

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Band: 89 (1997)
Heft: 5-6

Artikel: Griesgletscher
Autor: Vieli, Andreas / Funk, Martin / Blatter, Heinz
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-940181>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 15.10.2024

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Griesgletscher

Berechnungen des Gletscherfließens und Perspektiven für die Zukunft

Andreas Vieli, Martin Funk, Heinz Blatter

Zusammenfassung

Glaziologische und hydrologische Abklärungen vor dem Bau des Griesstauwerkes (1962–1966) im Wallis ergaben, dass ein Vorstoss des Griesgletschers bis zur Sperrstelle in den folgenden 50 Jahren kaum zu erwarten war. Mit dem Bau des Stauwerkes begann ein glaziologisch-hydrologisches Messprogramm im Einzugsgebiet des Griessees. Aus diesen Messungen liegt jetzt eine 34jährige Massenbilanzserie des Griesgletschers vor, mit welcher die Frage nach dem zukünftigen Verhalten des Griesgletschers mit einem neu entwickelten Gletscherfließmodell weiter untersucht wird. Es werden Ergebnisse einer Sensitivitätsstudie der Gletscherschwankungen bis ins Jahr 2100 präsentiert, basierend auf mehreren Klimaszenarien. Die Modellresultate geben eine quantitative Bestätigung der früheren Voraussagen.

Glacier de Gries: Modélisation de son écoulement et calcul de son comportement futur

Une étude glaciologique et hydrologique effectuée avant la construction du barrage de Gries (1962–1966) a montré que la probabilité d'une avance du glacier de Gries durant les 50 années suivantes était très faible. Avec la construction du barrage, un programme de mesures glacio-hydrologiques a été mis en route afin de pouvoir suivre l'évolution des réserves de glace dans le bassin versant de la retenue. Ces mesures ont permis d'établir une série de bilans de masse annuels du glacier de Gries portant sur 34 années consécutives. A l'aide de cette série, la question du comportement futur probable du glacier est étudiée avec un modèle numérique d'écoulement glaciaire récemment développé. Les résultats d'une étude de sensibilité sur l'évolution probable du glacier jusqu'à l'an 2100, obtenus sur la base de plusieurs scénarios d'évolution climatique, sont présentés. Les prévisions faites ont pu être vérifiées.

Gries glacier: Glacier flow modeling and possible changes in the future

Prior to the construction of the Gries dam (1962–1966) in the Wallis, a combined glaciological and hydrological study showed a small probability of a glacier advance during the next 50 years. With the construction of the dam, glaciological and hydrological measurements were started for glacier change monitoring purposes. We now have a 34-years series of mass balance results from the Gries glacier. These results are used to model past and futures glacier changes with a recently developed numerical glacier flow model. We present results of a sensitivity study of possible glacier changes up to the year 2100 based on several climate scenarios. The model provides quantitative confirmation of the earlier projection.

1. Einleitung

Im Alpenraum wurden schon seit Mitte des 19. Jahrhunderts Veränderungen der Ausdehnung von Gletschern systematisch beobachtet. Allerdings hat man sich meist auf die Messung von Längenänderungen beschränkt. Der Zu-

sammenhang zwischen Klima und Gletscherschwankungen ist zwar erkannt worden, umfassende Untersuchungen darüber existieren aber kaum. Auch der Griesgletscher (Oberwallis) war in den letzten 150 Jahren starken Veränderungen unterworfen. Im Zusammenhang mit dem Bau des Griesstauwerkes im Jahr 1961 hat sich die Frage gestellt, wie sich der Griesgletscher in Zukunft verhalten wird. In einer Untersuchung im Auftrag der Kraftwerke Aegina AG hat Kasser (1961) eine Wahrscheinlichkeit von 5 % angegeben, mit welcher mit einem Vorstoss des Gletschers bis zur Staumauer in den folgenden 50 Jahren zu rechnen ist. Die Bauarbeiten für das Kraftwerk am Gries wurden 1964 gestartet und waren 1966 abgeschlossen.

Mit der Planung des Stauwerkes im Jahre 1961 wurde ein glaziologisch-hydrologisches Messprogramm gestartet, welches unter anderem jährliche Massenbilanzmessungen enthält. Die Datengrundlagen für die Untersuchungen von Kasser (1961) haben sich im wesentlichen auf Abfluss- und Niederschlagsmessungen im Untersuchungsgebiet von 1956 bis 1961 beschränkt. Zudem haben seine Berechnungen auf einem einfachen eindimensionalen Fließmodell basiert, welches eine stationäre Gletschergeometrie voraussetzt. Im Jahr 1980 hat Bind-schadler (1980) weitere Untersuchungen über das zukünftige Verhalten des Griesgletschers durchgeführt. Er hat ein eindimensionales numerisches Modell benutzt, welches die Kontinuitätsgleichung des Gletscherfließens löst.

Mit gemessenen Daten aus der Beobachtungsperiode von 1961 bis 1978 hat er die im Modell verwendeten Parameter geeicht und das zukünftige Verhalten des Griesgletschers genauer untersucht. Dieses Modell vernachlässigt die Normalspannungsgradienten, welche bei Talgletschern für das Fließen relevant sind.

Nun sind 34 Jahre seit Beginn der Massenbilanzmessungen vergangen, und ein neues zweidimensionales numerisches Modell für Talgletscher ist entwickelt worden, welches Normalspannungsgradienten bei der Berechnung der Geschwindigkeits- und Spannungsfelder berücksichtigt (Vieli, 1996). Mit der vorhandenen Massenbilanzreihe des Griesgletschers von 1961 bis 1995 werden Modellrechnungen mit Messungen verglichen und diskutiert. Anhand von Klimaszenarien des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) wird die Evolution des Griesgletschers für die nächsten 100 Jahre berechnet. Zum Schluss wird noch abgeschätzt, welche Auswirkungen die berechneten Gletscherveränderungen für den Gebietsabfluss im Einzugsgebiet des Griessees haben können.

2. Das Untersuchungsgebiet und Datengrundlagen

Der Griesgletscher liegt zuoberst im Aeginatal (Oberwallis) an der Landesgrenze Schweiz-Italien. Er fließt vom Gipfel des Blinnenhorns (3373 m ü. M.) fast geradlinig über eine Steilstufe nach Nordosten zum Griesstausee, der den kleinen natürlichen Griessee nach dem Bau der Staumauer im Jahr 1966 ersetzt hat (Bilder 1 und 2). Mitte des 19. Jahrhunderts erstreckte sich die Gletscherzunge gut einen Kilometer über die Sperrstelle hinaus. Erst gegen Mitte dieses Jahrhunderts schmolz das Zungenende ins oberste Talbecken hinter die Sperrstelle zurück. Seine aktuelle Länge ist rund 5 km bei einer Gesamtfläche von 6,22 km² (Bild 3). Nach dem ersten Aufstau im Jahr 1966 wurde die Gletscherzunge überflutet und zum Teil abgetragen. In der Folge endete der Gletscher im Stausee mit einer Kalbungsfront, die sich seither kontinuierlich zurückgezogen hat und seit 1996 nicht mehr in Kontakt mit dem Stausee ist (Bilder

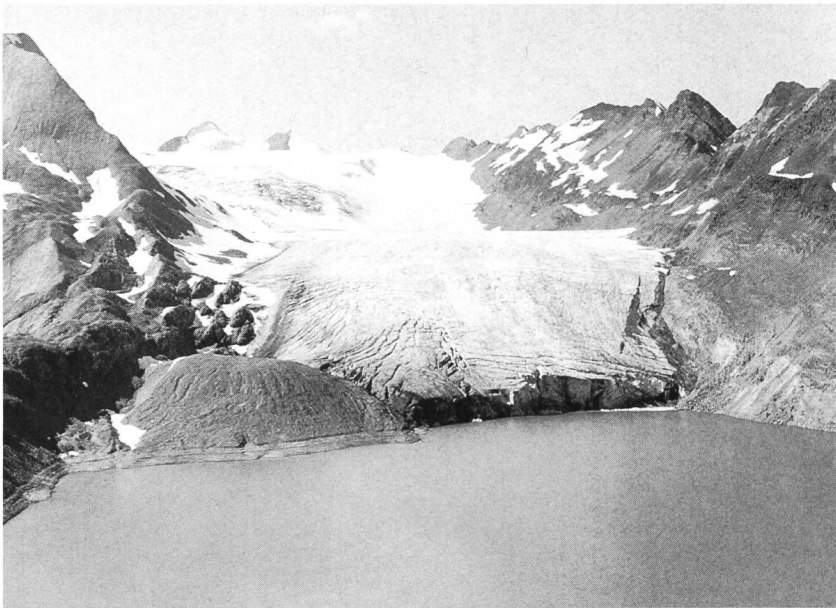


Bild 1. Ansicht des Griesgletschers mit vorgelagertem Griesstausee (2. Oktober 1980).



Bild 2. Ansicht des Griesgletschers vor dem Aufstau (10. August 1964).

4 und 5). Zusammen mit dem Bau der Staumauer wurde im Auftrag der Kraftwerk Aegina AG ein Messprogramm gestartet. Es beinhaltet:

- jährliche Massenbilanzmessungen,
- jährliche photogrammetrische Luftaufnahmen zur Bestimmung der Oberflächen- und Längenänderung des Griesgletschers,
- Geschwindigkeitsmessungen an der Gletscheroberfläche,
- Niederschlagsmessungen,
- Zuflussmessungen.

Die Beobachtungsperiode umfasst heute 34 Jahre, und das Messprogramm wird weitergeführt. Die jährlichen Massenbilanzmessungen bilden die Grundlage für die hier durchgeführten Untersuchungen. In Bild 6 wird die Zeitreihe der jährlichen Massenbilanzen des Griesgletschers der Periode 1961 bis 1995 und in Bild 7 die Summenkurve davon dargestellt (Funk et al., 1997). Ab 1980 wird ein stark negativer Trend sichtbar. Ergänzend sind für die Perioden 1961–1979, 1979–1986 und 1986–1991 die Massenbilanzen über die Volumenänderung mit der geodätischen Me-

thode bestimmt worden (Bild 7). Für die Jahre 1961, 1986 und 1991 stehen digitale Geländemodelle der Gletscheroberfläche aus photogrammetrischer Luftbildauswertung zur Verfügung. Aus Radio-Echolot-Sondierungen ist die Topographie des Gletscherbettes an 11 Querprofilen bekannt. Die Messgenauigkeit liegt bei $\pm 5\%$ der Eismächtigkeit. Zwischen den Querprofilen wird das Gletscherbett interpoliert, womit dort grössere Ungenauigkeiten auftreten können. Zur Füllung dieser Lücken sind noch weitere Radar-Sondierungen geplant.

Für die Längenänderungen des Griesgletschers sind Daten seit 1847 vorhanden. Grundlagen dazu sind topographische Karten aus den Jahren 1847, 1891, 1923 und 1957 sowie jährliche Vermessungen des Gletscherendes seit 1961 (Bilder 3 und 8).

Die bisher gemessenen Jahresgeschwindigkeiten an der Oberfläche sind für einen Vergleich mit Modellrechnungen problematisch. Die Fließgeschwindigkeit eines festen Punktes auf dem Gletscher setzt sich aus Eisdeformation und Gleiten am Gletscherbett zusammen. In Zeitperioden mit starker Schmelze (Frühling/Sommer) ist der Gleitanteil

der Fliessgeschwindigkeit substantiell, im Herbst und Winter, wenn keine Schmelze auftritt, wird er kleiner bis vernachlässigbar. Gemessene Jahresgeschwindigkeiten enthalten deshalb sowohl einen Eisdeformations- wie auch einen Gleitanteil. Im entwickelten numerischen Modell (Kap. 3) wird nur die Eisdeformation und kein Gleiten am Bett behandelt. Mit Messungen der Fliessgeschwindigkeiten in Zeitperioden minimaler Schmelze (Herbst/Winter) wird vor allem die Deformationsgeschwindigkeit und kaum basales Gleiten registriert. Man spricht dann von Wintergeschwindigkeiten. Solche Wintergeschwindigkeiten sind erstmals im Winter 1996/97 an 30 Pegeln in 10 Querprofilen über den ganzen Gletscher gemessen worden.

3. Das numerische Modell

Das neu entwickelte numerische Modell berechnet die Evolution der Gletscheroberfläche für eine vorgegebene Massenbilanz (Vieli, 1996). Es handelt sich um ein zweidimensionales Modell, welches speziell für Talgletscher entwickelt worden ist und entlang einer Fliesslinie des Gletschers läuft (Bild 3). Für die Berechnung des Geschwindigkeits- und Spannungsfeldes des Gletschers wird ein Algorithmus von Blatter (1995) verwendet, welcher Normalspannungsgradienten berücksichtigt. Man spricht von einer Approximation 1. Ordnung im Skalierungsquotient ϵ , welcher das Verhältnis zwischen einer typischen Gletscherdicke H und einer typischen Gletscherausdehnung L bezeichnet ($\epsilon \approx H/L$). Bei Eisschildmodellierungen (z. B. Grönland) werden Terme 1. Ordnung in ϵ im allgemeinen vernachlässigt, da die Skalierungsgrösse ϵ sehr klein wird ($\epsilon \approx 0,001$). Bei einem alpinen Talgletscher wird ϵ bis zu einem Faktor 100 grösser (Bsp. Griesgletscher: $\epsilon \approx 0,05$). Damit sind die Terme 1. Ordnung in ϵ nicht mehr vernachlässigbar und müssen berücksichtigt werden. Für die Berechnung der Geschwindigkeits- und Spannungsfelder wurden folgende Annahmen getroffen:

- kein Gleiten am Gletscherbett,
- der Gletscher ist temperiert, das heisst, die Temperatur des Eises liegt überall am Druckschmelzpunkt,
- die Fliessparameter im verwendeten Glen'schen Fliessgesetz sind $A = 0,1 \text{ Jahr}^{-1} \text{bar}^{-3}$ und $n = 3$ (Paterson, 1994).

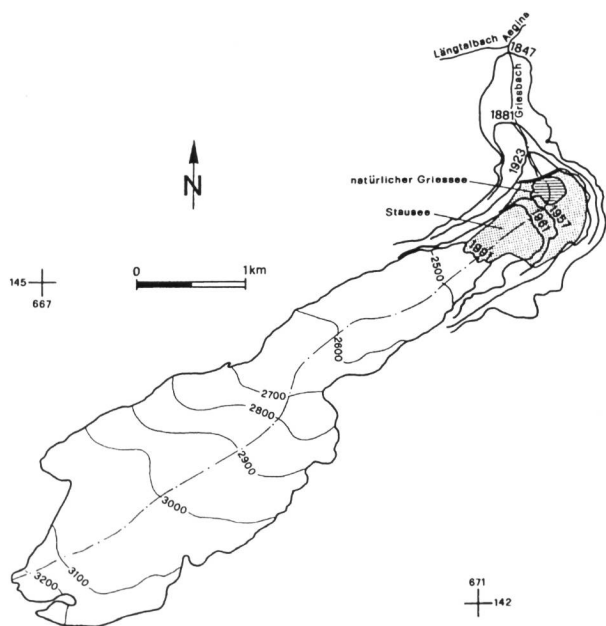


Bild 3. Karte des Griesgletschers mit Oberflächentopographie und Lage des Gletscherendes von 1847 bis 1991. Die verwendete Fliesslinie ist mit - - - - bezeichnet.



Bild 4. Kalbungsfront des Griesgletschers nach dem Aufstauen des Stausees (24. Juli 1968).



Bild 5. Gletscherfront des Griesgletschers im Jahre 1990, der Gletscher hat stellenweise den Kontakt mit dem See verloren (10. August 1990).

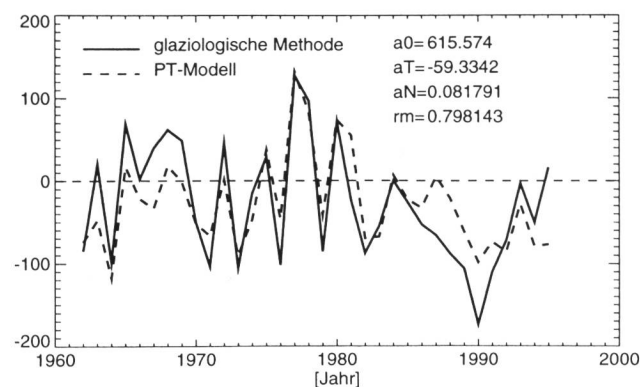


Bild 6. Massenbilanzen für den Griesgletscher von 1961 bis 1995 bestimmt mit der glaziologischen Methode sowie statistisch aus Temperatur- und Niederschlagsmessungen (PT-Modell). a_0 , a_T und a_N bezeichnen Koeffizienten des Regressionsmodells zwischen Klimafaktoren und Massenbilanz (siehe Kasten S. 114), r_m ist der multiple Korrelationskoeffizient.

Die zeitliche Evolution der Gletscheroberfläche wird mit der Gleichung

$$\frac{\partial S}{\partial t} = b - \frac{\partial(H\bar{u})}{\partial x} \quad (1)$$

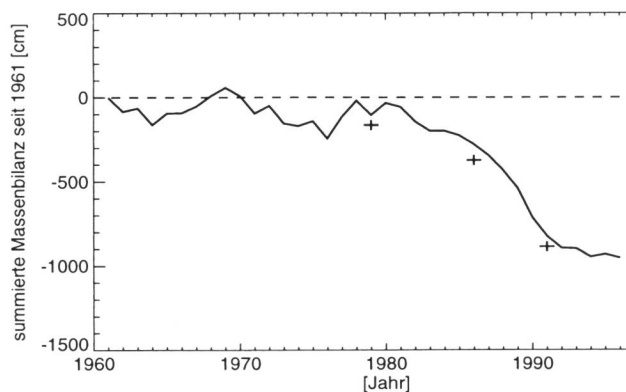


Bild 7. Summenkurve der jährlichen Massenbilanzen seit 1961. Die Kreuze (+) stehen für die Ergebnisse der photogrammetrischen Auswertungen der Perioden 1961–1979, 1979–1986, 1986–1991.

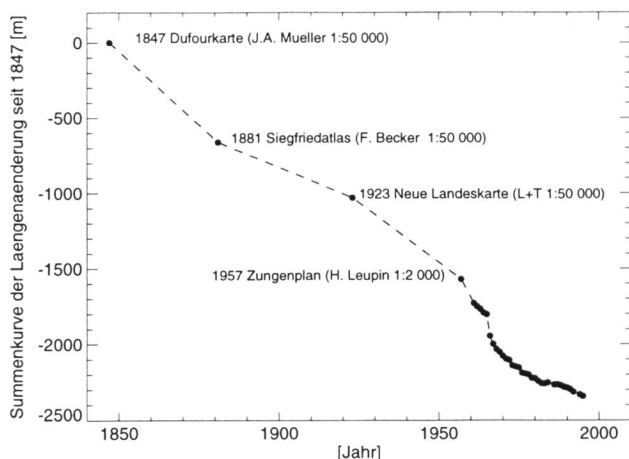


Bild 8. Längenänderung des Griesgletschers von 1847 bis 1995.

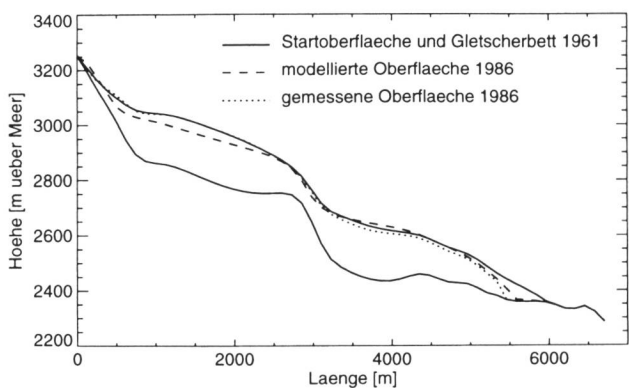


Bild 9. Vergleich zwischen modellierter und gemessener Oberfläche im Jahre 1986 im Längsprofil entlang der betrachteten Fliesslinie.

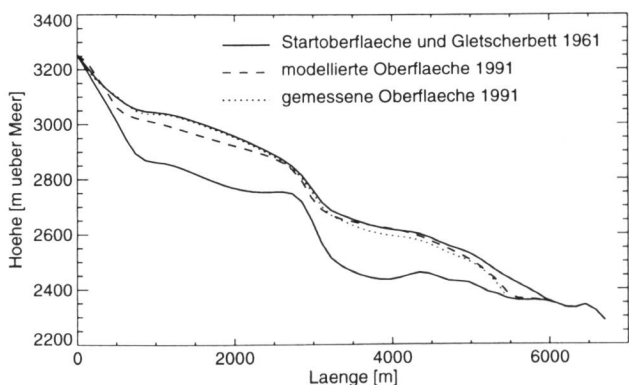


Bild 10. Vergleich zwischen modellierter und gemessener Oberfläche im Jahre 1991 im Längsprofil entlang der betrachteten Fliesslinie.

beschrieben, wobei S die Eisoberfläche, b die Massenbilanz, \bar{u} die vertikal gemittelte horizontale Geschwindigkeit, $(H\bar{u})$ den Fluss von Eis durch ein vertikales Profil der Dicke H und x die horizontale Komponente entlang einer Fliesslinie bezeichnet. Die Gleichung 1 wird mit der Methode der finiten Differenzen gelöst (Hirsch, 1988). Dazu wird ein zweidimensionales Gitter entlang der Fliesslinie verwendet. Topographie von Gletscherbett und Oberfläche sowie die jährliche Massenbilanz bilden die Eingabe für das Evolutionsmodell. Für eine vorgeschriebene Massenbilanzzeitreihe berechnet das Modell die Evolution der Oberflächentopographie sowie das Geschwindigkeits- und Spannungsfeld im Gletscher. Die horizontale Gitterweite bildet einen limitierenden Faktor für das numerische Modell. Die verwendete Gitterweite liegt bei 124 m, könnte jedoch auf Kosten des Rechenaufwandes noch kleiner gesetzt werden. Die vertikale Gitterweite liegt bei rund 1 m.

4. Vergleich von Modellrechnungen mit Messungen

Die jährlichen Massenbilanzen für den Griesgletscher stehen parametrisiert mit der Höhe für die Beobachtungsperiode 1961 bis 1995 zur Verfügung (Funk et al., 1997). Die Zeitreihe der jährlichen Massenbilanzen ist in Bild 6 dargestellt. Damit sind Modellrechnungen für den Griesgletscher von 1961 bis 1995 durchgeführt worden. Vorhandene digitale Geländemodelle für die Gletscheroberfläche aus photogrammetrischen Auswertungen der Jahre 1986 und 1991 erlauben eine Überprüfung der Modellergebnisse. Zudem können Oberflächengeschwindigkeiten aus Pegelmessungen mit den berechneten Geschwindigkeiten verglichen werden.

Der Vergleich von modellierter und gemessener Oberfläche wird für die Jahre 1986 und 1991 in den Bildern 9 und 10 dargestellt. Die Differenzen sind für beide Jahre mit ± 40 m recht gross, für beide Jahre aber fast identisch (Bild 11). Sie können mehrere Ursachen haben:

- Die gewählte Fliesslinie ist nicht ganz korrekt, das heisst, die Geschwindigkeitsvektoren verlaufen nicht immer exakt tangential zur angenommenen Fliesslinie.
- In einem zweidimensionalen Modell kann Kompression oder Extension von Eis quer zur Fliesslinie nicht berücksichtigt werden.
- Die dreidimensionale Geometrie des Gletscherbettes und damit der Einfluss vom Gletscherrand sowie allfällige Richtungswechsel werden nicht berücksichtigt.
- Unsicherheiten in der Betttopographie, vor allem im Bereich der Steilstufe, beeinflussen das Fliessfeld.
- Der verwendete Parameter A im Eisfliessgesetz ($A = 0,1 \text{ Jahr}^{-1}\text{bar}^{-3}$) ist vermutlich zu hoch. Für den Griesgletscher ist dieser Wert nicht direkt bestimmt worden, allerdings hat eine Studie am Unteraargletscher (Gudmundsson, 1994) einen Wert von $A = 0,080 \text{ Jahr}^{-1}\text{bar}^{-3}$ ergeben. Auch Hubbard und Blatter (persönliche Mitteilung) haben für den Glacier d'Arolla einen ähnlichen Wert erhalten.

Bild 12 zeigt den Verlauf von gemessenen und modellierten Oberflächengeschwindigkeiten entlang der Fliesslinie. Die Messungen sind Oberflächengeschwindigkeiten von Pegeln in der Periode Oktober 1996 bis Januar 1997 (Wintergeschwindigkeiten). Zu dieser Jahreszeit ist der Gleitanteil klein, und somit können die Messergebnisse mit den Modellierungen verglichen werden. Die modellierten Geschwindigkeiten sind etwas höher als die gemessenen. Ein Grund dafür ist, dass die dreidimensionale Geometrie hier nicht berücksichtigt worden ist.

Betrachtet man die berechnete Längenänderung des Griesgletschers von 1961 bis 1995 und vergleicht sie mit den Messergebnissen, ist eine gute Übereinstimmung festzustellen (Bild 13), abgesehen von den Stufen, bedingt durch die Gitterweite. Im Jahr 1966 ist durch das erstmalige Aufstauen des Griessees der vorderste Teil des Gletschers aufgeschwommen, hat sich gelöst und somit einen Sprung in der Längenänderung erzeugt. Für die Jahre 1966 bis etwa 1980 wurde der Rückzug durch Kalben an der Gletscherfront leicht beschleunigt (Bild 4). Das Aufstauen des Griessees und der damit einsetzende Kalbungsprozess wurden im Modell nicht berücksichtigt. Somit ist der beobachtete, etwas zu langsame Rückzug zu erwarten. Die berechnete Rückzugsdistanz zwischen 1961 und 1995 stimmt mit den Messungen gut überein, da das Gletscherende in den letzten Jahren immer weniger vom See beeinflusst wurde und damit der Kalbungsprozess an Bedeutung verloren hat (Bild 5).

Insgesamt zeigen die Modellrechnungen für den Zeitraum 1961 bis 1995, bis auf die erwähnten Abweichungen, eine gute Übereinstimmung mit den Messungen.

5. Perspektiven für die Zukunft

Bei der Planung des Griesstauwerkes im Jahr 1961 stand die Frage des zukünftigen Verhaltens des Griesgletschers im Vordergrund. Die Perspektive eines Gletschervorstosses wäre für das Stauwerkprojekt eine ungünstige Voraussetzung gewesen. Seit 1961 hat sich der Gletscher kontinuierlich zurückgezogen und das Gletscherende liegt heute über einen Kilometer hinter der Talsperre. Eine direkte Gefährdung der Staumauer durch einen Gletschervorstoss steht heute kaum mehr zur Diskussion. Trotzdem kann man die Frage nach dem zukünftigen Verhalten des Griesgletschers wieder aufwerfen. Das neu entwickelte Modell eröffnet zusammen mit der 34-jährigen Massenbilanzzeitreihe neue Möglichkeiten, dieser Frage nachzugehen. Allerdings wird dafür eine Massenbilanzprognose für die Zukunft benötigt. Mit neuen hochauflösenden Klimamodellen werden solche Prognosen bald möglich sein (A. Ohmura, persönliche Mitteilung). Zurzeit kann die Evolution des Griesgletschers für die nächsten 100 Jahre nur mit einer Sensitivitätsstudie untersucht werden. Damit soll gezeigt werden, wie gross die Gletscherveränderungen sein können, und es soll die wahrscheinlichste Evolution des Griesgletschers diskutiert werden. Mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Zeitreihe der Massenbilanzen von 1961 bis 1995 können Szenarien für die zukünftige Massenbilanz definiert werden. Die Modellrechnungen sollen zeigen, wie sich der Griesgletscher unter diesen Annahmen verhalten wird. Eine weitere Möglichkeit ist die Vorgabe eines Klimaszenarios zusammen mit einer Beziehung zwischen Klimaparametern und Massenbilanz.

Startgeometrie bildet die Gletscheroberfläche von 1991, und die Evolutionsperiode wird auf 106 Jahre gesetzt (1991 bis 2097).

5.1 Evolution unter Vorgabe von Massenbilanzszenarien

In der Beobachtungsperiode von 1961 bis 1995 variiert die gemessene spezifische Massenbilanz zwischen -174 cm/Jahr und $+128 \text{ cm/Jahr}$. Der Mittelwert der letzten 34 Jahre liegt bei $-27,4 \text{ cm/Jahr}$ (Bild 6). Für die Modellrechnungen werden Extremwerte der Massenbilanz aus der Beobachtungsperiode sowie der Mittelwert der letzten 34 Jahre gewählt. Die Resultate der Modellrechnungen sind in den Bildern 14 und 15 dargestellt.

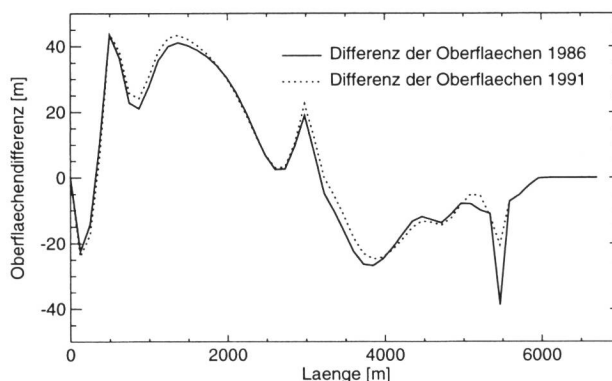


Bild 11. Abweichungen zwischen modellierter und gemessener Oberfläche in den Jahren 1986 und 1991. Die Differenzen sind für beide Jahre beinahe identisch.

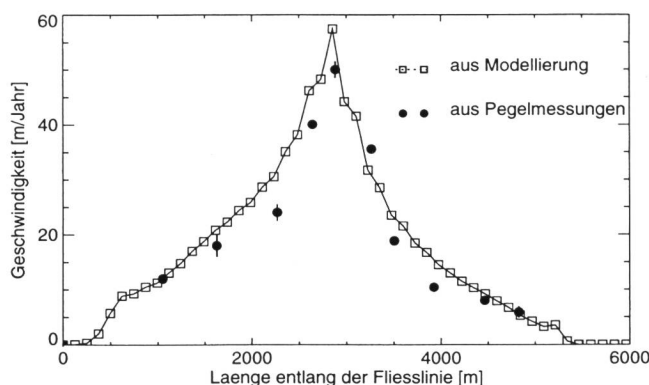


Bild 12. Darstellung der modellierten und an Pegeln gemessenen horizontalen Geschwindigkeiten [m/Jahr] an der Gletscheroberfläche entlang der Fliesslinie. Die Pegelmessungen wurden im Winter 1996/97 durchgeführt.

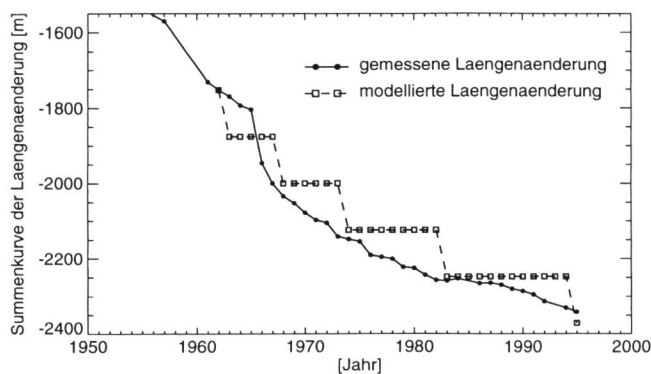


Bild 13. Gemessene und berechnete Längenänderung des Griesgletschers von 1961 bis 1995.

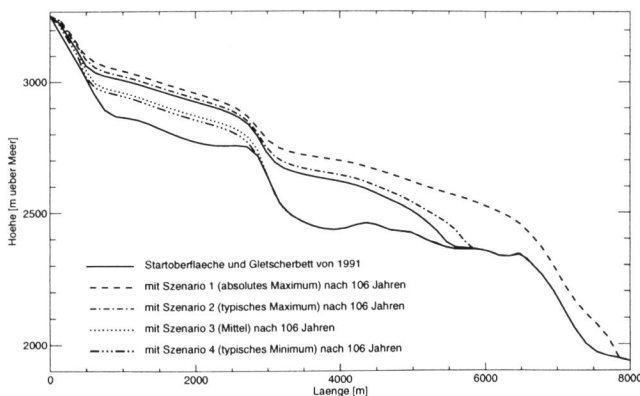


Bild 14. Evolution der Gletscheroberfläche 106 Jahre nach 1991 unter den vorgegebenen Massenbilanzszenarien 1 bis 4.

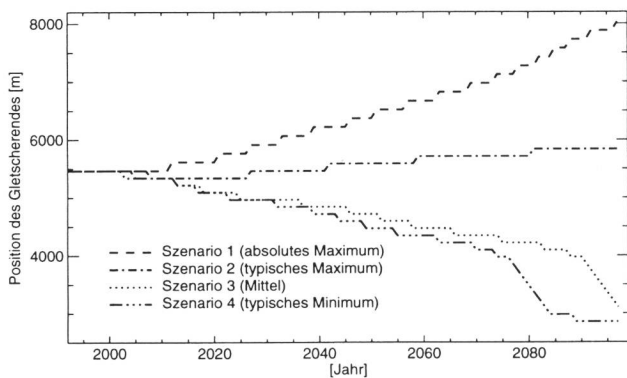


Bild 15. Evolution der Position der Gletscherzunge unter den vorgegebenen Massenbilanzszenarien 1 bis 4.

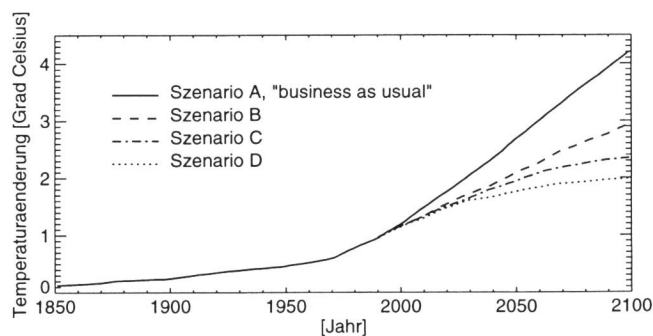


Bild 16. Verlauf der Temperatur gemäss den IPCC-Temperatur-szenarien (NFP31) bis ins Jahr 2100.

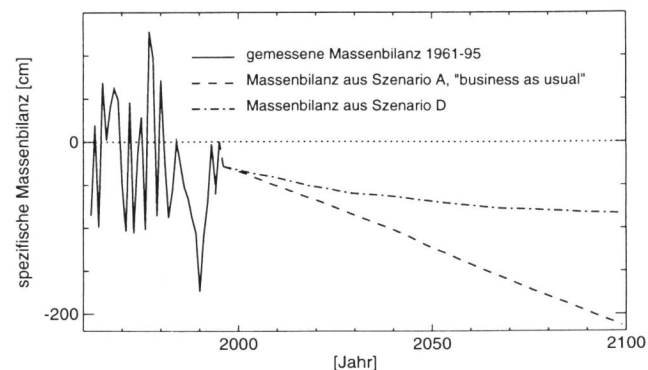


Bild 17. Verlauf der Massenbilanz: gemessen für die Periode 1961 bis 1995 und berechnet unter Annahme der IPCC-Temperatur-szenarien (NFP31) A und D für die Periode 1995–2100.

Szenario 1: Massenbilanz von 1976/77, das absolute Maximum in der Zeitreihe

Unter der Vorgabe von Szenario 1 stösst der Griesgletscher massiv vor, überfährt nach ungefähr 60 Jahren die Position der heutigen Staumauer und erreicht nach 106 Jahren den historischen Stand von 1847. Es muss hier angefügt werden, dass bei diesen Berechnungen weder der Einfluss des Stausees noch der Staumauer berücksichtigt wurden und der starke Richtungswechsel im Fließen des Gletschers vernachlässigt wurde.

Szenario 2: Massenbilanz von 1967/68, ein typisches Maximum in der Zeitreihe

Bei einer sprunghaften Erhöhung der Massenbilanz auf ein typisches Maximum stösst der Gletscher bis ins Jahr 2097 nur ungefähr um 400 m vor. In den ersten 30 Jahren zieht sich der Gletscher erst zurück und stösst dann nur langsam wieder vor (Bild 15). Der Gletscher muss in den ersten 30 Jahren Masse im Zungenbereich aufbauen, bevor er vorstossen kann. Für einen Vorstoss bis ins Jahr 2097 muss die Massenbilanz im Mittel mindestens den Wert von

Szenario 2 während der ganzen Periode beibehalten (also stark positiv sein). Betrachtet man den negativen Trend der Massenbilanz in den letzten 15 Jahren, so erscheint ein solcher Vorstoss im betrachteten Zeitraum sehr unwahrscheinlich.

Szenario 3: mittlere Massenbilanz der Beobachtungsperiode

Mit der mittleren Massenbilanz der letzten 34 Jahre ergibt sich ein kontinuierlicher Rückzug des Gletschers von insgesamt 2,2 km bis ins Jahr 2097. Das Gletscherende würde dann knapp unter der Steilstufe liegen (Bild 15). Auffallend ist der sehr schnelle Rückzug über die Steilstufe in den zehn letzten betrachteten Jahren. Die Eismächtigkeit in der Steilstufe ist, wegen der grossen Gletscherbettneigung und der daraus resultierenden hohen Geschwindigkeiten, deutlich geringer als im unteren und oberen Teil des Gletschers. Zum Zeitpunkt, wo die Gletscherzunge den unteren Rand der Steilstufe erreicht, hat sich die Eisdicke in der Steilstufe auf wenige Meter reduziert, und somit zieht sich der Gletscher sehr schnell über diese Stufe zurück. Oberhalb der Steilstufe wird die Eismächtigkeit auf rund 50 % reduziert.

Szenario 4: Massenbilanz von 1970/71, ein typisches Minimum in der Zeitreihe

Mit Szenario 4 zieht sich der Gletscher etwas schneller zurück als bei Szenario 3. Analog zu Szenario 3 wird ein sehr schneller Rückzug über die Steilstufe beobachtet.

Die Modellrechnungen mit den gewählten Szenarien 1 bis 4 zeigen, dass die heutige Gletschergeometrie weit von einem Gleichgewichtszustand entfernt ist. Sie entspricht der Geometrie eines Gletschers, der sich zurückzieht. Es konnte gezeigt werden, dass mit Massenbilanzwerten, die im Bereich der Schwankungen der letzten 34 Jahre liegen, der Griesgletscher in den nächsten 100 Jahren Zustände vom praktischen Verschwinden bis zum massiven Vorstoss in tiefere Lagen (1900 m ü. M.) annehmen kann. Das tatsächliche Verhalten des Griesgletschers wird am ehesten Szenario 3 entsprechen. Damit wird der zurzeit herrschende Gletscherschwund weiter anhalten, und die Gletscherzunge käme dann im Jahr 2097 rund 1,5 bis 2,5 km hinter dem heutigen Gletscherende zu liegen.

5.2 Evolution unter Vorgabe von IPCC-Temperaturszenarien

Die Massenbilanz eines Gletschers kann recht gut mit Temperatur- und Niederschlagsdaten aus umliegenden Stationen parametrisiert werden (Chen und Funk, 1990). Für den Alpenraum existieren allerdings noch keine Prognosen der Klimaparameter Temperatur und Niederschlag, die räumlich und jahreszeitlich eine genügende Auflösung für unsere Anwendung haben. Deshalb orientierten wir uns an zwei alternativen Klimaszenarien, die das *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) im Auftrag des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (UNEP) und der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) entwickelt und im Jahr 1990 publiziert hat (IPCC 1990). Nach dem einen Szenario würde sich die globale Mitteltemperatur bis ins Jahr 2100 um vier Grad, nach dem anderen um zwei Grad erhöhen (Szenarien A und D, Bild 16).

Aus Temperatur-, Niederschlags- und Massenbilanzdaten der letzten 34 Jahre lässt sich eine statistische Beziehung zwischen den Klimagrössen Temperatur und Niederschlag und der Massenbilanz ermitteln (siehe Kasten). Es werden dazu Sommertemperaturen sowie die Jahresniederschlagsdaten der SMA-Stationen Airolo und Reckingen verwendet. Die gemessenen und statistisch aus Temperatur und Niederschlag berechneten Massenbilanzen der

letzten 34 Jahre sind in Bild 6 dargestellt. Für die ausgewählten Temperaturszenarien kann mit Hilfe dieser Beziehung die entsprechende Massenbilanz ermittelt werden (Bild 17). Der Niederschlag wird für die Zukunft nicht variiert und konstant auf dem Mittelwert der letzten 34 Jahre gehalten. Als Startwert der Temperatur wird der Mittelwert der Sommertemperaturen der letzten 34 Jahre gewählt.

Für beide IPCC-Szenarien A und D liegt die Gleichgewichtslinie nach 40 Jahren bereits am oberen Rand des Griesgletschers, das heisst, der Gletscher schmilzt dann einfach als Ganzes ab. Nach 100 Jahren ist mit Szenario A der Gletscher praktisch verschwunden (Bild 18). Mit Szenario D zieht sich der Gletscher etwas langsamer zurück (Bild 19).

Die extreme Reaktion des Griesgletschers auf die beiden Temperaturszenarien zeigt, wie stark eine Erhöhung der globalen Mitteltemperatur das Verhalten des Griesgletschers beeinflussen kann. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass diese Temperaturszenarien auf die Sommertemperaturen angewendet wurden und möglicherweise eine überschätzte Erwärmung darstellen. Zudem wird der Zusammenhang zwischen Klima und Massenbilanz nur auf eine Änderung der Temperatur beschränkt. Einflüsse wie jährliche Verteilung der Temperatur und des Niederschlages sowie weitere Parameter, welche die Massenbilanz beeinflussen, sind nicht berücksichtigt worden. Ausserdem beschreiben die IPCC-Szenarien eine globale Erwärmung, und das lokale Klima kann davon abweichen.

5.3 Variation des Gletschervolumens für die verschiedenen Massenbilanzszenarien

Der Wasserhaushalt im Einzugsgebiet des Griesgletschers kann durch die gebräuchliche hydrologische Gleichung

$$N - A - R - V = 0 \quad (2)$$

beschrieben werden, wobei N den Gebietsniederschlag, A den Gebietsabfluss (d. h. der Zufluss zum Stausee), R die Reservenänderung und V die Verdunstung sind. Die mittleren Grössen der Beobachtungsperiode von 1961 bis 1995 sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1. Hauptkomponenten der hydrologischen Bilanz im Durchschnitt der Messperiode 1961–1995 (in mm pro Jahr).

	[mm]
Niederschlag N	2000
Gebietsabfluss A	2000
Reservenänderung R	-160
Verdunstung V	160

Die Reservenänderung R ist die Änderung des Gletschervolumens beziehungsweise die Massenbilanz, umgerechnet

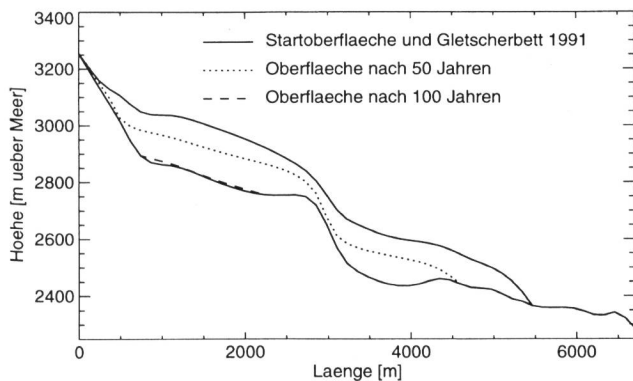


Bild 18. Modellrechnung für die Evolution der Oberfläche des Griesgletschers unter Szenario A (IPCC-Szenario) nach 50 und 100 Jahren.

net auf die Fläche des Einzugsgebietes (10,281 km²). Nach Tabelle 1 trägt der Gletscherschwund rund 8 % zum mittleren Gebietsabfluss bei. Mit den durchgeführten Modellrechnungen für die nächsten 50 Jahre sind die jährlichen Volumenänderungen des Gletschers für die Szenarien 2, 3 und 4 bestimmt worden (Tabelle 2).

Tabelle 2. Berechnete mittlere Volumenänderungen des Griesgletschers pro Jahr unter den Massenbilanzszenarien 2, 3 und 4, in mm Wassersäule über das Einzugsgebiet (10,281 km²) und in Prozent des Gebietsabflusses.

	Volumenabnahme [mm pro Jahr]	Anteil des mittleren Gebietsabflusses [%]
Szenario 2	-160	-8
Szenario 3	270	14
Szenario 4	330	17

Mit dem Szenario 2 (Gletschervorstoss) nimmt der Gebietsabfluss im Mittel in den nächsten 50 Jahren um 160 mm pro Jahr ab. Damit wäre der mittlere jährliche Gebietsabfluss gegenüber heute rund 16 % kleiner. Mit Szenario 4 (markanter Gletscherrückgang) trägt der Gletscherschwund mit 330 mm Wassersäule zum mittleren jährlichen Gebietsabfluss bei, was rund 17 % des Gebietsabflusses entspricht. Mit Szenario 3, welches am ehesten der Realität entspricht, liegt der Anteil des Gletscherschwundes zum mittleren jährlichen Gebietsabfluss bei rund 14 %. Mit den angenommenen Szenarien 2, 3 und 4 kann infolge Gletscheränderungen der mittlere Gebietsabfluss in den nächsten 50 Jahren um rund 16 % abnehmen oder bis gegen 17 % zunehmen. Diese Werte gelten unter der Voraussetzung, dass im betrachteten Zeitraum der Niederschlag im Mittel gleich bleibt wie in den letzten 34 Jahren.

6. Schlussbetrachtung und Ausblick

Das neue numerische Modell zur Berechnung der Evolution von Talgletschern hat am Beispiel des Griesgletschers brauchbare Resultate geliefert. Durchgeführte Modellrechnungen für vorgegebene Klima- und Massenbilanzszenarien erlauben Aussagen über das zukünftige Verhalten des Griesgletschers. Bei ähnlichen klimatischen Bedingungen wie in den letzten 34 Jahren wird sich der Griesgletscher in den nächsten 100 Jahren weiter kontinuierlich zurückziehen. Ein Vorstoss in den nächsten 50 Jahren ist sehr unwahrscheinlich, so dass für das Stauwerk keine direkte Gefährdung durch den Gletscher zu erwarten ist.

Das numerische Modell kann in einigen Punkten noch verbessert und erweitert werden. So könnte der Kalbungsprozess am Gletscherende noch eingebaut werden. Die

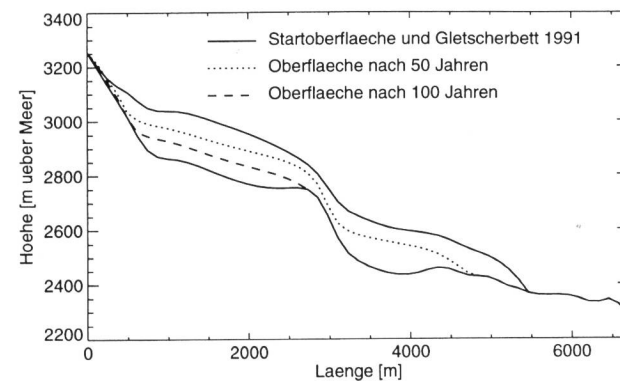


Bild 19. Modellrechnung für die Evolution der Oberfläche des Griesgletschers unter Szenario D (IPCC-Szenario) nach 50 und 100 Jahren.

Korrelation zwischen Klima und Massenbilanz

Die Abhängigkeit der Massenbilanz vom Klima wird auf die Klimagrößen Sommertemperatur und Jahresniederschlag reduziert. Die jährliche Massenbilanz \bar{b} wird wie folgt formuliert:

$$\bar{b} = a_0 + X_T + X_N + \epsilon, \quad (3)$$

und die Größen X_T und X_N stehen für die folgenden Produkte

$$X_T = a_T \cdot T, \quad (4)$$

$$X_N = a_N \cdot N, \quad (5)$$

wobei T und N für Temperatur und Niederschlag stehen und a_0 , a_T und a_N Koeffizienten sind. Dieser Ansatz soll bis auf eine Abweichung ϵ mit der jährlich gemessenen Massenbilanz \hat{b} übereinstimmen:

$$\bar{b} = \hat{b} + \epsilon. \quad (6)$$

Mit vorhandener Massenbilanz, Temperatur und Niederschlagsreihe für den Zeitraum von 1961 bis 1995 können die Koeffizienten a_0 , a_T und a_N bestimmt werden. Temperatur- und Niederschlagsdaten werden an den nächstgelegenen Klimastationen der SMA von Reckingen (Oberwallis) und Airolo (Nordtessin) entnommen. Die beste Korrelation (minimales ϵ) zwischen modellierter und gemessener Massenbilanz ergibt sich mit der mittleren Temperatur der Monate Juni, Juli, August von Reckingen und dem Jahresniederschlag von Airolo (Bild 6). Die entsprechenden Koeffizienten sind

$$a_0 = 615,574 \quad (7)$$

$$a_T = -59,3342 \quad (8)$$

$$a_N = 0,0817905 \quad (9)$$

Änderungen im Niederschlag fallen bei dieser Parametrisierung kaum ins Gewicht (a_N ist viel kleiner als a_T). Damit ist die Vorgabe eines Klimaszenarios durch die Temperatur recht vernünftig (Kap. 5).

Berücksichtigung von Gleiten am Gletscherbett kann zurzeit in Modellrechnungen kaum berücksichtigt werden, da die beteiligten Prozesse noch zu wenig bekannt sind. Die dreidimensionale Geometrie könnte mit der Einführung eines Formfaktors simuliert werden. Mehr zu erwarten ist allerdings mit einer Erweiterung des Modells auf drei Dimensionen. Dies ist gegenwärtig in Bearbeitung.

Dank

Dank geht an *H. Siegenthaler* und *P. Kasser* (†) für ihre sorgfältigen glaziologischen Untersuchungen am Griesgletscher in den Jahren 1961 bis 1984. Weiter danken wir der Kraftwerke Maggia AG und Aegina AG, namentlich *O. Martini* für das Interesse und die grosszügige finanzielle Unterstützung sowie der Eidgenössischen Vermessungsdirektion für die Luftbilder. Dank geht auch an *W. Schmid* (†) und *H. Boesch* für die photogrammetrischen Auswertungen.

Literatur

Bindschadler, R. R. (1980). The predicted behaviour of Griesgletscher and its possible threat to a nearby dam. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 16: 45–59.

Blatter, H. (1995). Velocity and stress fields in grounded glaciers: a simple algorithm for including deviatoric stress gradients. *Journal of Glaciology*, 41 (138): 333–344.

Chen, J., and Funk, M. (1990). Mass balance of Rhonegletscher during 1882/83–1986/87. *Journal of Glaciology*, 36 (123): 199–209.

Funk, M., Morelli, R., and Stahel, W. (1997). Mass balance of Griesgletscher 1961–1994: different methods of determination. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 33 (1): 41–55.

Gudmundsson, G. H. (1994). Converging glacier flow – a case study: the Unteraarglacier. Mitteilung 131, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Gloriastrasse 37–39, ETH-Zentrum, CH-8092 Zürich, pp. 120.

Hirsch, C. (1988). *Numerical computation of internal and external flows: Fundamentals of numerical discretization*, volume I. John Wiley and Sons.

IPCC (1990). The IPCC scientific assessment report prepared for the Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group 1. Technical report, WMO/UNEP (*Houghton, J. T., Jenkins, G. J., and Ephraums, J. J.*, eds.). Cambridge University Press.

Kasser, P. (1961). Hydroglaziologische Untersuchungen über das Einzugsgebiet des Griessees. Bericht Nr. 50.1, unveröffentlicht, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich. Im Auftrag der Kraftwerke Aegina.

Paterson, W. S. B. (1994). *The Physics of Glaciers*. Pergamon, New York, third edition.

Vieli, A. (1996). Modellierung der Veränderung des Griesgletschers seit 1961 und Perspektiven für die Zukunft. Diplomarbeit, ETH Zürich.

Adressen der Verfasser

Dipl. Phys. ETH *Andreas Vieli*, Versuchsanstalt für Wasserbau und Glaziologie, ETH Zürich, CH-8092 Zürich.

Dr. sc. nat. *Martin Funk*, Dozent und Wissenschaftler, Versuchsanstalt für Wasserbau und Glaziologie, ETH Zürich, CH-8092 Zürich.

PD Dr. sc. nat. *Heinz Blatter*, Dozent und Wissenschaftler, Geographisches Institut, ETH Zürich, Winterthurerstrasse 190, CH-8057 Zürich.

Laboratorium für die Kleinwasserkraft

Am 24. April 1997 konnte in der Zentrale Montcherand in der Nähe von Orbe das Laboratorium für Kleinkraftwerke, MHyLab, eingeweiht werden. Das Laboratorium soll mithelfen, die folgenden Forschungsziele zu erreichen: einfache und niedrige Baukosten, hoher energetischer Wirkungsgrad sowie maximale Betriebssicherheit und einfache Instandhaltung der Kleinwasserkraftwerke. Das Laboratorium hat in den von der Compagnie Vaudoise d'Electricité in der Zentrale Montcherand zur Verfügung gestellten Räumlichkeiten einen idealen Standort gefunden. Es wird ermöglicht dank finanziellen Beiträgen des Bundes, der Westschweizer Kantone, einiger Gemeinden und der Elektrizitätswirtschaft.

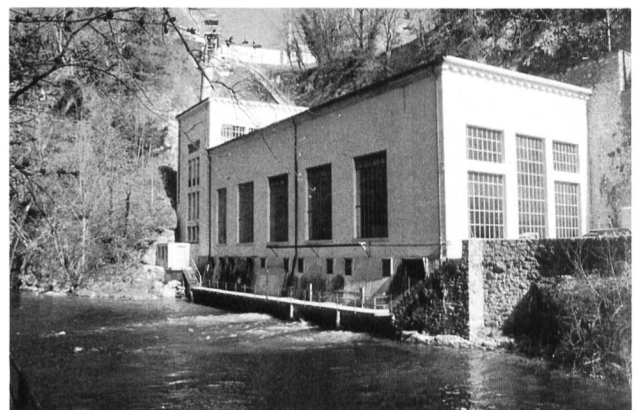


Bild 1. In Räumen der Zentrale Montcherand konnte das neue Laboratorium für Kleinwasserkraftwerke eingerichtet werden.

(Foto: R. Chenal)

Adresse des Laboratoriums: MHyLab, CH-1354 Montcherand, Telefon 024/441 36 54.