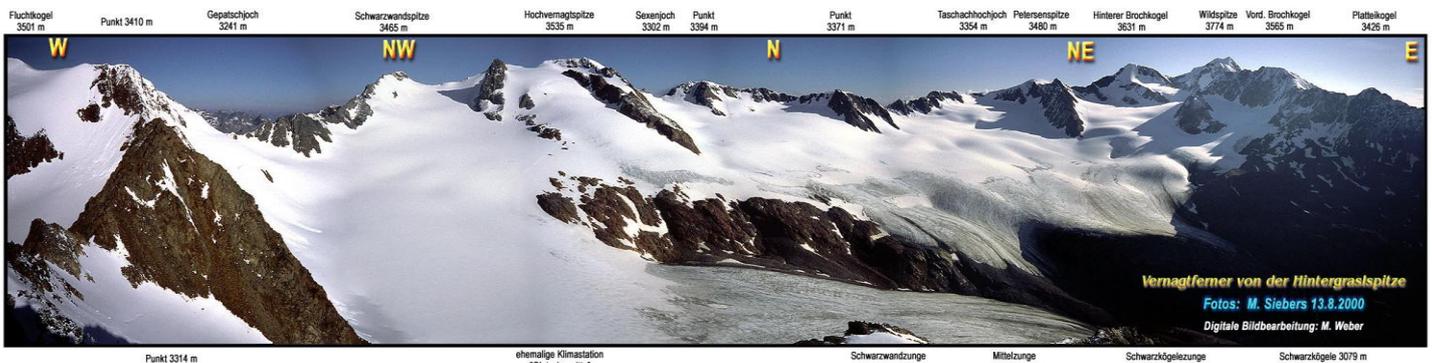


**Statistisch-hydrologische Analyse der
Abflusszeitreihe des Vernagtferners,
Öztaler Alpen, für den Zeitraum 1974
bis 2009**

**Statistical-Hydrological Analysis of the
Discharge Time Series of the
Vernagtferner, Oetztal Alps, for the
Period from 1974 to 2009**



Bachelorarbeit

Department für Geographie

Ludwig-Maximilians-Universität München

Betreuer: Prof. Dr. Otfried Baume

Kommission für Glaziologie

Bayerische Akademie der Wissenschaften

Betreuerin: Dr. Heidi Escher-Vetter

eingereicht am 23. Juni 2010

von **Daniel Ketzer**

Matrikelnummer: 6012186

Danielke@web.de Daniel.Ketzer@kfg.badw.de

Inhaltsverzeichnis

EINLEITUNG	I
ABSTRACT.....	II
ZIEL DER STUDIE.....	1
1. TEIL UNTERSUCHUNGSGEBIET VERNAGTFERNER	2
1.1 GEOGRAPHISCHE LAGE	2
1.2 HYDROLOGISCHE UND KLIMATISCHE BESCHREIBUNG	4
1.3 BISHERIGE ARBEITEN	6
2. TEIL GLETSCHERABFLUSS.....	8
2.1 SCHMELZPROZESSE	8
2.2 MASSENBILANZ	9
2.3 GESAMTABFLUSS	11
2.4 PEGELSTATION VERNAGTBACH	13
3. TEIL ANALYSE.....	16
3.1 ABFLUSSWERTE	18
3.1.1 Sommerabflusssummen.....	18
3.1.2 Monatssummen und -mittelwerte	19
3.2 ANALYSE DER ABFLUSSMAXIMA	23
3.2.1 Entwicklung HQ- Tageswerte	23
3.2.2 Mengenmäßige Veränderung	25
3.2.3 Zeitliche Veränderung der Maxima	26
3.2.4 Vergleich der Stundenwerte mit 5-min-Werten	27
3.2.5 Zusammenhang von Abfluss und Niederschlag	30
3.3 ABFLUSSGANGLINIE	32
3.3.1 Abflussganglinie Vergangenheit und Zukunft	32
3.3.2 Veränderung im mittleren Tagesgang eines Monats	35
3.3.3 Vergleich Abfluss bei positiver und negativer Massenbilanz	38
4. TEIL VERÄNDERUNGEN IM UNTERSUCHUNGSGEBIET IM ZEITRAUM 1974 - 2009	39
4.1 VERÄNDERUNG DER ABFLUSSGANGLINIE	39
4.2 VERÄNDERUNG DER ELA UND AAR	41
4.3 ABGRENZUNG SCHNEE- UND GLETSCHERSCHMELZE	42
5. TEIL ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION DER ERGEBNISSE.....	44
6. TEIL AUSBlick UND FAZIT	46
DANKSAGUNG	48
LITERATURVERZEICHNIS.....	49
ANHANG.....	53

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersichtskarte des Vernagtferners von 2007. Quelle: KFG.	3
Abbildung 2: Massenbilanz Vernagtferner 1964/65 bis 2008/09. Erweitert nach KFG 2006.	6
Abbildung 3: Anteil der Eisschmelze am Gesamtabfluss im Jahr 2003 an der Pegelmessstelle Goldbergkees an der Pasterze. Quelle: Böhm et al. 2007, 3.	9
Abbildung 4: Massenbilanz eines Gletschers. Quelle: Weber/Braun 2004, 18.	10
Abbildung 5: Abflusssystem eines vergletscherten Einzugsgebietes. Verändert nach Oerter 1981b, 15.	12
Abbildung 6: Aufnahme des Vernagtferners nach einem Sommerneuschneefall am 3. Juli 2003. Foto: L. Braun, KFG 2003	13
Abbildung 7: Pegelstation Vernagtbach mit Abflussgerinne bei geringem Abfluss. Foto: L. Braun, KFG 2004.	14
Abbildung 8: Pegelstation Vernagtbach mit Abflussgerinne bei hohem Abfluss am 12. Juli 2003. Foto: L. Braun, KFG 2003.	15
Abbildung 9: Datenblatt der Abflüsse 2003. Eigene Darstellung in Anlehnung an Oerter 1984.	17
Abbildung 10: Sommersumme der Abflüsse des Vernagtbachs. Eigene Darstellung.	18
Abbildung 11: Mittlerer Abfluss des Monats Juni für den Zeitraum 1974 - 2009. Eigene Darstellung.	20
Abbildung 12: Veränderung des Anteils der Monate Mai und Juni an der Sommersumme für den Zeitraum 1974 - 2009. Eigene Darstellung.	21
Abbildung 13: Entwicklung des HQ auf Tages- und Stundenbasis für den Monat August. Durch Ausfall der Messgeräte fehlt der Stundenwert für 1994. Eigene Darstellung.	23
Abbildung 14: Entwicklung MHQ für die Monate Mai bis Oktober für den Zeitraum 1974 - 2009. Eigene Darstellung.	26
Abbildung 15: Darstellung der Stunden-Werte für den Zeitraum 3.-5. August 2003 mit Maximal- und Minimalwerten. Eigene Darstellung.	28
Abbildung 16: Darstellung der 5-min-Werte für den Zeitraum 3.-5. August 2003 mit Maximal- und Minimalwerten.	28
Abbildung 17: Abfluss mit 5-minütiger Auflösung am 29. August 2003. Eigene Darstellung.	29
Abbildung 18: Abfluss und Niederschlag am 29. August 2003. Datenbasis Stundenwerte. Eigene Darstellung.	31
Abbildung 19: Abflussganglinie für das Jahr 1978. Eigene Darstellung.	33
Abbildung 20: Abflussganglinie für das Jahr 1981. Eigene Darstellung.	33
Abbildung 21: Abflussganglinie für das Jahr 1990. Eigene Darstellung.	34
Abbildung 22: Abflussganglinie für das Jahr 2003. Eigene Darstellung.	34
Abbildung 23: Mittlerer Tagesgang der Monate Mai bis Oktober für die Jahre 1978, 1981, 1990 und 2003.	36

Abbildung 24: Amplituden der Tagesabflüsse für die Jahre 1978, 1981, 1990 und 2003. Eigene Darstellung.	36
Abbildung 25: Vergleich von MQ und Stunden-HQ für die Jahre 1978, 1981, 1990 und 2003. Eigene Darstellung.	38
Abbildung 26: Veränderungen der Abflussganglinien für den Zeitraum 1974 - 2009. Dargestellt sind die Entwicklungen in 5 Jahresschritten. Eigene Darstellung.	40
Abbildung 27: Vergleich der Abflussganglinie für die Zeiträume 1974 - 1978, 1990 - 1994 und 2005 - 2009.	40
Abbildung 28: Entwicklung der Gleichgewichtslinie (ELA) und der Accumulation Area Ratio (AAR). Eigene Darstellung.	41
Abbildung 29: Blick vom Schwarzkögele am 1. Juni 2003. Foto: KFG 2003.	42
Abbildung 30: Blick vom Schwarzkögele am 1. Juli 2002. Foto: KFG 2002.	43
Abbildung 31: Blick vom Schwarzkögele am 1. Juli 2003. Foto: KFG 2003.	43
Abbildung 32: Mittlerer Abfluss des Monats Juni für den Zeitraum 1974 - 2009. Eigene Darstellung.	53
Abbildung 33: Veränderung des Anteils der Monate Mai und Juni an der Sommersumme für den Zeitraum 1974 - 2009. Eigene Darstellung.	53
Abbildung 34: Mittlerer Abfluss der Monate Juli und August für den Zeitraum 1974 - 2009. Eigene Darstellung.	54
Abbildung 35: Veränderung des Anteils der Monate Juli und August an der Sommersumme für den Zeitraum 1974 - 2009. Eigene Darstellung.	54
Abbildung 36: Mittlerer Abfluss des Monats September für den Zeitraum 1974 - 2009. Eigene Darstellung.	55
Abbildung 37: Mittlerer Abfluss des Monats Oktober für den Zeitraum 1974 - 2009. Eigene Darstellung.	55
Abbildung 38: Veränderung des Anteils der Monate September und Oktober an der Sommersumme für den Zeitraum 1974 - 2009. Eigene Darstellung.	56
Abbildung 39: Entwicklung des HQ auf Tages- und Stundenbasis für den Monat Mai. Eigene Darstellung.	56
Abbildung 40: Entwicklung des HQ auf Tages- und Stundenbasis für den Monat Juni. Eigene Darstellung.	57
Abbildung 41: Entwicklung des HQ auf Tages- und Stundenbasis für den Monat Juli. Durch Ausfall der Messgeräte fehlt der Wert für 1994. Eigene Darstellung.	57
Abbildung 42: Entwicklung des HQ auf Tages- und Stundenbasis für den Monat August. Durch Ausfall der Messgeräte fehlt der Wert für 1994. Eigene Darstellung.	58
Abbildung 43: Entwicklung des HQ auf Tages- und Stundenbasis für den Monat September. Eigene Darstellung.	58
Abbildung 44: Entwicklung des HQ auf Tages- und Stundenbasis für den Monat Oktober. Eigene Darstellung.	59

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Höhenverteilung des Vernagtferners. Eigene Darstellung nach Daten der KFG.	2
Tabelle 2: Mittlerer Abfluss von Mai bis Oktober für den Zeitraum 1974 - 2009. Eigene Darstellung.	22
Tabelle 3: Monatliche Abflussanteile an der Jahressumme. Werte für den Zeitraum 1974 bis 2009.	22
Tabelle 4: Ergebnisse der HQ-Entwicklung für den Zeitraum 1974 - 2009. Eigene Darstellung.	24
Tabelle 5: Vergleich von Stunden- und 5-min-Werten für das Jahr 2003. Angegebene Werte in [m ³ /s]. Eigene Darstellung.	29
Tabelle 6: Zeitpunkt [hh:mm] der Minima der Tages-MQ für die Jahre 1978, 1981, 1990 und 2003. Eigene Darstellung.	37
Tabelle 7: Zeitpunkt [hh:mm] der Maxima der Tages-MQ für die Jahre 1978, 1981, 1990 und 2003. Eigene Darstellung.	37

Abkürzungsverzeichnis

AAR	Accumulation Area Ratio. Verhältnis von Akkumulations- zu Gesamtgebiet eines Gletschers.
ELA	Equilibrium Line Altitude. Gleichgewichtslinie eines Gletschers
EZG	Einzugsgebiet
HQ	Höchster Stunden/ Tagesmittelwert
KFG	Kommission für Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
MQ	Arithmetischer Mittelwert von Q
MHQ	Arithmetischer Mittelwert von HQ
MNQ	Arithmetischer Mittelwert von NQ
NQ	Niedrigster Tagesmittelwert von Q
Q	Abfluss [m^3/s]
Qmax	Maximaler Abfluss eines Zeitraums
Qmin	Minimaler Abfluss eines Zeitraums
a	Jahr
d	Tag
h	Stunde
m NN	Höhenangabe. Meter über Normalnull
w. e.	Wasseräquivalent

Einleitung

"Klimaerwärmung und Gletscherschwund: Der Zusammenhang ist offensichtlich" (Petrascheck/Wagner 1999, 3). Kuhn (2004, 1) bezeichnet Gletscher als empfindliche und deutlich sichtbare Indikatoren für die Veränderung des Klimas in den Alpen seit 1850. Die globale Erwärmung sind am deutlichsten in der Kryosphäre der Alpen durch Gletscherschwund und kürzere Schneebedeckung zu erkennen (vgl. Bogataj 2007, 43). Veränderte Klimabedingungen spiegeln sich vor allem im Abfluss wider. Drastische Änderungen der Abflüsse zeigen daher eindrücklich die Auswirkungen des Global Change in hochalpinen Gebieten (vgl. Braun et al. 2007, 33). Das Klima der Alpen ist sehr komplex, da die Berge die allgemeine Zirkulation stark beeinflussen. Im Zeitraum 1974 bis 2009 steigt die mittlere Lufttemperatur deutlich und bringt in den Alpen bereits Symptome wie verringerten Schneefall, sich zurückziehende Gletscher und vermehrte Felsstürze mit sich, die sich mit der weiteren Klimaveränderung verschlimmern werden (vgl. Escher-Vetter et al. 1998, 6). Neben der Temperatur beeinflussen aber auch Strahlungsumsätze und Niederschläge die Schmelzwasserproduktion, so dass Gletscher auch ohne Klimaänderung ständigen Veränderungen unterworfen sind (vgl. Petrascheck/Wagner 1999, 3). In alpinen Einzugsgebieten ist der Abfluss die wichtigste Wasserhaushaltskomponente, er stellt die Reaktion aller Einflussgrößen des hydrologischen Systems dar. Variationen von mittleren Abflusswerten sind hierbei ebenso wichtig wie Menge und Häufigkeit einzelner (Extrem-) Ereignisse (vgl. Escher-Vetter et al. 1998, 6).

Um die Entwicklung der Gletscher als Reaktion auf veränderte klimatische Bedingungen zu erkennen (vgl. Braun et al. 2007, 34), bedarf es Informationen über Jahre bis Jahrzehnte.

Aufgrund der exponierten Lage von Gletschern ist die Beobachtung von Schnee- und Gletscherprozessen und ihrer meteorologischen Randbedingungen mühsam und arbeitsintensiv. Die Datenreihen sind dementsprechend eingeschränkt gegenüber den hydro-meteorologischen Beobachtungen in niedriger gelegenen Bereichen (vgl. Holzmann et al. 2009, 9). Die seit 1974 durchgehend bestehende Abflusszeitreihe des Vernagtferners erlaubt es, die Einflüsse der positiven und vor allem negativen Massenbilanzen auf den Gletscherabfluss darzustellen und Trends hinsichtlich Maxima und zeitlicher Verteilung zu erkennen. Anhand dieser Ergebnisse wird ebenfalls ein Ausblick in die Zukunft möglich.

Abstract

This Bachelor's Thesis deals with the consequences of climate change for runoff from the Vernagtferner glacier in the Oetztal Alps, Austria. Snow cover and glaciers provide the main sources of runoff during the ablation period. Furthermore, glaciers are important because of their long-term water storage. Varying climatic conditions cause glaciers to react in different ways. Discharge variations are caused by periods of sunny, warm weather as well as by snowfall, and bad weather. The Vernagtferner discharge time series for the interval between 1974 and 2009 describes the development of the glacier discharge as well as analyzes and identifies changes. These changes are measured at the 11.44 km² Vernagtferner drainage basin which is controlled by the 'Pegelstation Vernagtbach' (gauging station).

The climatic pattern during these 36 years, of which 28 have negative mass balances, tends to increase runoff amounts and reduce the storage volume of the Vernagtferner. The impact of positive, negative, and balanced mass balance, resp., on glacier runoff is determined. The changes in climate conditions also affect the diurnal variations. The time series is discussed with special regard to both maxima and means based on daily, monthly and yearly values. Hourly and five-minute records are compared with respect to extreme runoff conditions. The Vernagtbach hydrograph is studied to identify seasonal shifts and to observe the varying influence of the respective months. In glaciated catchments, July and August typically contribute 60 to 70% of the yearly runoff amounts.

The annual discharge amounts increase and reach their maxima in the decade 2000. These years show a total of 2200 mm of discharge, whereas in the years 1974 to 1979 it is only about 1200 mm. The strongest changes show up in June, where the increase of daily means is about 0.05 m³/s per year. In July and August the hourly peak flows rise up to 14.76 m³/s. The development in September and October is not as strong. The distribution of the discharge amounts varies as snow and ice begin to melt earlier in the year. Firn storage disappears and causes even stronger runoff in the summer. The ELA rises, and in some years is located above the glacier. The diurnal variations increase from 0.58 m³/s in 1978 to 7.38 m³/s in 2003. The year 2003 is an extreme example for increasing glacier runoff and the consequences for the glacier. The ablation area covers 100% of the glacier, which causes extreme peak flows and the highest daily mean ever. The combination of a heavy rainfall and high ice melt culminates in a discharge of 6.87 m³/s.

This study highlights the changes of discharge for the Vernagtferner.

Ziel der Studie

Ziel dieser Arbeit ist es, die Veränderungen des Abflusses am Vernagtferner im Ötztal in Österreich in Zeiten des Klimawandels aufzuzeigen. Sie soll Aufschluss darüber geben, wie sich die Abflüsse im Untersuchungszeitraum unter veränderten klimatischen Bedingungen entwickeln. Untersucht werden sollen sowohl die quantitativen Veränderungen der Mittelwerte auf Jahres-, Monats- und Tagesbasis, als auch die Maximalwerte. Die zeitlichen Verschiebungen der Abflussmaxima werden untersucht, um Aussagen über den Tages- sowie über den Jahrgang der Abflüsse zu machen. Jahreszeitliche Verschiebungen der Abflussganglinie geben Auskunft über Anteile der Schnee- und Eisschmelze. Ebenso lassen die Abflusswerte Aussagen über den Einfluss sommerlicher Schneefälle zu.

Ein Vergleich der stündlichen Messwerte mit Werten von fünfminütiger Auflösung soll Klarheit darüber bringen, ob eine höhere Auflösung andere Maxima hervorbringt und ob sich der höhere Registrier- und Auswertungsaufwand lohnt und somit neue, bzw. andere Erkenntnisse bringt. Die Veränderung der Gleichgewichtslinie und das Verhältnis zwischen Akkumulations- und Ablationsgebiet sind wichtig für die räumliche und zeitliche Veränderung der Abflüsse. Der Einfluss von Starkniederschlägen auf den Abfluss im Hochsommer soll an Beispielen dargestellt werden.

Neben der Recherche von bisherigen Ergebnissen enthält diese Arbeit 33 selbst erstellte Abbildungen, welche die Entwicklung der Gletscherabflüsse genauer darstellen. Diese Abbildungen sind für das Verständnis der Zusammenhänge in dieser Arbeit grundlegend. Einige Abbildungen und Ergebnisse sind ausführlicher dargestellt, die restlichen Abbildungen befinden sich im Anhang und werden im Text erwähnt.

1. Teil Untersuchungsgebiet Vernagtferner

1.1 Geographische Lage

Das Untersuchungsgebiet für diese Arbeit befindet sich im inneren Ötztal in Österreich. Das Rofental beginnt oberhalb der Gemeinde Vent in Tirol und reicht ca. 15 km nach Westen und Südwesten zum Alpenhauptkamm (vgl. Moser et al. 1987). Der Vernagtferner befindet sich in einem der am stärksten vergletscherten Bereiche der Ostalpen, nahe der Grenze zu Italien. Der Vernagtbach wird vom Gletscher(-abfluss) gespeist und führt an der Pegelstation die gesamten Abflüsse des Gletschers und des Vorfelds im 11,44 km² großen Einzugsgebiet (EZG). Das EZG weist eine Höhe zwischen 2635 m NN (Pegelstation) und 3631 m NN auf, bei einer mittleren Höhe von 3123 m NN (vgl. Tab. 1). Der Gebietsumfang beträgt 15,3 km, bei einer mittleren Gebietsbreite von 3,3 km.

Geologisch befindet sich das Untersuchungsgebiet auf dem kristallinen Grundgebirge der Zentralalpen. Die Gletscherauflage sowie die Moränen und Schutthalden von Lockergesteinsmassen sind Zeugnis der glazialüberprägten Geomorphologie. Die Moräne verläuft entlang der Talhänge, die Pegelstation befindet sich genau im Gletscherbett früherer Zeiten. Der Boden besteht im Wesentlichen aus Moränenboden, Landnutzung besteht im EZG keine.

Höhenstufe m NN	Flächenanteil (%)
2600-2800	5,3
2800-3000	16,1
3000-3200	42,8
3200-3400	30,1
3400-3600	5,6
3600-3800	0,1
Total	100

Tabelle 1: Höhenverteilung des Vernagtferners. Eigene Darstellung nach Daten der KFG.

Der Gletscher erstreckt sich über eine Höhe zwischen 2747-3631 m NN (1974) bzw. 2790-3598 m NN (2009) (vgl. Abb.1). Der vergletscherte Anteil des Einzugsgebiets hat sich von

81% im Jahr 1974 auf 71% im Jahr 2009 verringert, mit einem Maximum von 83% zwischen 1977 und 1981. Die Gletscherfläche zu Beginn des Untersuchungszeitraums beträgt damit 9,30 km² bzw. 8,12 km² im Jahr 2009. Das Ablationsgebiet ist über den untersuchten Zeitraum immer größer geworden, von 20% in den 1970er-Jahren bis zu 100% im Jahr 2003 (vgl. Escher-Vetter/Siebers 2007, 309).

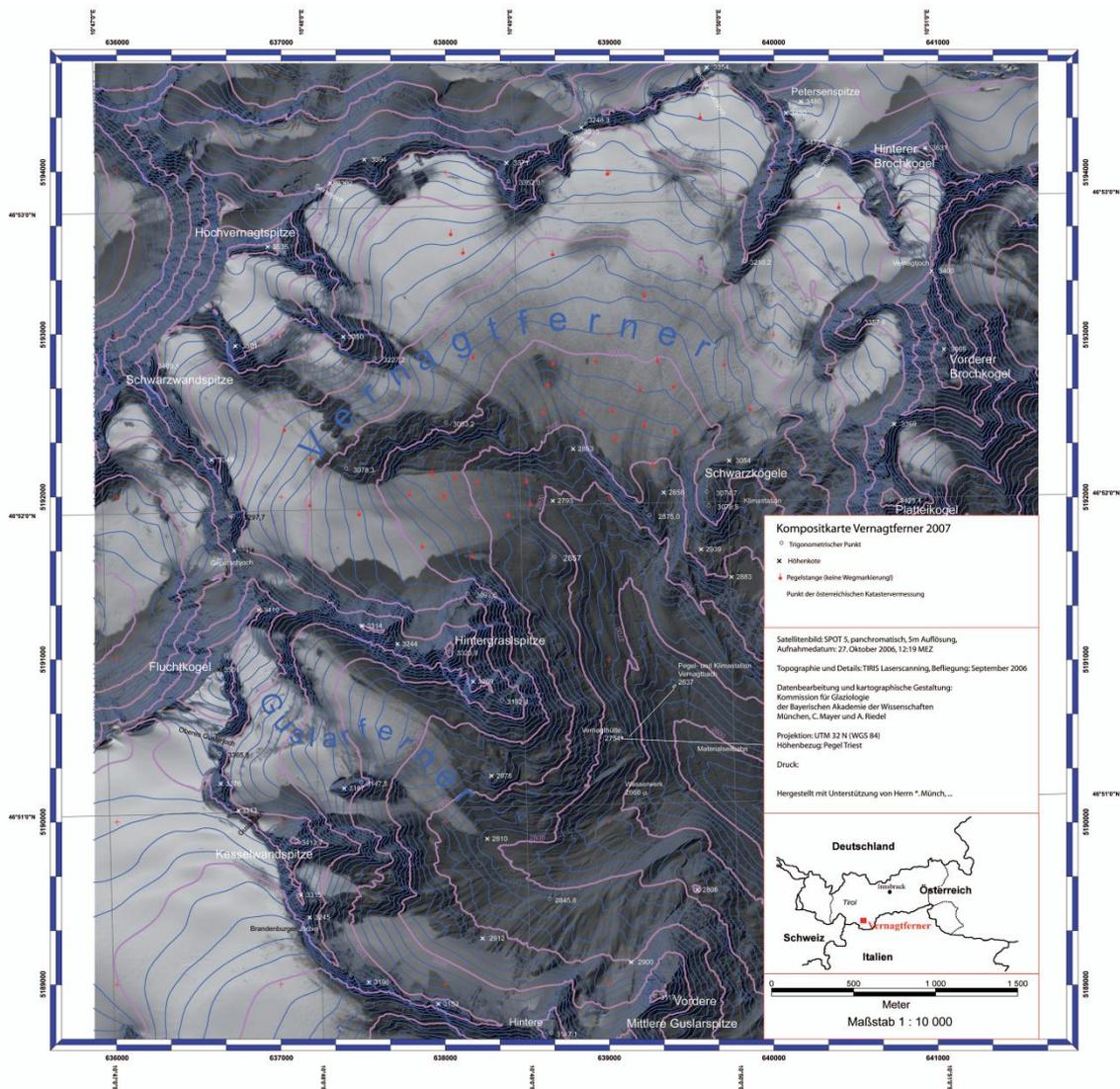


Abbildung 1: Übersichtskarte des Vernagtferners von 2007. Quelle: KFG.

1.2 Hydrologische und klimatische Beschreibung

Der Vernagtferner liegt im österreichischen Teil der Zentralalpen in der inneralpinen Trockenzone. Das Klima wird von mehreren klimatischen Zonen, nämlich der mediterranen, der kontinentalen, der atlantischen sowie der polaren Zone, beeinflusst. Der Alpenbogen trennt das mediterrane vom maritimen Klima und erzeugt so ein eigenes regionales Klima. Durch hohe Gradienten bei der Temperatur und vor allem beim Niederschlag können die Verhältnisse je nach naturräumlichen Gegebenheiten stark variieren. Niederschlagstrends sind räumlich variabler und Veränderungen der Niederschläge sind aufgrund höherer Temperaturen subtiler (vgl. Bogataj 2007, 43). Die Temperatur in den Alpen ist in den vergangenen 100 Jahren um 1-2°C gestiegen, der globale Anstieg liegt dagegen bei (nur) 0,7°C (vgl. Kuhn 2004, 3). Die durch den Klimawandel hervorgerufene Erwärmung ist damit in den Alpen nahezu dreimal so stark wie die globale und die Jahre 1994, 2000, 2002 und 2003 sind die wärmsten der letzten 500 Jahre in den Alpen. Die Niederschläge haben sich in ihrer Menge nicht merklich verändert, sondern unterliegen ihren normalen saisonalen und jährlichen Schwankungen. Eine Abnahme der Niederschläge ist bisher nicht erkennbar, allerdings ist das Jahr 2003 das trockenste der letzten 500 Jahre (vgl. Bogataj 2007, 44).

Neuere Studien von Hänggi/Plattner (2009, 8) zeigen dagegen, dass der mittlere Jahresabfluss in den Alpen in Zukunft einerseits wegen der Niederschlagsabnahme und andererseits wegen der Verdunstungszunahme abnehmen wird. Neben den direkten Folgen für den Wasserhaushalt der Alpen durch Temperatur-, Evapotranspirations- und Niederschlagsänderungen sind die Fließgewässer sehr stark von indirekten Folgen im Zusammenhang mit dem Gletscherschwund betroffen, sodass die Abflussregimes und ihre Änderungen eine wichtige Rolle spielen (vgl. Veit 2002, 296).

Durch große orographische Unterschiede, starke Temperaturgradienten und Luftzirkulationen kommt es in den Alpen zu Steigungsniederschlägen, die im Allgemeinen intensiver ausfallen als Niederschlag im Flachland. Gletscher sind im hydrologischen Kreislauf der Hochgebirgsregionen eine wichtige Komponente, da sie den Niederschlag im Winter in Form von Schnee binden und im Sommer als Schmelzwasser wieder abgeben. Außerdem wird Wasser im Gletschereis langjährig gespeichert. Gletscher reagieren empfindlich auf klimatische Veränderungen, die sich in ihrer Massenbilanz bemerkbar machen (vgl. Huss 2009, 1).

Der Gebietseinfluss auf die Abflussbildung muss berücksichtigt werden, da er sich vor allem durch physiographische Parameter zeigt. Diese sind u.a. Gebietsfläche, Höhenerstreckung, Flächen-Höhen-Verteilung, Neigung und Ausrichtung der Hänge sowie Gelände- und Oberflächenbeschaffenheit (vgl. Escher-Vetter et al. 1998, 7).

Das Abflussregime wird als glazial eingestuft. Ein EZG mit glazialem Abflussregime weist einen hohen Gletscheranteil und eine tages- und jahreszeitlich schwankende Gletscherspende auf. Die Monate Juli und August dominieren den Jahresabfluss mit einem Anteil von rund 60% (vgl. Veit 2002, 76).

Die Wasserführung ist im Winter sehr gering, der Sommerabfluss dominiert sehr stark. Moser et al. (1987, 193) geben einen Anteil von 97% für die Sommerabflüsse (Mai - Oktober) an.

Der mittlere Niederschlag beträgt an der Pegelstation 783 mm. Der Anteil der Niederschläge in der Ablationsperiode (Mai - September) liegt bei 60% (467 mm); im Untersuchungszeitraum dieser Arbeit (Mai - Oktober) fallen durchschnittlich 67% der Niederschläge. Die Niederschlagsmessungen sind erst seit 1990 kontinuierlich und (nahezu) lückenlos vorhanden, sodass sich diese Werte lediglich auf den Zeitraum 1990 - 2009 beziehen. Die Abweichungen sind groß, so liegt das Maximum bei 1009 mm (2009), das Minimum bei 515 mm (2003). Schnee macht ca. 70% des mittleren Jahresniederschlags aus, mit abnehmender Tendenz. An der Pegelstation werden die Sommerniederschläge mit der Belfort-Niederschlagswaage registriert. Der mittlere Gebietsniederschlag kann nicht direkt gemessen werden, weil er kleinräumig große Unterschiede aufweist.

Die Modellierung des Gebietsniederschlags mit dem Niederschlags-Abfluss-Modell HBV3-ETH9 und den Daten der Jahre 1974/75 bis 2002/03 liefert einen Mittelwert von 1381 mm w.e. (Wasseräquivalent), davon entfallen 892 mm w.e. auf den Winterniederschlag und 489 mm w.e. auf den Sommerniederschlag. Der Winterniederschlag kann ebenso über die Massenbilanz errechnet werden, die am Vernagtferner mit der glaziologischen Methode bestimmt wird. Hierzu werden im Frühjahr Schneeschächte gegraben und über die Dichte und Schneehöhe das entsprechende Wasseräquivalent bestimmt. Dieser Vorgang wird verteilt über den Gletscher ausgeführt, sodass sich eine räumliche Verteilung der Messungen für die Errechnung des Gebietsniederschlags ergibt (vgl. Escher-Vetter et al. 2004, 2).

Die Verdunstung wird im Einzugsgebiet nicht gemessen. Die Bestimmung der tatsächlichen Verdunstung gestaltet sich außerordentlich schwierig. Indirekt kann die Verdunstung über

die Berechnung der Energiebilanz ermittelt werden (vgl. Zmarsly et al. 2002, 132f.). An der Pegelstation kann der Wert über die energetische Methode berechnet werden, da Messdaten über Lufttemperatur, Luftfeuchte, Strahlung und Windgeschwindigkeit vorliegen. Auf dem Gletscher fehlen diese Messdaten, sodass sich die Verdunstung als Restglied der Wasserbilanzgleichung ergibt. Hier wird ein Wert von 170 mm veranschlagt, der anhand von Berechnungen, Modellierungen und Untersuchungen an anderen Gletschern gewählt wird (vgl. Escher-Vetter et al. 2004, 3).

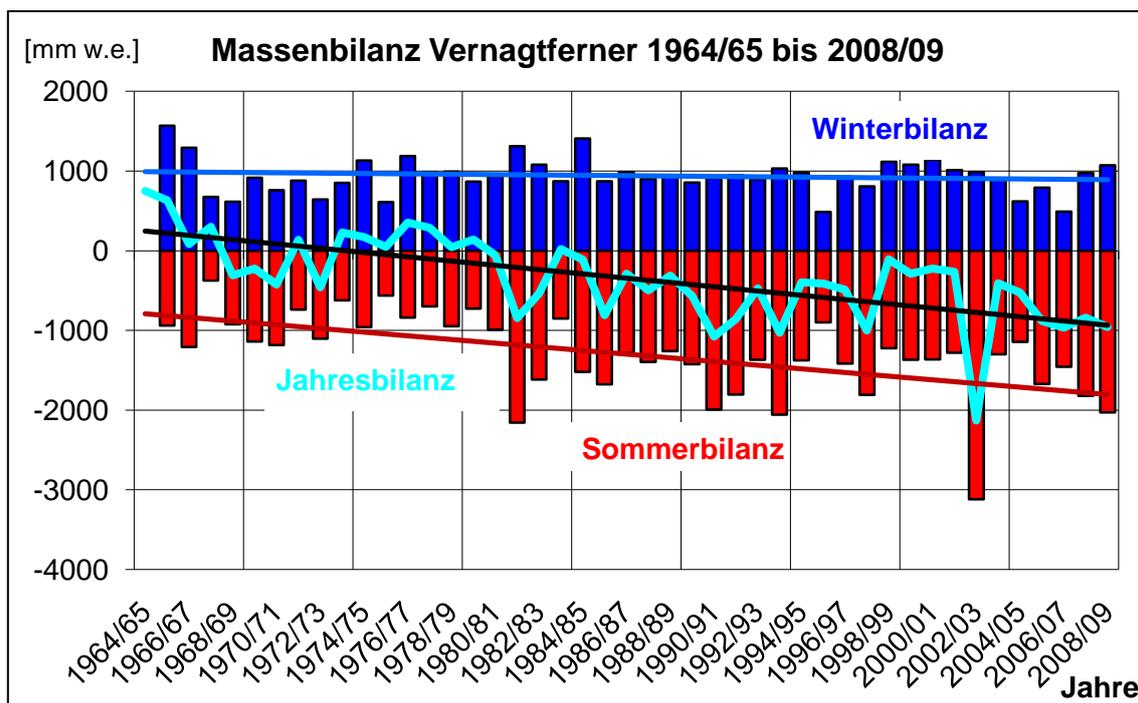


Abbildung 2: Massenbilanz Vernagtferner 1964/65 bis 2008/09. Erweitert nach KFG 2006.

1.3 Bisherige Arbeiten

Viele Arbeiten im Bereich der Gletscherforschung und Hydrologie wurden bereits am Vernagtferner durchgeführt, hauptsächlich von der Kommission für Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. Escher-Vetter/Reinwarth (1994a+b) veröffentlichen ihre Ergebnisse aus zwei Dekaden Abflussmessung von 1974 - 1993, in denen sie auf Veränderungen der vergletscherten Fläche eingehen und die jährliche Verteilung der Abflüsse darstellen. Außerdem arbeiten sie die maximalen und durchschnittlichen Abflüsse sowie die Tagesgänge des Abflusses heraus. Bereits für diesen Zeitraum lässt sich feststellen,

dass die Maximalwerte größer geworden sind und die Tagesschwankungen ebenfalls zunehmen. Die Summe der Abflüsse über das ganze Jahr ist laut Braun (2002) bereits sehr stark gestiegen, was auf die Klimaveränderung und den daraus resultierenden Gletscherschwund zurückzuführen ist, der sich seit den 1980er-Jahren verstärkt hat. Er führt an, dass die Veränderungen im Hochgebirge stärker sind als in Tieflandregionen, vor allem aufgrund der höheren Frostgrenze und der verminderten Zwischenspeicherung in Form von Schnee und Eis (vgl. Braun 2002, 5). Escher-Vetter et al. (1998) analysieren die Auswirkungen von Klimaveränderungen auf den Wasserhaushalt alpiner, teilweise vergletschertes Gebiete. In Abhängigkeit von vorgegebenen Klimaszenarien werden Sensitivitätsanalysen des Abflusses mit einem konzeptionellen Modell durchgeführt, die zeigen, dass der Abfluss unterhalb von 3000 m NN hauptsächlich auf Niederschlagsveränderungen reagiert. Durch höhere Temperaturen im Sommer fallen die Abflüsse aus vergletscherten Gebieten höher aus. Den Einfluss von Sommerschneefällen auf den Abfluss untersuchen Escher-Vetter/Siebers (2007). Hierbei stellen sie fest, dass die sommerlichen Schneefälle von 1976 bis 1991 abgenommen, danach jedoch wieder zugenommen haben. Sommerliche Schneefälle sind allerdings starken jährlichen Schwankungen unterworfen. Starke Sommerschneefälle haben erheblichen Einfluss auf die Sommersumme, was sich am Beispiel 2006 eindrücklich zeigt. Hier sind die Abflüsse bis Anfang August extrem hoch (ähnlich wie 2003). Dann minimieren Schneefälle die Abflüsse abrupt, sodass der August als Monat der größten Schmelze komplett ausfällt (vgl. KFG 2006, 1f.). Die Konsequenz höherer Temperaturen für dieses hochalpine Gebiet ist, dass die Niederschläge bis in höhere Lagen vermehrt als Regen niedergehen, sodass sie direkt in den Abfluss eingehen. Die Entwicklung der Lufttemperatur und des Abflusses am Vernagtferner werden ebenfalls von Escher-Vetter/Siebers (2007) untersucht, mit dem Ergebnis, dass Temperatur und Abfluss stark korrelieren. Dies wird für viele Modelle als Basis verwendet.

2. Teil Gletscherabfluss

2.1 Schmelzprozesse

Die Schmelzprozesse werden durch die Energiebilanz, d. h. durch den Energieaustausch zwischen Eisoberfläche und Atmosphäre bestimmt. Vor allem durch die einfallende Sonnenstrahlung sowie ihren von Eis und Schnee reflektierten Anteil, verbunden mit dem langwelligen Strahlungsverlust des Eises, wird das Schmelzen gesteuert. Bewölkung verringert die langwelligen Strahlungsverluste des Eises. Die starke positive Korrelation zwischen Sonnenstrahlung und Temperatur sowie die negative zwischen Bewölkung bzw. Niederschlag und Temperatur erlauben es, den Zusammenhang zwischen Klima und Gletscher durch Änderungen von Temperatur und Niederschlag zu parametrisieren. Diese beiden Parameter sind durch lange Messreihen gut dokumentiert (vgl. Kuhn 2004, 1).

Die Temperatur nimmt mit der Seehöhe um ca. 0,6 °C pro 100 Höhenmeter ab, was auch die abnehmende Energiemenge widerspiegelt (vgl. Böhm et al. 2007, 1). Daher stellt die Lufttemperatur ein gutes Maß für die Energiebilanz dar. Die Schmelze wird jedoch ebenso von anderen Faktoren wie Exposition, Abschattung und Albedo beeinflusst. Durch die hohe Albedo des Schnees fällt das Abschmelzen nur sehr schwach aus, solange Schnee auf dem Gletscher liegt. Das Schmelzen des Schnees an der Oberfläche führt dazu, dass das Schmelzwasser der Schwerkraft folgend in die darunter liegenden Schneeschichten gelangt. Das Wasser gefriert wieder, wenn die Schneeschichten eine Temperatur unter 0°C haben. In diesem Fall wird die freiwerdende Energie des Gefrierens zum Erwärmen der Schneedecke genutzt. Im anderen Fall, also wenn die Schneedecke bereits durchgehend auf 0°C erwärmt ist, fließt das Wasser in der Schneedecke oder an der Grenzfläche zwischen Schnee und Eis, bzw. zwischen Firn und Eis, ab. Eis schmilzt aufgrund der geringeren Albedo schneller als Schnee. Im Eis erfolgt der Abfluss unverzögert in oberflächlichen Abflusskanälen und kann in Gletscherspalten oder an anderen Störstellen des Gletschers in sein Inneres gelangen (siehe Abb. 5) (vgl. Holzmann et al. 2009, 10).

Die Abflusskanäle im Inneren werden immer größer und erreichen rasch die Gletscherbasis. An der Gletscherzunge tritt das Wasser aus dem Gletscher aus und fließt im Gletscherbach ab (vgl. Böhm et al. 2007, 1f.).

Abbildung 3 zeigt den Anteil der Eisschmelze am gesamten Abfluss der Pegelmessstelle Goldbergkees der Pasterze für das Jahr 2003. Hier wird deutlich, dass der Anteil der

Eisschmelze am Abfluss im Sommer nahezu 100% beträgt. In diesem Jahr, bei komplett ausgeapertem Gletscher, besteht der Abfluss Mitte August nur aus Eisschmelzwasser. Diese Abflussanteile können auch für den Vernagtferner angenommen werden. Im Juli und August 2003 ist der Vernagtferner ebenfalls komplett schneefrei, sodass auch hier der Abfluss nur aus Eisschmelze gespeist wird. Selbst hohe Niederschlagsmengen in den Wintermonaten können einen anschließenden heißen Sommer nicht ausgleichen (vgl. Bauder/Funk-Salami 2009, 6).

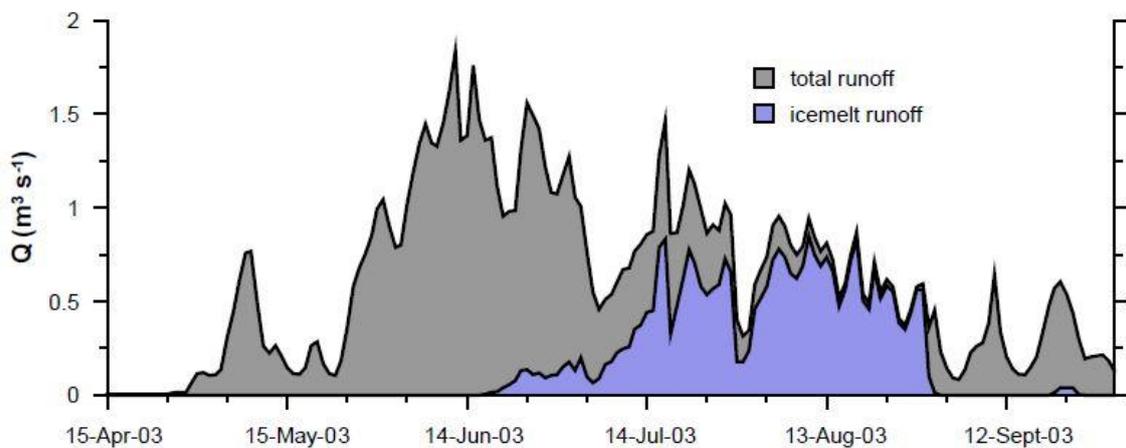


Abbildung 3: Anteil der Eisschmelze am Gesamtabfluss im Jahr 2003 an der Pegelmessstelle Goldbergkees an der Pasterze. Quelle: Böhm et al. 2007, 3.

2.2 Massenbilanz

Der Schnee auf dem Gletscher wird im Winter gespeichert und in der Ablationsperiode als Abfluss freigegeben (vgl. Herrmann 1977, 111f.). Für Gletscher gibt es zwei elementare Vorgänge, welche die Massenbilanz bestimmen: Akkumulation und Ablation. Hauptursache der Akkumulation ist der Niederschlag in Form von Schnee. Die Akkumulationsperiode ist hauptsächlich im Winter, wenn der Niederschlag als Schnee niedergeht und durch Wind und Lawinen (auf den Gletscher) verlagert wird. Die Ablationsperiode dauert von Mai bis September. Unter Ablation sind alle Verluste zusammengefasst, die durch sommerliches Abschmelzen, Verdunstung und Kalben des Gletschers stattfinden. Die Massenbilanz drückt das Verhältnis zwischen Akkumulation und Ablation aus (vgl. Abb. 4). Sie ist positiv, wenn

mehr Schnee akkumuliert wird als während der Ablationsperiode schmilzt, ansonsten ist sie negativ.

Der Gletscher ist im Untersuchungszeitraum unterschiedlichen Witterungsbedingungen unterworfen. Jahre mit niedriger oder hoher Akkumulation im Winter, Jahre mit schwacher oder starker Schnee- und Eisschmelze, Sommerschneefälle oder frühe Schneefälle im September oder Oktober wirken sich auf die Massenbilanz aus (vgl. Abb. 2/ Abb. 4), die wiederum die Höhenlage der Gleichgewichtslinie (ELA - Equilibrium Line Altitude) am Ende des glaziologischen Haushaltsjahres (Oktober bis September) bestimmt. Ihre Höhe schwankt von Jahr zu Jahr (vgl. Veit 2002, 58). Die ELA wird häufig auch als Schneegrenze bezeichnet, da sie die Grenze zwischen apermem Gletscher und Schnee-/Firnfläche darstellt.

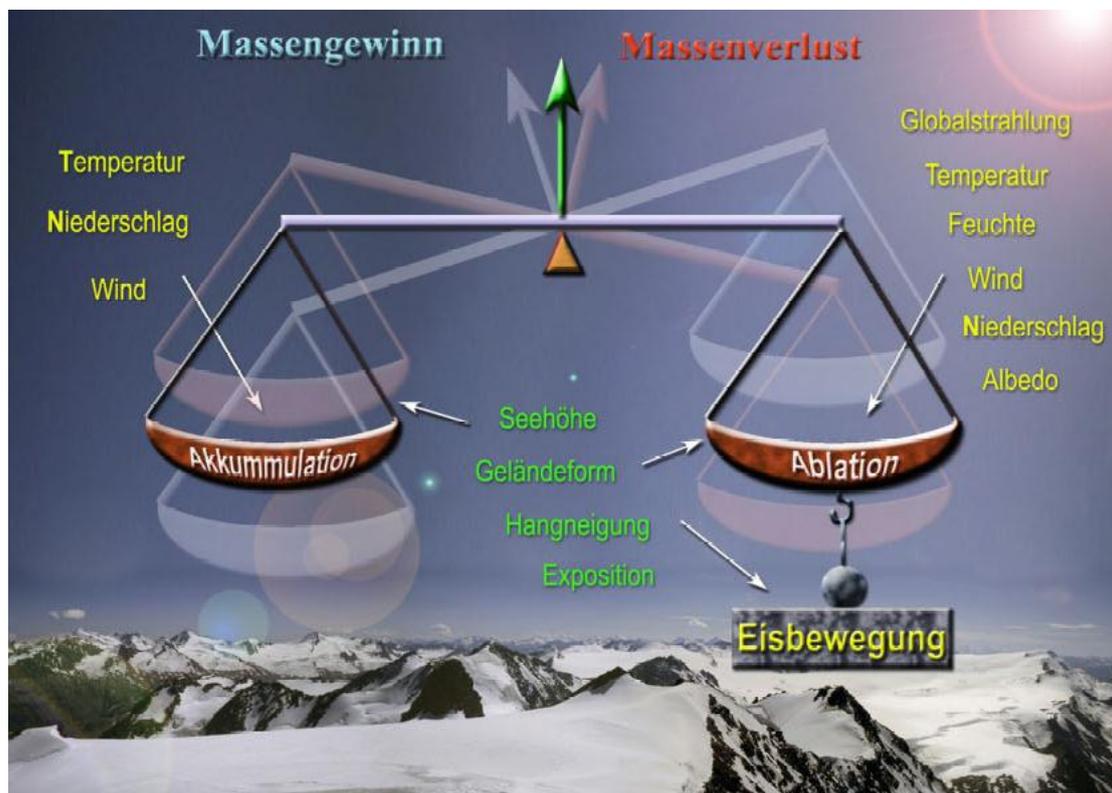


Abbildung 4: Massenbilanz eines Gletschers. Quelle: Weber/Braun 2004, 18.

Das Flächenverhältnis zwischen Akkumulationsgebiet und Gesamtgletscherfläche wird mit der AAR (Accumulation Area Ratio) ausgedrückt. ELA und AAR sind sehr hoch mit der Massenbilanz korreliert (vgl. Schöner 2009, 140). Täglich aufgenommene Bilder von der Gipfelstation Schwarzkögele zeigen die Veränderungen des Oberflächenzustands des

Gletschers. Mit ihrer Betrachtung lässt sich der Gletscher in Schnee-, Firn- und Eisgebiet aufteilen. Der Fortschritt der Ausaperung lässt sich so gut verfolgen.

2.3 Gesamtabfluss

Die Erstellung der Wasserbilanz in stark vergletscherten Einzugsgebieten mit großen Höhengradienten ist meist mit großen Schwierigkeiten verbunden. Vor allem die Ermittlung des Gebietsniederschlags, aber auch die Abschätzung der Verdunstung und die Erfassung des Gebietsabflusses sind schwierig zu bestimmen. Aufgrund der Vorfelddmorphologie der Gletscher sind Schmelzwässer oft schwer zu fassen, weshalb der Gebietsabfluss nur in Ausnahmefällen gemessen werden kann (vgl. Escher-Vetter et al. 2004, 1).

Das EZG des Vernagtferners liegt auf einer harten, undurchlässigen Felsschicht; dadurch werden alle Abflüsse des Gletschers an der Pegelmessstelle erfasst (vgl. Braun et al. 2007, 38). Im unvergletscherten Teil weist der Abfluss keine Besonderheiten gegenüber anderen unvergletscherten EZG im Hochgebirge auf. Grundwasser wird hauptsächlich im Frühjahr durch Schneeschmelze oder im Sommer durch versickernde Niederschläge neu gebildet (vgl. Oerter 1981b, 6). Der Oberflächenabfluss eines Gebietes ist abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit und der Geländeneigung sowie der Intensität der Niederschläge (vgl. Wilhelm 1966, 24). Daneben existiert noch der unterirdische Abfluss, bei dem Wasser in den Boden sickert und an anderen Stellen als Quelle wieder an die Oberfläche tritt. Die Interzeption kann im vorliegenden Fall vernachlässigt werden, da außer Moosen und Flechten keine Vegetation vorhanden ist. Abbildung 5 zeigt die Verweilzeiten des Schmelzwassers im Gletscher, während der Abfluss im Vorfeld des Gletschers unverzüglich stattfindet. Der Gletscher wirkt als großer Wasserspeicher. Der Großteil des Schmelzwassers fließt innerhalb weniger Stunden (h) als Oberflächenabfluss ab, ein Teil des Schmelzwassers sickert dagegen in intraglaziale Speicher im Gletscher, d. h. im wesentlichen in Schnee- und Firnspeicher, da Eis wasserundurchlässig ist. So verzögert sich der Abfluss um mehrere Tage (d). Erst dann tritt das Wasser aus dem Gletscher aus und fließt im Gletscherbach ab. Der Gesamtabfluss besteht aus den verschiedenen Abflusskomponenten Eis-, Firn- und Schneeschmelzwasser sowie Grundwasser. Die einzelnen Teilabflüsse aufzuschlüsseln ist allerdings nur mit großem Aufwand möglich (vgl. Oerter 1981b, 19).

Durch die Oberflächentemperatur des Gletschers von maximal null Grad Celsius überdauert Neuschnee im Sommer auch manchmal mehrere Tage, was den Abfluss stark reduziert und zeitlich verschiebt.

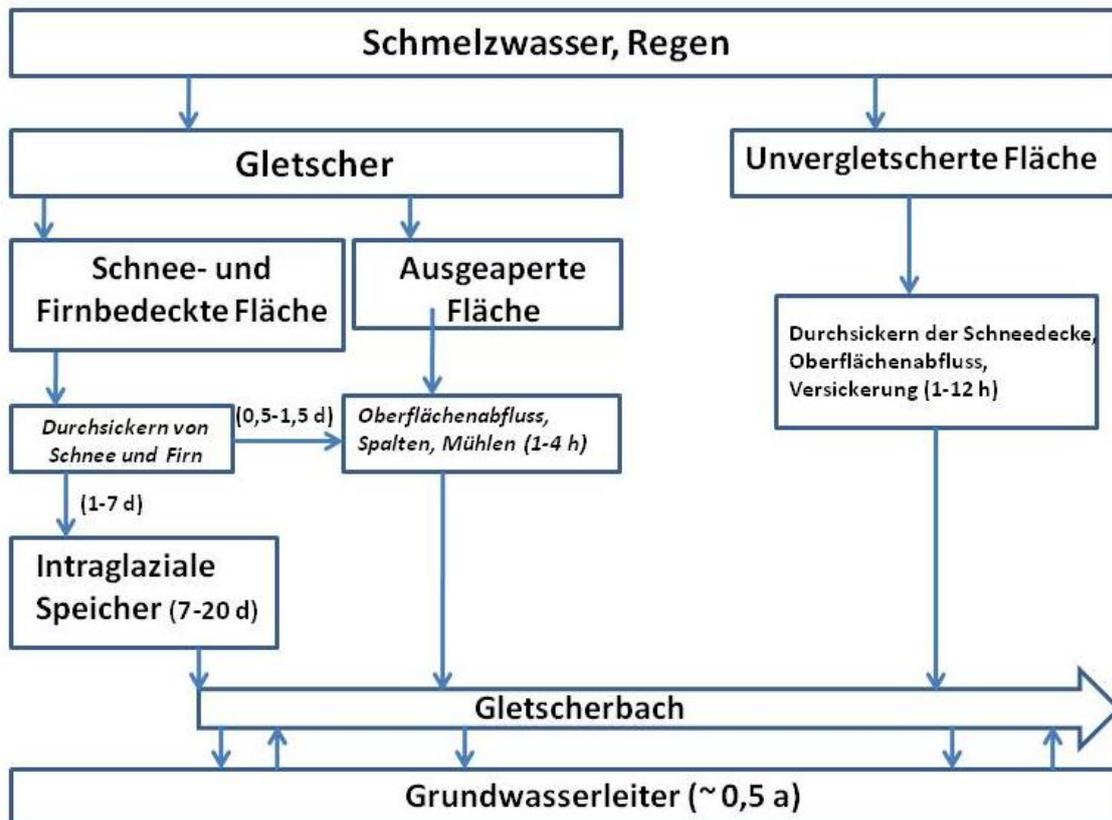


Abbildung 5: Abflusssystem eines vergletscherten Einzugsgebietes. Verändert nach Oerter 1981b, 15.

Einen großen Einfluss haben Frühjahrs- und Sommerschneefälle, da Neuschnee viel Strahlung reflektiert und somit die darunter liegenden Firn- und Eisschichten schützt (vgl. Bauder/Funk-Salami 2009, 6). Veit (2002, 77) nennt als Beispiel ein Ereignis am Vernagtferner aus dem Jahr 1983, als ein starker Schneefall am 2. August den Abfluss von vorher $5,61 \text{ m}^3/\text{s}$ auf $0,70 \text{ m}^3/\text{s}$ verringert; dies entspricht einem Rückgang von 88%.

Abbildung 6 zeigt den Gletscher im Sommer nach einem Schneefallereignis. Auffällig ist hier, dass die komplette Gletscherfläche hell weiß, also schneebedeckt ist. Dies verdeutlicht die Unterschiede der Oberflächentemperatur. Der Niederschlag wird auf dem Gletscher in Form von Schnee gespeichert, abseits des Gletschers schmilzt der Schnee direkt ab und geht in den Oberflächenabfluss ein.

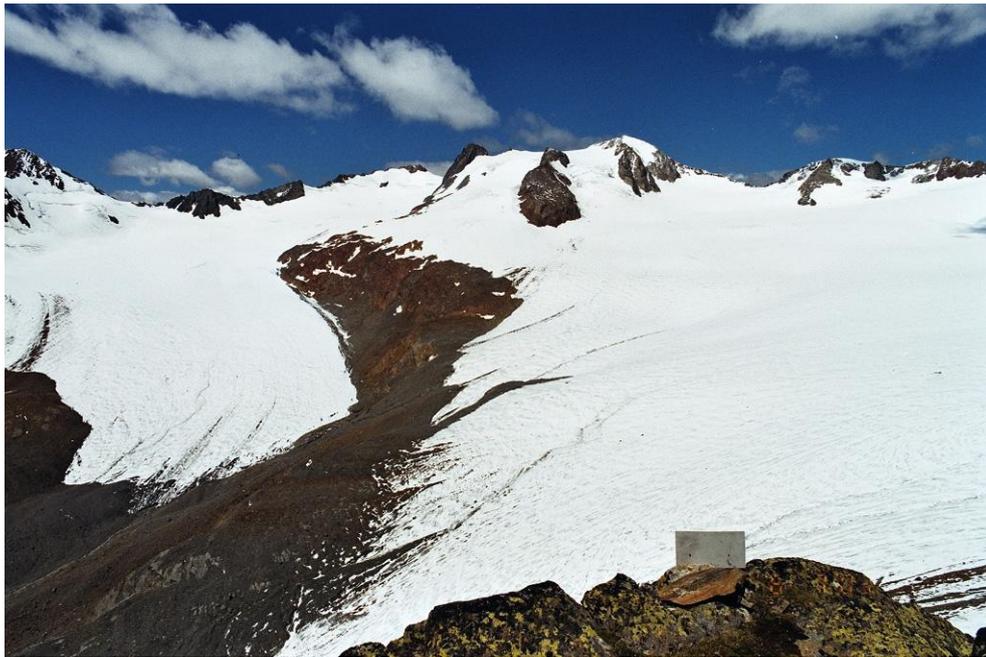


Abbildung 6: Aufnahme des Vernagtferners nach einem Sommerneuschneefall am 3. Juli 2003. Foto: KFG 2003.

2.4 Pegelstation Vernagtbach

Seit den 1960er-Jahren werden am Vernagtferner glaziologische und hydrologische Untersuchungen von der KFG durchgeführt. Dazu gehört die Bestimmung der Massenbilanzwerte, die für den Vernagtferner seit 1964/65 direkt glaziologisch bestimmt werden. Hieraus ergibt sich eine Komponente des Gebietsniederschlags, nämlich der im Winter deponierte Schnee. Registrierungen des Niederschlags an der Pegelstation und auf dem Schwarzkögele liefern den sommerlichen Anteil (vgl. 1.2). Außer der Verdunstung können somit alle Komponenten der Massenbilanz auf der Basis direkter Messungen ermittelt werden (vgl. Escher-Vetter et al. 2004, 1).

Um den Abfluss zu messen wird 1973 die Pegelstation Vernagtbach erbaut, die es erlaubt, den kompletten Abfluss des EZG zu erfassen. An der Station werden die verschiedenen Messwerte automatisch registriert und lokal gespeichert. Dies hat allerdings zur Folge, dass die Behebung von Störungen einige Tage dauern kann, da die Station unbemannt ist. Seit dem hydrologischen Jahr 1974 ist die Anlage der Pegelstation Vernagtbach in Betrieb und misst den Wasserstand. Die Station liegt ungefähr 1,5 km unterhalb des Gletscherendes im Gletschervorfeld (vgl. Braun et al. 2004, 39).

Abbildung 7 zeigt die Pegelstation bei niedrigem Abfluss im Jahr 2004, Abbildung 8 bei extremem Abfluss im Juli 2003.



Abbildung 7: Pegelstation Vernagtbach mit Abflussgerinne bei geringem Abfluss. Foto: L. Braun, KFG 2004.

Der Wasserstand wird anhand zweier Schwimmerpegel sowie (stichprobenweise) mit Ultraschallabtastung der Wasseroberfläche registriert (vgl. Escher-Vetter et al. 2004, 2). Die Schwimmerpegel laufen nur während der Ablationsperiode und werden je nach Witterungsverhältnissen im Oktober oder Anfang November stillgelegt. Im Winter werden keine kontinuierlichen Abflussmessungen durchgeführt; die Abflüsse betragen hier nur einige 10 l/s, ein typischer Wert für glaziale Abflussregime (vgl. Braun et al. 2007, 38). Der Pegeldurchfluss müsste den ganzen Winter über eisfrei gehalten werden, was aber nichtsdestotrotz zu Schwierigkeiten führen würde, da durch die Eisbedeckung des Gerinnes eine Querschnittsverengung erzeugt wird, die keine korrekte Registrierung mehr erlaubt.

Die zeitliche Auflösung der Abflussregistrierung liegt bei einer Stunde für die Jahre 1974 bis 2001, für 2002 bei zehn Minuten, seit 2003 sind es fünf Minuten. Die Umrechnung des Wasserstands [cm] in den Abfluss [m^3/s] erfolgt über die Schlüsselkurve, die das Verhältnis zwischen Wasserstandshöhe (die direkt gemessen werden kann) und Abflussmenge [m^3/s]

herstellt. Bei der Berechnung bzw. Erstellung dieser Schlüsselkurve kann es zu Fehlern kommen, welche die Genauigkeit der errechneten Werte beeinträchtigen. In den ersten beiden Dekaden wird der Abfluss mehrmals pro Jahr bei unterschiedlichen Wasserständen mit Flügelradmessungen kalibriert, um den gesamten Messbereich zu überdecken (vgl. Escher-Vetter et al. 2004, 2).



Abbildung 8: Pegelstation Vernagtbach mit Abflussgerinne bei hohem Abfluss am 12. Juli 2003. Foto: L. Braun, KFG 2003.

Seit Ende der 1990er-Jahre wendet die Kommission für Glaziologie die Salzverdünnungsmethode an. Salz (NaCl) eignet sich gut als Tracer für das Einzugsgebiet des Vernagtferners, da glaziale Abflüsse eine geringe Mineralisierung aufweisen. Hierzu wird an der festgelegten Eingabestelle oberhalb der Pegelstation eine genau definierte Menge des Salzes in den Vernagtbach eingespeist. Anschließend wird an der Pegelstation die Leitfähigkeit gemessen, über die dann anhand des Verdünnungseffekts auf die Durchflussmenge geschlossen werden kann.

3. Teil Analyse

Im Analyse-Teil werden die Veränderungen der Abflusswerte untersucht und dargestellt. Die Entwicklung der Sommerabflüsse und Monatswerte wird nachfolgend analysiert, um die Folgen der veränderten klimatischen Randbedingungen zu zeigen. Die Sommersummen umfassen die Abflüsse der Monate Mai bis Oktober (bzw. Mai bis September für 1974 und 1975). Der anschließende Vergleich von Stundenwerten mit 5-min-Werten bezieht auch Niederschlagsereignisse von kurzer Dauer mit ein und erlaubt sie zu quantifizieren.

Die Abflüsse werden mit den statistischen Formeln bzw. Maßen Maximum, Minimum, Mittelwert, Spannweite, Standardabweichung und linearer Trend dargestellt. Als Maximum gilt der jeweils größte Wert, als Minimum der kleinste Wert für einen bestimmten Zeitraum. Die Spannweite bezeichnet die Differenz zwischen dem größten (HQ bzw. Qmax) und kleinsten Wert (NQ bzw. Qmin) innerhalb der Datenreihe. Die Standardabweichung stellt ein einfaches Streuungsmaß mit der Formel

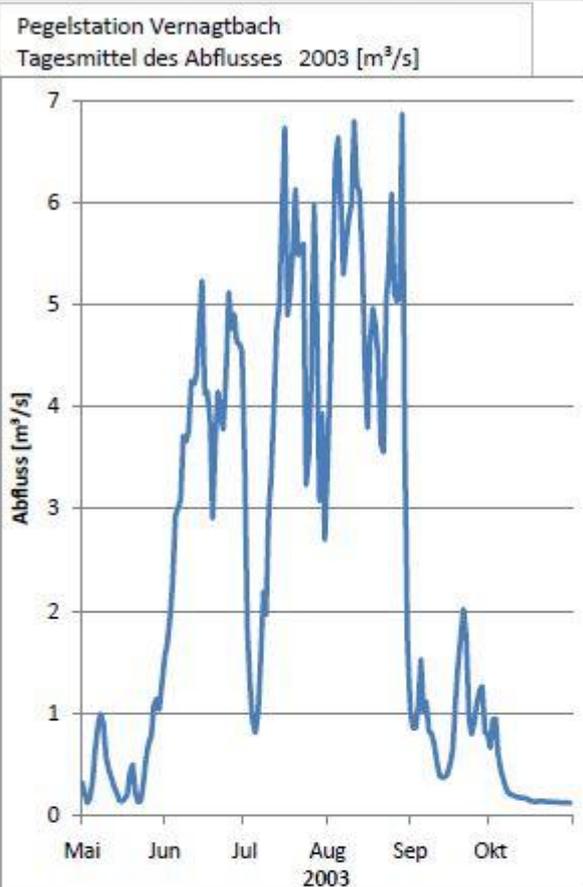
$$S := \sqrt{S^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

dar. Sie gibt die Streuung in der gleichen Maßeinheit an wie die ursprünglichen Messwerte (vgl. Bahrenberg/Giese 1975, 38f.).

Abbildung 9 zeigt das Datenblatt der Abflusswerte für das Jahr 2003. Die Analysen basieren teilweise auf den darin enthaltenen Daten, die aus den Messwerten berechnet werden. Eine ausführliche Beschreibung der Daten- und Datenblätter liefern Escher-Vetter/Reinwarth (1994a+b).

Vernagtbach	Pegel: Pegelstation der Kommission für Glaziologie der BADW: 1 km Entfernung vom Gletscherende bzw. 3,1 km vor Einmündung in die Rofenache. PN= NN+ 2634,8 m; F _N = 11,44 km ² , 75 % vergletschert; Abflüsse aus Stundenmitteln des Wasserstandes berechnet.
2003	

Tag	Mai	Juni	Juli	August	Sept.	Okt.
1	0,321	1,554	3,433	3,429	1,031	0,660
2	0,217	1,681	1,836	4,279	0,854	0,936
3	0,120	1,945	1,268	5,395	0,854	0,945
4	0,162	2,283	0,920	6,388	1,068	0,590
5	0,337	2,933	0,808	6,643	1,526	0,437
6	0,634	3,009	1,015	6,058	1,021	0,337
7	0,873	3,092	1,534	5,300	1,111	0,256
8	0,993	3,716	2,189	5,600	0,824	0,212
9	0,903	3,664	1,963	5,851	0,797	0,200
10	0,568	3,759	3,016	5,992	0,700	0,190
11	0,453	4,254	3,343	6,802	0,519	0,176
12	0,365	4,226	4,059	6,173	0,388	0,174
13	0,283	4,331	4,776	6,116	0,369	0,169
14	0,221	4,844	5,003	5,501	0,373	0,168
15	0,147	5,237	5,879	4,473	0,407	0,156
16	0,134	4,129	6,738	3,794	0,506	0,140
17	0,157	4,150	4,899	4,609	0,647	0,135
18	0,203	3,874	5,113	4,968	1,132	0,133
19	0,409	2,909	5,542	4,810	1,477	0,135
20	0,496	3,712	6,135	4,492	1,762	0,137
21	0,218	4,147	5,491	3,646	2,017	0,134
22	0,129	3,916	5,570	3,557	1,745	0,132
23	0,144	3,781	5,600	5,037	0,941	0,131
24	0,302	4,322	3,236	5,365	0,793	0,130
25	0,559	5,124	3,526	6,092	0,918	0,127
26	0,698	4,767	4,301	5,125	1,091	0,126
27	0,781	4,910	5,977	5,037	1,225	0,125
28	1,076	4,637	4,908	5,080	1,262	0,123
29	1,140	4,619	3,084	6,873	0,812	0,121
30	1,034	4,547	3,936	3,726	0,795	0,120
31	1,297		2,700	1,676		0,118



Hauptzahlen
Abflüsse in [m³/s] 2003

am	3.	1.	5.	31.	13.	31.
NQ	0,120	1,554	0,808	1,676	0,369	0,118
MQ	0,496	3,802	3,800	5,093	0,966	0,248
HQ	1,297	5,237	6,738	6,873	2,017	0,945
am	31.	15.	16.	29.	21.	3.

Abflußspenden (l/s km²)

	2003		76/03		74/03	
	V-X	VI-IX	V-X	VI-IX	VI-IX	VI-IX
Nq	10,3	32,3	2,6		17,4	MNq
Mq	209,9	298,5	111,7		153,1	Mq
Hq	600,8	600,8	422,5		413,6	MHq

1974/2003

	1974/2003			76/03		
NQ	0,010	0,038	0,111	0,328	0,076	0,009
MNQ	0,035	0,278	0,768	1,008	0,379	0,059
MQ	0,205	0,962	2,294	2,670	1,081	0,273
MHQ	0,602	2,128	4,068	4,508	2,175	0,688
HQ	1,303	5,237	6,738	6,873	4,034	2,177

Abflußhöhen [mm] 2003

A	116	862	890	1192	219	58
---	-----	-----	-----	------	-----	----

1974/2003

A	48	218	540	626	245	62
---	----	-----	-----	-----	-----	----

Höchste Stundenmittelwerte:
Abfluß HQ (m³/s), Abflußspende Hq (l/s km²)
Wasserstand am Pegel (cm)

	2003	1974/03
	05.8.	10.8.94
HQ	14,755	15
Hq	1289,8	1311
cm a.P.	161	161

Abbildung 9: Datenblatt der Abflüsse 2003. Eigene Darstellung in Anlehnung an Oerter 1984.

3.1 Abflusswerte

3.1.1 Sommerabflusssummen

Zur Bestimmung der Sommerabflusssummen des Vernagtbachs werden die Abflusstundenwerte auf Sommergesamtwerte summiert und in Millimeter umgerechnet (vgl. Abb. 10). Der niedrigste Jahresabfluss ergibt sich 1978 mit 932 mm, den maximalen Abfluss weist 2003 mit 3336 mm auf. Der mittlere Jahresabfluss liegt bei 1817 mm, mit einer Standardabweichung von 523 mm, die ca. 29% des Mittelwerts ausmacht. Die große Spannweite von 2404 mm und die hohe Standardabweichung zeigen die starke Variation der Abflussmenge, was weniger auf die unterschiedliche Schneemenge im Winter als auf unterschiedliche Schmelzwasserproduktion im Hochsommer zurückzuführen ist. Die Sommersummen weisen einen positiven Trend auf, bei einem Anstieg von 35 mm pro Jahr. Der lineare Trend ergibt einen Zuwachs von 1165 mm im Jahr 1974 auf 2400 mm für 2009.

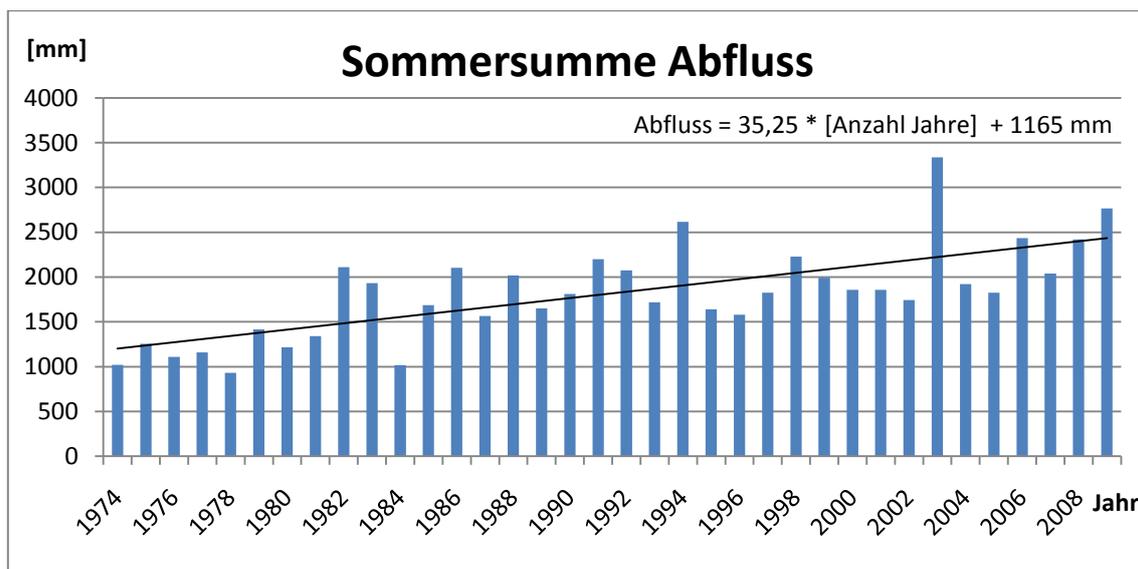


Abbildung 10: Sommersumme der Abflüsse des Vernagtbachs. Eigene Darstellung.

Im Vergleich mit den Massenbilanzen des Vernagtferners zeigt sich, dass die Abflüsse ab dem Jahr 1982 ansteigen, und fortan (außer 1984) jedes Jahr eine negative Massenbilanz aufweist. Ab diesem Zeitpunkt liegen die Abflüsse, mit Ausnahme von 1984, jedes Jahr über 1500 mm, was in den Jahren davor nie erreicht wird. In der Betrachtung der einzelnen Dekaden zeigt sich ebenfalls ein stark positiver Trend. So liegt der Mittelwert der 1970er-

Jahre unter 1200 mm (1974 - 1979), in der Dekade 1980 im Mittel jedoch bereits bei 1664 mm. Für 1990 - 1999 wächst dieser Wert auf 1969 mm und für die Dekade 2000 erreicht er sogar 2220 mm. Es zeigt sich also ein insgesamt sehr deutlicher Trend zu höheren Abflüssen (vgl. Abb. 10).

3.1.2 Monatssummen und -mittelwerte

Um die Entwicklung der Sommersummen zu erklären werden die einzelnen Monatswerte analysiert. Damit sich die einzelnen Monate einfacher miteinander vergleichen lassen sind die Achsen für alle Monate gleich skaliert. Der Wertebereich reicht von 0 bis 6 m³/s bzw. von 0 - 1400 mm. Zu beachten ist hierbei, dass die Abflusssummen [mm] direkt an die mittleren Abflüsse [m³/s] gekoppelt sind und deswegen nur der Veranschaulichung dienen, jedoch keinen anderen Informationsgehalt aufweisen, solange der Vergletscherungsanteil im EZG gleich bleibt. Der Wert in Millimetern bezieht sich auf das ganze EZG, dies ermöglicht Vergleiche unterschiedlicher EZG. Der Anteil der Monate am gesamten Sommerabfluss ist dargestellt, um zeitliche Verschiebungen zu erkennen.

Graphisch dargestellt ist der Juni (vgl. Abb. 11), alle anderen Monate sind im Anhang beigefügt und die Ergebnisse befinden sich in Tabelle 2. Die Kurve zeigt den mittleren Abfluss (MQ) des Juni für 1974 bis 2009. Der MQ steigt mit 0,05 m³/s pro Jahr an. Beeinflusst wird dieser Trend jedoch vor allem durch extreme Jahre wie 2008 und 2003, in denen die Abflüsse mit Werten von 2,13 und 3,80 m³/s extrem hoch ausfallen. Die Schneeschmelze ist im Juni sehr stark ausgeprägt und der Gletscher apert in den unteren Lagen bereits aus, was zu hohen Abflüssen führt (vgl. Abb. 11).

Der Mai ist großen Schwankungen unterworfen, die Werte steigen im Mittel ebenfalls stark an (vgl. Tab. 2/Abb. 11). Im Juli liegt der Anstieg bei 0,04 m³/s pro Jahr. Die Schwankungen sind durch sommerliche Schneefälle sehr groß, was sich in der Spannweite von 3,86 m³/s zwischen 0,64 m³/s (1980) und 4,50 m³/s (2003) erkennen lässt. Es wird deutlich, dass die hohen Temperaturen und Starkniederschläge im Sommer zu extrem hohen Tagesabflüssen führen, im Juli und August allerdings der Abfluss auch fast zum Erliegen kommen kann. Der MQ für Juli steigt sehr stark, von 1,84 m³/s für 1974 - 1983 auf 2,86 m³/s in den 2000er Jahren. Ähnlich sieht es im August aus, der die höchsten Abflüsse im Jahresverlauf aufweist. Hier ist die Entwicklung schwächer als im Juni und Juli, allerdings nehmen die Maxima zu.

Entscheidend für diesen Unterschied sind vor allem die Jahre 2005 und 2006, die jeweils durch einen kühlen August mit Schneefall geprägt sind und damit den MQ des August für die Dekade 2000 stark verringern. Die Maxima und Minima schwanken im August am stärksten, die Spannweite beträgt $4,35 \text{ m}^3/\text{s}$. In der direkten Betrachtung von Juli und August fällt auf, dass hohe Abflüsse dieser beiden Monate nur selten zusammenfallen (vgl. Abb. 34 und Abb. 35). 1994 und 2003 weisen Juli und August jeweils mit 4,15 und 3,97 (1994) sowie 3,80 und $5,09 \text{ m}^3/\text{s}$ (2003) sehr hohe Abflüsse auf. Zusammen ergeben Juli und August ca. 60 - 70% der Sommersumme.

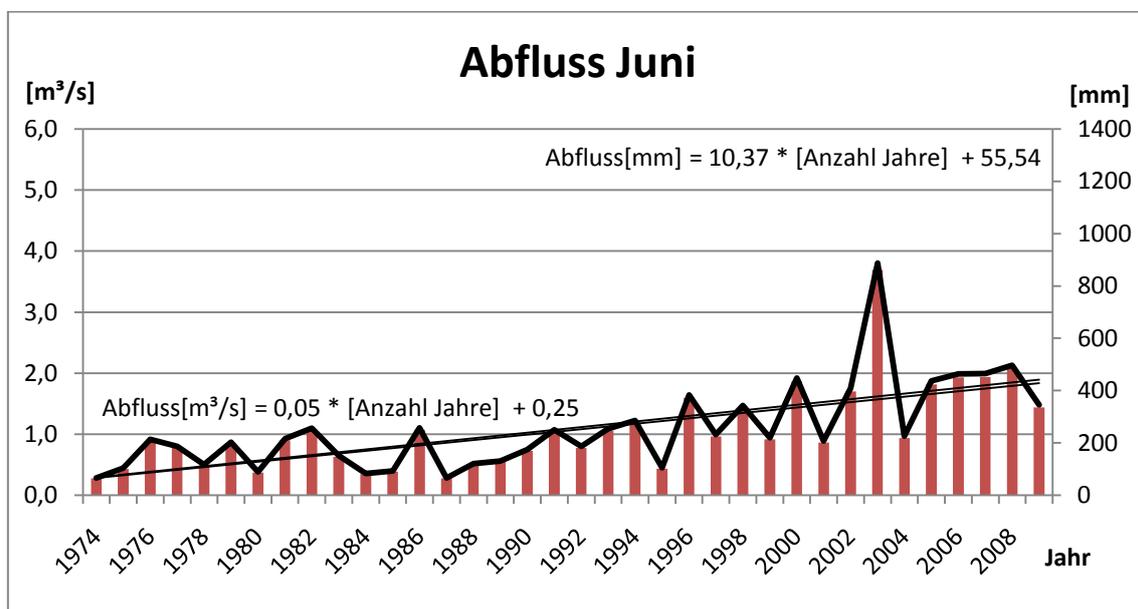


Abbildung 11: Mittlerer Abfluss des Monats Juni für den Zeitraum 1974 - 2009. Eigene Darstellung.

Für die Monate Mai und Juni ist der Anteil am Sommerabfluss in Abbildung 12 dargestellt. Wie oben bereits analysiert steigen die Monatsmittel stark an, der Anteil an der Sommersumme nimmt dementsprechend ebenfalls stark zu. Vor allem der Juni hat einen immer größeren Einfluss mit einem Wachstumskoeffizienten von 0,29% pro Jahr und einem Trend von 7,8 auf 17,8%. Mit im Mittel 247 mm ist der Juni für den Gesamtzeitraum von eher geringer Bedeutung (13%) für die Sommerabflusssumme (Mittelwert 1822 mm); allerdings hat der Abfluss im Juni stark zugenommen und in den letzten zehn Jahren im Schnitt 426 mm betragen, was einem Anteil von 19% an der entsprechenden Sommersumme entspricht (vgl. Tab. 3).

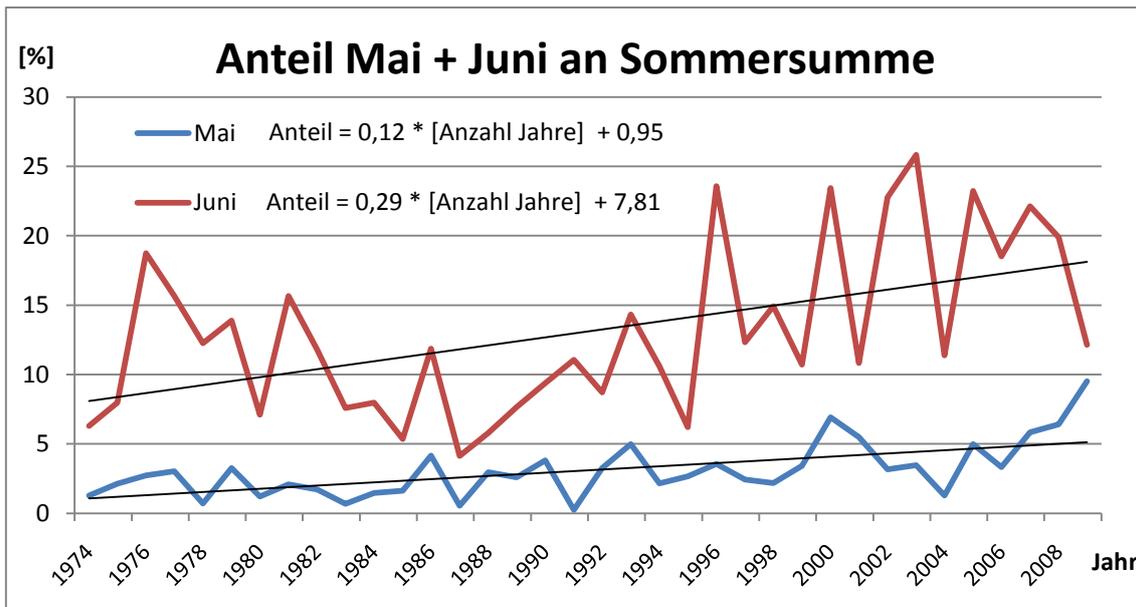


Abbildung 12: Veränderung des Anteils der Monate Mai und Juni an der Sommersumme für den Zeitraum 1974 - 2009. Eigene Darstellung.

Der Anteil des Monats August geht zurück (insgesamt um 4,9%), während er im Juli nur minimal geringer wird (1,6%) (vgl. Tab. 3). Auffällig ist vor allem, dass ab 2000 der Juli die gleichen Abflussmengen aufweist wie der August. Nur in der Dekade 2000 sind die Werte für August niedriger als in den zehn Jahren davor. Die leichten Abflussrückgänge im August werden von den anderen Monaten allerdings mehr als kompensiert. Der September weist nur einen minimal positiven Trend auf, bei einem Anstieg von knapp unter 1 m³/s für 1974 auf 1,28 m³/s für 2009 (vgl. Tab. 2/Abb. 36).

Der Abfluss im September unterliegt starken Unterschieden, was die Werte zwischen 0,18 und 2,19 m³/s verdeutlichen. Der Einfluss des Septembers nimmt über den Zeitraum stark ab (0,19%/a). Im Oktober liegt häufig bereits eine Schneeschicht auf dem Gletscher, die den Abfluss stark reduziert. Der Anteil des Oktobers am sommerlichen Abfluss nimmt mit ca. 0,1% pro Jahr (insgesamt ca. -2,8%) minimal ab, was über den langen Zeitraum aber als statistische Unsicherheit gewertet werden kann (vgl. Tab. 3).

	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober
MQ 1974-2009 [m³/s]	0,26	1,09	2,41	2,65	1,15	0,30
Spannweite Qmax - Qmin	1,10	3,52	3,86	4,35	2,01	1,18
Maximum [m³/s]	1,13	3,80	4,50	5,09	2,19	1,23
Minimum [m³/s]	0,02	0,28	0,64	0,74	0,18	0,05
Standardabweichung	0,22	0,71	0,86	0,95	0,54	0,25
MQ 1974-1983 [m³/s]	0,11	0,69	1,84	1,90	1,09	0,24
MQ 1980-1989 [m³/s]	0,14	0,63	2,25	2,48	1,28	0,42
MQ 1990-1999 [m³/s]	0,23	1,04	2,61	3,24	1,12	0,23
MQ 2000-2009 [m³/s]	0,49	1,88	2,86	2,86	1,21	0,29
Steigung der Trendlinie	0,01 m³/(s*a)	0,05 m³/(s*a)	0,04 m³/(s*a)	0,04 m³/(s*a)	0,01 m³/(s*a)	3*10 ⁻⁷ m³/(s*a)

Tabelle 2: Mittlerer Abfluss von Mai bis Oktober für den Zeitraum 1974 - 2009. Eigene Darstellung.

Anteil an Sommersumme in %	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober
Minimum [%]	0,2	4,1	12,4	10,9	2,5	0,5
Maximum [%]	9,5	25,8	53,1	51,6	26,4	14,3
Mittelwert [%]	3,3	13,5	31,4	33,8	14,3	4,0
Standardabweichung[%]	2,0	6,0	8,1	8,5	6,3	3,0
Trend [%]	0,12%/a	0,29%/a	-0,04%/a	-0,14%/a	-0,18%/a	-0,08%/a
Minimum [mm]	5	64	151	174	41	5
Maximum [mm]	263	862	1054	1192	496	263
Mittel [mm]	60	247	565	620	260	60
Standardabweichung [mm]	51	161	202	221	122	51
Mittel 1974-1983 [mm]	25	156	431	445	247	25
Mittel 1980-1989 [mm]	33	142	526	581	290	33
Mittel 1990-1999 [mm]	55	236	612	759	254	55
Mittel 2000-2009 [mm]	114	426	670	669	273	114

Tabelle 3: Monatliche Abflussanteile an der Jahressumme. Werte für den Zeitraum 1974 bis 2009.

Angaben in Prozent [%] bzw.[mm]. Eigene Darstellung.

3.2 Analyse der Abflussmaxima

Um zu untersuchen, ob sich die Monatsabflüsse gleichmäßig erhöhen oder wenige extreme Abflusstage im Monat die höheren Sommersummen verursachen, werden die Abflussmaxima untersucht. Hierzu werden die Tages- sowie die Stundenmaxima analysiert, die Aufschluss über kurzzeitige Extreme geben und ebenfalls die Untersuchung zeitlicher Trends erlauben.

3.2.1 Entwicklung HQ- Tageswerte

Abbildung 13 zeigt die Werte der höchsten mittleren Tagesabflüsse für August sowie den höchsten Abfluss einer Stunde. Die anderen Monate sind im Anhang beigefügt, die Ergebnisse in Tabelle 4. Erwartungsgemäß liegen die Werte für die Stundenmaxima höher (rote Linie). Der Anstieg der Stundenmaxima ist für den August extrem, mit einem Anstieg von 4,01 auf 11,42 m³/s ergibt sich ein jährlicher Zuwachs von 0,21 m³/s. Vor allem die Jahre 1998 und 2003 fallen durch Extremwerte auf, die auf Stundenbasis 13,84 und 14,76 m³/s betragen. Für 1994 fehlen die Stundenwerte von Juli und August. Durch Ausfälle der Messtechnik müssen die Tageswerte modelliert werden. Eine Einzelmessung am 10. August ergibt einen Stundenwert von ca. 15 m³/s.

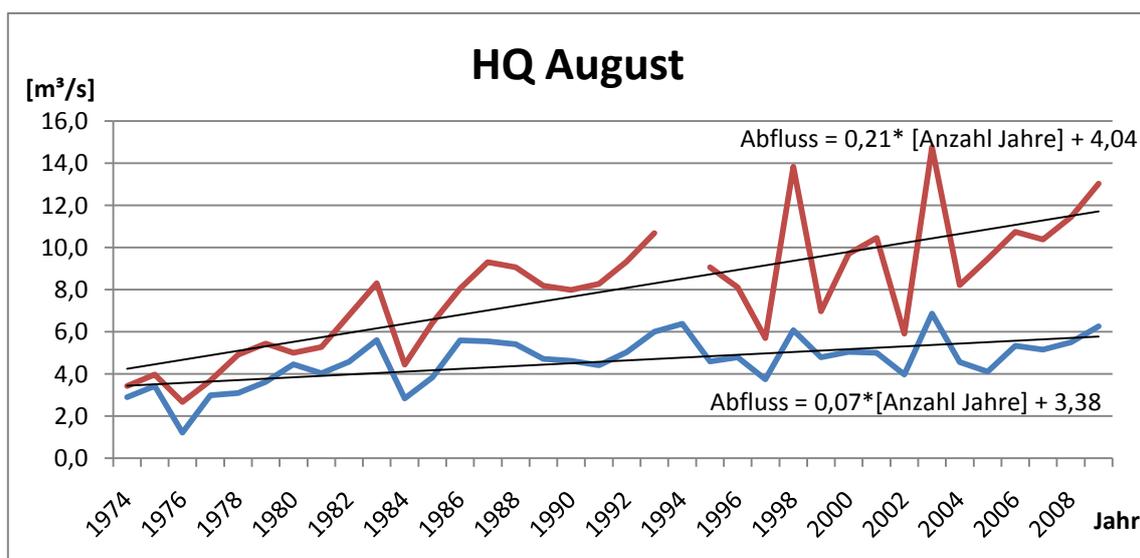


Abbildung 13: Entwicklung des HQ auf Tages- und Stundenbasis für den Monat August. Durch Ausfall der Messgeräte fehlt der Stundenwert für 1994. Eigene Darstellung.

Im Juni sind die Tagesmaxima hoch und der Unterschied zwischen Tages- und Stundenmaximum groß (vgl. Abb. 40). Es ergibt sich ein Trend für die Stundenmaxima von 0,66 auf 5,53 m³/s, was mehr als der achtfachen Menge entspricht. Für die ersten zehn Jahre ergibt sich ein mittlerer Maximalwert der Stundenwerte von 1,87 m³/s. Dem steht mit 5,56 m³/s der Wert für die 2000er Jahre gegenüber, was fast eine Verdreifachung bedeutet.

	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober
MHQ 1974-2009 [m³/s]	0,81	2,46	4,27	4,62	2,39	0,82
Spannweite Qmax - Qmin	3,11	4,60	4,85	5,65	4,36	2,74
Maximum (Tagesmittel) [m³/s]	3,20	5,24	6,74	6,87	4,69	2,84
Stundenmaximum [m³/s]	6,73	10,28	13,92	14,76	11,34	6,65
Minimum [m³/s]	0,09	0,64	1,89	1,22	0,32	0,10
Standardabweichung	0,74	1,31	1,20	1,17	1,07	0,72
HQ 1974-1983 [m³/s]	0,82	2,41	4,79	4,59	3,34	0,88
HQ 1980-1989 [m³/s]	1,01	3,72	6,12	5,61	4,03	2,18
HQ 1990-1999 [m³/s]	1,06	3,76	5,53	6,38	3,40	1,81
HQ 2000-2009 [m³/s]	3,20	5,24	6,74	6,87	4,69	2,84
Steigung der Trendlinie (HQ)	0,05 m ³ /(s*a)	0,10 m ³ /(s*a)	0,06 m ³ /(s*a)	0,07 m ³ /(s*a)	0,04 m ³ /(s*a)	0,01 m ³ /(s*a)
Steigung der Trendlinie Stunden-HQ	0,07 m ³ /(s*a)	0,14 m ³ /(s*a)	0,18 m ³ /(s*a)	0,21 m ³ /(s*a)	0,13 m ³ /(s*a)	0,04 m ³ /(s*a)

Tabelle 4: Ergebnisse der HQ-Entwicklung für den Zeitraum 1974 - 2009. Eigene Darstellung.

Das absolute Maximum liegt mit 10,28 m³/s (30. Juni 2003) nochmals deutlich höher. Mit dem Tagesmaximum von 5,24 m³/s am 15. Juni 2003 werden Tages- und Stundenmaximum getrennt voneinander gemessen, allerdings verdeutlicht dies umso mehr die enorme Steigerung der Abflüsse im Juni. Werte von über 5 m³/s werden normalerweise

nur im Juli oder August gemessen, da die Schneedecke im oberen Teil des Gletschers ein starkes Abschmelzen noch unterbindet. Deutlich wird jedoch auch im Juni, dass die Abflussmaxima sehr stark schwanken, sodass es auch im Juni zu Tageshöchstwerten von unter $1 \text{ m}^3/\text{s}$ kommen kann, was allerdings ab 1987 nicht mehr vorkommt. Diese Entwicklung verstärkt sich in der zweiten Hälfte des Untersuchungszeitraums zunehmend; so gibt es nach 1997 kein Jahr mehr unter $2 \text{ m}^3/\text{s}$ und die Jahre danach weisen einen Schnitt von $3,77 \text{ m}^3/\text{s}$ auf, wobei dieser Wert 2003 erstmalig überschritten wird. Die enorme Steigerung verdeutlicht sich in Abbildung 40.

Die Stundenmaxima im Juli weisen einen Anstieg von $0,18 \text{ m}^3/\text{s}$ pro Jahr von $3,20$ auf $9,54 \text{ m}^3/\text{s}$ auf. Das Maximum aus dem Jahr 2006 liegt mit $13,92 \text{ m}^3/\text{s}$ nochmals deutlich darüber. Die Maxima erreichen in ihren Dimensionen die des Augusts, was vor allem in den Jahren 2003 und 2006 deutlich wird. Im September steigen die Stundenmaxima sehr viel stärker an als die Tageswerte. Der Oktober weist die geringsten Veränderungen aller Monate auf. Die Tagesmaxima steigen lediglich um $0,01 \text{ m}^3/\text{s}$, die Stundenmaxima um $0,04 \text{ m}^3/\text{s}$ pro Jahr. Über den Untersuchungszeitraum verteilt gibt es einige Jahre, die durch hohe Abflüsse im Oktober geprägt sind. Diese hohen Abflüsse nehmen mengenmäßig zu.

3.2.2 Mengenmäßige Veränderung

Die Spitzenabflüsse haben sich im Untersuchungszeitraum sowohl in ihrer Intensität, als auch in ihrer Anzahl verstärkt. Um den Trend zu häufigeren und stärkeren Maxima auszudrücken, bietet es sich an, den MHQ (Arithmetisches Mittel der HQ) zu berechnen. Die Entwicklung des MHQ für den Zeitraum 1974 bis 2009 ist in Abbildung 14 dargestellt. Hierbei zeigt sich, dass nicht nur die Extremwerte, also einzelne Maxima zunehmen, sondern die HQ-Abflüsse insgesamt einen positiven Trend aufweisen. Die Spitzenabflüsse sind keine Einzelereignisse, sondern unterliegen einer Entwicklung über den gesamten Zeitraum. Der Oktober zeigt fast keinerlei Veränderung, was bereits die vorangegangenen Analysen belegen. Für den Beginn der Ablationsperiode im Mai zeigen sich dagegen Zuwächse, seit Beginn der Dekade 2000 liegen Oktober und Mai (fast) gleichauf.

Ähnliches zeigt sich bei September und Juni. Vor allem im mittleren Teil des Untersuchungszeitraums weist der September wesentlich höhere Werte für den MHQ auf; ab dem Jahr 2003 erreicht der MHQ für Juni ebenso hohe Werte. Mit Anstiegen des MHQ

von 0,02 (September) und 0,04 m³/s (Juni) pro Jahr ergeben sich für den Zeitraum absolute Zunahmen von 0,84 m³/s des MHQ für September und 1,25 m³/s für Juni. Der Wert des MHQ für Juni liegt 1974 dem Trend nach bei 1,03 m³/s, der Endwert für 2009 bei 2,28 m³/s. Dies bedeutet eine Zunahme von 221%. Der Wert im September nimmt um 154% zu.

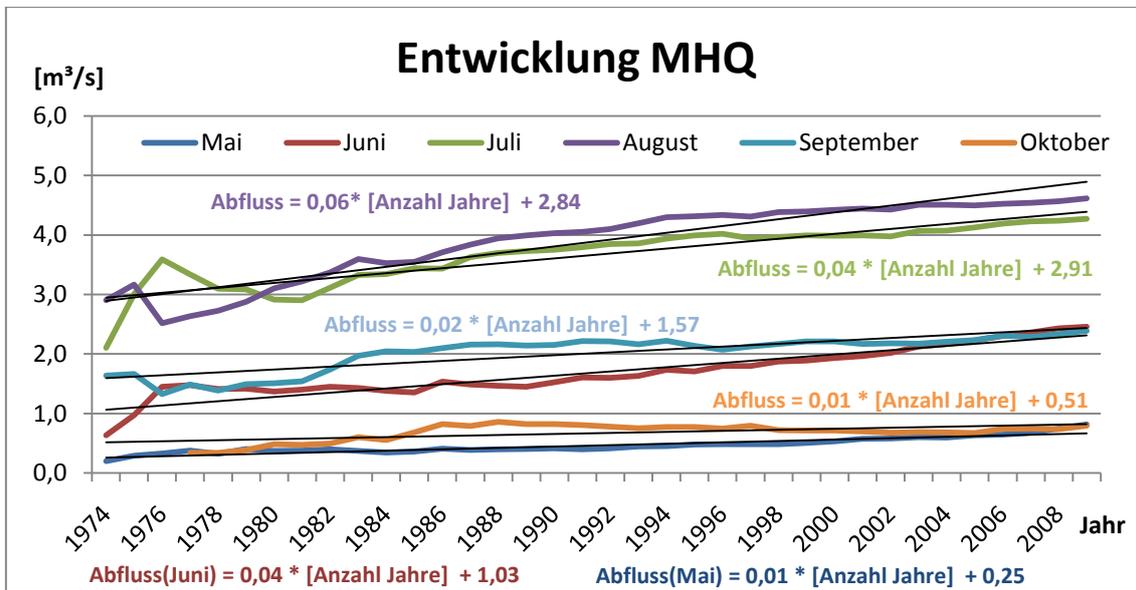


Abbildung 14: Entwicklung MHQ für die Monate Mai bis Oktober für den Zeitraum 1974 - 2009. Eigene Darstellung.

Am extremsten sind die Zunahmen jedoch in den Monaten Juli und August. Diese Monate sind die beiden abflussstärksten des Jahres. Zwar nimmt der MHQ mit 149% prozentual weniger zu als Juni und September, der absolute Zuwachs ist mit 1,44 m³/s jedoch stärker. Für den August nimmt der MHQ sogar absolut um 2,00 m³/s zu, was einem Anstieg um 171% entspricht.

3.2.3 Zeitliche Veränderung der Maxima

Neben der Änderung des HQ-Wertes spielt auch der Zeitpunkt des HQ eine Rolle. Der Zeitpunkt der Maxima ist keinen unmittelbaren Veränderungen unterworfen. Der Termin des Maximums im Monat Juli liegt im Mittel von 1974 bis 2009 um den 22./23. Juli. Der Trend für das Auftreten des Maximalwerts liefert einen Wert von +0,01 Tagen pro Jahr. Dieser Trend kann jedoch vernachlässigt werden, da er über den Zeitraum gesehen einer Verschiebung von 0,45 Tagen entspricht. Im August tritt das Maximum statistisch am 13./14.

August ein. Im Juni lässt sich dagegen eine Entwicklung feststellen. Der Zeitpunkt des Maximums verschiebt sich über den Zeitraum von ca. 20. Juni auf den 26. Juni. Mit +0,17 Tagen pro Jahr ist dies deutlicher als im Juli und August. Dies lässt sich damit erklären, dass die Abflüsse Ende Juni deutlich zunehmen und häufig schon Werte erreichen, die sonst nur im Juli und August auftreten. In den früheren Jahren, vor allem in den 1970er-Jahren, sind die Maxima des Monats Juni hauptsächlich witterungsabhängig. Bei schönem Wetter tritt ein Maximum auf, das je nach Witterung z. T. schon Mitte des Monats auftritt. In den späteren Jahren wachsen die Abflüsse im Juni allerdings immer stärker an, sodass sie von der vorangeschrittenen Ausaperung des Gletschers geprägt sind. Vor allem in den letzten Jahren ist die Schneeschmelze bereits im Juni zu großen Teilen abgeschlossen. Da die Ausaperung das Resultat mehrerer aufeinanderfolgender Tage/Wochen mit starker Schmelze ist, verschiebt sich das Maximum Richtung Ende Juni und geht mit einer starken Steigerung der Maxima einher. Im Mai, September und Oktober sind die Abflüsse zu starken Schwankungen unterworfen, sodass eine Analyse o.ä. wenig sinnvoll erscheint bzw. keine statistisch signifikanten Ergebnisse liefert.

3.2.4 Vergleich der Stundenwerte mit 5-min-Werten

Die Registrierungen der Abflüsse am Vernagtferner haben unterschiedliche zeitliche Auflösungen. Um die Güte der Werte zu analysieren und herauszufinden, ob die höhere zeitliche Auflösung einen signifikant besseren Informationsgehalt aufweist, werden die Werte miteinander verglichen.

Beispielhaft sind die Abflüsse vom dritten bis fünften August 2003 dargestellt. Dies sind die höchsten bisher gemessenen Abflüsse an dieser Messstelle (vgl. Escher-Vetter et al. 2004, 2). Es zeigt sich, dass die Kurven von ihrem allgemeinen Verlauf her gleich sind, allerdings haben die Kurven an ihren Spitzen für die hohe zeitliche Auflösung von fünf Minuten nicht einen einzigen Spitzenwert, ab dem die Kurve wieder absinkt, sondern die Werte variieren noch mit kurzzeitigem Steigen und Fallen der Kurve (vgl. Abb. 16).

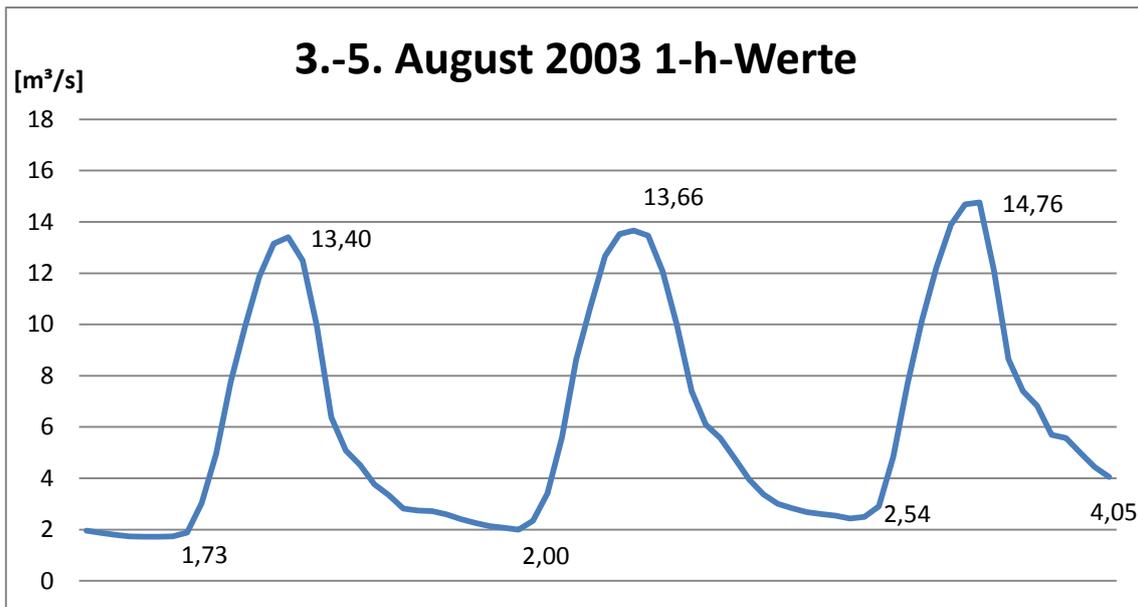


Abbildung 15: Darstellung der Stunden-Werte für den Zeitraum 3.-5. August 2003 mit Maximal- und Minimalwerten.
Eigene Darstellung.

Die Kurve zeigt einen daher deutlich genauer den Verlauf der Abflüsse. Die Minimal- und Maximalwerte sind unterschiedlich. Für die Auflösung von einer Stunde liegen die Scheitelpunkte bei 13,40 m³/s, 13,66 m³/s und 14,76 m³/s (vgl. Abb. 15 und Abb. 16), für die Auflösung von fünf Minuten dagegen bei 13,93 m³/s, 14,27 m³/s und 15,31 m³/s. Hier unterscheiden sich also die Spitzenwerte voneinander.

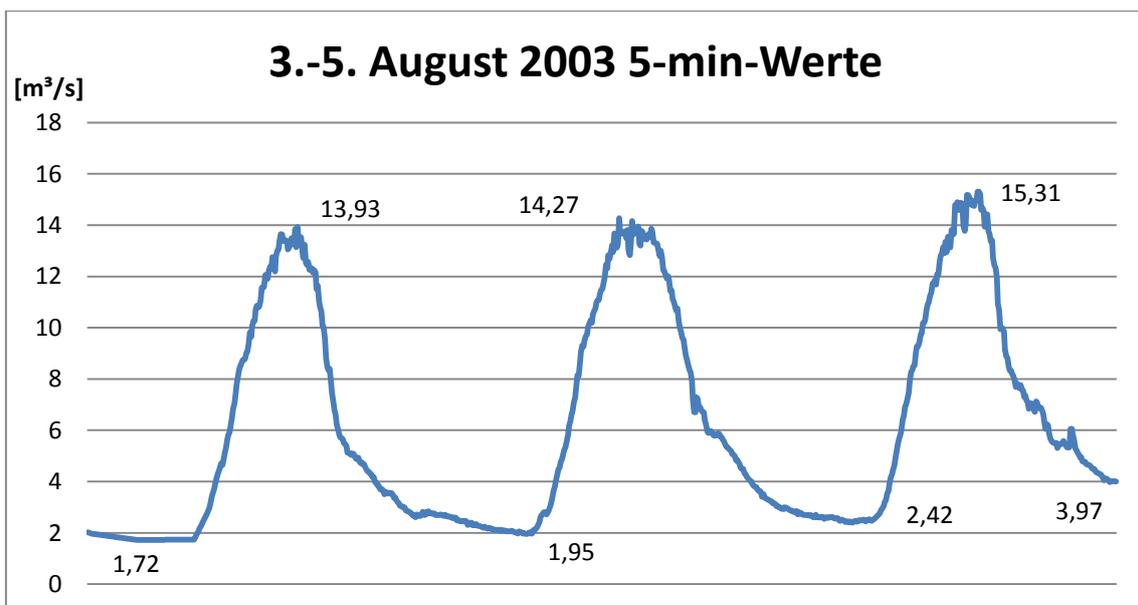


Abbildung 16: Darstellung der 5-min-Werte für den Zeitraum 3.-5. August 2003 mit Maximal- und Minimalwerten.
Eigene Darstellung.

Die Abweichung beträgt für alle drei Scheitelpunkte etwas mehr als $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Bei den Minimalwerten fällt der Unterschied geringer aus ($0,01/ 0,05/ 0,12/ 0,08 \text{ m}^3/\text{s}$).

Es lässt sich also feststellen, dass die Maximal- und Minimalwerte unterschiedlich variieren. Spitzenabflüsse verändern sich schneller als Minimalabflüsse, da sie sensibler auf Veränderungen der Strahlungsenergie durch Bewölkung, Niederschlag etc. reagieren.

In Tabelle 5 werden statistische Werte für das Jahr 2003 verglichen. Der Unterschied im Maximum von mehr als $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ist signifikant, das Minimum ist identisch (vgl. Tab. 5). Für die Hochsommermonate allein, wie hier im Beispiel der August, liegt der Unterschied beim Minimum bei $0,03 \text{ m}^3/\text{s}$.

	Stunden-Werte	5-min-Werte
Minimum	0,07	0,07
Maximum	14,76	15,31
Mittelwert	2,40	2,40
Mittl. Abweichung	2,03	2,04
Standardabweichung	2,71	2,71

Tabelle 5: Vergleich von Stunden- und 5-min-Werten für das Jahr 2003. Angegebene Werte in $[\text{m}^3/\text{s}]$. Eigene Darstellung.

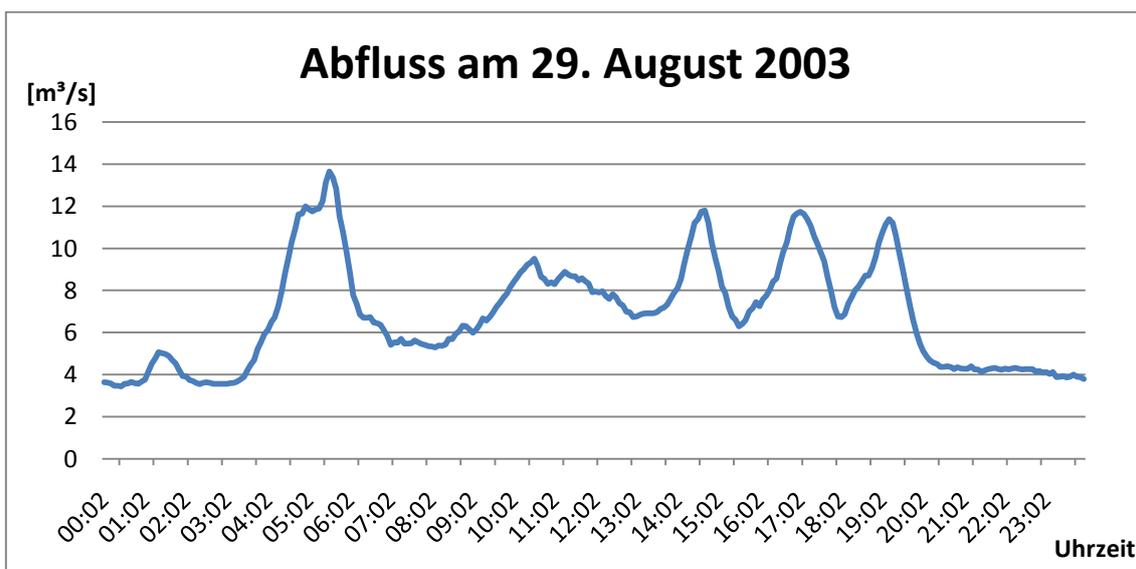


Abbildung 17: Abfluss mit 5-minütiger Auflösung am 29. August 2003. Eigene Darstellung.

Die höhere zeitliche Auflösung beeinflusst die Maximalwerte signifikant. Genau an dieser Stelle liegt auch die Bedeutung der höheren Auflösung. Ereignet sich beispielsweise ein Gewitter, so fallen kurzzeitig extreme Niederschläge, die aber im Stundenmittel nicht besonders auffällig sind. Aus diesem Grund soll an einem Beispiel verdeutlicht werden, wie sich die höhere zeitliche Auflösung bei Gewitter- oder Starkregenereignissen auswirkt.

Am 29. August 2003 trifft ein Starkniederschlagsereignis auf den aperen Gletscher, was zu Spitzenabflüssen führt. In Abbildung 17 ist der Abfluss mit fünfminütiger Auflösung dargestellt. Die Unterschiede zur stündlichen Auflösung werden durch die größeren Ausschläge vor allem ab 15 Uhr deutlich (vgl. Abb. 18).

3.2.5 Zusammenhang von Abfluss und Niederschlag

Die Analysen im 3. Teil zeigen, dass es im Hochsommer zu hohen Abflüssen kommt. Allerdings lässt sich daraus nicht erkennen, wie sich der Abfluss zusammensetzt. Hohe Abflüsse entstehen sowohl durch starke Niederschläge, als auch durch hohe Schmelze. Fallen diese beiden Ereignisse allerdings zusammen, z.B. bei einem starken Sommergewitter, so wird der Abfluss nochmals stärker. In neun von 35 Jahren (für 1975 fehlen die Niederschlagsdaten für den Tag des maximalen Abflusses) tritt der höchste mittlere Tagesabfluss des Jahres an einem Tag auf, an dem es mehr als 15 mm regnet. Unabhängig von Niederschlag sind die Maximalabflüsse von sechs Jahren. Die restlichen 20 der 35 Jahre weisen Niederschläge von unter 15 mm auf, im Mittel 5,5 mm. 1980 und 2003 fallen die höchsten Niederschläge des Jahres und die höchsten Abflüsse zusammen. Am 8. August 1980 beträgt der Niederschlag 11 mm, was einen Abfluss von $4,46 \text{ m}^3/\text{s}$ hervorruft. Im Jahr 2003, dem Jahr mit den höchsten Abflüssen, fallen am 29. August 42,2 mm Regen, die auf den zu 100% ausgeaperten Gletscher treffen. Hieraus resultiert ein Abfluss von $6,87 \text{ m}^3/\text{s}$, was dem höchsten jemals gemessenen Tagesmittel entspricht. Braun/Weber (2002, 11 ff.) nennen mehrere Eigenschaften des Gletscherzustands, die solche extremen Abflüsse bei Niederschlag begünstigen: die Lage der Nullgradgrenze weit oberhalb der Kammlinie und ein stark ausgeapertes Gletscher mit niedriger Albedo. Ein kurzzeitiger Starkniederschlag, der auf diese weitgehend apere Gletscheroberfläche fällt, während die Schmelzwasserproduktion noch sehr hoch ist, führt dann zu einer Flutwelle, die mit hohen

Abflussspitzen einhergeht. Am 29. August 2003 regnet es mehrfach, am Nachmittag beginnt dann ein ca. sechseinhalb Stunden andauernder Starkregen, bei dem insgesamt 18 mm Regen niedergehen. Der höchste Abfluss liegt an diesem Tag im Stundenmittel bei $12,06 \text{ m}^3/\text{s}$ um 5:30 Uhr, mit fünfminütiger Auflösung bei $13,65 \text{ m}^3/\text{s}$ um 5:32 Uhr. In Abbildung 18 ist der Zusammenhang zwischen Niederschlag und Abfluss sehr gut ersichtlich. Tritt das Abflussmaximum in der Nacht auf, so ist sicher, dass es direkt an den Niederschlag und nicht an besonders hohe Schmelzwasserproduktion gekoppelt ist. Die Schmelzwasserproduktion ist zwar immer noch sehr hoch durch die vorangegangenen Tage mit hoher Schmelze, allerdings ist diese um 5:30 Uhr schon sehr stark zurückgegangen. Im weiteren Tagesverlauf wird die Abflusskurve weiterhin von den Niederschlägen gesteuert. Bei reiner Schmelze tritt das Maximum am Nachmittag auf (vgl. Tabelle 7), hier steigen die Abflüsse jedoch gegen Abend nochmals an. Durch die komplette Ausaperung des Gletschers und die vorangegangene starke Schmelze sowie das fehlende Firngebiet auf dem Gletscher wird hier das höchste Tagesmaximum erreicht.

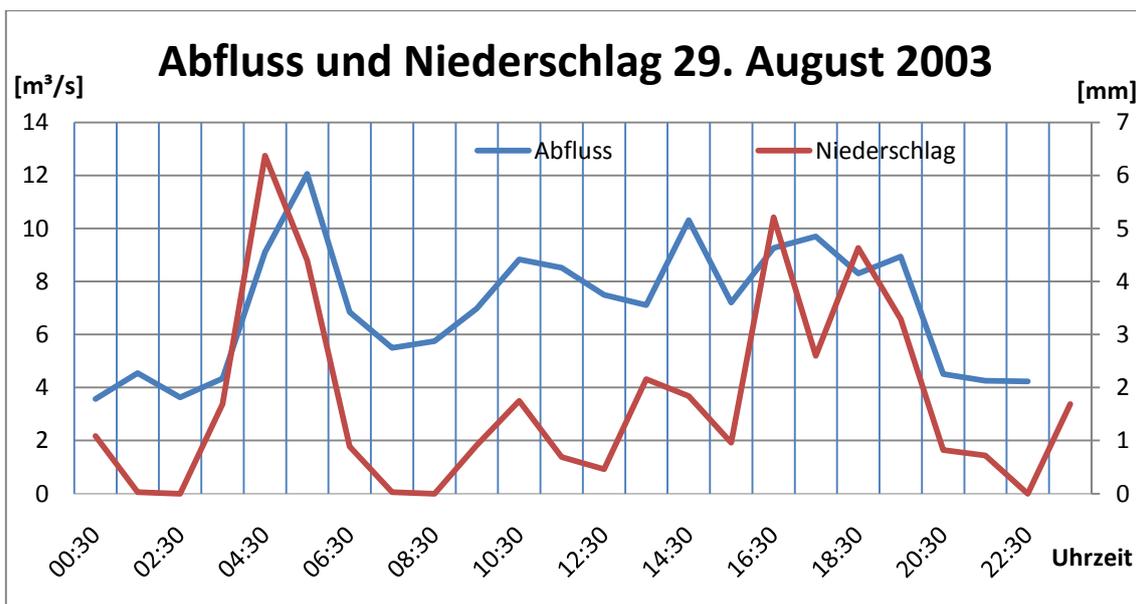


Abbildung 18: Abfluss und Niederschlag am 29. August 2003. Datenbasis Stundenwerte. Eigene Darstellung.

Allerdings gilt es zu beachten, dass die Stundenmaxima der Abflüsse in beiden Fällen nicht an den Tagen des höchsten Tagesabflusses registriert werden. 1980 tritt das Stundenmaximum am 7. August, d. h. einen Tag vor dem Starkniederschlag auf. Der Tagesabfluss liegt mit $4,07 \text{ m}^3/\text{s}$ niedriger, das Stundenmaximum allerdings mit $5,01 \text{ m}^3/\text{s}$

höher als am 8. August. Gleiches gilt für 2003, hier erreichen die Stundenwerte ihr Maximum am 5. August mit $14,76 \text{ m}^3/\text{s}$, das Tagesmittel liegt mit $6,64 \text{ m}^3/\text{s}$ nur knapp unter dem vom 29. August ($6,87 \text{ m}^3/\text{s}$). An diesem Tag sowie am 11. August 2003, mit $6,80 \text{ m}^3/\text{s}$ fast gleichauf mit dem 29. August, fällt kein Niederschlag, sodass die hohen Abflüsse hier komplett der Schmelze zugeschrieben werden können. Es zeigt sich also, dass normalerweise die höchsten Abflüsse bei der reinen Schmelze erreicht werden, allerdings kann es als Extremereignis (wie 2003) zu einer Koppelung von Starkniederschlag und Schmelze führen. Die Situation im August 2003 ist außergewöhnlich, da der Gletscher komplett ausgeapert ist, die Nullgradgrenze mit über 4000 m weit oberhalb des Gletschers liegt und die Firnfläche ebenfalls aufgezehrt ist, sodass der Niederschlag direkt und unverzüglich in den Abfluss übergeht.

3.3 Abflussganglinie

Die Abflussganglinie zeigt den Jahresgang der Tagesmittelwerte sowie die Verteilung der jährlichen Abflüsse mit der Ausprägung ihrer Extremwerte. Anhand der Ausprägung der Abflussganglinie werden die Witterungsverhältnisse deutlich. Setzt die Schneeschmelze erst spät im Frühjahr ein, so zeigt sich dies in der Abflussganglinie. Durch den Vergleich der Abflussganglinien verschiedener Jahre sollen die jahreszeitliche Verschiebung sowie die veränderten Maxima und Minima analysiert werden. Dargestellt sind die mittleren Tagesabflüsse.

3.3.1 Abflussganglinie Vergangenheit und Zukunft

Für vier Jahre mit verschiedenen Massenbilanzen sind die Abflussganglinien in den Abbildungen 19 - 22 zu sehen. Das Jahr 1978 weist eine positive Massenbilanz auf, 1981 ist ungefähr ausgeglichen. 1990 und 2003 repräsentieren Jahre mit negativer Massenbilanz des Gletschers, wobei 1990 eher einen durchschnittlichen Verlauf und 2003 einen extremen Verlauf zeigt. Anhand dieser vier Jahre sollen die Veränderungen der Abflussganglinie aufgezeigt und beschrieben werden.

Die Schneeschmelze setzt 1978 erst spät ein, denn die Abflüsse bis Anfang Juni steigen nicht an. Durch Schneefälle Ende Juni wird der Abfluss reduziert, bevor er Anfang Juli wieder stark zunimmt. Deutlich zu erkennen ist das eingipflige Maximum des Jahres 1978 mit einem Wert von $3,09 \text{ m}^3/\text{s}$ (8. August). Nach Erreichen des Maximums fällt der Abfluss rapide auf Werte um $1 \text{ m}^3/\text{s}$ ab. Nach einem weiteren Anstieg der Abflüsse Ende August sinken die Abflüsse ab Anfang September bis Ende Oktober ab, wo sie Werte von nahezu null erreichen. Hier ist der Gletscher mit Schnee bedeckt, was den Abfluss fast gänzlich stoppt.

1981 setzt die Schneeschmelze bereits Mitte Mai ein. Ab Anfang Juni steigen die Abflüsse an; bis auf einen kleinen Einbruch Ende Juni nehmen die Werte bis zum ersten Maximum Mitte Juli stetig und stark zu. Der erste Gipfel der Abflusskurve erreicht mit einem Wert von $2,83 \text{ m}^3/\text{s}$ (13. Juli) einen sehr hohen Wert. Ende Juli fallen die Abflüsse nochmals stark ab (bis unter $1 \text{ m}^3/\text{s}$). Die zweite Abflussspitze erreicht am 17. August ihren Höchstwert ($4,04 \text{ m}^3/\text{s}$). Diese Phase maximaler Abflüsse wird wiederum durch schlechte Witterung beendet, die in Abflüssen von ca. $1 \text{ m}^3/\text{s}$ resultiert. Der Schneefall setzt im Jahr 1981 erst Anfang Oktober ein, ab hier sinken die Werte rapide ab und erreichen Mitte Oktober Werte unter $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$.

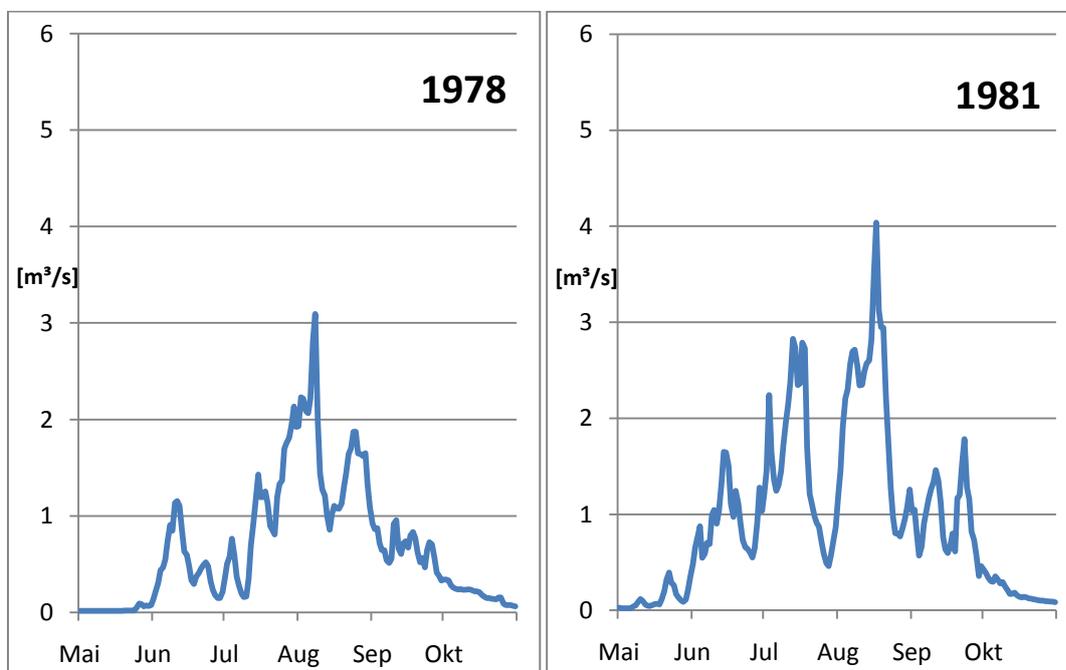


Abbildung 19: Abflussganglinie für das Jahr 1978. Eigene Darstellung.

Abbildung 20: Abflussganglinie für das Jahr 1981. Eigene Darstellung.

Die Jahre 1990 und 2003 zeigen einen extremeren Verlauf. Die Schneeschmelze setzt 1990 bereits Anfang Mai ein, wird jedoch Ende Mai durch Schneefall unterbrochen. Erst Mitte Juni beginnen die Abflüsse wieder stark zu steigen und erreichen Anfang Juli Werte von $2,83 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Abflüsse steigen Anfang August bis auf das Maximum von $4,63 \text{ m}^3/\text{s}$ an. Der ganze August ist durch hohe Abflüsse geprägt, die erst Anfang September schwächer werden. Dies lässt auf schlechte Witterungsverhältnisse und/oder Schneefall schließen.

Das Jahr 2003 fällt mit seinen extremen Abflüssen komplett aus der Reihe. Die Schneeschmelze beginnt hier ebenfalls Anfang Mai, ist allerdings noch nicht so stark. Durch die ab Ende Mai hohe Schneeschmelze erreicht der Abfluss am 15. Juni Werte von $5,24 \text{ m}^3/\text{s}$. Anfang Juli fällt Schnee auf dem Gletscher, der die Abflüsse bis unter $1 \text{ m}^3/\text{s}$ drückt (siehe Abb. 22). Die Gletscherschmelze weist am 16. Juli eine Abflussspitze von $6,78 \text{ m}^3/\text{s}$ auf. Die Abflusswerte bleiben im Juli und August hoch, mit einem zweiten Spitzenabfluss Anfang August von $6,64 \text{ m}^3/\text{s}$ und dem absoluten Maximum von $6,87 \text{ m}^3/\text{s}$ (29. August). Durch Schneefälle Anfang September bricht der Abfluss ein, erreicht aber am 21. September nochmals Werte von $2,02 \text{ m}^3/\text{s}$. Anschließend sinkt der Abfluss ab auf Werte unter $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ für den Oktober (vgl. Abb. 22).

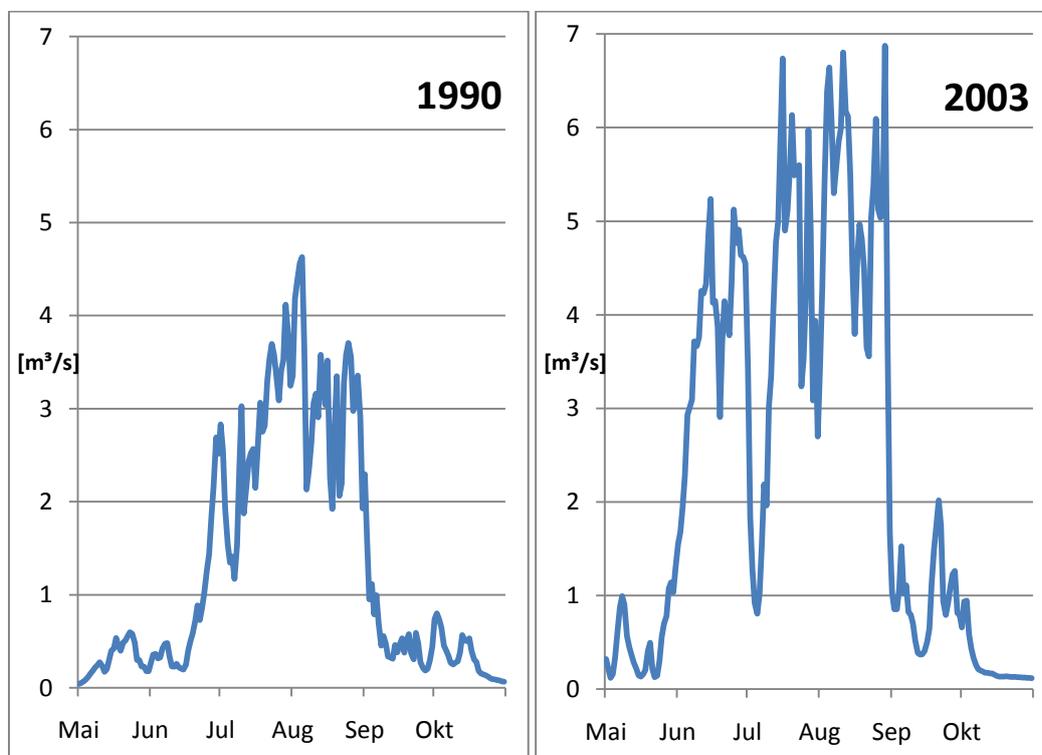


Abbildung 21: Abflussganglinie für das Jahr 1990. Eigene Darstellung.

Abbildung 22: Abflussganglinie für das Jahr 2003. Eigene Darstellung.

3.3.2 Veränderung im mittleren Tagesgang eines Monats

Der mittlere Tagesgang der Abflüsse ist in Abbildung 23 für die gleichen vier Jahre dargestellt. Er stellt die gemittelten Werte für jede Stunde (0:30 Uhr, 1:30 Uhr usw.) dar, die für jeden Monat und jedes Jahr einzeln ermittelt werden. Der Vergleich der einzelnen Jahre soll Aufschluss darüber geben, wie sich die Verhältnisse zwischen niedrigstem und höchstem Abfluss des Tages verschieben. Im Mai ist kein Tagesgang zu beobachten, der Abfluss weist im Tagesverlauf nur minimal unterschiedliche Werte auf. Anders sieht es im Juni aus. Hier liegen die Jahre 1978, 1981 und 1990 nahe beisammen, mit insgesamt sehr niedrigen Werten und einem nur minimal ausgeprägten Tagesgang. Die Amplitude zwischen Minimum und Maximum liegt 1978 bei $0,12 \text{ m}^3/\text{s}$, für 1981 und 1990 bereits bei $0,30 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Steigerung zum Jahr 2003 ist extrem, hier liegt die Differenz bei $2,21 \text{ m}^3/\text{s}$. Es gilt jedoch zu beachten, dass der Juni 2003 der abflussstärkste Juni überhaupt ist. Im Juni 2003 fällt außerdem auf, dass die minimalen Abflüsse in der Nacht und am frühen Morgen wesentlich höher liegen als im Juli und August. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich durch die extreme Schneeschmelze und die bereits begonnene Eisschmelze große Mengen Schmelzwasser im Gletscher befinden, das selbst in der Nacht noch ausfließt und dadurch hohe Abflüsse erzeugt (siehe Abb. 23). Durch die kleine Firnfläche kann weniger Schmelzwasser zwischengespeichert werden. Im Hochsommer ist ein Tagesgang erkennbar, der sich 1981 aber auf die Monate Juli und August beschränkt. 1990 weist mit $1,78$ (Juli) und $3,97 \text{ m}^3/\text{s}$ (August) bereits deutlich ausgeprägte Tagesgänge auf. Das Jahr 2003 zeigt mit $5,38 \text{ m}^3/\text{s}$ für Juli und $7,82 \text{ m}^3/\text{s}$ für August einen extremen Tagesgang. Für die Monate September und Oktober ist die Zunahme geringer. So weist das Jahr 1978 im September einen Tagesgang von $0,32 \text{ m}^3/\text{s}$ auf; die Werte der anderen Jahre liegen hier mit $0,68 \text{ m}^3/\text{s}$ (1981), $0,49 \text{ m}^3/\text{s}$ (1990) und $0,93 \text{ m}^3/\text{s}$ (2003) etwas höher. Dies bestätigt auch die Trends der anderen Analysen, die zeigen, dass die Entwicklung im September und Oktober nur sehr gering ausfällt.

Die Zeitpunkte der minimalen und maximalen Abflüsse des Tages verändern sich ebenfalls. Die Minima verschieben sich in den abflussstarken Monaten (Juni - August); im Mai, September und Oktober ist die Veränderung dagegen nicht eindeutig. Der niedrigste Abfluss des Tages liegt meist am Vormittag, allerdings nicht kurz nach Sonnenaufgang wie die tiefste Temperatur des Tages, sondern einige Stunden danach (vgl. Tab. 6). Dies hängt damit

zusammen, dass nachts das gespeicherte und im Gletscher befindliche Schmelzwasser abfließt. Somit ergibt sich der niedrigste Abfluss erst verzögert nach der tiefsten Temperatur. Die Oberfläche gefriert meistens in der Nacht, was den Oberflächenabfluss geringfügig senkt. Die Firnspeicherung wird jedoch kleiner, sodass, wie im Juni 2003 festgestellt, die Abflüsse nachts nicht so stark abfallen (siehe Abb. 23).

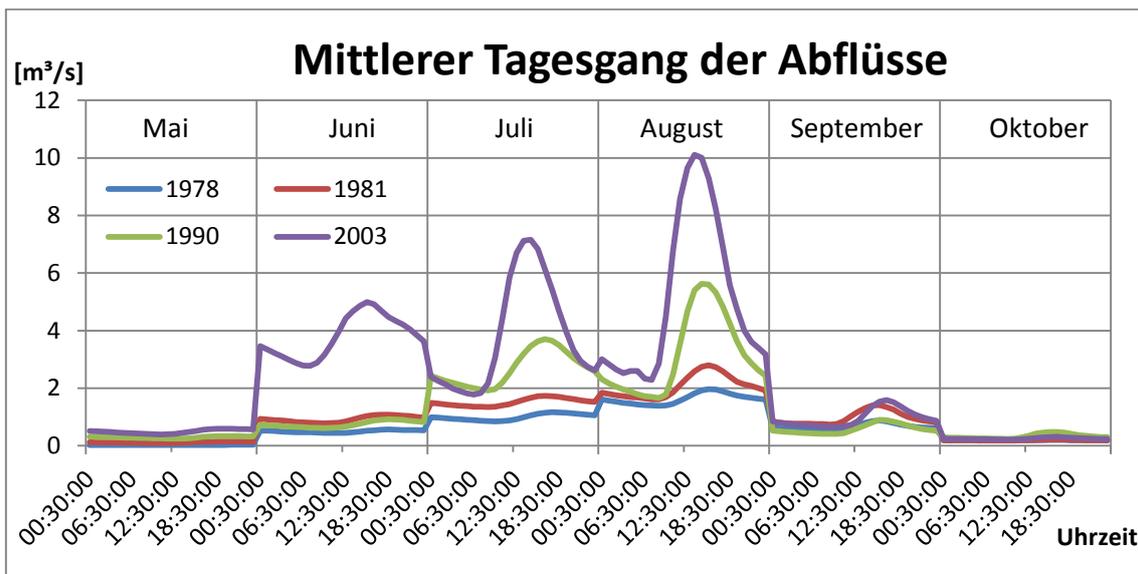


Abbildung 23: Mittlerer Tagesgang der Monate Mai bis Oktober für die Jahre 1978, 1981, 1990 und 2003.

Eigene Darstellung.

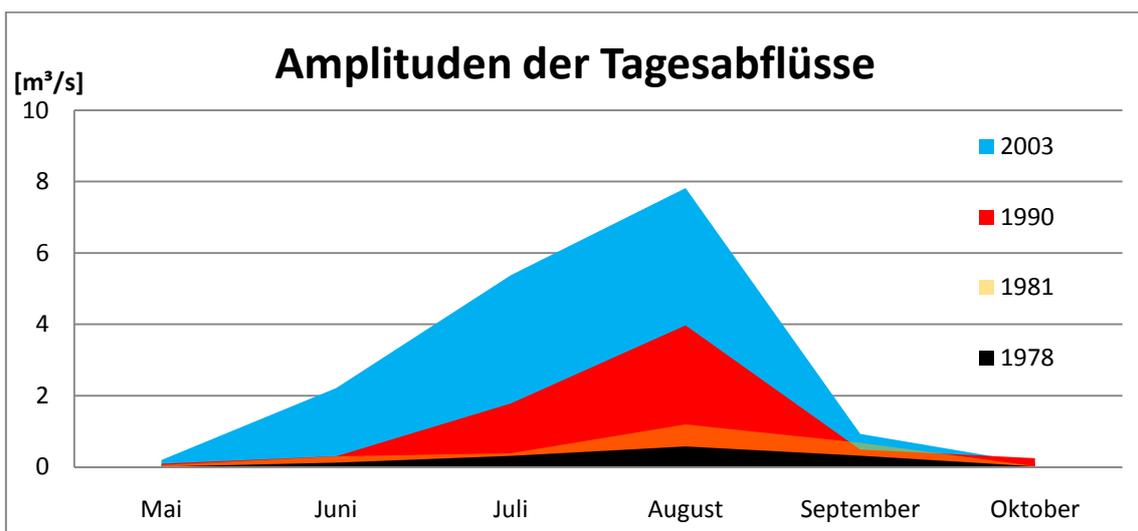


Abbildung 24: Amplituden der Tagesabflüsse für die Jahre 1978, 1981, 1990 und 2003. Eigene Darstellung.

Der Zeitpunkt der maximalen Abflüsse hat sich ebenfalls verändert, die höchsten Werte für die Hochsommermonate treten ebenfalls früher auf. Um die Gletscheroberfläche abzuschmelzen bedarf es viel Energie, die durch Strahlung eingebracht wird. Durch die hohe Albedo von Schnee dauert es länger, bis der Schnee geschmolzen ist. Im Hochsommer wird der Zeitpunkt maximaler Schmelze früher am Tag erreicht, da die geringe Albedo des Eises die Reflexstrahlung verringert, wodurch die Eisschmelze die nächtlichen Abflüsse bereits früher am Morgen erhöht. Die Schmelzwasserbildung hängt nicht allein vom Energieangebot, also der Sonneneinstrahlung, ab, sondern welcher Anteil davon absorbiert und damit genutzt werden kann (vgl. Braun/Weber 2008, 52).

In den Monaten Juni, Juli und August verschiebt sich das Maximum zwischen 1978 und 2003 um zwei bis drei Stunden nach vorne (siehe Tab. 7), im September und Oktober bleiben die Zeitpunkte dagegen fast identisch.

	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober
1978	13:30	10:30	09:30	08:30	07:30	01:30
1981	11:30	09:30	08:30	08:30	08:30	06:30
1990	12:30	09:30	08:30	08:30	09:30	09:30
2003	10:30	07:30	06:30	07:30	08:30	09:30

Tabelle 6: Zeitpunkt [hh:mm] der Minima der Tages-MQ für die Jahre 1978, 1981, 1990 und 2003. Eigene Darstellung.

	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober
1978	21:30	18:30	17:30	15:30	15:30	16:30
1981	19:30	18:30	16:30	15:30	15:30	16:30
1990	19:30	18:30	16:30	14:30	15:30	16:30
2003	19:30	15:30	14:30	13:30	16:30	16:30

Tabelle 7: Zeitpunkt [hh:mm] der Maxima der Tages-MQ für die Jahre 1978, 1981, 1990 und 2003. Eigene Darstellung.

3.3.3 Vergleich Abfluss bei positiver und negativer Massenbilanz

Dieser Abschnitt soll verdeutlichen, wie sich für ausgewählte Jahre mit unterschiedlicher Massenbilanz die Werte für MQ und Stunden-HQ (auf Stundenbasis) verändern. Wie bereits oben begründet, werden die Jahre 1978, 1981, 1990 und 2003 für diesen Vergleich herangezogen. Die Jahre mit negativer Massenbilanz (1990, 2003) zeigen eine starke Erhöhung der MQ-Werte gegenüber 1978 mit positiver Massenbilanz (siehe Abb.25). Die Werte für 1981 (ausgeglichene Massenbilanz) liegen nur geringfügig über den Werten für 1978. Vor allem im Juli und August zeigt sich der starke Anstieg des MQ, 2003 zusätzlich im Juni. Die Stundenmaxima steigen von 1978 auf 1981 vor allem im Mai und Juni, sowie September und Oktober an; im Juli und August sind sie dagegen ähnlich. Der Unterschied für Jahre mit positiver und ausgeglichener Massenbilanz ist gering. Die Unterschiede zur negativen Massenbilanz sind dagegen extrem. Schon 1990 zeigt sich der starke Anstieg der Maximalwerte, sie liegen für die gesamte Ablationsperiode weit über denen für 1978 und 1981. Vor allem die Differenz im Hochsommer ist extrem (vgl. Abb. 25). Hier liegen die Maximalwerte um fast 3 m³/s höher. Der Anstieg zum Jahr 2003 ist nochmals außergewöhnlich. Hier ist vor allem die Entwicklung im Juni äußerst stark, aber auch im Juli und August nehmen die Abflüsse nochmals extrem zu. Die geringsten Zunahmen ergeben sich für September und vor allem für Oktober. Die Sommermaxima liegen mit Werten von über 14,76 m³/s fast dreimal so hoch wie für 1978 und 1981 (4,92 bzw. 5,28 m³/s).

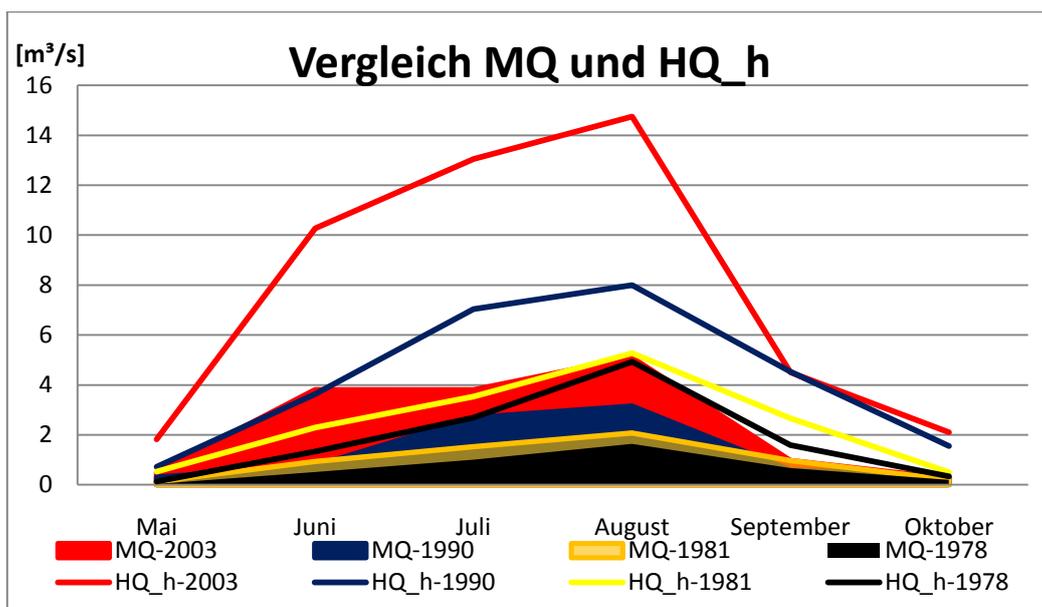


Abbildung 25: Vergleich von MQ und Stunden-HQ für die Jahre 1978, 1981, 1990 und 2003. Eigene Darstellung.

4. Teil Veränderungen im Untersuchungsgebiet im Zeitraum 1974 - 2009

4.1 Veränderung der Abflussganglinie

Die Abflussganglinie verändert sich über den Zeitraum. Die Analysen in 3.3.1 zeigen, dass sich die Abflussganglinien der einzelnen Jahre unterscheiden. In Abbildung 26 ist der Jahresgang für jeweils fünf aufeinanderfolgende Jahre dargestellt (außer 1974-1979, hier sechs Jahre). Es zeigt sich, dass die Abflüsse sehr stark steigen, vor allem im Juli und August. Die Ganglinie für 1974 - 1979 weist die maximalen Werte Mitte Juli und Anfang August auf. Bis Anfang Juli und ab Anfang September sind die Werte dagegen gering. Die Maxima liegen in den darauffolgenden Zeiträumen wesentlich höher. Ab 1981 sind die Massenbilanzen bis auf 1984 durchweg negativ, was sich deutlich in der Entwicklung der Abflüsse widerspiegelt. Die Abflüsse nehmen vor allem in den Monaten Mai und Juni stark zu. Die Maximalwerte im Hochsommer verschieben sich nicht signifikant. Die Jahre 2005 - 2009 zeigen für Mai extrem hohe Werte gegenüber den anderen Zeitabschnitten, die Jahre 2000 - 2004 weisen für den Juni extreme Werte auf. Bei den Sommermaxima fällt auf, dass die Abflüsse bereits zu Beginn der 1990er-Jahre ebenso hohe Werte aufweisen (siehe Abb. 26).

Dies ist in Abbildung 27 nochmals verdeutlicht mit dem Vergleich der drei Abschnitte 1974 - 1979, 1990 - 1994 und 2005 - 2009. Die Jahressummen der Jahre 1990 - 1993 liegen bereits fast so hoch wie die der Jahre nach 2000, das Jahr 1994 weist ebenso hohe Abflüsse auf (siehe 3.1.1). Der Zeitraum 2005-2009 unterscheidet sich hauptsächlich in den Monaten Mai und Juni, sowie September von den anderen Zeiträumen. Das absolute Sommermaximum liegt hier mit Ende Juli wesentlich früher. Dies ist jedoch auch durch den äußerst abflussarmen August 2006 zu erklären. Vor allem im Juni haben sich die Abflüsse im Verlauf der Jahre stark erhöht, was die Abflussganglinie verändert. Die Dauer hoher Abflüsse nimmt zu. Dies ist an der zunehmenden Breite der von der Abflussganglinie begrenzten Fläche im Diagramm zu erkennen. Die gelbe Linie in Abbildung 27 zeigt die mittlere Abflussganglinie über den Gesamtzeitraum. Die Zunahmen gegenüber den 1970er-Jahren sind deutlich zu erkennen, ebenso die Abweichungen der Jahre 1990 - 1994 sowie 2005 - 2009.

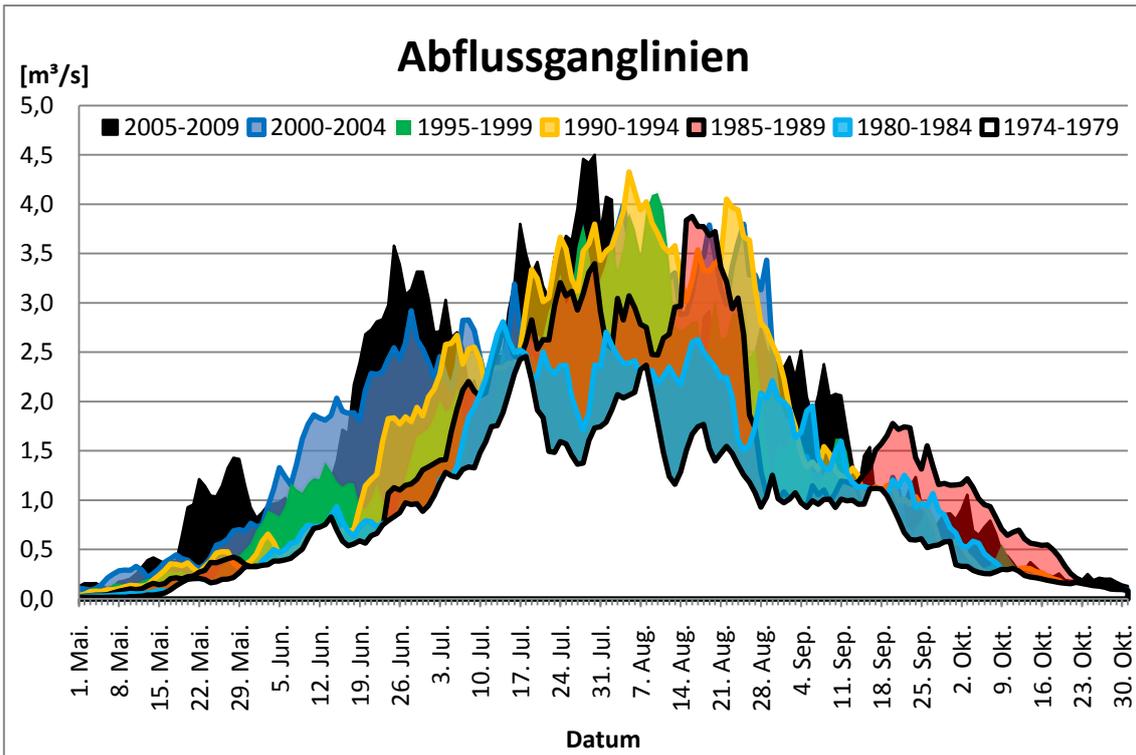


Abbildung 26: Veränderungen der Abflussganglinien für den Zeitraum 1974 - 2009. Dargestellt sind die Entwicklungen in 5 Jahresschritten. Eigene Darstellung.

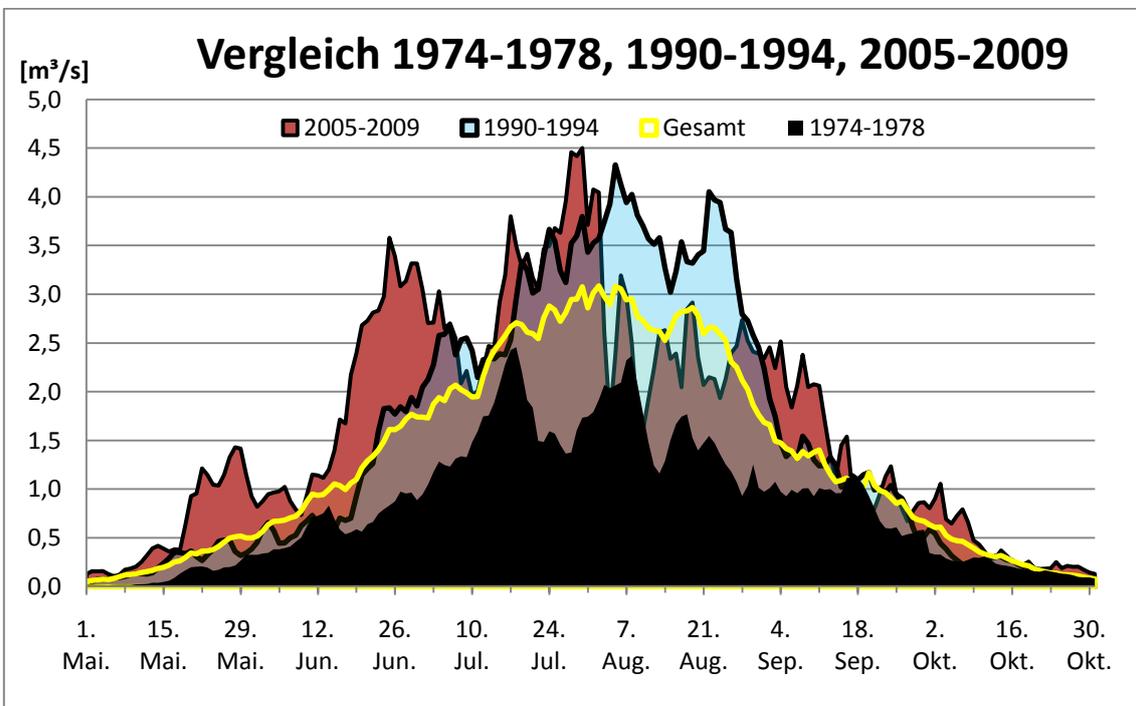


Abbildung 27: Vergleich der Abflussganglinie für die Zeiträume 1974 - 1978, 1990 - 1994 und 2005 - 2009. Eigene Darstellung.

4.2 Veränderung der ELA und AAR

Die Abbildung 28 zeigt die Entwicklung der beiden Indizes ELA und AAR. Die Höhe der ELA nimmt stetig zu, der Trend weist einen Anstieg von 7,7 m pro Jahr aus. Im Untersuchungszeitraum steigt sie von knapp unter 3000 m NN (1974 und 1977) bis auf mehr als 3300 m NN. In einigen Jahren (1991, 1994) liegt sie höher als 3600 m NN, im Jahr 2003 oberhalb des Gletschers. Hier beträgt die AAR 0%, d. h. die Ablationsfläche ist gleich der Gesamtfläche des Gletschers. Die AAR beträgt für die ersten Jahre des Untersuchungszeitraums noch zwischen 80 und 90%, nimmt insgesamt jedoch stark ab. In einzelnen Jahren starker Ablation sinkt die AAR auf Werte von 10% (1991) oder sogar 0% (2003).

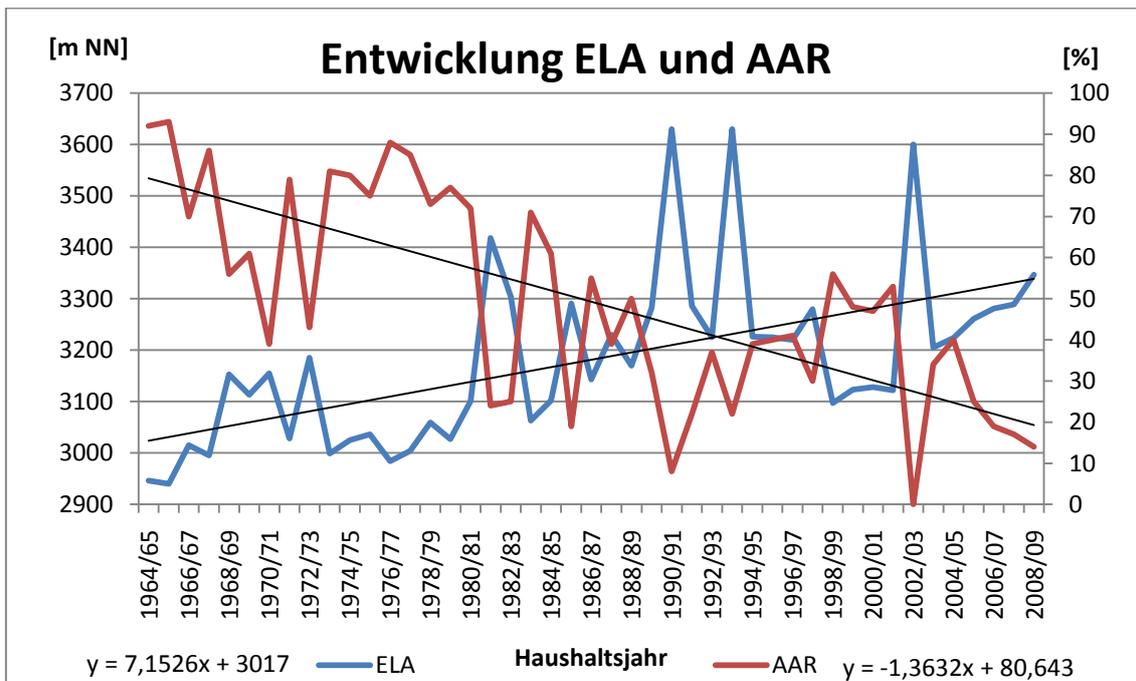


Abbildung 28: Entwicklung der Gleichgewichtslinie (ELA) und der Accumulation Area Ratio (AAR). Eigene Darstellung.

4.3 Abgrenzung Schnee- und Gletscherschmelze

Die Beschaffenheit der Gletscheroberfläche ist maßgeblich für die Schmelzwasserproduktion. Je weiter der Gletscher ausgeapert ist, desto höher sind die Abflüsse. Wie bereits in den vorherigen Kapiteln erwähnt, reduzieren Sommerschneefälle die Schmelze. Um dies zu verdeutlichen zeigen die Abbildungen 29, 30 und 31 den Vernagtferner in zwei verschiedenen Jahren. Das erste Foto zeigt den 1. Juni 2003, der Gletscher ist schneebedeckt und die Felsen am Gletscherrand sind bereits schneefrei. Das zweite Bild zeigt den Gletscher am 1. Juli 2002. Das Vorfeld weist nur noch Schneereste auf, der Gletscher ist dagegen noch fast komplett schneebedeckt. Lediglich die Gletscherzungen beginnen auszuapern (Mitte links).



Abbildung 29: Blick vom Schwärzkögele am 1. Juni 2003. Foto: KFG 2003.

Ein starker Kontrast dazu ist das dritte Bild, das den 1. Juli 2003 zeigt. Hier wird der Einfluss des extrem warmen und abflussreichen Junis deutlich. Der Gletscher ist fast komplett ausgeapert, nur in den oberen Teilen des Gletschers überdeckt noch Schnee das Eis. Dieser Grad der Ausaperung wird sonst nur zu Ende der Ablationsperiode Ende August bis Anfang September erreicht. Dieses Bild verdeutlicht die zeitliche Verschiebung der Abflüsse. Das

Jahr 2002 ist durch schwache Abflüsse im Mai und Juni geprägt, was sich deutlich in der Ausaperung des Gletschers zeigt. Abbildung 6 zeigt den Gletscher am 3. Juli 2003 nach einem Neuschneefall wieder komplett schneebedeckt.



Abbildung 30: Blick vom Schwarzkögele am 1. Juli 2002. Foto: KFG 2002.

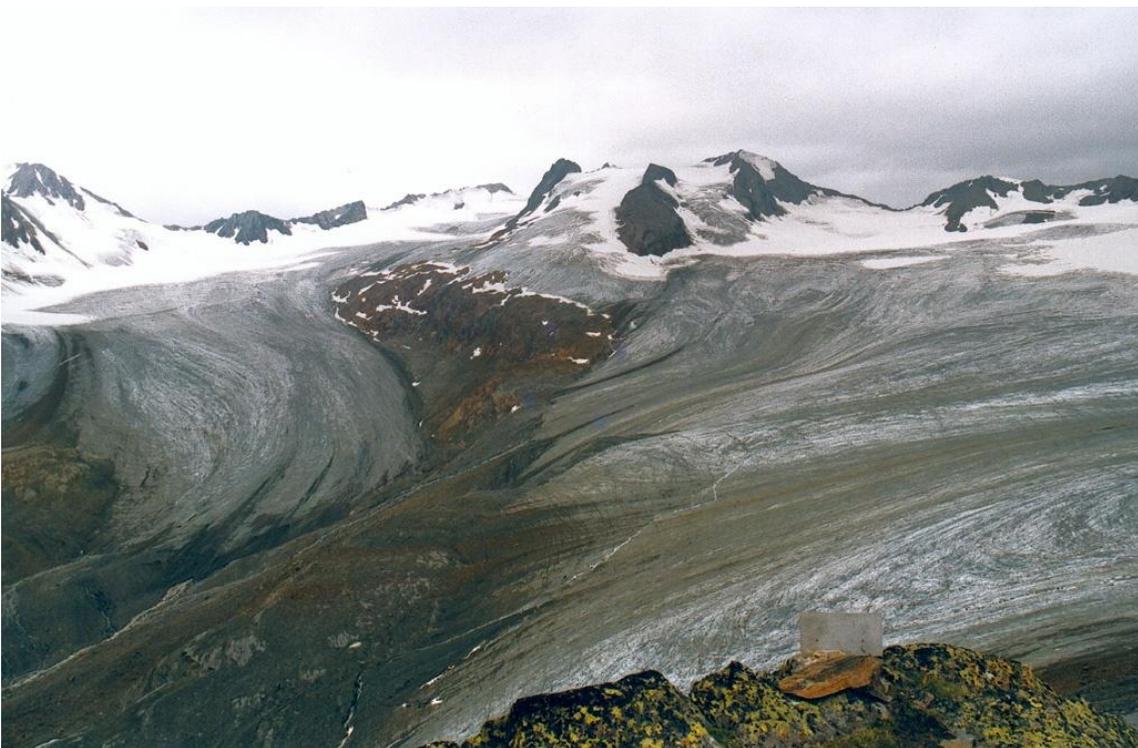


Abbildung 31: Blick vom Schwarzkögele am 1. Juli 2003. Foto: KFG 2003.

5. Teil Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse dieser Arbeit sind eindeutig: Die Abflüsse steigen im Untersuchungszeitraum stark an. Insgesamt weist die Sommersumme der Abflüsse, d. h. der Monate Mai bis Oktober, eine Zunahme von 35 mm pro Jahr von 1165 auf 2400 mm auf, die vor allem in den 2000er Jahren extrem wird. Hier liegt der Mittelwert bei 2200 mm, im Zeitraum 1974 - 1979 bei positiven Massenbilanzen bei 1200 mm. Die Monatsmittelwerte des Abflusses steigen insgesamt an; vor allem im Juni ist der Anstieg mit $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$ pro Jahr extrem. Der stärkste Anstieg ist für die Dekade 2000 zu verzeichnen, hier liegt das Mittel bei $1,88 \text{ m}^3/\text{s}$, in den 1990er-Jahren noch bei $1,04 \text{ m}^3/\text{s}$. Im Juli und August gestaltet sich die Veränderung ähnlich stark mit jährlich $0,04 \text{ m}^3/\text{s}$ Zuwachs. Die Dekade 1990 weist im August höhere Werte auf als die 2000er Jahre. Der September weist nur eine geringe Zunahme der Abflüsse auf, der Oktober ist nahezu unverändert. Für die Monate Mai, September und Oktober zeigt sich, dass sie starken Abflussschwankungen durch Schneefälle unterworfen sind. Der Beginn der Schmelzperiode ist im Mai sehr unterschiedlich, ebenso der erste Schneefall im Herbst. Der Einfluss von Schneefällen ist insgesamt sehr groß für die Abflüsse, da eine geschlossene Neuschneedecke die Abflüsse durch die höhere Albedo stark reduziert. Die Anteile an der Sommersumme haben sich durch die erhöhten Monatsmittel verändert. Vor allem der Juni nimmt stark zu mit einem Plus von $0,3\%$ pro Jahr. Die Abflusswerte liegen hier z. T. bereits auf dem Niveau der Hochsommermonate Juli und August. Die beiden Monate nehmen zwar von den absoluten Abflusswerten zu, allerdings anteilmäßig weniger als die Sommersumme insgesamt. Beide Monate zusammen bilden zwischen 60 und 70% des Sommerabflusses, mit abnehmender Tendenz. Der Trend zeigt einen Rückgang von 69 auf 62,6%.

Insgesamt lässt sich sagen, dass die Abflüsse sich im Jahresverlauf verschieben. Dies lässt sich durch die frühere Schneeschmelze infolge höherer Temperaturen und daraus resultierender früherer Ausaperung des Gletschers erklären, daneben auch durch die über viele Jahre sich verstärkende Aufzehrung der Firnrücklagen des Gletschers. Im Juni der 2000er-Jahre ist der Gletscher schon teilweise schneefrei, sodass die Eisschmelze bereits beginnt. Im Hochsommer nehmen die Abflüsse ebenfalls stark zu, während sie im Spätsommer und beginnenden Herbst (September und Oktober) in etwa gleich bleiben. Der September nimmt anteilmäßig von 18 auf 12% ab, der Oktober liegt ähnlich wie der Mai unter 5%, mit starken jährlichen Schwankungen. 2003 ist in allen Bereichen ein extremes

Jahr. Die Schmelze beginnt bereits sehr früh, sodass der Gletscher schon im Juli komplett ausapert. Der höchste Tagesabfluss tritt hier mit einem Starkniederschlag auf. Die Abflussganglinien verändern sich, die Anstiege sind vor allem im Mai und Juni zu verzeichnen, September und Oktober verändern sich kaum. Die Spitzenabflüsse im Hochsommer nehmen extrem zu. Die ELA steigt an, das Akkumulationsgebiet geht immer weiter zurück, in Jahren wie 2003 existiert es nicht mehr. Die Ausaperung des Gletschers beginnt immer früher, sodass der Zeitraum hoher Abflüsse länger anhält. Die Amplituden vervielfachen sich seit Beginn des Untersuchungszeitraums. Abflussmesswerte mit 5-minütiger Auflösung beeinflussen die Maximalwerte, für die Ausprägung der Minimalwerte haben sie allerdings kaum Auswirkungen. Der Tagesgang prägt sich vor allem für Juni, Juli und August immer stärker aus. In den früheren Jahren ist er kaum erkennbar, nimmt dann jedoch stetig und stark zu. Im Hochsommer 2003 treten Tagesgänge von bis zu $7,38 \text{ m}^3/\text{s}$ auf, 1978 liegen sie noch bei $0,58 \text{ m}^3/\text{s}$.

Der Rekordsommer 2003 wirkt sich auch auf die nachfolgenden Jahre aus. Die Altschneedecke wird 2003 komplett aufgezehrt, in den Jahren danach schmilzt die geringe Winterauflage schon früh wieder ab, sodass die apere Eisfläche von 2003 trotz schlechterer Witterung wieder erreicht wird (vgl. KFG 2006, 1).

6. Teil Ausblick und Fazit

„Die alpinen Regionen stellen eines der sensibelsten Gebiete für Klimaänderungen dar [...]“ (Nachtnebel 2008, 27). Die Klimamodelle prognostizieren einen weiteren Temperaturanstieg. Vor allem für höher gelegene Stationen zeigt sich eine deutliche Erwärmung im Sommer. Die Variabilität der Niederschläge nimmt zu, die Jahressummen dagegen nur wenig. Die Temperaturänderungen haben ein früheres Abschmelzen der Schneedecke zur Folge (vgl. Nachtnebel 2008, 27). Der Temperaturanstieg wird in den Sommermonaten ausgeprägter sein und in Hochlagen über 2000 m NN ca. 2 bis 3 °C betragen. Dies ruft eine stärkere Verdunstung und verstärkte Abschmelzvorgänge hervor (vgl. Nachtnebel 2008, 38).

In vielen Gletscherregionen führt der Gletscherschwund zu Regimen, die durch Schneeschmelze anstatt durch Eisschmelze geprägt sein werden (vgl. Huss 2008, 3901). Bogataj (2007, 46) erwartet ein weiteres Ansteigen der Gletscherabflüsse mit steigenden Spitzenabflüssen, die den Tagesgang weiter verstärken. Mit dem weiteren Abschmelzen der Gletscher wird jedoch der Abfluss und auch die Amplitude des Tagesgangs auf lange Sicht signifikant zurückgehen. Die Abflussspitzen werden sich in den Frühsommer verschieben, das Abflussregime wird zunehmend von Niederschlag und Schneeschmelze dominiert (vgl. Bauder/Funk-Salami 2009, 8). Haeberli et al. (2007, 156) betonen, dass die Massenverluste nicht nur durch verstärkte Klimaänderung verursacht werden, sondern auch durch positive Rückkoppelungen bspw. durch niedrigere Albedo. Das Verhältnis von vergletscherten zu schnee- und eisfreier Fläche wird immer ungünstiger und führt somit zu einer beschleunigten Erwärmung und noch intensiveren Schneeschmelze (vgl. Braun/Weber 2008, 54). In den folgenden Jahrzehnten wird daher der Großteil der Gletscher verschwinden.

Für den Vernagtferner wird ein weiterer starker Rückgang der Gletscherfläche und -masse erwartet. Von 1974 bis 2009 haben sich bereits die Spitzenabflüsse im Hochsommer und die Abflusssummen insgesamt stark erhöht. Höhere Temperaturen im Sommer bedingen eine Abnahme der Neuschneefälle, zusammen mit den erhöhten Schmelzraten ergeben sich dadurch verstärkte Abflüsse in stark vergletscherten Gebieten (vgl. Braun 2002, 5). Vor allem die durch gestiegene Temperaturen wachsende Ausaperung des Gletschers im Sommer führt zu immer höheren Abflüssen. Kuhn (2004, 6) beschreibt für das Rofental eine geringfügige Verschiebung des Abflussmaximums von Juli auf August. Seine Modellierungsszenarien

zeigen, dass der Abfluss von Mai bis Oktober sich gleichmäßig erhöhen wird, die Wintermonate jedoch von Temperaturänderungen unberührt bleiben werden.

In Zukunft besteht zunehmend die Gefahr von Hochwasserereignissen im Alpenraum, wenn Starkniederschläge auf ausgeaperte Gletscherflächen treffen. Durch die höheren Temperaturen geht der komplette Niederschlag als Regen nieder, was den Selbstschutzmechanismus der Gletscher verringert (vgl. Escher-Vetter 2007, 8f.). Dies zeigen die Ereignisse am 29. August 2003 deutlich (vgl. 3.2.4 u. 3.2.5). Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass die Änderungen bereits sehr stark sind, aus der starken Varianz resultieren allerdings sehr unterschiedliche Abflüsse. Die Extremwerte werden zunehmen, so dass 2003 als Extremjahr vielleicht bald abgelöst wird. Die genaue Entwicklung wird trotz vielfältiger Modellierungen und Szenarien nicht vorhersehbar sein, sodass die Beobachtung und Messung des Gletscherverhaltens auch in Zukunft eine interessante Disziplin bleibt.

Danksagung

Der Zeitraum, um eine Bachelorarbeit zu erstellen beträgt zwar nur 10 Wochen, allerdings ist diese Zeit sehr arbeitsintensiv. In diesem Fall ist es besonders wichtig, Unterstützung zu haben. Hiermit möchte ich mich sehr herzlich bei Prof. Dr. Baume und dem gesamten Department für Geographie bedanken, durch deren Begleitung mein Interesse an der Geographie und Glaziologie intensiviert wurde und die mir das nötige Fachwissen und einen vertiefenden Einblick in die nötigen Methoden gewährt haben.

Ganz besonderer Dank gilt der Kommission für Glaziologie, die mir als Praktikant und Werkstudent die Faszination des Vernagtferners und anderer Gletscher gezeigt hat und ermöglichte, in einzigartiger Natur und Atmosphäre zu arbeiten. Hervorheben möchte ich Frau Dr. Heidi Escher-Vetter, die mir bei der Erstellung meiner Bachelorarbeit sehr zeitintensiv und zuverlässig als Betreuerin und Ansprechpartnerin zur Seite stand. Dafür möchte ich mich ganz herzlich bedanken. Ebenfalls zu großem Dank verpflichtet bin ich Dr. Hans-Dieter Schwartz, der mir bei der Literatursuche sehr behilflich war. Ebenso möchte ich Dr. Ludwig Braun und die gesamte Kommission für Glaziologie nennen, die mir bei Detailfragen, Überlassung von Daten und Fotos immer sehr freundlich, offen und konstruktiv begegnet sind. Ihnen allen herzlichen Dank!

Schließlich möchte ich auch meiner Familie und meinen Freunden danken, die mich während meines Studiums und vor allem in dieser arbeitsreichen Zeit unterstützt und begleitet haben!

Literaturverzeichnis

Bahrenberg, G.; Giese, E. (1975): Statistische Methoden und ihre Anwendung in der Geographie. Stuttgart.

Bauder, A.; Funk-Salami, F. (2009): Gletscher und Klimawandel in Graubünden. Faktenblatt 14. 1. Ausgabe.
Amt für Wald Graubünden.

Bogataj, L. K. (2007): How will the Alps Respond to Climate Change? Scenarios for the Future of Alpine Water.
In: Alpine Space - man & environment, vol.3: The Water Balance of the Alps (2007). Innsbruck
University Press. S. 43 - 51.

Böhm, R. et al. (Hrsg.) (2007): Gletscher und Abflussverhalten. Zentralanstalt für Meteorologie und
Geodynamik (ZAMG), Wien, Bericht zu Zielvereinbarung 2008/31.

Böhm, R. et al. (Hrsg.) (2008): Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische Wasserwirtschaft.
Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW).
In cooperation with: Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV).

Braun, L.N.; Weber, M.; Schulz, M. (2000): Consequences of climate change for runoff from Alpine regions. In:
Annals of Glaciology 31 (2000). S. 19 - 25.

Braun, L. N. (2002): Das Wasser der Alpen: Hydrologische Empfindlichkeit der Alpenregion gegenüber einer
Klimaveränderung. In: Mattersberger, H. (Hrsg.) (2002): Tagungsband "Der Klimawandel und
die Auswirkungen auf den Alpenraum" vom 11.-12. April 2002 in Neukirchen. S. 26 - 31.

Braun, L. N.; Weber, M. (2002): Droht im nächsten Sommer Hochwasser vom Gletscher? Rundgespräche der
Kommission für Ökologie (Bayerische Akademie der Wissenschaften) 24 (München 2001). In:
Deigele, C. (Hrsg.) (2001): Katastrophe oder Chance? Hochwasser und Ökologie.
Rundgespräch "Katastrophe oder Chance? Hochwasser und Ökologie. München, 22. Oktober
2001. S. 47 - 66.

Braun, L. N. et al. (2004): Experiences with the new 'Vernagtach' hydro-meteorological station.
In: Oerlemans/ Tijm-Reijmer (Hrsg.): Book of extended abstracts of presentation at the
workshop "Automatic Weather Stations on Glaciers", Pontresina, 28 to 31 March 2004,
IMAU. S. 38 - 44.

Braun, L. N. et al. (2007): Water balance of the highly glaciated Vernagt basin, Ötztal Alps. In: Psenner, R.; Lackner, R. (Hrsg.) (2007): The Water Balance of the Alps. Alpine Space – man & environment. Vol. 3. Innsbruck University Press. S. 33 - 42.

Braun, L. N.; Weber, M. (2008): Gletscher - Wasserkreislauf und Wasserspende. In: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (Hrsg.) (2008): Klimawandel in den Alpen. Fakten - Folgen - Anpassung. 3. Auflage. S. 48 - 55.

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) (2009):
Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich, ISSUE 86.

Ellenrieder, T. (2002): Abfluss und Gletschermassenbilanz im Einzugsgebiet des Vernagtferners: Eine Rekonstruktion für die Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert. Diplomarbeit, Universität Würzburg, Geographisches Institut, Lehrstuhl I, Physische Geographie.

Escher-Vetter, H.; Reinwarth, O. (1994a): Zwanzig Jahre Abflussmessung an der Pegelstation Vernagtbach (Ötztaler Alpen). Kommission für Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. München.

Escher-Vetter, H.; Reinwarth, O. (1994b): Two Decades of Runoff Measurements (1974 to 1993) at the Pegelstation Vernagtbach/ Oetztal Alps. In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie. Band 30 (1994). S. 53 - 98.

Escher-Vetter, H.; Weber, M.; Braun, L.N. (1998): Gletscherverhalten als klimatische Information. Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt alpiner, teilweise vergletschertes Gebiete. Abschlußbericht zu den BayFORKLIM Projekten AII2 und H2. Bayerische Akademie der Wissenschaften, Kommission für Glaziologie. Bayerischer Klimaforschungsverbund (BayFORKLIM).

Escher-Vetter, H.; Ellenrieder, T.; Siebers, M. (2004): Gemessene und modellierte Komponenten der Wasserbilanz für ein stark vergletschertes alpines Einzugsgebiet. In: Deutsche Meteorologische Gesellschaft (DMG), Österreichische Gesellschaft für Meteorologie (ÖGM), Schweizerische Gesellschaft für Meteorologie (SGM) Deutsch-Österreichisch-Schweizerische Meteorologen-Tagung - DACH 2004, Karlsruhe, 7.-10. September 2004.

Escher-Vetter, H. (2007): Gebirgsgletscher im Wandel - Auswirkungen auf die Wasserversorgung. Vortragsmanuskript zur PAX Tagung Augsburg.

- Escher-Vetter, H.; Siebers, M. (2007):** Sensitivity of glacier runoff to summer snowfall events. In: *Annals of Glaciology* **46**, S. 309 - 315.
- Hänggi, P.; Plattner, C. (2009):** Projekt Klimaänderung und Wasserkraftnutzung. Schlussbericht der Vorstudie. 2. Auflage. Geographisches Institut Universität Bern. Bern.
- Herrmann, R. (1977):** Einführung in die Hydrologie. Stuttgart.
- Holzmann, H. et al. (2009):** Schnee- und Gletscherschmelze als Baustein der hydrologischen Abflussmodellierung. In: *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* **61** (2009) 1/2. S. 9 - 15.
- Huss, M. et al. (2008):** Modelling runoff from highly glacierized alpine drainage basins in a changing climate. In: *Hydrological Processes* **22** (2008) 19. S. 3888-3902.
- Huss, M. (2009):** Past and future changes in glacier mass balance. In: *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich* **213** (2009). S. 1 - 214.
- Kommission für Glaziologie KFG (2006):** Kenngrößen des Massenhaushalts des Vernagtferners für den Zeitraum 1964 bis 2006. URL: www.glaziologie.de. (16. Juni 2010).
- Kuhn, M. (2004):** Die Reaktion der österreichischen Gletscher und ihres Abflusses auf Änderungen von Temperatur und Niederschlag. In: *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* **56** (2004) 1/2, S. 10-16.
- Moser, H. et al. (1987):** Abfluss in und von Gletschern. Schlussbericht Teilprojekt A 1 Band 1. Sonderforschungsbereich 81. Technische Universität München. München.
- Moser, H. et al. (1986):** Abfluss in und von Gletschern. GSF-Bericht 41/ 86. Teil II. Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung München. München.
- Nachtnebel, H. P. (2008):** Auswirkungen von möglichen Klimaänderungen auf die Hydrologie und Wasserwirtschaft in einigen österreichischen Regionen. S.27 - 52. In: Böhm, R. et al. (Hrsg.): *Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische Wasserwirtschaft*. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW).
- Oerter, H. (1981a):** Der Abfluß an der Pegelstation Vernagtbach (Ötztaler Alpen) 1974 - 1980. Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München. GSF-Institut für Radiohydrometrie/ Kommission für Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München. GSF-Bericht R 260. München.

- Oerter, H. (1981b):** Untersuchungen über den Abfluss aus dem Vernagtferner unter besonderer Berücksichtigung des Schmelzwasserabflusses im Firnkörper. Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München. Institut für Radiohydrometrie. GSF-Bericht R 267. München.
- Oerter, H. (1984):** Der Abfluß an der Pegelstation Vernagtbach (Öztaler Alpen) 1974 - 1983. Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München. GSF-Institut für Radiohydrometrie/ Kommission für Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München. GSF-Bericht R 363. München.
- Petrascheck, A.; Wagner, J.J. (1999):** Vorwort. In: Haeberli, W. et al. (1999): Eisschwund und Naturkatastrophen im Hochgebirge. Zürich.
- Schöner, W. (2009):** Paläoklimainformationen aus Kenngrößen der Gletschermassenbilanz - Beispiele für die Alpen seit der ausgehenden Kleinen Eiszeit. In: alpine space - man & environment. Vol. 6: Klimawandel in Österreich (2009). Innsbruck University Press. S. 127 - 144.
- Veit, H. (2002):** Die Alpen - Geoökologie und Landschaftsentwicklung. Stuttgart.
- Weber, M.; Braun, L. N. (2004):** Gletscherschmelze ohne Ende? - Hat der Klimawandel bereits begonnen? In: *Mitteilungen des Österreichischen Alpenvereins Heft 1-04, S.16-20.*
- Weber, M. (2008):** Mikrometeorologische Prozesse bei der Ablation eines Alpengletschers. Bayerische Akademie der Wissenschaften. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse. Abhandlungen. Neue Folge. Heft 177.
- Zmarsly, E.; Kuttler, W.; Pethe, H. (2002):** Meteorologisch-klimatologisches Grundwissen. 2. Auflage. Stuttgart.

Anhang

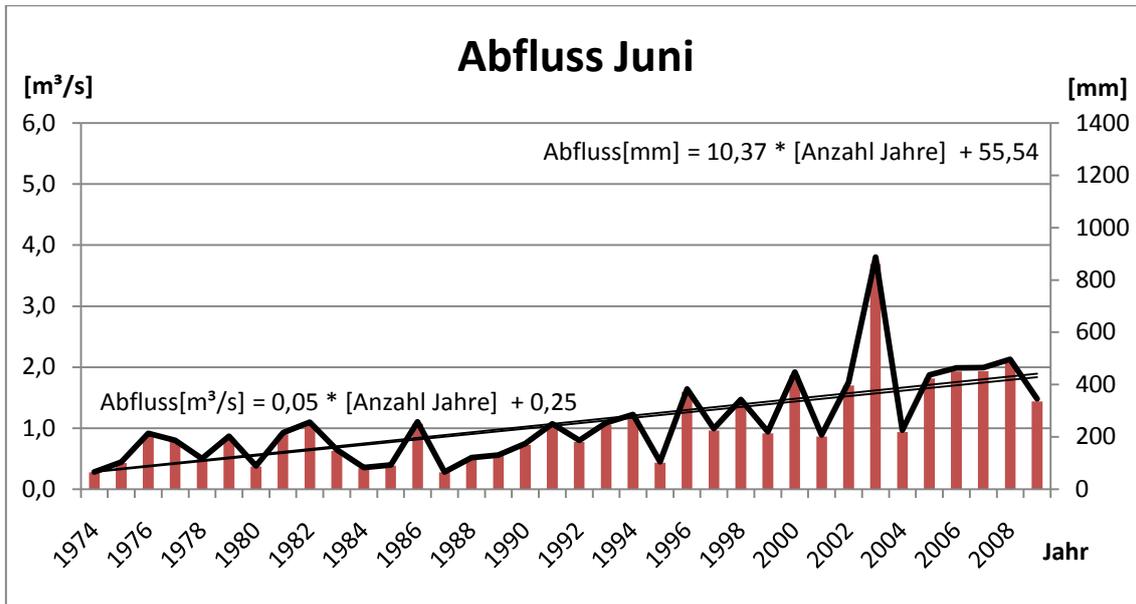


Abbildung 32: Mittlerer Abfluss des Monats Juni für den Zeitraum 1974 - 2009. Eigene Darstellung.

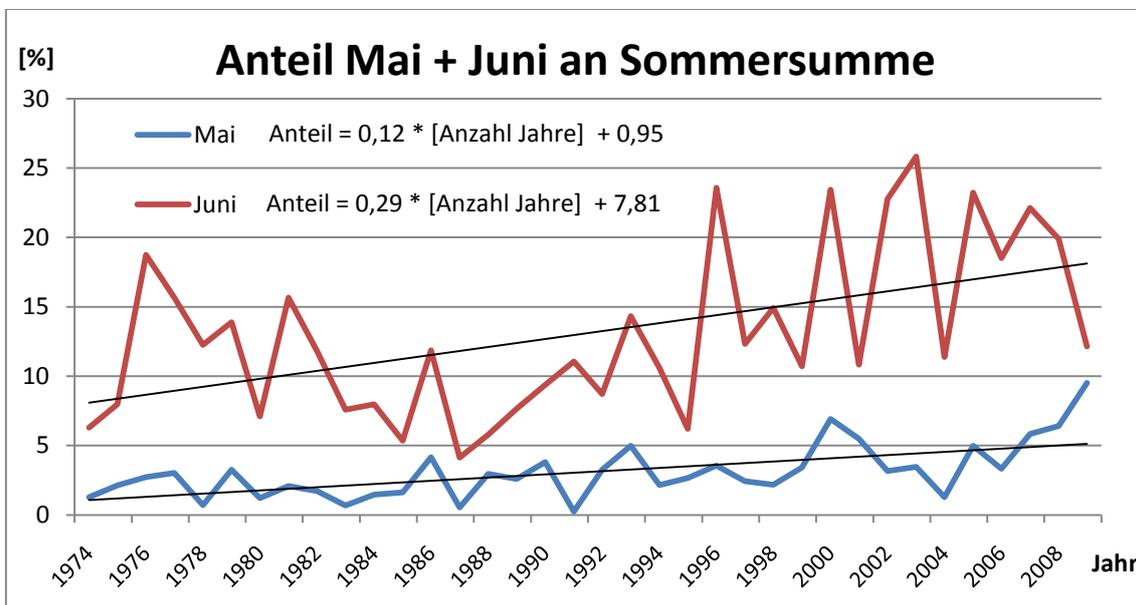


Abbildung 33: Veränderung des Anteils der Monate Mai und Juni an der Sommersumme für den Zeitraum 1974 - 2009. Eigene Darstellung.

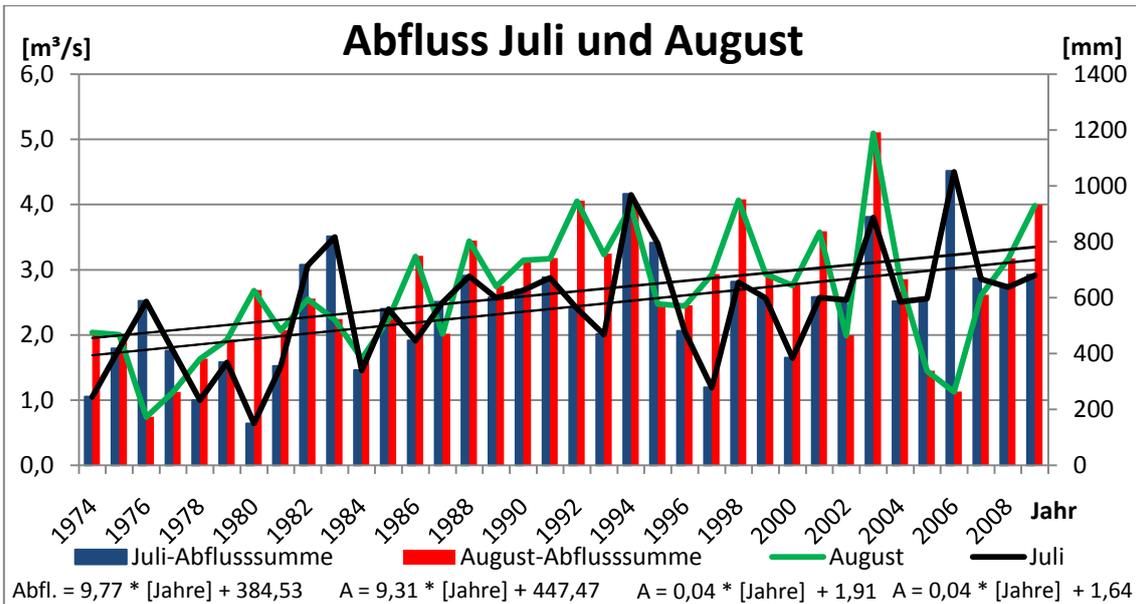


Abbildung 34: Mittlerer Abfluss der Monate Juli und August für den Zeitraum 1974 - 2009. Eigene Darstellung.

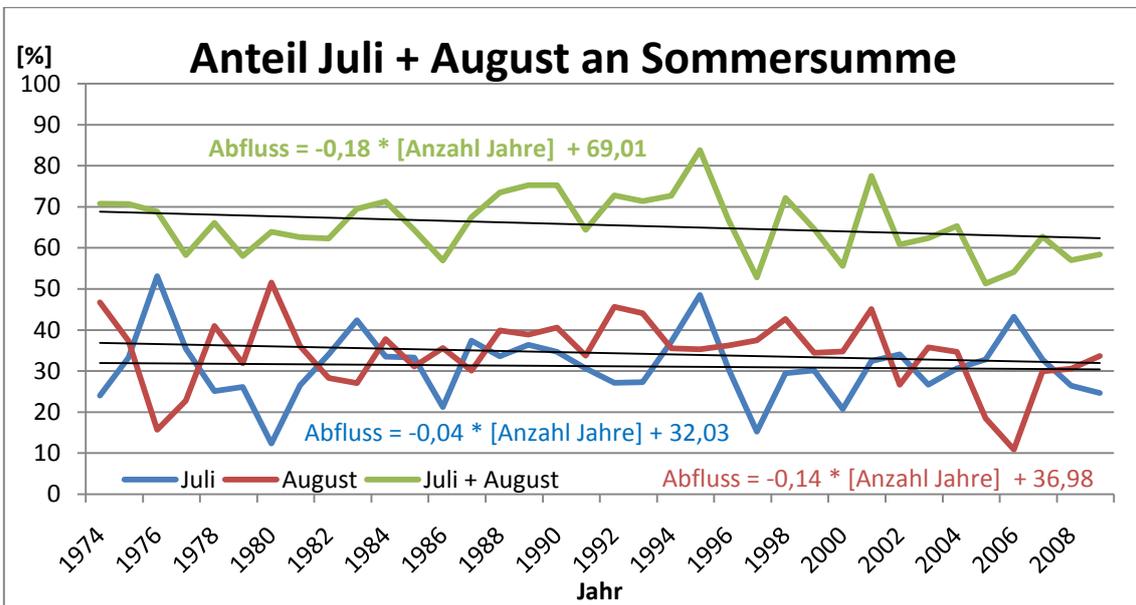


Abbildung 35: Veränderung des Anteils der Monate Juli und August an der Sommersumme für den Zeitraum 1974 - 2009. Eigene Darstellung.

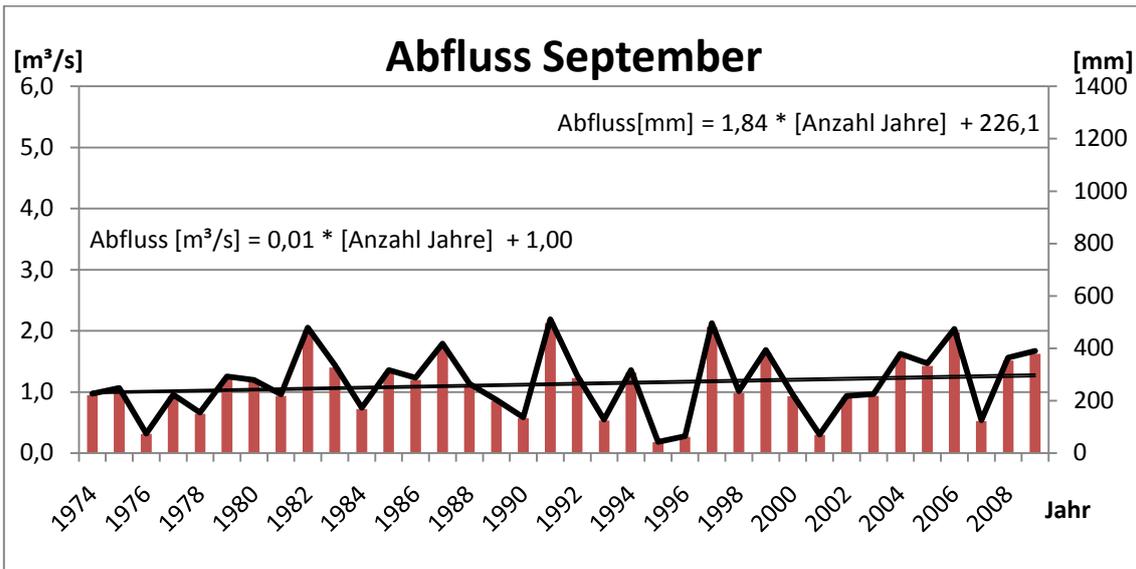


Abbildung 36: Mittlerer Abfluss des Monats September für den Zeitraum 1974 - 2009. Eigene Darstellung.

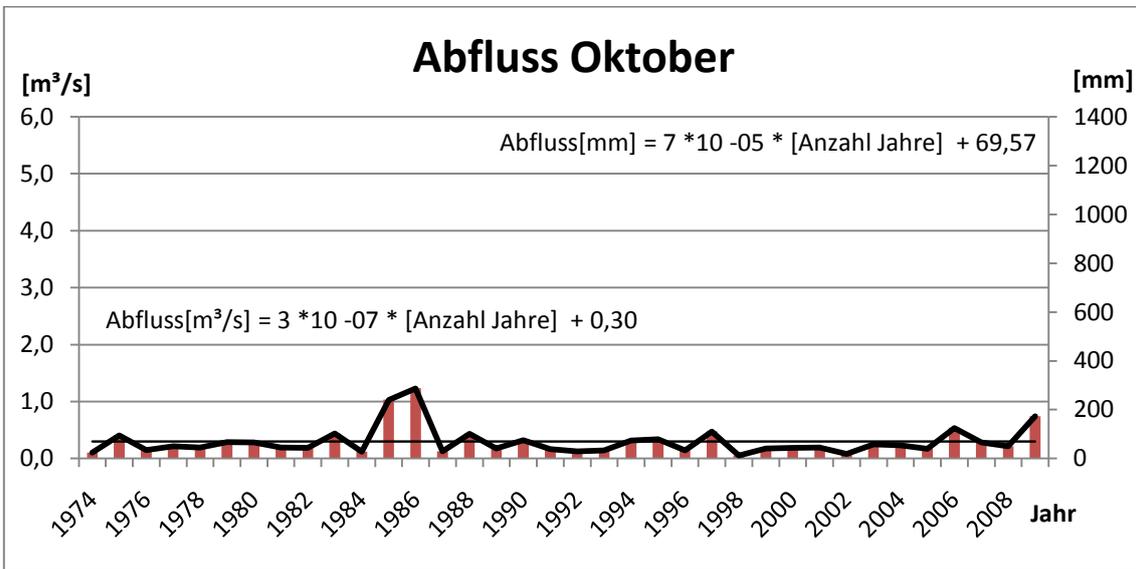


Abbildung 37: Mittlerer Abfluss des Monats Oktober für den Zeitraum 1974 - 2009. Eigene Darstellung.

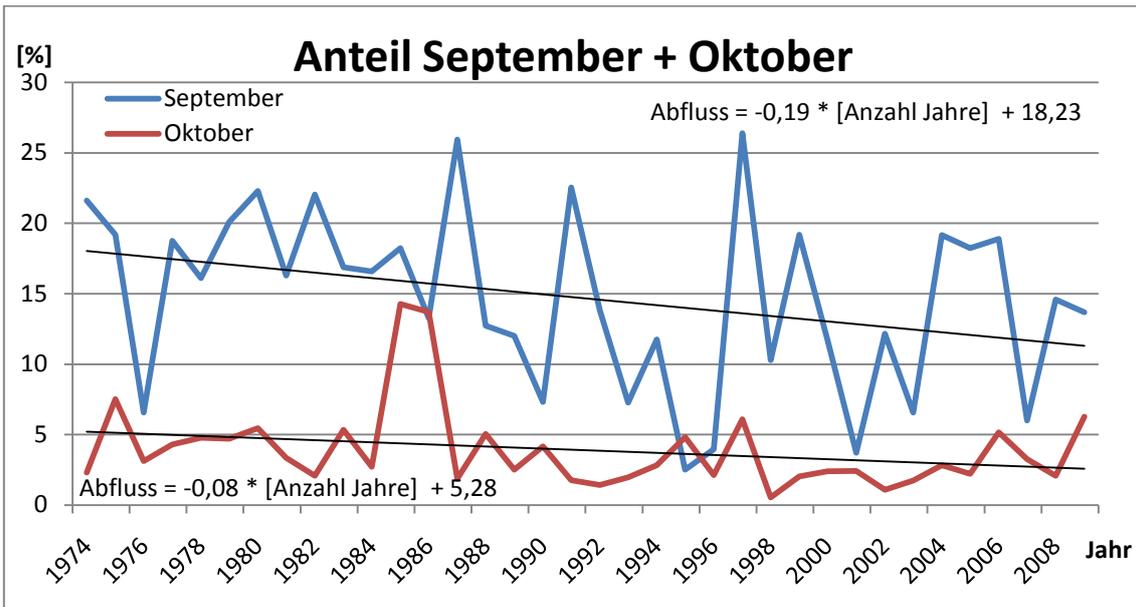


Abbildung 38: Veränderung des Anteils der Monate September und Oktober an der Sommersumme für den Zeitraum 1974 - 2009. Eigene Darstellung.

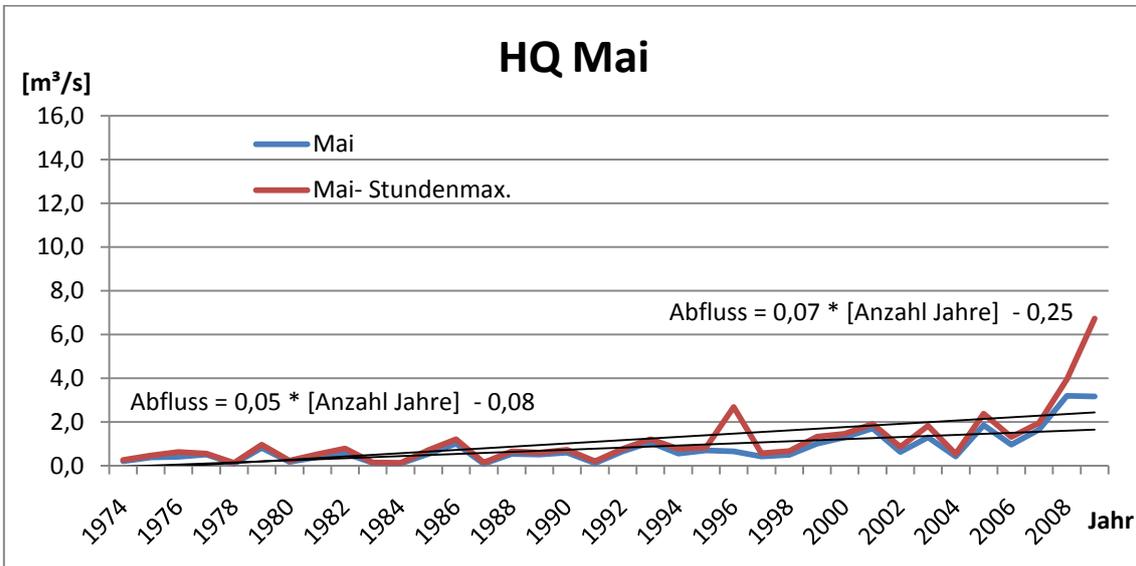


Abbildung 39: Entwicklung des HQ auf Tages- und Stundenbasis für den Monat Mai. Eigene Darstellung.

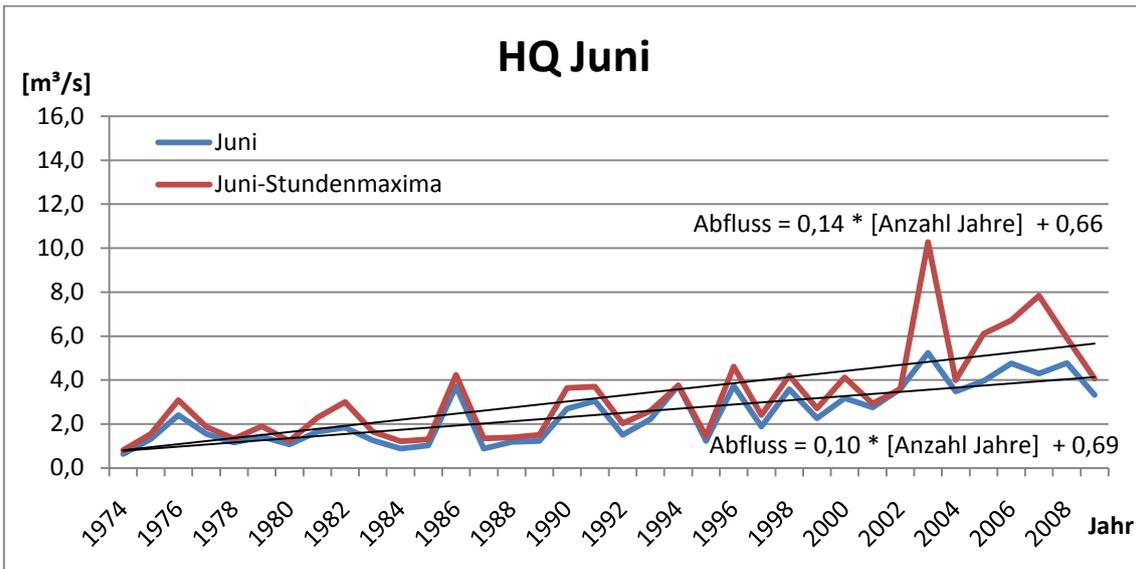


Abbildung 40: Entwicklung des HQ auf Tages- und Stundenbasis für den Monat Juni. Eigene Darstellung.

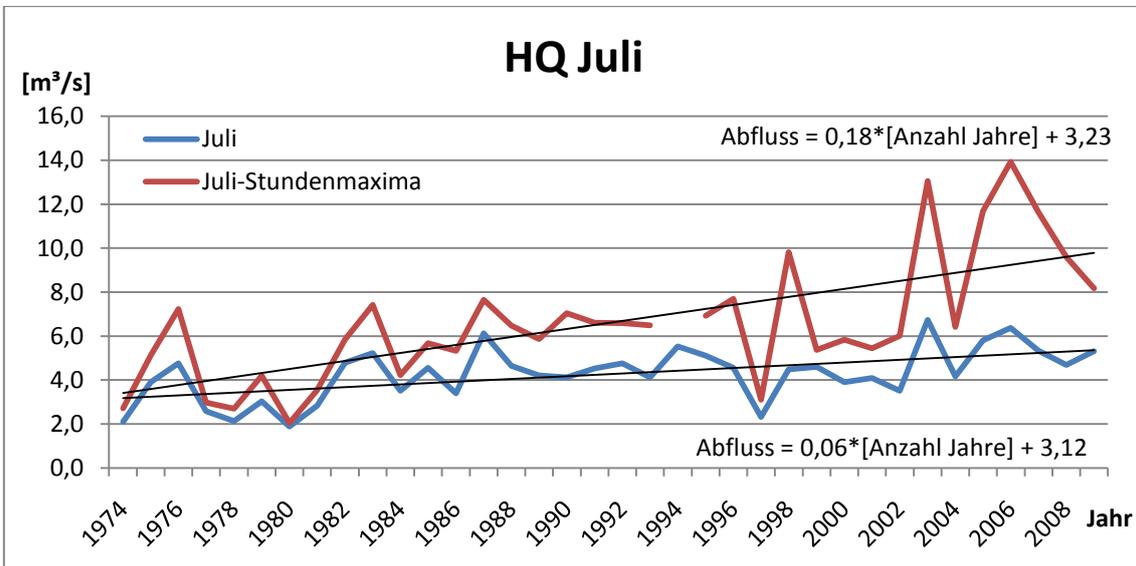


Abbildung 41: Entwicklung des HQ auf Tages- und Stundenbasis für den Monat Juli. Durch Ausfall der Messgeräte fehlt der Wert für 1994. Eigene Darstellung.

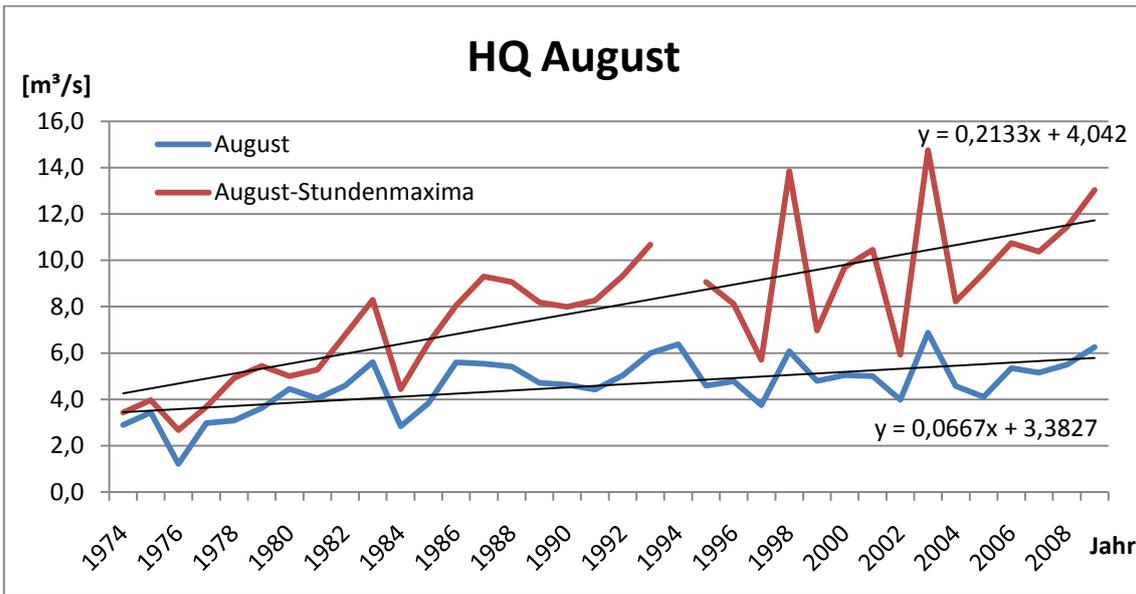


Abbildung 42: Entwicklung des HQ auf Tages- und Stundenbasis für den Monat August. Durch Ausfall der Messgeräte fehlt der Wert für 1994. Eigene Darstellung.

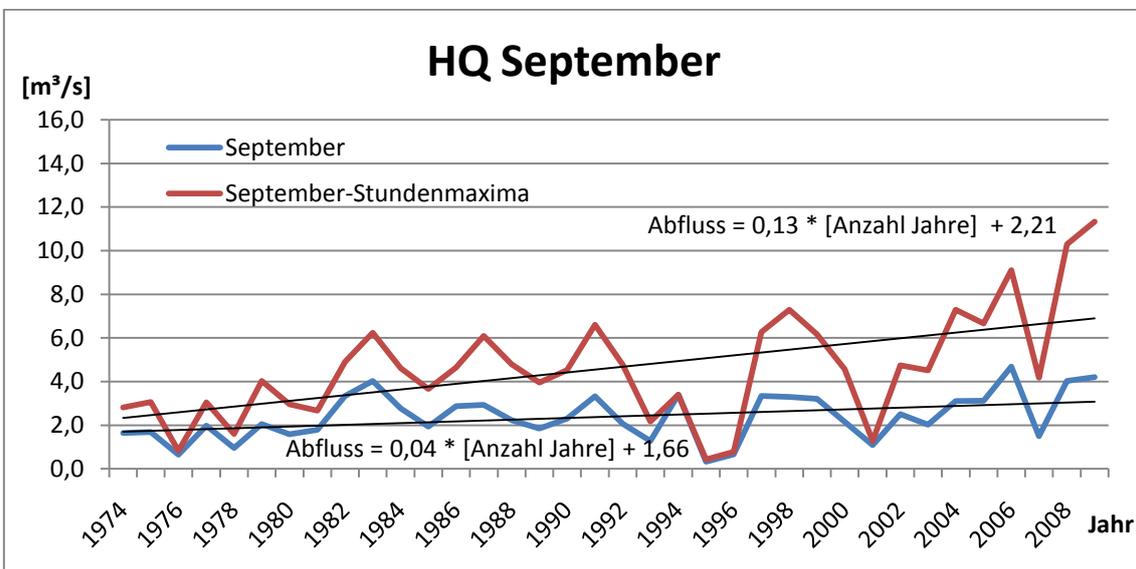


Abbildung 43: Entwicklung des HQ auf Tages- und Stundenbasis für den Monat September. Eigene Darstellung.

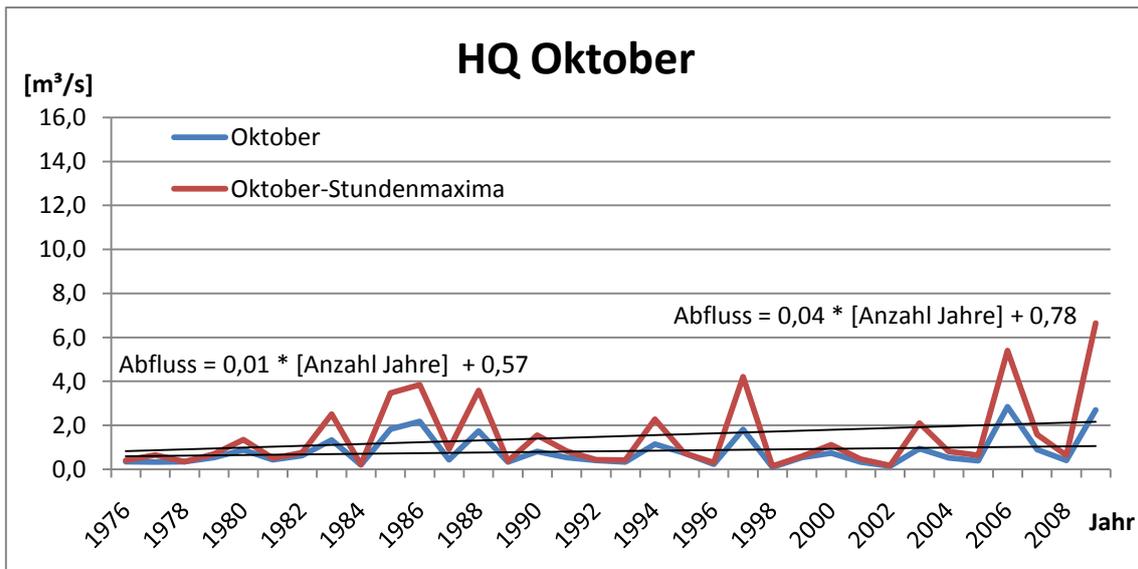


Abbildung 44: Entwicklung des HQ auf Tages- und Stundenbasis für den Monat Oktober. Eigene Darstellung.