

# Veränderungen der Gletscher und des alpinen Wasserkreislaufs seit 1970

Michael Kuhn  
Kay Helfricht  
Martin Ortner  
Johannes Landmann  
Wolfgang Gurgiser



AUTONOME PROVINZ BOZEN - SÜDTIROL

Abteilung 40. Bildungsförderung,  
Universität und Forschung



PROVINCIA AUTONOMA DI BOLZANO - ALTO ADIGE

Ripartizione 40. Diritto allo Studio  
Università e Ricerca scientifica

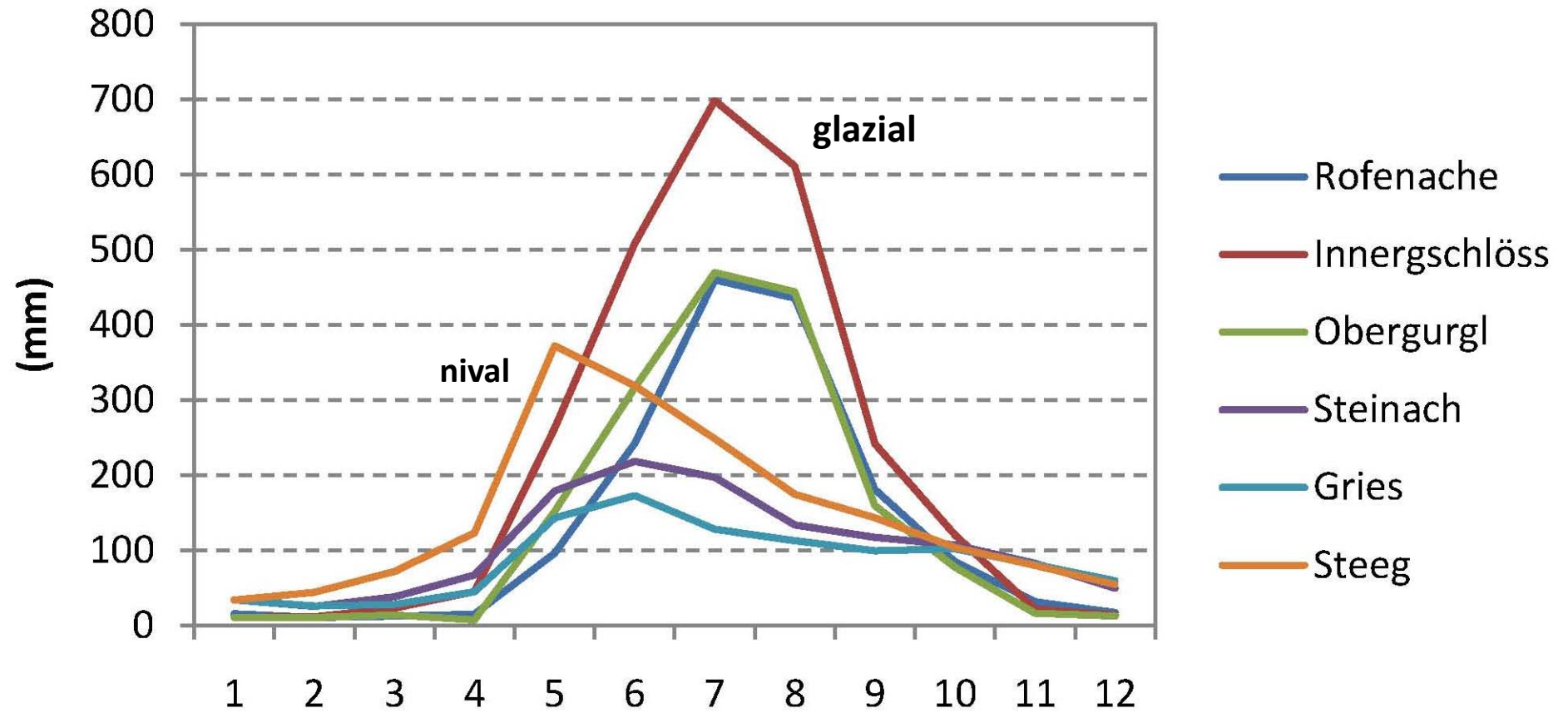
**Der alpine Wasserkreislauf wird maßgeblich vom Jahresgang und der Menge und Phase des Niederschlags sowie von der vorübergehenden Speicherung in Schnee und Eis, in geringerem Ausmaß von der Verdunstung bestimmt.**

**Durch die Temperatur, die über Regen oder Schnee und über das Schmelzen entscheidet, hängt er stark von der Höhe ab, was durch die lokale Verteilung der Bewölkung verstärkt werden kann.**

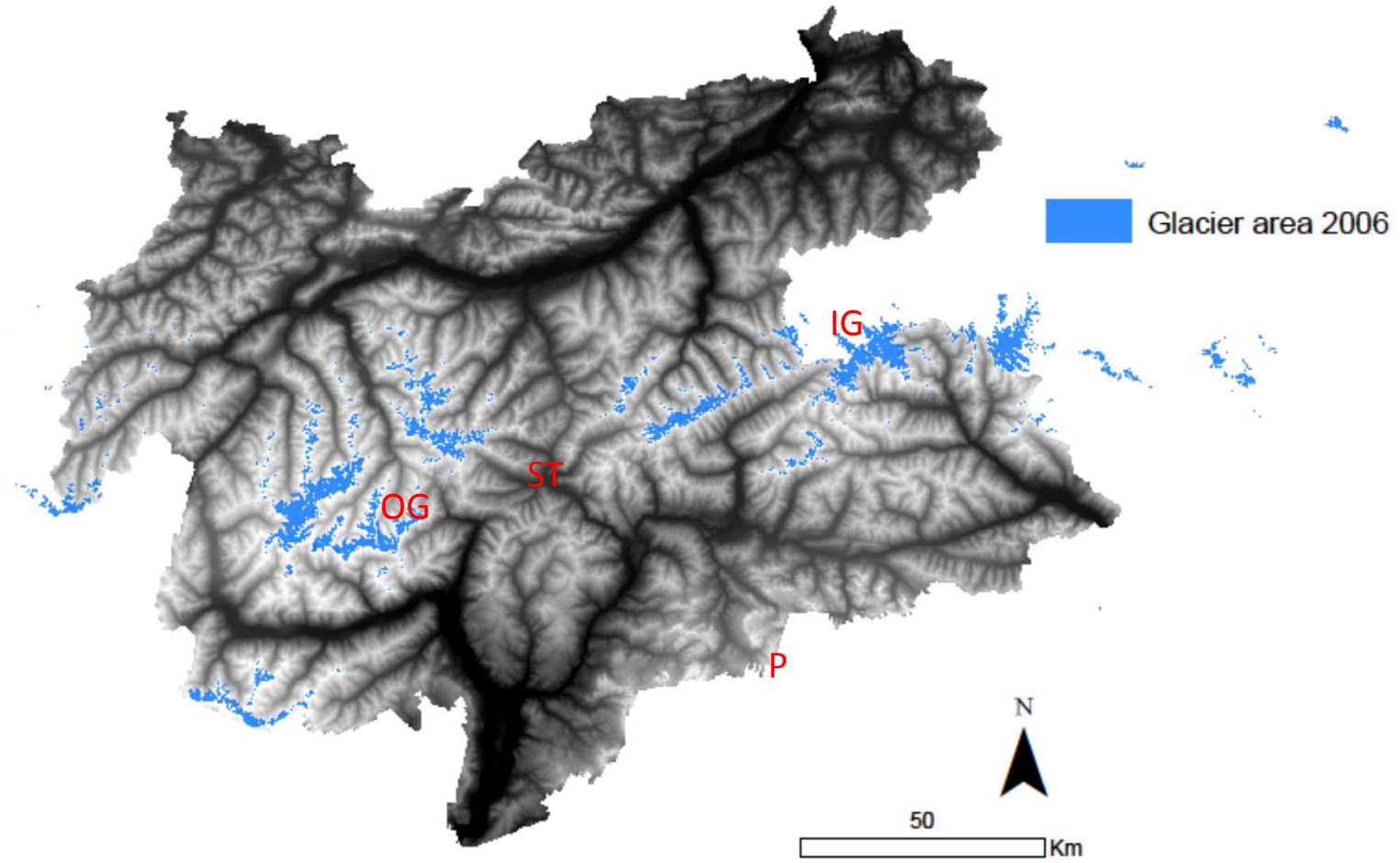
**Die dominanten Anströmungsrichtungen von NW und SW verursachen deutliche Unterschiede zwischen Randlagen und zentralen Gebieten.**

**Die Klimaänderungen der vergangenen Jahrzehnte haben zu messbaren, regional verschiedenen Änderungen im Abfluss und in der Verteilung von Schnee und Eis geführt.**

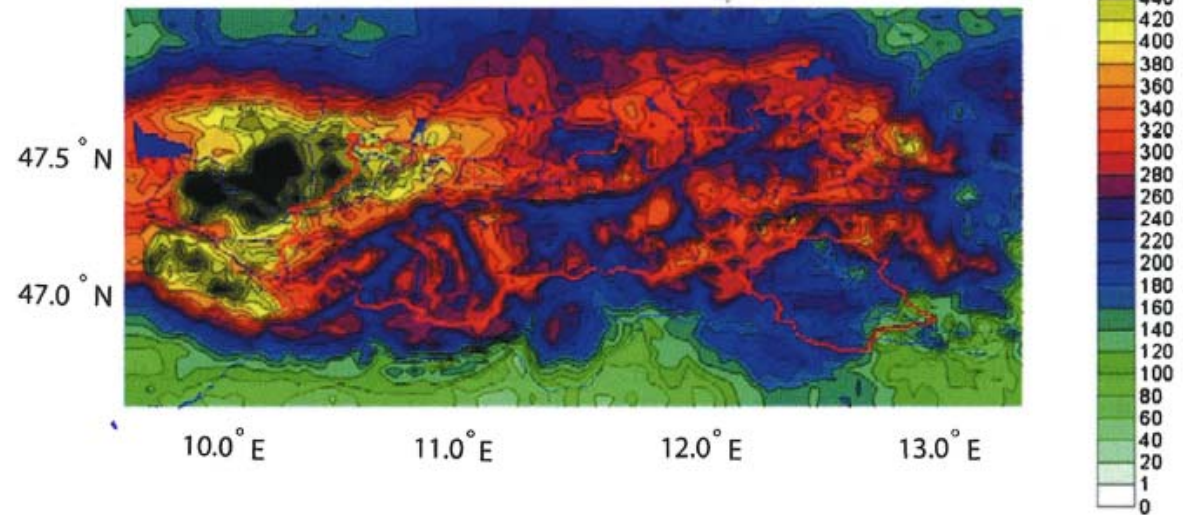
# Runoff 1985-2003



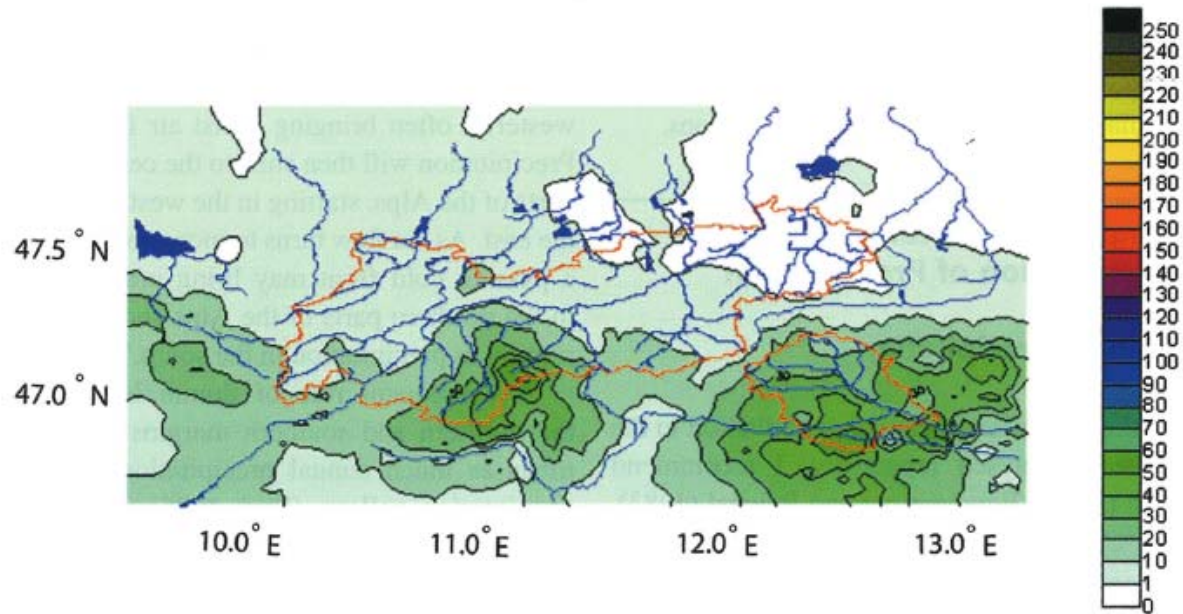
# Das Untersuchungsgebiet



Monatsniederschlag  
 August 2010  
 überwiegend NW Strömung



Tagesniederschlag  
 14.8.2010  
 Südströmung



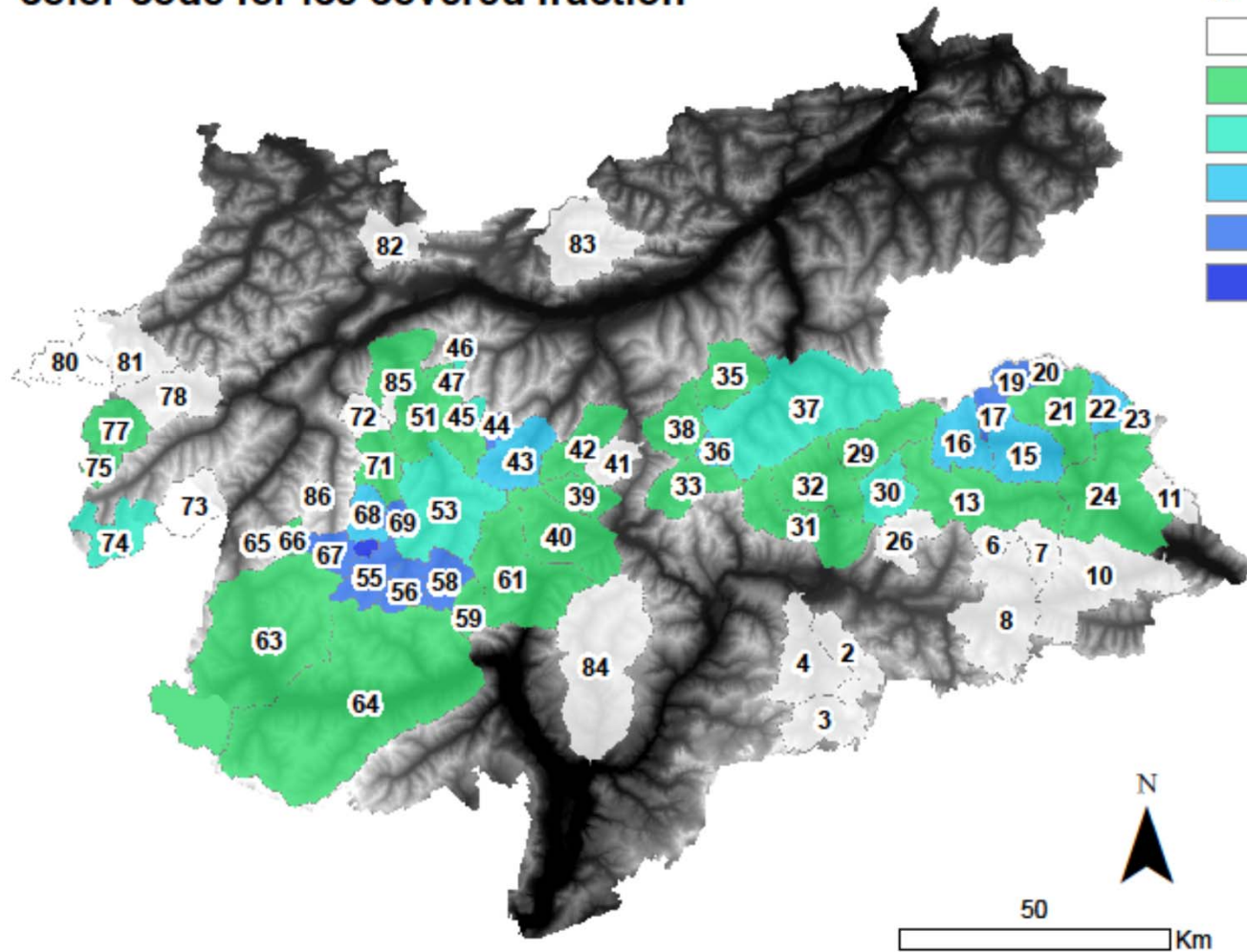
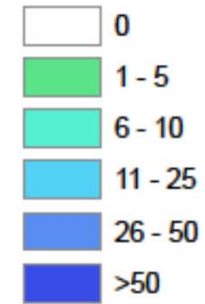
**Fig. 1.2** Total precipitation of the month of August 2010 (*above*) is dominated by north-westerly flow with values exceeding 400 mm in the west and less than 200 in the

south-east. The daily sums from 14-08-2010, 07:00 to 15-08-2010, 07:00 given in the *lower* panel describe a situation of southerly flow. From Gattermayr (2010)

### Basin identification number and color code for ice covered fraction

### relative Vergletscherung

%



**Das Prinzip dieser Untersuchung ist die Bilanzierung des Gebietsniederschlags**

**Niederschlag = Abfluss + Speicherung + Verdunstung**

**Bestimmung von monatlichen Werten mit OEZ 4.1**

**Abfluss: gemessene Monatswerte  $A$  (mo) von 84 Pegelstationen**

**Speicherung aus den Gletscherinventaren  $S$   
zwingt zu 2 Perioden: 1969 – 97(98) - 2006**

**Verdunstung parametrisiert mit Höhe, Schneedecke, Eis, Vegetation  $V$  (mo)**

**Jahressumme des Gebietsniederschlags:  $N = A + S + V$**

**Wird mit dem heutigen Jahresgang von Referenzstationen auf Monate aufgeteilt  
 $N$  (mo)**

**Daraus monatliche Speicherung  $S$  (mo)**

**Diese Werte gelten für das ganze Einzugsgebiet**

## Aufteilung auf 100 m Höhenstufen

$$N(m_o, z_i) = N(m_o, z_1) + dN/dz(m_o)(z_i - z_1)$$

$N(m_o, z_1)$  und  $dN/dz$  werden so angepasst, dass der Gebietsniederschlag  $N(m_o)$  erhalten bleibt

Lineare Restriktion:

$dn/dz(m_o)$  ist in allen Höhen gleich

Das ist in der Natur nicht immer der Fall:

Keine robuste Lösung

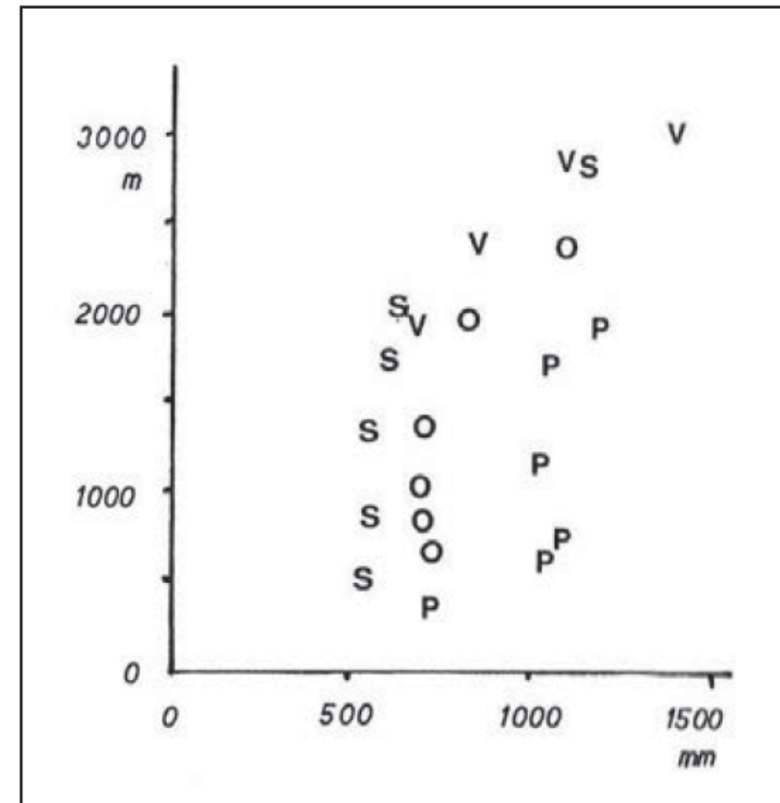
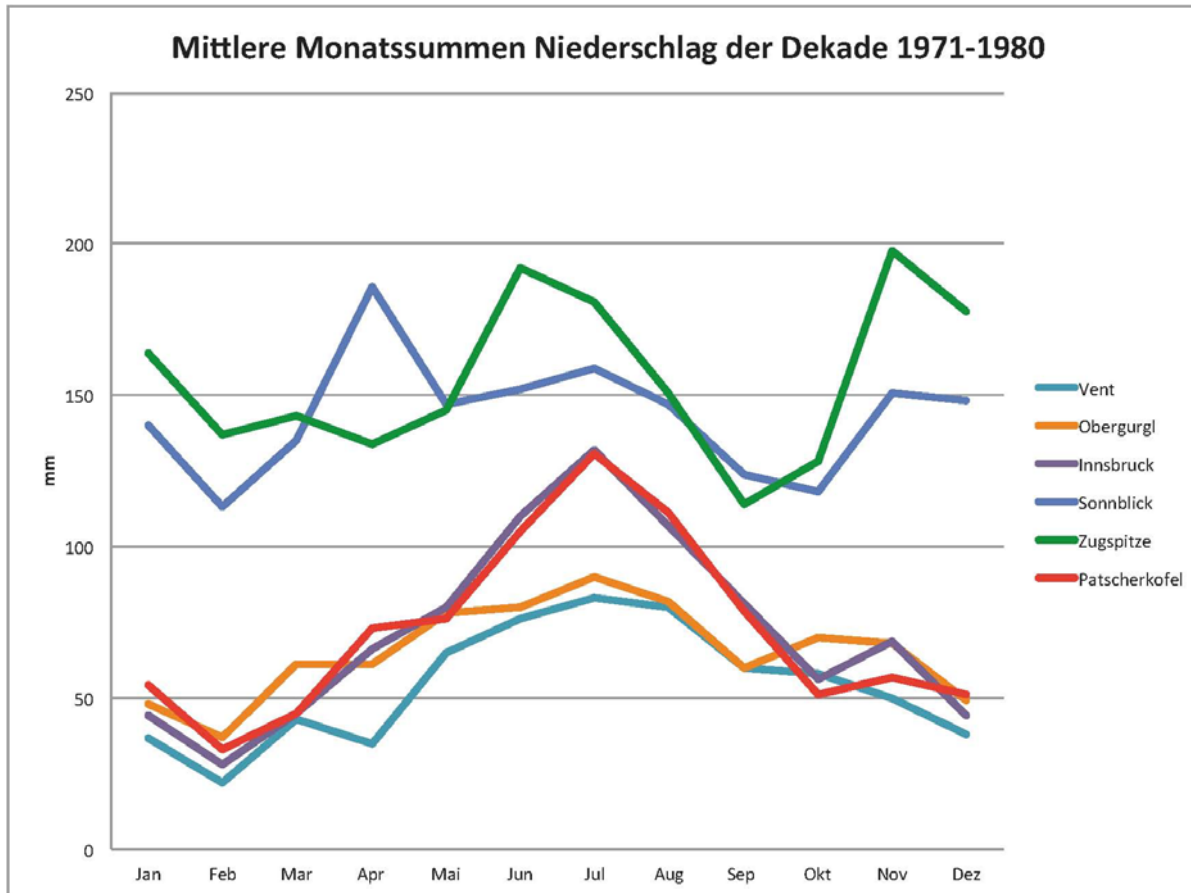
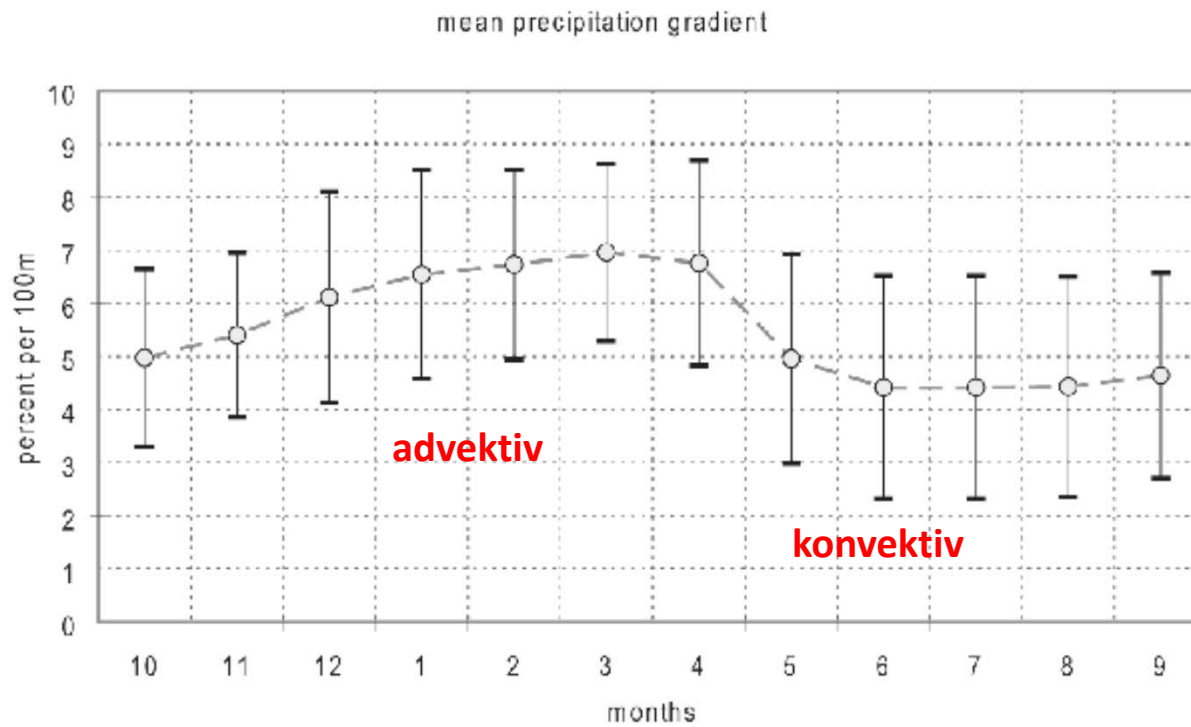


Abb. 11: Jahresniederschlag in der weiteren Umgebung von Obergurgl. S: Stationen im Schnalstal, P: Passeiertal, O: Ötztal bis Schönwies (s. Abb. 2), V: Vent bis zum Hintereisferner (Kuhn et al. 1982)





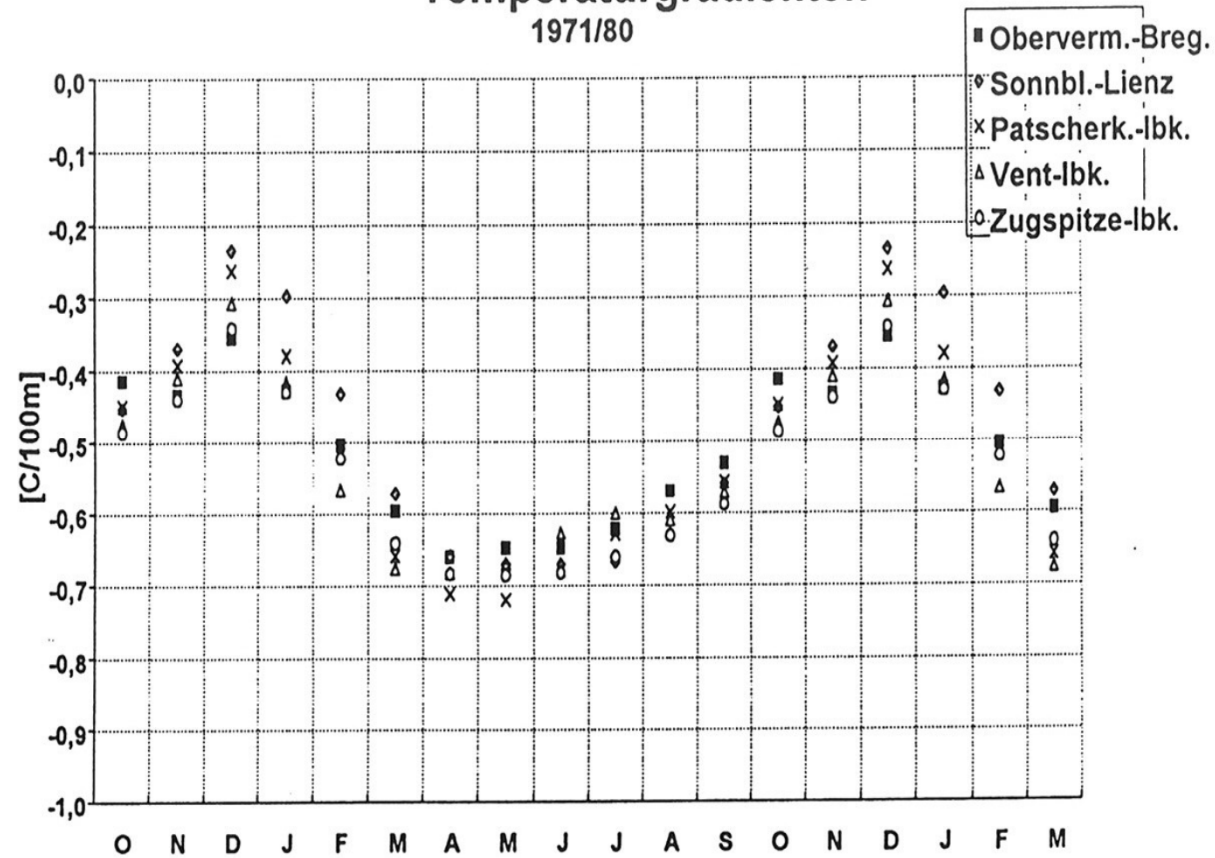
**Niederschlagsmessungen sind notorisch fehlerhaft,  
 N ist lokal inhomogen verteilt,  
 aber man sieht, dass  $dN/dz$  im Winter größer ist als im Sommer**



**Figure 2.4** Mean monthly precipitation increase in Eastern Alpine basins expressed as percent increase per 100 m elevation.

# Temperaturgradienten

1971/80



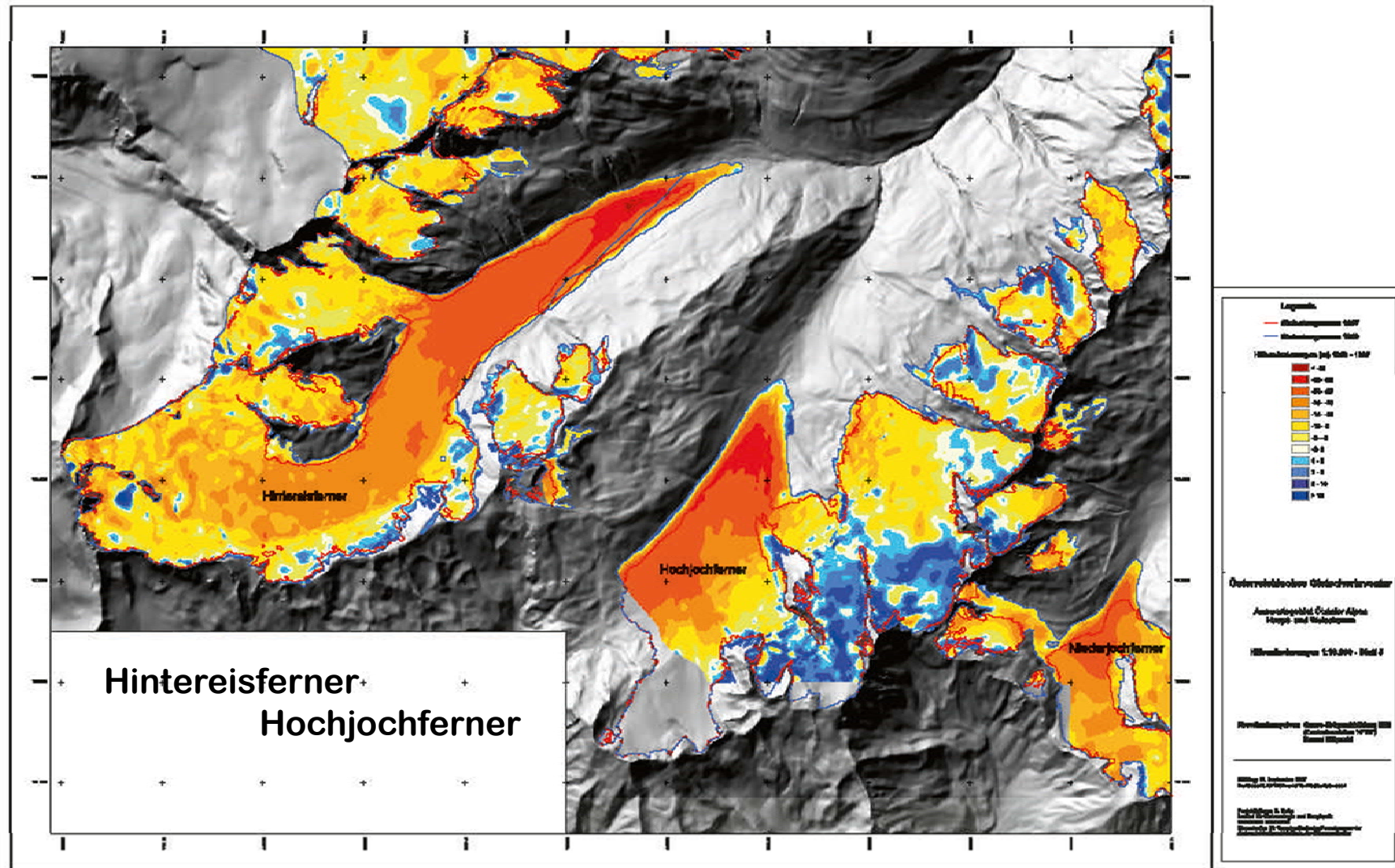
**Starker Jahrgang, einheitlicher Verlauf zwischen Bregenz und Sonnblick**  
**In diesem Projekt wurden die räumlich aufgelösten Werte aus dem Histalp-Datensatz**  
**Verwendet.**

## Speicherung: verwendete Gletscherinventare

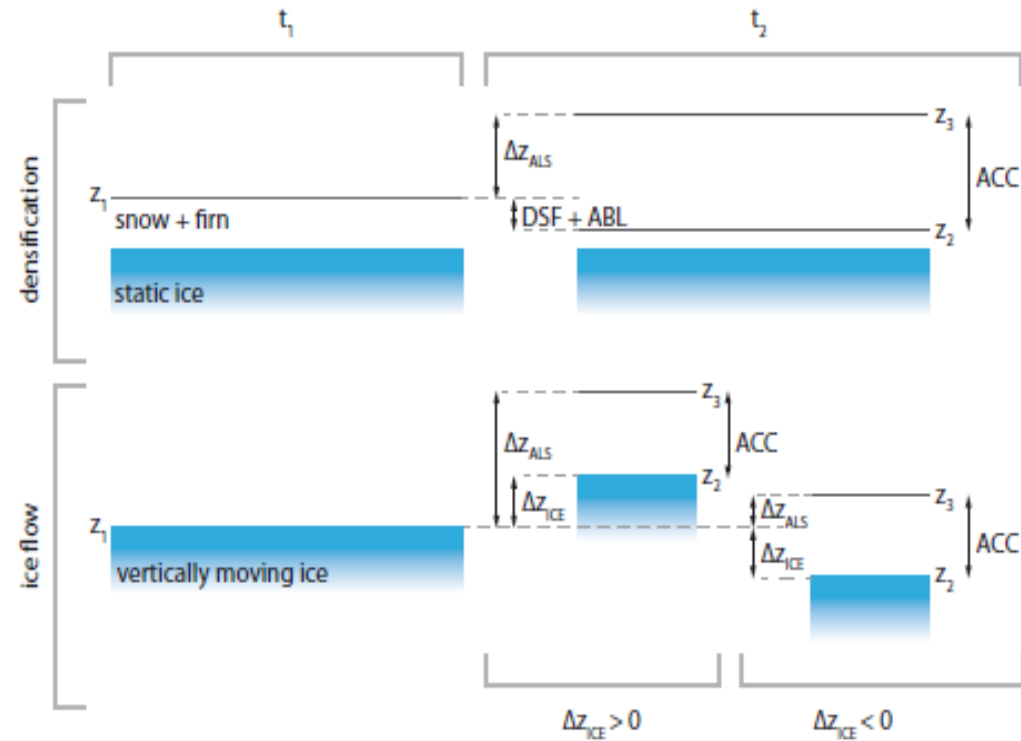
|                       |      |           |           |      |
|-----------------------|------|-----------|-----------|------|
| Südtirol              |      | 1997      |           | 2006 |
| Nord-<br>und Osttirol | 1969 | 1997/98   |           | 2006 |
|                       |      | Periode 1 | Periode 2 |      |

# Änderungen der Oberflächenhöhen 1969 – 1997

Rot bis < -75 m                      Blau bis > +10 m



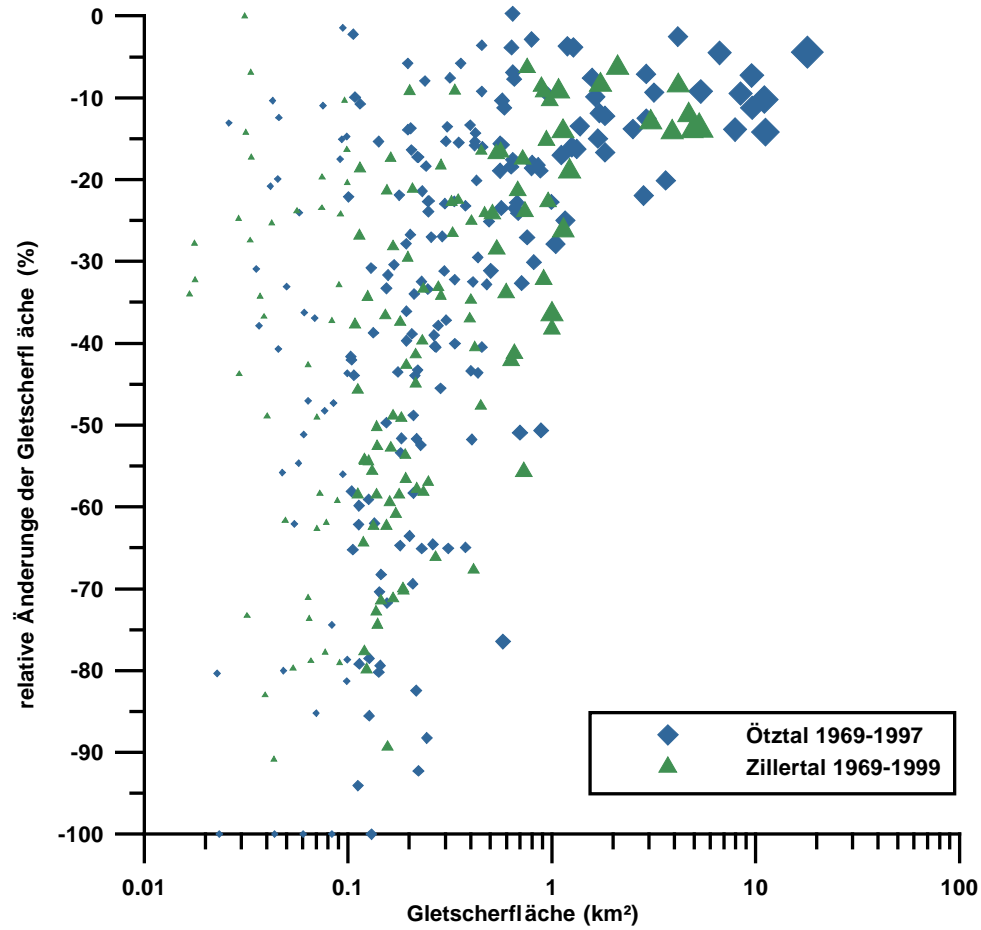
Beim Vergleich von zwei Oberflächenhöhen müssen Setzung (Verdichtung) des Schnees und Vertikalbewegung des Eises berücksichtigt werden



**Fig. 1.** Chart of the processes causing deviations between ALS surface elevation changes  $\Delta z_{ALS}$  and actual accumulation (ACC), namely densification of snow and firn (DSF), ablation (ABL) and vertical ice flow ( $\Delta z_{ICE}$ ).

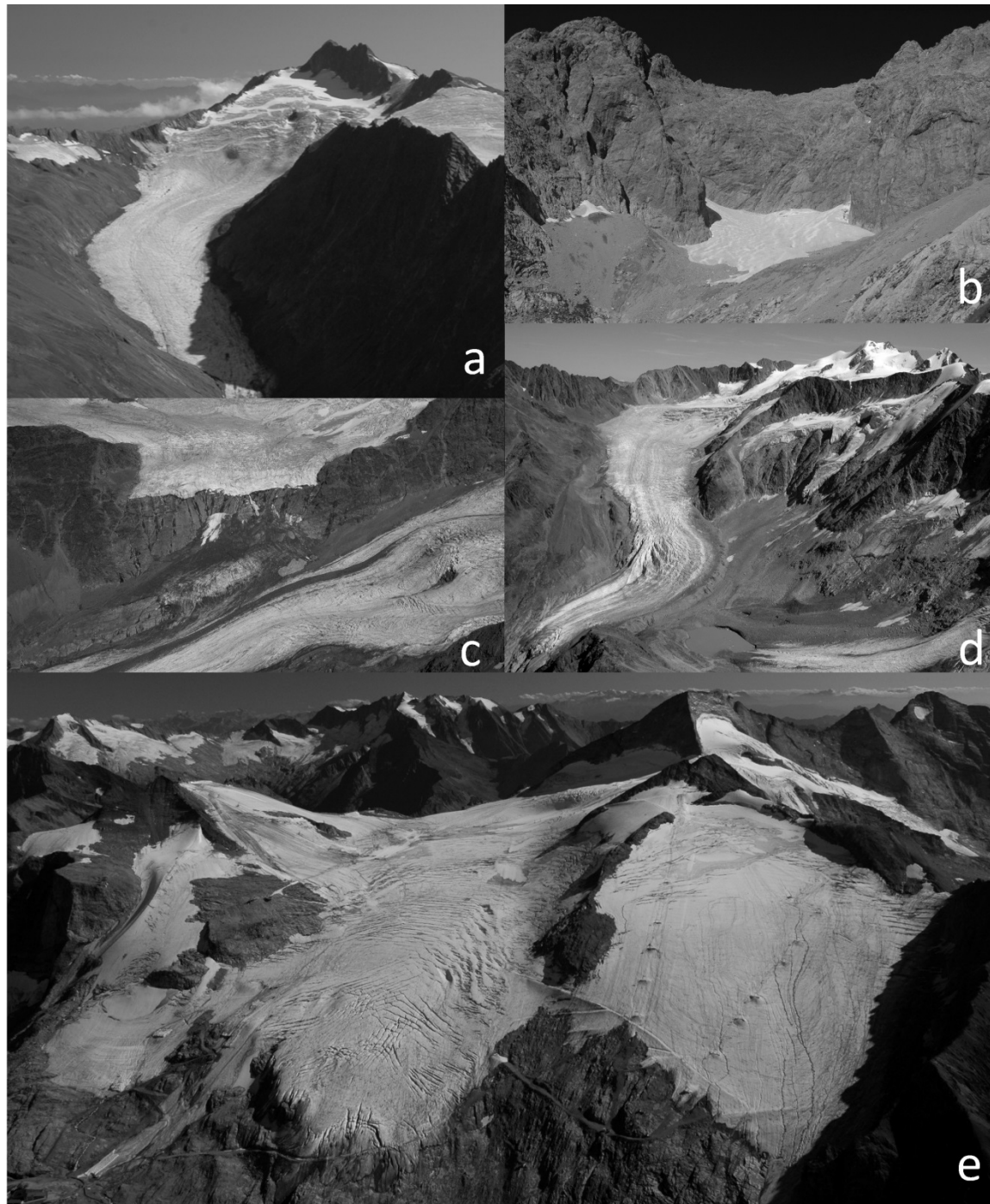
# Österreichisches Gletscherinventar Periode 1

Relative  
Flächen-  
änderung %



Gletscherfläche

Die Reaktion der Gletscher auf das Klima hängt von ihrer Größe und Topographie ab





Große Gletscher haben tiefe Zungen mit starker Ablation, brauchen Jahrzehnte, um ins Gleichgewicht mit dem heutigen Klima zu kommen

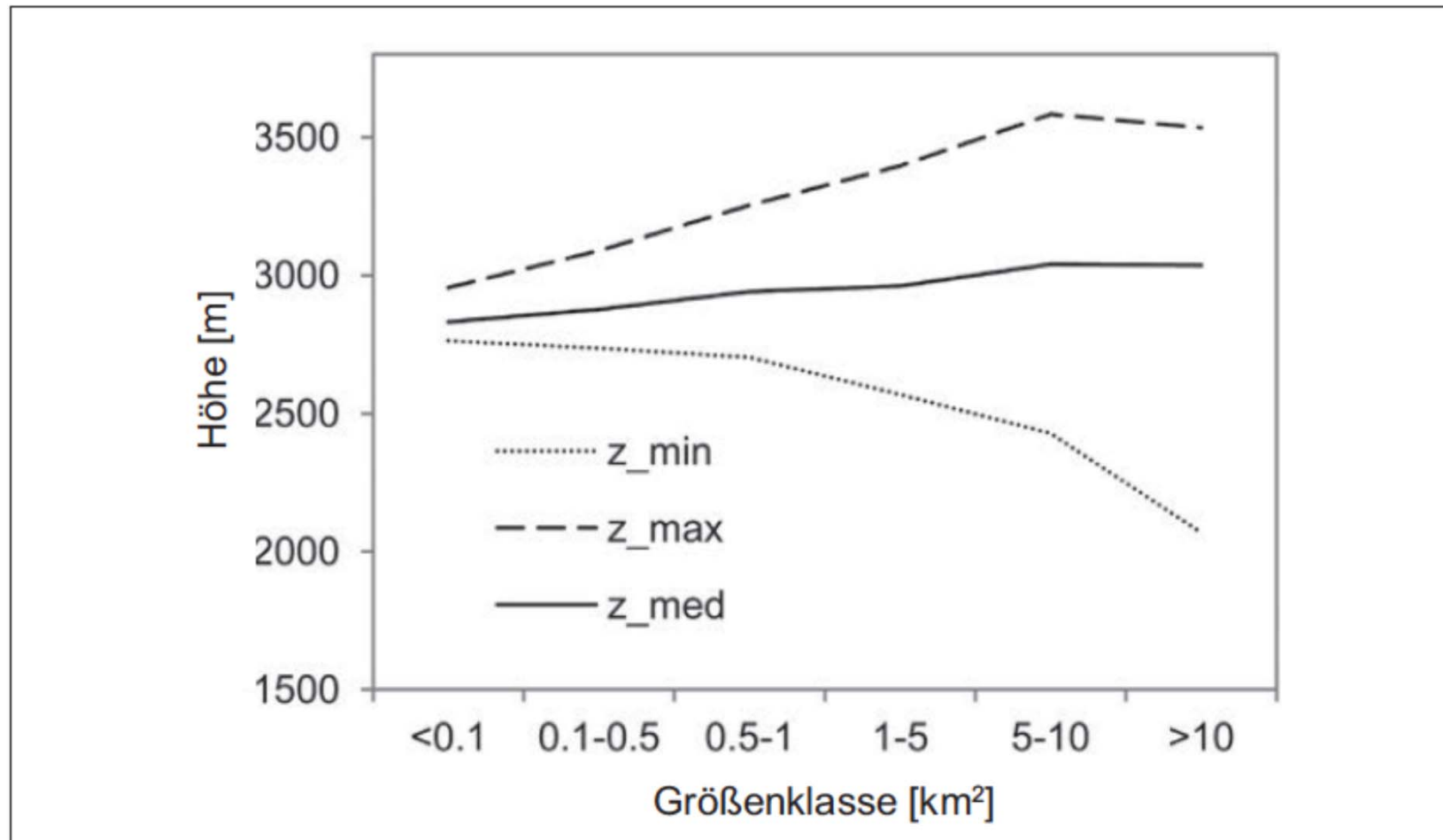


Abb. 7: Mittleres Minimum (zmin), Maximum (zmax) und Median (zmed) der Meereshöhe der Gletscher 1998 als Funktion der Größenklasse



## **Exgletscher**

**Seit 1969  
verschwunden**

**Kleine Hanggletscher  
reagieren sehr schnell  
auf Klimaänderungen**

Kargletscher reagieren vor allem auf Akkumulation, können „temperaturunabhängig“ sein



Dem Mieminger Schneeferner in 2400 m helfen Lawinen, Driftschnee, Schatten und Protalus Rampart









## **Modellierung der Gletscherbilanzen**

$$\text{Schneefall} = (0,6 - 0,06 * T(mo,z)) * N(mo,z)$$

**Umverteilung von der unvergletscherten Umgebung auf die Gletscher in der gleichen Höhe.  
Häufiger Wert 10 – 20 % mehr für die Gletscher**

### **Abzug der Verdunstung/Sublimation**

**Potentielle Schmelze mit Gradtagfaktoren 4 bis 7 mm/Gradtag und T(mo,z)  
Aktuelle Schmelze: Flächen sind nicht zur Gänze schneebedeckt**

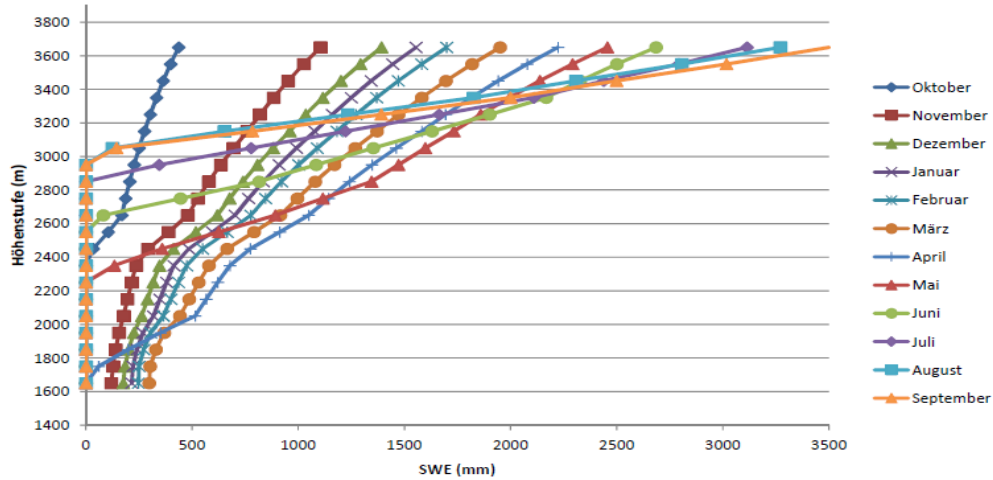
### **Akkumulation auf dem Gletscher**

$$D(mo,z) = D(mo-1,z) + \text{Schneefall} + \text{Umverteilung} - \text{Verdunstung} - \text{aktuelle Schmelze}$$

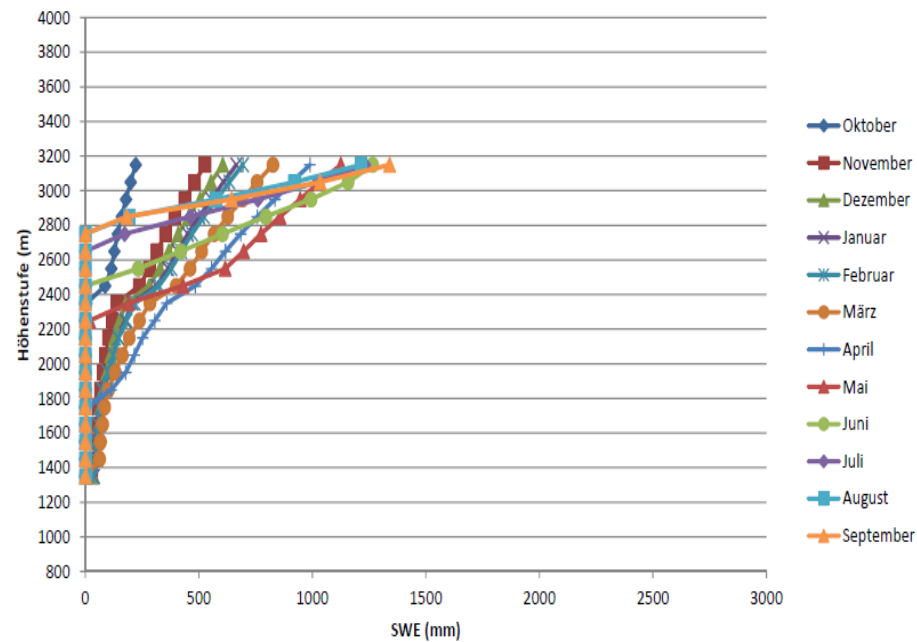
**Das Modell ist an den mittleren monatlichen Abfluss von 84 Pegelstationen für die Perioden 1969-97 und 1998-2006 angepasst worden**



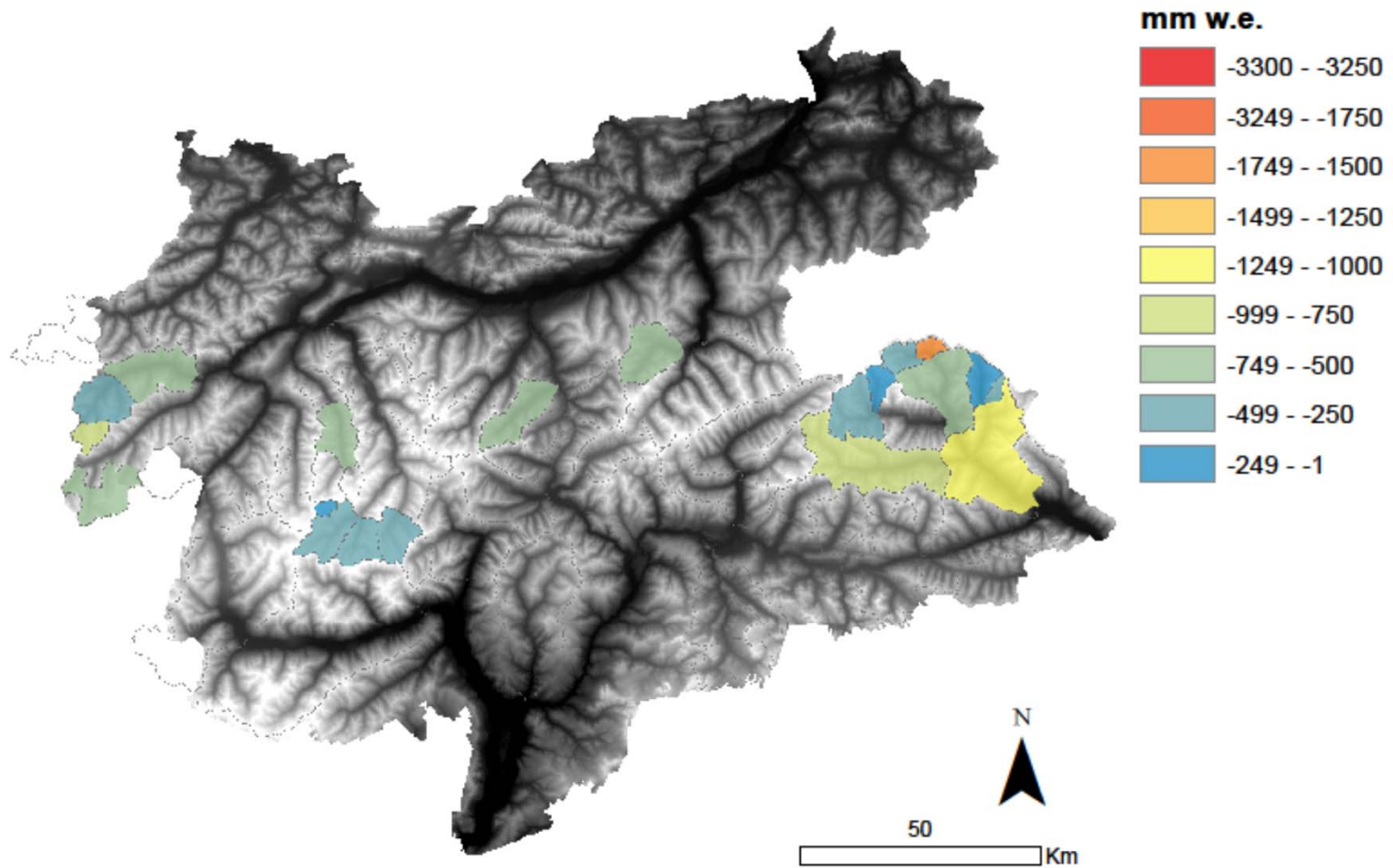
### Schneedeckenentwicklung Innerschlöß 99 - 06



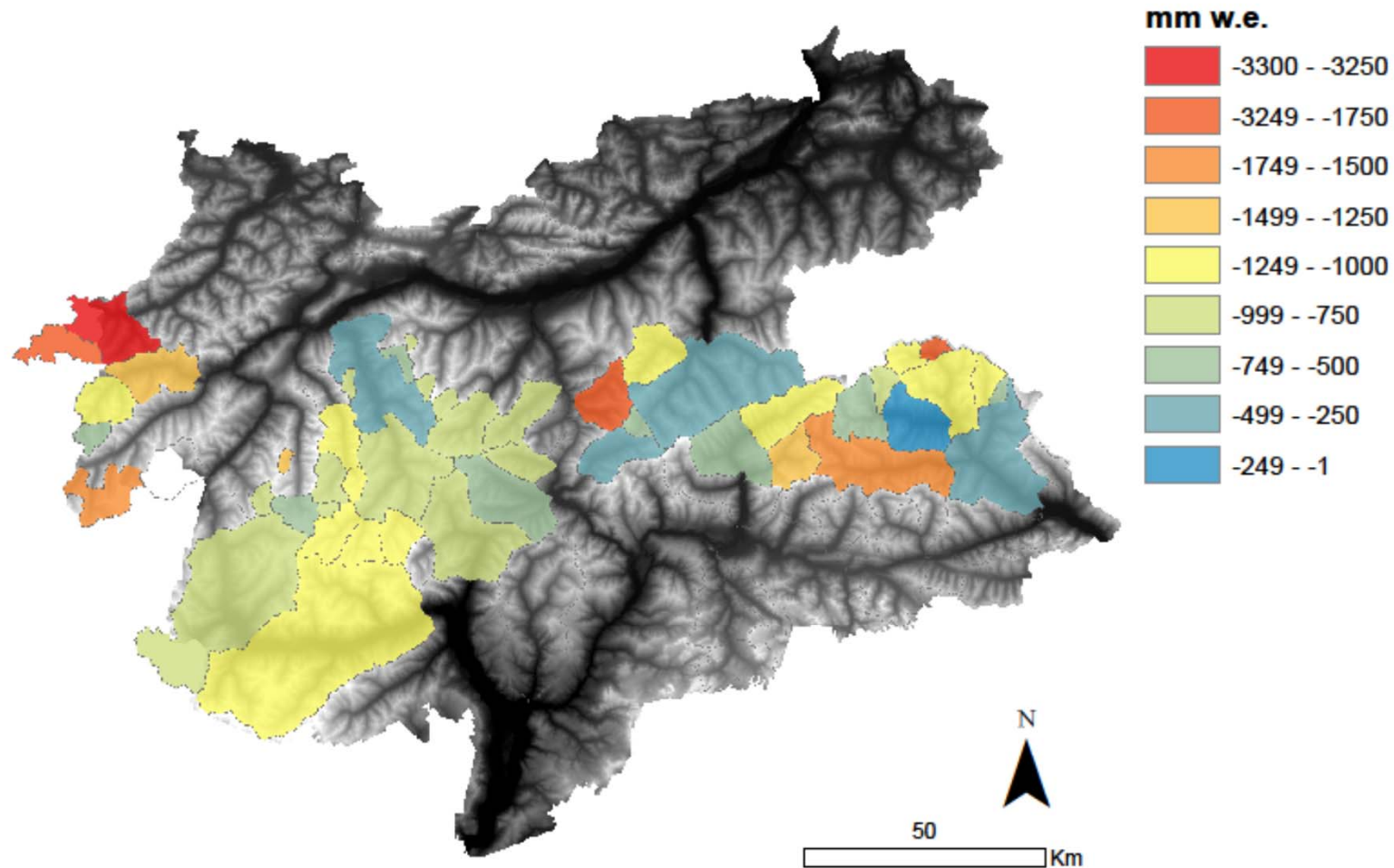
### Schneedeckenentwicklung Pedraces 98 - 06



# Spezifische Massenbilanz der Gletscher, Periode1



## Spezifische Massenbilanz der Gletscher, Periode2



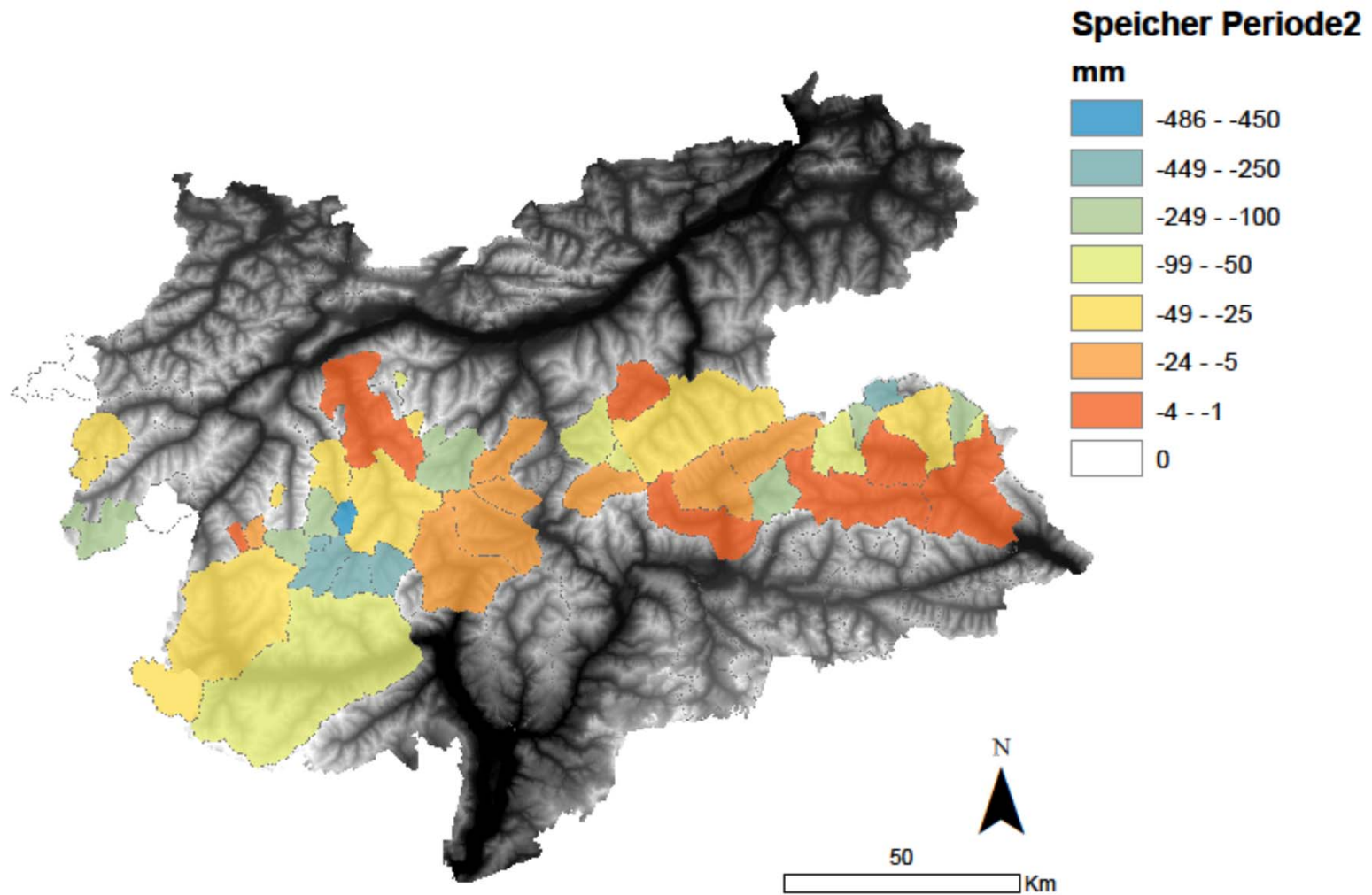
Das ungewichtete Mittel der spezifischen Massenbilanzen der Gletscher in den 28 Einzugsgebieten, zu denen Daten von beiden Perioden vorliegen, war

1. Periode 1970-97  $b = -560$  mm pro Jahr

2. Periode bis 2006  $-1170$  mm pro Jahr

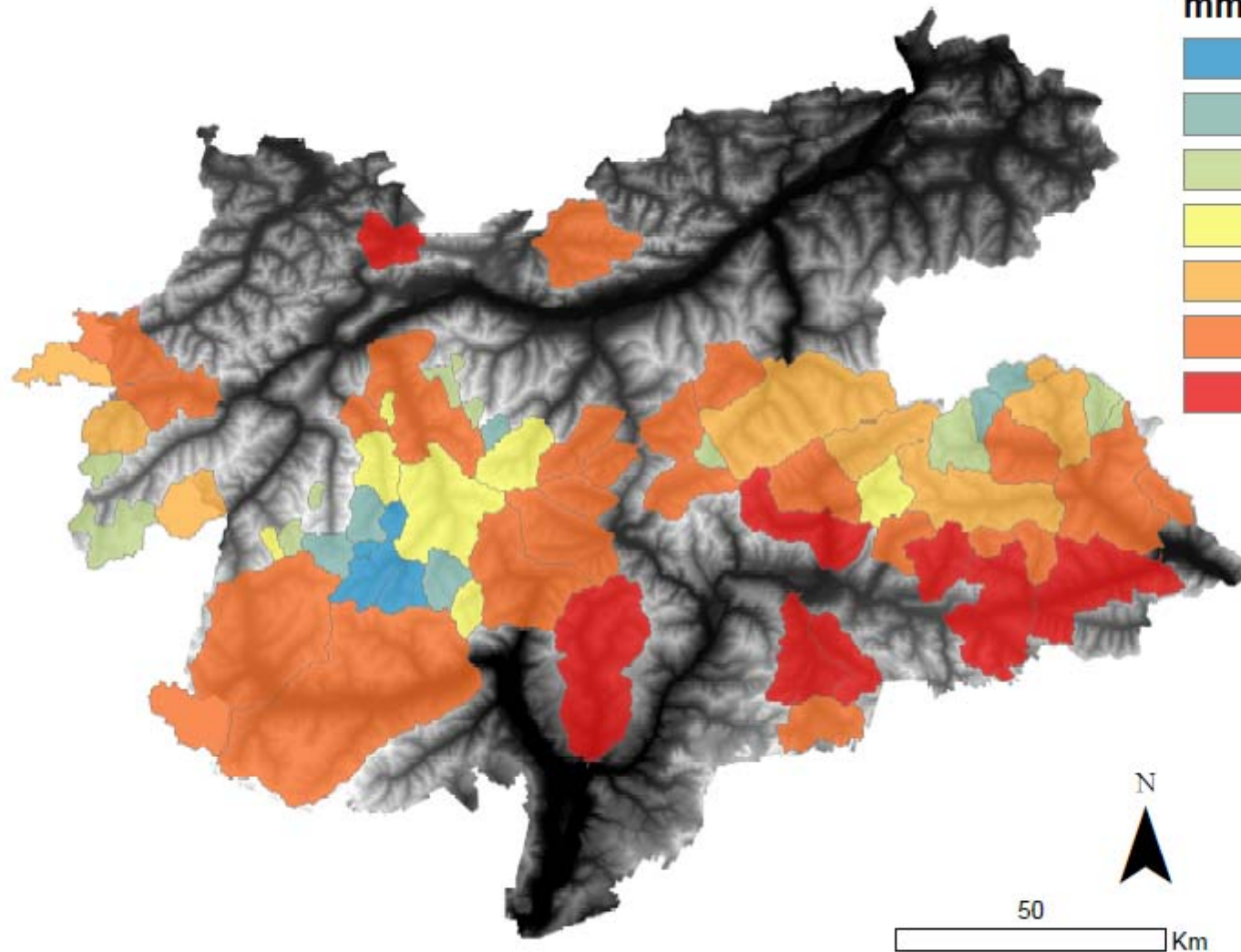
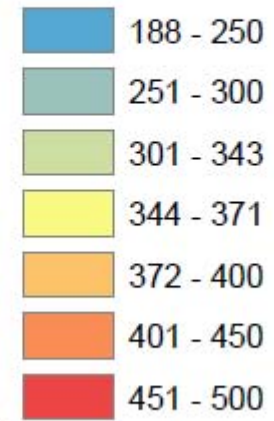
Das heißt, der jährliche Eisverlust von der Gletscherfläche hat sich in Tirol in dieser Zeit verdoppelt.

Die Gebietspeicherung hängt stark von der relativen Vergletscherung ab.



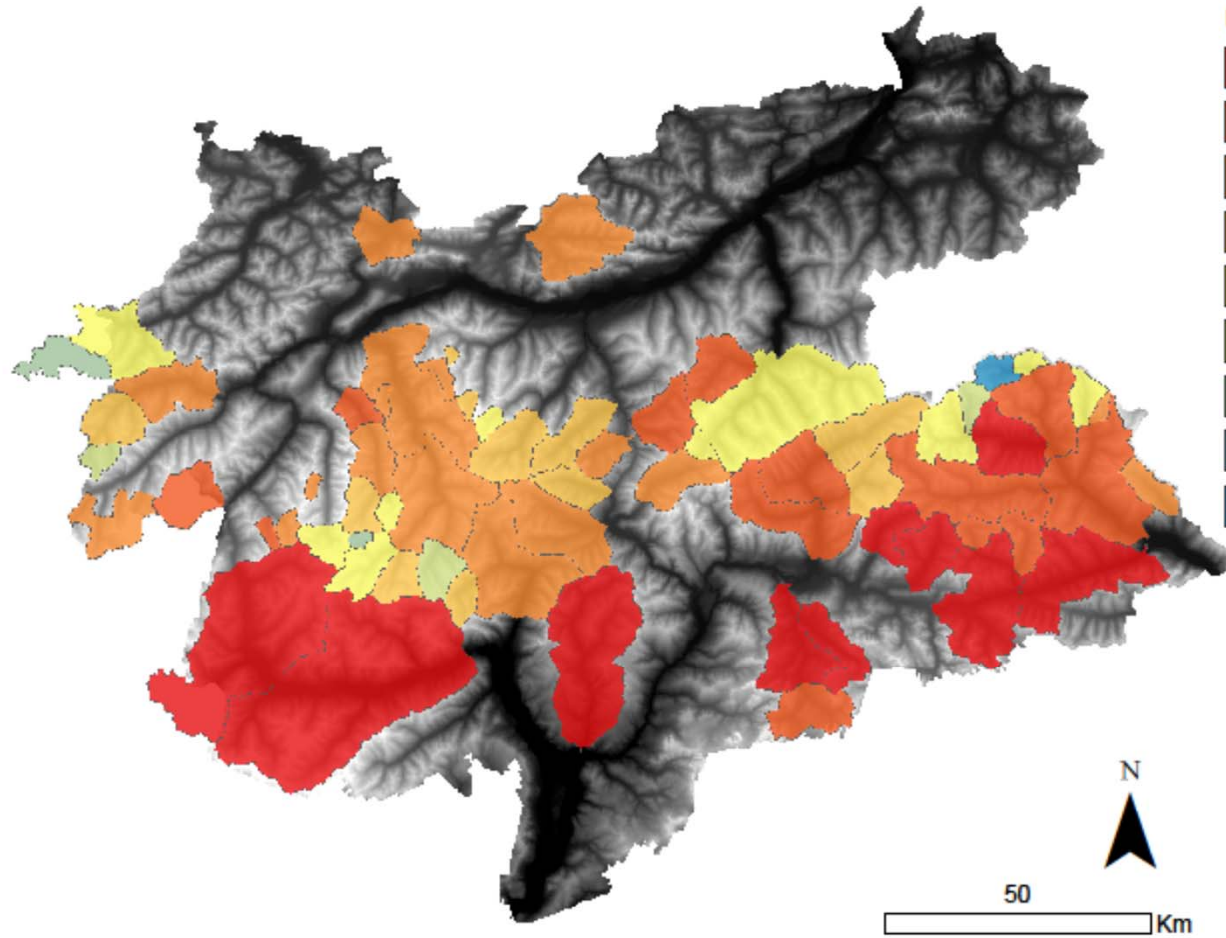
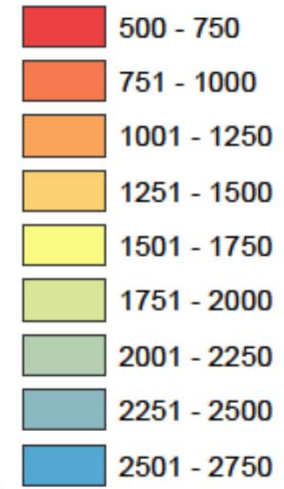
## Verdunstung Periode2

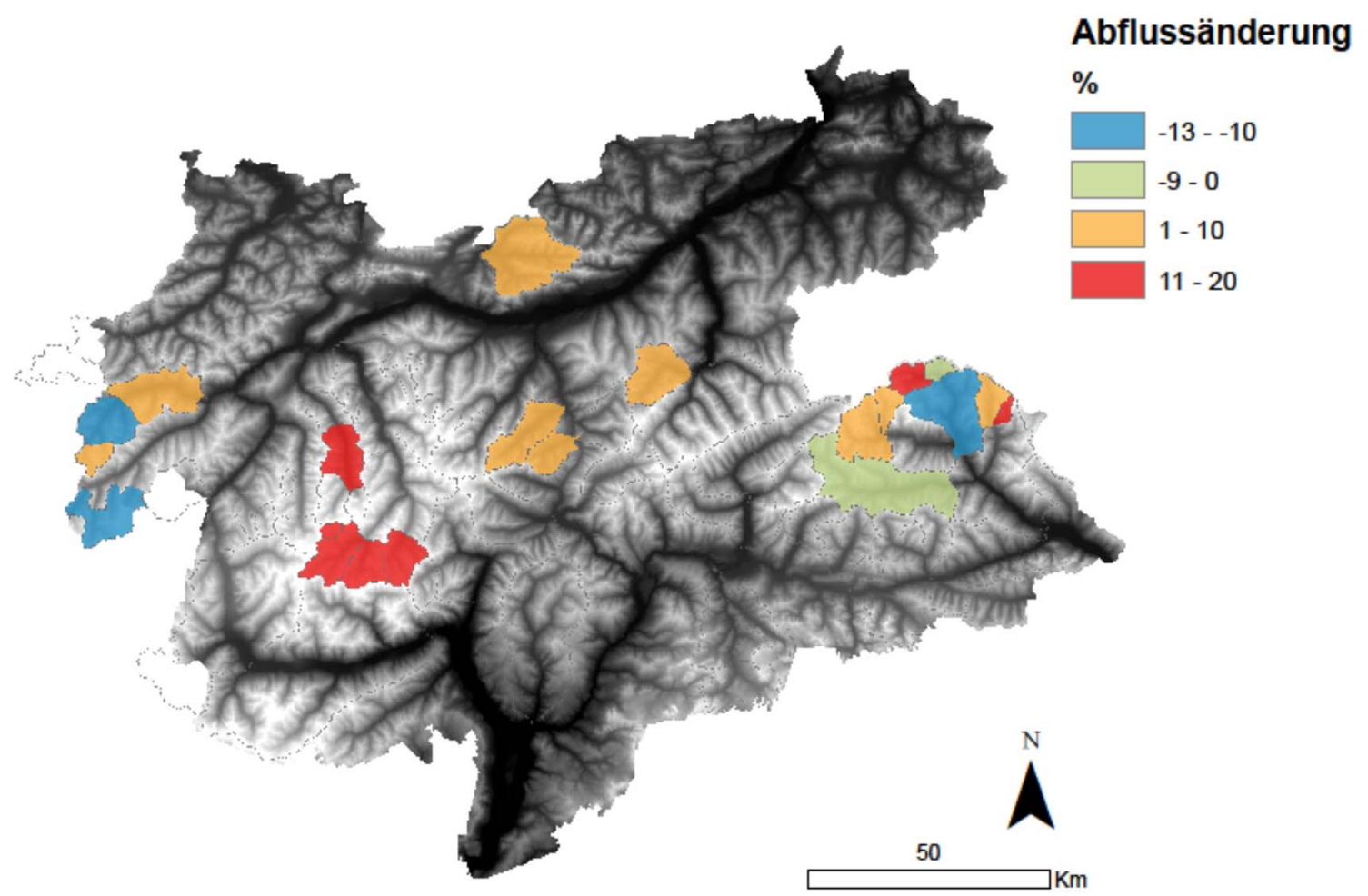
mm



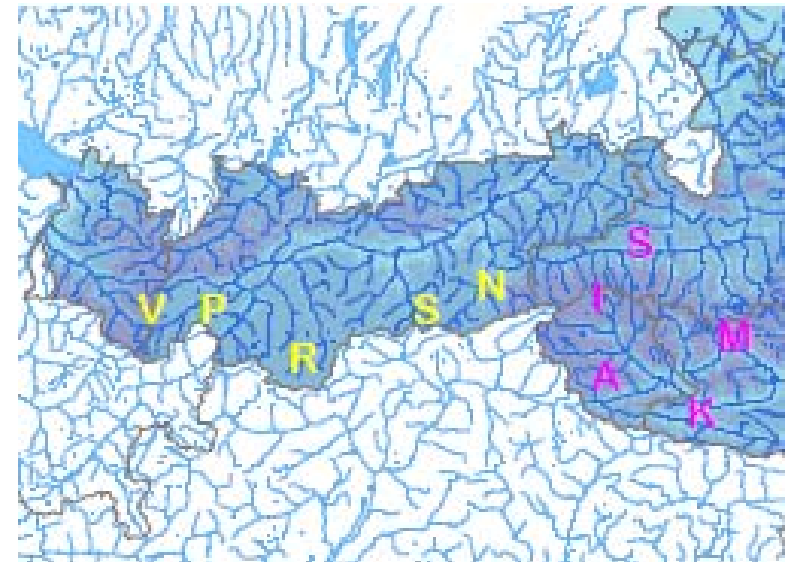
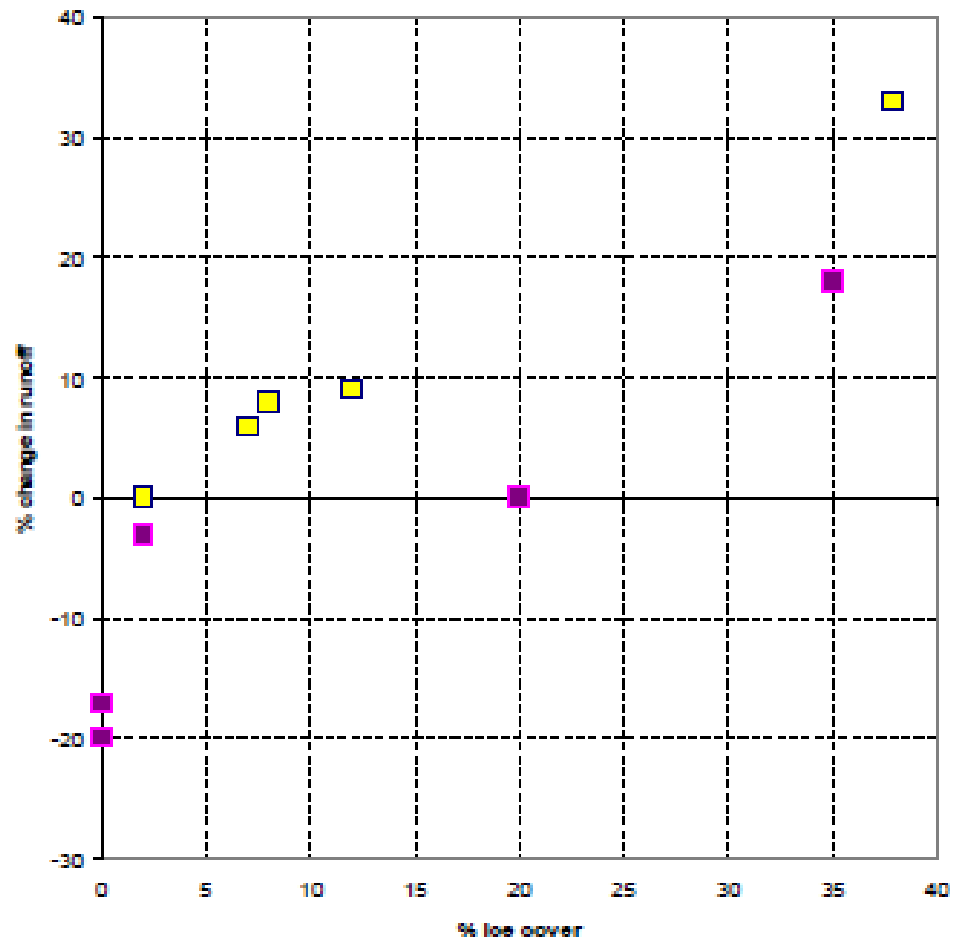
## Abfluss Periode2

mm





% change in runoff 1961-90 to 1985-2003 vs. % glacier cover



Daten HZB



## **Modellierung des Abflusses in der 4. Näherung des OEZ 4.1**

### **Gegeben:**

**Flächen-Höhen-Verteilung des Einzugsgebiets  
Bilanzierter Niederschlag, Schneeanteil, Umverteilungsfaktor,  
Temperatur, aktuelle Schmelze,  
 $dN/dz$ ,  $dT/dz$ , Gradtagfaktor,  
alle in Monatswerten**

### **Daraus berechnet:**

**Potentieller Abfluss  $AP$  (mo)**

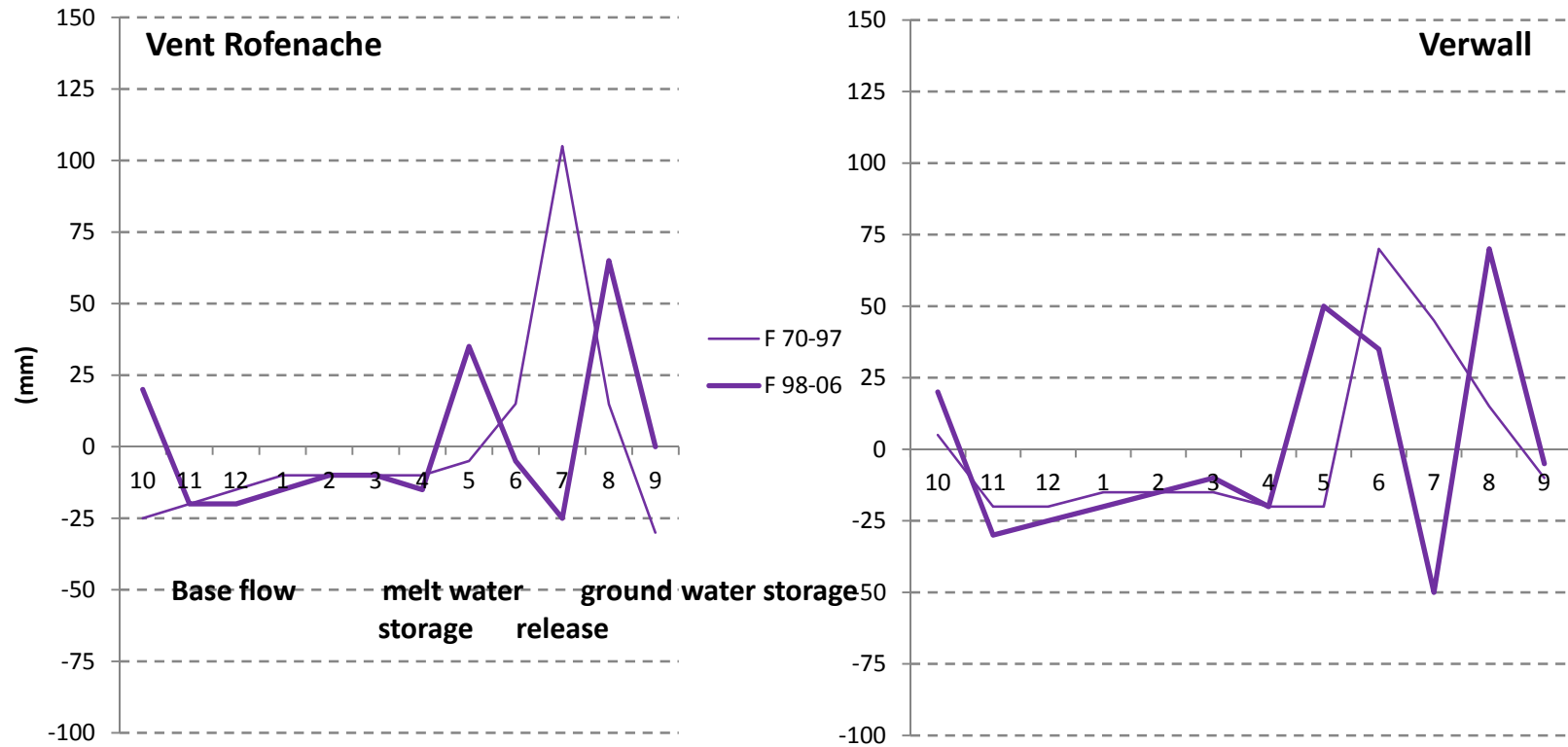
**Die Differenz gemessener Abfluss  $A$  (mo) -  $AP$ (mo) =  $F$  (mo),**

**Ist der Flüssigspeicher,**

**der nicht nur eine hydrologische Größe ist, sondern auch alle Unsicherheiten  
der beteiligten Größen enthält.**

# Flüssige Speicherung: Wasser in der Schneedecke, Grundwasser, Stauseen

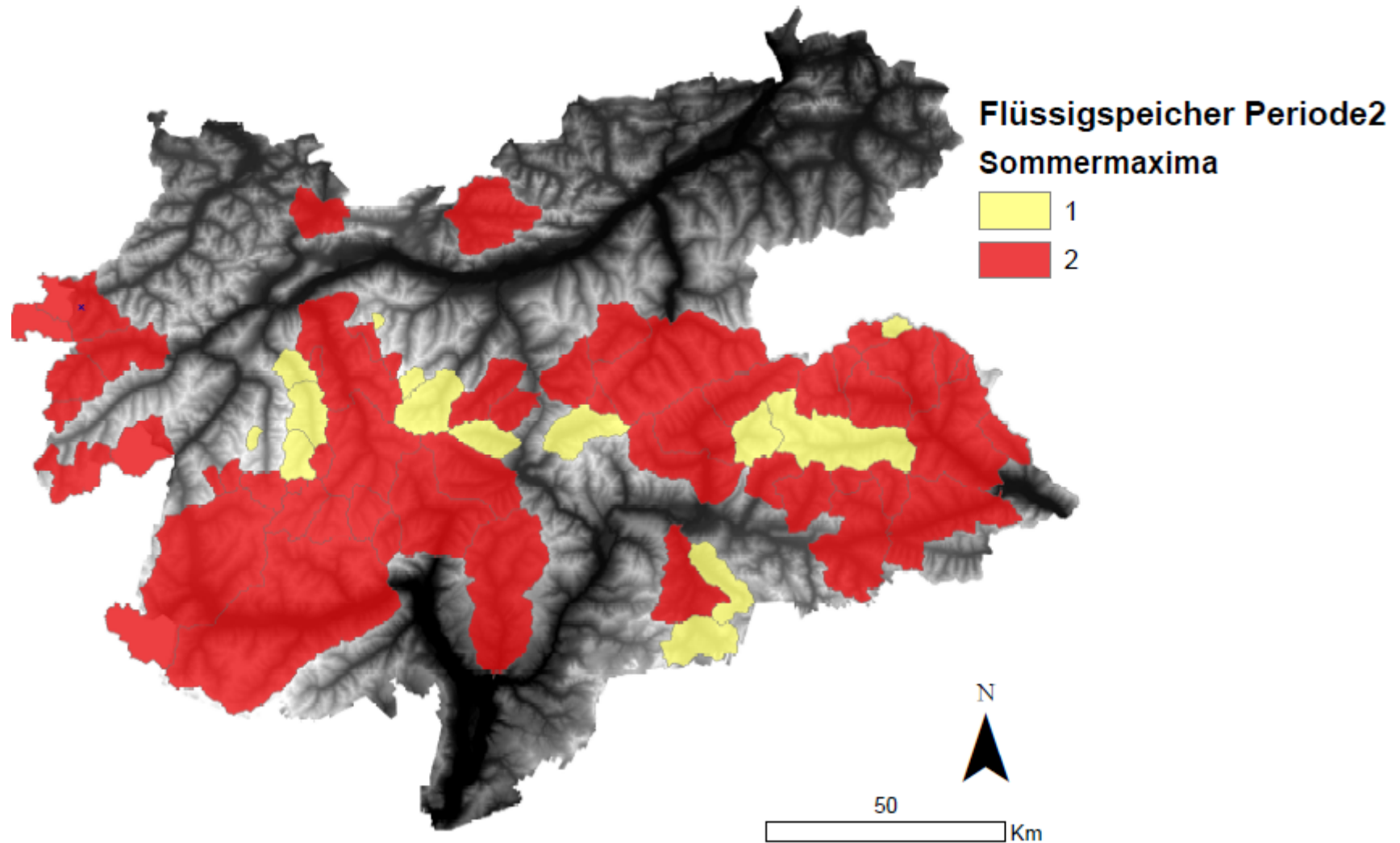
Abfluss = Regen + Schmelzwasser – flüssige Speicherung - Verdunstung



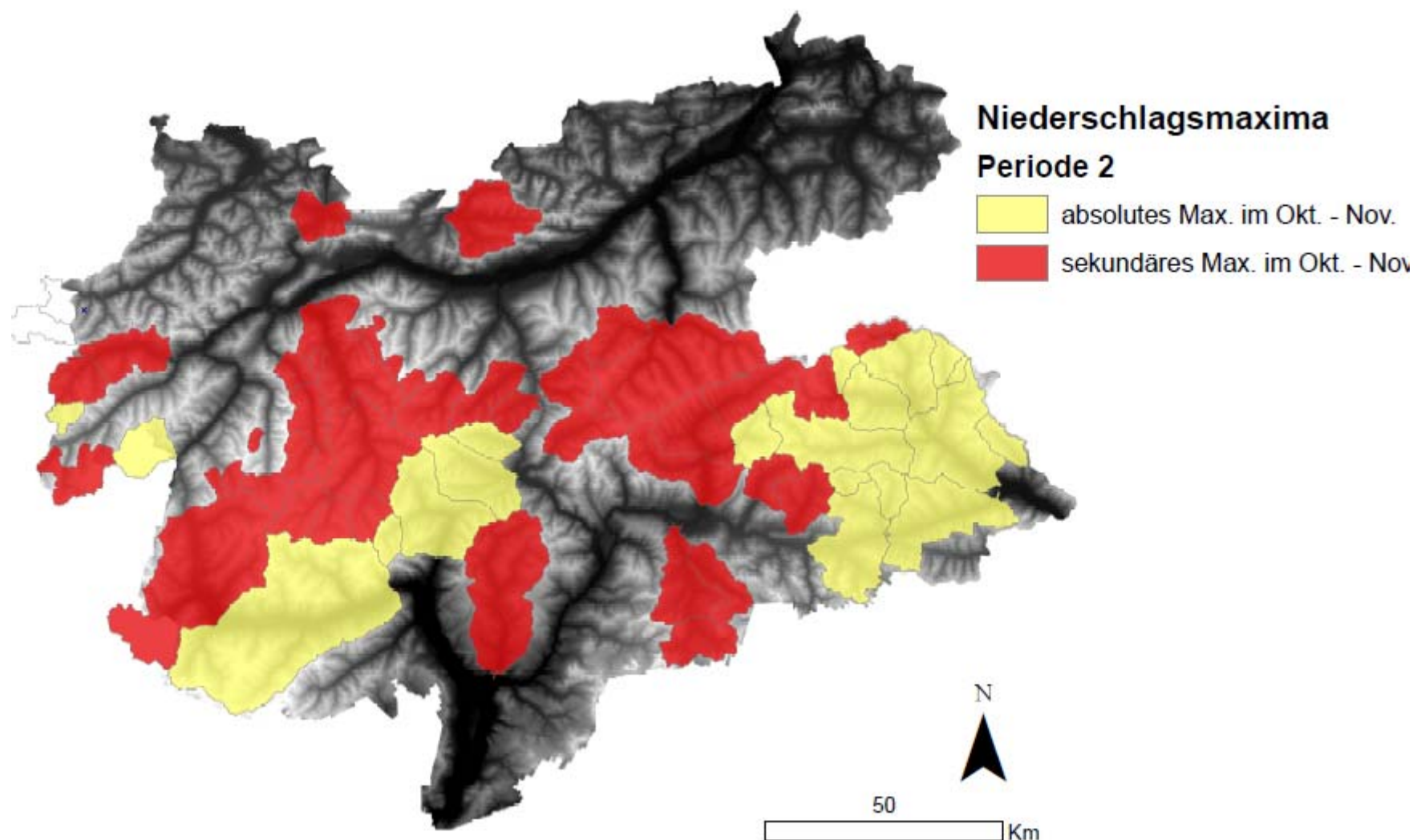
The double peak is F 98 - 06

In der ersten Periode hat das Schmelzen später eingesetzt und das herbstliche Niederschlagsmaximum war weniger entwickelt

In der ersten Periode gab es überwiegend nur 1 Sommermaximum im Flüssigspeicher, in der zweiten 2, dazu in beiden Perioden fast immer ein Oktobermaximum



## Jahresgang des Niederschlags



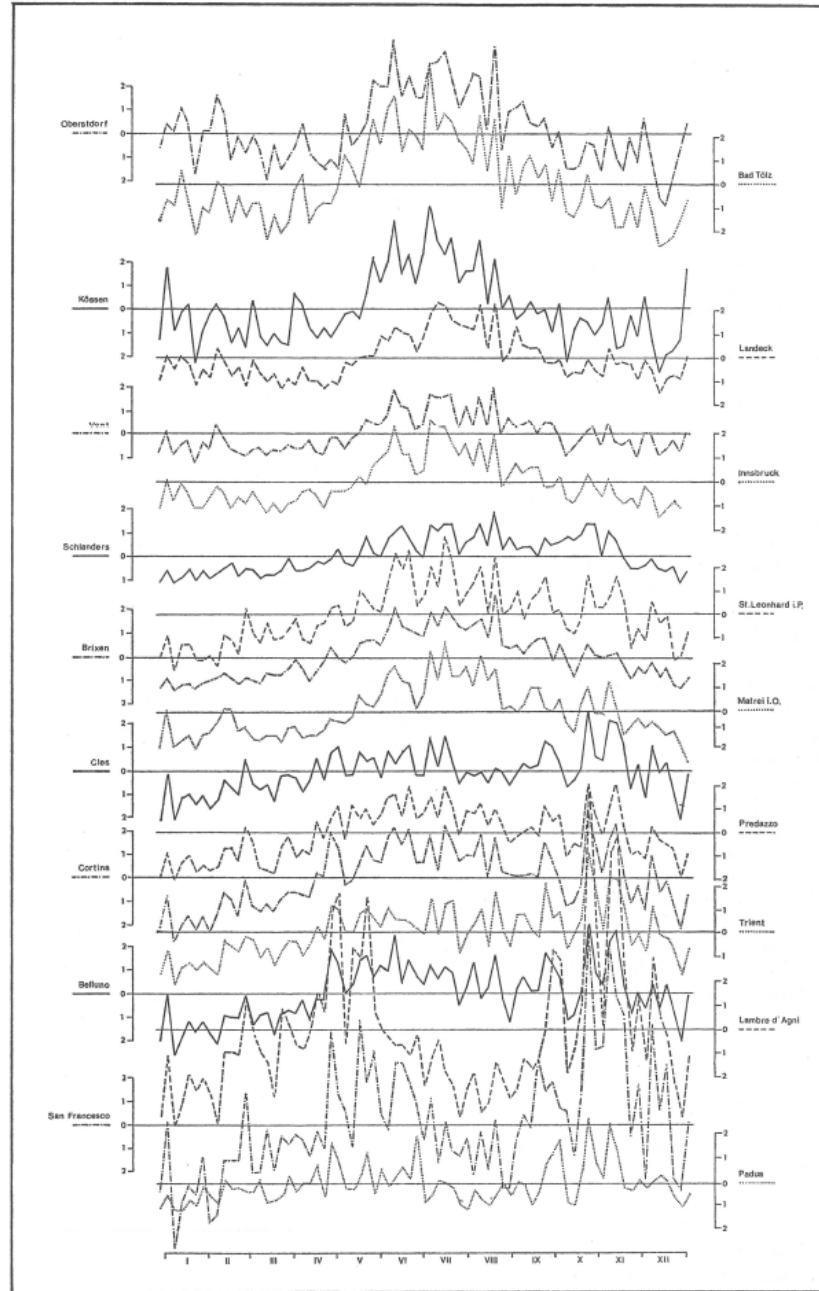
Oberstdorf

Vent

Schlanders

Cles

Belluno



Niederschlag  
Mittelwerte 1931-60  
Fliri 1975

Innsbruck

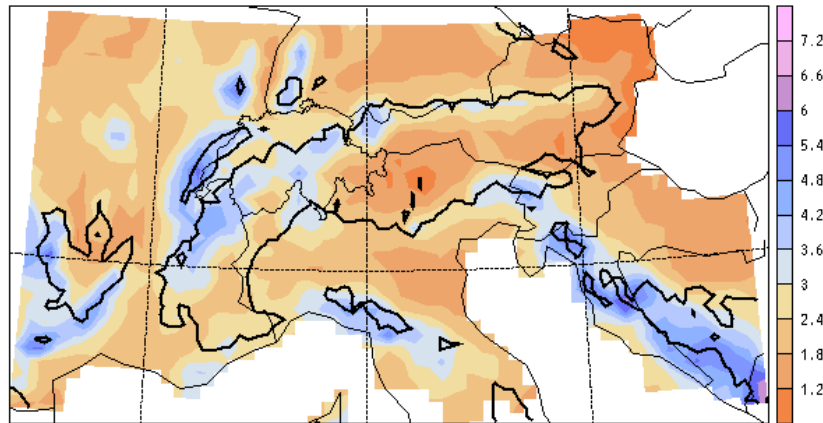
Matrei i.O.

Trient

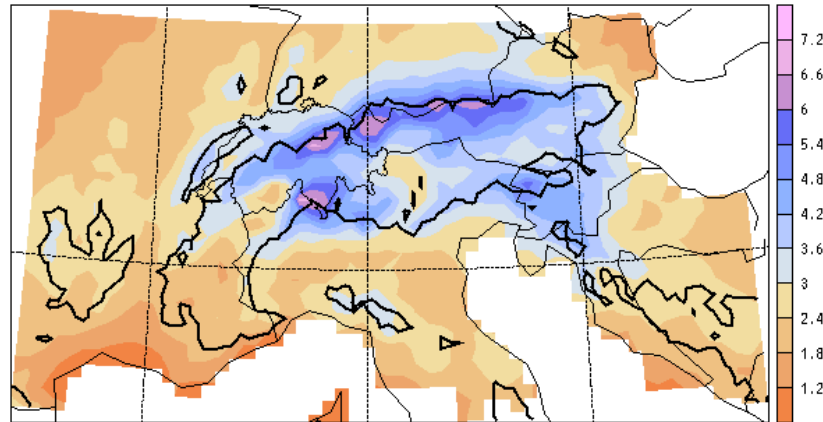
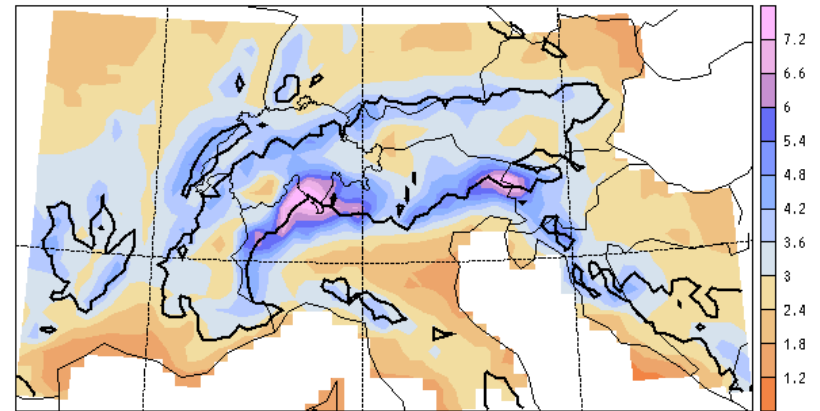
Padua

Abb. 75 Mittlerer Jahresgang der Niederschlagsmengen (in mm je Kalendertag) nach Pentadenmitteln im Querprofil der Alpen in Tirol in der Periode 1931–1960.

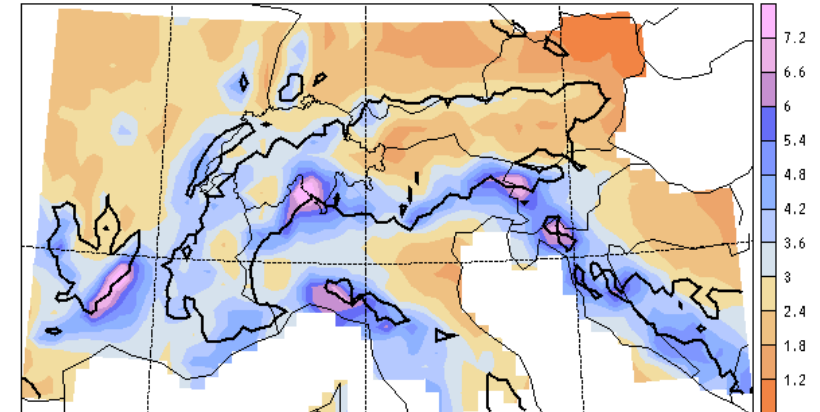
Februar



Mai



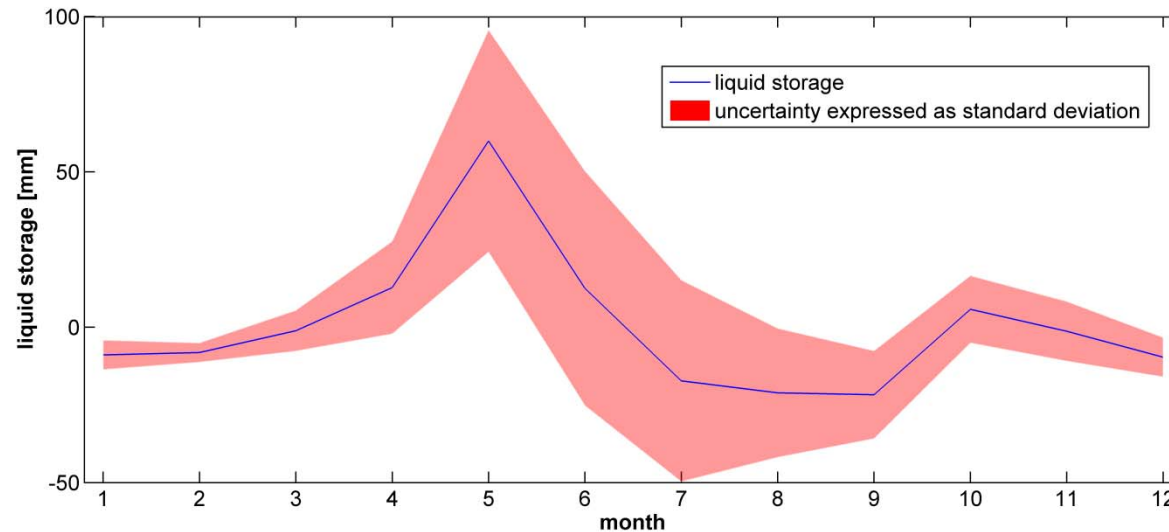
August



Oktober

Frei und Schär 1998

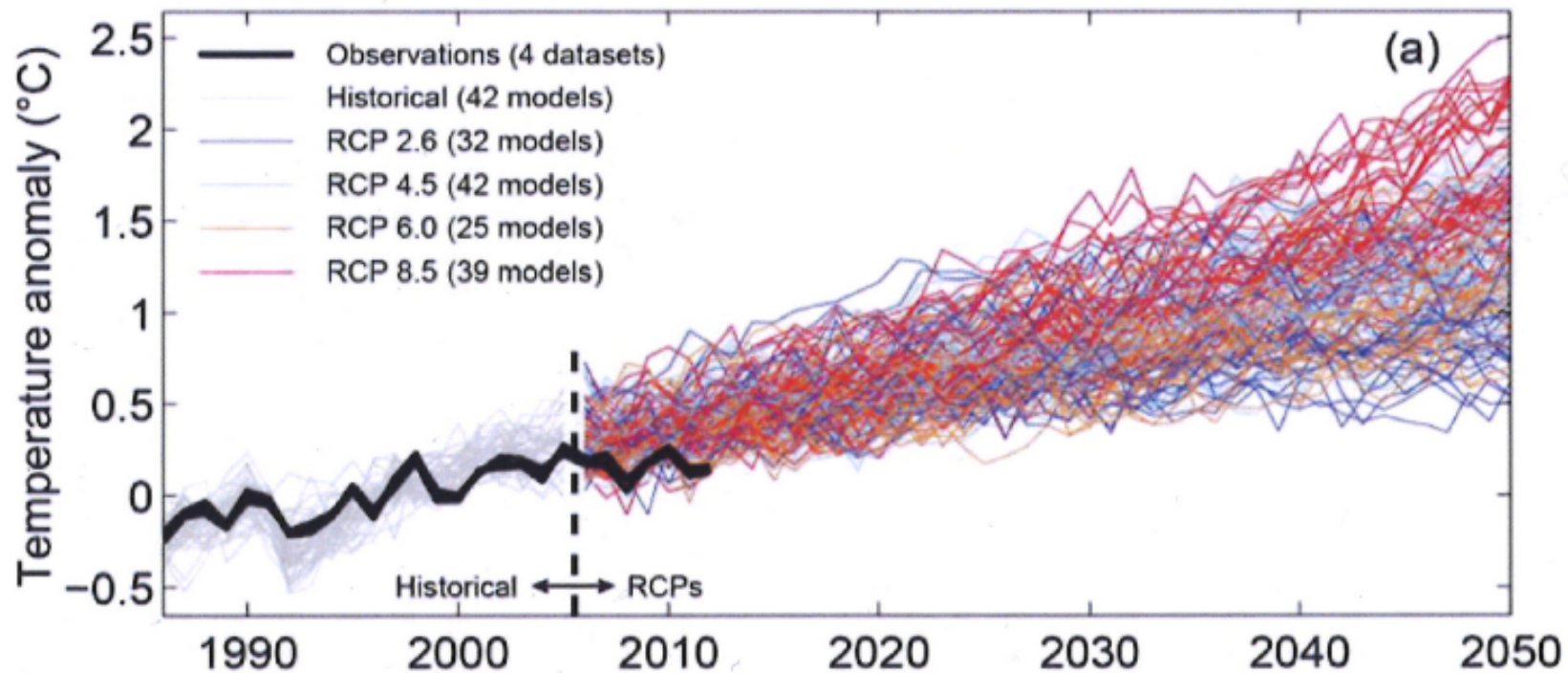
## Monte Carlo Simulation



Jahresgang des Flüssigspeichers mit Unsicherheiten im Einzugsgebiet Isel für die Periode 1969-1997. Die Unsicherheiten resultieren aus einer Monte Carlo Simulation, bei der die Fehlerfortpflanzung von Eingangsgrößen ermittelt wurde. Die Unsicherheiten der Eingangsgrößen und Kalibrierungsparameter wurden dabei anhand von normalverteilten Stichproben für die Temperaturen, die Niederschlagsmengen sowie die Gradtagfaktoren (Normalverteilungen mit einer Standardabweichung von  $0.25^{\circ}\text{C}$  für die monatliche Referenztemperatur, von  $0.5^{\circ}\text{C}$  für die Standardabweichung der monatlichen Temperaturverteilung, von 5% für den monatlichen Referenzniederschlag, von  $0.05^{\circ}\text{C}/100\text{m}$  für den monatlichen vertikalen Temperaturgradienten, von  $2\%/100\text{m}$  für den monatlichen vertikalen Niederschlagsgradienten und von  $0.5\text{mm}/(\text{d}^{\circ}\text{C})$  für den monatlichen Gradtagfaktor (**Martin Ortner, 2013**)

Projektionen des globalen Klimas werden auf die Alpen angepasst.  
Sie hängen von den Emissionsszenarien ab (Treibhausgase und Aerosole).  
Eine große Zahl von Klimamodellen gibt für jedes dieser Emissionsszenarien  
eine große Zahl von verschiedenen Ergebnissen.

Global mean temperature near-term projections relative to 1986–2005





Ein Szenario mit zeitlichem Ablauf. Weber, Prasch, Braun 2009

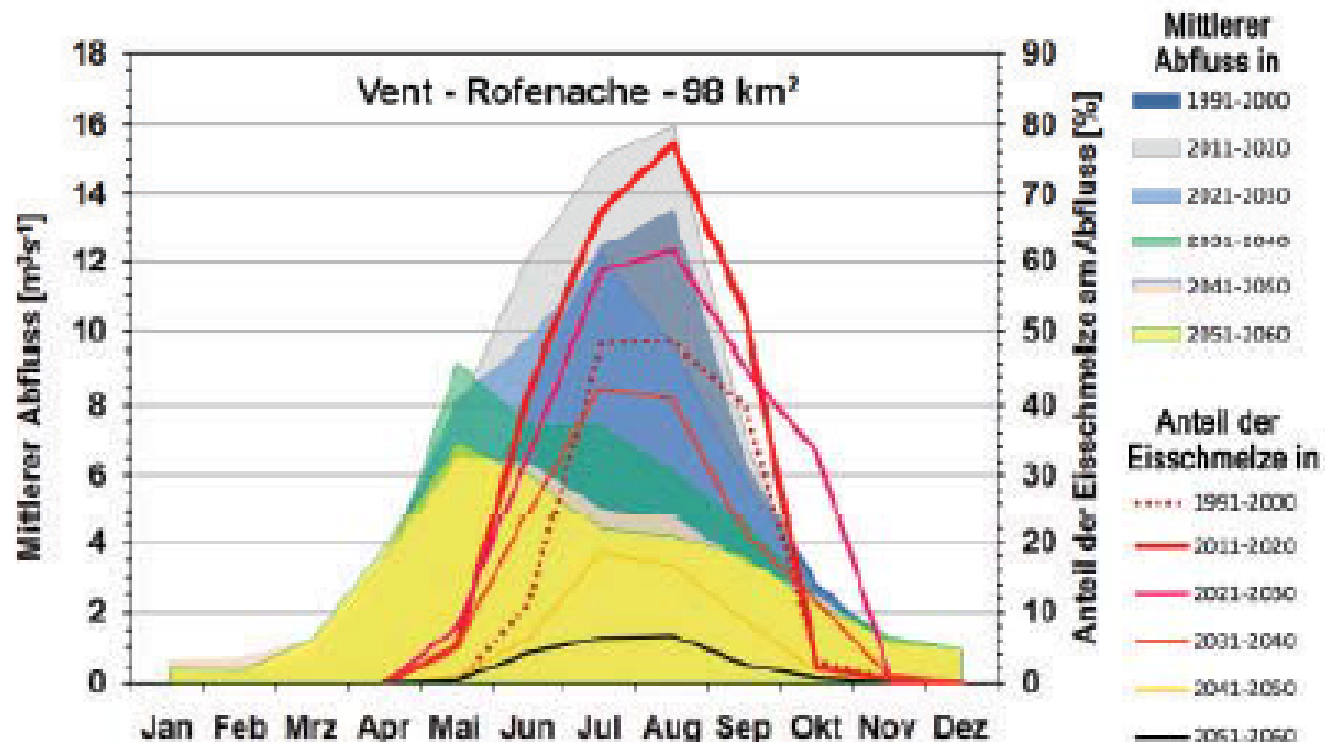


Abbildung 9: Der durchschnittliche Jahresgang des Abflusses (farbige Flächen, linke Skala) und der korrespondierende prozentuale Anteil des Schmelzwassers von den Gletschern (Linien, rechte Skala) im gegenwärtig zu 35% vergletscherten Einzugsgebiet der Rofenache in Vent.

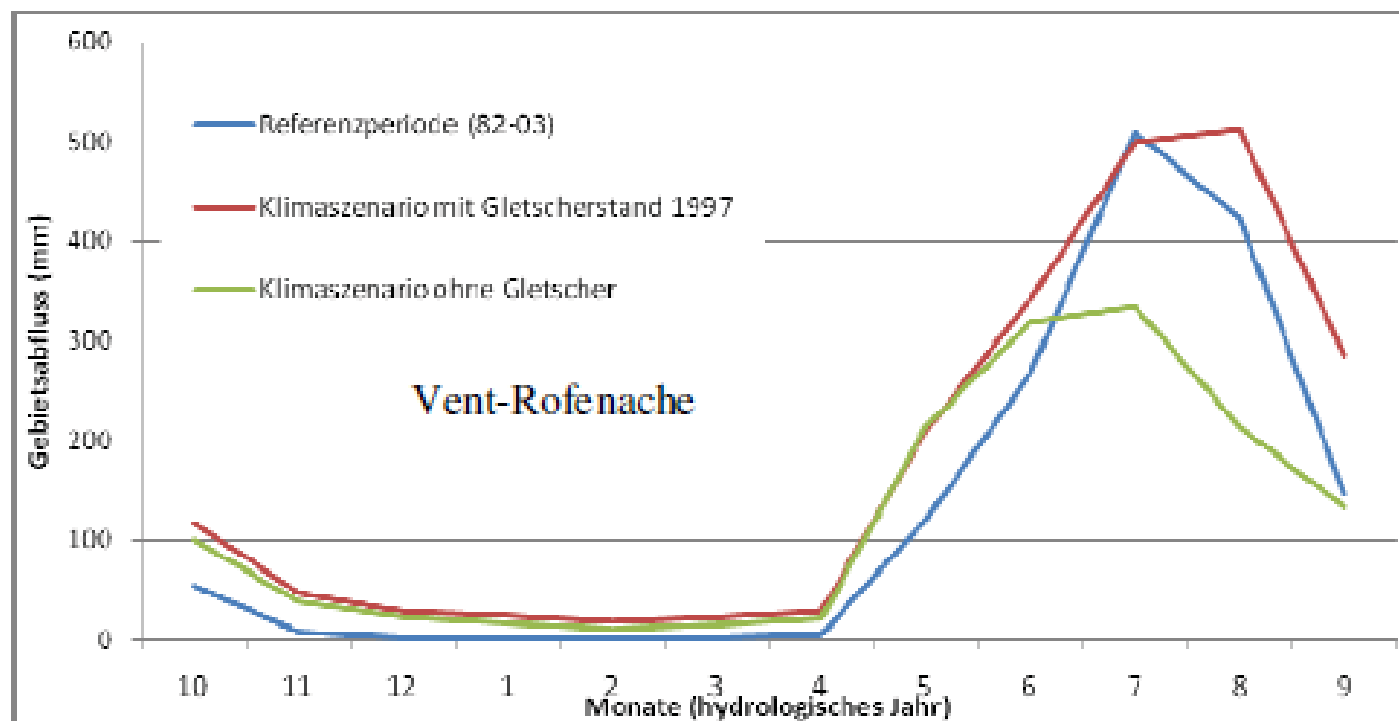
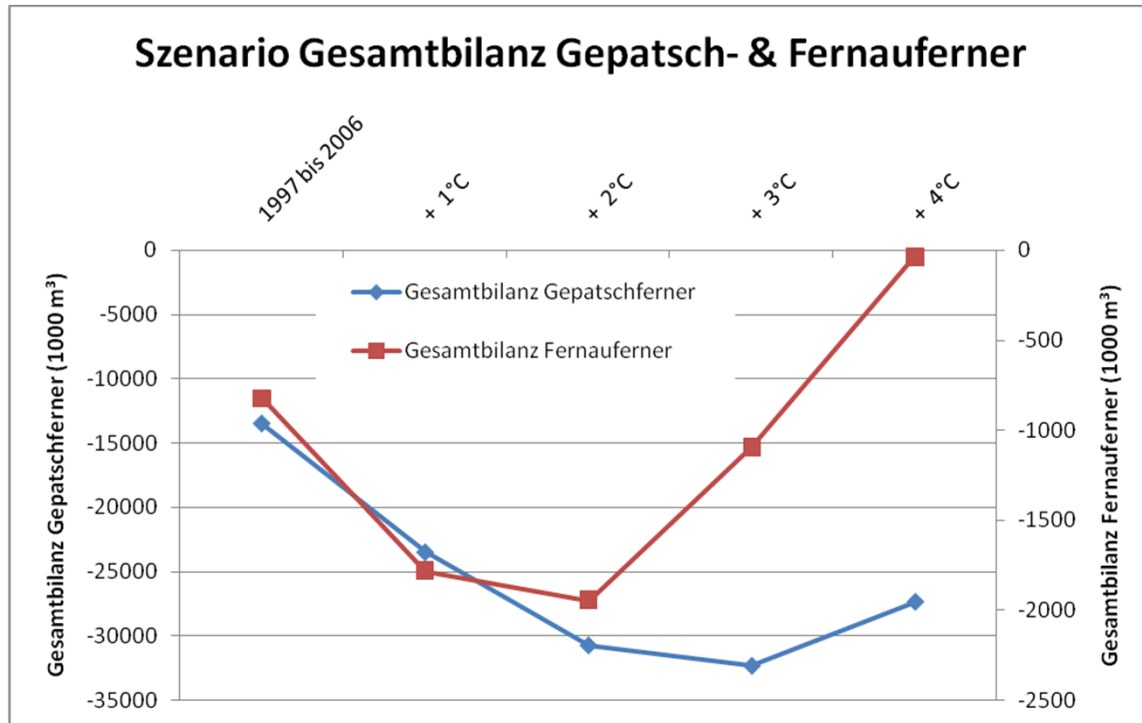


Abbildung 11: Gemessener Abfluss (Mittelwert 1982-2003) und Klimaszenarien für das EZG Vent-Rofenache mit Gletscherfläche von 1997 und ganz ohne Gletscher. Reaktion des Abflussverhaltens auf eine monatsabhängige Temperatur- und Niederschlagsänderung wie im Text beschrieben (gerechnet mit heutigem Flüssigwasserspeicher (Boden, Schneedecke, Gletscher)).

Das hier verwendete Szenario basiert auf einer Regionalisierung des A1B Szenarios des letzten IPCC Berichtes (Solomon, 2007; reclip:more 2007) und gilt für die Änderung der Referenzperiode bis in die Jahre 2020-29. Es zeigt wärmere, trockenere Sommer (Mai-Oktober: Niederschlag -20%, Temperatur +2°C) und geringfügig wärmere, niederschlagsreichere Winter (November – April: Niederschlag +15%, Temperatur +1°C).

### Scenario of annual volume loss of Gepatschferner (17 km<sup>2</sup>) and Fernaufener (1km<sup>2</sup>)



Das interessiert die Wasserwirtschaft

**Achtung:**

**Die heutigen Gletscher befinden sich noch nicht im Gleichgewicht mit dem heutigen Klima. Diese Altlasten (commitments) müssen in den Projektionen berücksichtigt werden.**

**Lineare, auch temperaturabhängige Extrapolationen, sind in diesem Umfeld wissenschaftliche Herausforderungen.**

**Aber auch wenn verschiedene Szenarien und Modelle verschiedene Details projizieren – sie stimmen darin überein, dass die Rolle der Gletscher im Wasserhaushalt der Ostalpen in einigen Jahrzehnten unbedeutend wird.**

Danke !

