab dem Jahr 1400 läßt sich in drei Abschnitte gliedern (Fig. 13). Die Periode zwischen etwa 1600 und etwa 1850, die sogenannte „Kleine Eiszeit“, stellt sich als Zeitabschnitt mit relativ geringen Massenbilanzschwankungen auf sehr hohem Niveau dar. Der Zeitraum zwischen 1400 und dem späten 16. Jahrhundert ist gekennzeichnet durch Eisvolumina, die zwischen den Niveaus von 1870 bzw. 1940 liegen. Aufgrund der Dendro-Massenbilanzen ist davon auszugehen, daß zur Mitte des 15. Jahrhunderts, um 1445, das letzte Minimum in der Ausdehnung der Alpengletscher vor der Mitte des 20. Jahrhunderts erreicht wurde, denn die Phase des Minimums der Dendro-Massenbilanzen um 1560 dauerte sicherlich nicht genügend lange an, um einen Rückgang der Gletscherausdehnung auf entsprechendes Niveau zu ermöglichen. Der dritte Zeitabschnitt ist die bis heute andauernde Phase des Volumsverlustes seit „1850“, der am Hintereisferner nur etwa 1890/1920 deutlich unterbrochen wurde.

Der starke Eismassenrückgang ab etwa 1940 ist für den hier untersuchten Zeitraum ab dem Jahr 1400 singular. Der Einbezug von Arbeiten, die für das 13. und 14. Jahrhundert Gletschervorstöße in den Alpen nachweisen (Patzelt 1990, Zumbühl und Holzhauser 1988), welche zumindest teilweise Hochstandsniveau erreichten, verstärkt den Eindruck einer vom Trend der vorhergehenden Jahrhunderte abweichenden Entwicklung in der Gegenwart.

DANK

Gernot Patzelt hat das Entstehen dieser Arbeit in vielfältiger Art und Weise, sei es durch Hilfe bei Feldarbeiten, sei es durch Mitteilungen und Bildmaterial, von Anfang an gefördert und unterstützt, wofür ich ihm herzlich danke. Für die bereitwillige Hilfe und die Möglichkeit zur Benützung des Jahringmeßgerätes danke ich Sigmar Bortenschlager, Botanisches Institut der Universität Innsbruck. Gerhard Markl, Meteorologisches Institut der Universität Innsbruck, sei für die freundliche Überlassung unpublishierter Daten gedankt. Die Drucklegung der Bilddarstellungen wurde von der Vereinigung Österreichischer Industrieller, Landesgruppe Tirol, und vom Daniel Swarovski – Leopold Franzens Universität Innsbruck-Förderungs fonds unterstützt, wofür an dieser Stelle gedankt wird.

LITERATUR

- Becker, B., 1991: Dendrochronologische Datierungen von Nadelhölzern (Tanne, Fichte, Kiefer) in Süddeutschland. Dendrochronologische Datierung von Nadelhölzern in der Hausforschung – Süddeutschland und angrenzende Gebiete. Internationales Symposium im Freilichtmuseum des Bezirkes Oberbayern an der Glentleiten 18. Mai 1990. Schriftenreihe des Freundeskreises Freilichtmuseum Südbayern e. V., 10: 7–22.
- Bircher, W., 1982: Zur Gletscher- und Klimageschichte des Saastales. Diss. Univ. Zürich, 233 S.
- Blümcke, A. und H. Hess (1899): Untersuchungen am Hintereisferner. Wissenschaftliche Ergänzungshefte zur Zeitschrift des D. u. Ö. A. V. 1/2, München, 87 S.
- Böhm, R., R. Hammer und J. Strobl, 1983: Analyse der Veränderungen von drei benachbarten alpinen Gletschern in der Goldberggruppe der Hohen Tauern seit 1930. Mitteilungen der Österreichischen Geographischen Gesellschaft; 125: 116–151.
- Brunner, K. und H. Rentsch, 1972: Die Änderungen von Fläche, Höhe und Volumen am Vernagt- und Guslarferner 1889 – 1912 – 1938 – 1969. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 7: 11–25.
- Chen, J. und M. Funk (1990): Mass balance of the Rhone Glacier during 1882/83–1986/87. Journal of Glaciology, 36: 199–209.
- Eckstein, D. und R. W. Aniol, 1981: Dendroclimatological reconstruction of the summer temperatures for an alpine region. Dickenwachstum der Bäume – Symposium Innsbruck 9.–12. 9. 1980, Mitteilungen der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien, 142/2: 391–398.
- Finsterwalder, Rich., 1953: Die zahlenmäßige Erfassung des Gletscherrückgangs an Ostalpengletschern. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 2/2: 189–239.
- Finsterwalder, Rüd. und H. Rentsch, 1980: Zur Höhenänderung von Ostalpengletschern im Zeitraum 1969–1979. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 16/1: 111–115.
- Fliri, F., 1964: Zur Witterungsklimatologie sommerlicher Schneefälle in den Alpen. Wetter und Leben, 16: 1–11.
- Frenzel, B. und I. Maisch, 1981: Klimatische Analyse der Jahringbreitenschwankungen an der alpinen Waldgrenze. Dickenwachstum der Bäume – Symposium Innsbruck 9.–12. 9. 1980, Mitteilungen der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien, 142/2: 399–416.
- Graherr, G., 1980: Jahringuntersuchungen in Westtirol. Diss. Univ. Innsbruck, 100 S.
- Greuell, W., 1989: Glaciers and Climate. Diss. Univ. Utrecht, 181 S.
- Groß, G., 1987: Der Flächenverlust der Gletscher in Österreich 1850 – 1920 – 1969. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 23/2: 131–141.
- Grosser, D., 1977: Die Hölzer Mitteleuropas. Berlin/Heidelberg/New York (Springer), 208 S.
- Grove, J. M., 1988: The Little Ice Age. London/New York (Methuen), 498 S.

- Havranek, W. M., 1981: Stamatmung, Dickenwachstum und Photosynthese einer Zirbe (*Pinus cembra* L.) an der Waldgrenze. Dickenwachstum der Bäume – Symposium Innsbruck 9.–12. 9. 1980, Mitteilungen der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien, 142/2: 443–467.
- Hess, H., 1917: Die Gletscher des Rofentales. Zeitschrift für Gletscherkunde, 10/3: 144–166.
- Hess, H., 1924: Der Hintereiserner 1891 bis 1922. Zeitschrift für Gletscherkunde, 13/4–5: 145–203.
- Hoinkes, H., 1971: Über Beziehungen zwischen der Massenbilanz des Hintereiserners (Ötztaler Alpen, Tirol) und Beobachtungen der Klimastation Vent. Annalen der Meteorologie, N.F. 5: 259–264.
- Hoinkes, H. und R. Steinacker, 1975: Zur Parametrisierung der Beziehung Klima – Gletscher. Rivista Italiana di Geofisica, 1: 97–104.
- Holzhauser, H., 1984: Zur Geschichte der Aletschgletscher und des Fieschergletschers. Physische Geographie 13, Zürich, 448 S.
- Hüsken, W., 1994: Dendrochronologische und ökologische Studien an Nadelhölzern im Gebiet der Prager Dolomiten (Südtirol/Italien). Dissertationes Botanicae 215, Berlin/Stuttgart (Borntraeger), 183 S.
- Karlén, W., 1984: Dendrochronology, mass balance and glacier front fluctuations in northern Sweden. Mörner, N. A., und W. Karlén (Hrsg.): Climatic Change on a Yearly to Millennial Basis, Dordrecht/Boston/Lancaster (D. Reidel Publishing Company), S. 263–271.
- Kuhn, M., 1980: Begleitworte zur Karte des Hintereiserners 1979, 1: 10.000. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 16/1: 117–124.
- Kuhn, M., G. Kaser, G. Markl, U. Nickus und F. Pellet, 1985a: Hydrologische und glaziologische Untersuchungen im Ötztal 1952–1982. Unveröff. Manuskript, Innsbruck, 104 S.
- Kuhn, M., G. Markl, G. Kaser, U. Nickus, F. Obleitner, und H. Schneider, 1985b: Fluctuations of climate and mass balance: different responses of two adjacent glaciers. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 21: 409–416.
- Lamarche, V. C. und H. C. Fritts, 1971: Tree Rings, Glacial Advance and Climate in the Alps. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 7/1–2: 125–131.
- Loris, K., 1981: Dickenwachstum von Zirbe, Fichte und Lärche an der alpinen Waldgrenze / Patscherkofel. Ergebnisse der Dendrometermessungen 1976/79. Dickenwachstum der Bäume – Symposium Innsbruck 9.–12. 9. 1980, Mitteilungen der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien, 142/2: 417–441.
- Maisch, M., 1992: Die Gletscher Graubündens. Zürich, 2 Bde, 324 + 128 S.
- Matthews, J. A., 1976: "Little Ice Age" palaeo-temperatures from high altitude tree growth in S. Norway. Nature, 264: 243–245.
- Müller, H. N., 1980: Jahrringwachstum und Klimafaktoren. Angewandte Pflanzensoziologie, 25, 81 S.
- Nicolussi, K., 1990: Die Beziehung zwischen dem Jahrringwachstum von Zirben an der Waldgrenze und dem Massenhaushalt des Hintereiserners. Diss. Naturwiss. Fak. Univ. Innsbruck, 156 S.
- Nicolussi, K., 1993: Bilddokumente zur Geschichte des Vernagfjernes im 17. Jahrhundert. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 26/2 (1990): 5–57.
- Nicolussi, K., S. Bortenschlager und Ch. Körner (1995): Increase in tree-ring width in subalpine *Pinus cembra* from the central Alps that may be CO₂-related. Trees 9: 181–189.
- Österreichisches Gletscherinventar (Stand 1969): Institut für Hochgebirgsforschung, Univ. Innsbruck.
- Patzelt, G., 1973: Die neuzeitlichen Gletscherschwankungen in der Venedigergruppe (Hohe Tauern, Ostalpen). Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 9/1–2: 5–57.
- Patzelt, G., 1990: Gurgler Ferner. Patzelt, G., S. Bortenschlager, K. Nicolussi und G. Poscher: Neue Ergebnisse zur Holozänforschung in Tirol. Exkursionstagung vom 29. 7.–3. 8. 1990, Unveröff. Manuskript.
- Patzelt, G. und S. Bortenschlager, 1973: Die postglazialen Gletscher- und Klimaschwankungen in der Venedigergruppe (Hohe Tauern, Ostalpen). Zeitschrift für Geomorphologie N.F., Suppl.Bd., 16: 25–72.
- Pfister, Ch., 1985: Das Klima der Schweiz 1525–1860 und seine Bedeutung in der Geschichte von Bevölkerung und Landwirtschaft. Bd. 1: Klimageschichte der Schweiz 1525–1860. Academica Helvetica 6, Bern/Stuttgart, 184 S.
- Renner, F., 1982: Beiträge zur Gletschergeschichte des Gotthardgebietes und dendroklimatologische Analysen an fossilen Hölzern. Diss. Univ. Zürich, 180 S.
- Reynaud, L., 1977: Glacier fluctuations in the Mont Blanc area (French Alps). Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 13: 155–166.

- Richter, E., 1891: Geschichte der Schwankungen der Alpengletscher. Zeitschrift des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins, 22: 1–74.
- Röthlisberger, F., P. Haas, H. Holzhauser, W. Keller, W. Bircher und F. Renner, 1980: Holocene Climatic Fluctuations – Radiocarbon Dating of Fossil Soils (fAh) and Woods from Moraines and Glaciers in the Alps. Geography in Switzerland, Geographica Helvetica, 35/5: 21–52.
- Serre, F., 1978: The dendroclimatological value of the European Larch (*Larix decidua* Mill.) in the French Maritime Alps. Tree-Ring Bull., 38: 25–34.
- Schlagintweit, H. und A., 1850: Untersuchungen über die Physikalische Geographie der Alpen. Leipzig (Barth), 398 S.
- Schweingruber, F. H., 1983: Der Jahrring: Standort, Methodik, Zeit und Klima in der Dendrochronologie. Bern/Stuttgart (P. Haupt), 234 S.
- Scuderi, L. A., 1987: Glacier variations in the Sierra Nevada, California, as related to a 1200 year-tree-ring chronology. Quaternary Research, 27: 220–231.
- Siebenlist-Kerner, V., 1984: Der Aufbau von Jahrringchronologien für Zirbelkiefer, Lärche und Fichte eines alpinen Hochgebirgsstandortes. Dendrochronologia, 2: 9–29.
- Sonklar, K., 1860: Die Oetzthaler Gebirgsgruppe. Gotha (J. Perthes), 292 S.
- Span, N., 1993: Untersuchung der Dynamik des Hintereisferners zwischen 1894 und 1992. Dipl. Arb. Naturwiss. Fak. Univ. Innsbruck. 110 S.
- Steinacker, R., 1979: Rückrechnung des Massenhaushaltes des Hintereisferners mit Hilfe von Klimadaten. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 15/1: 101–104.
- Tiroler Schützenzeitung (1857), Innsbruck.
- Zumbühl, H. J., 1980: Die Schwankungen der Grindelwaldgletscher. Denkschriften der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft, 92, Basel/Boston/Stuttgart (Birkhäuser), 279 S.
- Zumbühl, H. J., B. Messerli und Ch. Pfister, 1983: Die Kleine Eiszeit. Gletschergeschichte im Spiegel der Kunst. Katalog zur Sonderausstellung des Schweizerischen Alpen Museums Bern und des Gletschergarten-Museums Luzern. 9. 6.–14. 8. 1983 Luzern, 24. 8.–16. 10. 1983, Bern, 61 S.
- Zumbühl, H. J. und H. Holzhauser, 1988: Alpengletscher in der Kleinen Eiszeit. Die Alpen (Sonderheft zum 125jährigen Jubiläum des SAC), 64/3: 129–322.

Manuskript erhalten am 22. November 1994, revidiert am 19. April 1995

Anschrift des Verfassers: Dr. K. Nicolussi
 Institut für Hochgebirgsforschung
 Universität Innsbruck
 Innrain 52
 A-6020 Innsbruck