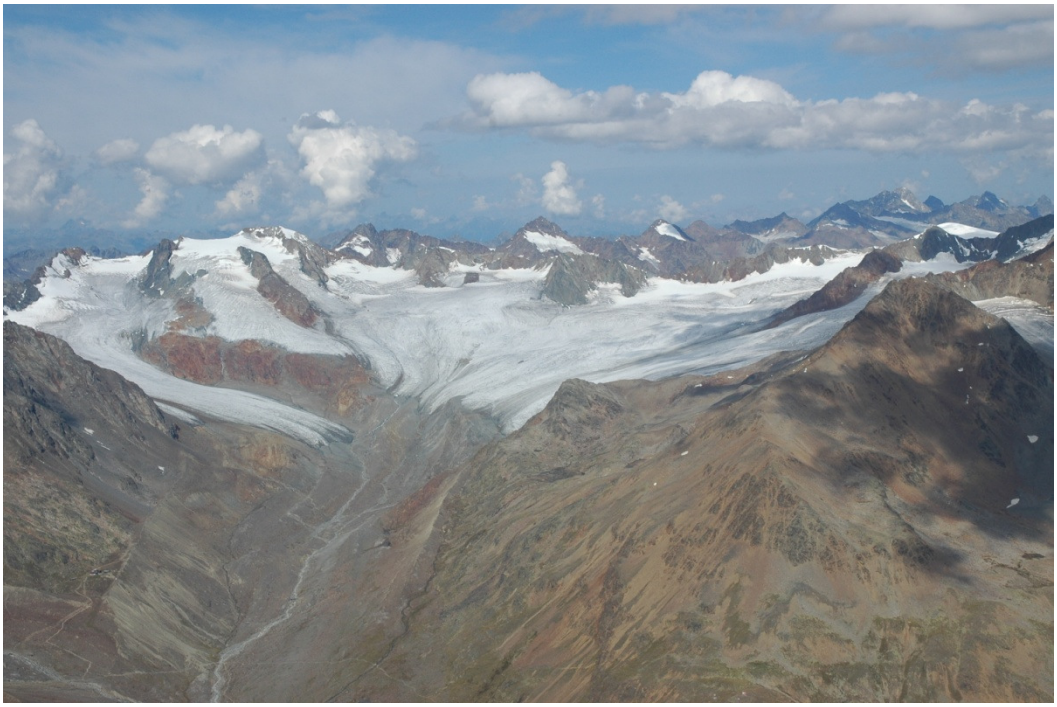
Technische Universität Braunschweig

Untersuchung des Gebietsniederschlags im hochalpinen Einzugsgebiet Vernagtferner mittels Messungen, Abflussmodellierung und homogenisierten HistAlp-Datenreihen



Bachelorarbeit

der Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

vorgelegt von

Barbara Sailer

6. Juni 2011

Erstprüfer:	Prof. Dr. Andreas Herrmann
Zweitprüfer:	Jun-Prof. Dr. Marc-O. Löwner

Abstract

This bachelor thesis deals with the analysis of basin precipitation in the basin Vernagtferner. It's a high alpine basin in the Oetztal Alps with an area of 11.4 km^2. The glaciated area decreased from 9.55 km^2 (84%) in 1980 to 7.92 km^2 (69%) in 2009.

For the determination of the annual basin precipitation in this study the conceptual runoff model HBV3-ETH9 (Braun & Renner 1992) has been applied. As input data for the model daily precipitation sums and daily temperature means and for calibration daily runoff sums were used. These data were measured at the Vernagtbach gauging and meteorological station. To calculate the annual basin precipitation of each year as realistic as possible the parameters which influence the melting processes and the precipitation vary from year to year. The yearly optimal values of the parameters were found by taking into account the measured discharge and the glacier mass balance data. A mean annual basin precipitation sum of 1692 mm is determined over the period 1980-2009. The snow fall amounts to 74 per cent of the whole basin precipitation but it differs from year to year.

The determined annual precipitation sums are compared with the precipitation data of the HistAlp-database which contains yearly anomaly values of the precipitation. The comparison is made to evaluate the temporal course of the determined basin precipitation values with the HBV3-ETH9. For this an assumed basin precipitation reference value of 1590 mm per year is multiplied with the anomaly value. The comparison is made with two different modes, a regional one and a punctual one with the coordinates of Vernagtferner. Both comparisons show a satisfying agreement. With statistical analysis methods like double-mass curve and regression analysis the result is strengthened and homogeneity of the calculated basin precipitation values is shown.

In a last step the determined basin precipitation is compared with the measured precipitation values at the meteorological station Vernagtbach. It shows that the measured values approximately need to be doubled to get the basin precipitation.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Zielsetzung 1
2.Untersuchungsgebiet 4
2.1 Geographische Lage 4
2.2 Klima und Hydrologie 5
2.3 Pegelstation Vernagtbach 7
2.4 Niederschlagsmessung an der Pegelstation Vernagtbach 8
2.5 Bisherige Arbeiten 11
3. Modellierung des Gebietsniederschlags im Einzugsgebiet Vernagtferner auf Basis der hydrologischen Wasserbilanz 13
3.1 Hydrologische Wasserbilanz eines Einzugsgebiets 13
3.2 Das Modell HBV3-ETH9 14
3.3 Modellstruktur und Aufbau 14
3.4 Eingangsdaten 18
3.5 Parameterbelegung 20
3.6 Modellergebnisse 24
3.6.1 Modellierte Abflüsse 24
3.6.2 Modellierte Massenbilanzen 25
3.6.3 Modellierte Gebietsniederschläge 27
3.6.4 Hydrologische Bilanz 30
4. Das Projekt HistAlp zum Vergleich mit den berechneten Gebietsniederschlägen 31
4.1 Das Projekt HistAlp 31
4.2 Vergleich des berechneten Gebietsniederschlags mit den HistAlp-Datenreihen 33
4.3 Zusammenfassung der Ergebnisse des Vergleichs mit HistAlp 40
5. Beziehung zwischen dem berechneten Gebietsniederschlag und den Punktmessungen an der Klimastation 42
6. Fazit 49
7.Literatur 51
A. Anhang 54

Abbildungsverzeichnis

Abb.1: Einzugsgebiet Vernagtbach mit eingezeichneten Einzugsgebietsgrenzen (rot) und der aktuellen Gletscherfläche (blau) (Quelle: KfG, verändert). 5
Abb.2: Monatsmittelsummen der Niederschläge (gemittelt über die Jahre 1990-2009) und die Monatsmittel der Temperatur (gemittelt 1979-2009) an der Pegelstation Vernagtbach (2640 m NN) (Quelle: KFG, 2010). 6
Abb.3: Pegelstation und Klimastation Vernagtbach in 2640 m NN. 7
Abb.4: Belfort-Niederschlagswaage an der Klimastation Vernagtbach (links), Schreiberarm mit Papierstreifen (rechts). 9
Abb.5: Schematische Darstellung des Wippenregenmessers (MeteoDataExplorer 2002). 10
Abb.6: Schematische Darstellung des HBV3-ETH9, basierend auf Bergström 1976. Zu optimierende Parameter sind fett gedruckt (Hagg, 2003). 15
Abb.7: Streudiagramm der berechneten und gemessenen Abflusswerte für die hydrologischen Jahre 1980/81-2008/09 24
Abb.8: Gegenüberstellung der berechneten und gemessenen Gletschermassenbilanz bezogen auf das Einzugsgebiet und der akkumulierten Differenz. 26
Abb.9: Streudiagramm der gemessenen und berechneten Massenbilanzen der hydrologischen Jahre 1980-2009. 27
Abb.10: Zeitlicher Verlauf des Gebietsniederschlags, unterteilt in Regen (rot), Schnee (blau) und Gesamtniederschlagsmenge (grün). 28
Abb.11: Messstationen der HistAlp- Datenbank. 32
Abb.12: Vergleich des zeitlichen Verlaufs des Gebietsniederschlags berechnet mit dem HBV-Modell (blau) und aus den Anomaliewerten des CRSM- Mode (rot). 35
Abb.13: Vergleich des zeitlichen Verlaufs des Gebietsniederschlags berechnet mit dem HBV-Modell (blau) und aus den Anomaliewerten des GRID1- Mode (grün). 36
Abb.14: Doppelsummenanalyse der berechneten Gebietsniederschläge mit den CRSM-Werten (links) und den GRID1-Werten (rechts) 37
Abb.16: Streudiagramm der mit dem HBV3-ETH9 berechneten und den aus den HistAlpanomaliewerten des regionalen Gitters (GRID1) berechneten Gebietsniederschlagssummen. 39
Abb.17: Unterschied [%] in den Schneeanteilen an der Pegelstation im Vergleich zum Gebietsniederschlag. 42
Abb.18: Gebietsniederschlag berechnet mit dem HBV-Modell (blau) und berechnet aus des Messwerten an der Pegelstation multipliziert mit einem mittleren konstanten Quotienten (grün). 45
Abb.19: Gebietsniederschlag berechnet mit dem HBV-Modell (blau) und berechnet aus des Messwerten an der Pegelstation plus einem mittleren konstanten Zuschlag (rot). 46

Tabellenverzeichnis

Tab.1: Datenlücken in den Niederschlagsreihen an der Klimastation Vernagtbach . 11
Tab.2 : Modellvariablen, die im Modell berechnet werden und Systemzustände oder Prozesse repräsentieren..... 15
Tab.3: Zu optimierende Parameter und ihr Wertebereich (nach Schulz,1999)..... 16
Tab.4: Höhen-Flächen-Verteilung des Einzugsgebiets Vernagtbach und die Anteile [%] der Expositionsklassen am Gesamtgebiet (nach Schulz,1999)..... 19
Tab.5: Verwendete Parameterbelegung (übernommen von Schulz (1999))..... 23
Tab.6: Parameterbelegung, der jährlich veränderten Parameter RCF und SCF, sowie für C_{max} 23
Tab.7: Nash-Sutcliff- Koeffizient, sowie die akkumulierten Differenzen in mm und prozentual zum gemessenen Abfluss..... 25
Tab. 8: Berechnete Gebietsniederschläge, unterteilt in festen und flüssigen Anteil . 29
Tab.9: Mittlere Jahreswerte der modellierten Wasserhaushaltskomponenten in mm w.e. im Untersuchungszeitraum 1980-2009 30
Abb.15: Streudiagramm der mit dem HBV3-ETH9 berechneten und den aus den HistAlpanomaliewerten des regionalen Gitters (CRSM) berechneten Gebietsniederschlagssummen. 38
Tab.10: Mittelwerte der Gebietsniederschläge der verschiedenen Datenreihen, sowie deren Minimal- und Maximalwerte..... 40
Tab.11 : Werte des berechneten Gebietsniederschlags, sowie der Punktwerte an der Klimastation Vernagtbach und deren Abweichung voneinander..... 44
Tab.12: Werte für den Zuschlag der Punktmessung über den Gesamtzeitraum und unterteilt in Zeiträume von 10 Jahren 46
Tab.13: Werte des Gebietsniederschlags und des Niederschlags an der Pegelstation, deren Abweichung voneinander und der aus den Niederschlagswerten berechnete Quotient..... 47
Tab. 14: Parameterbelegung für das HBV3-ETH9 und die jährlichen Nash-Sutcliff-Koeffizienten..... 54
Tab.15: Werte der gemessenen und berechneten jährlichen Abflüsse, sowie Massenbilanzen..... 55

1. Einleitung und Zielsetzung

Neben dem Abfluss ist der Gebietsniederschlag die bedeutendste Größe im Wasserhaushalt eines Einzugsgebiets. Der Gebietsniederschlag ist das Integral der Niederschlagsintensität über Raum und Zeit über ein Einzugsgebiets. Ein Einzugsgebiet ist ein Gebiet, das durch ober- und unterirdische Wasserscheiden begrenzt ist. Der gesamte Abfluss fließt dem am tiefsten gelegensten Punkt des Gebietes, dem Pegel zu. Die Niederschlagsintensität ist der Quotient aus der Niederschlagshöhe, des an einer Messstelle erfassten Niederschlags in mm Wassersäule, und der Zeit.
Die Niederschlagshöhe [mm] wird im hochalpinen Einzugsgebiet Vernagtbach mit verschiedenen Messgeräten erfasst. Durch Windeinfluss und Haftwasser an der Auffangfläche kommt es zu Ungenauigkeiten bei den Messwerten (Maniak 2010). Da der Gebietsniederschlag in der Regel nicht mit den Punktmessungen übereinstimmt, sondern die Niederschlagshöhen und Intensitäten sowohl örtlich als auch zeitlich variieren, gibt es für die Bestimmung des Gebietsniederschlags verschiedene Methoden:

- Isohyethenmethode

  Das Untersuchungsgebiet wird anhand Linien gleichen Niederschlages in Teilflächen gegliedert und anhand von diesen durch Flächengewichtung und Aufsummierung der Gebietsniederschlag errechnet. Diese Methode ist an der Pegelstation Vernagtbach nicht durchführbar, da es innerhalb des Einzugsgebiets nur zwei Niederschlagsmessstellen (Klimastation Vernagtbach und Schwarzkögele) gibt. In hochalpinen Einzugsgebieten werden jedoch mehr Messstellen für diese Methode benötigt, um die räumlichen Differenzen des Niederschlages erfassen zu können.
- Polygonmethode

  Jeder Messstation wird eine Fläche durch ein Polygon zugeordnet und die einzelnen Niederschlagssummen aufsummiert. Diese Methode kann im Hochgebirge nicht angewendet werden, da sie die Höheneinflüsse nicht berücksichtig.
- Radarmethode

> Der Gebietsniederschlag wird durch Radarmessungen abgeschätzt. Dabei wird das Radarsignal gemessen, das an Regentropfen und Schneekristallen abgeschwächt und reflektiert wird. Radarmessungen sind jedoch im Gebirge nicht überall möglich, da die Berge natürliche Hindernisse für die Radarstrahlen darstellen.
>
> (Schöniger & Dietrich 2008)

Wenn der Niederschlag an jedem Punkt des Einzugsgebietes gleich dem an der Pegelstation P(x, y)= P_{PV} wäre, dann hinge das Ergebnis des Gebietsniederschlags p nur von den Messfehlern an der Station ab. Ist der Niederschlag jedoch örtlich variabel, muss das Feld der Variation bekannt sein, um p exakt bestimmen zu können.
Man kann somit den Niederschlag an jedem Punkt im Einzugsgebiet durch die Messung an der Pegelstation P_{PV} plus eine Abweichung P‘ vom lokalen Wert angeben. Diese Gleichung wird über das Einzugsgebiet integriert:

$$p = P_{PV} + \overline{P'} \qquad [1]$$

mit p Gebietsniederschlag
P_{PV} Messwert an der Pegelstation
P‘ mittleres Flächenmittel der Abweichung vom lokalen Wert

Da keine der oben genannten Standartmethoden für die Bestimmung des Gebietsniederschlages im Einzugsgebiet Vernagtbach praktikabel ist, wird in dieser Arbeit der Gebietsniederschlag mittels eines hydrologischen Modelles abgeschätzt. Dafür wird das konzeptionelle Niederschlags-Abfluss-Modell HBV3-ETH9 verwendet (Bergström 1992, Braun & Renner 1992, Braun et al. 2000). Als Eingabedaten für diese Art von Modell dienen Tagesmittelwerte von Temperatur und Tagessumme des Niederschlags. Es verfügt über spezielle Parameter, um systematische Fehler und Abweichungen, die sich auf Grund von Orts- und Höhenabhängigkeit ergeben, in den Eingangsdaten zu korrigieren. Die Kalibrierung erfolgt über den Abfluss mit dem Ziel diesen möglichst genau zu berechnen. Durch die Sensitivitätsanalysen und Optimierung der Parameter ist das Ziel dieser Arbeit, eine Lösung für den Gebietsniederschlag p für das Vernagtgebiet zu finden, so dass nicht nur der Abfluss, sondern auch die Massenbilanz des Einzugsgebiets Vernagtferner bestmöglich modelliert ist.

Die berechneten Gebietsniederschlagssummen dienen als Basis für einen nächsten Schritt. Diese werden dabei mit den Niederschlagsreferenzreihen des im Internet frei verfügbaren HistAlp-Projektes (Böhm et al. 2009) verglichen, um den zeitlichen Verlauf des Gebietsniederschlags zu überprüfen. HistAlp ist eine klimatologische Datenbasis, die den zeitlichen Gang des Niederschlages auf monatlicher Basis dokumentiert. Durch diesen Vergleich werden Aussagen über die Änderung des Gebietsniederschlags getroffen und somit kann der berechnete Gebietsniederschlag p beurteilt werden.

In einem letzten Schritt soll ein Bezug zwischen dem Gebietsniederschlag und den Punktmessungen an der Pegelstation hergestellt werden. Dadurch wird die Abweichung P‘ des Gebietsniederschlags p zur Punktmessung P_{PV} bestimmt.

2.Untersuchungsgebiet

2.1 Geographische Lage

Das Untersuchungsgebiet Vernagtferner befindet sich im inneren Ötztal in Österreich. Das Venter Tal zweigt in Zwieselstein vom Ötztal ab und teilt sich oberhalb der Ortschaft Vent in das Niedertal und das Rofental. Der Vernagtferner liegt auf der Nordseite des Rofentales, das sich ca. 15 km nach Westen und Südwesten zum Alpenhauptkamm hin erstreckt. Das Ötztal ist eines der am stärksten vergletscherten Gebiete der Ostalpen (Moser et al, 1986).

Die Fläche des Einzugsgebiet der Pegelstation Vernagtbach beträgt 11.41 km^2. Innerhalb des Untersuchungszeitraums 1980-2009 verringert sich die vergletscherte Fläche von 9.55 km^2 im Jahre 1980 auf 7.92 km^2 (2009). Dies bedeutet eine Abnahme des vergletscherten Anteils von 84% auf 69%, d.h. um 15%-Punkte.

Das Einzugsgebiet erstreckt sich von 2640 m NN an der Pegelstation Vernagtbach bis zu 3631 m NN, bei einer mittleren Höhe von 3143 m NN und einer mittleren Gebietsbreite von 3.3 km.

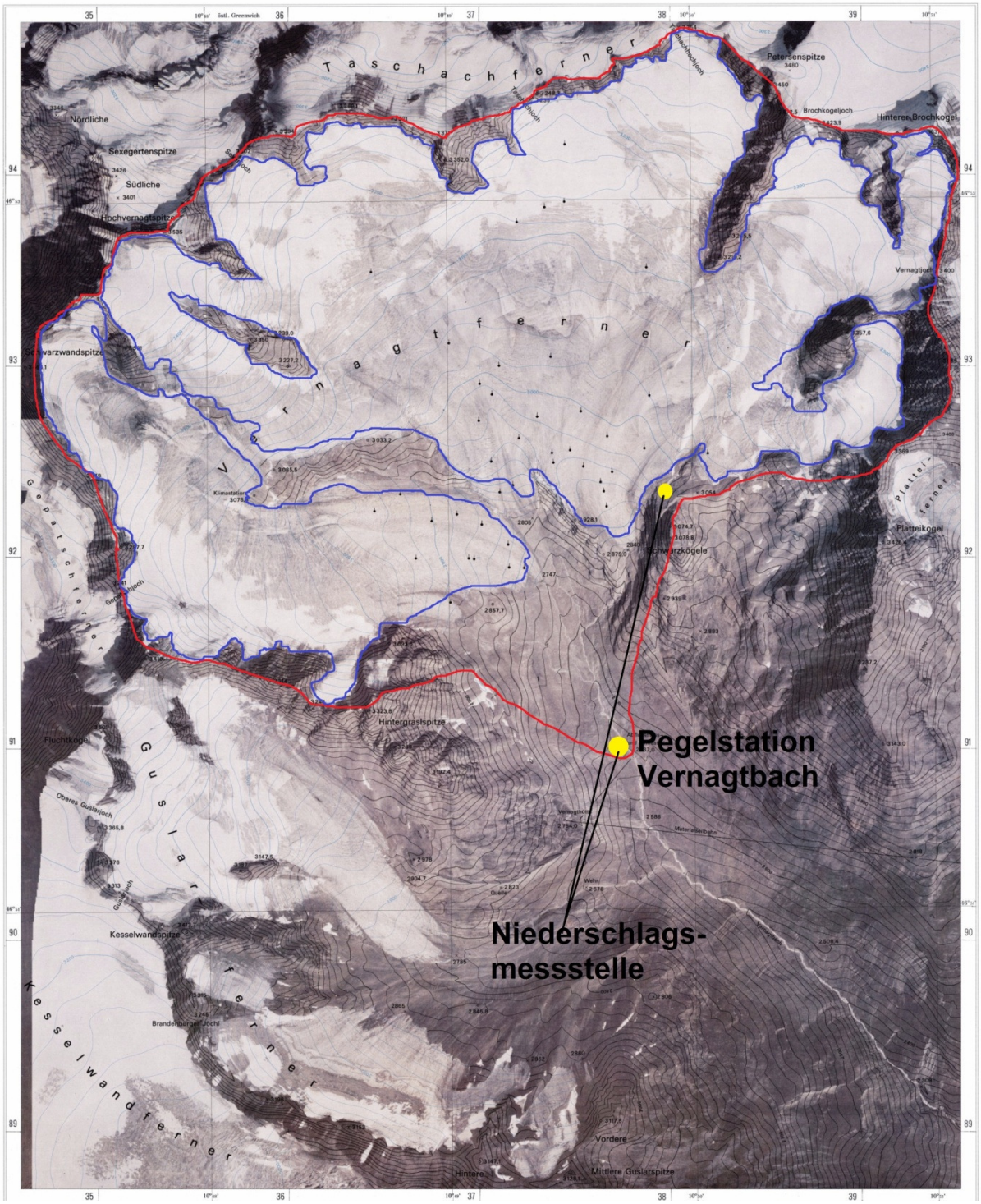


Abb.1: Einzugsgebiet Vernagtbach mit eingezeichneten Einzugsgebietsgrenzen (rot) und der aktuellen Gletscherfläche (blau) (Quelle: KfG, verändert).

2.2 Klima und Hydrologie

Das hintere Ötztal, in dem das Untersuchungsgebiet liegt, wird zu den inneralpinen Trockentälern gezählt. Die niedrigen Summen der Jahresniederschläge kommen

durch die geringen Niederschlagsmengen bei den Einzelereignissen zustande und nicht durch eine geringe Niederschlagshäufigkeit (Kuhn et al. 1982).

An der Pegelstation gibt es ein ausgeprägtes Sommermaximum der mittleren Monatsniederschläge. Die Niederschlagsreihen liegen erst ab 1990 lückenlos vor, sodass sich die nachfolgenden Werte nur auf den Zeitraum 1990- 2009 beziehen. Abbildung 2 kann man entnehmen, dass das Maximum des Niederschlages im Sommer (Juli: 118mm) fällt, das Minimum im Winter (Januar: 35mm). Ein deutlicher Anstieg des Niederschlages ist erst im Juni zu beobachten. Der mittlere Jahresniedereschlag an der Pegelstation beträgt 795mm im Zeitraum 1990-2009. Jedoch kommt es zu großen jährlichen Abweichungen. Die mittleren Niederschläge liegen zwischen 590 mm (2002/03) und 1005 mm (1993/94).

Die Jahresdurchschnittstemperatur an der Pegelstation Vernagtbach (2640m NN) gemittelt über die Jahre 1979-2009 beträgt -1,5°C. Die maximale Monatsmitteltemperatur wird in den Monaten Juli und August erreicht (Vgl. Abb.2). Die höchste Monatsmitteltemperatur wird im September 2003 mit 9.6°C gemessen.

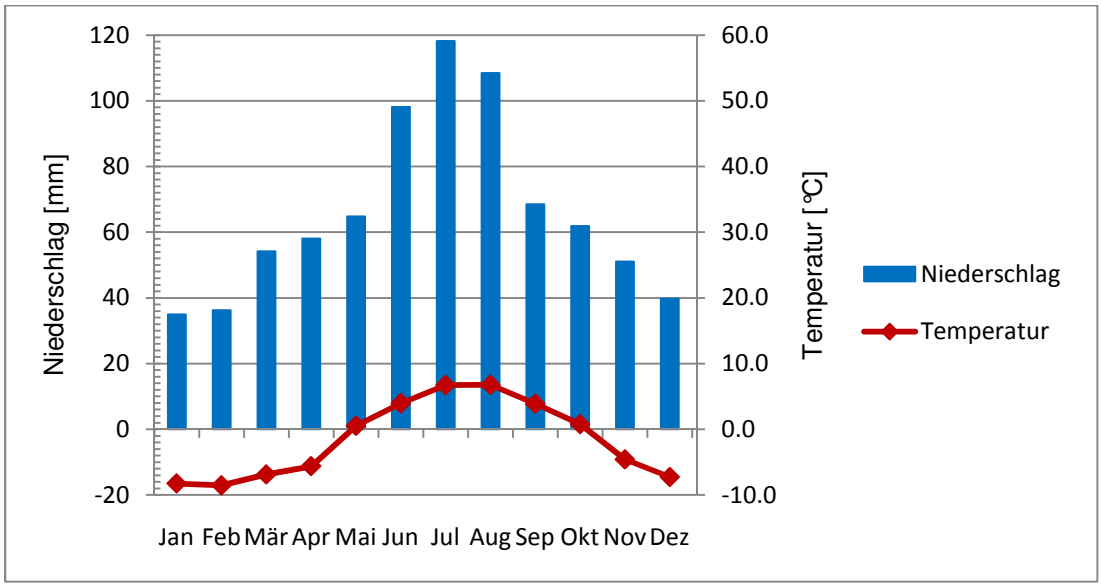


Abb.2: Monatsmittelsummen der Niederschläge (gemittelt über die Jahre 1990-2009) und die Monatsmittel der Temperatur (gemittelt 1979-2009) an der Pegelstation Vernagtbach (2640 m NN) (Quelle: KFG, 2010).

Im Untersuchungsgebiet herrscht ein glaziales Abflussregime, d.h. der Hydrograph wird durch den Abfluss des Gletschers geprägt. Der Abfluss zeigt tages- und jahreszeitlichen Schwankungen und hat sein Maximum in den Sommermonaten. Der Glet-

scher entwässert über den Venagtbach. An der Pegelstation führt der Vernagtbach die gesamten oberirdischen Abflüsse des Einzugsgebiets.

2.3 Pegelstation Vernagtbach

Die Pegelstation Vernagtbach befindet sich in einer Höhe von 2640m NN und liegt aktuellungefähr 1.5km unterhalb des Gletschers im Gletschervorfeld. Die Pegelstation wurde 1974 in Betreib genommen (Braun et al. 2004).
An der Pegelstation werden nicht nur der Abfluss des Einzugsgebietes sondern auch andere Klimaelemente gemessen. Die Messgeräte der Klimastation sind nahe der Pegelstation aufgestellt. Es finden Messungen von Schneehöhe, Temperatur, Niederschlag, Luftdruck, Strahlung, relativer Feuchte, Windrichtung und Windgeschwindigkeit statt. Die Zustandsgrößen werden mittels Sensoren, die ein entsprechendes analoges oder digitales Signal erzeugen, gemessene. Die Signale werden in Datenloggern gespeichert.

Abb.3: Pegelstation und Klimastation Vernagtbach in 2640 m NN.

2.4 Niederschlagsmessung an der Pegelstation Vernagtbach

Niederschlagsmessungen werden an der Klimastation Vernagtbach seit 1974 durchgeführt. Es wird der Niederschlag mit drei verschiedenen Verfahren, die unterschiedliche Messgenauigkeiten und zeitliche Auflösungen haben, gemessen. Zum Einsatz kamen Niederschlagwaagen und -wippen.

Zur Messung der festen und flüssigen Niederschläge an der Pegelstation wird die Belfort-Waage eingesetzt. Dies basiert auf dem Wägeprinzip. Dabei wird der Niederschlag in einer Sammeleimer, der etwa ein Wasseräquivalent von 500mm fasst, aufgefangen. Der Durchmesser der Auffangfläche beträgt etwa 203 mm (8 Inch) und die Fläche umfasst somit 0.13 m^2. Im Herbst wird in den Eimer zusätzlich Salz gefüllt, damit der fallende Schnee besser schmilzt. Gemessen wird das Gewicht des in der Sammeleimer aufgefangen Niederschlags. Die Niederschlagshöhe [mm] errechnet sich anhand des Gewichtes des gefallenen Niederschlags und der Fläche der Auffangöffnung. An der Klimastation gibt es zwei Niederschlagswaagen wovon die eine das Messsignal analog und die andere digital erfasst. Bei der analogen Methode werden die Niederschlagsmesswerte mittels eines Schreiberarms auf eine Papiertrommel aufgetragen. Der Papierstreifen wird monatlich gewechselt und ausgewertet. Die digitale Belfort-Waage wurde mit einem Drehwiderstand nachgerüstet, an dem ein kontinuierliches elektrisches Signal der Stellung des Schreibarms auf der Trommel verfügbar ist. Die zeitliche Auflösung des digitalen Signals beträgt 5 Minuten.

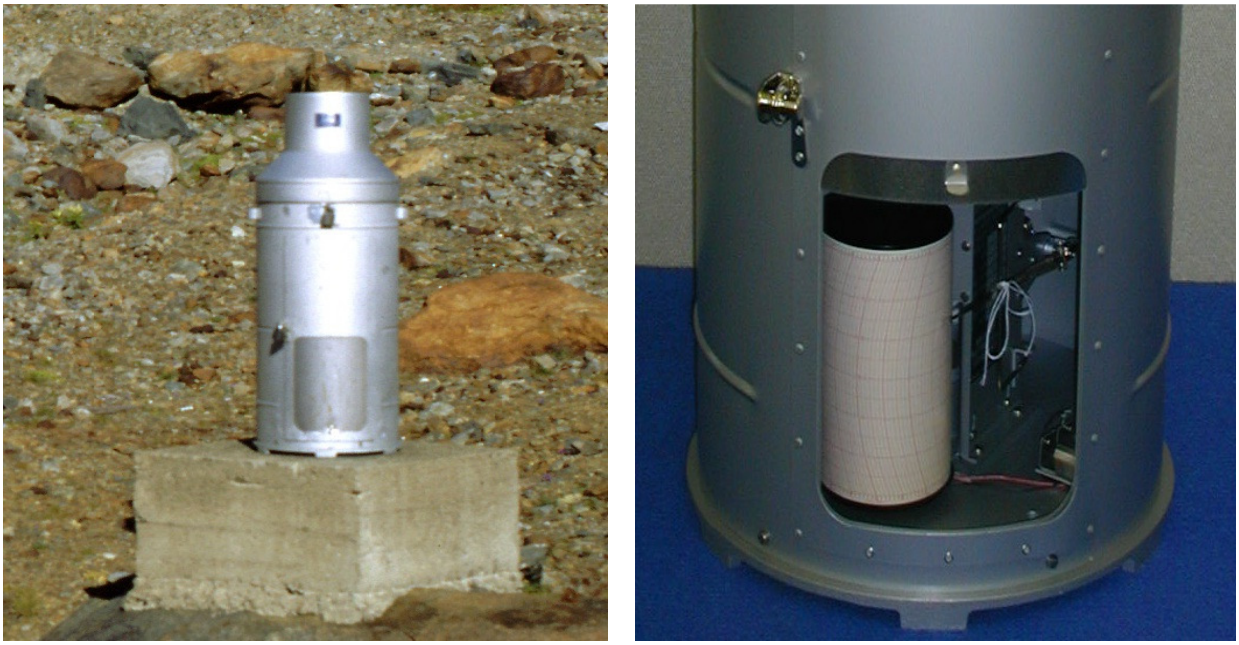


Abb.4: Belfort-Niederschlagswaage an der Klimastation Vernagtbach (links), Schreiberarm mit Papierstreifen (rechts).

Bei den Niederschlagsmessungen kommt es zu systematisch auftretenden Fehlern durch den Windeinfluss und durch Haftwasser an der Auffangfläche und bei der analogen Niederschlagswaage durch Ungenauigkeiten beim Ablesen des Papierstreifens bei der Auswertung vor allem bei der Zeitzuordnung des Niederschlagsereignisses. Der Windeinfluss verursacht den größten Fehler bei der Niederschlagsmessung. Der Sensor des Niederschlagsmessers ragt in die Atmosphäre und befindet sich somit nicht unmittelbar an der Bodenoberfläche. Dadurch wirkt er als Hindernis und es kommt zu Störungen in der Luftströmung. Diese Turbulenzen können zu einer höheren Windgeschwindigkeit über dem Auffangtrichter führen. Durch die höheren Windgeschwindigkeiten kommt es zu einer zusätzlichen horizontalen Komponente in der Bewegung von Regentropfen und Schneeflocken. Damit jedoch der Niederschlag vollständig aufgefangen wird, muss die Öffnung senkrecht zu dessen Fallrichtung ausgerichtet sein. Durch die Montage des Pluviometers wird die Horizontale vorgeben. Je mehr die Fallrichtung des Niederschlags vom Lot abweicht, umso weniger gelangt in den Auffangtrichter. Da Regentropfen träger sind als Schneeflocken, bieten die Tropfen dem Wind eine geringere Angriffsfläche und werden weniger stark aus ihrer ursprünglichen Falllinie abgelenkt als die Schneeflocken. Falls der Niederschlag als Schnee fällt, kann der mit der Belfort-Waage gemessene Niederschlag bis zu 50% geringer ausfallen als direkter Messungen des Wasseräquivalents der Schneedecke neben dem Gerät (Maniak 2010).

Als Kontrollverfahren wird zusätzlich eine Niederschlagswippe der Firma *Gertsch* eingesetzt. Der Niederschlag wird in einem Trichter mit einer Auffangfläche von 250 cm^2 aufgefangen. Das Wasser gelangt zu einer Kippgefäß, welches aus zwei Wippschalen besteht, die jeweils ein Fassungsvermögen von 2 ml haben. Eine Wippung entspricht einer Niederschlagshöhe von 0.1 mm. Die Wippe kippt, wenn die Schale voll ist und wird dabei sofort entleert. Dabei wird ein elektrischer Impuls ausgelöst, der von einer elektronischen Schaltung gezählt wird. Über die Anzahl der Impulse in einer bestimmten Zeit wird die Intensität des Niederschlags gemessen. Mit der Niederschlagswippe kann jedoch nur der flüssige Niederschlag erfasst werden. Fester Niederschlag sammelt sich zwar auf der Trichterfläche an, löst jedoch die Wippe nicht aus. Schnee wird erst gemessen, nachdem dieser schmilzt. Deshalb wird die Niederschlagswippe nur im Sommer eingesetzt. Dank der hohen Speicherungsrate kann somit die Niederschlagsintensität des einzelnen Niederschlagsereignisses in 5-Minuten-Intervallen gemessen werden.

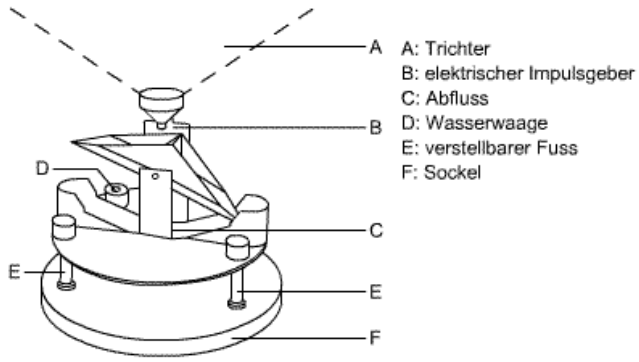


Abb.5: Schematische Darstellung des Wippenregenmessers (MeteoDataExplorer 2002).

Die örtliche Schneehöhe nahe der Klimastation Vernagtbach wird mittels eines Ultraschalldistanzmessers kontinuierlich gemessen. Dort kommt es jedoch wegen der Tallage und der dadurch bedingten Kanalisierung des Windes zu verstärkten Umlagerungen des Schnees. Deshalb lässt sich aus dem dort gemessenen Schneehöhenzuwachs der tatsächlich gefallene Niederschlag nicht ableiten.

Die gemessenen Niederschlagsreihen an der Pegelstation weisen vor allem in den frühen Untersuchungsjahren große Messlücken auf. Seit dem Haushaltsjahr 1992/93 liegen die Niederschlagsreihen dagegen praktisch lückenlos vor.

Tab.1: Datenlücken in den Niederschlagsreihen an der Klimastation Vernagtbach

Hydrologisches Jahr	Datenlücken [%]	Hydrologisches Jahr	Datenlücken [%]
1979/80	91	1994/95	0
1980/81	42	1995/96	0
1981/82	43	1996/97	0
1982/83	24	1997/98	0
1983/84	39	1998/99	0
1984/85	3	1999/00	0
1985/86	12	2000/01	0
1986/87	19	2001/02	0
1987/88	19	2002/03	0
1988/89	0	2003/04	0
1989/90	0	2004/05	0
1990/91	0	2005/06	0
1991/92	4	2006/07	0
1992/93	0	2007/08	0
1993/94	0	2008/09	0

2.5 Bisherige Arbeiten

Im Einzugsgebiet Vernagtbach wurden bereits viele Arbeiten im Bereich der Glaziologie und Hydrologie durchgeführt. Seit 1964 ist die Kommission für Glaziologie am Vernagtferner aktiv. Erste Abschätzungen des Gebietsniederschlags anhand der verfügbaren Messungen im Einzugsgebiet Vernagtbach wurden bereits im Rahmen des SFB81-Projektes „Abfluss von und in Gletschern“ für den Untersuchungszeitraum 1974- 1985 gemacht (Moser et al 1986). Der Gebietsniederschlag wird für die Winter- und Sommermonate getrennt betrachtet. Im Winter (Oktober-April) wird in der Regel der gesamte Niederschlag in der Schneedecke gespeichert. Mit Hilfe von Schneeschächten und Schneehöhensondierungen wird das mittlere Wasseräquivalent des Winterniederschlags ermittelt. Im Sommer (Mai-September) wird auf den an der Pegelstation registrierten Niederschlag mittels Korrekturfaktoren für Schnee und Regen, sowie Höhenkorrekturen ein pauschaler Wert addiert.

Escher- Vetter et al. (2003) veröffentlichten sowohl empirische Gebietsniederschlagsergebnisse als auch erstmals Ergebnisse der Berechnung des Gebietsniederschlags mit dem HBV3- ETH9. Dabei erfolgte die Kalibrierung des Modells über den gesamten Untersuchungszeitraum 1974-2003 als Ganzes. Neben dem Abfluss

wurden auch die kumulativen Gletschermassenbilanzen zur Kalibrierung herangezogen.

Die Untersuchung des Gebietsniederschlags erfolgte weiterhin mit diesen beiden Methoden. Die Parameter für das HBV- Modell wurden über den gesamten Untersuchungszeitraum konstant gehalten. Die mit dem Modell berechneten Niederschläge liefern im Mittel gute Übereinstimmungen mit den Gebietsniederschlägen errechnet aus den gemessenen Winter und Sommerniederschlägen. Aber der Vergleich zeigt immer noch große Abweichungen zwischen den empirischen und modellierten Niederschlagswerten. Eine Unterteilung in zwei zeitliche Abschnitte (1974- 1985 und 1994- 2005) zeigt eine Zunahme der Gebietsniederschlagssummen im Laufe der Zeit (Braun et al. 2007).

In dieser Arbeit wird erneut das HBV3- ETH9 zur Ermittlung des Gebietsniederschlags für den Zeitraum 1980- 2009 verwendet. Jedoch werden anstatt der Annahme von konstanten Modellparametern die Parameter, die den Niederschlag und die Schmelze beeinflussen jährlich kalibriert. Die Kalibrierung erfolgt über den Abfluss und die spezifischen Gletschermassenbilanzen. In einem weiteren Schritt werden die berechneten Niederschlagswerte mit den Werten der Histalp-Datenbank verglichen.

3. Modellierung des Gebietsniederschlags im Einzugsgebiet Vernagtferner auf Basis der hydrologischen Wasserbilanz

3.1 Hydrologische Wasserbilanz eines Einzugsgebiets

Die hydrologische Bilanz eines Einzugsgebiets wird nach Wehren et al. (2010) wie folgt formuliert:

$$R = P - ET - \delta S \quad [2]$$

mit R Abfluss
P Gebietsniederschlag
ET Verdunstung
δS Speicheränderung

Die Terme der Wasserbilanz sind auf das Einzugsgebiet Pegelstation Vernagtbach innerhalb eines hydrologischen Jahres bezogen und sind in mm Wasseräquivalent angegeben. Das hydrologische Jahr beginnt am 1.Oktober und endet am 30. September des darauffolgenden Jahres. Diese Einteilung erfolgt, um in der Jahresbilanz auch die Niederschläge zu erfassen, die in den Wintermonaten fallen, als Schnee und Eis gespeichert werden und erst im darauffolgenden Jahr abfließen.
In die Speicheränderung gehen die Terme der Massenänderung des Gletschers und die Bilanzen des Schneespeichers, des Grundwasserspeichers und des Bodenspeichers ein.

$$\delta S = B_{Gletscher} + B_{Schnee} + B_{Boden} \quad [3]$$

mit $B_{Gletscher}$ Bilanz der Gletschers
B_{Schnee} Bilanz des Schneespeichers
B_{Boden} Bilanz des Grundwasser- und Bodenspeichers

3.2 Das Modell HBV3-ETH9

In diese Arbeit wird das Modell HBV3-ETH9 angewendet (Braun & Renner 1992). Dieses ist ein konzeptionelles Niederschlags-Abfluss-Modell. Das HBV-Modell berechnet den Abfluss auf Basis der Wasserhaushaltsgleichung. Der Abfluss wird durch abflussbildende Prozesse erzeugt, zu denen auch der Auf- und Abbau von Schnee und Eis gehören. Die erste Version des Modells wurde am *Swedish Meteorological and Hydrological Institut* in den 70ger Jahren entwickelt und seit 1992 erfolgreich angewandt (Bergström 1976 1992). Es wurde von Jensen und Braun weiterentwickelt, um das Modell auch auf alpine und hochalpine Einzugsgebiete anwenden zu können (Braun et al. 1993). Die Modellversion 9 wurde von Weber an der Kommission für Glaziologie neu programmiert. Das HBV3-ETH9 Modell wurde seitdem weiterentwickelt und wird auch heute noch in der Kommission für Glaziologie (KfG) eingesetzt.
Die ausführliche Darstellung der Modellparameter und der einzelnen Berechnungsschritte finden sich bei Schulz (1999), Ellenrieder (2002) und Haag (2003). Im Folgenden werden nur die wichtigsten Algorithmen kurz aufgeführt.

3.3 Modellstruktur und Aufbau

Bei der Konzeption des Modells war das Ziel, dieses einfach und klar strukturiert zu halten. Um die wichtigsten abflussbildenden Prozesse zu beschreiben, werden drei Hauptmodule unterschieden:

- Schnee- und Gletscherroutine
- Bodenwasserroutine
- Berechnung des Abflusshydrographen

In Abb. 6 sind die im Modell berücksichtigten Prozesse bei der Abflussgenese und die zu bestimmenden Parameter schematisch aufgezeigt.

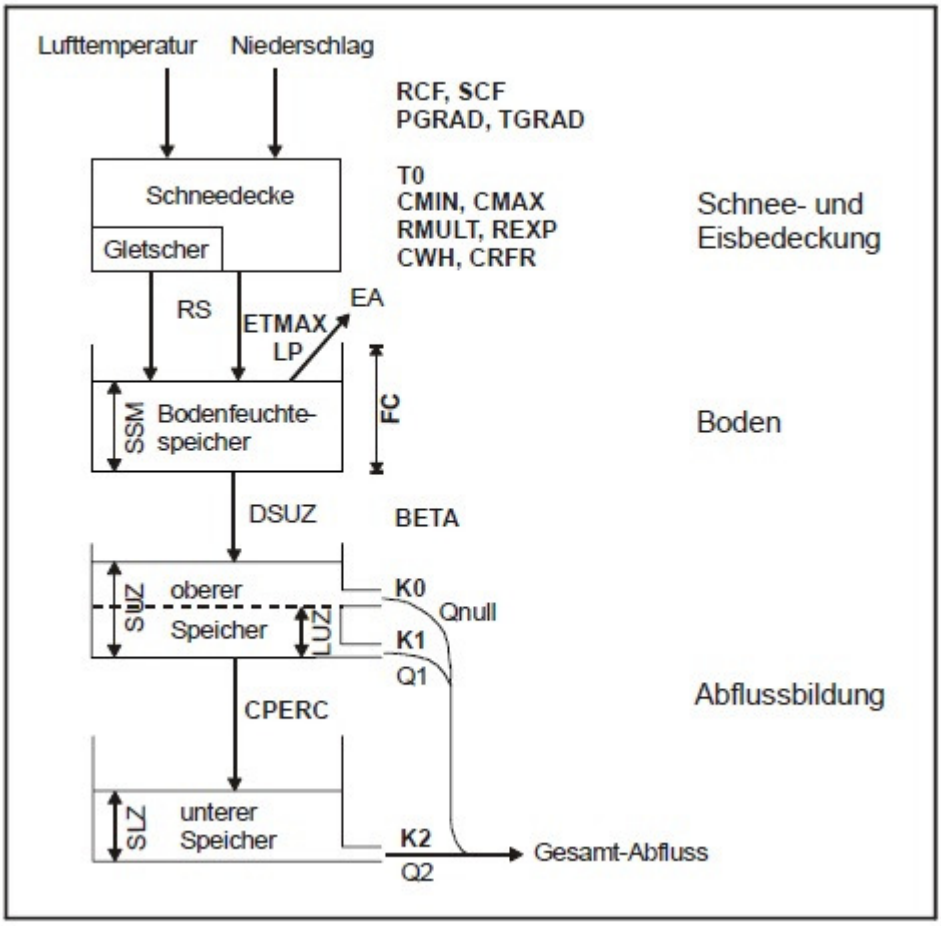


Abb.6: Schematische Darstellung des HBV3-ETH9, basierend auf Bergström 1976. Zu optimierende Parameter sind fett gedruckt (Hagg, 2003).

Der Darstellung können aus der linken Spalte die Modellvariablen entnommen werden, die im Modell berechnet werden und Systemzustände oder Prozesse repräsentieren (Tab. x).

Tab.2 : Modellvariablen, die im Modell berechnet werden und Systemzustände oder Prozesse repräsentieren

Parameter	Bedeutung	Einheit
RS	Äquivalentniederschlag	mm
E_A	Aktuelle Evapotranspiration	mm/d
S_{SM}	Inhalt des Bodenfeuchtespeicher	mm
D_{SUZ}	Zufluss in den oberen Speicher	mm/d
S_{UZ}	Inhalt des oberen Speichers	mm
S_{LZ}	Inhalt des unteren Speichers	mm
Q_{NULL}	Oberflächenabfluss	mm/d
Q_1	Interflow	mm/d
Q_2	Grundwasserabfluss	mm/d

Der mittleren Spalte des Schemas können die Parameter und deren Wertebereich entnommen werden, welche durch Optimierung bestimmt werden (Tab. 3).

Tab.3: Zu optimierende Parameter und ihr Wertebereich (nach Schulz,1999)

Parameter	Bedeutung	Wertebereich	Einheit
RCF	Regen- Korrekturfaktor	0,1 …2,5	-
SCF	Schnee- Korrekturfaktor	0,1 …2,5	-
P_{GRAD}	Höhen- Niederschlagsgradient	0,0 …20,0	%/(100 m)
T_{GRAD}	Höhen- Temperaturgradient	-1,5 ...1,0	℃/(100 m)
T_0	konstanter Temperaturzuschlag	-5,0 …5,0	℃
C_{MIN}	minimaler Gradtagfaktor (21.12.)	1,0 …10,0	mm/(℃ d)
C_{MAX}	maximaler Gradtagfaktor (21.06.)	1,0 …20,0	mm/(℃ d)
R_{MULT}	Faktor für erhöhte Schmelze von Eis gegenüber Schnee	1,0 …2,0	-
R_{EXP}	Faktor für expositionsabhängige Berechnung der Schnee- und Gletscherschmelze	1,0 …3,0	-
CWH	Wasserrückhaltevermögen der Schneedecke	0,01 …0,2	-
CRFR	Wiedergefrierkoeffizient	0,01 …5,0	-
ET_{MAX}	Maximale Evapotranspiration	1,0 …10,0	mm/d
LP	Wert des S_{SM}, ab dem die potentielle Verdunstung angenommen wird	1,0 …500,0	mm
FC	Maximale Speicherkapazität des Bodenfeuchte-Speichers	0,1 …500,0	mm
BETA	Exponent bei der Berechnung von D_{SUZ}	0,0 …10,0	-
L_{UZ}	Schwellenwert für den Abfluss Q_{NULL}	0,0 …200,0	mm
k_0	Speicherkonstante zur Berechnung des Abflusses Q_{NULL}	0,0 …1,0	-
k_1	Speicherkonstante zur Berechnung des Abflusses Q_1	0,0 …1,0	-
C_{PERC}	Perkolation aus dem oberen in den unteren Speicher	0,0 …2000,0	mm/d
k_2	Speicherkonstante zur Berechnung des Abflusses Q_2	0,0 …1,0	-

Die Hauptmodule des Modells stellen sich wie folgt dar:

<u>Schnee-und Gletscherroutine</u>

Innerhalb der Schnee- und Gletscherroutine wird aus dem flüssigen Niederschlag und der Schnee und Eisschmelze der Äquivalentniederschlag RS berechnet.

- *Unterscheidung zwischen festem und flüssigem Niederschlag*

  Der Aggregatszustand des Niederschlags wird mit Hilfe der Schwellentemperatur T_0 differenziert. Wenn $T-T_0$ positiv ist, ist der Niederschlag flüssig, ist $T-T_0$ negativ fällt Schnee. Dabei ist der Schwellenwert T_0 eine generelle Temperaturkorrektur, welcher durch Optimierung bestimmt wird.

Anhand des Temperaturgradienten T_{Grad} wird für jede Höhenstufe eine mittlere Temperatur ermittelt.

- *Berechnung des Gebietsniederschlags*

  Zur Berechnung des Gebietsniederschlags müssen die an der Klimastation gemessenen Niederschlagswerte korrigiert werden. Dadurch werden systematische Messfehler ausgeglichen und auch die mangelnden Repräsentativität der Punktmessungen für das gesamte Einzugsgebiet berücksichtigt. Diese Korrektur erfolgt über den Regenkorrekturfaktor(RCF) und den Schneekorrekturfaktor (SCF).

$$P_{liq} = RCF * P_m \quad [4]$$

$$P_{snow} = SCF * P_m \quad [5]$$

  P_m gemessener Niederschlag [mm]
  P_{liq} korrigierter flüssiger Niederschlag [mm]
  P_{snow} korrigierter fester Niederschlag [mm]

  Eine Berücksichtigung der Niederschlagszunahme mit der Höhe wird durch den Niederschlagsgradienten P_{Grad}, die prozentuale Niederschlagszunahme pro 100m Höhenzunahme, in die Berechnung mit einbezogen.

- Weitere Berechnungsschritte innerhalb der Schnee- und Gletscherroutine sind die Berechnung der Schnee- und Gletscherschmelze sowie des Wiedergefrierens und der Speicherung von Schmelzwasser in der Schneedecke.

<u>Bodenfeuchteroutine</u>

Für die Bodenfeuchteroutine wird der berechnete Äquivalentniederschlag RS, die Summe aus Regen und Schmelze, über die Höhenstufen aufsummiert und als Eingabegröße verwendet. Alle Abflussprozesse im Boden werden durch ein einfaches Speichermodell beschrieben, welches alle räumlichen Abflusskomponenten zusammenfasst. Ausgabegrößen sind die aktuellen Verdunstungsverluste E_A und der Durchfluss in den oberen Speichers D_{SUZ}.

Abflusshydrograph (Antwortfunktion)

Als Eingabedaten für die Antwortfunktion werden die berechneten Werte für den Durchfluss in den oberen Speicher verwendet. Daraus wird die Abflussganglinie am Pegel modelliert. Bei der Modellierung wird methodisch zwischen zwei Speichern unterschieden: dem linearen unteren Speicher und dem oberen Speicher. Innerhalb dieser Speicher wird zwischen den verschiedenen Abflussformen differenziert. Aus dem Oberflächenabfluss Q_{Null}, dem Interflow Q_1 und dem Grundwasserabfluss Q_2 werden durch eine Transformationsfunktion der Gesamtabfluss Q_g berechnet (Schulz 1999).

3.4 Eingangsdaten

Als Eingabedaten werden Tagesmittelwerte der Temperatur und Tagessummen des Niederschlags der hydrologischen Jahre 1980/81-2008/09 und zusätzlich die Tagessummen des Abflusses zur Kalibrierung verwendet. Diese werden in das HBV-Modell eingelesen. Ein Großteil der Daten lag bereits aus vorangegangen Arbeiten von Schulz (1999) und Ellenrieder (2002) vor. Da für das Modell ein kontinuierlicher und lückenloser Datensatz vorliegen muss, wurden die Lücken durch Schulz (1999) und Ellenrieder (2002) ergänzt. Als Referenzstationen dienten die Stationen Vent, Obergurgl und Marienberg. Die Ergänzungen wurden nach folgenden Schritten durchgeführt:

- Bestimmung der mittleren täglichen Eintrittswahrscheinlichkeit für Niederschlag an jeder Station in Abhängigkeit der Jahreszeit
- Bestimmung der Tage mit übereinstimmenden Eintritt eines Niederschlagsereignisses an der Zielstation und jeder Vergleichsstation
- Bestimmung der monatlichen Verhältnisse der Niederschlagsmengen an der Zielstation und jeder Vergleichsstation
- Bestimmung der aktuellen Monatssummen an der Zielstation im betreffenden Jahr

(Weber,1997)

In den Sommermonaten kommt es auf die Bestimmung der Einzelniederschlagsereignisse an, da der flüssige Niederschlag direkt in den Abfluss eingehen kann. Die Datenlücken werden über lineare Regressionsgleichung der Vergleichsstation und der Pegelstation Vernagtbach ergänzt.
In den Wintermonaten ist die Gesamtschneefallmenge wichtig, da der Schnee zuerst zwischengespeichert wird und zu einem späteren Zeitpunkt als Schmelzwasser in den Abfluss eingeht. Dafür werden die Tagessummen an der Vergleichsstation Vent mit einem Quotienten – berechnet aus den Monatsmittelsummen der Stationen Vent und der Klimastation Vernagtbach – multipliziert (Schulz 1999).

Außerdem müssen die Flächen-Höhen-Verteilungen und die Expositionsklassen mit den dazugehörigen prozentualen Anteilen der Vergletscherungsfläche in das Modell eingelesen werden. Für die Flächen-Höhen-Verteilung wird die heterogene Geländetopographie in 200 m breite Höhenbänder diskretisiert. Die Expositionsklassen werden in drei Klassen unterteilt: Ost-West-Horizontal werden zu einer Klasse zusammengefasst und auf Grund der Abweichung vom Mittel des Strahlungsangebots werden die Exposition nach Norden und Süden differenziert. Diese Eingaben dienen zur Berechnung der Schmelzwasserproduktion.

Tab.4: Höhen-Flächen-Verteilung des Einzugsgebiets Vernagtbach und die Anteile [%] der Expositionsklassen am Gesamtgebiet (nach Schulz,1999)

Höhenstufe [mm ü.NN]	**Ost-West-Horizontal**				**Nord**				**Süd**			
	ge-samt	vergletschert			ge-samt	vergletschert			ge-samt	vergletschert		
		1980 - 1989	1990 - 1999	2000 - 2008		1980 - 1989	1990 - 1999	2000 - 2008		1980 - 1989	1990 - 1999	2000 - 2008
2600- 2800	3.8	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	0.0	0.0
2800- 3000	8.9	6.3	6.3	2.0	1.4	1.2	1.2	1.0	5.8	4.4	4.4	2.0
3000- 3200	18.7	17.3			2.8	1.9			21.3	20.7		
3200-3400	14.4	10.7			2.2	1.3			13.5	11.1		
3400-3600	2.8	1.4			0.3	0.1			2.8	1.7		

3.5 Parameterbelegung

Die Kalibrierung des Modells erfolgt über die gemessenen Eingangsdaten und die inversen Modellierung der Abflussganglinie (Renner & Braun 1992, Bergström 1976). Bei der inversen Modellierung werden die Parameter anhand des Vergleiches des gemessenen und des berechneten Abflusses bestimmt. Es wird die Parameterkombination gesucht, bei der es die kleinste mögliche Abweichung zwischen diesen beiden Größen gibt. Zusätzlich werden die gemessenen Gletschermassenbilanzen mit einbezogen und mit den berechneten verglichen. Durch diesen Vergleich wird die Gefahr reduziert, dass Berechnungsfehler im Gebietsniederschlag durch falsche Eisschmelzbeträge kompensiert werden (Hagg, 2003).
In dieser Arbeit wird das Modell dazu verwendet den Gebietsniederschlag des Einzugsgebiet Vernagtbach zu berechnen. Dafür müssen die Terme der Wasserbilanz möglichst realistisch für jedes einzelne Haushaltsjahr berechnet werden. Damit dies möglich ist, müssen Zusatzinformationen wie z.B. die gemessenen Massenbilanzen des Gletschers zum Abgleich herangezogen werden. Es wurde versucht, sowohl die Abflussganglinie als auch die spezifischen Massenbilanzwerte möglichst genau zu simulieren.
Dazu wurde der Großteil der ermittelten Parameter von Schulz (1999) übernommen. Verändert wurden nur die Parameter, die den Gebietsniederschlag und die Schmelze beeinflussen. Mit den Parametern T_0, C_{min}, C_{max}, RCF und SCF wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt.
Der Schwellenwert T_0 wird sowohl zur Korrektur der Lufttemperatur als auch als Schwellentemperatur für den Übergang von Schneefall zu Regen herangezogen. Der optimierte Wert liegt bei -0.3. Dies bedeutet, dass die gemessenen Temperaturdaten um 0.3°C erniedrigt werden. Dadurch schneit es bereits bei einer höheren gemessenen Temperatur (>0°C). Es tritt jedoch weniger Schmelze auf. Dieser Parameter hat somit eine große Sensitivität und hat einen großen Einfluss sowohl auf den Abfluss als auch die Massenbilanz des Gletschers.
C_{min} und C_{max} beschreiben die auftretenden Schmelzraten [mm/d]. Die tägliche Schmelzrate wird mit der Temperaturindexmethode berechnet.

$$M = CMF(i) * (T - T_0) \quad [6]$$

mit	M	Schmelzrate [mm/d]
	C	Gradtagfaktor des i-ten Tages [mm/°C*d]
	T	Tagesmitteltemperatur [°C]
	T_0	Schwellentemperatur [°C]

Der Gradtagfaktor ändert sich jahreszeitlich mit dem Einstrahlungswinkel der kurzwelligen Strahlung. Diese saisonale Änderung wird im Modell durch eine Sinusfunktion berücksichtigt, die ihren Maximalwert am 21. Juni und ihren Minimalwert am 21. Dezember annimmt.

$$CMF(i) = \frac{C_{max} - C_{min}}{2} * \cos\left(\frac{2\,\pi}{MaxTag} * i\right) + C_{min} + \frac{C_{max} - C_{min}}{2} \quad [7]$$

C_{max}	Maximaler Gradtagfaktor [mm/(K*d)]
C_{min}	Minimaler Gradtagfaktor [mm/(K*d)]
MaxTag	Anzahl der Tage des Jahres minus 1
i	Tag (durchnummeriert von 0 bis MaxTag (i=0 am 21.Juni)

Für die Schmelze entscheidend ist das Residuum der Energiebilanz und kann nicht mit einem einheitlichen Koeffizienten berechnet werden. Der Jahresgang der kurzwelligen Strahlung kann entsprechend der Sonnenstandshöhe durch eine Sinusfunktion beschrieben werden. Die Amplitude der Funktion wird durch die Differenz von C_{min} und C_{max} beschrieben.

Diese Parameter sollten sich nur dann verändert werden, wenn sich die Verhältnisse im Einzugsgebiet prinzipiell ändern, wie z.B. die Gletscherfläche, der Abstand Pegelstation zum Gletscher oder die Niederschlagsmessanlage. Die Fläche des Gletschers und die Entfernung zwischen Gletscher und Klimastation verändern sich kontinuierlich. Innerhalb des Untersuchungszeitraumes 1980-2009 hat die Gletscherfläche von 84% auf 69% des Einzugsgebiets abgenommen. Diese Änderungen wurden dadurch berücksichtigt, dass C_{max} über kleinere Zeitschritte im Zeitintervall von ca. 5 Jahren, anstatt über die gesamten 29 Jahre optimiert wurde. Die Messreihen der Temperatur weisen keine offensichtliche Inhomogenität auf, die durch Veränderun-

gen in der Datenerfassung hervorgerufen werden können. Deshalb werden die Parameter C_{min} und T_0 über den gesamten Untersuchungszeitraum konstant gehalten.
Die Niederschlagsmessung weist große Unsicherheiten auf. Auf Grund der in Kapitel 2.4. aufgeführten Fehler bei der Niederschlagsmessung sind die Korrekturfaktoren RCF und SCF im Modell sehr wichtig. Für die Gletschermassenbilanz ist vor allem der Parameter SCF sensitiv, da durch eine höhere Schneeauflage auf dem Gletscher durch die hohe Schneealbedo die Schmelze verlangsamt und die Eisschmelze erst einsetzt nach dem der Gletscher schneefrei ist. Da die Parameter nicht für jedes Niederschlagsereignis konstant sind und die Korrekturanteile der Lücken in frühen Messreihen sich unterscheiden, ist es sinnvoll, diese von Jahr zu Jahr zu verändern. Der Korrekturfaktor für Schnee nimmt im Mittel einen Wert von 2.5 an, der von Jahr zu Jahr schwankt. Der Regenkorrekturfaktor RCF liegt im Mittel bei 1.5. Dieser nimmt in den 80er-Jahren einen höheren Wert an als in den Jahren danach. Dieser Trend ist auf die Verbesserung der Niederschlagsmessungen zurückzuführen. Im frühen Untersuchungszeitraum kam es in den Messungen immer wieder zu Ausfällen, was zu Datenlücken in den Zeitreihen führt

Die Optimierung der oben genannten Parameter wurde durch inverse Modellierung durchgeführt. In HBV3-ETH9 ist ein Optimierungsverfahren implementiert, bei dem die Wertekonstellation von jeweils zwei Parametern gegeneinander optimiert werden können. Die Parameter können derart gewählt werden, dass man in den Optimierungsprozess nicht nur den Abfluss, sondern auch die Werte der Massenbilanz mit einbeziehen kann. Dabei werden die Ergebnisse des Modells mit den gemessenen Werten verglichen und die Parameter so verändert, dass das Ergebnis bestmöglich an die Messungen angepasst wird. Dazu wurden die vorhanden Messdaten des Abflusses und die Werte der Massenbilanz zum Vergleich herangezogen. Zur Überprüfung der Simulationsgüte wird das R^2-Kriterium verwendet, welches von Nash und Sutcliff (1970) entwickelt wurde.
Innerhalb des Modells kann es zur Fehlerkompensation kommen. Ein zu gering modellierter Gebietsniederschlag, der eine frühe Ausaperung der Gletscherfläche zur Folge hat, wird unter Umständen durch eine verstärkte Gletscherschmelze kompensiert, so dass die Simulationsgüte trotzdem vom Modell selbst als hoch eingeschätzt wird und eine hohe Genauigkeit vorgetäuscht wird. Deshalb ist es wichtig, nicht nur die Abflussganglinie, sondern auch weitere Kriterien wie die Massenbilanz in der Ergebnisbetrachtung zu berücksichtigen.

Tab.5 ist die Parameterbelegung für den Untersuchungszeitraum 1980-2009 zu entnehmen.

Tab.5: Verwendete Parameterbelegung (übernommen von Schulz (1999))

Parameter	Werte
P_{GRAD}	0.0
T_{GRAD}	0.65
T_0	-0.3
C_{MIN}	0.0
R_{MULT}	1.4
R_{EXP}	1.7
CWH	0.02
CRFR	0.5
ET_{MAX}	2.0
LP	150
FC	160
BETA	0.16
L_{UZ}	25
k_0	0.1
k_1	0.06
C_{PERC}	0.6
k_2	0.02

Die optimierten Werte für die Parameter C_{max}, RCF und SCF sind in Tab.6 zu finden.

Tab.6: Parameterbelegung, der jährlich veränderten Parameter RCF und SCF, sowie für C_{max}

hydr. Jahr	C_{max}	RCF	SCF		hydr. Jahr	C_{max}	RCF	SCF
1980/81	3.7	1	2.5		1995/96	4.2	1.5	2.5
1981/82	3.7	1.3	2.5		1996/97	4.2	1.4	2.1
1982/83	3.7	2.4	2.5		1997/98	4.2	1	2.9
1983/84	3.7	2	1.7		1998/99	4.2	1.2	2.9
1984/85	3.7	2	2.8		1999/00	4.2	1	2.9
1985/86	4.9	1.7	2.5		2000/01	4.2	1.9	2
1986/87	4.9	1	2.6		2001/02	4.2	1.4	2.5
1987/88	4.9	2.2	2.5		2002/03	5.3	1.5	2.7
1988/89	4.9	2.2	2.2		2003/04	5.3	1.5	2.7
1989/90	4.9	1.9	2.8		2004/05	5.3	1	2.5
1990/91	4.2	1.8	2.8		2005/06	5.3	1.2	2.7
1991/92	4.2	1.5	2.2		2006/07	5.3	1.2	2.7
1992/93	4.2	1.3	2.3		2007/08	5.3	1.2	2.7
1993/94	4.2	1.4	2.1		2008/09	5.3	1.5	2.3
1994/95	4.2	1.5	2.2					

Zur Berechnung der Gebietsniederschläge wurden die Korrekturfaktoren für Regen und Schnee von Jahr zu Jahr variiert. Für SCF ist kein Trend zu erkennen. Der Wert schwankt im gesamten Untersuchungszeitraum zwischen Werten von 2,0 und 2,9. Für RCF gibt es die Tendenz, dass der Wert sich im Laufe des Untersuchungszeitraumes kleinere Werte annimmt und sich zwischen 1,0 und 1,5 einpendelt.

3.6 Modellergebnisse

3.6.1 Modellierte Abflüsse

Da die Kalibrierung des Modells über den Abfluss erfolgt, ist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen berechnetem und gemessenem Abfluss zu erwarten. Die Streuung ist sehr gering und man erhält ein sehr hohes Bestimmtheitsmaß von 0.971.

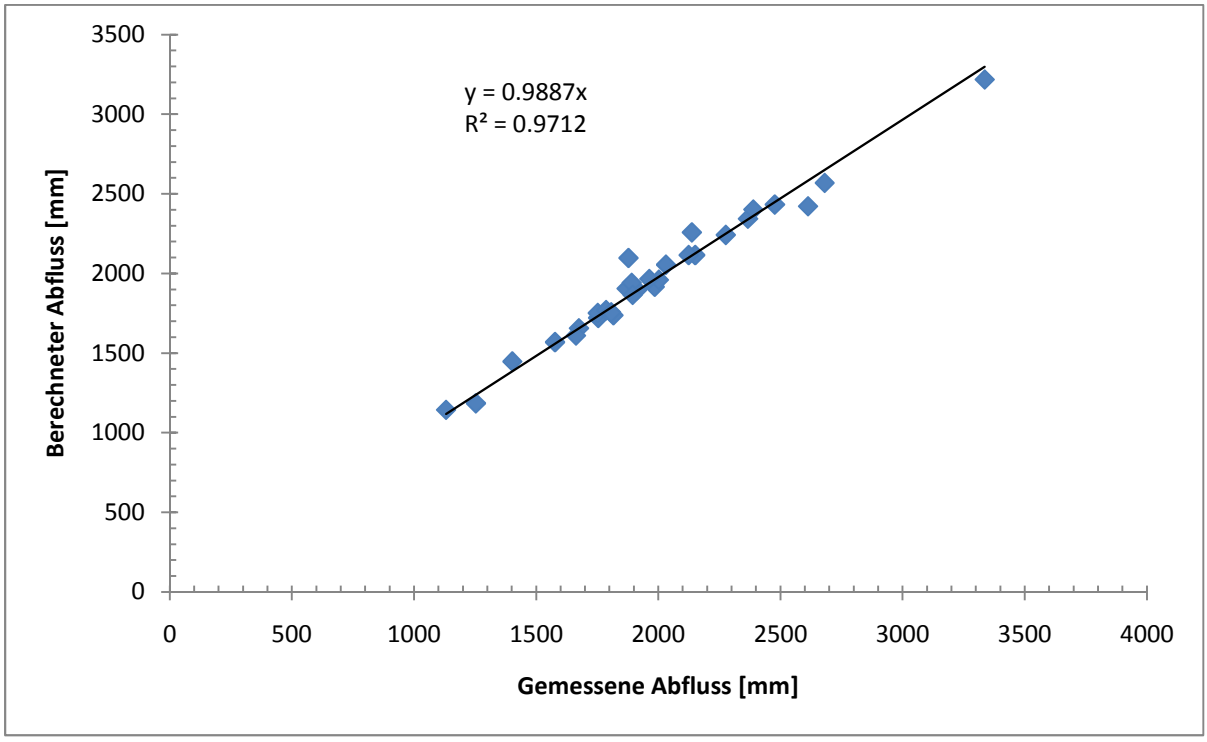


Abb.7: Streudiagramm der berechneten und gemessenen Abflusswerte für die hydrologischen Jahre 1980/81-2008/09.

In Tab. 7 sind die Werte des Nash-Sutcliff-Koeffizienten R^2 und Werte für die akkumulierte Differenzen zwischen berechneten und gemessenen Abflusswerten über den gesamten Untersuchungszeitraum aufgeführt. Auch diese Werte zeigen die hohe Übereinstimmung zwischen dem berechneten und modellierten Abfluss.

Der Nash-Sutcliff-Koeffizient beurteilt die Übereinstimmung des Abflusshydrographen auf Basis von Tagesschritten mit den Abflussmessungen. Dieser liegt im Mittel bei 0.889. Außer im Haushaltsjahr 1993/94, in dem keine gemessenen Abflussdaten zum Vergleich vorliegen, liegt R^2 über 0.8. Somit wird durch das Modell ca. 80% der Varianz im Abfluss erklärt-
Auch die akkumulierten Differenzen sind gering und liegen im schlechtesten Fall bei knapp 12% des gemessenen Wertes.

Tab.7: Nash-Sutcliff- Koeffizient, sowie die akkumulierten Differenzen in mm und prozentual zum gemessenen Abfluss

R^2_{mittel}	R^2_{min}	R^2_{max}	$Q_{diff(mittel)}$		$IQ_{diff}I_{min}$		$IQ_{diff}I_{max}$	
			[mm]	[%]	[mm]	[%]	[mm]	[%]
0.889	0,829 (0,64)	0,96	18	2.6	1	0.06	219	11.88

Vergleicht man die Ganglinien des berechneten und gemessenen Abflusses findet man auch darin eine gute Übereinstimmung.

3.6.2 Modellierte Massenbilanzen

Die spezifischen Massenbilanzen, die vom HBV3-ETH9-Modell berechnet werden beziehen sich auf das gesamte Einzugsgebiet. Während der Modellierung wurde darauf geachtet, dass die Massenbilanzen im Vergleich zu den gemessenen bestmöglich berechnet sind. Daher liegt auch hier eine hohe Übereinstimmung vor.

Vergleicht man die berechneten Gletscherbilanzen mit den langjährigen Erhebungen der KfG muss darauf geachtet werden, dass die gemessenen Daten sich nur auf die Gletscherfläche beziehen. In der hydrologischen Bilanz muss die Gletscherspende G durch eine negative Massenbilanz MB jedoch auf das durch den Pegel definierte Einzugsgebiet bezogen werden.

$$G = MB * f \qquad [8]$$

Der Faktor f berechnet sich aus der Fläche des Einzugsgebiets (11.41 km^2) und der aktuellen jährlichen Gletscherfläche. Er ändert sich über den Untersuchungszeitraum von 0.84 im Jahr 1980 auf 0.68 im Jahr 2009 auf Grund der Abnahme der Gletscherfläche.

Die akkumulierten Differenzen bei den spezifischen Massenbilanzen des Einzugsgebiets liegen im Bereich von 0 – 341 mm. Sie schwanken von Jahr zu Jahr und es werden sowohl zu geringe als auch zu hohe Massenbilanzwerte berechnet. Es zeigt sich jedoch die Tendenz in Richtung zu negativ berechneter Massenbilanzen. Dieser Trend tritt vor allem ab dem Jahr 2003 auf. Es kommt zu systematischen Abweichungen der berechneten und gemessenen Massenbilanzen von über 100mm in den Haushalten 2002-2009 mit Ausnahme des hydrologischen Jahres 2003/04. Ab dem Haushaltsjahr 2002/03 wurde das Auswerteverfahren der Pegelablesungen, d.h. das Übertragen der Punktmessungen auf die Fläche, verändert. Ein mehr empirisches Verfahren wurde von einem mathematisch objektiverem Verfahren abgelöst. Auch kam es durch die hohen Abschmelzungen im Sommer 2003 zu hohen Verlusten des Eismasse, die das Regime des Vernagtferners stark verändert haben. Ob diese jedoch die Folgen für die systematischen Abweichungen sind, müsste weiter untersucht werden.

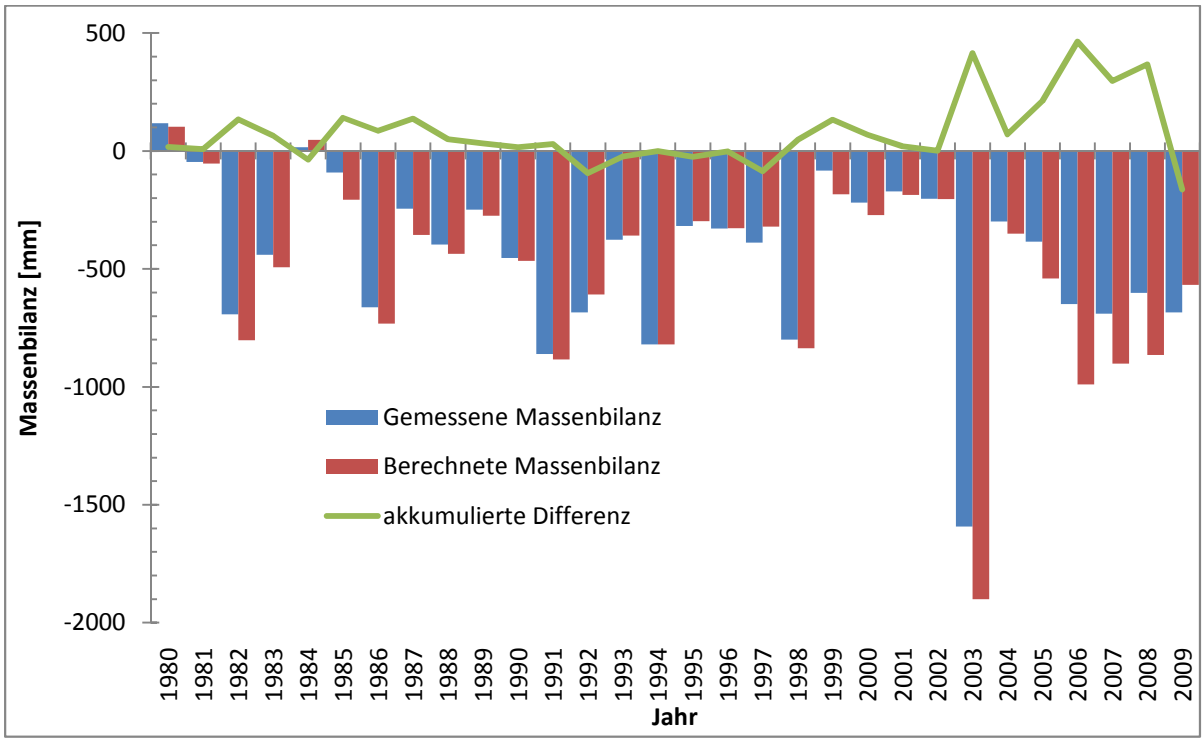


Abb.8: Gegenüberstellung der berechneten und gemessenen Gletschermassenbilanz bezogen auf das Einzugsgebiet und der akkumulierten Differenz.

Auch das Streuungsdiagramm in Abb.9 zeigt sehr zufriedenstellende Ergebnisse für den Vergleich der gemessenen und berechneten Massenbilanzen bezogen auf das Einzugsgebiet.

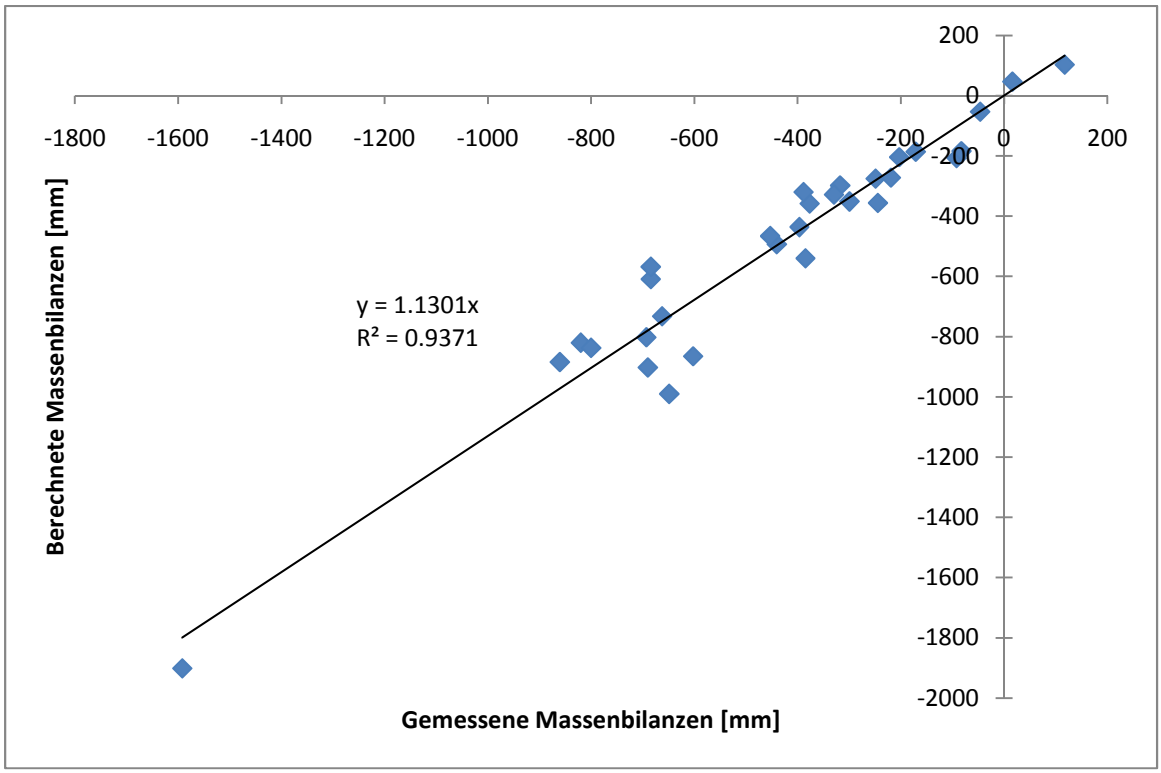


Abb.9: Streudiagramm der gemessenen und berechneten Massenbilanzen der hydrologischen Jahre 1980-2009.

3.6.3 Modellierte Gebietsniederschläge

Für den Gebietsniederschlag wird als Mittel über den Untersuchungszeitraum und das Einzugsgebiet ein Wert von 1696 mm berechnet. Die Gebietsniederschlagssummen schwanken von Jahr zu Jahr. Der maximale Wert des Gebietsniederschlags liegt bei 2124 mm im hydrologischen Jahr 1998/99. Auffällig dabei ist, dass zwar der der Schneeanteil auch einen maximalen Wert annimmt, der Regen jedoch einen sehr kleinen Wert annimmt. Das Jahr mit dem geringsten Gebietsniederschlags ist mit 1404 mm 1983/84.

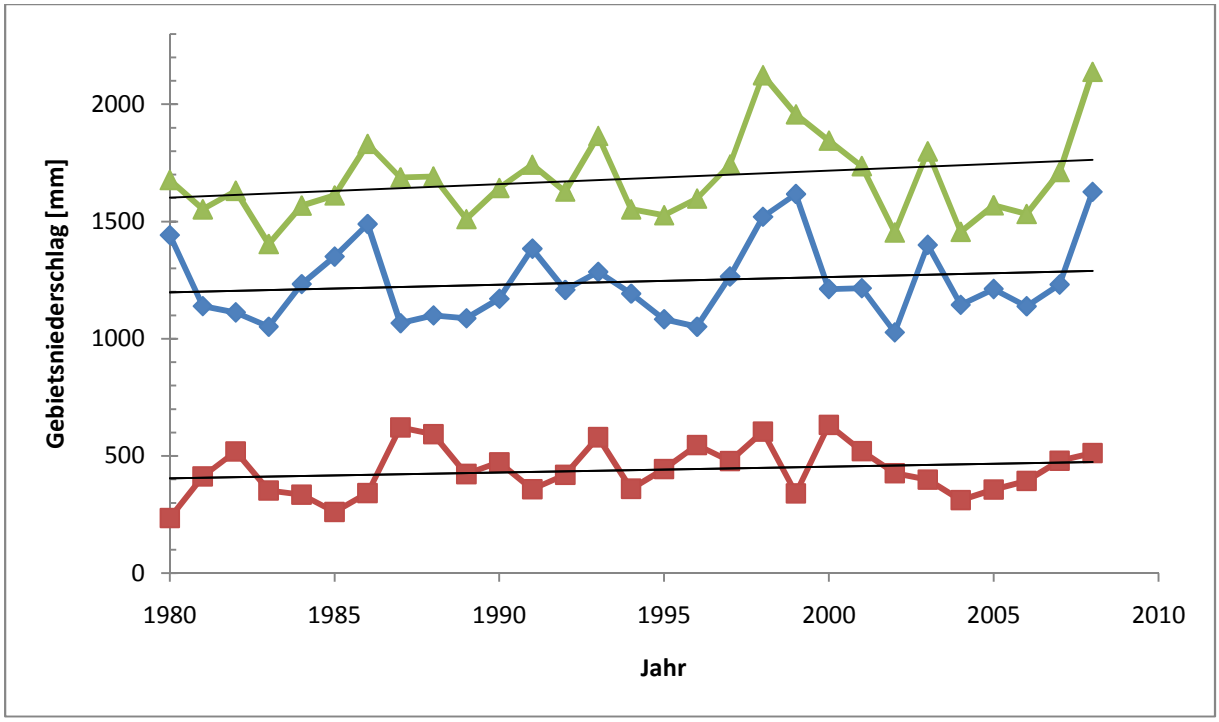


Abb.10: Zeitlicher Verlauf des Gebietsniederschlags, unterteilt in Regen (rot), Schnee (blau) und Gesamtniederschlagsmenge (grün).

Auch die Summen des festen und flüssigen Niederschlags ändern sich jährlich und es ist keine Ähnlichkeit im Verlauf zu erkennen. Die mittleren Anteile liegen für den festen Niederschlag bei 74% und dementsprechend der des flüssigen Niederschlags bei 26%. Die Anteile variieren jährlich stark und liegen für Schnee zwischen 61% (1996/97) und 86% (61%). Insgesamt ist zwar eine leichte Steigerung des Gesamtgebietsniederschlags zu erkennen. Jedoch gibt es weder für den flüssigen noch den festen Niederschlagsanteil einen signifikanten Trend.

In Tab.8 sind die jährlichen Gebietsniederschlagssumme, sowie der Anteil und die Summen des festen sowie flüssigen Niederschlags.

Tab. 8: Berechnete Gebietsniederschläge, unterteilt in festen und flüssigen Anteil

hydrologisches Jahr	Fester Niederschlag		Flüssiger Niederschlag		Gesamtgebietsniederschlag [mm]
	[mm]	[%]	[mm]	[%]	
1980/81	1442	86	235	14	1677
1981/82	1139	73	413	27	1552
1982/83	1112	68	519	32	1631
1983/84	1051	75	353	25	1404
1984/85	1233	79	335	21	1568
1985/86	1350	84	261	16	1611
1986/87	1489	81	342	19	1831
1987/88	1066	63	622	37	1688
1988/89	1099	65	593	35	1692
1989/90	1087	72	423	28	1510
1990/91	1170	71	473	29	1643
1991/92	1384	79	358	21	1742
1992/93	1208	74	420	26	1628
1993/94	1285	69	580	31	1865
1994/95	1192	77	360	23	1552
1995/96	1083	71	444	29	1527
1996/97	1051	66	547	34	1598
1997/98	1265	73	478	27	1743
1998/99	1520	72	604	28	2124
1999/00	1617	83	340	17	1957
2000/01	1212	66	633	34	1845
2001/02	1215	70	521	30	1736
2002/03	1027	72	426	28	1453
2003/04	1400	78	399	22	1799
2004/05	1144	79	312	21	1456
2005/06	1212	79	357	21	1569
2006/07	1138	74	394	26	1532
2007/08	1231	74	480	26	1711
2008/09	1626	78	512	22	2138
Mittelwert	1247 ± 176	74 ± 6	445 ± 109	26± 6	1692 ± 183

3.6.4 Hydrologische Bilanz

Außer den genannten Termen Abfluss, Massenbilanz und Gebietsniederschlag liefert das Modell auch die übrigen Terme der hydrologischen Wasserbilanz. Es werden die Verdunstung, das spezifische Wasseräquivalent der Schneedecke, der Bodenfeuchte und des Grundwassersspeicher am Ende des hydrologischen Jahres berechnet (Tab.9)

Tab.9: Mittlere Jahreswerte der modellierten Wasserhaushaltskomponenten in mm w.e. im Untersuchungszeitraum 1980-2009

Abfluss	Niederschlag		Verdunstung	Speicheränderung		
R	P_{fest}	$P_{flüssig}$	ET	$B_{Gletscher}$	B_{Schnee}	$B_{Boden+GW}$
1996	1247	445	174	-524	46	-4

Der Wert für die Verdunstung liegt in einem plausiblen Bereich. Jedoch können die jährlichen Werte der Verdunstung und die Änderung des Schneespeichers und Bodenspeichers nur schwer beurteilt werden, da Vergleichswerte fehlen. Der Verlauf dieser Terme könnte jedoch einen anderen Verlauf annehmen. Um diesen bestimmen zu können, müssten jedoch weitere Einflussgrößen wie Luftfeuchte oder Strahlung bekannt sein (Braun et al. 2007).

Der positive Term der Schneespeicheränderung B_{Schnee} rührt daher, dass die Schneedecke der obersten Höhenstufe im Modell nicht komplett abschmilzt. Damit dieser Schnee schmilzt müsste er z.B. durch Wind in eine tiefere Höhenstufe verlagert werden. Das im Modell verwendete Temperatur-Index-Ansatz ist somit in diesem Falle mangelhaft und müsste überarbeitet werden (schriftl.Mittlg L.Braun, 2011)

4. Das Projekt HistAlp zum Vergleich mit den berechneten Gebietsniederschlägen

4.1 Das Projekt HistAlp

Das HistAlp-Projekt (=„Historical instrumental climatological surface time series of the greater alpine region“) hat eine Klimadatenbasis in monatlicher Auflösung für den Großraum der Alpen geschaffen. Dabei wurden Klimadaten von 242 Messstationen des Alpenraumes zusammengetragen und in einer Datenbank zusammengefasst. Diese Messstationen liefern Daten der Klimavariablen Temperatur, Niederschlag, Druck, Sonnenscheindauer und Bewölkung. Allerdings werden nicht alle Parameter an den einzelnen Klimastationen gemessen. Die für diese Arbeit relevante Klimavariable ist der Niederschlag, der an 192 Stationen aufgezeichnet wurde, teilweise bis ins Jahr 1800 zurück (Auer et al. 2005).

Geographisch umfasst das Projekt die „Greater Alpine Region“ (GAR). Diese umfasst eine Fläche von ca. 724000 km^2 und beinhaltet die Länder Österreich, Deutschland, Schweiz, Italien, Frankreich, Tschechien, Slowenien, Lichtenstein und Bosnien und Herzegowina. Beschreibt man das Gebiet in Längen- und Breitengraden, umfasst es die Fläche zwischen 4°- 19° Ost und 43°- 49° Nord. Die vertikale Verteilung deckt den Höhenbereich 0- 3500 m NN ab (Auer et al. 2007). Aufgrund von Problemen bei Schneemessungen und der Unsicherheiten der Messwerte durch Windverwehungen werden die Gipfelstationen für die Niederschlagsmessung nicht in die Datenbasis mit einbezogen. Die höchsten Stationen, die in die Niederschlagsdatenbank eingehen, befinden sich zwischen 1600 m NN und 1900 m NN in den hochalpinen Tälern (Auer et al. 2005).

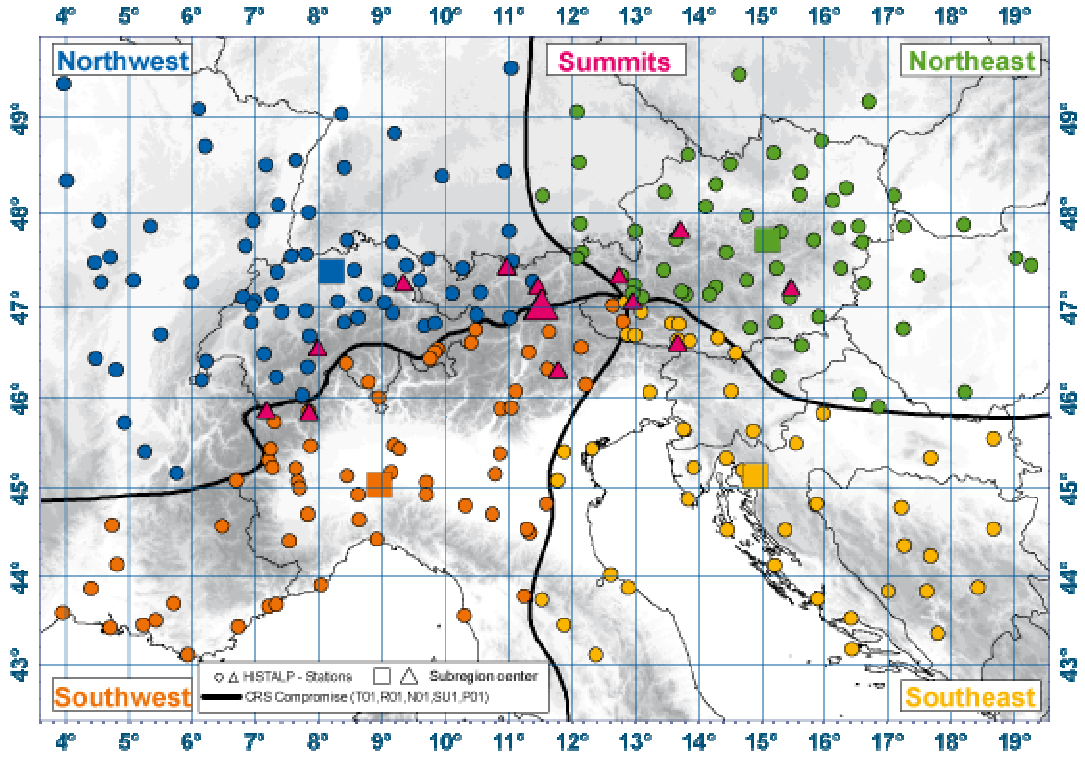


Abb.11: Messstationen der HistAlp- Datenbank.

Bei den Datenbanken handelt es sich um sehr lange Zeitreihen. Dadurch kommt es zu zahlreichen Problemen durch fehlende Konstanz der Beobachtungsbedingungen, der Beobachtungsorte und Messgeräte und durch den Wechsel der Beobachtungspersonen. Deshalb geben die Rohaten nicht die wahre Variabilität des Klimas wieder und eine Homogenisierung ist notwendig (Aquilar et al. 2003). Desweiteren werden die Daten von mehr als 30 Behörden aus den verschiedenen Ländern verwaltet. Somit kommt es zu weiteren Unterschieden.

Innerhalb aller verwendeten Datenreihen wurden ca. 2500 Inhomogenitäten und 5000 Ausreißer festgestellt (Auer et al. 2007).

Im Rahmen der Qualitätsüberprüfung werden die Daten homogenisiert. Dazu werden die Datenreihen mit den Daten der Nachbarstationen verglichen. Bei sehr alten Datenreihen werden zusätzlich Metadaten in die Homogenisierung mit einbezogen. So werden Rückschlüsse auf die zum Zeitpunkt der Messung herrschenden Verhältnisse gezogen.

Im nächsten Schritt werden die Aufzeichnungslücken geschlossen. Dazu wird die Nachbarstation mit lückenlosen Datenreihen und mit dem höchsten Korrelationskoeffizient herangezogen. Die Entscheidung, welche Lücke ergänzt werden soll, wurde

sehr individuell und flexibel getroffen. Sie war abhängig von der Wichtigkeit der jeweiligen Station und hing in erster Linie von der Länge der Lücke ab (Auer et al. 2007).

Der vollständige Datensatz ist in verschiedenen Modi im Internet frei zugänglich.
Der **Station-Mode** beinhaltet „stmod-ori" mit den Originaldaten der einzelnen Stationen, sowie „stmod-hom", in dem die Daten aufgeführt sind, die eine Homogenisierung durchlaufen haben.
Die in dieser Arbeit verwendeten Modi sind der **GRID-Mode** und die **CRSM-Data.**
„Grid1"- Mode beinhaltet monatliche Anomaliewerte von Temperatur, Luftdruck und Niederschlag. Dieser Modus wird durch die Projektion der Stationsdaten auf ein geographisch regelmäßiges Gitters erzeugt. Die räumliche Auflösung ist 1° x 1° (geographische Länge/ Breite) und bei der Zeit beträgt sie einen Monat. Durch die Interpolation auf die räumliche Auflösung werden zusätzlich unerkannte Inhomogenitäten und Ausreißer reduziert. Dazu wurde die Gauß'sche Inverse Distanzwichtung angewandt. Dabei wird angenommen, dass die Werte von nahe beieinanderliegenden Stationen höher korrelieren als bei weit entfernten. Für den Niederschlag gibt es nur eine ‚low-level' Datenreihe, da die Daten der windexponierten Gipfelstationen bereits für den station-mode entfernt wurden.
In einem weiteren Datensatz, der ***„CRSM"***-Data (=coarse resolution subregibnal means) wird die GAR in vier klimatische Subregionen (NO, SO, SW, NW) unterteilt. Die Datenreihen werden durch die arithmetischen Mittel der Anomalien der einzelnen Stationen in der jeweiligen Region gebildet (Auer et al. 2007).

4.2 Vergleich des berechneten Gebietsniederschlags mit den HistAlp-Datenreihen

Die mit dem HBV3-ETH9 berechneten jährlichen Gebietsniederschlagssummen werden mit den Niederschlagsdaten der HistAlp-Klimadatenreihen verglichen. Der Referenzwert des mittleren Gebietsniederschlags im Einzugsgebiet Vernagtbach wird mit den HistAlp Niederschlagsanomalien für das jeweilige hydrologische Jahr multipliziert. Für den Vergleich werden sowohl die Anomaliewerte des CRSM Modus als auch des GRID1 Modus benutzt. Auf Grund der geographischen Lage des Vernagtferners (10'46 E; 46'52 N) wird das Gebiet der CRSM-Region Nord- West zugeord-

net. Für den Vergleich mit dem Grid1-Mode wird der Mittelwert der Anomalien der beiden nächstgelegenen Gitterpunkte (10'47,11'47) verwendet.
Die absolute Größe des Mittelwerts für den Gebietsniederschlag im Einzugsgebiet ist nicht bekannt, da keine Messreihe für den Zeitraum 1960-1990 an der Klimastation Vernagtbach vorhanden ist. Als Referenzwert wird eine mittlere Gebietsniederschlagssumme vom 1590 mm im Haushaltsjahr angenommen.
Die Vergleiche werden bis zum Jahr 2006 durchgeführt, da die HistAlpdaten nur bis zu diesem Jahr vorliegen.

Bei der Analyse handelt es sich um keinen direkten Vergleich, sondern um die relative Änderung auf Jahresbasis. Berücksichtigt werden muss dabei, dass die Hist-Alp-Datenreihen nicht für den Gebrauch für Hochgebirgsstationen gedacht sind. Die Anwendung ist jedoch möglich, da die Höhenabhängigkeit durch den angenommenen Mittelwert in den Vergleich eingeht. Auch betrifft die Höhenabhängigkeit nur das Flächenmittel der Abweichung vom lokalen Messwert an der Klimastation Vernagtbach P' (Gl. 1). Da dieser Wert auch durch das HBV3-ETH9-Modell nur relativ unsicher bestimmt werden kann, ist dieser Vergleich möglich.
Auch sind die örtlichen Besonderheiten des Niederschlags am Vernagtferner in der HistAlp-Datenreihe nicht berücksichtigt, da Messungen der Klimastation Vernagtbach nicht in die Datenbank eingegangen sind.

Vergleich des zeitlichen Verlaufs

Beim Vergleich der Zeitreihen des im HBV3-ETH9 berechneten Gebietsniederschlags und den HistAlpkurven stellt man eine relativ gute Übereinstimmung fest. Dies gilt sowohl für den Vergleich mit der regionalen HistAlpreihe als auch der Niederschlagsreihe des Grid1-Modes. Die berechneten Niederschlagssummen haben zwar nicht genau denselben Verlauf wie die der homogenisierten HistAlp Reihen, jedoch muss bei der Betrachtung des Ergebnisses die erwähnte nicht gewollte Anwendung auf Hochgebirgsstationen, sowie die Kleinräumigkeit der Niederschlagsfelder in alpinen Regionen berücksichtigt werden.

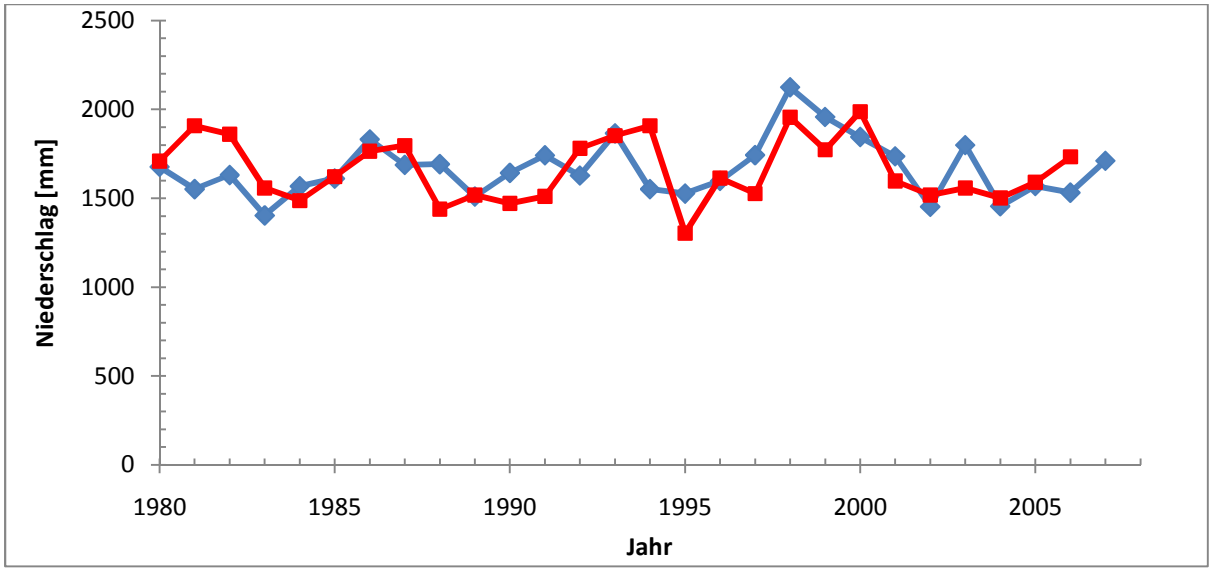


Abb.12: Vergleich des zeitlichen Verlaufs des Gebietsniederschlags berechnet mit dem HBV-Modell (blau) und aus den Anomaliewerten des CRSM- Mode (rot).

Beim Vergleich der berechneten Gebietsniederschläge mit den aus den Anomaliewerten berechneten Gebietsniederschlägen des CRSM Modus wird eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen den beiden Kurven deutlich (Abb.12). Auch wenn diese nicht immer denselben Verlauf haben, sind die grundsätzlichen Änderungen zu erkennen. In den ersten Jahren des Untersuchungszeitraums ist eine Abnahme des Gebietsniederschlags zu sehen. Nach einem zeitversetzen Minimumwert im Jahr 1983/84 (HBV) bzw. 1984/85 (CRSM) werden auch die kurzfristigen Peaks der Jahre der Jahre 1986/87 und 1993/94 der HBV-Niederschläge erst ein Jahr später für die CRSM-Werte errechnet. Der Maximalwert innerhalb des gesamten Untersuchungszeitraums ist für die Anomaliewerte eher verschwommen und nicht so deutlich wie für die modellierten Werte zu erkennen.

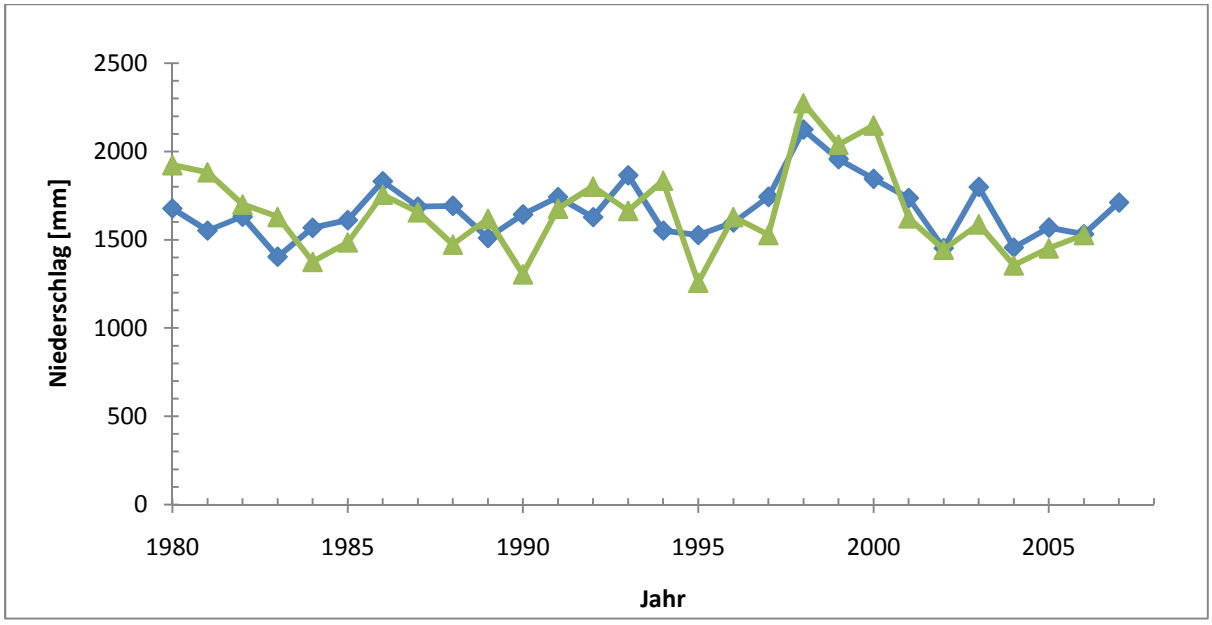


Abb.13: Vergleich des zeitlichen Verlaufs des Gebietsniederschlags berechnet mit dem HBV-Modell (blau) und aus den Anomaliewerten des GRID1- Mode (grün).

Beim Vergleich mit den Anomaliewerten aus dem GRID 1 Modus erkennt man einen sehr ähnlichen Verlauf der beiden Kurven (Abb.13). Auch kann man eine höhere Übereinstimmung als im Vergleich mit dem CRSM Modus feststellen. Von 1980-1984 ist eine Abnahme des Gebietsniederschlags zu erkennen. Danach schwanken die Werte beider Reihen bis sie im selben Haushaltsjahr 1998/99 einen Peak erreichen. Zwischen 1984 und 1998 kommt es zwar zu gegenläufigen Verläufen zwischen den berechneten Gebietsniederschlägen und den HistAlp Datenreihen, jedoch liegen diese im Rahmen und können durch die Kleinräumigkeit der Niederschlagsfelder im Hochgebirge erklärt werden. Nach dem Peak nimmt der Gebietsniederschlag wieder ab, mit Ausnahme des Jahres 2003/04, welches ein niederschlagreicheres Jahr war.

Insgesamt finden sich bei der Analyse des Verlaufs der drei Kurven keine signifikanten Abweichungen oder Ausreiser. Auch im Zeitraum in denen in vorangegangen Arbeiten Datenlücken ergänzt wurden, gibt es keine großen Auffälligkeiten.

Überprüfung der Homogenität zwischen Histalp und berechneten Gebietsniederschlägen

Um die Homogenität der berechneten Gebietsniederschläge zu prüfen, wird eine Doppelsummenanalyse nach Hansel und Schäfer (1970) durchgeführt. Dabei werden die fortlaufenden Werte der Zieldaten gegen die aufsummierten Referenzdaten aufgetragen. Bei einer ausreichenden Korrelation der beiden Reihen lässt sich die Doppelsummenkurve als Gerade darstellen. Diese wird mit der 1:1 Geraden verglichen. Ist eine Abweichung von dieser erkennbar, ist innerhalb der Messreihe eine Inhomogenität vorhanden.

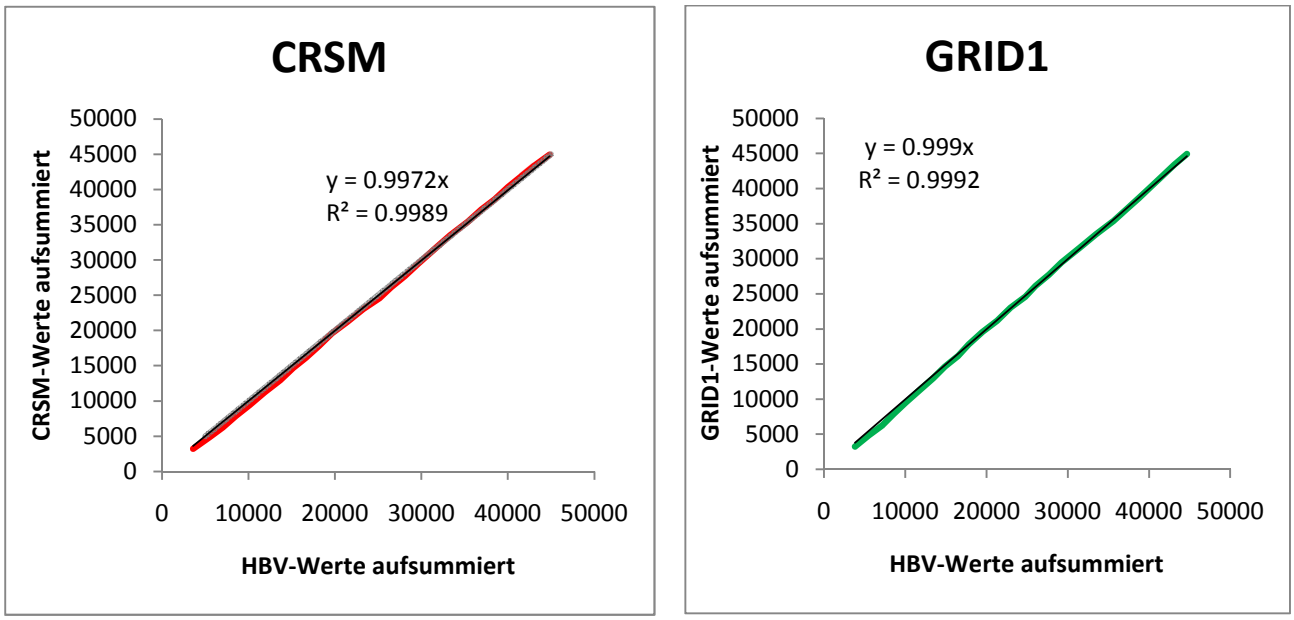


Abb.14: Doppelsummenanalyse der berechneten Gebietsniederschläge mit den CRSM-Werten (links) und den GRID1-Werten (rechts)

Trägt man die Summen der mit dem HBV-Modell berechnete Gebietsniederschläge gegen die Summen der homogenisierte HistAlp-Datenreihe auf, bekommt eine nahezu perfekte Übereinstimmung zum Idealfall der 1:1 Geraden. Sowohl beim Vergleich mit den CRSM als auch den Gitterpunktdaten, liegt die Steigung der Gerade bei 0.99. Dies zeigt, dass die berechnete Gebietsniederschlagsreihe homogen ist.

Regressionsanalyse

Um die gute Übereinstimmung des zeitlichen Verlaufs zu quantifizieren und um einen Zusammenhang zwischen den beiden zu vergleichenden Größen herzustellen, wird eine Regressionsanalyse durchgeführt. Dazu werden auf der Abszisse die mit dem HBV-Modell berechneten Gebietsniederschläge dargestellt. Diesen werden auf der Ordinate die aus den Anomaliewerten der HistAlp-Datenbank berechneten Gebietsniederschlagssummen gegenübergestellt. Die Daten werden linear zu einander in Beziehung gesetzt und eine Regressionsgerade der Gleichung y=ax+b angepasst. Da angenommen wird, dass beide Datenreihen richtig sind, muss die Regression durch den Schnittpunkt (0,0) erzwungen werden.

Im Idealfall sollten gelten:

HBV-Niederschlagswerte: HistAlp-Niederschlagswerte = 1:1

Somit sollte die Steigung a den Wert 1 annehmen.

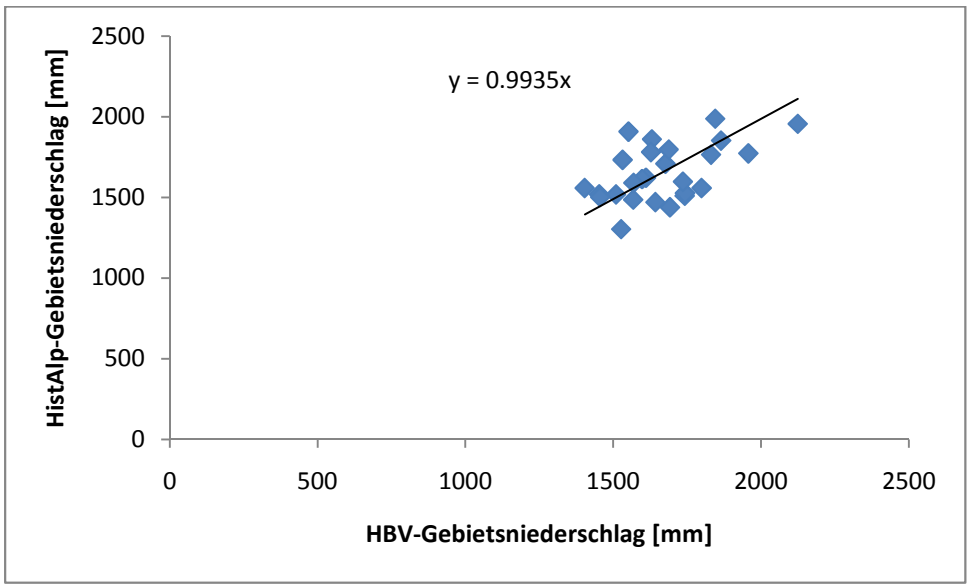


Abb.15: Streudiagramm der mit dem HBV3-ETH9 berechneten und den aus den HistAlpanomaliewerten des regionalen Gitters (CRSM) berechneten Gebietsniederschlagssummen.

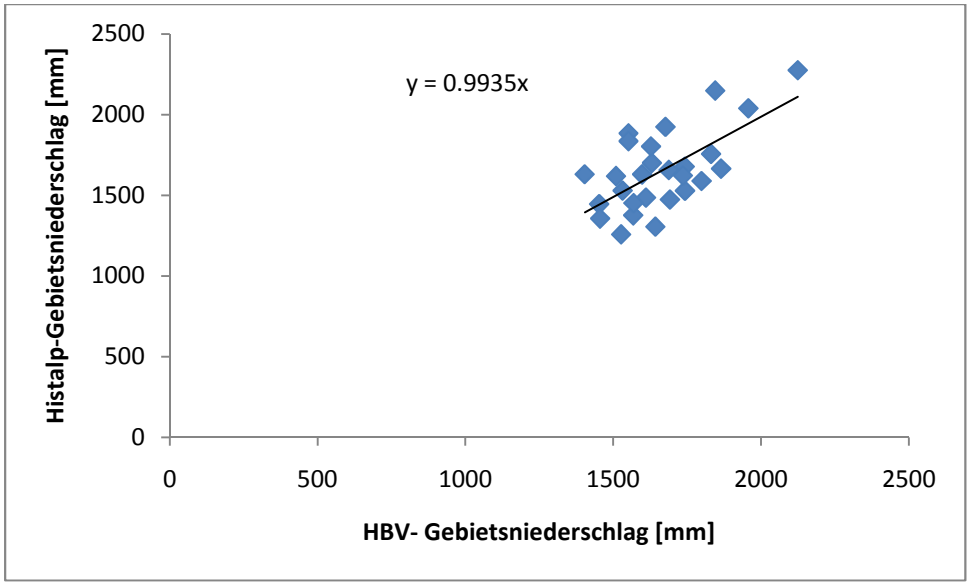


Abb.16: Streudiagramm der mit dem HBV3-ETH9 berechneten und den aus den HistAlpanomaliewerten des regionalen Gitters (GRID1) berechneten Gebietsniederschlagssummen.

Sowohl in der Regression mit GRID1-Mode als auch CRSM Mode beträgt die Steigung a= 0.9935. Da diese nahezu dem Idealfall entspricht, zeigt diese Analyse wiederum eine sehr gute Übereinstimmung der HistAlp und modellierten Gebietsniederschlagswerte. Bei einer perfekten Übereinstimmung sollten alle Werte auf der 1:1 Ursprungsgeraden liegen. Diese ist jedoch nicht der Fall und es kommt zu Abweichungen von dieser. Diese liegen jedoch in einem vertretbaren Bereich, da nicht davon ausgegangen wird, das die beiden Datenreihen perfekt Übereinstimmen müssen, wegen der zuvor genannten Gründe der fehlenden Hochgebirgsstationen in den HistAlp- Reihen, der Kleinräumigkeit des Niederschlags und des fehlenden exakten Referenzwertes.

Vergleich der Mittelwerte

Im Vergleich der Mittelwerte der Gebietsniederschläge berechnet mit dem HBV, des Grid1-Modus und der CRSM miteinander, sieht man dass die Werte sehr nahe beieinander liegen. Diese liegen in einen Bereich von nur 38 mm. Jedoch sind die Wertebereiche, in denen die jährlichen Gebietsniederschlagsummen liegen, unterschiedlich. Sie variieren bei den HBV- Werte in einem Wertebereich von 720 mm, bei GRID1 in einem von 972 mm und bei CRSM in 754 mm.

Auffallend ist auch das in allen drei Niederschlagsreihen der Höchstwert im hydrologischen Jahr 1998/99, der minimale Gebietsniederschlagswert jedoch nicht einheitlich im selben Jahr erreicht wird

Tab.10: Mittelwerte der Gebietsniederschläge der verschiedenen Datenreihen, sowie deren Minimal- und Maximalwerte

HBV3-ETH9			**GRID 1**			**CRSM**		
$\bar{P}$	P_{min}	P_{max}	$\bar{P}$	P_{min}	P_{max}	$\bar{P}$	P_{min}	P_{max}
1692 ± 166	1404	2124	1654 ± 248	1275	2247	1659 ± 182	1304	1958

4.3 Zusammenfassung der Ergebnisse des Vergleichs mit HistAlp

Betrachtet man das Gesamtergebnis des Vergleichs der mit dem Niederschlags-Abfluss- Modell HBV3-ETH9 berechneten Gebietsniederschläge und mit den aus den Anomaliewerten der zwei verschiedenen HistAlp- Datenreihen- Modi GRID1 und CRSM, erhält man ein sehr zufriedenstellendes Ergebnis. Bei der Bewertung der Vergleichsanalyse muss berücksichtigt werden, dass in die HistAlp-Datenreihe keine Hochgebirgsstationen eingegangen sind, und somit die Besonderheiten von hochalpinen Niederschlagsfeldern außer Acht gelassen wurden. Trotzdem sind die Ergebnisse dieses Vergleichs sehr aussagekräftigt, da es sich um homogenisierte Reihen handelt und sie als Richtlinie für den zeitlichen Verlauf des Klimaparameters dienen kann. Sie dient somit zur Unterstützung der Überprüfung der mit dem HBV-Modell berechneten Gebietsniederschläge.

Der zeitliche Verlauf der drei Vergleichsreihen ist in Ordnung und weist eine gute Übereinstimmung auf. In allen Reihen wird der Maximalwert des Niederschlags im selben Jahr erreicht. Auch der restliche Verlauf ist vergleichbar, trotz der teilweise gegenläufigen Verlaufsphasen. Innerhalb des Untersuchungszeitraums kommt es zu keinen signifikanten Abweichungen zwischen den Vergleichsdatenreihen.

Sehr interessant ist das Ergebnis der Doppelsummenkurve. Diese zeigt die Homogenität der berechneten Gebietsniederschläge aus der Modellierung mit dem HBV3-ETH9 sowohl in der Analyse mit den regionalen HistAlp-Werten als auch der GRID1-Werten.

Auch die lineare Regression zeigt die gute Güte der Vergleichsreihen. Zwar liegen die bestimmten Werte nicht direkt auf der 1:1 Ursprungsgeraden, die Abweichung ist aber auf Grund der oben genannten Gründe in Ordnung.
All diese Ergebnisse zeigen auch keine signifikanten Abweichungen, auch nicht im frühen Untersuchungszeitraum in denen es zu Ergänzungen durch Schulz (1999) und Ellenrieder (2002) in den Datenlücken der Niederschlagsmessreihen an der Pegelstation Vernagtbach gekommen ist. Somit war die angewandte Methode zur Schließung der Datenlücken sehr praktikabel und kann auch in Zukunft angewendet werden, falls es zu einem unerwarteten Ausfall des Niederschlagmessgerätes kommen sollte.

Dadurch dass für den Vergleich sowohl die regionale Datenreihe CRSM als auch die räumlich höher diskretisierte GRID1- Reihe verwendet wurden, zeigt sich ein interessantes Ergebnis. Bereits für den Vergleich mit dem gröberen CRSM-Raster werden sehr gute Übereinstimmungen und Ergebnisse erzielt. Der GRID1-HBV Vergleich zeigte nur in der Betrachtung des zeitlichen Verlaufs bessere Übereinstimmungen auf. Bei der Doppelsummenanalyse als auch Regressionsanalyse ist das Ergebnis mit dem groben Raster vergleichbar. Dies zeigt, dass die Verfeinerung des Gitters nicht wirklich einen größeren Erfolg bringt. Diese Aussage wird dadurch unterstützt, dass eine räumliche Verdichtung auf statistischer Basis, wie es in HistAlp geschehen ist, nur dann eine Verbesserung bringt, wenn zusätzlich mehr Informationen, wie Daten von weiteren Messstationen in die Verfeinerung eingehen (Braun et al. 2011).

5. Beziehung zwischen dem berechneten Gebietsniederschlag und den Punktmessungen an der Klimastation

In einem nächsten Schritt werden die mit dem HBV3-ETH9 berechneten Gebietsniederschlagssummen mit den an der Klimastation Vernagtbach gemessenen Niederschlagssummen verglichen und in Beziehung gesetzt. Ziel ist es, sowohl einen Zuschlag zu den Niederschlagssummen an der Messstation, als auch einen Quotienten zur Berechnung des Gebietsniederschlags aus den Stationsdaten zu berechnen.

Werden die Anteile des gefallenen Schneeniederschlags an der Niederschlagsmessstelle mit dem des Gebietsniederschlags verglichen, erhält man große Unterschiede. Im hydrologischen Jahr 1983/84 liegt der Anteil von festem Niederschlag an der Klimastation höher als der für das gesamte Gebiet. Dies ist jedoch eine Ausnahme, denn in den übrigen Jahren des Untersuchungszeitraumes ist der Schneeanteil am Gebietsniederschlag höher als an der Punktmessung und dieser variiert jährlich. Es kommt zu Unterschieden von bis zu 44%. Im Mittel liegt der Anteil des festen Niederschlags an der Klimastation Vernagtbach (63%) 11% unterhalb dessen für das gesamte Einzugsgebiet (74%). Innerhalb des Vergleiches gibt es den Trend zu einem größeren Unterschied zwischen den Schneeanteilen an der Pegelstation und in den berechneten Gebietsniederschlägen.

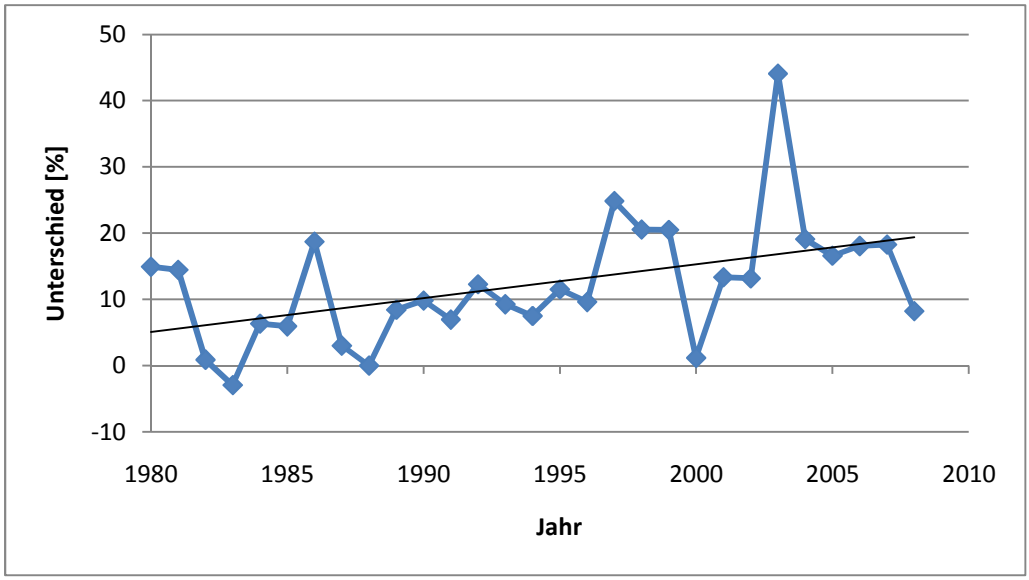


Abb.17: Unterschied [%] in den Schneeanteilen an der Pegelstation im Vergleich zum Gebietsniederschlag.

Diese Unterschiede werden durch die Korrektur der Niederschlagswerte der Punktmessung mit Hilfe des Schneekorrektur- und Regenkorrekturfaktors erklärt. Auf Grund der in Kapitel 2.4. eingegangen Fehler bei der Niederschlagsmessung liegt der Korrekturfaktor für Schnee höher als der für Regen. RCF liegt im Mittel bei 1.5 und zeigt innerhalb des Untersuchungszeitraumes einen Trend zu kleineren Werten. Daraus lässt sich folgern, dass der Niederschlagsmesswert für Regen an der Klimastation relativ gut ist, vor allem ab dem Jahr 1991, da die Niederschlagsreihen lückenlos vorliegen. Für Schnee liegt der Korrekturfaktor sehr viel höher. Im Mittel nimmt er einen Wert von 2.5 an. Hierfür zeigt sich jedoch nicht wie für RCF ein Trend. SCF bleibt über den gesamten Zeitraum ziemlich konstant. Dies liegt vor allem an den Fehlern bei der Schneemessung.

In Tab.11 sind die Anteile des festen und flüssigen Niederschlags in mm w.e. und in Prozent für die Punktmessung an der Klimastation Vernagtbach, sowie für das gesamte Gebiet aufgeführt.

Tab.11 : Werte des berechneten Gebietsniederschlags, sowie der Punktwerte an der Klimastation Vernagtbach und deren Abweichung voneinander

hydro - logisches Jahr	**Gebietsniederschlag**				**Pegelstation**			
	Schnee [mm]	Schnee [%]	Regen [mm]	Gesamt [mm]	Schnee [mm]	Schnee [%]	Regen [mm]	Gesamt [mm]
1980/81	1442	86	235	1677	577	71	235	812
1981/82	1139	73	413	1552	456	59	318	773
1982/83	1112	68	519	1631	445	67	216	661
1983/84	1051	75	353	1404	618	78	177	795
1984/85	1278	78	363	1641	456	72	182	638
1985/86	1350	84	261	1611	540	78	154	694
1986/87	1489	81	342	1831	573	63	342	915
1987/88	1066	63	622	1688	426	60	283	709
1988/89	1099	65	593	1692	500	65	270	769
1989/90	1087	72	423	1510	388	64	223	611
1990/91	1170	71	473	1643	418	61	263	681
1991/92	1384	79	358	1742	629	72	239	868
1992/93	1208	74	420	1628	525	62	323	848
1993/94	1285	69	580	1865	612	60	414	1026
1994/95	1192	77	360	1552	542	69	240	782
1995/96	1083	71	444	1527	433	59	296	729
1996/97	1051	66	547	1598	500	56	391	891
1997/98	1265	73	478	1743	436	48	478	914
1998/99	1520	72	604	2124	524	51	503	1027
1999/00	1617	83	340	1957	558	62	340	898
2000/01	1212	66	633	1845	606	65	333	939
2001/02	1215	70	521	1736	486	57	372	858
2002/03	1027	72	400	1427	380	59	267	647
2003/04	1400	78	399	1799	285	34	285	845
2004/05	1144	79	312	1456	458	59	312	770
2005/06	1212	79	330	1542	449	62	275	724
2006/07	1138	74	394	1532	421	56	328	750
2007/08	1231	74	443	1674	456	55	369	825
2008/09	1699	78	483	2182	739	70	322	1061
Mittelwert	1274	74	436	1683	507	63	302	809

<u>Berechnung eines Korrekturfaktors zur Bestimmung des Gebietsniederschlages aus den Messwerten an der Pegelstation</u>

Wird der Unterschied der Gesamtgebietsniederschlagssumme P von den Punktmessungen des Niederschlags P_{PV} untersucht, kann dafür ein Quotient Q_Z - berechnet aus dem mit dem HBV-Modell berechneten Wert geteilt durch den an der Klimastation Vernagtbach gemessenen Wert - angewendet werden.

$$P = P_{PV} * Q_Z \qquad [9]$$

Für den Quotienten errechnet sich im Mittel ein Wert von 2.08. Dieser schwankt jedoch im Untersuchungszeitraum zwischen 1.79 – 2.57, wobei der sich in den letzten 10 Jahren zwischen den Werten 1.9 und 2.1 einpendelt.
In Abb. sind der mit dem HBV3-ETH9 berechneten und der mit Hilfe des Mittelwerts des Quotienten (2.08) berechneten Gebietsniederschlag dargestellt.

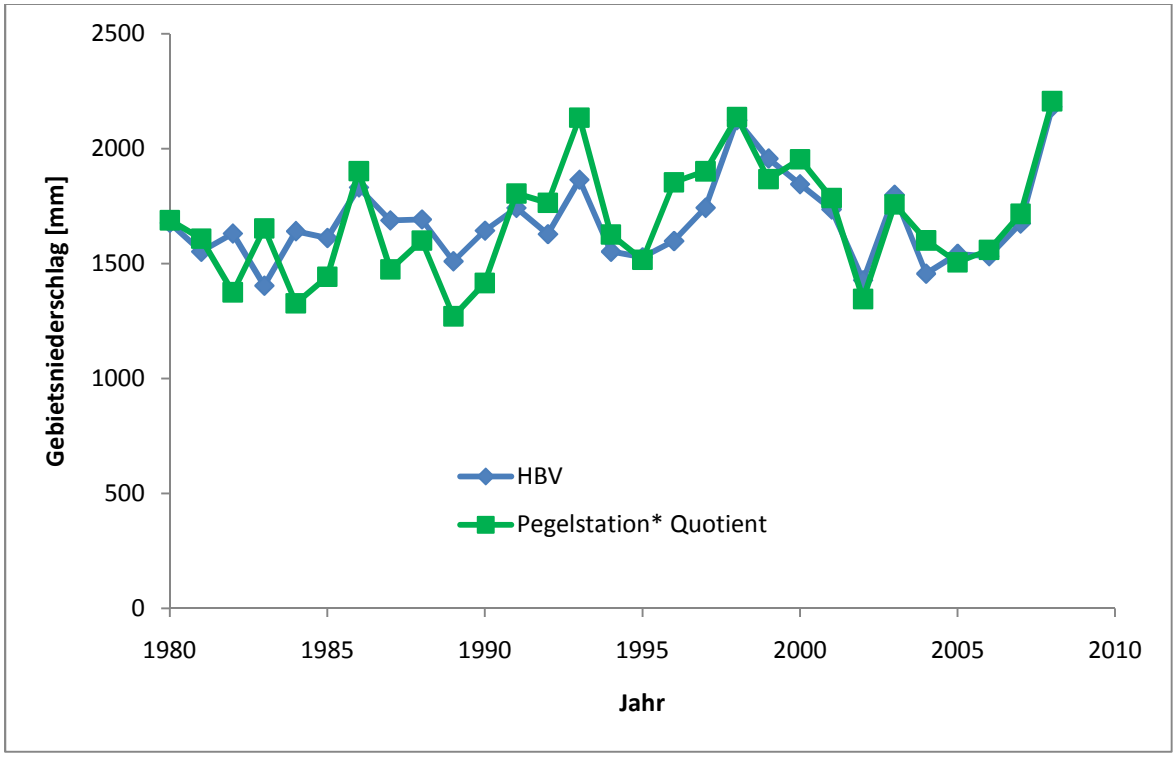


Abb.18: Gebietsniederschlag berechnet mit dem HBV-Modell (blau) und berechnet aus des Messwerten an der Pegelstation multipliziert mit einem mittleren konstanten Quotienten (grün).

Dabei fällt eine gute Übereinstimmung zwischen den beiden Kurven auf, jedoch erst ab den Jahr 1998. Zuvor werden die mit dem HBV berechneten Niederschlagssummen häufig unter- bzw. überschätzt. Auch der Verlauf ist in den ersten 10 Jahren des Untersuchungszeitraums teilweise gegenläufig.

Eine weitere Methode ist die Abweichung als konkreten Zahlenwert zu berechnen. Dazu wird Gleichung 1 angewandt. Dabei ergibt sich für die mittlere Abweichung von der Punktmessung eine Niederschlagssumme von 874 ± 119 mm. Die Abweichung

schwankt jedoch von Jahr zu Jahr und nimmt Werte von 609 – 1121 mm an. Dabei ergibt sich im Laufe des Untersuchungszeitraums der leichte Trend, dass die Abweichung kleinere Werte annimmt, jedoch trotzdem relativ konstant bleibt.

Tab.12: Werte für den Zuschlag der Punktmessung über den Gesamtzeitraum und unterteilt in Zeiträume von 10 Jahren

Zeitraum	1980-2007	1980- 1989	1990- 1999	2000- 2009
Zuschlag [mm]	874	886	871	864

In Abb. 19 sind die mit dem HBV-Modell berechneten und die Gebietsniederschläge, die aus dem Messwert an der Klimastation plus des mittleren Zuschlags berechnet wurden. Dabei wird deutlich, dass die Übereinstimmung zwischen den beiden Kurve gut ist. Es werden zwar hydrologische Jahre überschätz und andere unterschätzt, vor allem das niederschlagsreiche Haushaltsjahr 1998/99, aber insgesamt werden die berechneten Niederschlagswerte durch die Methode Pegelstation plus Zuschlag häufig nahezu erreicht.

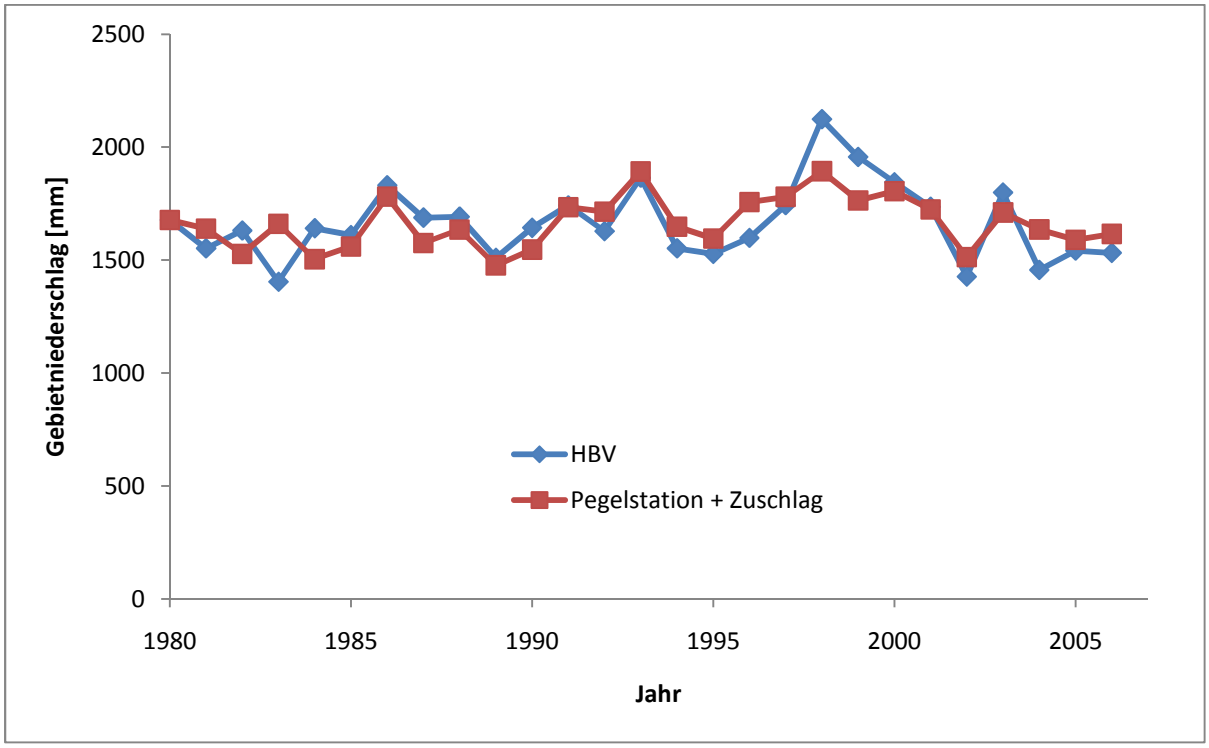


Abb.19: Gebietsniederschlag berechnet mit dem HBV-Modell (blau) und berechnet aus des Messwerten an der Pegelstation plus einem mittleren konstanten Zuschlag (rot).

In Tabelle 13 sind die Werte des Gebietsniederschlags, des Niederschlags an der Pegelstation die Abweichung dazwischen und der Quotient aus Gebietsniederschlag und dem Niederschlag an der Pegelstation aufgeführt.

Tab.13: Werte des Gebietsniederschlags und des Niederschlags an der Pegelstation, deren Abweichung voneinander und der aus den Niederschlagswerten berechnete Quotient

hydrol.Jahr	Gebietsniederschlag HBV	Niederschlag Pegelstation	Abweichung	Quotient
1980/81	1677	812	865	2.07
1981/82	1552	773	779	2.01
1982/83	1631	661	970	2.47
1983/84	1404	795	609	1.77
1984/85	1641	638	1003	2.57
1985/86	1611	694	917	2.32
1986/87	1831	915	916	2.00
1987/88	1688	709	979	2.38
1988/89	1692	769	923	2.20
1989/90	1510	611	899	2.47
1990/91	1643	681	962	2.41
1991/92	1742	868	874	2.01
1992/93	1628	848	780	1.92
1993/94	1865	1026	839	1.82
1994/95	1552	782	770	1.99
1995/96	1527	729	798	2.09
1996/97	1598	891	707	1.79
1997/98	1743	914	829	1.91
1998/99	2124	1027	1097	2.07
1999/00	1957	898	1059	2.18
2000/01	1845	939	906	1.96
2001/02	1736	858	878	2.02
2002/03	1427	647	780	2.21
2003/04	1799	845	954	2.13
2004/05	1456	770	686	1.89
2005/06	1542	724	818	2.13
2006/07	1532	750	782	2.04
2007/08	1674	825	849	2.03
2008/09	2182	1061	1121	2.06
Mittelwert	1683	809	874	2.10

Zusammenfassung

Durch die Untersuchung der Beziehung zwischen den in dieser Arbeit modellierten Gebietsniederschläge und den Niederschlagsmessungen an der Klimastation wird deutlich, dass der erfasste Regen, vor allem in den letzten 15 Jahren, sehr nahe dem Wert für den Gebietsniederschlag ist. Der mit dem Niederschlagsmesser erfasste Schnee jedoch muss durch einen hohen Faktor von ungefähr 2.0 korrigiert werden und es kommt zu sehr großen Unterschieden von Jahr zu Jahr

Der Zuschlag zum gemessenen Wert an der Klimastation zur Berechnung des Gebietsniederschlags kann nicht als konstant angenommen werden. Er variiert von Jahr zu Jahr. Zur Berechnung des Gebietsniederschlags direkt aus den Punktmessungen wurden zwei Methoden ausprobiert:

- Mit Hilfe eine Quotienten
- Mit Hilfe eines absoluten Zahlenwert als Zuschlag

Über den gesamten Zeitraum betrachtet kommt es bei der Berechnung des Punktwertes plus Zuschlag im Vergleich zu einer besseren Übereinstimmung mit den modellierten Gebietsniederschlagssummen. Bei der Quotientenmethode kommt es nur zu einer hohen Übereinstimmung in den letzten Jahren des Untersuchungszeitraumes, während die Zuschlagsmethode denselben zeitlichen Verlauf hat mit Ausnahme des Haushaltsjahres 1983/84. Somit kann dieser Zuschlag verwendet werden, um die Gebietsniederschlagssummen des Einzugsgebiets abzuschätzen. Man kann sagen, dass der gemessene Werte ungefähr verdoppelt werden muss, um den Wert des Gebietsniederschlags im Einzugsgebiet zu erhalten. Jedoch sind zur Bestimmung des genauen Wertes weitere Methoden notwendig.

6. Fazit

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Berechnung des Gebietsniederschlages im Einzugsgebiet Vernagtbach für den Zeitraum 1980-2009 und der Vergleich mit den HistAlp-Datenreihen zeigen ein sehr zufriedenstellendes Ergebnis. Die Modellierung mittels des HBV3-ETH9 Modells zeigen sehr gute Ergebnisse in den Termen Abfluss und Gletschermassenbilanz. Daraus kann geschlossen werden, dass die berechneten Werte für den Gebietsniederschlag sehr realistisch sind. Der Vergleich mit den HistAlp-Werten zeigt, dass die berechneten Gebietsniederschläge homogen sind und auch der Verlauf eine gute Übereinstimmung zeigt.
Trotzdem könnte der Verlauf des Gebietsniederschlags auch anders verlaufen. Um diesen jedoch zu verbessern müssten weitere gemessene Terme wie z.B. die Verdunstung für den gesamten Untersuchungszeitraum bekannt sein.
Eine weitere Möglichkeit um eine Verbesserung der berechneten Terme zu erhalten, wäre die Anwendung eines physikalischen Modells, da dort die Massen- und Energieerhaltung vorausgesetzt wird und weiter Terme wie z.B. die Strahlung mit in das Modell eingehen. Die Voraussetzung dafür sind jedoch die Verfügbarkeit geeigneter Treiberdaten, die durch Messungen erfasst sein müssen und möglichst genau vorliegen sollten. In dieser Arbeit wurde der Niederschlag überprüft und anhand der Ergebnisse des Vergleichs mit HistAlp die Homogenität festgestellt. Somit sind die Messdaten an der Pegelstation genau genug gemessen, um realistische Ergebnisse zu erhalten. Um jedoch eine physikalisches Modell anwenden zu können müssen auch weitere Größen, wie z.B. die Temperatur oder die Strahlung überprüft werden.

Die Ergebnisse aus dem Vergleich der berechneten Gebietsniederschläge im Untersuchungsgebiet mit den aus den HistAlp Anomalien berechneten Werte, zeigen dass unter Berücksichtigung der Besonderheiten des Ortes auf die Niederschlagsverhältnisse die homogenisierte HistAlp-Datenreihe sehr gut anwendbar ist, um den zeitlichen Verlauf der berechneten Gebietsniederschläge im Einzugsgebiet Vernagtbach abzugleichen und zu bewerten.
Desweiteren kann die HistAlp-Reihe angewendet werden, um Informationen über die Niederschlagsverhältnisse für frühere Zeitreihen im Einzugsgebiet zu erhalten und die Gebietsniederschlagssummen ungefähr abschätzen zu können. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass kein Referenzwert vorliegt. Der für diese Arbeit verwen-

dete Wert von 1590 mm hat für den hier untersuchten Zeitraum gute Ergebnisse geliefert. Waren die Niederschlagsverhältnisse in früheren Zeiten jedoch sehr unterschiedlich zu den heutigen, muss ein anderer Referenzwert ermittelt werden.

7.Literatur

Aquilar E., Auer I., Brunet M., Peterson T.C., Wieringa J. (2003): Guidelines on Climate Metadata and Homogenization. World climate programme data and Monitoring WCDMP 53, WMO-TD 1186, WMO Geneva.

Auer I., Böhm R., Jurkovic A., Orlik A., Potzmann R., Schöner W., Ungersböck M., Brunetti M., Nanni T., Maugeri M., Briffa K., Jones P., Efthymiadis D., Mestre O., Moisselin J.M., Begert M., Brazdil R., Bochnicek O., Cegnar T., Gajic-Capka M., Zaninivic K., Majstorovic Z., Szalai S., Szentimrey T. (2005a): A new instrumental precipitation dataset in the greater alpine region for the period 1800-2002. International Journal of Climatology,25, S.139-166.

Auer I., Böhm R., Jurkovic A., Lipa W., Orlik A., Potzmann R., Schöner W., Ungersböck M., Matulla C., Briffa K., Jones P.D., Efthymiadis D., Brunetti M., Nanni T., Maugeri M., Mercalli L., Mestre O., Moisselin J-M., Begert M., Müller-Westermeier G., Kveton V., Bochnicek O., Stastny P., Lapin M., Szalai S., Szentimrey T., Cegnar T., Dolinar M., Gajic-Capka M., Zaninovic K., Majstorovic Z., Nieplova E. (2007): HISTALP – Historical instrumental climatological surface time series of the greater Alpine region 1760-2003. *International Journal of Climatology 27*, S.17-46.

Bergström S. (1976): Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. Bulletin Series A, 52.

Bergström S. (1991): Principles and Confidence in hydrological modelling. Nordic Hydrology,22, S.123-136.

Bergström S. (1992): The HBV model – its structure and its applications. *SMHI* RH No.4, April 1999, 35 Seiten.

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., Auer I., Schöner W., Ganekind M., Gruber C., Jurkovic A., Orlik A., Ungersböck M. (2009): Eine neue Webseite mit instrumentellen Qualitäts-Klimadaten für den Grossraum Alpen zurück bis 1760. Wiener Mitteilungen, 216, Hochwässer: Bemessung, Risikoanalyse und Vorhersage.

Braun L.N., Aellen M. (1990): Modelling discharge of glacierized basins assisted by direct measurements of glacier mass balance. IAHS Publ., 193, S.99-106.

Braun L.N. & Renner C. (1992): Application of a conceptual runoff model in different

physiographic regions of Switzerland. *Hydrological Sciences Journal,* 37 (3), S. 217 - 231.

Braun L.N., Aellen M., Funk M., Rohrer M.B., Steinegger U., Kappenberger G., Mül ler-Lemans H. (1993): Measurements and simulation of high alpine water balance components in the Linth-Limmern head watershed (morth-eastern Switzerland). Z.f.Gletscherkunde und Glaziogeologie,30, S. 161-185.

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

Braun L. N., Escher-Vetter H., Heucke E., Siebers M., Weber M. (2004): Experiences with the new ´Vernagtbach' hydro-meteorological station. In: Oerlemans/ Tijm-Reijmer (Hrsg.): Book of extended abstracts of presentation at the workshop "Automatic Weather Stations on Glaciers", Pontresina, 28.-31. March 2004, IMAU, S. 38 - 44.

Braun L.N., Escher-Vetter H., Siebers M., Weber M. (2007): Water balance pf 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., Mauser W., Prasch M. (2011): Hydrometeorological monitoring of Vernagtferner as an essiential basis for snow and glacier modelling in the GLOWA- Danube project, Contribution tot he SHF-symposium „ Water in mountain areas, March 2011, Lyon, 16 S.

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., Ellenrieder T., Siebers M. (2003): Gemessene und modellierte Komponenten der Wasserbilanz für ein stark vergletschertes alpines Einzugs gebiet. 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.

Haag W. (2003): Auswirkungen von Gletscherschwund auf die Wasserspende hoch-Alpiner Gebiete, Vergleich Alpen- Zentralasien. Dissertation, LMU München, Fakultät für Geowissenschaften, 111 S..

Hansel N., Schäfer U. (1970): Die Doppelsummenanalyse. Wasserwirtschaft-Wassertechnik, Heft 5, 29.Jhg, S.145-150.

Kuhn M., Nickus U., Pellet F. (1982): Die Niederschlagsverhältnisse im inneren Ötz tal. Annalen der Meteorologie 19, S.235-237.

Maniak U. (2010): Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure. 6. Aufl. Springer, Berlin, Heidelberg.

MeteoDataExplorer (2003): Internetquelle: aufgerufen: 21.05.2011 http://meteo.kanti-glarus.ch/station/geraete/index.php?topic=ger_regen

Moser H., Escher-Vetter H., Oerter H., Reinwarth O., Zunke D. (1986): Abfluss in und von Gletschern. *GSF-Bericht* 41/86, Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH, München, 408 Seiten.

Nash J.E., Sutcliffe J.V. (1970): River flow forecasting through conceptual models. Part I- a discussion of principles. Journal of Hydrology, 10/3, S.282-290.

Paterson W.S.B. (1994): The Physics of Glaciers. 3. Aufl. Pergamon Press, Oxford, 481S.

Schöninger M., Dietrich J. (2008): Hydroskript. Aufgerufen: 21.05.2011 http://www.hydroskript.de/html/_index.html

Schulz M. (1999): Bestimmung der Wasserhaushaltsgrenzen ausgewählter hochalpiner Einzugsgebiete mittels Messung und Simulation. Unveröff. Diplomarbeit, Institut für Geographie, LMU München.

Weber M. (1997): Aspekte zur Extrapolation von Tagesmittelwerten von Temperatur Und täglichen Niederschlagssummen an hochgelegenen Gebirgsstationen aus Klimadaten des örtlichen Klimamessnetzes in Nepal. Interner Bericht, KfG.

Wehren B., Weingartner R., Schädler B., Viviroli D. (2010): General characteristics of Alpine waters. In: U. Bundi (ed.), Alpine Waters, Hdb Env Chem (2010) 6: 17–58, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010.

A. Anhang

Tab. 14: Parameterbelegung für das HBV3-ETH9 und die jährlichen Nash-Sutcliff-Koeffizienten

hydrologisches Jahr	RCF	SCF	Cmax	R^2
1980/81	1	2,5	3,7	0,896
1981/82	1,3	2,5	3,7	0,917
1982/83	2,4	2,5	3,7	0,902
1983/84	2	1,7	3,7	0,86
1984/85	2	2,8	3,7	0,856
1985/86	1,7	2,5	5,1	0,817
1986/87	1	2,6	5,1	0,82
1987/88	2,2	2,5	5,1	0,922
1988/89	2,2	2,2	5,1	0,912
1989/90	1,9	2,8	5,1	0,932
1990/91	1,8	2,8	4,4	0,869
1991/92	1,5	2,2	4,4	0,957
1992/93	1,3	2,3	4,4	0,889
1993/94	1,4	2,1	4,4	0,77
1994/95	1,5	2,2	4,4	0,964
1995/96	1,5	2,5	4,4	0,893
1996/97	1,4	2,1	4,4	0,915
1997/98	1	2,9	4,4	0,94
1998/99	1,2	2,9	4,4	0,897
1999/00	1	2,9	4,4	0,909
2000/01	1,9	2	4,4	0,895
2001/02	1,4	2,5	4,4	0,897
2002/03	1,5	2,7	5,3	0,899
2003/04	1,5	2,7	5,3	0,914
2004/05	1	2,5	5,3	0,895
2005/06	1,2	2,7	5,3	0,904
2006/07	1,2	2,7	5,3	0,889
2007/08	1,2	2,7	5,3	0,86
2008/09	1,5	2,3	5,3	0,881

Tab.15: Werte der gemessenen und berechneten jährlichen Abflüsse, sowie Massenbilanzen

hydro-logisches Jahr	**Abfluss**		**Massenbilanz Gletscher**	
	Gemessen	Modelliert	Gemessen	Modelliert
1980/80	1253	1184	118	103
1980/81	1402	1447	-46	-53
1981/82	2151	2115	-693	-802
1982/83	1913	1896	-440	-493
1983/84	1131	1143	16	47
1984/85	1577	1568	-92	-207
1985/86	2031	2055	-662	-732
1986/87	1870	1905	-244	-356
1987/88	1985	1916	-396	-436
1988/89	1754	1721	-249	-275
1989/90	1816	1737	-453	-466
1990/91	2276	2242	-860	-884
1991/92	2124	2115	-684	-609
1992/93	1752	1751	-376	-358
1993/94	2613	2422	-820	-820
1994/95	1675	1656	-317	-298
1995/96	1663	1610	-329	-328
1996/97	1786	1769	-388	-320
1997/98	2367	2343	-800	-837
1998/99	2002	1960	-82	-184
1999/00	1891	1941	-219	-272
2000/01	1895	1865	-171	-186
2001/02	1807	1755	-203	-204
2002/03	3336	3218	-1592	-1901
2003/04	1963	1965	-299	-351
2004/05	1878	2097	-385	-540
2005/06	2389	2401	-649	-990
2006/07	2137	2258	-690	-902
2007/08	2477	2433	-602	-865
2008/09	2681	2569	-684	-568