

Zeitschrift: Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaften beider Basel
Herausgeber: Naturforschende Gesellschaft Basel ; Naturforschende Gesellschaft Baselland
Band: 15 (2014)

Artikel: Gletscher und Gebirgsbäche im Klimawandel
Autor: Singeisen, Corinne
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-676688>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 06.01.2026

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

Gletscher und Gebirgsbäche im Klimawandel

CORINNE SINGEISEN

Zusammenfassung: Diese Arbeit befasst sich mit den Auswirkungen der Klimaerwärmung auf Gletscher und deren Abfluss. Am Beispiel von zwei benachbarten Einzugsgebieten im Oberengadin wird untersucht, ob das stärker vergletscherte Einzugsgebiet vermehrt auf die Klimaerwärmung reagiert. Das Einzugsgebiet des Berninabaches (18 % Vergletscherung) ist glazio-nival geprägt, wohingegen der Rosegbach (30 % Vergletscherung) vor allem durch die Gletscherschmelze beeinflusst wird.

Zu den Systemen Klima, Gletscher und Gebirgsbäche wurden vorhandene Messdaten von Meteo-Schweiz, der Versuchsanstalt für Wasserbau der ETH Zürich und des Bundesamtes für Umwelt aus der Zeit von 1972–2008 mit einer Regressionsanalyse statistisch ausgewertet und mit einem Permutationstest auf Signifikanz geprüft.

Es kann ein signifikanter Temperaturanstieg beobachtet werden; Veränderungen im Niederschlag sind vernachlässigbar. Alle untersuchten Gletscher zeigen einen hochsignifikanten Längen- und Massenverlust sowie einen Anstieg der Gleichgewichtslinie. Beim Berninabach zeigen weder die mittleren Sommer- noch Jahresabflüsse ($p = 0.437/p = 0.213$) einen signifikanten Trend. Die Werte beim Rosegbach sind zwar ebenfalls nicht signifikant, jedoch weisen Regressionskoeffizient und p-Werte auf eine bessere Korrelation hin (Sommer $p = 0.097$ /Jahr $p = 0.087$).

Beide Bäche zeigen somit eine ähnliche Reaktion auf die Veränderungen im Einzugsgebiet. Die Trends der mittleren Sommer- und Jahresabflüsse sind jedoch aufgrund natürlich starker Schwankungen nicht wie erwartet signifikant; die Ergebnisse unterstützen aber die Hypothese. Die Untersuchungsperiode müsste für bedeutendere Schlüsse erweitert werden.

In Zukunft wird die Bevölkerung der Alpenländer durch die Veränderung der Gebirgsbachabflüsse in Bezug auf die Wasser- und Energieversorgung vor grosse Herausforderungen gestellt werden.

Abstract: Glaciers and Mountain Stream Discharge in a Changing Climate. The impact of climate change on glaciers and their discharge is investigated. Rising temperatures lead to negative mass balance of the glaciers, which results in increasing runoff in glacial streams. Two adjacent basins in the South Eastern Swiss Alps of different glacierization were compared. The hypothesis of a more pronounced increase in runoff in the higher glaciated basin has been analyzed. The annual distribution of runoff in the *Bernina* catchment (18 % glacierized) is glacio-nival driven whereas the *Roseg* catchment (30 % glacierized) is mainly influenced by glacial melt.

Data series from 1972–2008 were analyzed for climate, glacier evolution and runoff. The time series were statistically tested for significance by Regression Analysis and Permutation Tests.

A significant trend in temperature increase was found whereas changes in precipitation are negligible. The investigated glaciers showed highly significant mass loss and a rise in the ELA. No significant trend in time series was observed either in mean annual ($p = 0.213$) or summer runoff ($p = 0.437$) in *Bernina* catchment. Runoff in the *Roseg* basin shows no significance in either value, but both regression coefficients and p-values show better correlation (annual $p = 0.087$, summer $p = 0.097$).

Both basins show similar responses to the observed temperature change and glacial melt. Annual variability is too high to prove a significant trend in this relatively short time period. The hypothesis could not be proved, but is supported by the results. For further investigations the time series should be extended.

Future changes, which can be seen approaching, will be a challenge for water supply and energy production in alpine regions.

Key words: glacier, mountain stream discharge, climate change

1. Einleitung

Der Schwund der Alpengletscher zeigt die Auswirkungen der Klimaänderung unverkennbar und stört das fragile Gleichgewicht der Bergwelt, insbesondere in Bezug auf den Wasserhaushalt.

1.1 Grundlagen zu Gebirgsbächen und deren Abflussverhalten

Die Charakteristika eines Einzugsgebietes bestimmen das Wasservolumen und die Fließgeschwindigkeit eines Baches (Press und Siever 2008). So zeigt ein stark vergletschertes Gebiet eine andere Verteilung des Abflusses im Jahresverlauf, als eines, dessen Abflussverhalten hauptsächlich durch Niederschlag in Form von Regen geprägt ist. Abb. 1 zeigt die mittlere Verteilung des Abflusses im Jahresverlauf, das Abflussregime, von Einzugsgebieten unterschiedlicher Höhenlagen in der Schweiz.

Die Höhendifferenz zwischen den einzelnen Regimetypen beträgt etwa 300 Höhenmeter. Das Einzugsgebiet eines glazialen Regimetyps weist dabei eine mittlere Höhe von ungefähr 2'700 m.ü.M. auf, ein pluvial geprägtes eine mittlere Höhe von etwa 800 m.ü.M. (OcCC 2007).

Der wichtigste Unterschied zwischen den Einzugsgebieten ist somit ihre Höhenlage. Damit wird klar, dass die Temperatur eine wesentliche Funktion in der Bestimmung des Abflussregimes einnimmt. Sie legt die Art des Nieder-

schlags und somit auch die Verzögerung des Niederschlags im Abfluss fest. Die Klimaveränderung und der damit verbundene Gletscherschwund wirken sich unweigerlich auf das Abflussverhalten von Gebirgsbächen aus (OcCC 2007).

Ist die Vergletscherung eines Einzugsgebietes klein, hängen Veränderungen im Abfluss von den Veränderungen im Niederschlag ab. Ist die Vergletscherung eines Gebietes hoch, hängt die Veränderung des Abflusses vermehrt von der Energieaufnahme des Gletschers im Sommer ab. Deshalb ist es möglich, dass zwei aneinandergrenzende Einzugsgebiete mit ähnlicher Höhenlage, aber unterschiedlichen Vergletscherungsgraden verschieden auf den Klimawandel reagieren (Van Dam 1999).

1.2 Fragestellung

Das Einzugsgebiet des Rosegbaches weist einen hohen Vergletscherungsgrad von etwa 30 % auf. Beim Berninabach hingegen ist die Vergletscherung mit 18 % wesentlich geringer (BAFU, Abteilung Hydrologie 2009). Es wird deshalb erwartet, dass das Abflussverhalten des Rosegbaches aufgrund der vermehrten Gletscherschmelze stärker auf Temperaturveränderungen reagiert.

Durch die Erwärmung ändert sich die in Gletschern gespeicherte Wassermenge. Dies hat eine Erhöhung der Abflussmengen in Gebirgsbächen zur Folge, sofern sich Niederschlag und Verdun-

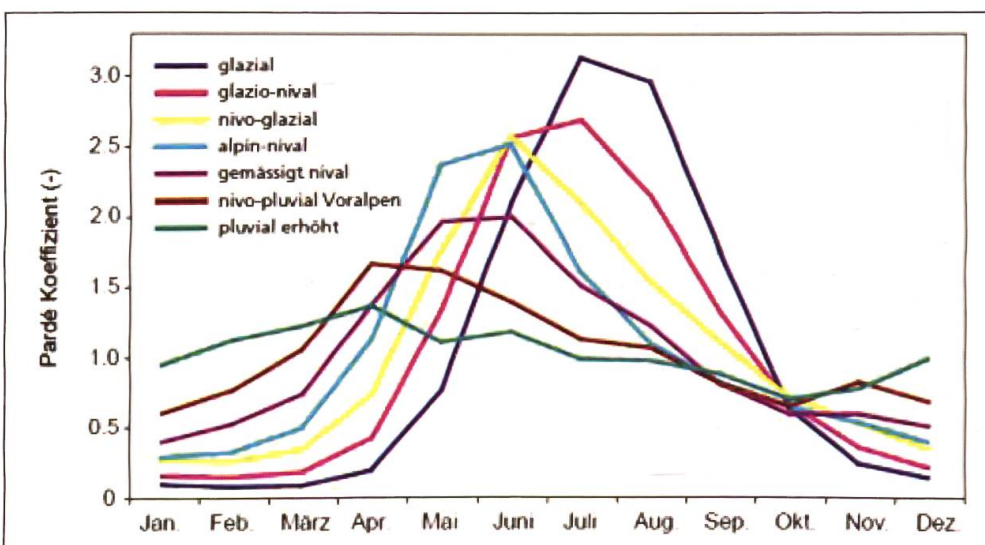


Abb. 1: Mittlere Abflussregimes von Einzugsgebieten in der Schweiz (glazial = von Gletschern geprägt, nival = von Schnee geprägt, pluvial = von Regen geprägt) (OcCC 2007). Der Pardé-Koeffizient gibt das Verhältnis vom mittleren monatlichen zum mittleren jährlichen Abfluss an ($\text{Pardé Koeffizient} = \frac{\text{monatlicher Abfluss}}{\text{jährlicher Abfluss}}$). Er beschreibt so die Art des Abflussregimes unabhängig von der Grösse des Flusses. (OcCC 2007).

stung im Einzugsgebiet nicht wesentlich verändern (Vischer und Huber 2002). Die Tendenz eines Anstiegs im jährlichen Abfluss sollte sich hauptsächlich in den Sommermonaten durch den verstärkten Schmelzwasserabfluss abzeichnen.

Da sich die Abflussregimetyphen grundsätzlich durch ihre Höhenlage unterscheiden, ist anzunehmen, dass sich durch die Erwärmung auf einer gewissen Höhe in Zukunft Klimabedingungen ergeben werden, die einer zuvor niedrigeren Höhenlage entsprechen. Dies bewirkt, dass sich die Abflussregimetyphen gemäss Prognosen von OcCC (2007), Huss et al. (2010) und Hänggi et al. (2011) bis ins Jahr 2050 um einen Regimetyphen nach unten verschieben werden. Dies kann jedoch erst der Fall sein, wenn sich die Gletscher so stark zurückgebildet haben, dass es nicht mehr ihr Schmelzwasser ist, das den grössten Anteil des Abflusses im Einzugsgebiet ausmacht. Zu diesem Zeitpunkt werden die jährlichen Abflussmengen sinken.

In Hänggi et al. (2011) wurde der Einfluss der Klimaerwärmung auf schweizerische Abflussregimes untersucht. Es wird gezeigt, dass glazial und nival geprägte Einzugsgebiete am stärksten auf die Temperaturveränderung reagieren. Hänggi und Weingartner (2009) belegen eine signifikante Zunahme der Abflussmengen seit 1966 bei stark vergletscherten Einzugsgebieten in allen Jahreszeiten. Gemäss Hänggi et al. (2011) wird erwartet, dass die Abflussmengen in diesen Einzugsgebieten weiter signifikant zunehmen.

1.3 Gesellschaftliche Relevanz

Gebirgsbäche mit glazialen Abflussregime führen im Sommer am meisten Wasser, genau dann, wenn das Süsswasser in zukünftigen Trockenperioden für die Trinkwasserversorgung am meisten gebraucht wird. Sie stellen einen wichtigen Trinkwasserspeicher dar, der durch die Klimaerwärmung zu verschwinden droht.

Da in der Schweiz zwischen 50 und 60 % der Elektrizität durch die Wasserkraftnutzung gewonnen wird, ist das Verständnis für mittelfristige Trends im Abflussverhalten essentiell. In Hänggi und Weingartner (2012) wurde gezeigt,

dass die prognostizierten Veränderungen im Jahresverlauf der Abflüsse die Stromproduktion begünstigen. Insbesondere im Winter werden die Nutzwassermengen ansteigen.

Die Gefahr von Hochwasser durch Starkniederschläge wird sich im Winterhalbjahr verstärken, da auch im Winter Niederschläge künftig vermehrt in Form von Regen auftreten werden und nicht in einer Schneedecke oder einem Gletscher gespeichert und verzögert abfliessen werden (Jordi 2007). Die Wahrscheinlichkeit für Schmelzwasserüberflutungen im Frühling wird hingegen sinken (Van Dam 1999).

2. Material und Methoden

2.1 Untersuchungsgebiet

Die beiden gewählten Einzugsgebiete befinden sich im Südosten der Schweiz im Oberengadin. Sie eignen sich für diese Untersuchungen, weil die Gletscherveränderungen sehr gut dokumentiert sind und die Abflüsse beider Bäche vor ihrem Zusammenfluss in Pontresina seit 1955 gemessen und aufgezeichnet werden. Zusätzlich sind auch die klimatischen Bedingungen im Oberengadin an mehreren Stationen erfasst. Dies erlaubt eine genaue Beschreibung und Datenabsicherung für das Klima in der Region.

Abb. 2 zeigt die Einzugsgebiete und alle Messstationen, von welchen die Daten zum Klima und der Klimaveränderung sowie des Abflusses bezogen wurden.

2.2 Auswertung der Klimadaten

Die Klimadaten stammen alle vom Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie Meteo-Schweiz. Die Messstationen befinden sich alle auf dem Schweizer Koordinatennetz maximal ± 15 km von Pontresina entfernt. Zu jedem Messwert sind Daten von mehreren Klimamessstationen vorhanden, sodass man die Richtigkeit eines vorhandenen Trends stationsunabhängig sicherstellen kann. Die statistische Auswertung beschränkt sich jedoch auf die Stationen Sils Maria und Passo del Bernina.

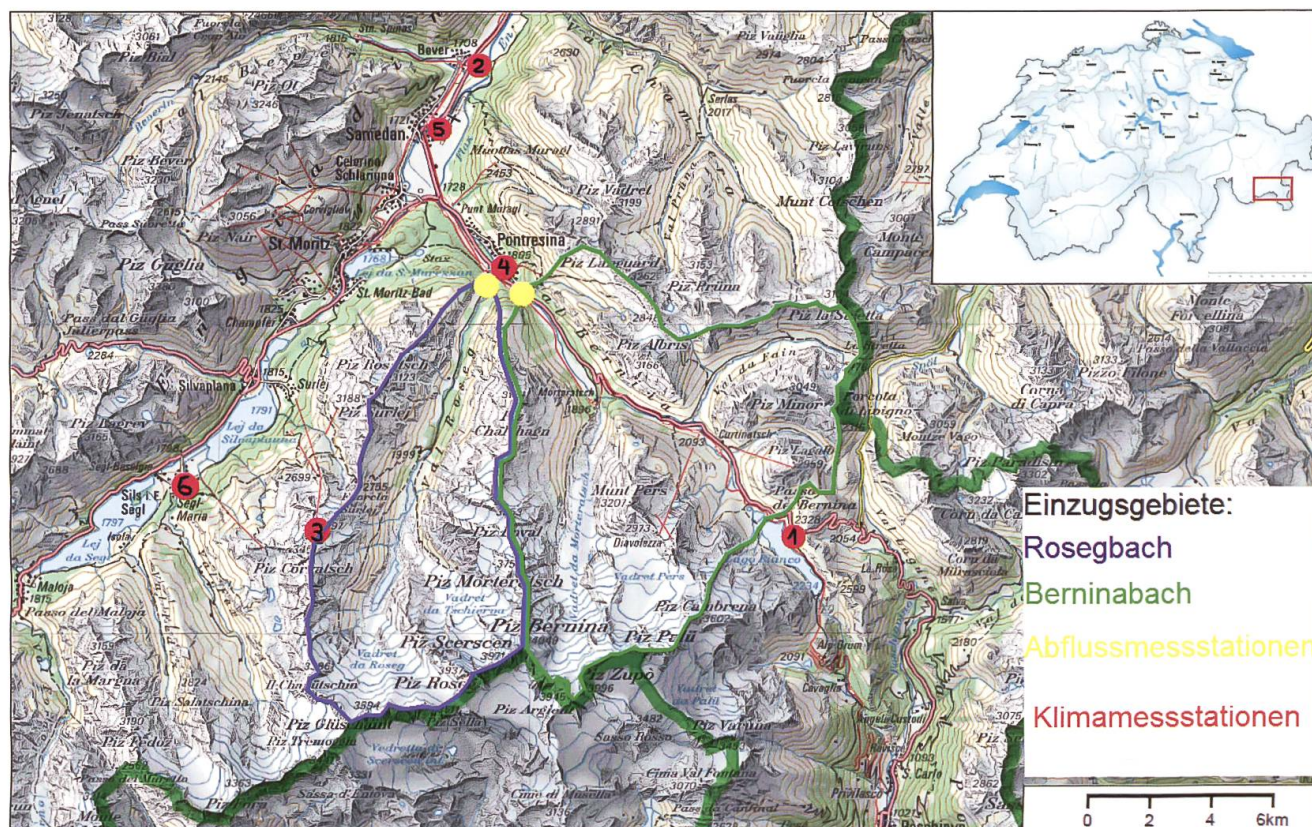


Abb. 2: Übersichtskarte Untersuchungsgebiet mit Klimamessstationen und untersuchten Einzugsgebieten, definiert durch die Abflussmessstationen (eigene Darstellung mit Grundlagenkarte von swisstopo 2010). Die Klimamessstationen sind wie folgt nummeriert 1: Passo del Bernina 2: Bever 3: Piz Corvatsch 4: Pontresina 5: Samedan 6: Sils Maria.

Die Daten konnten im Excel mit Pivot-Tabellen ausgewertet und anhand von Pivot-Charts visualisiert werden. Eine Auswertung zum langjährigen Verlauf soll dazu dienen, allfällige Trends zu erkennen.

Für die Dokumentation des langjährigen Verlaufs der Niederschläge und der Neuschneehöhe wird die Jahressumme berechnet. Die Lufttemperatur, welche 2 Meter über dem Boden gemessen wird, wie auch die Globalstrahlung sind in der Datengrundlage Tagesmittelwerte und in den Auswertungen mit jährlichen Durchschnittswerten dargestellt.

2.3 Dokumentation der Gletscherveränderung

Für die Dokumentation der Gletscherveränderung in den Einzugsgebieten wurden diejenigen Gletscher ausgewählt, die den grössten Anteil der Vergletscherung ausmachen. Tab. 1 gibt einen Überblick über die ausgewählten Gletscher und deren Charakteristika. Die Abbildungen 3–5 zeigen die drei ausgewählten Gletscher. Die Dokumentation der Gletscherveränderung besteht aus der Kartierung der Gletscherstände, der daraus erstellten Vermessung und Darstellung der Längenänderungen sowie einer Darstel-

Einzugsgebiet	Berninabach	Rosegbach	
ausgewählte Gletscher	Morteratsch	Tschierva	Roseg
Fläche 2008 (km ²) (Huss et al. 2010)	15.27	5.94	7.56
Länge 2008 (km) (VAW/ETHZ und EKK/SCNAT 2009)	6.37	4.18	3.76

Tab. 1: Charakteristika der ausgewählten Gletscher.



Abb. 3: Morteratschgletscher im Oktober 2010.



Abb. 4: Tschieravagletscher im Dezember 2010.

lung zu den Massenbilanzen. Alle dazu benötigten Unterlagen, Instrumente sowie die Daten zu den Massenbilanzen konnten von der Versuchsanstalt für Wasserbau (VAW) der ETH Zürich bezogen werden.

Die Kartierung der Gletscherstände beruht auf Luftbildern aus dem Luftbildarchiv der VAW. Diese Bilder konnte ich mit Hilfe eines Stereoskops genau betrachten, den Gletscherand definieren und danach den Gletscherstand auf einer Landkarte eintragen. Die kartierten Jahrgänge der jeweiligen Gletscher sind in Tab. 2 aufgelistet. Die Luftbildaufnahmen sind jeweils Ende des hydrologischen Jahres (Oktober bis September) erstellt worden.

Der Gletscherrand ist in der Kartierung dort gesetzt, wo der Gletscher mit seinem Geröll zur



Abb. 5: Roseggletscher im Oktober 2010.

Moräne mit Eis übergeht. Dieser Übergang ist auch aus einem Stereomodell nicht immer eindeutig herauszulesen und beruht deshalb oftmals auf einer Schätzung. Zur besseren Orientierung und um grobe Fehler korrigieren zu können, wurden zwei von der VAW kartierte Jahrgänge als Referenz verwendet.

Um zu den kartierten Gletscherständen eine quantitative Aussage machen zu können, wurden die Längenänderungen in der Kartierung senkrecht zur Fließrichtung vermessen und grafisch dargestellt. Zur Absicherung wurden diese mit vorhandenen Daten aus Feldmessungen verglichen.

Die Längenänderung eines Gletschers ist jedoch kein sicheres Indiz für dessen Massenhaushalt. Deshalb wurden die von der VAW erhaltenen Daten zu den Massenbilanzen mit Excel ausgewertet. Die Daten zu Längenänderungen, Massenbilanzen und der Gleichgewichtslinie beziehen sich immer auf das hydrologische Jahr. Die Auswertung der Massenbilanzen beinhaltet eine Darstellung zur kumulierten Jahresbilanz sowie eine zur Entwicklung der Höhe der Gleichgewichtslinie. Die Einheit der Daten zu den Winter- und Jahresbilanzen ist mm Wasseräquivalent. Dies gibt die Wassermenge an, welche bei einem kompletten Abschmelzen von Schnee und Eis einer bestimmten Fläche entstehen würde: $\frac{\text{Wassermenge (m}^3\text{)}}{\text{Fläche (m}^2\text{)}} = \text{Wasseräquivalent (mm)}$

Morteratsch	1964	1971	1978	1985	1988	1994	1997	2002	2003	2008
Tschierva	1964	1971	1978	1985	1988	1994	1997	2002	–	2008
Roseg	1964	1971	1978	1985	1988	–	1997	2002	–	2008

Tab. 2: Ausgewählte Luftbildjahrgänge zur Kartierung der Gletscherstände.

2.4 Auswertung der Abflussdaten

Die Daten zu den Gebirgsbachabflüssen von Berninabach und Rosegbach stammen vom Bundesamt für Umwelt (BAFU), welches die Abflussmessstationen betreibt. Beide Stationen befinden sich in Pontresina kurz vor dem Zusammenfluss der Bäche und zeichnen seit 1955 deren Abflüsse auf.

In Tab. 3 findet sich ein Überblick über die wichtigsten Charakteristika der Einzugsgebiete. Die Unterschiede dieser Gebiete bestehen hauptsächlich in ihrer Grösse und dem Vergletscherungsgrad. Der unterschiedliche Vergletscherungsgrad ist grundlegend und der Grund für die Wahl dieser beiden Gebiete. Deren Grösse und somit auch diejenige des Baches spielt für die Abflussmessdaten nach entsprechender Auswertung keine Rolle mehr. Dem Roseggletscher vorgelagert befindet sich ein Zungenbeckensee. Die Auswirkungen dessen werden hier nicht genauer untersucht. Aufgrund der hohen Vergletscherung des Gebietes und des im Vergleich dazu kleinen Speichervermögens des Sees kann jedoch davon ausgegangen werden, dass das Abflussverhalten des Rosegbaches nicht wesentlich durch den Gletschersee beeinflusst wird.

Die Auswertung der Daten besteht im Wesentlichen aus einer Darstellung zum Jahresverlauf mit gemittelten Monatswerten und einer zum langjährigen Verlauf mit gemittelten Jahreswerten. Ausserdem ist der langjährige Verlauf der Sommerabflüsse mit gemittelten Monatswerten dargestellt, da diese gemäss Hypothese die stärkste Veränderung erfahren sollten. Die Einheit des Abflusses ist dabei immer m^3/s . Die Berechnung des Pardé-Koeffizienten macht es möglich, ein standardisiertes Abflussregime der Bäche zu erstellen. Dieses ist dazu da, den Bach einem Regimetyp zuzuteilen und somit zu identifizieren, durch welche Einflüsse dieser geprägt ist.

	Berninabach	Rosegbach
Stationshöhe (m.ü.M.)	1804	1766
Fläche Einzugsgebiet (km^2)	107	66.5
Mittlere Höhe (m.ü.M.)	2617	2716
Vergletscherungsgrad (%)	18.7	30.1

Tab. 3: Übersicht über Charakteristika der Einzugsgebiete (BAFU, Abteilung Hydrologie 2009).

2.5 Statistische Auswertung

Die Zeitreihen wurden mit einer Regressionsanalyse statistisch ausgewertet.

Zudem wurden die Trends nach Kundzewicz/Robson (2004) auf Signifikanz getestet. Dabei wurde ein Permutationstest angewandt. Dies ist ein robuster Test, welcher für verschiedene Datenreihen, auch ohne spezielle Voraussetzungen, verwendet werden kann. Um ein aussagekräftiges Resultat zu erhalten, werden jedoch mindestens 30 Datenpunkte benötigt. Deshalb konnte der Test nicht auf die Werte der Längenänderung aus den Kartierungen angewendet werden. Getestet wird, ob die erhaltene Regressionsgerade zufällig zustande gekommen sein kann. Deren Steigung würde sich somit nicht signifikant von denjenigen unterscheiden, welche entstehen, wenn die Werte im Zufallsverfahren ohne Zurücklegen den entsprechenden Jahren zugeteilt werden (Kundzewicz und Robson 2004).

Bei den Signifikanztests wurden für die Berechnungen 1'000 Permutationen gewählt und das Signifikanzniveau auf $p < \alpha < 0.05$ festgelegt. Errechnete p-Werte < 0.05 werden als signifikant bezeichnet; p-Werte < 0.01 als hochsignifikant. Der p-Wert entspricht bei Permutationstests $p = \frac{k}{s}$, wenn $k = \text{Rang der Regressionssteigung}$ und $s = \text{Anzahl Simulationen}$.

Die Zeitreihen der ausgewerteten Klimadaten sowie der Längenänderung der Gletscher sind original und nicht homogenisiert, d.h. allfällige künstliche Einflüsse auf die Messreihen, wie beispielsweise eine Stationsverschiebung oder das Ersetzen von Messgeräten, konnten nicht entfernt werden. Die Daten der Gebirgsbachabflüsse sind gemäss Hänggi/Weingartner (2012) bereits homogen; ebenso die Daten zur Massenänderung der Gletscher, welche in der Studie Huss et al. (2010) generiert worden sind.

3. Resultate

3.1 Klimaveränderung

Die Analyse zeigt, dass sich von den Klimaparametern zwischen 1972 und 2008 nur die mittlere Jahrestemperatur einheitlich signifikant verändert

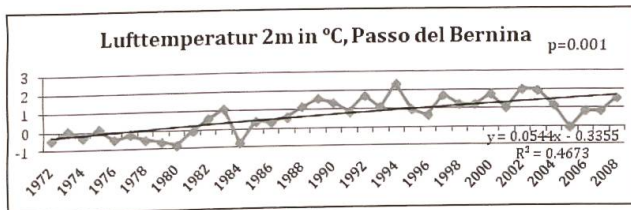


Abb. 6: Lufttemperatur 2 m in °C Passo del Bernina, Untersuchungsperiode, Jahresmittel. Der Verlauf der mittleren Jahrestemperaturen weist eine positive Steigung auf. Mit einem p-Wert von 0.001 ist der Temperaturanstieg hochsignifikant.

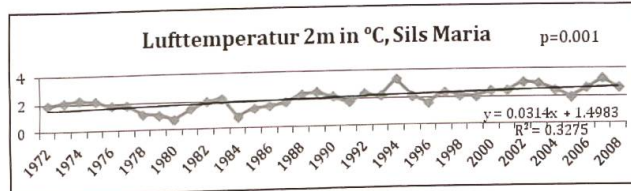


Abb. 7: Lufttemperatur 2 m in °C Sils Maria, Untersuchungsperiode, Jahresmittel. Der p-Wert 0.001 zeigt, dass die Steigung der mittleren Jahrestemperatur hochsignifikant ist.

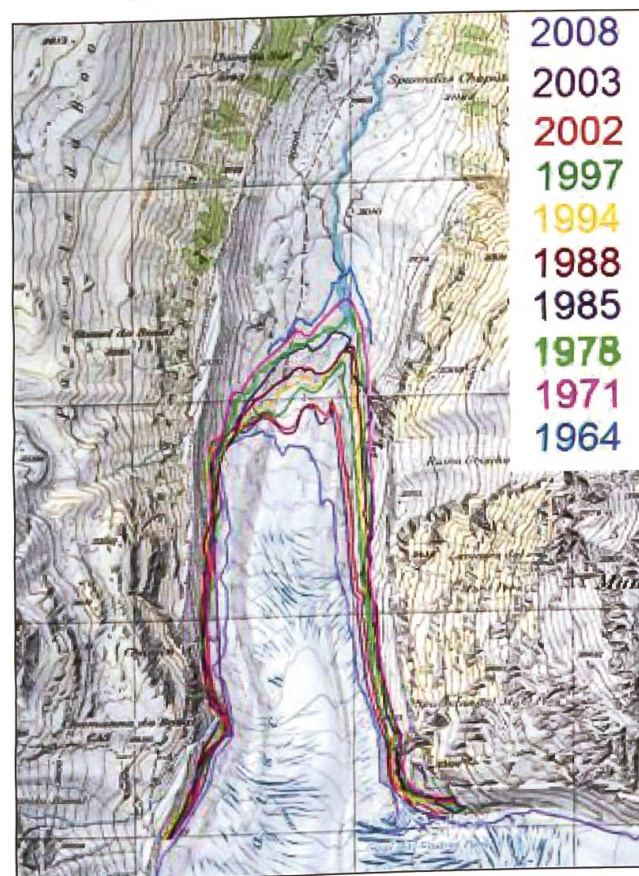


Abb. 8: Kartierung Gletscherstände Morteratsch. Auf der Karte (1:25'000 d.h. das Raster kennzeichnet eine Entfernung von 1 km) sind die Gletscherstände der jeweiligen Jahrgänge, kartiert anhand der Luftbilder (aufgenommen jeweils Ende des hydrologischen Jahres), farbig eingezeichnet.

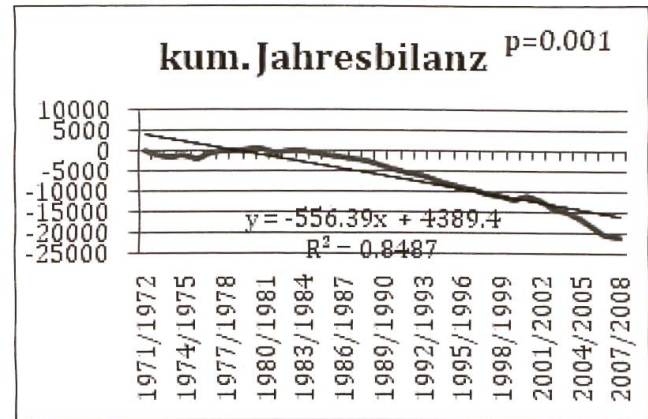


Abb. 9: kumulierte Jahresbilanz (mm w.e.) Morteratschgletscher. Die fette Kurve stellt die kumulierten Jahresbilanzen (Referenzjahr 1972) während der Untersuchungsperiode dar. Die Entwicklung zeigt einen hochsignifikanten, massiven Massenverlust von -21'242 mm w.e. ($p < 0.01$).

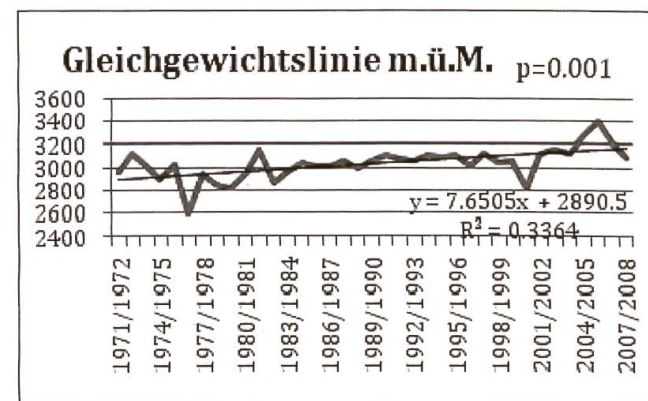


Abb. 10: Verlauf Höhe Gleichgewichtslinie (m.ü.M.) Morteratschgletscher. Fett dargestellt ist die Entwicklung der Gleichgewichtslinie während der Untersuchungsperiode. Es ist eine hochsignifikante Erhöhung dieser von rund 280 m zu erkennen.

hat. An der Station Bernina konnte ein hochsignifikanter Temperaturanstieg ($p < 0.01$) von 1.8 °C, in Sils einer von 1.2 °C beobachtet werden.

Der Verlauf der jährlichen Neuschneesummen weist nur in Sils eine hochsignifikante Abnahme (204 cm) auf. Am Bernina ist der negative Trend nicht signifikant. Niederschlag und mittlere Globalstrahlung zeigen keine signifikanten Trends.

3.2 Gletscherveränderung

Bei der Analyse der drei untersuchten Gletscher Morteratsch, Tschierwa und Roseg werden hochsignifikante Längenverluste von 600 m, 500 m

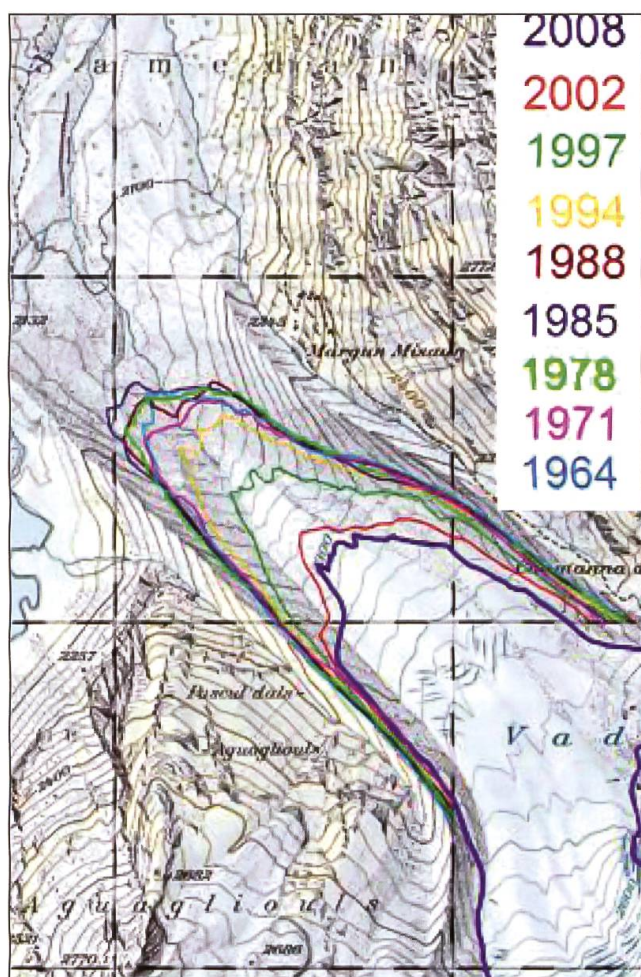


Abb. 11: Kartierung Gletscherstände Tschierva. Auf der Karte (1:25'000) sind die Gletscherstände der jeweiligen Jahrgänge, kartiert anhand der Luftbilder vom VAW, farbig eingezeichnet.

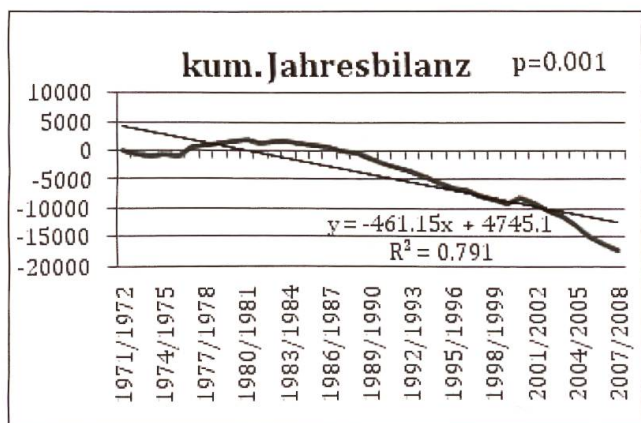


Abb. 12: Kumulierte Jahresbilanz (mm w.e.) Tschieravagletscher. Die fette Kurve stellt die kumulierten Jahresbilanzen (Referenzjahr 1972) bis 2008 dar. Der Verlauf dieser zeigt einen hochsignifikanten, massiven Massenverlust von -17'122 mm w.e. ($p < 0.01$).

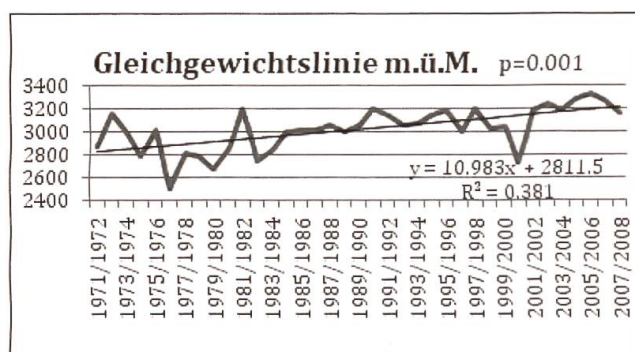


Abb. 13: Verlauf Höhe Gleichgewichtslinie (m.ü.M.) Tschieravagletscher. Der fett dargestellte Verlauf der Gleichgewichtslinie hat sich mit einer hochsignifikanten Steigung ($p = 0.001$) um rund 400 m erhöht.

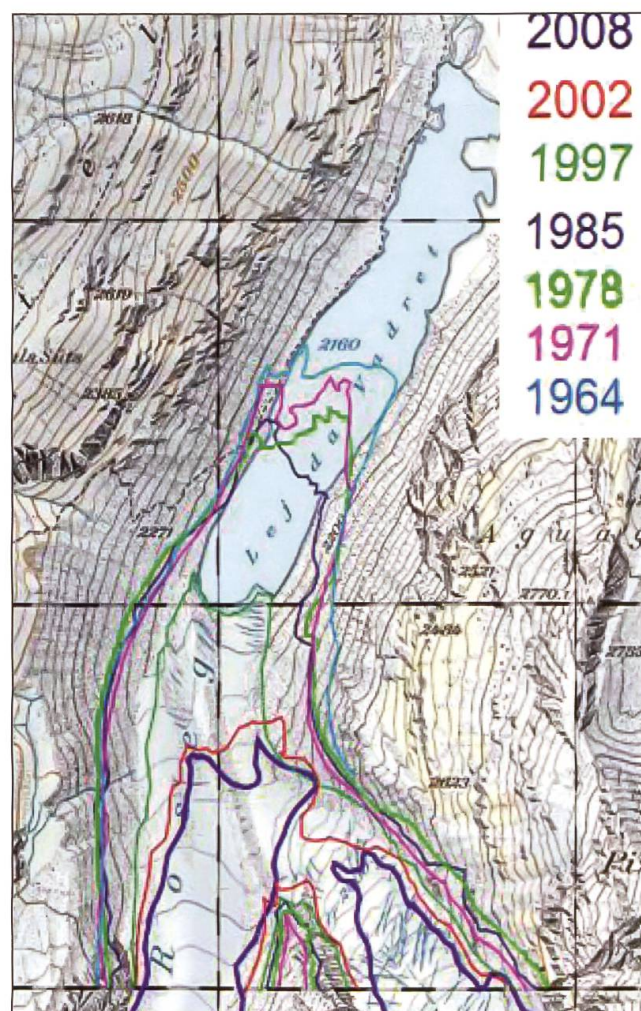


Abb. 14: Kartierung Gletscherstände Roseggletscher. Die Karte (1:25'000) zeigt die Gletscherstände der jeweiligen Jahrgänge, kartiert anhand der Luftbilder mit Stereoskop, farbig eingezeichnet.

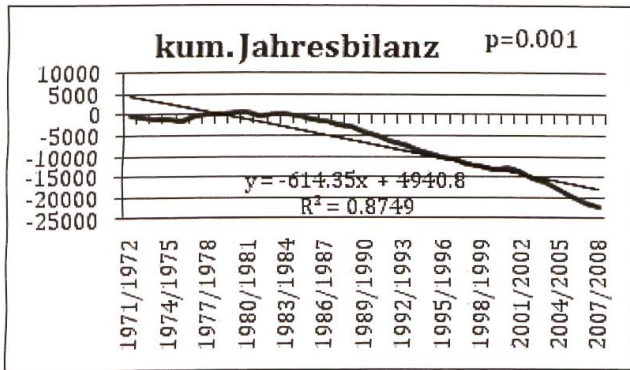


Abb. 15: Kumulierte Jahresbilanz (mm w.e.) Roseggletscher. Die Datenreihe der kumulierten Jahresbilanzen mit Referenzjahr 1972 zeigt eine hochsignifikante negative Steigung. Der Massenverlust beträgt $-22'112$ mm w.e.

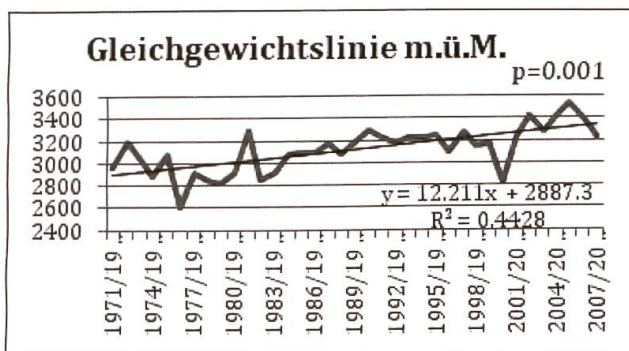


Abb. 16: Verlauf Höhe Gleichgewichtslinie (m.ü.M.) Roseggletscher. Der Verlauf der Gleichgewichtslinie zeigt während der Untersuchungsperiode einen hochsignifikanten, positiven Trend. Die Gleichgewichtslinie ist im Mittel um 450 m angestiegen.

und 900 m gemessen. Auch die Massenverluste sind hochsignifikant; sie betragen 21'200 mm Wasseräquivalent (w.e.) am Morteratschgletscher, 17'100 mm w.e. am Tschieravagletscher sowie 22'100 mm w.e. am Roseggletscher. Ein hochsignifikanter Anstieg der Gleichgewichtslinie ist bei allen Gletschern zu verzeichnen und beträgt 280 m (Morteratsch), 400 m (Tschierava) respektive 450 m (Roseg).

3.3 Gebirgsbachabflüsse und deren Veränderung

Abbildung 17 zeigt das Abflussverhalten des Berninabachs im Jahresverlauf. In den Wintermonaten Oktober bis April ist der Abfluss sehr tief, im Mai steigt er sprunghaft an und ist im Juni und Juli auf dem Höchstwert. Der Pardé-Koeffizient in diesen Monaten beträgt 2.8.

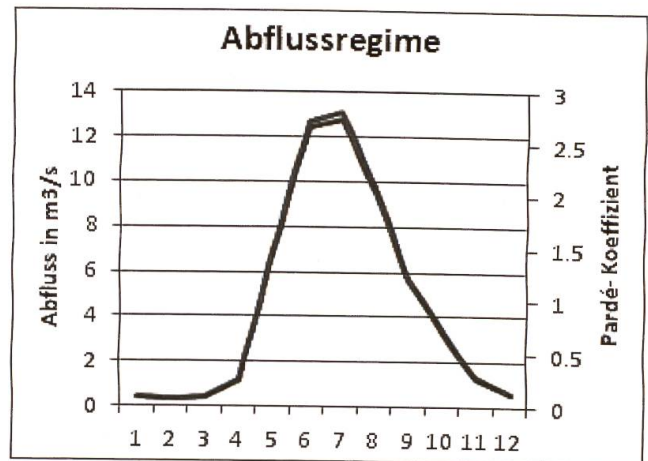


Abb. 17: Abflussregime Berninabach, Untersuchungsperiode. Die Grafik zeigt den Jahresverlauf der mittleren Monatsabflüsse in m^3/s sowie des standardisierten Abflussregimes in der Einheit des Pardé-Koeffizienten. Der Mittelwert des Abflusses beträgt $4.6 \text{ m}^3/\text{s}$ und die Wintermonate (Oktober-April) machen 14 % des jährlichen Abflusses aus.

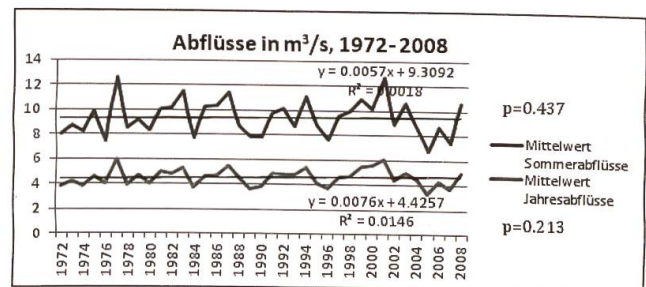


Abb. 18: Verlauf mittlere Sommer- und Jahresabflüsse (m^3/s) Berninabach, Untersuchungsperiode. Die Steigung der linearen Regressionsgerade ist bei keiner der beiden Kurven signifikant ($p > 0.05$).

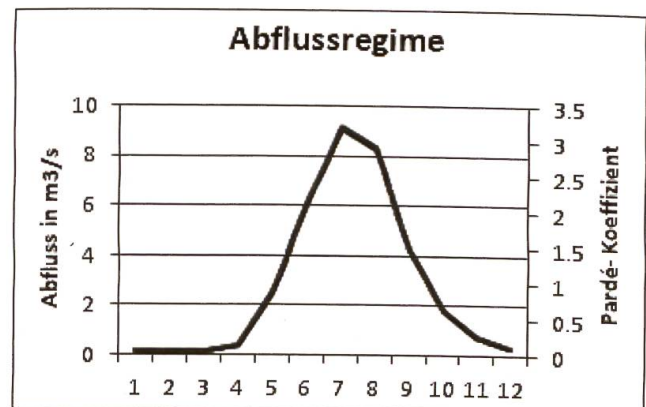


Abb. 19: Abflussregime Rosegbach, Untersuchungsperiode. Der Jahresverlauf der mittleren monatlichen Abflüsse in m^3/s und des standardisierten Abflussregimes (Pardé-Koeffizient) ist in der Grafik dargestellt. Der Mittelwert des Abflusses beträgt $2.8 \text{ m}^3/\text{s}$ und der Anteil der Wintermonate (Oktober-April) am Abfluss beläuft sich auf rund 11 %.

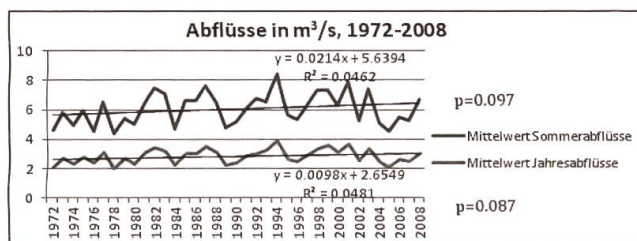


Abb. 20: Verlauf mittlere Sommer- und Jahresabflüsse (m^3/s) Rosegbach, Untersuchungsperiode. Die Steigung der hier dargestellten mittleren Jahres- (unten) und Sommerabflüsse (oben) ist knapp nicht signifikant ($0.05 < p < 0.1$).

Abb. 18 zeigt die Werte der mittleren Jahresabflüsse und der mittleren Sommerabflüsse seit 1972. Die lineare Trendlinie der mittleren Jahresabflüsse weist eine nicht signifikante, positive Steigung auf. Bei den mittleren Sommerabflüssen ist bei starken Schwankungen kein signifikanter Trend zu erkennen. Es fällt auf, dass die Steigung der Trendlinie der mittleren Sommerabflüsse beinahe gleich gross ist wie diejenige der mittleren Jahresabflüsse.

Abb. 19 zeigt das Abflussverhalten des Rosegbaches im Jahresverlauf. Nach überaus tiefen Messwerten in den Wintermonaten Oktober bis April, beginnt der mittlere Abfluss im Mai und Juni stark zu steigen. Der Höchstwert wird im Juli erreicht. Der Höchstwert des Pardé-Koeffizienten beträgt ca. 3.2.

Abb. 20 stellt den Verlauf des mittleren jährlichen Abflusses und der mittleren Sommerabflüsse des Rosegbaches dar. Nebst starken jährlichen Schwankungen ist der Trend eines Anstiegs erkennbar. Dieser ist jedoch bei beiden Werten knapp nicht signifikant. Erstaunlich dabei ist, dass die positive Steigung der linearen Trendlinie der Sommerabflüsse doppelt so gross ist wie diejenige der mittleren Jahresabflüsse. Erweitert man die Zeitreihe auf die gesamte Messperiode der Abflüsse (1955–2008) am Rosegbach, ist die Steigung der linearen Trendlinie mit einem p-Wert von 0.027 bei den mittleren Jahresabflüssen und 0.049 bei den mittleren Sommerabflüssen signifikant.

4. Diskussion

Der hochsignifikante **Temperaturanstieg** von ca. 2°C am Passo del Bernina zwischen 1972

und 2008 und derjenige in Sils Maria von rund 1°C gibt einen klaren Hinweis auf einen Trend der Erwärmung. Die Werte zur **Globalstrahlung** sowie jene der **Niederschlagsmengen** haben sich während der Untersuchungsperiode nicht signifikant verändert. Deshalb können diese Parameter für die weiteren Betrachtungen vernachlässigt werden. Die Veränderung der jährlichen **Neuschneehöhe** ist mit einer leicht negativen Tendenz an beiden Stationen einheitlich. Die Auswirkungen des Temperaturanstiegs auf die Neuschneehöhe sind jedoch grösstenteils von den vorherrschenden Wintertemperaturen abhängig. Somit ist auch klar, weshalb der Trend an der Station in Sils Maria hochsignifikant ist und derjenige am Passo del Bernina nicht signifikant. Aufgrund der grösseren Höhenlage am Passo del Bernina und der somit tieferen Temperaturen lässt sich vermuten, dass die Auswirkung der Temperaturveränderung noch klein genug ist, dass der Niederschlag im Winter noch immer in Form von Schnee fällt und sich so kein signifikanter Trend zur Verminderung der Neuschneehöhen erkennen lässt. Weil sich die mittlere Höhe der Einzugsgebiete deutlich über der Höhe der Klimamessstationen befindet, ist es wahrscheinlich, dass dieser Faktor nicht beeinflussend für die Gletscherveränderung ist.

Der einzige Wert, der somit eine signifikante Veränderung während der Untersuchungsperiode von 1972–2008 erfahren hat, ist die Lufttemperatur. Dies stimmt mit den Erkenntnissen von MeteoSchiweiz (2009) überein. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass trotz der inhomogenen Zeitreihen in dieser Arbeit die allgemeine Klimaentwicklung im Kanton Graubünden dargestellt werden konnte.

Die Länge des **Morteratschgletschers** hat in der Untersuchungsperiode massiv abgenommen. Eine Phase mit einem verlangsamten Rückgang der Gletscherstände (1981–1994) beginnt ungefähr, als die Temperaturen ab 1980 stark zu steigen beginnen. Dies ist mit der Trägheit des Gletschers zu erklären. Der stetige Längenverlust konnte dadurch aber nicht unterbrochen werden. Eine ähnliche Entwicklung ist in der Darstellung zur kumulierten Jahresbilanz zu beobachten. Die kurzzeitig positive Entwicklung der Massenbilanzen zwischen 1975 und

1983 bei einer leichten Abnahme der Jahresmitteltemperaturen sind dadurch bedingt, dass die Massenbilanzen die jährlichen Witterungsbedingungen veranschaulichen.

Der **Tschiervagletscher** ist der kleinste der drei untersuchten Gletscher. Die Veränderung seiner Länge ist während der Untersuchungsperiode sehr ausgeprägt. So nimmt sie zwischen 1971 und 1985 ziemlich stark zu, danach jedoch rasant ab. Der Verlauf der Längenänderung veranschaulicht dabei die kurzfristige Entwicklung der Temperaturen sehr gut, da die Temperaturen im Untersuchungsgebiet vorwiegend ab 1980 gestiegen sind. In den 1970er und Anfang der 1980er Jahre ist der Gletscher vorgestossen. Dies lässt sich damit erklären, dass der Tschiervagletscher durch seine geringe Grösse die kleinste Trägheit der untersuchten Gletscher aufweist und deshalb am stärksten und schnellsten auf kurzfristige Klimaänderungen reagiert.

Die Darstellung zu den kumulierten Jahresbilanzen weist einen sehr ähnlichen Verlauf wie die Längenänderung auf. Die Jahre mit positiven Massenbilanzen stimmen sogar ungefähr mit denjenigen der positiven Längenänderung überein. Dies weist wiederum auf die geringe Trägheit des Gletschers hin. Auch beim Tschiervagletscher zeigen die hochsignifikanten Massenverluste die Auswirkungen der Temperaturerhöhung somit unverkennbar.

Der **Rosegletscher** ist kürzer, aber grösser als der Tschiervagletscher. Und auch bei diesem ist ein hochsignifikanter Längenverlust festzustellen. Zwischen 1973 und 1984 ist eine kurze Stabilisation der Länge der Gletscherzunge zu erkennen; der Gletscherrückgang konnte dabei – ähnlich wie beim Morteratschgletscher – aber nicht unterbrochen werden. Der wissenschaftlich präzisere Wert zur Aussage über den Massenhaushalt sind die Jahresbilanzen, die in diesem Fall den Schwund des Gletschers bestätigen. Dies ist anhand der Darstellung zu den kumulierten Jahresbilanzen sehr gut zu sehen. Die Jahres- und Winterbilanzen zeigen einen ähnlichen Verlauf wie bei den anderen beiden untersuchten Gletschern; dies ist erneut auch an der Entwicklung der Höhe der Gleichgewichtslinie sichtbar. Eine massive Abnahme der gespeicherten Wassermenge konnte beobachtet werden.

Alle untersuchten Gletscher haben während der Untersuchungsperiode hochsignifikant und massiv an Länge und Masse eingebüsst. Dies ist wegen nicht signifikant veränderten Winterbilanzen hauptsächlich auf die erhöhte Schmelze im Sommer zurückzuführen.

Die durch die Gletscherschmelze entstandene Speicheränderung wirkt sich unweigerlich auf den Wasserhaushalt im Gebirge und somit auch auf den Abfluss der Gebirgsbäche aus.

Bei einem Vergleich des Abflussregimes des **Berninabachs** in Abb. 17 mit den in Abb. 1 dargestellten Abflussregimetypen, wird deutlich, dass das Einzugsgebiet glazio-nival geprägt ist. Die mittlere Höhe des Einzugsgebietes liegt nicht wesentlich tiefer als bei einem Gebiet, dessen Abfluss normalerweise glazial beeinflusst ist. Der Vergletscherungsgrad ist jedoch so klein, dass das Einzugsgebiet des Berninabaches glazio-nival geprägt ist. Demzufolge hat sowohl die Speicheränderung des Gletschers, wie auch der Niederschlag in Form von Schnee wesentlichen Einfluss auf die Abflussmengen.

Bei gleichbleibendem Niederschlag und erhöhter Gletscherschmelze sollte das System mit einem verstärkten Abfluss reagieren. In Abb. 18 sind die mittleren Sommer- und Jahresabflüsse während der Untersuchungsperiode dargestellt. Ihr Verlauf bestätigt den vermuteten positiven Trend. Dieser ist aber nicht signifikant. Die ungefähr gleich starke Steigung der linearen Trendlinie bei beiden Kurven weist darauf hin, dass sowohl die Sommer- wie auch die Winterabflüsse zu vergleichbaren Anteilen zur leichten Zunahme der Jahresabflüsse beitragen. Deshalb ist diese ohnehin nicht signifikante Tendenz nicht nur auf die durch die Klimaerwärmung verursachte erhöhte Gletscherschmelze während des Sommers zurückzuführen. Der Trend ist zu vernachlässigen. Zudem ist darauf hinzuweisen, dass die Sommerabflüsse aussagekräftiger sind, da die Messanlage im Winter vereist ist und somit verfälschte Messungen entstehen können.

Das Abflussverhalten vom **Rosegbach** im Jahresverlauf (siehe Abb. 19) entspricht gemäss Abb. 1 einem glazialen Abflussregime. Bei einer mittleren Höhe des Einzugsgebietes von 2716 m.ü.M. und einem Vergletscherungsgrad von 30.1 % entspricht diese Zuordnung den Vermu-

tungen und lässt erwarten, dass sich die Auswirkungen der Speicherungsänderung in den Gletschern während der Untersuchungsperiode mit einem erhöhten Abfluss zeigen.

Die in Abb. 20 dargestellten Kurven zu den mittleren Sommer- und Jahresabflüssen zeigen eine knapp nicht signifikante positive Steigung während der Untersuchungsperiode. Trotz starken Schwankungen ist zu erkennen, dass die Steigung der linearen Trendlinie in den mittleren Sommerabflüssen grösser ist als bei den mittleren Jahresabflüssen. Dies weist darauf hin, dass die mittleren Sommerabflüsse aufgrund des kleinen Anteils der Wintermonate am Jahresabfluss von nur 11 % die mittleren Jahresabflüsse ebenfalls haben steigen lassen. Bei der Betrachtung der Zeitreihe seit Messbeginn von 1955 bis 2008 sind die Tendenzen im mittleren Sommer- wie auch Jahresabfluss signifikant. Es ist anzunehmen, dass bei einer Erweiterung der Untersuchungsperiode eine gemäss Hypothese erwartete Zunahme der Abflussmengen im glazialen Einzugsgebiet des Rosegbaches beobachtet werden könnte. Dies entspräche auch der in Hänggi/Weingartner (2009) beobachteten signifikanten Zunahme des jährlichen Abflusses in anderen glazialen Einzugsgebieten in der Schweiz. Die verstärkte Gletscherschmelze ist somit in den Gebirgsbachabflüssen zu erahnen, jedoch während der Untersuchungsperiode noch nicht ausgeprägt.

Die Unterschiede in der Entwicklung der Abflussmengen beider Bäche sind nicht so gut zu erkennen wie erwartet. Die Analysen zeigen, dass der Rosegbach ähnlich, aber ein wenig stärker auf die Klimaerwärmung reagiert hat als der Berninabach. Dies lässt sich an den knapp nicht signifikanten Trends sowie an den gegenüber dem Jahresabfluss verstärkt ansteigenden Sommerabflussmengen erkennen. Die Hypothese einer signifikanten Zunahme der Abflussmengen konnte während der Untersuchungsperiode aber nicht bestätigt werden.

In dieser Arbeit konnte somit für die ausgewählten Einzugsgebiete gezeigt werden, dass die massive Abnahme des gespeicherten Wasservolumens der Gletscher mit einem hochsignifikanten Temperaturanstieg im Oberengadin einhergeht. Die Auswirkungen auf Gebirgsbachabflüsse hingegen blieben während der Untersuchungsperiode gering und sind nicht signifikant.

Diese Schlussfolgerungen können allerdings nicht ohne weiteres auf andere Untersuchungsgebiete angewendet werden, da innerhalb von Gebirgen sehr starke Unterschiede von wesentlichen Faktoren wie beispielsweise dem Niederschlag bestehen; ein Hinweis darauf, wie sich die Abflussmengen von glazial und glazio-nival geprägten Einzugsgebieten bei gegebener Klimaerwärmung im Allgemeinen verhalten sollten, lässt sich jedoch durchaus ableiten.

Zudem wird durch diese Untersuchung klar, dass die gegenwärtige Zunahme der Abflussmengen, welche hauptsächlich durch die Massenabnahme der Gletscher verursacht wird, zeitlich begrenzt ist. Denn sobald die Speichermenge des Gletschers sehr klein oder verschwunden ist, ist die Speicheränderung nicht mehr so ausgeprägt, um gleich gross zu sein wie die zuvor angestiegene Menge der Abflüsse. Der Gletscher verliert seinen Einfluss auf die Abflussmengen. Von diesem Zeitpunkt an, welcher ungefähr auf das Jahr 2030 geschätzt wird, werden die Abflussmengen gemäss Huss et al. (2010) gezwungenermassen stark zu sinken beginnen. Um einen gesellschaftsrelevanten Beitrag für die erwarteten Auswirkungen dieses Phänomens leisten zu können, müssten Zukunftsprognosen errechnet werden; vgl. beispielsweise in Hänggi et al. (2011).

In der untersuchten Periode sind die Auswirkungen dieses Phänomens auf die Gebirgswelt noch nicht spürbar. In Zukunft wird die Bevölkerung der Alpenländer durch die Veränderung der Gebirgsbachabflüsse in Bezug auf die Wasser- und Energieversorgung jedoch vor neue Herausforderungen gestellt werden.

Literaturverzeichnis

- BAFU, Abteilung Hydrologie (2009), Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz 2008. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern.
- Hänggi, P. & R. Weingartner (2009), Zur Veränderung der hydrologischen Rahmenbedingungen für die Wasserkraftnutzung im Rheineinzugsgebiet bis Basel 1808–2007, Wasserkraftnutzung im Zeichen des Klimawandels: angepasste Strategien – neue Technologien/ Dresdner Wasserbaukolloquium 2009, 12.–13. März 2009. Bd. 39. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen, Dresden: Technische Universität Dresden, S. 53–62.
- Hänggi, P., T. Bosshard & R. Weingartner (2011), Swiss discharge regimes in a changing climate, Auswirkungen der hydroklimatischen Variabilität auf die Wasserkraftnutzung in der Schweiz. Dissertation. Hrsg. P. Hänggi. Bern: Geographisches Institut der Universität Bern.
- Hänggi, P. & R. Weingartner (2012), Variations in Discharge Volumes for Hydropower Generation in Switzerland, Water Resour Manage, doi 10.1007.
- Huss, M., S. Usselman, D. Farinotti, & A. Bauder, (2010), Glacier mass balance in the south-eastern Swiss Alps since 1900 and perspectives for the future, Erdkunde, 64(2), 119–140, doi:10.3112/erdkunde. 2010.02.02.
- Jordi, B. (2007), Auf den Spuren des Klimawandels. WWF Schweiz/ Europäisches Tourismus Institut an der Academia Engiadina/ Naturforschende Gesellschaft des Engadins SESN, Zürich/ Samedan.
- Kundzewicz, Zbigniew W., Robson, Alice J. (2004), Change detection in hydrological records – a review of the methodology, Hydrological Sciences/ Journal des Sciences Hydrologiques, 49(1) February 2004.
- MeteoSchweiz (2009), Klimabericht Kanton Graubünden, Arbeitsberichte der MeteoSchweiz, 228, p.40.
- OcCC (2007), Klimaänderung und die Schweiz 2050, http://proclimweb.scnat.ch/products/ch2050/PDF_D/CH2050.pdf, (Stand 15.12.10).
- Press, F. & R. Siever (2008), Allgemeine Geologie. 5. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- Van Dam, J.C. (1999), Impacts of Climate Change and Climate Variability on Hydrological Regimes. Cambridge University Press, Cambridge.
- VAW/ETHZ & EKK/SCNAT (2009), Gletscherberichte (1881–2009). «Die Gletscher der Schweizer Alpen», Jahrbücher der Expertenkommission für Kryosphärenmessnetze der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT) herausgegeben seit 1964 durch die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich. No. 1–126, (<http://glaciology.ethz.ch/swiss-glaciers/>).
- Vischer, D. & A. Huber (2002), Wasserbau. 6. Auflage, Springer, Berlin.

Corinne Singeisen
Militärstrasse 3
4410 Liestal
c.singeisen@bluewin.ch

