



Versuchsanstalt für Wasserbau,  
Hydrologie und Glaziologie  
der Eidgenössischen  
Technischen Hochschule Zürich

# **Gletscher- und Abflussveränderungen im Zeitraum 1900-2100 in sieben Einzugsgebieten der Schweiz**

VAW-Teilprojekt von CCHydro

Schlussbericht

Im Auftrag des  
Bundesamts für Umwelt BAFU

Zürich, Mai 2011

## **Impressum**

- Auftraggeber:** Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Hydrologie, CH-3003 Bern  
Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).
- Auftragnehmer:** ETH Zürich, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW)
- Autoren:** Martin Funk, Andreas Bauder, Daniel Farinotti, Stephanie Usselman, Jeannette Gabbi
- Begleitung BAFU:** David Volken, Bruno Schädler, Hugo Aschwanden, Dominique Bérod, Gian Reto Bezzola, Willy Geiger, Roland Hohmann, Adrian Jakob, Ronald Kozel, Petra Schmockler-Fackel
- Hinweis:** Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

## Zusammenfassung

Der Gletscherrückzug in den Alpen, der seit dem Ende der kleinen Eiszeit im Gange ist und sich seit den 80er Jahren verstärkt hat, ist ein deutliches Anzeichen für die voranschreitende Klimaerwärmung. Aufgrund des erwarteten Temperaturanstiegs, welcher durch verschiedene Klimastudien belegt wird, ist in Zukunft mit einem noch ausgeprägteren Gletscherschwund zu rechnen. Als Folge davon wird das Abflussregime in hochalpinen Räumen spürbaren Änderungen unterworfen sein.

Das Ziel dieser Studie ist es, den Einfluss der Klimaerwärmung auf die Gletscher beziehungsweise auf die Abflussverhältnisse für ausgewählte vergletscherte Einzugsgebiete bis zum Ende des 21. Jahrhunderts zu untersuchen. Dazu wurde ein kombiniertes hydro-glaziologisches Modell angewendet, welches die Wasserbilanz in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung berechnet und die Gletscheroberfläche in jährlichen Zeitschritten aktualisiert. Um die Gletscherveränderungen in Zukunft modellieren zu können, muss das Eisvolumen sowie die räumliche Eisvolumenverteilung bekannt sein. Das Modell wurde mittels Eisvolumenänderungen in der Vergangenheit, Massenbilanz- sowie Abflussmessungen in einem iterativen Verfahren kalibriert. Für die klimatische Entwicklung, wurden die neusten Klimaszenarien des Instituts für Atmosphäre und Klima (IAC) der ETH Zürich verwendet.

Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts werden die Gletscher einen starken Rückgang erfahren. Aufgrund der Modellrechnungen ist zu erwarten, dass im Jahr 2100 die meisten der untersuchten Einzugsgebiete praktisch eisfrei sein werden. Ausgenommen sind einzelne Eisreste in sehr hohen Lagen. Als eine Folge dieses Rückzuges werden die mittleren Jahresabflüsse in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts weiter ansteigen. In einer darauffolgenden Periode werden die Abflussmengen jedoch zum Teil stark zurückgehen und unter das heutige Niveau fallen. Das Ausmass des Abflussrückgangs hängt stark vom jeweiligen Gebiet ab, insbesondere von dessen Vergletscherung. Des Weiteren kommt es zu einer Veränderung des Abflussregimes. Aufgrund des Übergangs von einem Eisschmelze- zu einem Schneeschmelze-dominierten Abflussregime werden in Zukunft Abflussspitzen bereits Ende Juni und Anfangs Juli erreicht, rund ein bis zwei Monate früher als heute.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung und Auftrag . . . . .	1
1.2	Aufbau des Berichtes . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Untersuchungsgebiete</b>	<b>3</b>
2.1	Einzugsgebiet Aletsch . . . . .	3
2.2	Einzugsgebiet Rhone . . . . .	5
2.3	Einzugsgebiet Trift . . . . .	7
2.4	Einzugsgebiet Gries . . . . .	9
2.5	Einzugsgebiet Findelen . . . . .	11
2.6	Einzugsgebiet Silvretta . . . . .	13
2.7	Einzugsgebiet Morteratsch . . . . .	15
<b>3</b>	<b>Gletscherentwicklungs- und Abflussmodell <i>GERM</i></b>	<b>17</b>
3.1	Akkumulation . . . . .	18
3.2	Ablation . . . . .	18
3.3	Gletscherentwicklung . . . . .	19
3.4	Evapotranspiration . . . . .	20
3.5	Abflussbildung . . . . .	20
<b>4</b>	<b>Datengrundlagen</b>	<b>23</b>
4.1	Geländemodelle . . . . .	23
4.2	Eisvolumenänderungen . . . . .	24
4.3	Massenbilanzmessungen . . . . .	25
4.4	Abflussmessungen . . . . .	26
4.5	Eisdickenverteilung . . . . .	27
4.6	Meteorologische Daten . . . . .	28

<b>5</b>	<b>Resultate</b>	<b>35</b>
5.1	Einzugsgebiet Aletsch . . . . .	35
5.1.1	Gletscherentwicklung . . . . .	35
5.1.2	Abflussentwicklung . . . . .	38
5.2	Einzugsgebiet Rhone . . . . .	41
5.2.1	Gletscherentwicklung . . . . .	41
5.2.2	Abflussentwicklung . . . . .	43
5.3	Einzugsgebiet Trift . . . . .	46
5.3.1	Gletscherentwicklung . . . . .	46
5.3.2	Abflussentwicklung . . . . .	46
5.4	Einzugsgebiet Gries . . . . .	51
5.4.1	Gletscherentwicklung . . . . .	51
5.4.2	Abflussentwicklung . . . . .	51
5.5	Einzugsgebiet Findelen . . . . .	56
5.5.1	Gletscherentwicklung . . . . .	56
5.5.2	Abflussentwicklung . . . . .	56
5.6	Einzugsgebiet Silvretta . . . . .	61
5.6.1	Gletscherentwicklung . . . . .	61
5.6.2	Abflussentwicklung . . . . .	61
5.7	Einzugsgebiet Morteratsch . . . . .	66
5.7.1	Gletscherentwicklung . . . . .	66
5.7.2	Abflussentwicklung . . . . .	68
<b>6</b>	<b>Schlussfolgerungen</b>	<b>71</b>
6.1	Untersuchte Gebiete . . . . .	71
6.2	Gletscherentwicklung . . . . .	73
6.3	Abflussentwicklung . . . . .	73
6.4	Unsicherheiten und weiterer Forschungsbedarf . . . . .	75

# Kapitel 1

## Einleitung

Gletscher kontrollieren die Abflussverhältnisse in alpinen Einzugsgebiete. Obwohl die Gletscher in den letzten Jahrzehnten durch verstärkte Schmelze viel Eis verloren haben, liegen in den Schweizer Alpen noch bedeutende Eismassen. Klimaprognosen bis Ende des Jahrhunderts zeigen einen weiteren Temperaturanstieg, welcher weitere, zum Teil markante Veränderungen der Gletscher erwarten lässt.

### 1.1 Problemstellung und Auftrag

Die Alpen gelten als Wasserschloss Europas. Veränderungen in dessen Wasserkreislauf sind deshalb nicht nur lokal sondern auch regional von zentraler Bedeutung. Studien in der Vergangenheit lieferten kaum umfassende Aussagen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Abflussverhältnisse und Wasserwirtschaft. Das Projekt CCHydro (Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz) des Bundesamt für Umwelt (BAFU) soll deshalb basierend auf neusten Klimaszenarien für verschiedene Regionen in der Schweiz zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Szenarien zum Wasserkreislauf erarbeiten. Diese ermöglichen weiterführende Analysen zu den vorhandenen Wasserressourcen und Abflussverhältnissen.

Bis anhin sind wenig quantitative Informationen zu den vorhandenen Eismassen und Abflüssen aus vergletscherten Einzugsgebiete in der Schweiz verfügbar. Insbesondere fehlen Untersuchungen zu den grossen und bedeutenden Gletscher. Die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) wurde vom BAFU deshalb

beauftragt

*die zu erwartenden **mittleren Jahresabflüsse** und die **Veränderung im Abflussregime** für vergletscherte Einzugsgebiete in den Einzugsgebiete der Flüsse Rhone, Aare, Rhein, Po und Inn bis 2100*

zu untersuchen. Dabei kommen die durch Huss et al. (2008b) entwickelte Methodik, sowie die im Rahmen des CCHydro Projektes vom IAC der ETH Zürich erarbeiteten Klimaszenarien zur Anwendung.

Für die vorliegende Studie wurden die Einzugsgebiete mit den Gletschern Grosser Aletsch, Mittel- und Oberaletsch, Findelen, Rhone, Trift, Silvretta, Gries und Morteratsch ausgewählt. Diese Einzugsgebiete umfassen rund 30% des in der Schweiz aktuell geschätzten Eisvolumens und verfügen über eine vom BAFU oder von Kraftwerken unterhaltene Abflussmessstation.

## **1.2 Aufbau des Berichtes**

Der vorliegende Bericht ist in sechs Kapitel gegliedert. Nach der Einleitung werden die untersuchten Einzugsgebiete hinsichtlich Morphologie und heutigem Klima kurz charakterisiert (Kapitel 2). Es folgt eine detaillierte Darstellung des verwendeten hydro-glaziologischen Modells (Kapitel 3) und eine umfassende Übersicht der Datensätze, die für die Anwendung des Modells notwendig sind (Kapitel 4). Besonderes Augenmerk wird auf die Implementierung der vom IAC / ETHZ vorgegebenen Klimaszenarien gerichtet (Abschnitt 4.6). In Kapitel 5 werden die Resultate der Studie präsentiert. Für jedes Einzugsgebiet sind die Merkmale der zu erwartenden Gletscher- und Abflussänderungen separat hervorgehoben. Am Schluss des Berichts werden in Kapitel 6 die Resultate der einzelnen Gebiete zusammengefasst und Empfehlungen für weitere Untersuchungen gegeben.

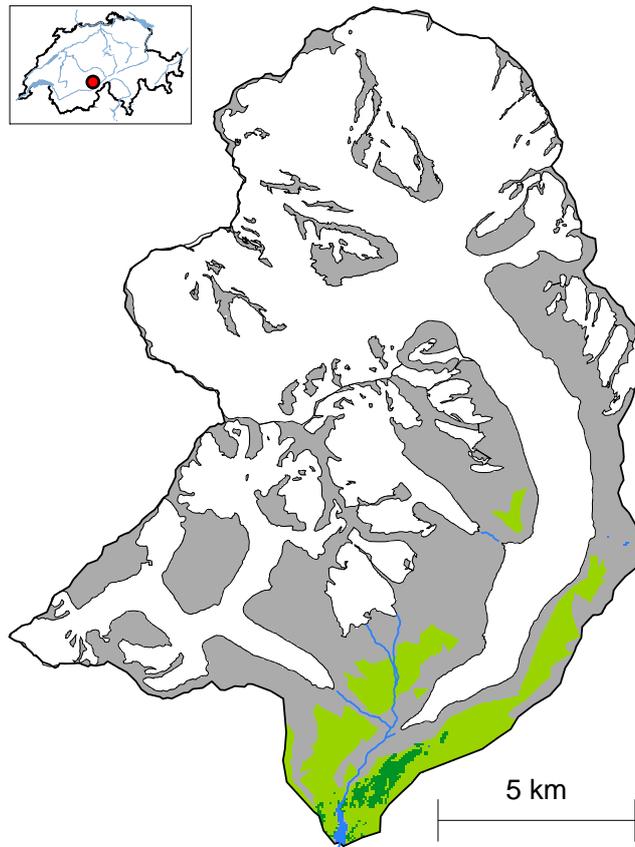
# Kapitel 2

## Untersuchungsgebiete

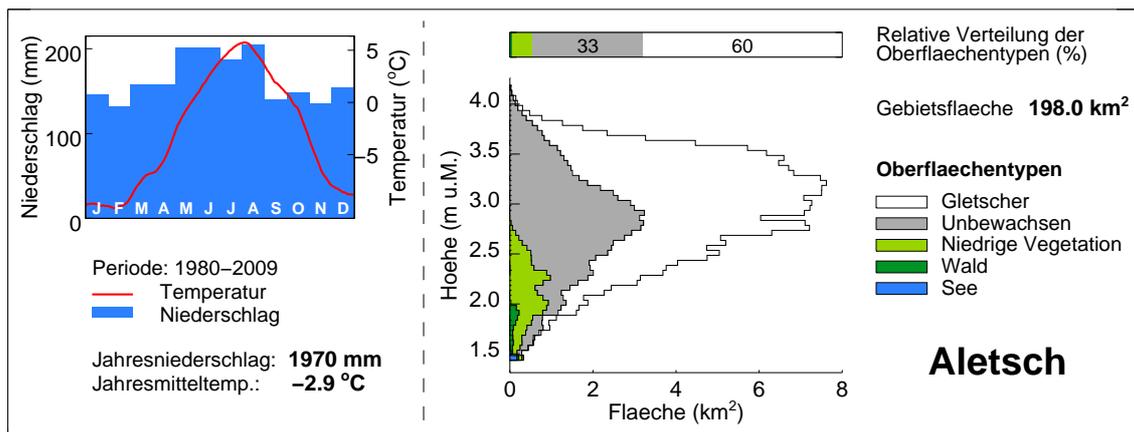
Im folgenden Kapitel werden die untersuchten Einzugsgebiete einzeln charakterisiert. In kurzer Form werden dessen Morphologie, die im Gebiet vorkommenden Gletscher und die während der Referenzperiode 1980-2009 vorherrschenden klimatischen Bedingungen vorgestellt.

### 2.1 Einzugsgebiet Aletsch

Das Einzugsgebiet Aletsch (Abb. 2.1) erstreckt sich über  $198\text{ km}^2$  und ist damit das grösste der betrachteten Gebiete. Dem Gebiet entspringt der Fluss Massa, der am Gebietsauslass durch den Stausee Gebidem gestaut wird. Im Jahre 1999 waren 60 % der Gebietsfläche vergletschert und 33 % unbewachsen (Abb. 2.2 rechts). Neben dem Grossen-, Mittel- und Oberaletschgletscher, befinden sich ein halbes Dutzend weiterer Gletscher im Gebiet – hauptsächlich in den Flanken der Fiescher- und Dreieckshörner. Während der Referenzperiode 1980–2009 betrug der mittlere Jahresniederschlag  $1970\pm 395\text{ mm}$  und die durchschnittliche Lufttemperatur  $-2.9\pm 1.2\text{ }^\circ\text{C}$  (Abb. 2.2 links). Beim Niederschlag ist ein deutlicher Jahresgang feststellbar, in dem die Monate Mai, Juni, Juli und August durchschnittlich etwa 70 mm feuchter sind als die restlichen.



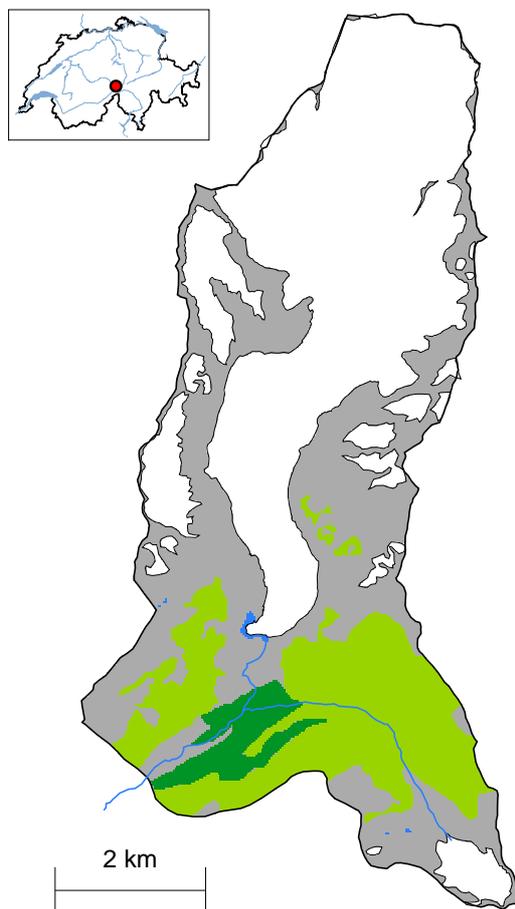
**Abbildung 2.1:** Einzugsgebiet Aletsch. Die Gletscherumrisse entsprechen dem Stand 1999.



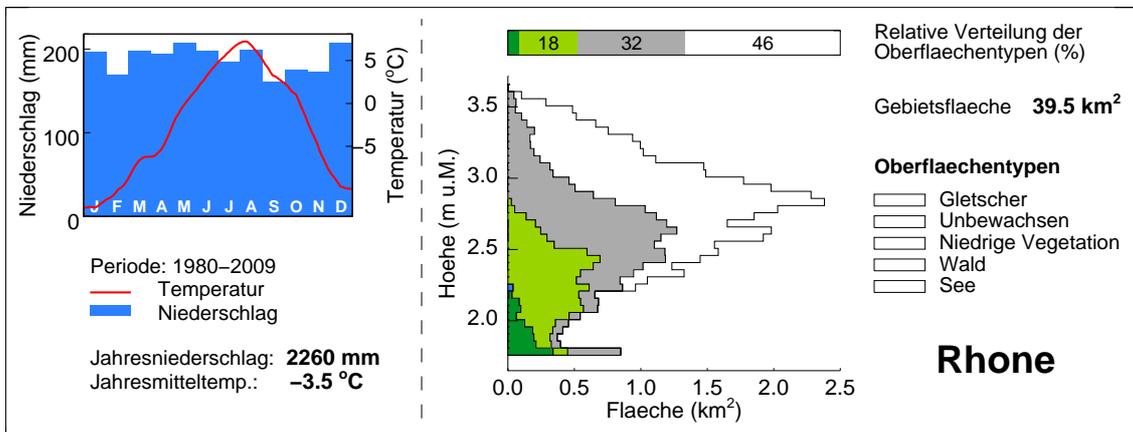
**Abbildung 2.2:** Klimatische Bedingungen in der Referenzperiode 1980–2009 und Hypsometrie der Oberflächentypen im Einzugsgebiet Aletsch.

## 2.2 Einzugsgebiet Rhone

Das Einzugsgebiet Rhone (Abb. 2.3) weist bis zur Abflussmessstation in Gletsch eine Gesamtfläche von  $39.5 \text{ km}^2$  auf. Es ist Ursprung des gleichnamigen Flusses, welcher nach etwas mehr als 800 km im Mittelmeer mündet. Im Jahre 2007 war etwas weniger als die Hälfte (46 %) des Gebiets vergletschert, ein Drittel unbewachsen und der Rest hauptsächlich mit niedriger Vegetation bewachsen (Abb. 2.4 rechts). Im Gebiet befindet sich neben dem Rhonegletscher und dessen Seitengletschern der Muttgletscher. Der mittlere Jahresniederschlag betrug während der Referenzperiode (1980–2009)  $2260 \pm 455 \text{ mm}$ , wobei sich die Gesamtmenge recht homogen über das Jahr verteilt. Die durchschnittliche Lufttemperatur betrug in der gleichen Periode  $-3.5 \pm 1.3 \text{ }^\circ\text{C}$  (Abb. 2.4 links).



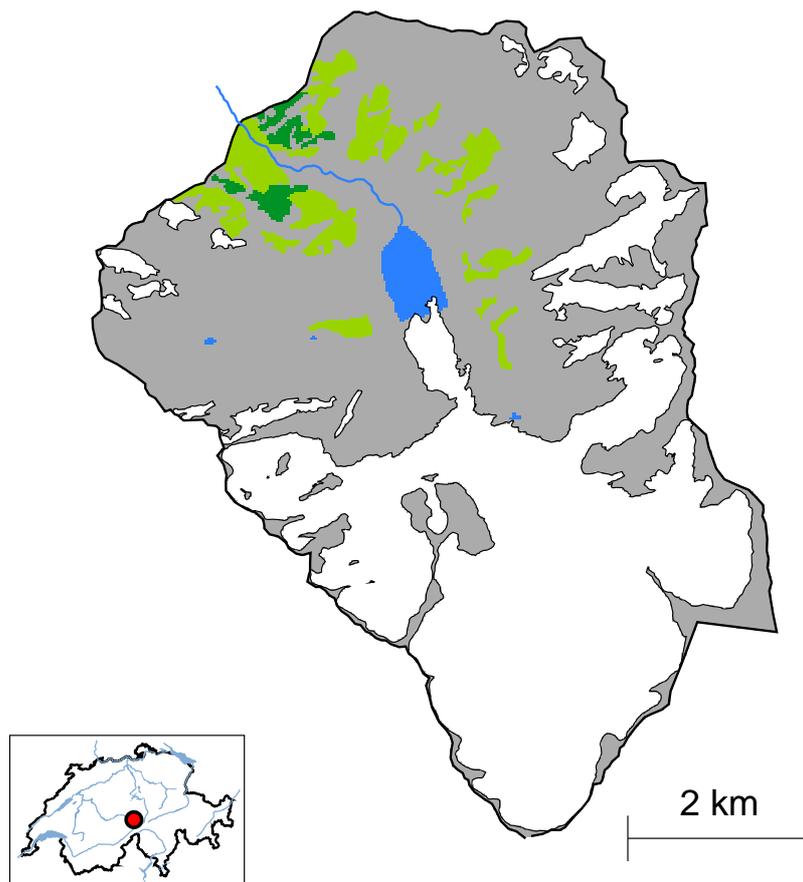
**Abbildung 2.3:** Einzugsgebiet Rhone. Die Gletscherumrisse entsprechen dem Stand 2007.



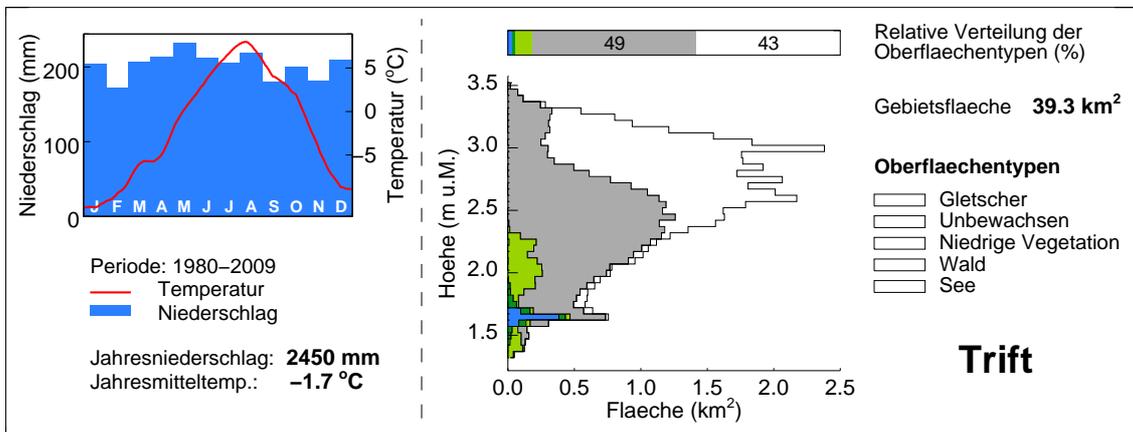
**Abbildung 2.4:** Klimatische Bedingungen in der Referenzperiode 1980–2009 und Hypsometrie der Oberflächentypen im Einzugsgebiet Rhone.

## 2.3 Einzugsgebiet Trift

Das Einzugsgebiet Trift wird in den vorliegenden Analysen durch die Wasserfassung der Kraftwerke Oberhäsli (KWO), welche das Triftwasser bei der Underi Trift fasst, begrenzt (Abb. 2.5). Das Gebiet weist eine Gesamtfläche von  $39.3 \text{ km}^2$  auf, wovon 43% im Jahr 2008 vergletschert waren. Etwa 50% des Gebiets waren 2008 unbewachsen und etwa 7% durch Vegetation eingenommen (Abb. 2.6 rechts). Die vergletscherten Gebiete werden vom Triftgletscher dominiert. Kleinere Gletscher – insbesondere in den Westflanken der Tierberge – tragen nur unwesentlich zum Gesamteisvolumen des Gebiets bei. Während der Referenzperiode (1980–2009) betrug die Jahresmitteltemperatur  $-1.7 \pm 1.3 \text{ }^\circ\text{C}$  und der Jahresniederschlag  $2450 \pm 505 \text{ mm}$ . Die Niederschlagsmenge verteilt sich dabei recht homogen auf den Jahresverlauf (Abb. 2.6 links).



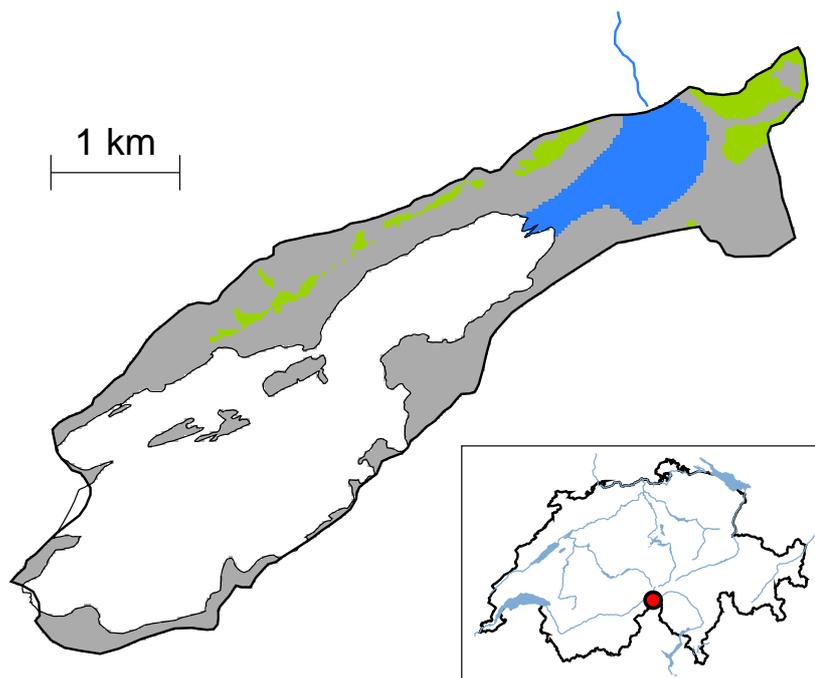
**Abbildung 2.5:** Einzugsgebiet Trift. Die Gletscherumrisse entsprechen dem Stand 2008.



**Abbildung 2.6:** Klimatische Bedingungen in der Referenzperiode 1980–2009 und Hypsometrie der Oberflächentypen im Einzugsgebiet Trift.

## 2.4 Einzugsgebiet Gries

Das Einzugsgebiet Gries, welches durch den Gries-Stausee begrenzt ist, ist mit  $10.0\text{ km}^2$  Fläche das kleinste der analysierten Gebiete (Abb. 2.7). 2007 betrug die vom Griesgletscher gegebene Vergletscherung nahezu 50% und das restliche Gebiet war unbewachsen (Abb. 2.8 rechts). Der Stausee bedeckt eine Fläche von etwa  $0.75\text{ km}^2$ . Die Jahresmitteltemperatur im Gebiet lag während der Referenzperiode (1980–2009) bei  $-3.1\pm 1.3\text{ }^\circ\text{C}$  und der mittlere Jahresniederschlag bei  $1980\pm 575\text{ mm}$ . Der Niederschlag ist dabei durch einen Jahresgang charakterisiert in dem die Wintermonate etwa 60 mm trockener sind als die restlichen (Abb. 2.8 links).



**Abbildung 2.7:** Einzugsgebiet Gries. Der Gletscherumriss entspricht dem Stand 2007.

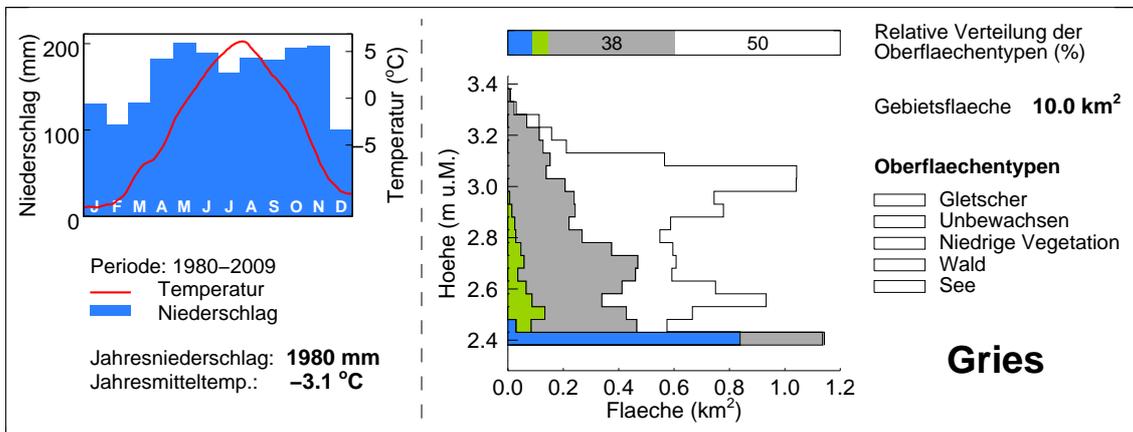
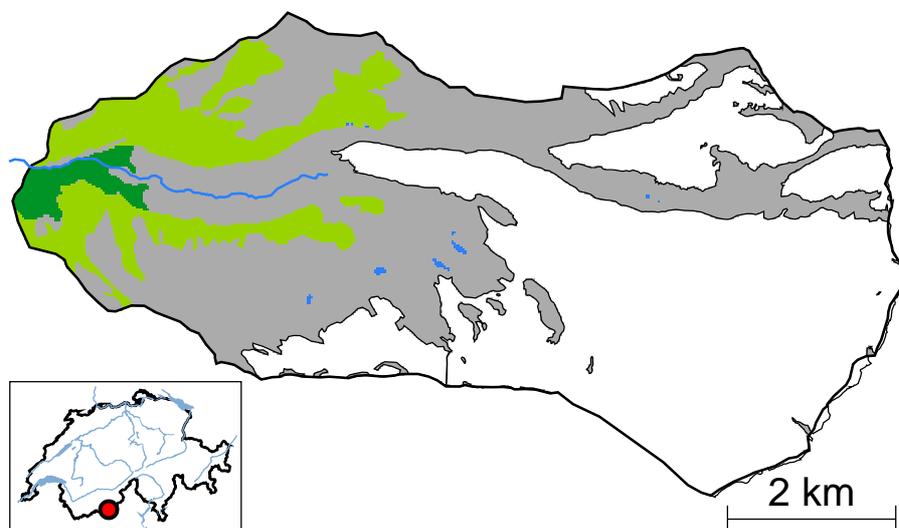


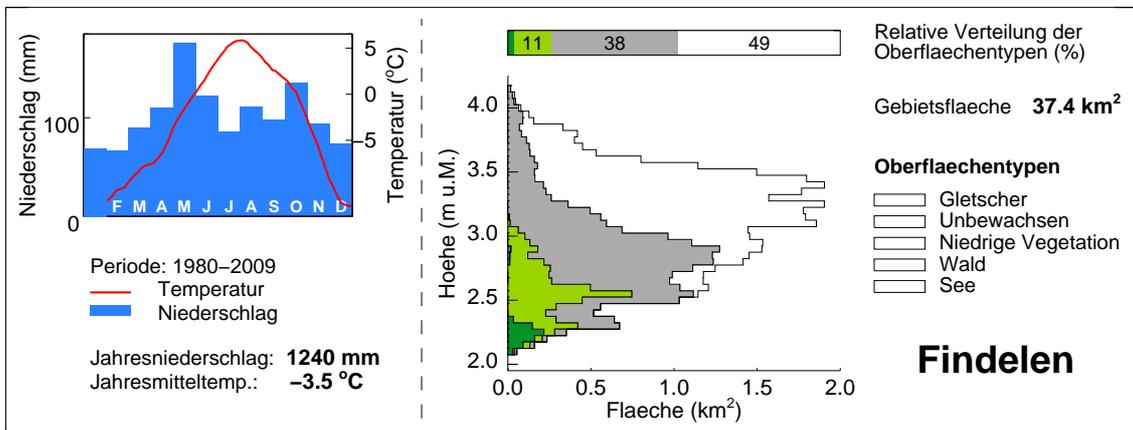
Abbildung 2.8: Klimatische Bedingungen in der Referenzperiode 1980–2009 und Hypsometrie der Oberflächentypen im Einzugsgebiet Gries.

## 2.5 Einzugsgebiet Findelen

Das Einzugsgebiet Findelen erstreckt sich für die vorliegenden Analysen bis zur Schlucht bei Pt. 2086, etwa 400 m westlich des Mosjesees. Damit beträgt die Einzugsgebietsfläche  $37.4 \text{ km}^2$  wovon 2007 48% Vergletschert waren (Abb. 2.9). Die wichtigsten Eismassen sind der Findelen- und der Adlergletscher. Kleinere Eisvolumen kommen dem Triftjigletscher und den Eisflächen in den Hängen von Rimpfisch- und Strahlhorn zu. Etwa 12% des Gebiets sind bewachsen, meist von niedriger Vegetation (Abb. 2.10 rechts). Während der Referenzperiode (1980–2009) betrug die Temperatur im Jahresmittel  $-3.5 \pm 1.3 \text{ }^\circ\text{C}$  und der Niederschlag  $1240 \pm 320 \text{ mm}$ . Der Niederschlagsverlauf ist dabei von einer zweigipfligen Verteilung geprägt, mit Maxima in den Monaten Mai und Oktober (Abb. 2.10 links).



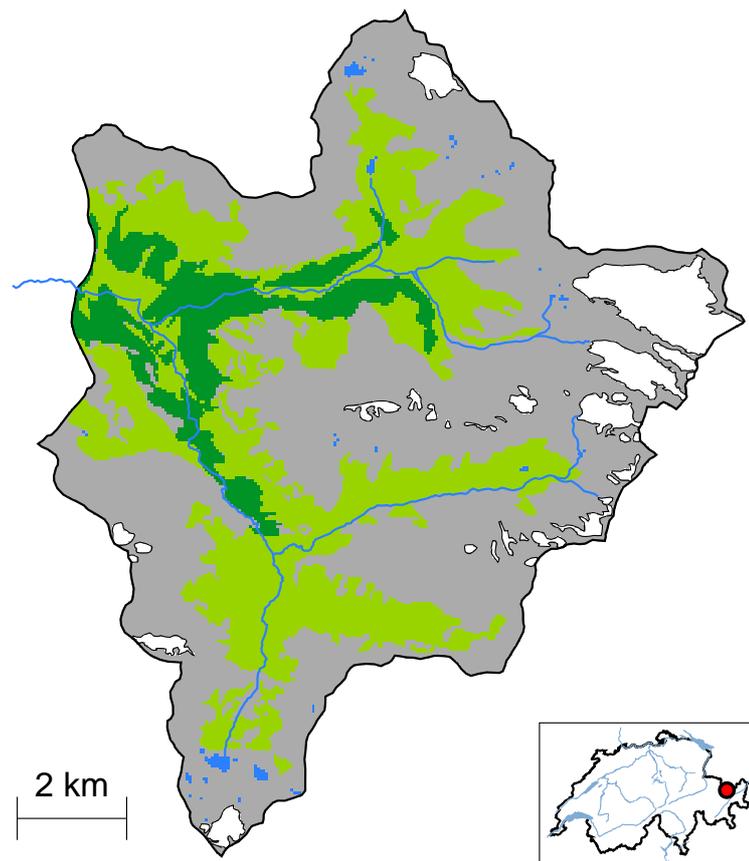
**Abbildung 2.9:** Einzugsgebiet Findelen. Die Gletscherumrisse entsprechen dem Stand 2007.



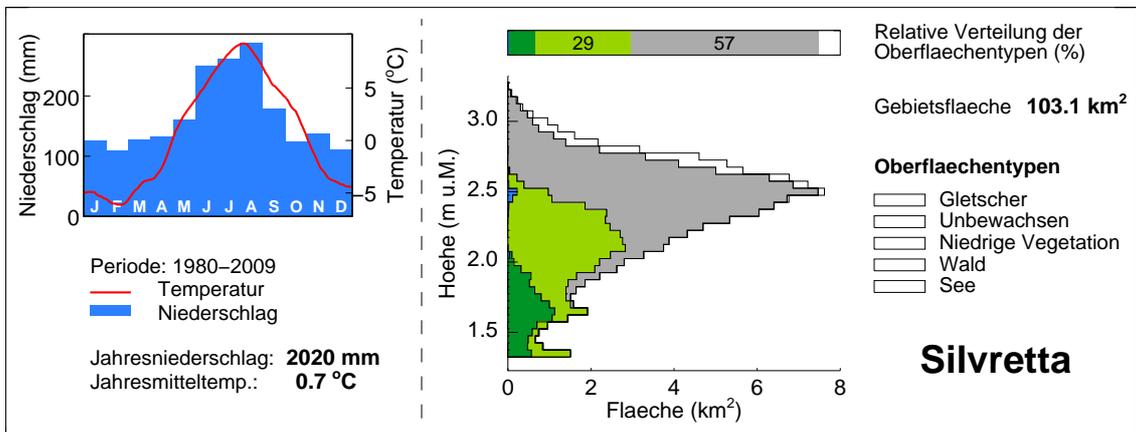
**Abbildung 2.10:** Klimatische Bedingungen in der Referenzperiode 1980–2009 und Hypsometrie der Oberflächentypen im Einzugsgebiet Findelen.

## 2.6 Einzugsgebiet Silvretta

Das Einzugsgebiet Silvretta, welches von der Abflussmessstation in Monbiel–Auelti begrenzt ist, erstreckt sich über insgesamt 103.1 km<sup>2</sup> (Abb. 2.11). Es ist das tiefstgelegene und somit auch das am wenigsten vergletscherte der untersuchten Gebiete. 2007 betrug die Vergletscherung etwa 6 %, wobei die Gletscher Silvretta, Verstancla, Vernela und See die Haupteismassen ausmachen. Nebst den vergletscherten Flächen sind 56 % des Gebietes unbewachsen, 28 % bestehen aus niedriger Vegetation und etwa 10 % sind bewaldet (Abb. 2.12 rechts). Die Jahresmitteltemperatur während der Referenzperiode (1980 – 2009) betrug  $0.7 \pm 1.2$  °C und der Jahresniederschlag im Mittel  $2020 \pm 470$  mm. Der Niederschlag weist dabei einen ausgeprägten Jahresgang auf, bei dem die drei Sommermonate Juni, Juli und August im Mittel gut 120 mm niederschlagsreicher sind als die restlichen Monate (Abb. 2.12 links).



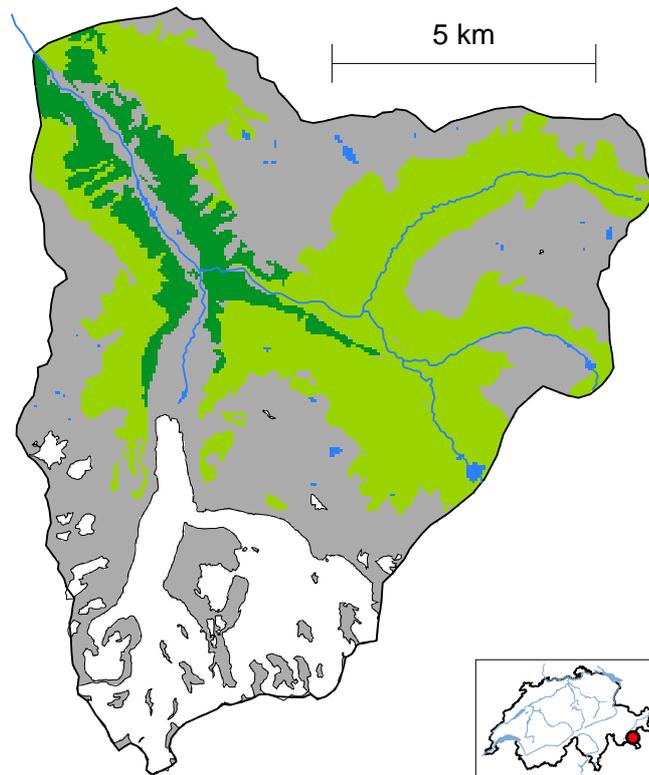
**Abbildung 2.11:** Einzugsgebiet Silvretta. Die Gletscherumrisse entsprechen dem Stand 2007.



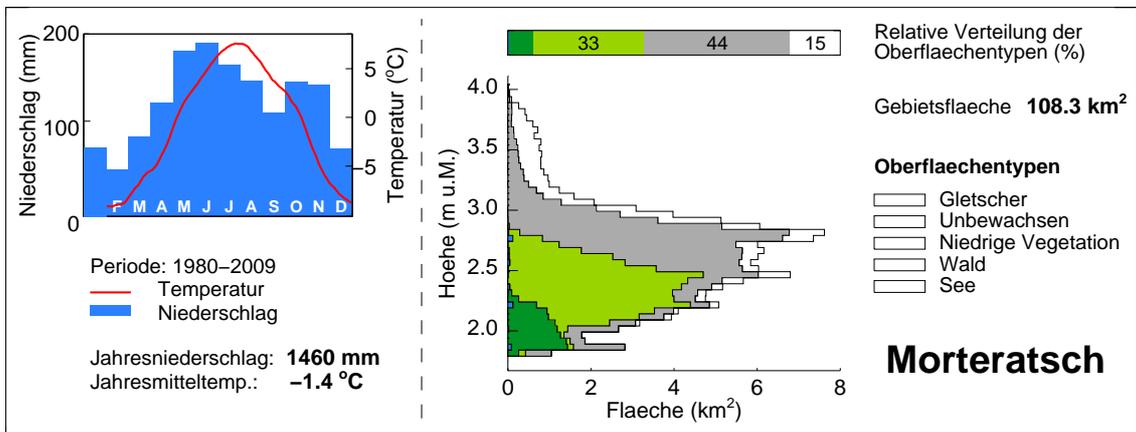
**Abbildung 2.12:** Klimatische Bedingungen in der Referenzperiode 1980–2009 und Hypsometrie der Oberflächentypen im Einzugsgebiet Silvretta.

## 2.7 Einzugsgebiet Morteratsch

Das Einzugsgebiet Morteratsch erstreckt sich in dieser Studie bis zur Abflussmessstation in Pontresina. Das 108.3km<sup>2</sup> grosse Gebiet umfasst somit nicht nur das Seitental, welches den Vadret da Morteratsch beinhaltet, sondern auch das obere Val Bernina sowie das Val da Fain und Val Minor (Abb. 2.13). Das Gebiet war 2008 zu 14% vergletschert, 43% unbewachsen und insgesamt 43% mit Vegetation bedeckt. Der grösste Anteil der Vegetation kommt niedriger Pflanzen zu. Etwa 1% des Gebiets wird durch kleinere Seen eingenommen (Abb. 2.14 rechts). Während der Referenzperiode (1980–2009) betrug die Jahresmitteltemperatur  $-1.4\pm 1.2^{\circ}\text{C}$  und die Jahresniederschlagssumme  $1460\pm 465\text{ mm}$ . Im Jahresgang des Niederschlags ist eine schwach ausgeprägte, zweigipflige Verteilung zu erkennen mit einem Maximum in den Monaten Mai und Juni und einem zweiten, weniger deutlichen in den Monaten Oktober und November. Auffällig ist das recht ausgeprägte Minimum in den Wintermonaten (Abb. 2.14 links).



**Abbildung 2.13:** Einzugsgebiet Morteratsch. Die Gletscherumrisse entsprechen dem Stand 2008.



**Abbildung 2.14:** Klimatische Bedingungen in der Referenzperiode 1980–2009 und Hypsometrie der Oberflächentypen im Einzugsgebiet Morteratsch.

## Kapitel 3

# Gletscherentwicklungs- und Abflussmodell *GERM*

Die ausgeprägte räumliche Variabilität der meteorologischen Phänomene machen hydrologische Modellierungen für hochalpine Einzugsgebiete zu einer Herausforderung. Hydrologische Modelle müssen in der Lage sein, eine Serie von Prozessen zu beschreiben, die untereinander interagieren und die zum Teil noch nicht ganz verstanden sind (Becker, 2005). Schnee und Eis spielen in hohen Lagen eine wichtige Rolle und müssen im Wasserzyklus dementsprechend abgebildet werden.

Das für diese Studie verwendete hydro-glaziologische Modell ist eine Weiterentwicklung des *Glacier Evolution Runoff Model (GERM)* (Huss et al., 2008b, Farinotti et al., in press). Das Modell besteht aus fünf verschiedenen Modulen, die sich mit Akkumulation, Ablation, Gletscherentwicklung, Evapotranspiration und Abflussbildung befassen. Das konzeptionelle, deterministische Modell operiert räumlich verteilt. Dies bedeutet, dass jede der betrachteten Größen für jede einzelne Gitterzelle, in denen das jeweilige Einzugsgebiet unterteilt wird, berechnet wird. In der vorliegenden Studie wurde Gitterzellen von  $25 \times 25$  m verwendet. Es werden sechs Oberflächentypen unterschieden: Eis, Schnee, Fels, niedrige und hohe Vegetation sowie offene Gewässer. Das Modell wird durch Zeitreihen der Lufttemperatur und des Niederschlags angetrieben. Die einzelnen Module basieren auf bekannte Ansätze, die im Folgendem kurz beschrieben werden.

### 3.1 Akkumulation

Für eine beliebige Gitterzelle  $i$  wird die Akkumulation, d.h. die anfallende Menge an Festniederschlag  $P_{\text{fest},i}$ , berechnet durch:

$$P_{\text{fest},i} = P_{\text{ref}} \cdot (1 + c_{\text{prec}}) \cdot [1 + (z_i - z_{\text{ref}}) \cdot dP/dz] \cdot D_{\text{snow},i} \cdot r_s. \quad (3.1)$$

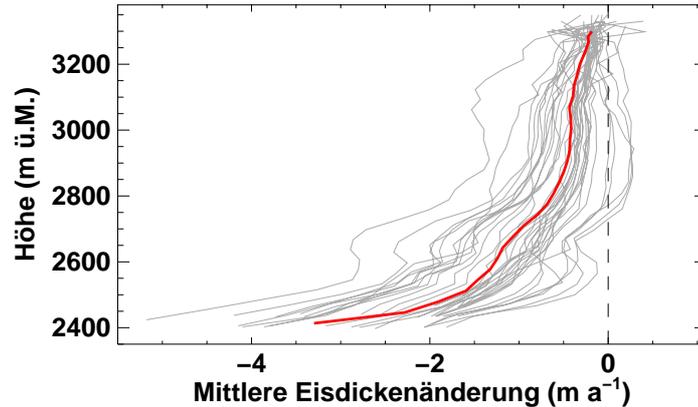
Dabei ist  $P_{\text{ref}}$  die Niederschlagsmenge, die von der vorgegebenen Niederschlagsreihe für den Referenzpunkt angegeben wird,  $c_{\text{prec}}$  ein Korrekturfaktor, der den sogenannten *gauge-catch deficit* berücksichtigt (Bruce and Clark, 1981),  $z_i - z_{\text{ref}}$  der Höhenunterschied zwischen der betrachteten Gitterzelle und dem Referenzpunkt,  $dP/dz$  die Rate, mit welcher der Niederschlag mit der Höhe zunimmt (Peck and Brown, 1962),  $D_{\text{snow},i}$  ein räumlich verteilter Faktor, der die Effekte von Schneeumverteilungsprozessen vereint (Tarboton et al., 1995; Huss et al., 2008b) und  $r_s$  der Anteil Niederschlag, der in fester Form anfällt.  $D_{\text{snow},i}$  wird aus Charakteristiken der Oberflächentopographie hergeleitet (Huss et al., 2008b) während  $r_s$  im Intervall  $T_{\text{ff}} - 1^\circ\text{C}$  und  $T_{\text{ff}} + 1^\circ\text{C}$  linear von 1 auf 0 abfällt, wobei  $T_{\text{ff}}$  eine Grenzwerttemperatur ist, welche Fest- und Flüssigniederschlag trennt (Hock, 1999). Gemäss der Definition von  $r_s$  lässt sich die Menge an Flüssigniederschlag  $P_{\text{fl}}$  ebenfalls aus Gleichung 3.1 berechnen, in dem  $r_s$  mit  $(1 - r_s)$  ersetzt wird.

### 3.2 Ablation

Die Ablation wird mit einem räumlich verteilten Grad-Tag-Faktor-Ansatz modelliert, welcher den Effekt der Strahlung mitberücksichtigt (Hock, 1999). Die Schmelze  $M_i$  wird für jede Gitterzelle  $i$  berechnet als:

$$M_i = (f_M + r_{\text{Schnee/Eis}} \cdot I_{\text{pot},i}) \cdot \bar{T}_i \quad \text{wenn } \bar{T}_i > 0^\circ\text{C}. \quad (3.2)$$

Dabei sind  $f_M$  ein Schmelzfaktor,  $r_{\text{Schnee/Eis}}$  zwei unterschiedliche Strahlungsfaktoren für Schnee und Eis,  $I_{\text{pot},i}$  die direkte, potentielle Sonneneinstrahlung für die Gitterzelle  $i$  und  $\bar{T}_i$  die Tagesmitteltemperatur der Luft am selben Ort. Für Tage an welchen  $\bar{T}_i \leq 0^\circ\text{C}$  ist, fällt keine Schmelze an. Die räumliche Verteilung von  $\bar{T}_i$  wird aus der Tagesmitteltemperatur, die die vorgegebene Temperaturzeitreihe für den Referenzpunkt vorgibt, und einem konstanten Temperaturgradienten berechnet.



**Abbildung 3.1:** Beziehung zwischen Eisdickenänderung und Höhe über Meer am Beispiel des Griesgletschers. Jede der grauen Kurven entspricht dem Verlauf aus der Differenzierung zweier DHMs. Da für den Griesgletscher 9 unterschiedliche DHMs zur Verfügung stehen, können 36 unterschiedliche solcher Kurven erstellt werden. Die rote Kurve ist der Mittelwert der Kurvenschar.

### 3.3 Gletscherentwicklung

Die Geometrie der Gletscher im jeweiligen Einzugsgebiet wird in Jahresschritten aktualisiert. Dies erfolgt mit dem nicht-parametrischem Ansatz von Huss et al. (2010). Dabei wird die Eisvolumenänderung, die das Akkumulations- und Ablationsmodul berechnet nach einer gletscherspezifischen, höhenabhängigen Funktion  $\Delta h$  umverteilt. Die  $\Delta h$ -Funktion wird dazu aus der beobachteten Eisdickenänderung in der Vergangenheit abgeleitet. Für jede Periode zwischen zwei vorhandenen Geländemodellen (DHMs) wird die Eisdickenänderung als Funktion der Höhe ermittelt und über alle Perioden gemittelt (Abb. 3.1). Stehen für ein Gebiet  $n$  DHMs zur Verfügung, können  $\frac{n(n-1)}{2}$  unterschiedliche Perioden gebildet werden, aus denen die Funktion bestimmt werden kann. Der  $\Delta h$ -Ansatz ist massenerhaltend und schreibt vor, dass die grössten Eisdickenänderungen im Zungenbereich stattfinden (Bauder et al., 2007). Geometrieänderungen im Akkumulationsgebiet sind dabei vernachlässigbar. Die Eignung des Ansatzes für die Modellierung von Gletschern wurde von Huss et al. (2010) gezeigt, in dem die Resultate mit denjenigen eines 3D finite-Elemente-Modells (Jouvet et al., 2008) verglichen wurden.

### 3.4 Evapotranspiration

Die tatsächliche Evapotranspiration  $ET_{\text{act},i}$  für jede Gitterzelle  $i$  wird berechnet in dem die potentielle Evapotranspiration nach dem Ansatz von Hamon (1961) mit einem Oberflächentypabhängigen Faktor  $f_{\text{ETp},j}$  reduziert wird:

$$ET_{\text{act},i} = \frac{35.77 \cdot DL \cdot e_s}{\bar{T}_i + 273.3} \cdot S_j \cdot f_{\text{ETp},j}. \quad (3.3)$$

Dabei ist  $DL$  die als Tagesanteil ausgedrückte potentielle Sonnenscheindauer (eine Funktion des Tages innerhalb des Jahres),  $e_s$  der Sättigungsdampfdruck (eine Funktion von  $\bar{T}_i$ ),  $\bar{T}_i$  die mittlere Tagestemperatur der Luft für die Gitterzelle  $i$  und  $S_j$  ein empirischer Faktor, der die Eigenschaften des Oberflächentyps  $j$  hinsichtlich Evapotranspiration charakterisiert. Im Sommer kann  $S_j$  über Schnee- und Eisoberflächen ein negatives Vorzeichen annehmen, was bedeutet, dass Kondensation stattfindet (Lang et al., 1977; Bernath, 1991). Solange ein Interzeptionsreservoir gefüllt ist, wird der Faktor  $f_{\text{ETp},j}$  auf 1 gesetzt.

### 3.5 Abflussbildung

Das verwendete Abflussbildungsmodul ist eine Weiterentwicklung des Schemas welches von Huss et al. (2008b) präsentiert wurde und löst für jede Gitterzelle  $i$  und jeden Modellierungszeitschritt die lokale Wasserbilanz

$$Q_i = P_{\text{fl},i} + M_i - ET_i - \sum_r \Delta V_{r,i}. \quad (3.4)$$

Dabei ist  $Q_i$  der Abfluss aus Gitterzelle  $i$  und  $\Delta V_{r,i}$  die Speicheränderung von Reservoir  $r$  am selben Ort.

Je nach dem ob eine Schneebedeckung für die Gitterzelle  $i$  vorhanden ist, unterscheidet das Modul zwischen drei oder vier Reservoiren (Abb. 3.2). Ein *Interzeptionsreservoir*, wird bei jedem Niederschlags- und Schmelzereignis als erstes gefüllt und hat eine vorgegebene, oberflächentypabhängige Maximalgröße. Das vom Interzeptionsreservoir nicht aufgenommene Wasser infiltriert in tiefere Schichten, die durch ein *schnelles* und ein *langsames Reservoir* repräsentiert sind. Das schnelle Reservoir stellt den oberflächennahen, schnellansprechenden Abfluss dar während das langsame Reservoir den Abfluss aus tiefere Bodenschichten, in denen das Wasser über längere Zeiträume gespeichert werden kann, repräsentiert. Wieviel Wasser

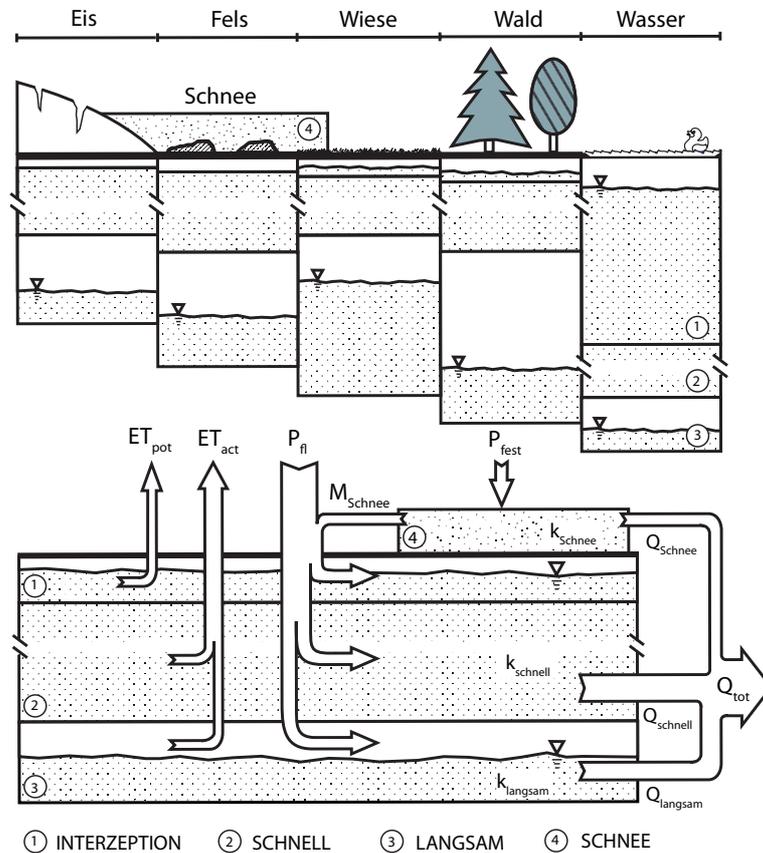
in das langsame Reservoir infiltriert, hängt von dessen Füllstand ab. Je stärker das langsame Reservoir gefüllt ist, desto weniger Wasser infiltriert darin und desto mehr Wasser fließt ins schnelle Reservoir. Das langsame Reservoir hat, wie das Interzeptionsreservoir, eine vorgegebene, vom Oberflächentyp abhängige Maximalgröße während die Größe des schnellen Reservoirs unbeschränkt ist. Wenn eine Schneedecke vorhanden ist, kommt ein *Schneereservoir* dazu. Dieses wird durch den festen Niederschlag gespeist. Ein Teil der Schmelze wird dabei wie der flüssige Niederschlag in die tieferen Reservoirs (schnell und langsam) geleitet. Der andere Teil hingegen trägt direkt zum Abfluss bei.

Sämtliche Reservoirs entleeren sich nach dem Prinzip des linearen Speichers:

$$\Delta V_{r,i} = V_{r,i}/k_r, \quad (3.5)$$

wobei  $V_{r,i}$  der Füllstand von Reservoir  $r$  ( $r = \text{Schnee, schnell oder langsam}$ ) an der Gitterzelle  $i$  und  $k_r$  eine reservoirabhängige Retentionskonstante ist.

Der Gesamtabfluss wird aus der Summe des Abflusses aus dem schnellen, dem langsamen sowie dem Schneereservoir berechnet. Das Wasser aus dem Interzeptionsreservoir trägt nicht zum Abfluss bei, sondern steht einzig für die Evapotranspiration zur Verfügung. Schliesslich werden die Abflüsse aus jeder Gitterzelle eines Gebietes aufsummiert, um den Betrag des entsprechenden Teil- oder Gesamteinzugsgebietes zu ermitteln.



**Abbildung 3.2:** Schema des Abflussmoduls, welches vier verschiedene Reservoirs unterscheidet: ① Interzeptionsreservoir, ② schnelles Reservoir, ③ langsames Reservoir, ④ Schneereservoir. Die anfallende Schne- und Eisschmelze  $M$  und der flüssige Niederschlag  $P_{fl}$  infiltrieren zunächst ins Interzeptionsreservoir, bis es gefüllt ist. Danach infiltriert das Wasser ins langsame und schnelle Reservoir. Das Schmelzwasser des vom Festniederschlag  $P_{fest}$  gespiesenen Schneereservoirs  $M_{Schnee}$  fließt zu einem Teil in die Reservoirs ① bis ③, zum anderen direkt ab ( $Q_{Schnee}$ ). Der Gesamtabfluss  $Q_{tot}$  entspricht der Summe aus den Abflüssen aus dem langsamen, dem schnellen und dem Schneereservoir. Das Interzeptionsreservoir wird durch die Evapotranspiration  $ET_{pot}$  entleert. Ist dieses Reservoir leer, erfolgt die Evapotranspiration mit einer veränderten Rate  $ET_{act}$  aus dem langsamen und dem schnellen Reservoir. Das Schema wurde aus Farinotti et al. (submitted) übernommen.

# Kapitel 4

## Datengrundlagen

Für die Anwendung von *GERM* werden verschiedene Daten als Grundlage benötigt. Diese dienen entweder zur Charakterisierung des Gebiets (z.B. Höhenmodelle der Geländeoberfläche, Eisdickenverteilung der Gletscher), zur Kalibrierung der Parameter der einzelnen Module (z.B. Massenbilanz- und Abflussmessungen) oder als Treiber für das Modell selbst (z.B. Temperatur- und Niederschlagszeitreihen). Im folgenden wird auf die verschiedenen benötigten Datensätze sowie dessen Bereitstellung näher eingegangen. Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über die für jedes einzelne der bearbeiteten Einzugsgebiete verfügbaren Daten.

### 4.1 Geländemodelle

Um die einzelnen Gebiete charakterisieren und modellieren zu können, muss dessen Topographie abgebildet werden. Dies geschieht mittels digitaler Höhenmodelle (DHMs). Da sich die Gletscher im Laufe der Zeit verändert haben, ist es von zentraler Bedeutung, dass für jedes der modellierten Einzugsgebiete mehrere solche DHMs zur Verfügung stehen. Für diese Studie wurden DHMs aus zwei unterschiedlichen Quellen verwendet: einerseits aus historischen Karten, andererseits aus Luftbilder. Erste detaillierte Luftaufnahmen stammen aus den frühen 1960er Jahren. Um Gletscherstände für frühere Zeitpunkte zu rekonstruieren, werden historische Karten digitalisiert. Diese reichen mit genügender Genauigkeit bis in die 1920er oder 1930er Jahre zurück. Für die Modellierungen werden sämtliche DHMs auf ein regelmäßiges Gitter mit 25 m Rasterweite interpoliert. Die vertikale Genauigkeit wird auf etwa

**Tabelle 4.1:** Übersicht über die verfügbaren Datensätze. Unter 'DHMs' ist die Anzahl zur Verfügung stehender Geländemodelle (#) sowie die Zeitpunkte der Aufnahmen (Gletscherstände) aufgeführt. DHMs für *kursiv* gedruckten Zeitpunkte basieren auf topographischen Karten, alle anderen auf Luftbildern. Die Spalten 'Massenbilanz' und 'Abfluss' geben die Perioden wieder, in denen entsprechende Messungen vorhanden sind.

Gebiet	DHMs		Massenbilanz		Abfluss
	#	Gletscherstände	Jahresbilanz	Winterbilanz	
<b>Aletsch</b>	3	<i>1927, 1957</i> , 1999	1952 - 1991 1996 - 1999 2001 - 2006	1918 - 1934 1939 - 1992 1996 - 2006	1922 - 2006
<b>Rhone</b>	6	<i>1929</i> , 1959, 1980, 1991, 2000, 2007	1884 - 1910 1979 - 1982 2006 - 2008	1979 - 1982 2006 - 2008	1894 - 1903 1919 - 1928 1956 - 2007
<b>Trift</b>	7	<i>1929</i> , 1980, 1990, 1995, 2000, 2003, 2008	2002 - 2003		1997 - 2009
<b>Gries</b>	9	<i>1923</i> , 1961, 1967, 1979, 1986, 1991, 1998, 2003, 2007	1961 - 2008	1993 - 2009	1957 - 2004
<b>Findelen</b>	3	<i>1930</i> , 1982, 2007	2004 - 2009	2008 - 2009	1962 - 2008
<b>Silvretta</b>	7	<i>1938</i> , 1959, 1973, 1986, 1994, 2003, 2007	1917 - 2009 2003 - 2009	1914 - 1983 1975 - 2004	1933 - 1964
<b>Morteratsch</b>	4	<i>1935, 1956</i> , 1985, 2008	1949 - 1959 1991 - 2007	1949 - 1959	1955 - 2008

30 cm geschätzt (Bauder et al., 2007).

Für die untersuchten Einzugsgebiete sind zwischen drei (Einzugsgebiete Aletsch und Findelen) und neun (Einzugsgebiet Gries) DHMs vorhanden. Höhenmodelle vor 1959 wurden durch das Auswerten von historischer Karten, jene späterer Zeitpunkte durch das Auswerten von Luftbildern erstellt (Tab. 4.1). Nichtvergletscherte Bereiche innerhalb des Einzugsgebietes die durch keines der speziell aufgenommenes DHM abgedeckt sind wurden mit dem DHM25 von swisstopo (L+T, 1993) ergänzt.

## 4.2 Eisvolumenänderungen

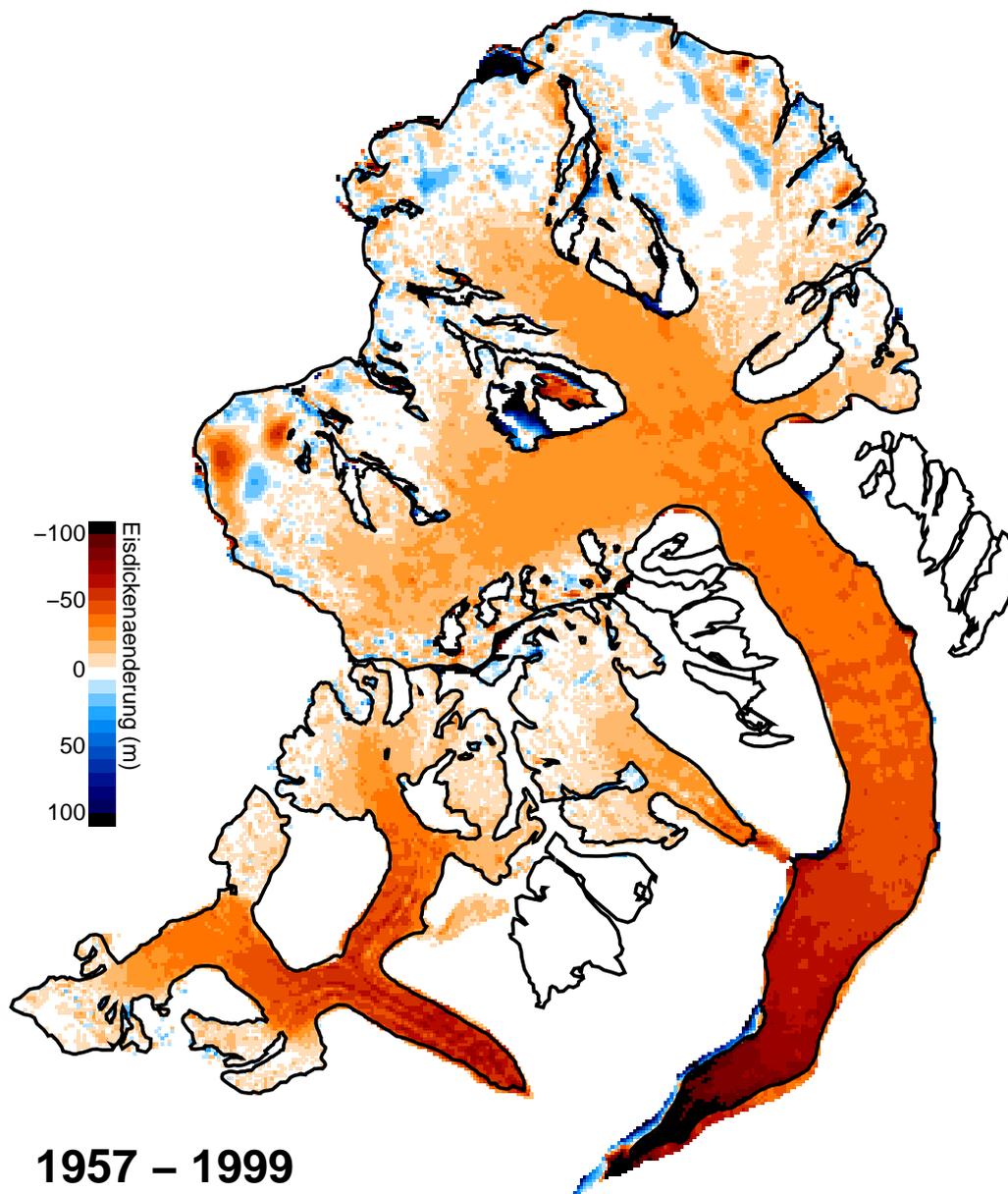
Durch den Vergleich zweier DHMs, die für unterschiedliche Zeitpunkte gelten, kann für die vergletscherten Gebiete die Eisvolumenänderung in der betrachteten Zeit-

spanne bestimmt werden (Bauder et al., 2007). Diese Information wird für die Kalibrierung der Parameter des Akkumulations- und des Ablationsmoduls verwendet. Insbesondere werden durch ein stufenweise iteratives Verfahren die Parameter  $c_{\text{prec}}$ ,  $dP/dz$  (Gleichung 3.1) und  $f_M$ ,  $r_{\text{Schnee/Eis}}$  (Gleichung 3.2) so angepasst, dass die aus den DHMs ermittelten Eisvolumenänderungen reproduziert werden können (Huss et al., 2008a). Abbildung 4.1 zeigt am Beispiel des Aletschgebiets, wie sich die Eisvolumenänderung auf die Gletscherflächen im Gebiet verteilt.

### 4.3 Massenbilanzmessungen

Die Massenbilanz eines Gletschers beschreibt wie viel Masse dieser innerhalb einer bestimmten Periode gewonnen oder verloren hat. Normalerweise wird das hydrologische Jahr (1. Oktober – 30. September) als Beobachtungsperiode gewählt. Anhand in die Gletscheroberfläche eing Bohrten Pegeln wird für den jeweiligen Ort die Schneeakkumulation oder die Eisschmelze über den Beobachtungszeitraum ermittelt. Existieren Zwischenablesungen am Ende des Winters, lassen sich die Schneeakkumulation über den Winter und die Schnee-/Eisschmelze über den Sommer zusätzlich separieren. Massenbilanzmessungen dienen ebenfalls zur Kalibrierung der Akkumulations- und Ablationsmodule. Im Gegensatz zu den Eisvolumenänderungen, welche Aufschluss über die Gesamtänderung eines Gletschers über einen längeren Zeitraum geben, dienen die Massenbilanzmessungen zur Kalibrierung der kleinräumigeren und kurzzeitigeren Variabilität.

Für sechs der sieben betrachteten Einzugsgebiete liegen jährliche Massenbilanz- und Wintermassenbilanzmessungen vor, die eine Zeitspanne von mehreren Jahrzehnten abdecken (Tab. 4.1). Einzig auf dem Triftgletscher beschränken sich die Massenbilanzmessungen auf die Jahre 2002 und 2003, wobei Wintermassenbilanzmessungen gänzlich fehlen. Die Massenbilanzreihe des Rhonegletschers reicht am weitesten zurück. Bereits im Jahre 1884 wurden erste Messungen durchgeführt (Mercanton, 1916). Allerdings wurde diese Zeitreihe ab 1910 für rund 80 Jahre unterbrochen und erst 1979 wieder aufgenommen. Die längsten Massenbilanzreihen weist das Silvretta Gebiet auf, für welches seit den 1910er Jahre nahezu kontinuierliche Messungen der Winter- und Jahresbilanz existieren. Für alle anderen Gebiete sind Massenbilanzdaten seit etwa den 1950er Jahren vorhanden, wobei die Wintermassenbilanzmessungen generell kürzere Perioden abdecken als Jahresmassenbilanzmessungen.



**Abbildung 4.1:** Beispiel für die aus den DHMs bestimmte Verteilung der Eisdickenänderung. Gezeigt sind die Änderungen im Aletschgebiet zwischen 1957 und 1999. Für die kleinen Seitengletscher an den Hängen entlang der Zunge vom Grossen Aletschgletscher stehen keine Daten zur Verfügung, da das DHM für 1999 unvollständig ist.

#### 4.4 Abflussmessungen

Abflussmessungen dienen der Kalibration der Parameter des Abflussbildungsmoduls. Tägliche Messungen verhelfen der Abstimmung der kurzzeitigen Variabilität

während Jahresabflussmengen auch Aufschluss über Langzeitänderung der Speicher geben. Insbesondere kann dadurch auch die Plausibilität der mittels Volumenänderungen kalibrierten Parameter des Akkumulations- und Ablationsmoduls überprüft werden.

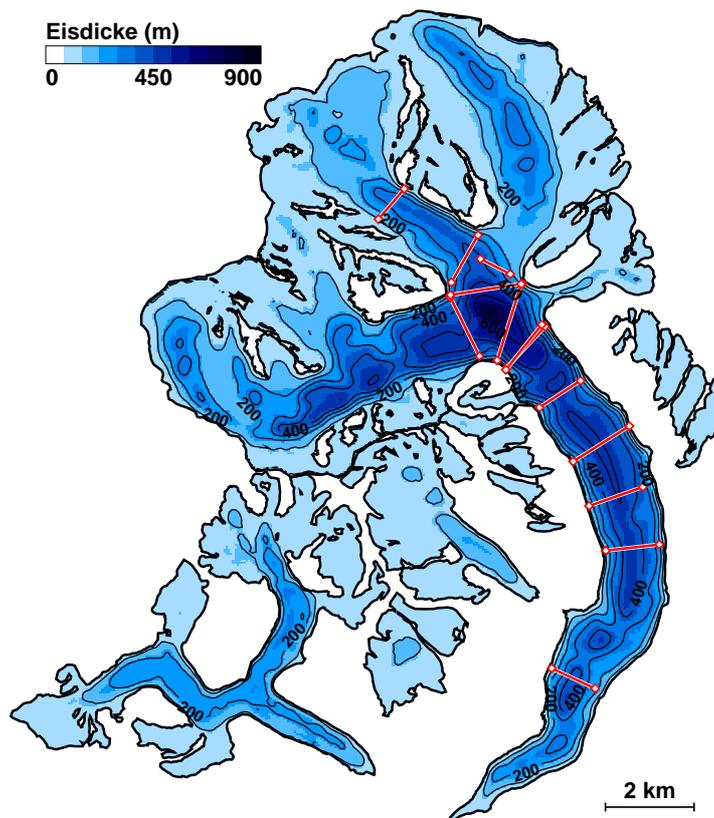
In allen betrachteten Einzugsgebieten sind Abflussmessungen vorhanden. Die längsten Abflusszeitreihen stammen mit über 80 Jahre an Daten aus den Gebieten Aletsch und Rhone. Im Einzugsgebiet Aletsch wird der Abfluss seit 1922 und im Einzugsgebiet Rhone gar seit 1894 gemessen, allerdings sind im letzteren Messunterbrüche von mehreren Jahren zu vermerken. In allen anderen Gebieten haben die Abflussmessreihen eine Länge von 40 bis 60 Jahren. Eine Ausnahme bildet das Triftgebiet, für welches Abflussmessungen erst seit 1997 vorliegen (Tab. 4.1).

## 4.5 Eisdickenverteilung

Für die räumliche Modellierung der Gletscherentwicklung muss die Verteilung der Eisdicke bekannt sein. Die Bestimmung derselben ist jedoch komplex, da das Gletscherbett grundsätzlich nur anhand Bohrungen direkt zugänglich wird. Da solche Messungen mit sehr hohem Aufwand verbunden sind und eine flächendeckende Anwendung nicht praktikabel ist, wird die Eisdicke eines Gletschers oft durch Radio-Echo-Sondierungen vermessen. Dabei werden elektromagnetische Wellen ausgesendet, welche sich im Gletschereis ausbreiten und an der Eis-Fels Kontaktfläche zum Teil reflektiert werden. Erreichen diese Reflexionen einmal wieder die Gletscheroberfläche, können sie von einem Messgerät aufgezeichnet werden. Anhand der Zeit, welche eine reflektierte Welle braucht, bis sie wieder an der Oberfläche ist (der sogenannten Laufzeit) und einer Annahme über die Geschwindigkeit mit welcher sich die elektromagnetischen Wellen im Eis ausbreiten, kann die Eismächtigkeit hergeleitet werden. Obwohl die Methode in ihrer Anwendung weniger aufwändig ist als Bohrungen, ist auch mit dieser Methode eine flächendeckende Vermessung nicht möglich. Flächendeckende Eisdickenverteilungen werden deswegen durch eine Kombination aus direkten Messungen und theoretischen Überlegungen hergeleitet, wobei Informationen der Gletscheroberfläche und Kenntnisse über die Eisfließdynamik miteinbezogen werden.

In der vorliegenden Studie wurde die Eisdickenverteilung in den verschiedenen Einzugsgebieten durch das Eisdicken-Bestimmungsverfahren von Farinotti et al. (2009)

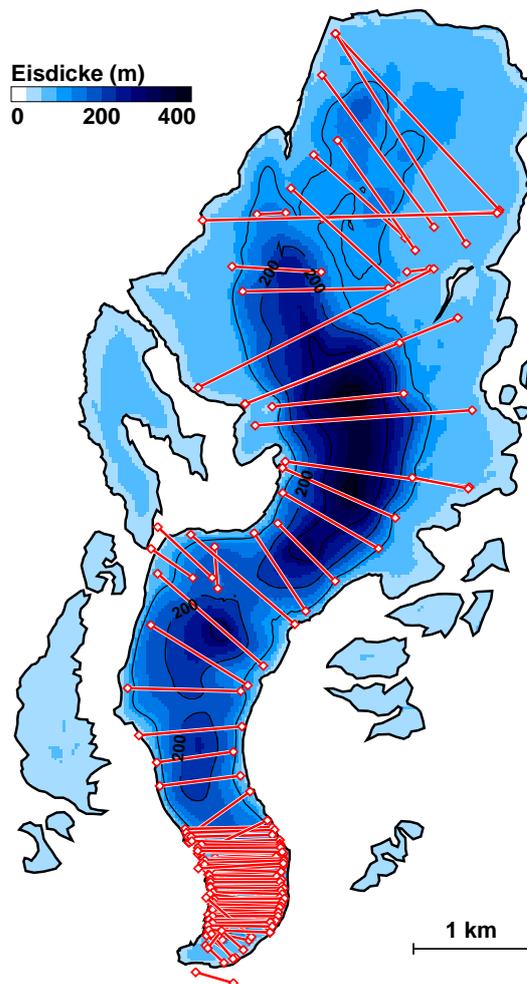
hergeleitet. Die VAW verfügt in jedem der Untersuchungsgebiete bis auf das Gebiet Morteratsch über Radarmessungen. Am Rhone- und des Findelengletscher ist ein helikoptergestützten Radarsystems zum Einsatz gekommen. Für den Triftgletscher beschränken sich die Radarmessungen auf den Zungenbereich wobei einige Messprofile inzwischen bereits eisfrei sind. Die Abbildungen 4.2 bis 4.8 zeigen die für die Hauptgletscher in den verschiedenen Einzugsgebieten berechneten Eisdickenverteilungen sowie die Lage der verwendeten Radarprofile.



**Abbildung 4.2:** Eisdickenverteilung und Position der Messprofile im Einzugsgebiet Aletsch. Die Gletscherumrisse entsprechen dem Stand 1999.

## 4.6 Meteorologische Daten

Nebst den Datensätzen, welche die einzelnen Einzugsgebiete und die darin enthaltenen Gletscher hinsichtlich ihrer Morphologie beschrieben, sind die klimatisch-meteorologischen Randbedingungen die zentralen Eingangsgrößen für die Model-



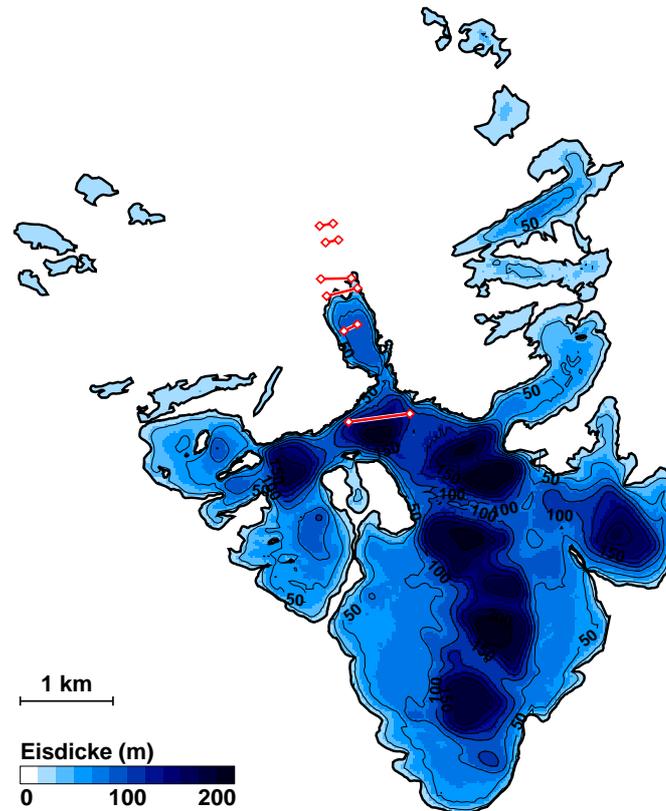
**Abbildung 4.3:** Eisdickenverteilung und Position der Messprofile im Einzugsgebiet Rhone. Die Gletscherumrisse entsprechen dem Stand 2007.

lierungen mit *GERM*. Das Modell wird mit kontinuierlichen Temperatur- und Niederschlagszeitreihen angetrieben, wobei die zeitliche Auflösung ein Tag beträgt. Die benötigten Zeitreihen für Vergangenheit und Zukunft werden mit zwei unterschiedlichen Ansätzen generiert.

#### **Meteorologische Zeitreihen für die Vergangenheit**

Die Meteorologische Zeitreihen für die Vergangenheit wurden in dieser Studie nach den Methoden von Huss et al. (2008a) erstellt. Diese behandeln die beiden Variablen Lufttemperatur und Niederschlag unterschiedlich.

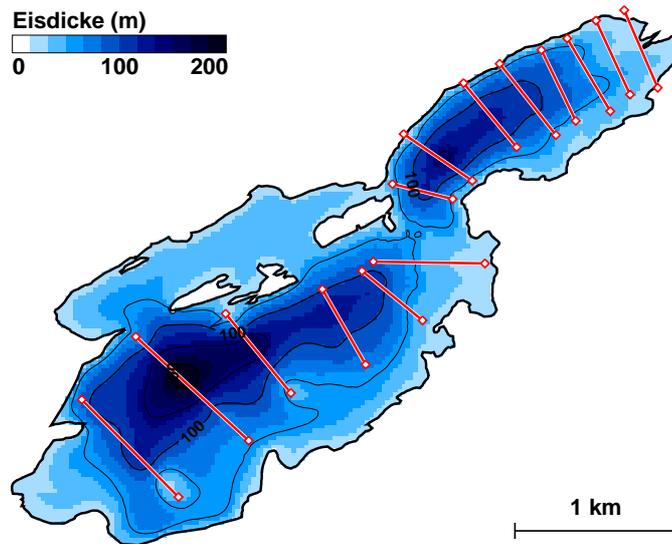
Als Grundlage für die Temperaturzeitreihe dienen die homogenisierten Zeitreihen,



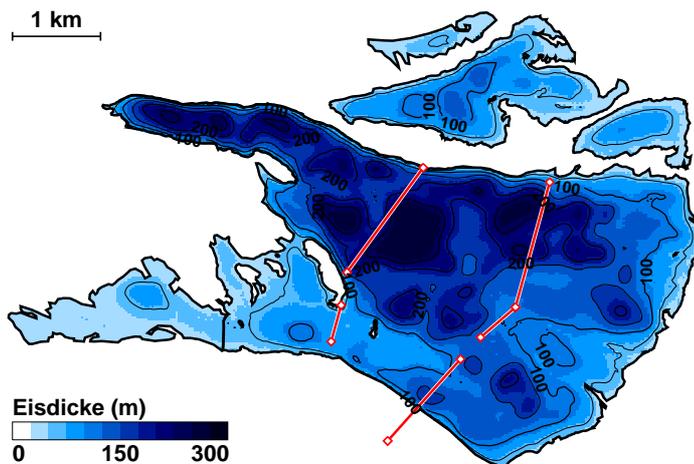
**Abbildung 4.4:** Eisdickenverteilung und Position der Messprofile im Einzugsgebiet Trift. Die Gletscherumrisse entsprechen dem Stand 2008.

welche vom Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz) für 12 Stationen bereitgestellt werden (Begert et al., 2005). Mit einer 'inverse distance'-Interpolation, in welcher die einzelnen Stationen umgekehrt-proportional zu ihrer Entfernung, ins Untersuchungsgebiet übertragen. Da die homogenisierten Zeitreihen der MeteoSchweiz nur in monatlicher Auflösung vorhanden sind, werden Tageschwankungen von der nächstgelegenen Station mit einer kontinuierlichen Messreihe ab 1900 der Zeitreihe überlagert. Obwohl diese Station relativ weit vom betrachteten Gebiet entfernt sein kann, werden trotzdem gute resultate erzielt, da die Lufttemperatur eine auch auf grössere Distanzen gut extrapolierbare Grösse ist (Begert et al., 2005). Um die Temperaturen schliesslich auf die benötigte Höhe jedes einzelnen Gitterpunktes anzupassen, kommt ein lokaler Temperaturgradient zur Anwendung, der aus Messstationen in einem Umkreis von 30 km ermittelt wird.

Der Niederschlag hingegen weist grosse räumliche Unterschiede. Insbesondere in

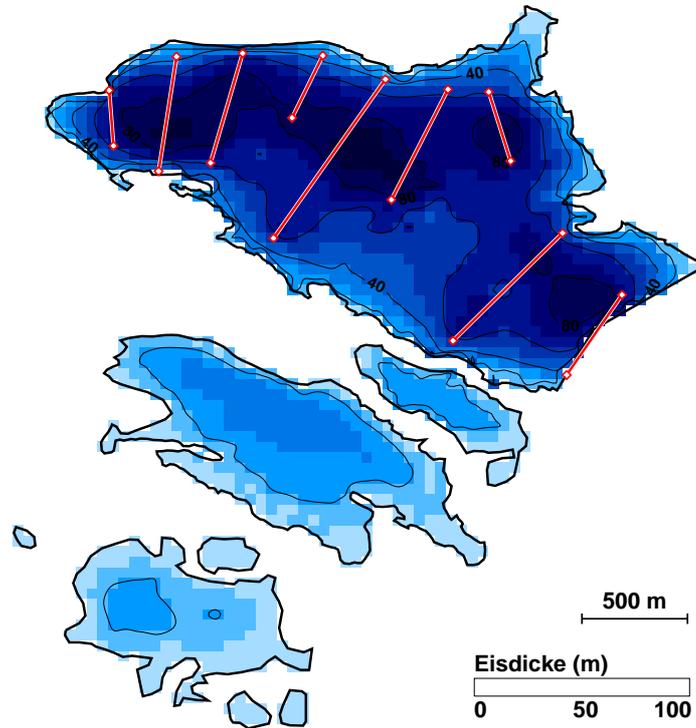


**Abbildung 4.5:** Eisdickenverteilung und Position der Messprofile im Einzugsgebiet Gries. Der Gletscherumriss entspricht dem Stand 2007.



**Abbildung 4.6:** Eisdickenverteilung und Position der Messprofile im Einzugsgebiet Findelen. Die Gletscherumrisse entsprechen dem Stand 2007.

der alpinen Topographie sind diese kleinräumig sehr variabel (Fliri, 1986; Frei and Schär, 1998). Als Grundlage dient deshalb der *PRISM*-Gitterdatensatz von Schwarb et al. (2001). Für die Alpenregion liefert der *PRISM*-Datensatz mittlere Monatsniederschlagssummen mit einer horizontalen Auflösung von etwa 2 km. Die Mittelwerte beziehen sich dabei auf die Periode 1971–1990. Um ebenfalls eine Zeitreihe in täglicher Auflösung zu erstellen, werden die Messungen an der nächstgelegenen Sta-



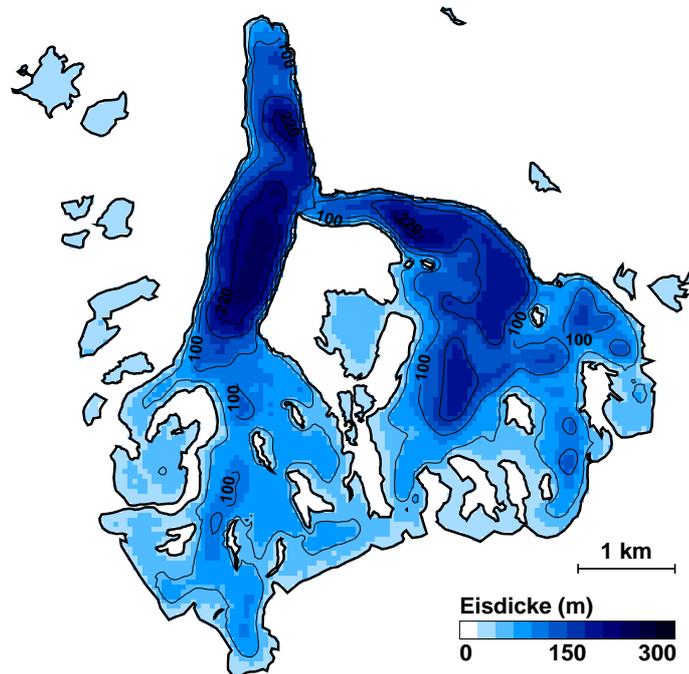
**Abbildung 4.7:** Eisdickenverteilung und Position der Messprofile im Einzugsgebiet Silretta. Die Gletscherumrisse entsprechen dem Stand 2007.

tion linear skaliert, um mit den mittleren Monatssummen des *PRISM*-Datensatz übereinzustimmen. Dabei wird auch ein Wechsel dieser nächstgelegenen Referenzstation während der Modellierungsperiode in Kauf genommen, um die klümmigen Variabilität im Niederschlag möglichst gut zu berücksichtigen.

Die Tabelle 4.2 gibt Aufschluss, welche Messstationen für die Lufttemperatur und den Niederschlag in den einzelnen Untersuchungsgebieten als Referenz verwendet wurden.

### Meteorologische Zeitreihen für die Zukunft

Den notwendigen Temperatur- und Niederschlagsdaten für die Zukunft, liegt der sogenannte 'delta-change approach' zu Grunde. In diesem wird der Effekt der Klimaänderung zwischen zwei Perioden als Unterschied ('Delta') im Mittelwert der betrachteten Variable (Temperatur oder Niederschlag) ausgedrückt. Die beiden Perioden haben dabei gleiche Länge und werden mit 'Referenz-' und 'Szenarioperiode' bezeichnet. Die jeweiligen 'Deltas' müssen nicht notwendigerweise auf den Jahres-



**Abbildung 4.8:** Eisdickenverteilung im Einzugsgebiet Morteratsch. Die Gletscherumrisse entsprechen dem Stand 2008.

mittelwert bezogen sein, sondern können eine höhere zeitliche Auflösung aufweisen. Für die vorliegende Studie wurden 'Deltas' in täglicher Auflösung verwendet, die für zwei unterschiedliche Szenarioperioden (2021–2050 und 2070–2099) vom IAC über das *Center for Climate Systems Modeling (C2SM)* der ETH Zürich bereitgestellt wurden (Bosshard et al., 2011). Als Referenz gilt die Periode 1980–2009. Es stehen zehn Klimaszenarien von 'Deltas' des Niederschlags und der Lufttemperatur jeweils für beide Szenarioperioden zur Verfügung. Diese resultieren von 10 unterschiedlichen Modellketten von globalen und regionalen Klimamodellen aus dem ENSEMBLES Projekt (van der Linden and Mitchell, 2009). Die 10 unterschiedlichen Szenarien sind Ausdruck der Unsicherheit in den Klimamodellen selbst und erlauben es, für das zukünftige Klima eine Bandbreite anzugeben.

Um aus den für zwei diskrete Perioden geltenden Szenarien eine transiente Zeitreihe zu erstellen, wurde zwischen den Perioden eine lineare Interpolation durchgeführt. Wenn man den Mittelwert der Variable  $P$  und  $T$  über die beliebige Periode  $[t - 15, t + 14]$  mit  $\bar{P}(t)$  bzw.  $\bar{T}(t)$  bezeichnet und das 'delta-change'-Signal zwischen der Referenzperiode  $[r - 15, r + 14]$  und der Szenarioperiode  $[s - 15, s + 14]$  mit  $\Delta_{r-s}$ ,

**Tabelle 4.2:** Übersicht über die Referenzstationen, die für die Temperatur- und Niederschlagszeitreihen verwendet wurden. Die Spalte 'Zukunft' führt auf, welche Station für die Fortsetzung der entsprechende Zeitreihe in die Zukunft dienen.

Gebiet	Temperatur	Niederschlag	Zukunft
<b>Aletsch</b>	Bern	Lauterbrunnen	Mürren
<b>Rhone</b>	Bern	Guttannen	Grimsel Hospiz
<b>Trift</b>	Bern	Guttannen	Guttannen
<b>Gries</b>	Sion	Sion, Grimsel (ab 1958)	Reckingen
<b>Findelen</b>	Sion	Zermatt	Zermatt
<b>Silvretta</b>	Davos	Davos, Klosters (ab 1960)	Davos
<b>Morteratsch</b>	Sils Maria	Sils Maria	Corvatsch

kann geschrieben werden:

$$\begin{aligned}
 \bar{P}(t) &= \bar{P}(r) \cdot \frac{\Delta_{r-s}}{s-r} \cdot t \\
 \bar{T}(t) &= \bar{T}(r) + \frac{\Delta_{r-s}}{s-r} \cdot t.
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Da die 'Deltas' tägliche Auflösung aufweisen, gilt die Gleichung für jeden einzelnen Tag im Jahr. Damit können für die zehn zur Verfügung stehenden Klimaszenarien (Modellketten) zehn unterschiedliche Entwicklungen der mittleren Lufttemperatur und des mittleren Niederschlags in der Periode 2010–2100 abgeleitet werden. Dabei würde allerdings die natürliche Jahr-zu-Jahr Variabilität der beiden Variablen nicht berücksichtigt werden. Deshalb wurden für jede der 10 Entwicklungen, wiederum jeweils 10 zufällige Zeitreihen generiert, welche den vorgegebenen Mittelwert einhalten, aber eine aus der Vergangenheit abgeleitete Variabilität aufweisen. Die 10 zufälligen Zeitreihen wurden dabei nach folgendem Schema generiert: Für jedes Jahr in der Zukunft wird zufällig ein Jahr in der Vergangenheit gewählt und entsprechend skaliert, dass der vorgegebene Mittelwert gemäss Gleichung 4.1 in der Zukunft erreicht wird. Damit stehen jeweils ein Satz von 100 möglichen Temperatur- und Niederschlagszeitreihen für die Periode 2010–2100 zur Verfügung mit welchen *GERM* angetrieben werden kann. Für die Zukunft gibt es somit für jedes der Einzugsgebiete 100 mögliche Abflussganglinien, was statistische Analysen von Mittelwert und Bandbreite für den zukünftigen Abfluss ermöglicht.

# Kapitel 5

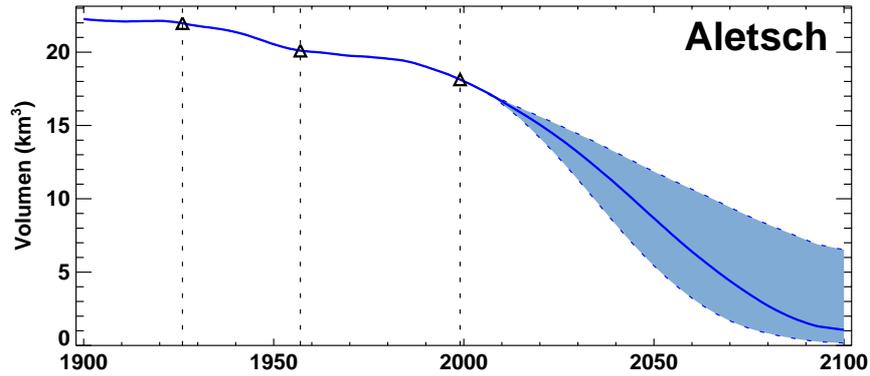
## Resultate

Im folgenden werden die Resultate der Modellrechnungen für die einzelnen Einzugsgebiete vorgestellt. Jedes Einzugsgebiet wird in einem separatem Unterkapitel betrachtet welches in zwei Abschnitte gegliedert ist. Der erste präsentiert einige glaziologische Kenngrössen, die die Entwicklung der Eismassen im jeweiligen Gebiet charakterisieren. Der zweite stellt die erwartete Entwicklungen der modellierten Abflüsse und Abflusskomponenten im Zeitraum 1900–2100 vor. Einige Kennzahlen sind für vier verschiedene Perioden (1940–1969, Referenzperiode 1980–2009 und Szenarioperioden 2021–2050 resp. 2070–2099) in tabellarischer Form zusammengestellt. Der für jedes Einzugsgebiet gleich gehaltene Aufbau soll das Finden der gewünschten Informationen erleichtern.

### 5.1 Einzugsgebiet Aletsch

#### 5.1.1 Gletscherentwicklung

Gemäss Modellrechnungen ist zu erwarten, dass sich das Eisvolumen im Einzugsgebiet Aletsch bis 2040–2070 im Vergleich zur Referenzperiode halbiert haben wird (Abb. 5.1). Bis Ende Jahrhundert wird auch gemäss den günstigsten Szenarien weniger als ein Drittel des heute vorhandenen Eisvolumen übrig sein. Zu erwarten ist, dass bis 2100 weniger als 15% des Einzugsgebiet vergletschert sein werden. Abbildung 5.2 zeigt die Gletscherausdehnung für vier ausgewählte Zeitpunkte. Zu bemerken ist der sehr rasche Schwund, der aufgrund seiner tiefen Lage, für den



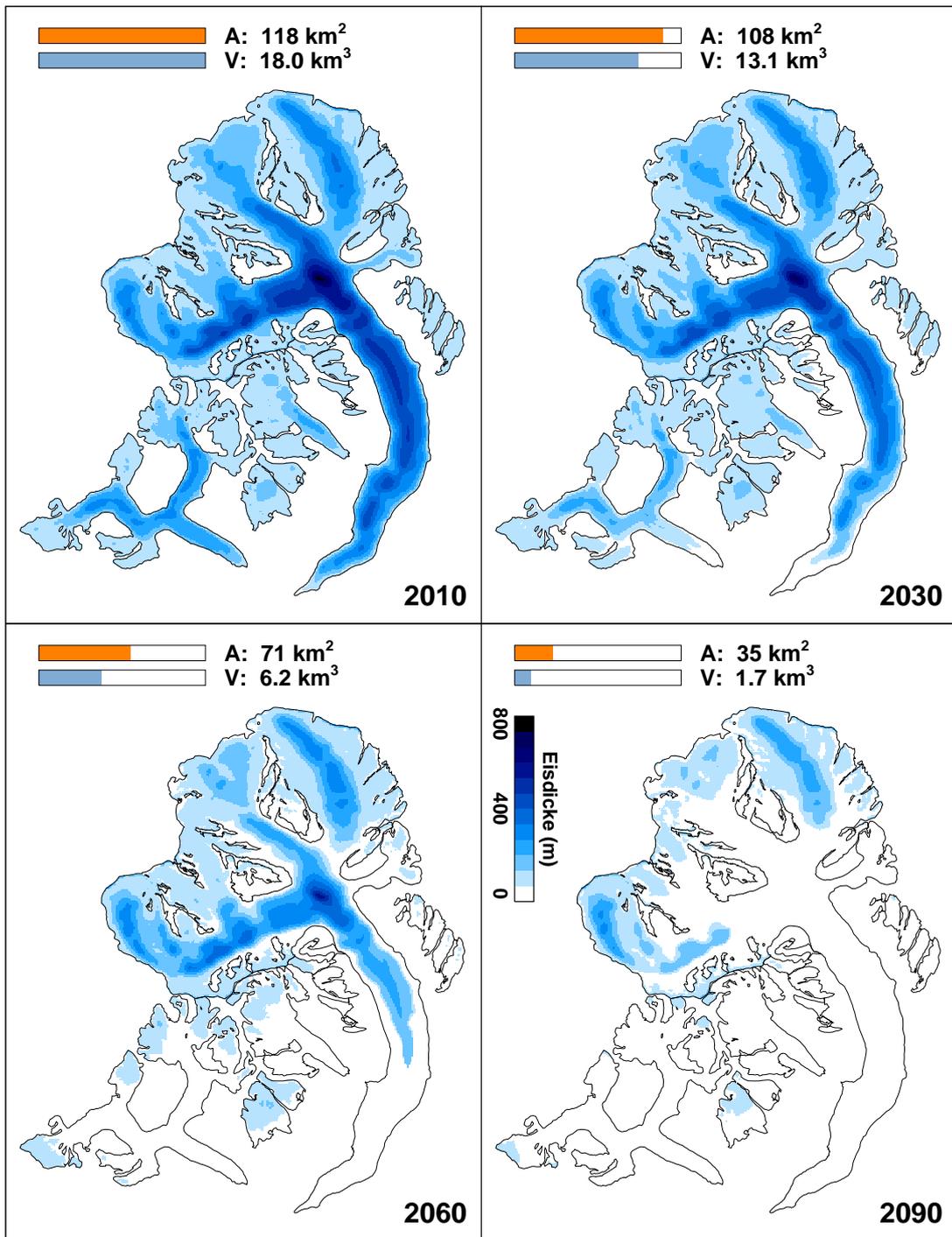
**Abbildung 5.1:** Entwicklung des Eisvolumens im Einzugsgebiet Aletsch. Die durchgezogene Linie entspricht einem gleitenden Mittelwert über 15 Jahre. Das hellblaue Band enthält 95 % aller Realisierungen. Zeitpunkte für welche ein Geländemodell zur Verfügung steht sind mit einem Dreieck gekennzeichnet.

Oberaletschgletscher simuliert wird. Dass ein allfällige Zunahme der heute schon bedeutenden Schuttbedeckung den Prozess verlangsamen könnte, ist nicht ausgeschlossen. Zum heutigen Zeitpunkt berücksichtigt das verwendete Modell nämlich derartige Prozesse nicht.

Die Jahresmassenbilanzen im Gebiet werden bis Ende Jahrhundert voraussichtlich stark negativ bleiben (Tab. 5.1). Für die Winterbilanzen sind nur kleinere Änderungen zu erwarten. Voraussichtlich werden diese auf einem Niveau von ungefähr  $115 \text{ cm a}^{-1}$  stabil bleiben. Bis Ende Jahrhundert wird für die Gleichgewichtslinie einen Anstieg um etwa 800 m vorhergesagt. Damit würde die Akkumulationszone im Gebiet auf wenige Quadratkilometer schrumpfen.

**Tabelle 5.1:** Entwicklung glaziologischer Kenngrößen im Einzugsgebiet Aletsch. Angaben sind Mittelwerte über 30 Jahre. 'Vergl.': Vergletscherungsgrad, ' $A_{GI}$ ': Gletscherfläche, ' $V_{GI}$ ': Gletschereisvolumen, ' $b_n$ ': Jahresmassenbilanz, ' $b_w$ ': Wintermassenbilanz, 'ELA': Höhe der Gleichgewichtslinie.

Periode	Vergl. %	$A_{GI}$ ( $\text{km}^2$ )	$V_{GI}$ ( $\text{km}^3$ )	$b_n$ (cm w.e.)	$b_w$ (cm w.e.)	ELA (m ü.M.)
1940–1969	64	$128 \pm 2$	$20.1 \pm 0.4$	$-41 \pm 70$	$100 \pm 25$	$3010 \pm 140$
1980–2009	61	$123 \pm 3$	$18.4 \pm 0.3$	$-85 \pm 65$	$110 \pm 30$	$3080 \pm 130$
2021–2050	52	$104 \pm 10$	$12.1 \pm 2.3$	$-195 \pm 80$	$110 \pm 30$	$3310 \pm 240$
2070–2099	19	$39 \pm 20$	$2.0 \pm 2.0$	$-300 \pm 100$	$120 \pm 35$	$3860 \pm 320$



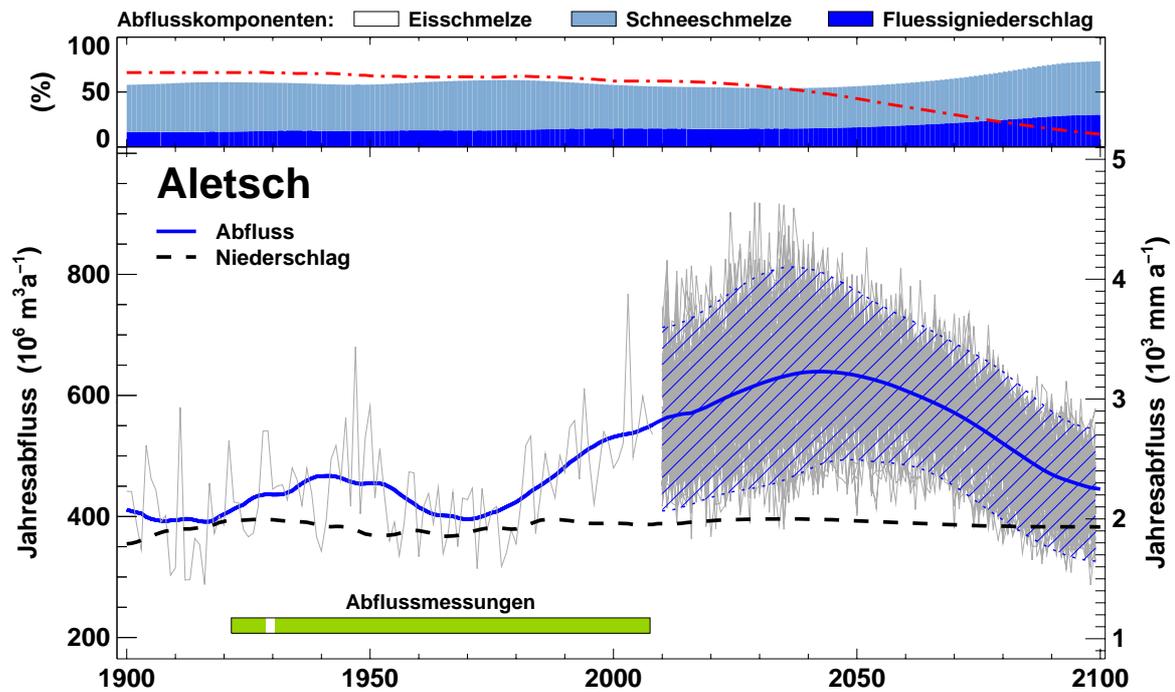
**Abbildung 5.2:** Gletscherentwicklung im Einzugsgebiet Aletsch. Die Farbtönung entspricht der mittleren Eisdicke sämtlicher Realisierungen. Bereiche in denen mehr als die Hälfte der Realisierungen keinen Gletscher vorhersagen sind weiss dargestellt. Die gezeigten Gletscherumrisse entsprechen dem Stand 1999.

**Tabelle 5.2:** Entwicklung von Temperatur und Niederschlag im Einzugsgebiet Aletsch. Angaben sind Gebietsmittelwerte über 30 Jahre. 'Festanteil' bezeichnet den Anteil Jahresniederschlag, der in fester Form anfällt.

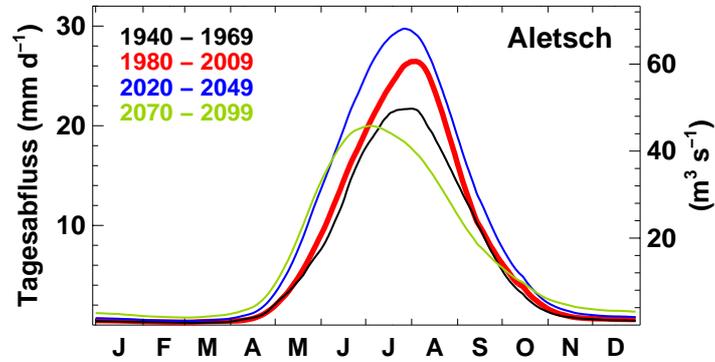
Periode	Temperatur (°C)	Niederschlag (mm a <sup>-1</sup> )	Festanteil (%)
1940–1969	-3.8 ± 1.2	1890 ± 395	83
1980–2009	-2.9 ± 1.2	1970 ± 395	78
2021–2050	-1.5 ± 1.3	2000 ± 400	72
2070–2099	0.8 ± 1.9	1940 ± 400	62

### 5.1.2 Abflussentwicklung

Die grossen Eismassen, die im Aletschgebiet gespeichert sind, lassen markante Änderungen im Abfluss und dessen Jahresgang erwarten (Abb. 5.3 und 5.4). Gemäss den verwendeten Klimaszenarien, wird sich der Jahresniederschlag im Gebiet bis ins Jahr 2100 nicht signifikant ändern (im Mittel über die Szenarien ist eine Abnahme von weniger als 5% zu erwarten). Allerdings wird erwartet, dass sich der Flüssiganteil des Jahresniederschlags um rund 10% erhöhen wird (Tab. 5.2). Der Jahresabfluss wird bis etwa 2040 aufgrund der stärkeren Eisschmelze zunehmen. Für 2040 wird ein mittlerer Jahresabfluss von  $640 \pm 80$  Mio. m<sup>3</sup> vorausgesagt, was im Vergleich zur Referenzperiode einem Anstieg von 26% entspricht. Ab etwa 2040 ist eine Abnahme des Jahresabfluss zu erwarten. Um 2090 wird eine Jahresabflussmenge von  $470 \pm 70$  Mio. m<sup>3</sup> vorhergesagt, was verglichen mit der Referenzperiode einer knapp signifikanten Abnahme entspricht (-5%). Gemäss Modellresultate wird sich die Evapotranspiration bis 2090 mehr als verdoppeln (Tab. 5.3). Bei der Entwicklung des Abflussjahresgang (Abb. 5.4) ist zu bemerken, dass sich der Maximalabfluss in den Sommermonaten bis Ende des Jahrhunderts deutlich verringern wird. Im Vergleich zur Referenzperiode wird für 2090 eine Abnahme um fast 30% vorhergesagt. Es wird zudem erwartet, dass sich der Zeitpunkt des maximalen Abflusses um rund einen Monat verschieben wird: von Anfangs August nach Anfangs Juli.



**Abbildung 5.3:** Entwicklung von Abfluss und Niederschlag im Einzugsgebiet Aletsch. Gezeigt sind 100 mögliche Realisierungen des Jahresabflussverlaufs in der Periode 1900–2100 (graue Linien) und ein über 30 Jahre geglätteter Mittelwert (blaue Linie). Das blau schraffierte Band enthält 95 % der Realisierungen. Für den Jahresniederschlag ist nur der geglättete Mittelwert gezeigt (schwarz gestrichelte Linie). Die relativen Beiträge zum Gesamtabfluss sind im oberen Bereich der Graphik gezeigt. Aufgeschlüsselt sind die Beiträge von Eis- und Schneeschmelze sowie Flüssigniederschlag. Im selben Bereich ist auch der Verlauf der Vergletscherung im Gebiet dargestellt (rote Punkt-Strich Linie). Der grüne Balken im unteren Bereich der Graphik zeigt die Periode in welcher gemessene Abflussdaten zur Verfügung stehen.



**Abbildung 5.4:** Zeitliche Entwicklung des Abflussregime im Einzugsgebiet Aletsch. Gezeigt ist der Verlauf des mittleren Tagesabflusses gemittelt über eine Periode von 30 Jahre.

**Tabelle 5.3:** Entwicklung von Abfluss und Evapotranspiration (ET) im Einzugsgebiet Aletsch.  $M_{\text{Eis}}$ ,  $M_{\text{Schnee}}$  und ' $P_{\text{fl}}$ ' bezeichnen den Abflussanteil der durch Eisschmelze, Schneeschmelze oder Niederschlag verursacht wird. Angaben sind Gebietsmittelwerte über 30 Jahre.

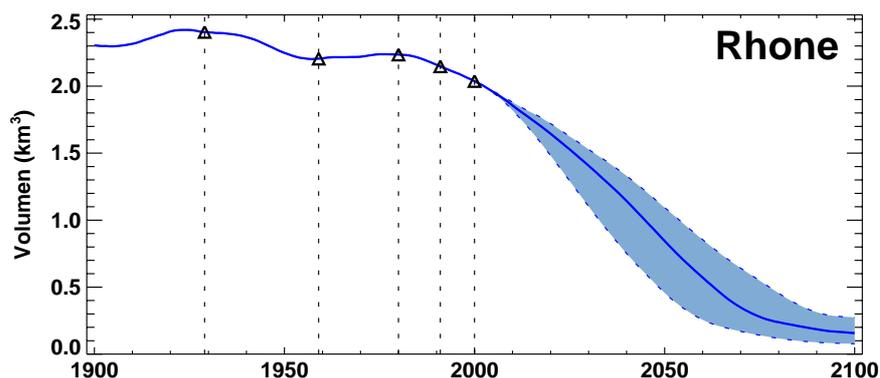
Periode	Abfluss (mm a <sup>-1</sup> )	$M_{\text{Eis}}$ (%)	$M_{\text{Schnee}}$ (%)	$P_{\text{fl}}$ (%)	ET (mm a <sup>-1</sup> )
1940–1969	2210 ± 400	43	43	14	35 ± 5
1980–2009	2550 ± 380	42	41	17	40 ± 5
2021–2050	3180 ± 430	46	37	17	55 ± 10
2070–2099	2490 ± 370	28	45	26	100 ± 25

## 5.2 Einzugsgebiet Rhone

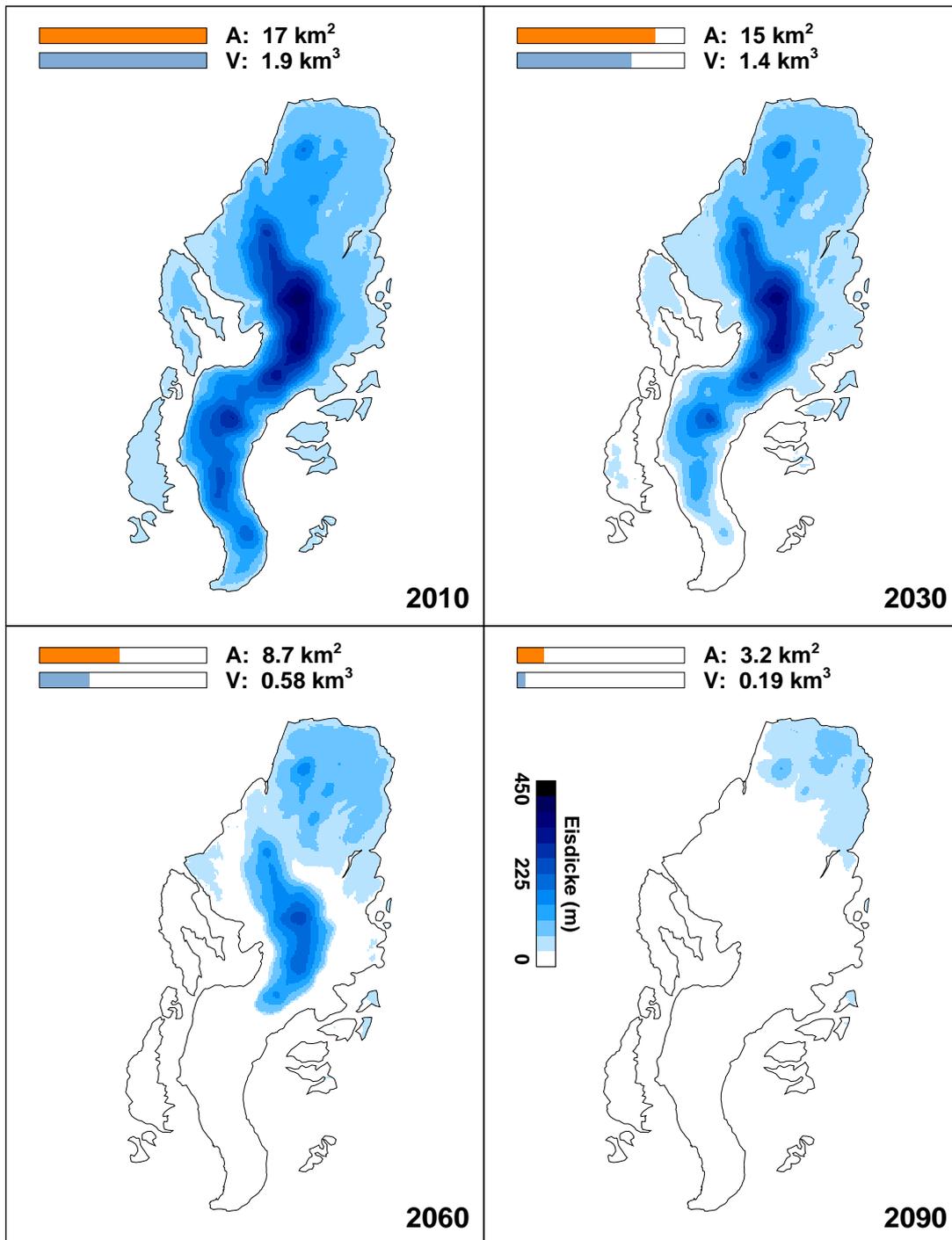
### 5.2.1 Gletscherentwicklung

Für das Einzugsgebiet Rhone lassen die Berechnungen vermuten, dass sich bis 2030–2050 das Eisvolumen gegenüber der Referenzperiode halbiert haben wird (Abb. 5.5). Für Ende Jahrhundert ist zu erwarten, dass sich die Gletscher in Höhenlagen über etwa 3200 m ü.M. zurückgezogen haben werden (Abb. 5.6), was die Vergletscherung des Gebiets auf weniger als 10% schrumpfen lassen würde.

Durch den leichten Niederschlagsanstieg, der von den verwendeten Klimaszenarien für das Winterhalbjahr vorhergesagt wird, und durch den Gletscherrückzug in höheren Lagen, ist zu vermuten, dass die Winterbilanzen der Gletscherflächen leicht zunehmen werden. Dieser Effekt wird aber weitgehend durch die negativ werdenden Sommerbilanzen übertönt, so dass die Jahresmassenbilanzen ebenfalls stärker negativ sein werden. Für den Zeitraum um 2060 werden im Mittel Jahresbilanzen in der Grösse von  $-2.5 \text{ m a}^{-1}$  prognostiziert (Tab. 5.4). Gemäss Berechnungen wird der Anstieg der Gleichgewichtslinie bis Ende Jahrhundert in etwa 500 m betragen. Dadurch würde die Gleichgewichtslinie von den etwa 3000 m ü. M. während der Referenzperiode auf etwa 3500 m ü. M. ansteigen.



**Abbildung 5.5:** Entwicklung des Eisvolumens im Einzugsgebiet Rhone. Die durchgezogene Linie entspricht einem gleitenden Mittelwert über 15 Jahre. Das hellblaue Band enthält 95% aller Realisierungen. Zeitpunkte für welche ein Geländemodell zur Verfügung steht sind mit einem Dreieck gekennzeichnet.



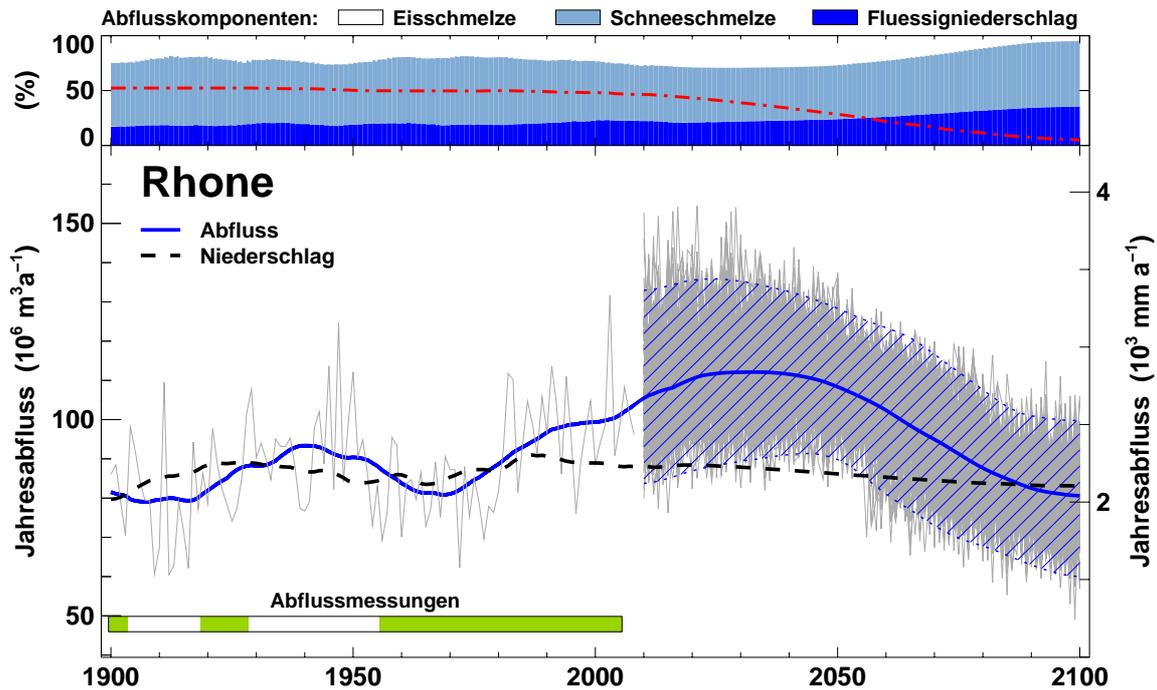
**Abbildung 5.6:** Gletscherentwicklung im Einzugsgebiet Rhone. Gezeigt ist nur das Gebiet um den Hauptgletscher. Die Farbtonung entspricht der mittleren Eisdicke sämtlicher Realisierungen. Bereiche in denen mehr als die Hälfte der Realisierungen keinen Gletscher vorhersagen sind weiss dargestellt. Die gezeigten Gletscherumrisse entsprechen dem Stand 2007.

**Tabelle 5.4:** Entwicklung glaziologischer Kenngrößen im Einzugsgebiet Rhone. Angaben sind Mittelwerte über 30 Jahre. 'Vergl.': Vergletscherungsgrad, 'A<sub>GI</sub>': Gletscherfläche, 'V<sub>GI</sub>': Gletschereisvolumen, 'b<sub>n</sub>': Jahresmassenbilanz, 'b<sub>w</sub>': Wintermassenbilanz, 'ELA': Höhe der Gleichgewichtslinie.

Periode	Vergl. %	A <sub>GI</sub> (km <sup>2</sup> )	V <sub>GI</sub> (km <sup>3</sup> )	b <sub>n</sub> (cm w.e.)	b <sub>w</sub> (cm w.e.)	ELA (m ü.M.)
1940–1969	50	19.8 ± 0.3	2.21 ± 0.03	-25 ± 110	195 ± 45	2910 ± 150
1980–2009	48	19.1 ± 0.4	2.09 ± 0.10	-60 ± 75	175 ± 40	2970 ± 130
2021–2050	35	14.2 ± 2.1	1.27 ± 0.29	-195 ± 95	165 ± 40	3210 ± 150
2070–2099	9	3.7 ± 2.2	0.21 ± 0.16	-210 ± 105	190 ± 45	3450 ± 80

## 5.2.2 Abflussentwicklung

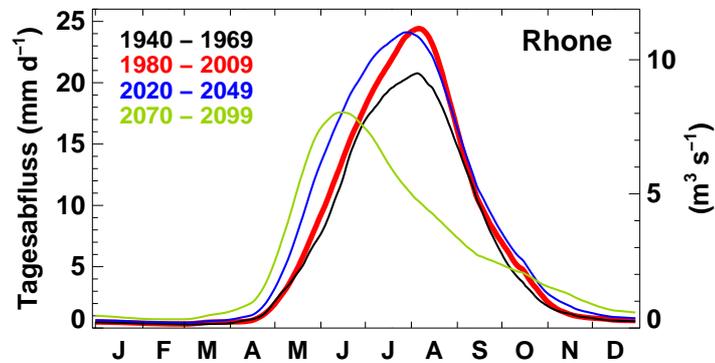
Gemäss Modellrechnungen ist für das Einzugsgebiet Rhone bis etwa 2030 von einem Anstieg der Jahresabflussmengen auszugehen (Abb. 5.7). Verglichen mit der Referenzperiode beträgt der Anstieg bis 2030 an die 14 %, was einem Jahresabfluss von  $112 \pm 11 \text{ Mio. m}^3 \text{ a}^{-1}$  entspricht. In der Periode 2030–2090 ist mit einer Abnahme der Gesamtabflussmenge zu rechnen. Im Vergleich zur Referenzperiode sollte diese bis 2090 etwa 15 % betragen. Dies würde dem Abflussniveau entsprechen, welches in der Periode 1960–1970 vorherrschte. Die Variationen im Abfluss sind hauptsächlich durch das Abschmelzen der Eismassen bedingt. Für den Jahresniederschlag wird bis 2090 eine Abnahme von 7 % vorausgesagt (Tab. 5.5). Starke Änderungen sind in der Entwicklung des Abflussregimes zu erwarten (Abb. 5.8). Insbesondere ist mit einer starken Reduktion des Abflusses in den Monaten Juli, August und September zu rechnen. Bis 2090 sagen die Modellrechnungen für den Monat August eine Abnahme des mittleren Abflusses um etwas mehr als die Hälfte voraus. Hingegen wird sich der Abfluss insbesondere in den Monaten Mai und Juni stark erhöhen. Der maximale mittlere Abfluss, welcher in der Referenzperiode jeweils Anfangs August verzeichnet wurde, wird 2090 für Mitte Juni erwartet.



**Abbildung 5.7:** Entwicklung von Abfluss und Niederschlag im Einzugsgebiet Rhone. Gezeigt sind 100 mögliche Realisierungen des Jahresabflussverlaufs in der Periode 1900–2100 (graue Linien) und ein über 30 Jahre geglätteter Mittelwert (blaue Linie). Das blau schraffierte Band enthält 95 % der Realisierungen. Für den Jahresniederschlag ist nur der geglättete Mittelwert gezeigt (schwarz gestrichelte Linie). Die relativen Beiträge zum Gesamtabfluss sind im oberen Bereich der Graphik gezeigt. Aufgeschlüsselt sind die Beiträge von Eis- und Schneeschmelze sowie Flüssigniederschlag. Im selben Bereich ist auch der Verlauf der Vergletscherung im Gebiet dargestellt (rote Punkt-Strich Linie). Der grüne Balken im unteren Bereich der Graphik zeigt die Periode in welcher gemessene Abflussdaten zur Verfügung stehen.

**Tabelle 5.5:** Entwicklung von Temperatur und Niederschlag im Einzugsgebiet Rhone. Angaben sind Gebietsmittelwerte über 30 Jahre. 'Festanteil' bezeichnet den Anteil Jahresniederschlag, der in fester Form anfällt.

Periode	Temperatur (°C)	Niederschlag (mm a <sup>-1</sup> )	Festanteil (%)
1940–1969	-3.3 ± 1.2	2160 ± 460	78
1980–2009	-2.4 ± 1.3	2260 ± 455	74
2021–2050	-1.1 ± 1.2	2220 ± 465	70
2070–2099	1.1 ± 1.7	2120 ± 500	60



**Abbildung 5.8:** Zeitliche Entwicklung des Abflussregime im Einzugsgebiet Rhone. Gezeigt ist der Verlauf des mittleren Tagesabflusses gemittelt über eine Periode von 30 Jahre.

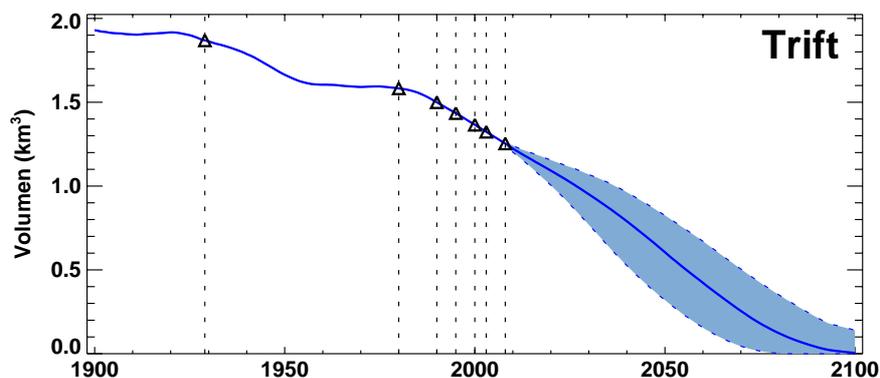
**Tabelle 5.6:** Entwicklung von Abfluss und Evapotranspiration (ET) im Einzugsgebiet Rhone.  $M_{\text{Eis}}$ ,  $M_{\text{Schnee}}$  und ' $P_{\text{fi}}$ ' bezeichnen den Abflussanteil der durch Eisschmelze, Schneeschmelze oder Niederschlag verursacht wird. Angaben sind Gebietsmittelwerte über 30 Jahre.

Periode	Abfluss (mm a <sup>-1</sup> )	$M_{\text{Eis}}$ (%)	$M_{\text{Schnee}}$ (%)	$P_{\text{fi}}$ (%)	ET (mm a <sup>-1</sup> )
1940–1969	2220 ± 330	24	57	19	100 ± 10
1980–2009	2490 ± 290	23	56	21	115 ± 10
2021–2050	2830 ± 280	29	49	22	145 ± 15
2070–2099	2160 ± 280	10	57	33	210 ± 25

## 5.3 Einzugsgebiet Trift

### 5.3.1 Gletscherentwicklung

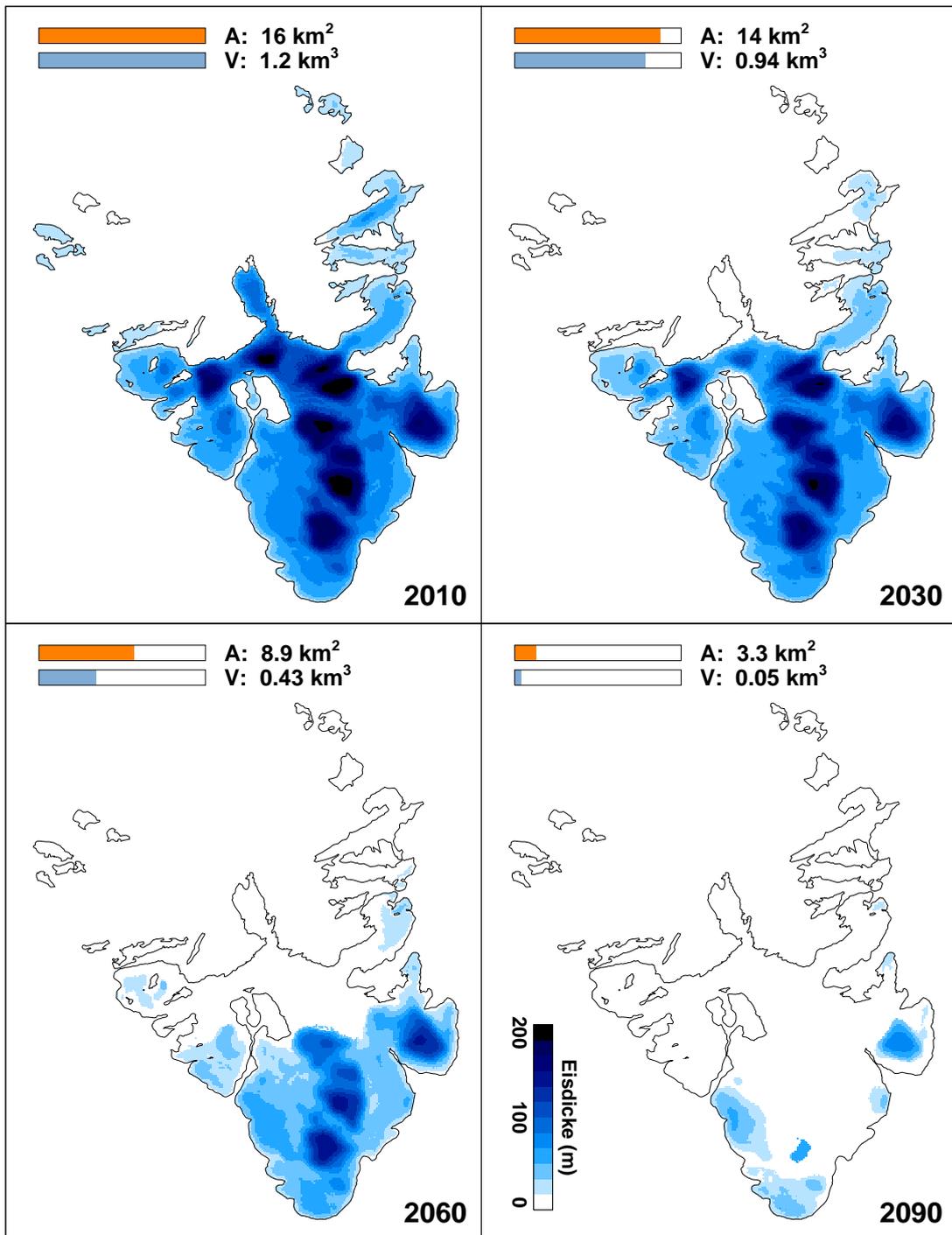
Im Einzugsgebiet Trift dürfte sich das Eisvolumen der Referenzperiode bis 2035–2060 halbiert haben (Abb. 5.9). Gemäss den ungünstigeren Klimaszenarien könnte das Gebiet bereits ab 2080 eisfrei sein. Bis 2100 lassen sämtliche Szenarien vermuten, dass nur noch ein unbedeutender Teil des Einzugsgebiet vergletschert sein wird (Abb. 5.10). Die Gleichgewichtslinie würde somit Ende Jahrhundert am oberen Einzugsgebietrand zu liegen kommen. Für die Jahresmassenbilanzen wird erwartet, dass der Durchschnitt bereits ab 2030 Werte deutlich unter  $-1 \text{ m a}^{-1}$  annehmen wird (Tab. 5.7).



**Abbildung 5.9:** Entwicklung des Eisvolumens im Einzugsgebiet Trift. Die durchgezogene Linie entspricht einem gleitenden Mittelwert über 15 Jahre. Das hellblaue Band enthält 95 % aller Realisierungen. Zeitpunkte für welche ein Geländemodell zur Verfügung steht sind mit einem Dreieck gekennzeichnet.

### 5.3.2 Abflussentwicklung

Die Modellrechnungen sagen für das Einzugsgebiet Trift relativ geringe Änderungen der Jahresabflüsse bis etwa 2050 voraus (Abb. 5.11). Die maximalen Jahresabflussmengen werden voraussichtlich um 2040 eintreffen und mit geschätzten  $110 \pm 10 \text{ Mio. m}^3 \text{ a}^{-1}$  nur unwesentlich (etwa 1 %) über dem Niveau der Referenzperiode ausfallen. Ab 2050 kann von einer kontinuierlichen Abnahme der Jahresabflüsse ausgegangen werden, die per 2090 einer Reduktion von etwa 13 % entsprechen wird. Die



**Abbildung 5.10:** Gletscherentwicklung im Einzugsgebiet Trift. Die Farbtonung entspricht der mittleren Eisdicke sämtlicher Realisierungen. Bereiche in denen mehr als die Hälfte der Realisierungen keinen Gletscher vorhersagen sind weiss dargestellt. Die gezeigten Gletscherumrisse entsprechen dem Stand 2008.

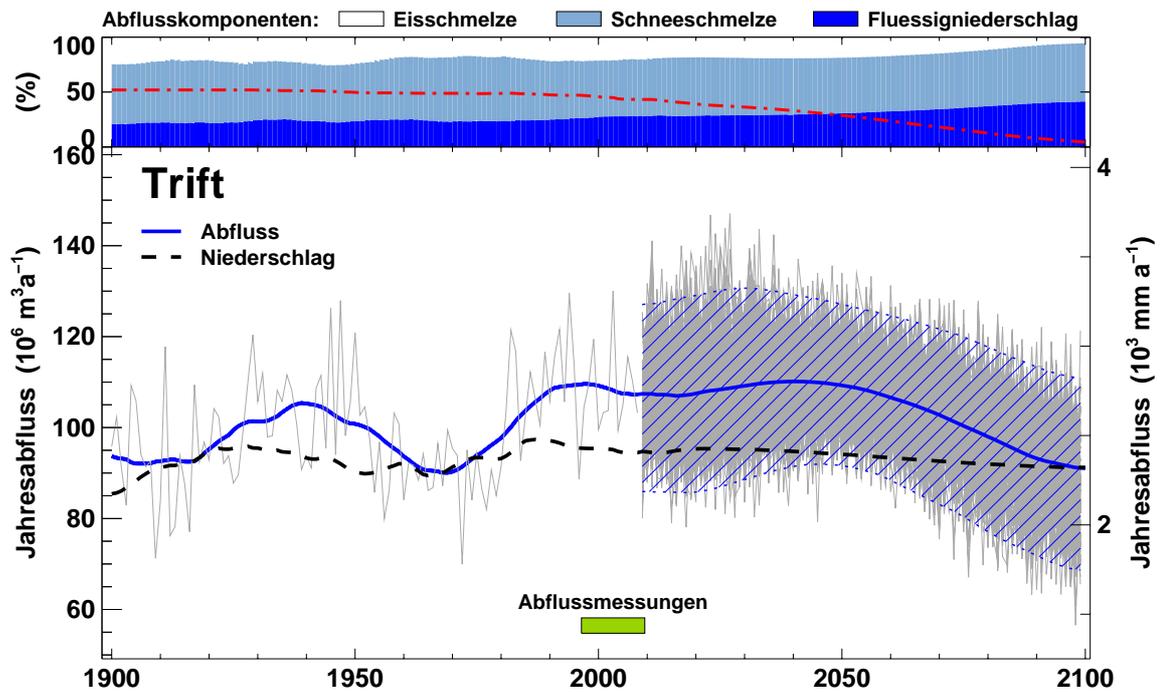
**Tabelle 5.7:** Entwicklung glaziologischer Kenngrößen im Einzugsgebiet Trift. Angaben sind Mittelwerte über 30 Jahre. 'Vergl.': Vergletscherungsgrad, 'A<sub>Gl</sub>': Gletscherfläche, 'V<sub>Gl</sub>': Gletschereisvolumen, 'b<sub>n</sub>': Jahresmassenbilanz, 'b<sub>w</sub>': Wintermassenbilanz, 'ELA': Höhe der Gleichgewichtslinie.

Periode	Vergl. %	A <sub>Gl</sub> (km <sup>2</sup> )	V <sub>Gl</sub> (km <sup>3</sup> )	b <sub>n</sub> (cm w.e.)	b <sub>w</sub> (cm w.e.)	ELA (m ü.M.)
1940–1969	49	19.5 ± 0.3	1.63 ± 0.03	-35 ± 75	135 ± 35	2810 ± 160
1980–2009	46	18.3 ± 0.7	1.44 ± 0.12	-75 ± 65	170 ± 40	2900 ± 140
2021–2050	33	13.3 ± 1.6	0.86 ± 0.19	-130 ± 80	165 ± 35	3080 ± 130
2070–2099	9	3.8 ± 2.5	0.08 ± 0.11	-260 ± 90	125 ± 80	3210 ± 70

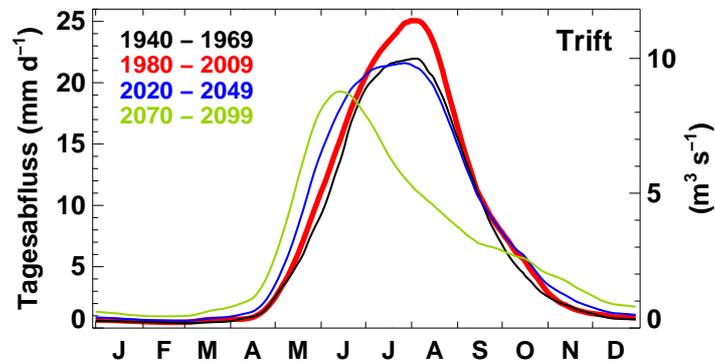
Änderungen im Jahresverlauf des Abflusses werden sich voraussichtlich deutlicher und insbesondere auch früher bemerkbar machen. So wird bereits für 2030 eine Reduktion des maximalen Monatsabflusses um etwa 10 % erwartet (Abb. 5.12). Die Modellrechnungen lassen vermuten, dass diese Reduktion bis 2090 über 50 % betragen wird. Das Maxima des Abflusses wird dann nicht mehr anfangs August sondern Mitte Juni eintreffen. Für das Einzugsgebiet ist die bis Ende Jahrhundert prognostizierte Abnahme des Jahresniederschlags knapp an der Signifikanzgrenze (-5 % Tab. 5.8).

**Tabelle 5.8:** Entwicklung von Temperatur und Niederschlag im Einzugsgebiet Trift. Angaben sind Gebietsmittelwerte über 30 Jahre. 'Festanteil' bezeichnet den Anteil Jahresniederschlag, der in fester Form anfällt.

Periode	Temperatur (°C)	Niederschlag (mm a <sup>-1</sup> )	Festanteil (%)
1940–1969	-2.5 ± 1.2	2320 ± 510	73
1980–2009	-1.7 ± 1.3	2450 ± 505	69
2021–2050	-0.4 ± 1.1	2420 ± 515	63
2070–2099	1.7 ± 1.6	2330 ± 530	54



**Abbildung 5.11:** Entwicklung von Abfluss und Niederschlag im Einzugsgebiet Trift. Gezeigt sind 100 mögliche Realisierungen des Jahresabflussverlaufs in der Periode 1900–2100 (graue Linien) und ein über 30 Jahre geglätteter Mittelwert (blaue Linie). Das blau schraffierte Band enthält 95 % der Realisierungen. Für den Jahresniederschlag ist nur der geglättete Mittelwert gezeigt (schwarz gestrichelte Linie). Die relativen Beiträge zum Gesamtabfluss sind im oberen Bereich der Graphik gezeigt. Aufgeschlüsselt sind die Beiträge von Eis- und Schneeschmelze sowie Flüssigniederschlag. Im selben Bereich ist auch der Verlauf der Vergletscherung im Gebiet dargestellt (rote Punkt-Strich Linie). Der grüne Balken im unteren Bereich der Graphik zeigt die Periode in welcher gemessene Abflussdaten zur Verfügung stehen.



**Abbildung 5.12:** Zeitliche Entwicklung des Abflussregime im Einzugsgebiet Trift. Gezeigt ist der Verlauf des mittleren Tagesabflusses gemittelt über eine Periode von 30 Jahre.

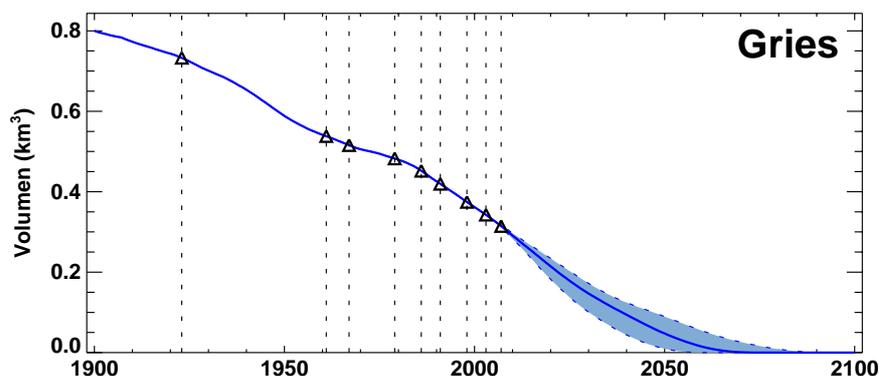
**Tabelle 5.9:** Entwicklung von Abfluss und Evapotranspiration (ET) im Einzugsgebiet Trift.  $M_{\text{Eis}}$ ,  $M_{\text{Schnee}}$  und ' $P_{\text{fl}}$ ' bezeichnen den Abflussanteil der durch Eisschmelze, Schneeschmelze oder Niederschlag verursacht wird. Angaben sind Gebietsmittelwerte über 30 Jahre.

Periode	Abfluss (mm a <sup>-1</sup> )	$M_{\text{Eis}}$ (%)	$M_{\text{Schnee}}$ (%)	$P_{\text{fl}}$ (%)	ET (mm a <sup>-1</sup> )
1940–1969	2490 ± 300	22	54	24	52 ± 5
1980–2009	2760 ± 260	21	53	26	65 ± 10
2021–2050	2790 ± 270	19	52	29	95 ± 15
2070–2099	2430 ± 280	10	52	38	145 ± 20

## 5.4 Einzugsgebiet Gries

### 5.4.1 Gletscherentwicklung

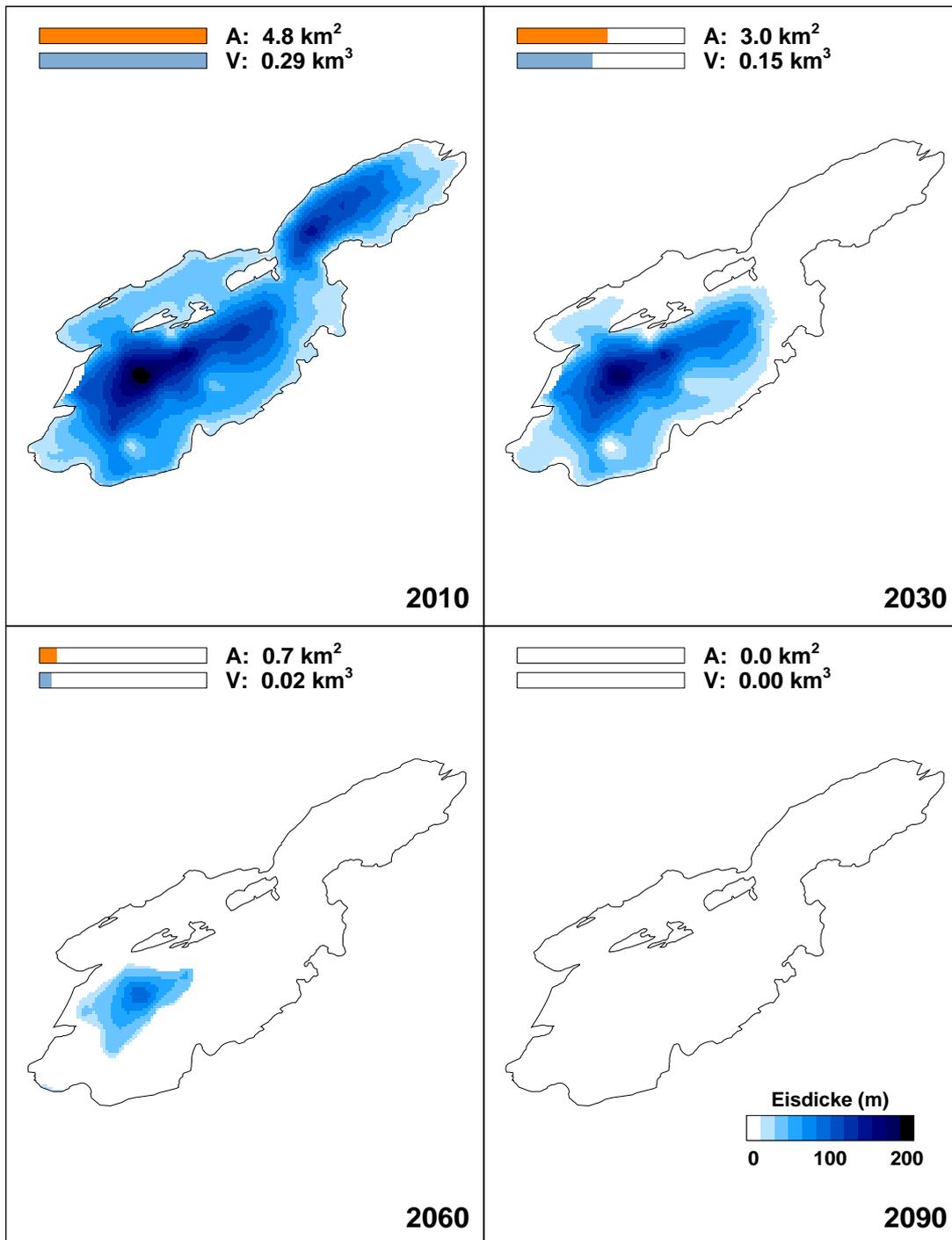
Bereits in der Vergangenheit war der Griesgletscher ein Gletscher mit stark negativen Massenbilanzen (siehe z.B. Huss et al., 2008). Dementsprechend schnell gestaltet sich der zu erwartende Gletscherschwund. Gemäss Modellrechnungen wird eine Halbierung des in der Referenzperiode vorhandenen Eisvolumens bis 2020–2025 eintreffen und selbst die positivsten Szenarien sagen für 2080 ein komplett eisfreies Einzugsgebiet voraus (Abb. 5.13 und 5.14). Die Jahresmassenbilanzen werden ab schätzungsweise 2020 im Mittel unter  $-2 \text{ m a}^{-1}$  zu liegen kommen und die Gleichgewichtslinie wird ab etwa 2070 an die Obergrenze des Gebiets stossen (Tab. 5.10).



**Abbildung 5.13:** Entwicklung des Eisvolumens im Einzugsgebiet Gries. Die durchgezogene Linie entspricht einem gleitenden Mittelwert über 15 Jahre. Das hellblaue Band enthält 95 % aller Realisierungen. Zeitpunkte für welche ein Geländemodell zur Verfügung steht sind mit einem Dreieck gekennzeichnet.

### 5.4.2 Abflussentwicklung

Für das Einzugsgebiet Gries ist im Vergleich zum heutigen (2010) Niveau kein Anstieg des Jahresabfluss mehr zu erwarten (Abb. 5.15). Im Vergleich zur Referenzperiode ist gemäss den Modellierungen bis 2050 mit einer Abnahme der Jahresabflussmenge um 15 % zu rechnen. Bis Ende des Jahrhunderts sollte der Jahresabfluss auf  $16 \pm 3 \text{ Mio. m}^3 \text{ a}^{-1}$  zurückgegangen sein, was einer Abnahme von etwa 30 % entspricht. Die Monatsabflussspitze wird sich dabei von heute Ende Juli nach Anfangs



**Abbildung 5.14:** Gletscherentwicklung im Einzugsgebiet Gries. Die Farbtonung entspricht der mittleren Eisdicke sämtlicher Realisierungen. Bereiche in denen mehr als die Hälfte der Realisierungen keinen Gletscher vorhersagen sind weiss dargestellt. Die gezeigten Gletscherumrisse entsprechen dem Stand 2007.

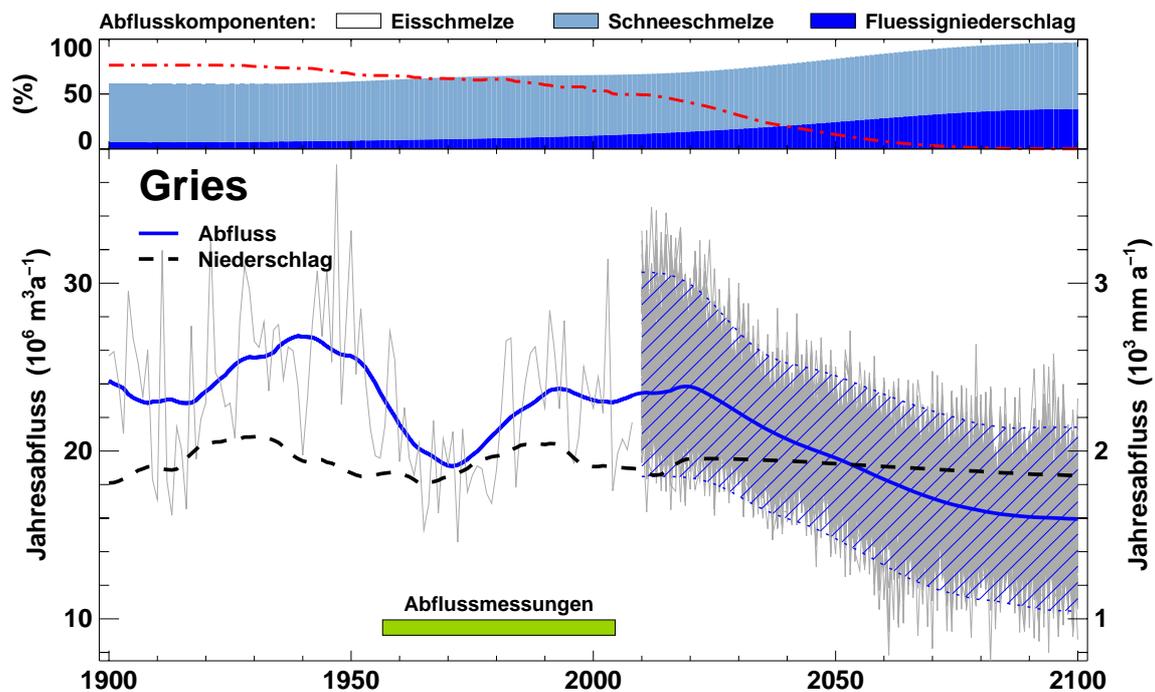
**Tabelle 5.10:** Entwicklung glaziologischer Kenngrößen im Einzugsgebiet Gries. Angaben sind Mittelwerte über 30 Jahre. 'Vergl.': Vergletscherungsgrad, 'A<sub>GI</sub>': Gletscherfläche, 'V<sub>GI</sub>': Gletschereisvolumen, 'b<sub>n</sub>': Jahresmassenbilanz, 'b<sub>w</sub>': Wintermassenbilanz, 'ELA': Höhe der Gleichgewichtslinie.

Periode	Vergl. %	A <sub>GI</sub> (km <sup>2</sup> )	V <sub>GI</sub> (km <sup>3</sup> )	b <sub>n</sub> (cm w.e.)	b <sub>w</sub> (cm w.e.)	ELA (m ü.M.)
1940–1969	67	6.8 ± 0.3	0.52 ± 0.04	-75 ± 60	75 ± 30	3010 ± 190
1980–2009	56	5.6 ± 0.5	0.29 ± 0.05	-120 ± 75	120 ± 40	3040 ± 130
2021–2050	25	2.6 ± 1.0	0.12 ± 0.05	-210 ± 115	125 ± 40	3170 ± 90
2070–2099	0	0.0 ± 0.2	0.00 ± 0.00	-	-	-

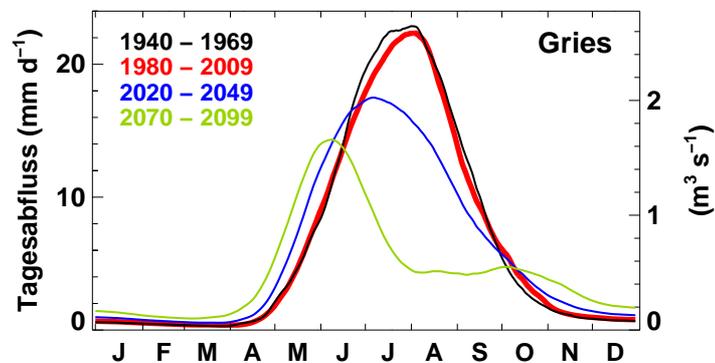
Juni verschoben haben (Abb. 5.16). Die Abnahme in den Jahresabflussmengen ist nur sehr geringfügig durch die Abnahme des Jahresniederschlags bedingt. Für letzteren wird eine Abnahme um etwa 5% prognostiziert (Tab. 5.11). Wichtiger sind die Effekte des Gletscherrückzugs, welcher zum Fehlen der Eisschmelze führen wird, und der ansteigenden Evaporation, welche aufgrund des vorhandenen Stausees eine wichtige Rolle spielt und dazu führen wird, dass der Jahresabfluss kleiner als der Jahresniederschlag ausfallen wird. Die beiden Effekte werden insbesondere in den Monaten Juli bis September einen starken Einfluss auf die mittleren Abflüsse haben.

**Tabelle 5.11:** Entwicklung von Temperatur und Niederschlag im Einzugsgebiet Gries. Angaben sind Gebietsmittelwerte über 30 Jahre. 'Festanteil' bezeichnet den Anteil Jahresniederschlag, der in fester Form anfällt.

Periode	Temperatur (°C)	Niederschlag (mm a <sup>-1</sup> )	Festanteil (%)
1940–1969	-4.0 ± 1.2	1860 ± 580	76
1980–2009	-3.1 ± 1.3	1980 ± 575	71
2021–2050	-1.8 ± 1.2	1970 ± 585	63
2070–2099	0.3 ± 1.7	1890 ± 590	53



**Abbildung 5.15:** Entwicklung von Abfluss und Niederschlag im Einzugsgebiet Gries. Gezeigt sind 100 mögliche Realisierungen des Jahresabflussverlaufs in der Periode 1900–2100 (graue Linien) und ein über 30 Jahre geglätteter Mittelwert (blaue Linie). Das blau schraffierte Band enthält 95 % der Realisierungen. Für den Jahresniederschlag ist nur der geglättete Mittelwert gezeigt (schwarz gestrichelte Linie). Die relativen Beiträge zum Gesamtabfluss sind im oberen Bereich der Graphik gezeigt. Aufgeschlüsselt sind die Beiträge von Eis- und Schneeschmelze sowie Flüssigniederschlag. Im selben Bereich ist auch der Verlauf der Vergletscherung im Gebiet dargestellt (rote Punkt-Strich Linie). Der grüne Balken im unteren Bereich der Graphik zeigt die Periode in welcher gemessene Abflussdaten zur Verfügung stehen.



**Abbildung 5.16:** Zeitliche Entwicklung des Abflussregime im Einzugsgebiet Gries. Gezeigt ist der Verlauf des mittleren Tagesabflusses gemittelt über eine Periode von 30 Jahre.

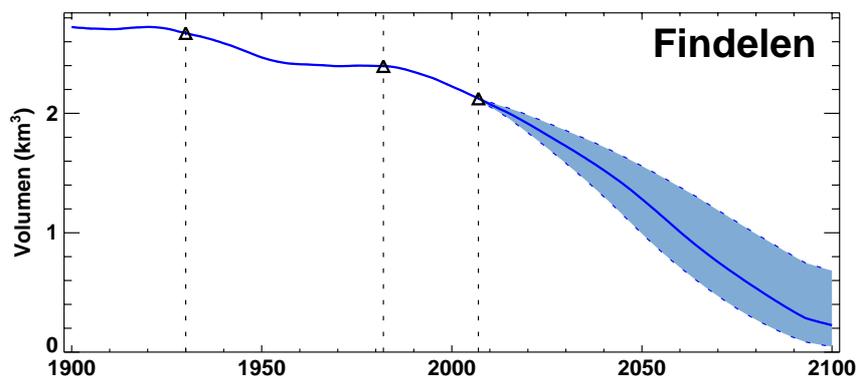
**Tabelle 5.12:** Entwicklung von Abfluss und Evapotranspiration (ET) im Einzugsgebiet Gries.  $M_{\text{Eis}}$ ,  $M_{\text{Schnee}}$  und ' $P_{\text{fl}}$ ' bezeichnen den Abflussanteil der durch Eisschmelze, Schneeschmelze oder Niederschlag verursacht wird. Angaben sind Gebietsmittelwerte über 30 Jahre.

Periode	Abfluss (mm a <sup>-1</sup> )	$M_{\text{Eis}}$ (%)	$M_{\text{Schnee}}$ (%)	$P_{\text{fl}}$ (%)	ET (mm a <sup>-1</sup> )
1940–1969	2390 ± 510	43	50	7	50 ± 15
1980–2009	2330 ± 330	34	56	10	85 ± 15
2021–2050	2190 ± 290	27	55	18	200 ± 45
2070–2099	1650 ± 270	2	61	37	270 ± 45

## 5.5 Einzugsgebiet Findelen

### 5.5.1 Gletscherentwicklung

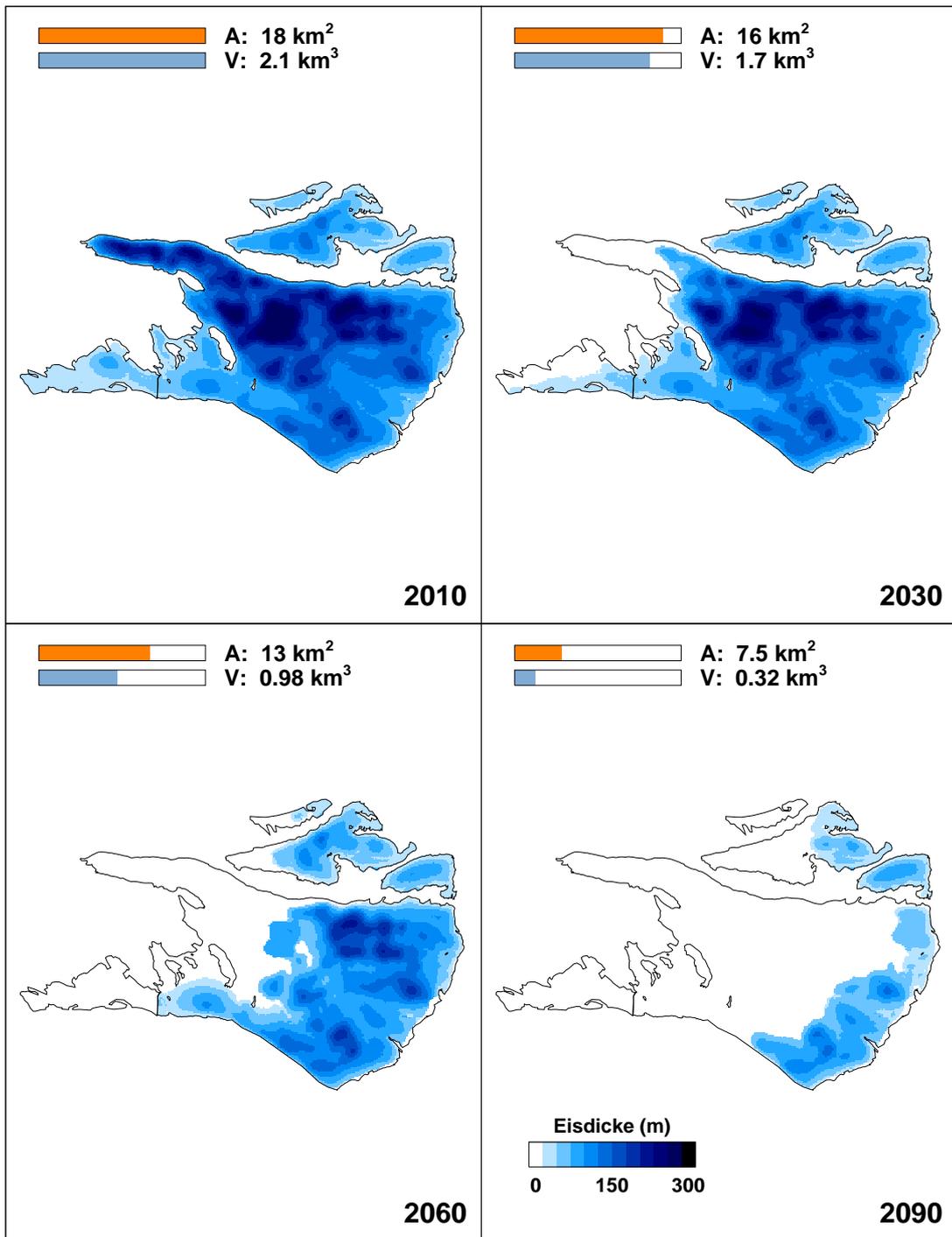
Gemäss Berechnungen ist für das Einzugsgebiet Findelen davon auszugehen, dass sich das Eisvolumen gegenüber der Referenzperiode bis 2045–2070 halbiert haben wird (Abb. 5.17). Durch die hohe Lage und die relativ grossen Eismächtigkeiten lassen die Prognosen davon ausgehen, dass auch Ende des Jahrhunderts einige Gletscher noch vorhanden sein werden (Abb. 5.18). Für 2090 wird eine Vergletscherung für das Gebiet von etwa 20 % vorhergesagt (Tab. 5.13). Während die Wintermassenbilanzen über den gesamten Modellierungszeitraum praktisch unverändert bleiben (bei etwa  $65 \text{ cm a}^{-1}$ ) wird die Jahresbilanz stark negativ ausfallen. Ab 2060 ist ein Mittelwert von unter  $-2 \text{ m a}^{-1}$  vorhergesagt. Die Gleichgewichtslinie wird voraussichtlich im selben Zeitraum auf  $3880 \pm 200 \text{ m ü. M.}$ , was etwa 500 m höher ist als in der Referenzperiode. Bis Ende Jahrhundert wird die Gleichgewichtslinie die obere Limite des Gebiets erreicht haben.



**Abbildung 5.17:** Entwicklung des Eisvolumens im Einzugsgebiet Findelen. Die durchgezogene Linie entspricht einem gleitenden Mittelwert über 15 Jahre. Das hellblaue Band enthält 95 % aller Realisierungen. Zeitpunkte für welche ein Geländemodell zur Verfügung steht sind mit einem Dreieck gekennzeichnet.

### 5.5.2 Abflussentwicklung

Für das Einzugsgebiet Findelen deuten die Berechnungen darauf hin, dass der Trend zu grösser werdenden Jahresabflüssen, der seit den 1970er Jahren zu beobachten ist,



**Abbildung 5.18:** Gletscherentwicklung im Einzugsgebiet Findelen. Die Farbtönung entspricht der mittleren Eisdicke sämtlicher Realisierungen. Bereiche in denen mehr als die Hälfte der Realisierungen keinen Gletscher vorhersagen sind weiss dargestellt. Die gezeigten Gletscherumrisse entsprechen dem Stand 2007.

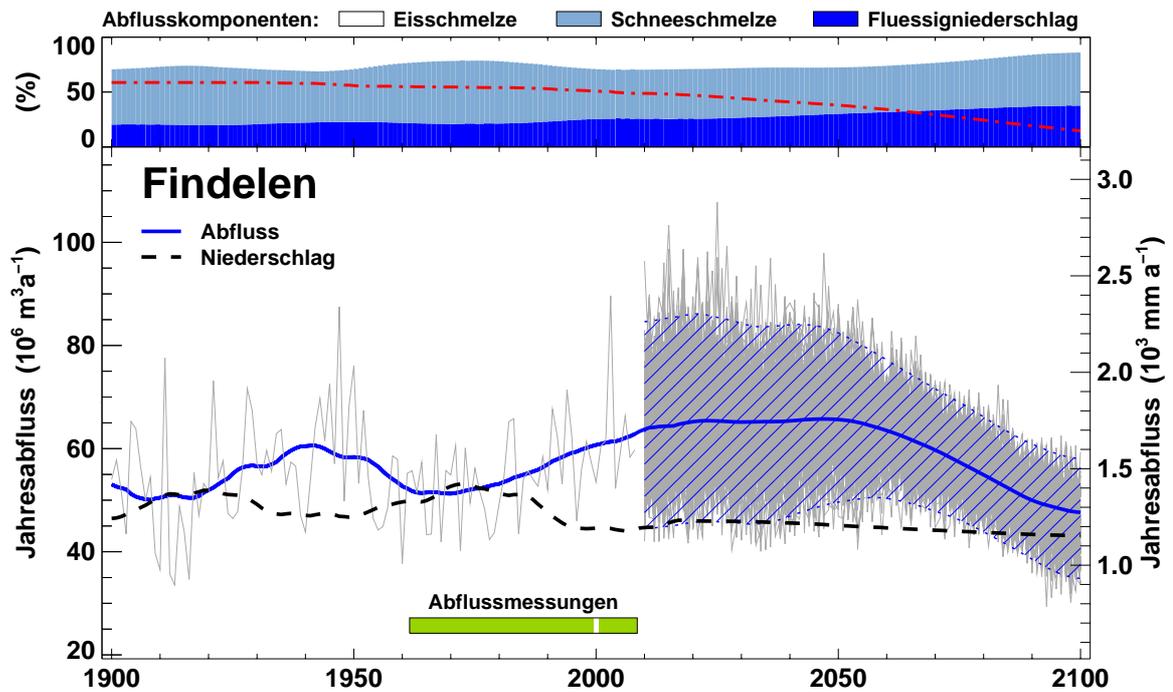
**Tabelle 5.13:** Entwicklung glaziologischer Kenngrößen im Einzugsgebiet Findelen. Angaben sind Mittelwerte über 30 Jahre. 'Vergl.': Vergletscherungsgrad, 'A<sub>G1</sub>': Gletscherfläche, 'V<sub>G1</sub>': Gletschereisvolumen, 'b<sub>n</sub>': Jahresmassenbilanz, 'b<sub>w</sub>': Wintermassenbilanz, 'ELA': Höhe der Gleichgewichtslinie.

Periode	Vergl. %	A <sub>G1</sub> (km <sup>2</sup> )	V <sub>G1</sub> (km <sup>3</sup> )	b <sub>n</sub> (cm w.e.)	b <sub>w</sub> (cm w.e.)	ELA (m ü.M.)
1940–1969	55	20.9 ± 0.4	2.51 ± 0.03	-30 ± 60	65 ± 20	3280 ± 140
1980–2009	51	19.4 ± 0.7	2.25 ± 0.11	-60 ± 55	65 ± 30	3390 ± 170
2021–2050	42	15.8 ± 1.1	1.65 ± 0.20	-130 ± 65	65 ± 25	3650 ± 220
2070–2099	21	8.1 ± 2.5	0.50 ± 0.25	-245 ± 70	65 ± 25	4010 ± 130

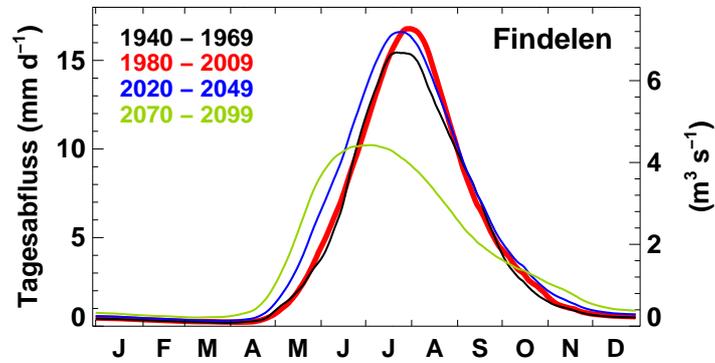
bis etwa 2020 anhalten wird (Abb. 5.19). Zwischen 2020 und 2050 wird erwartet, dass der mittlere Jahresabfluss  $65 \pm 9 \text{ Mio. m}^3 \text{ a}^{-1}$  betragen wird, was gegenüber der Referenzperiode einem Anstieg von etwa 11 % entspricht. Ab 2050 wird von einem Rückgang der Jahresabflussmengen ausgegangen. Bis Ende Jahrhundert wird dieser, im Vergleich zur Referenzperiode, etwa 17 % betragen. Obwohl sich auch die maximalen Monatsabflüsse bis etwa 2050 nur geringfügig ändern werden, werden sich durch den früheren Anfang der Schmelzsaison die Abflüsse der Monate Mai und Juni markant erhöhen (Abb. 5.20). Nach 2050 ist auch mit einer Abnahme des maximalen Monatsabflusses zu rechnen. Im Vergleich zur Referenzperiode wird diese bis 2090 voraussichtlich rund 40 % betragen. Die Änderungen des Jahresniederschlags sind im Einzugsgebiet leicht über der Signifikanzgrenze: bis Jahrhundertsende wird eine Abnahme von etwa 6 % erwartet (Tab. 5.14).

**Tabelle 5.14:** Entwicklung von Temperatur und Niederschlag im Einzugsgebiet Findelen. Angaben sind Gebietsmittelwerte über 30 Jahre. 'Festanteil' bezeichnet den Anteil Jahresniederschlag, der in fester Form anfällt.

Periode	Temperatur (°C)	Niederschlag (mm a <sup>-1</sup> )	Festanteil (%)
1940–1969	-4.3 ± 1.2	1300 ± 325	83
1980–2009	-3.5 ± 1.3	1240 ± 320	77
2021–2050	-2.1 ± 1.2	1220 ± 340	71
2070–2099	0.2 ± 1.6	1170 ± 360	60



**Abbildung 5.19:** Entwicklung von Abfluss und Niederschlag im Einzugsgebiet Findelen. Gezeigt sind 100 mögliche Realisierungen des Jahresabflussverlaufs in der Periode 1900–2100 (graue Linien) und ein über 30 Jahre geglätteter Mittelwert (blaue Linie). Das blau schraffierte Band enthält 95 % der Realisierungen. Für den Jahresniederschlag ist nur der geglättete Mittelwert gezeigt (schwarz gestrichelte Linie). Die relativen Beiträge zum Gesamtabfluss sind im oberen Bereich der Graphik gezeigt. Aufgeschlüsselt sind die Beiträge von Eis- und Schneeschmelze sowie Flüssigniederschlag. Im selben Bereich ist auch der Verlauf der Vergletscherung im Gebiet dargestellt (rote Punkt-Strich Linie). Der grüne Balken im unteren Bereich der Graphik zeigt die Periode in welcher gemessene Abflussdaten zur Verfügung stehen.



**Abbildung 5.20:** Zeitliche Entwicklung des Abflussregime im Einzugsgebiet Findelen. Gezeigt ist der Verlauf des mittleren Tagesabflusses gemittelt über eine Periode von 30 Jahre.

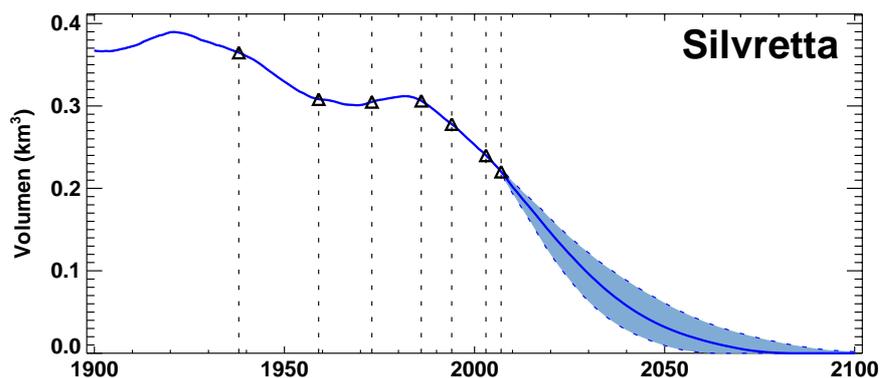
**Tabelle 5.15:** Entwicklung von Abfluss und Evapotranspiration (ET) im Einzugsgebiet Findelen.  $M_{\text{Eis}}$ ,  $M_{\text{Schnee}}$  und ' $P_{\text{fl}}$ ' bezeichnen den Abflussanteil der durch Eisschmelze, Schneeschmelze oder Niederschlag verursacht wird. Angaben sind Gebietsmittelwerte über 30 Jahre.

Periode	Abfluss (mm a <sup>-1</sup> )	$M_{\text{Eis}}$ (%)	$M_{\text{Schnee}}$ (%)	$P_{\text{fl}}$ (%)	ET (mm a <sup>-1</sup> )
1940–1969	1500 ± 300	28	50	22	62 ± 5
1980–2009	1570 ± 230	28	49	24	70 ± 10
2021–2050	1750 ± 260	28	44	27	90 ± 10
2070–2099	1410 ± 190	18	46	36	125 ± 15

## 5.6 Einzugsgebiet Silvretta

### 5.6.1 Gletscherentwicklung

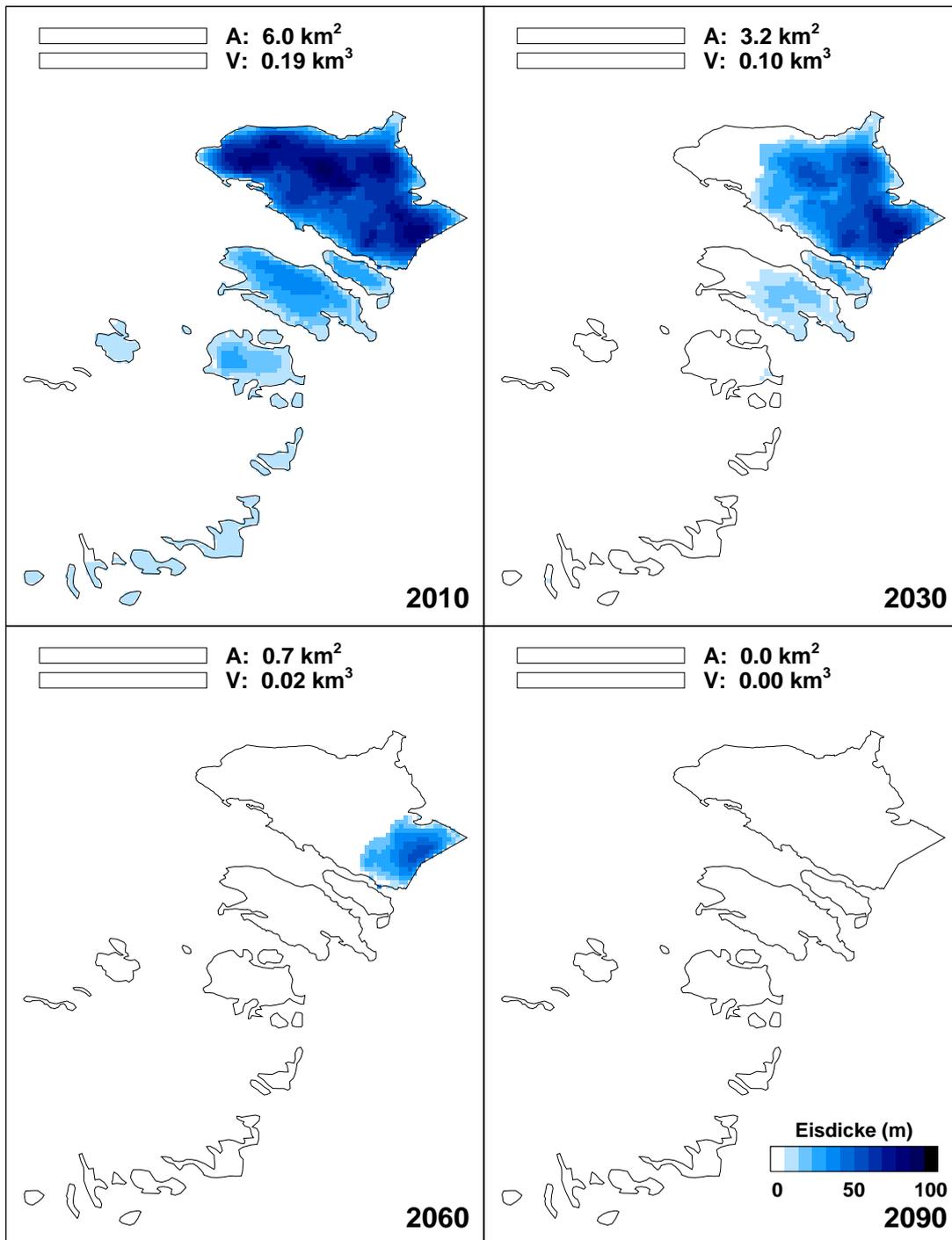
Im Vergleich zur Referenzperiode wird sich das Eisvolumen im Einzugsgebiet Silvretta gemäss Modellierungen bis 2020–2030 halbiert haben (Abb. 5.21). Pessimistische Szenarien sagen bereits ab etwa 2060 ein gänzlich eisfreies Einzugsgebiet voraus. Die optimistischsten Szenarien hingegen lassen einen kompletten Gletscherschwund erst für Ende des Jahrhunderts erwarten. Die am längsten überdauernden Eismassen werden sich am Silvrettagletscher konzentrieren (Abb. 5.22). Gemäss Berechnungen werden die Wintermassenbilanzen im Gebiet leicht abnehmen während die Jahresmassenbilanzen ab 2030 im Mittel unter  $-1.5 \text{ m w.e. a}^{-1}$  zu liegen kommen dürften (Tab. 5.16). Die Gleichgewichtslinie wird sich bis etwa 2050 an die Obergrenze des Gebiets verlagert haben.



**Abbildung 5.21:** Entwicklung des Eisvolumens im Einzugsgebiet Silvretta. Die durchgezogene Linie entspricht einem gleitenden Mittelwert über 15 Jahre. Das hellblaue Band enthält 95 % aller Realisierungen. Zeitpunkte für welche ein Geländemodell zur Verfügung steht sind mit einem Dreieck gekennzeichnet.

### 5.6.2 Abflussentwicklung

Durch die sehr geringe Vergletscherung und den konstant bleibenden Jahresniederschlagsmengen (Tab. 5.17) sind die Änderungen der Jahresabflüsse im Einzugsgebiet Silvretta praktisch allein durch die Entwicklung der Evapotranspiration bedingt. Diese wird gemäss Modellrechnungen bis 2090 auf  $385 \pm 35 \text{ mm a}^{-1}$  ansteigen und



**Abbildung 5.22:** Gletscherentwicklung im Einzugsgebiet Silvretta. Der Seegletscher ist nicht gezeigt. Die Farbtönung entspricht der mittleren Eisdicke sämtlicher Realisierungen. Bereiche in denen mehr als die Hälfte der Realisierungen keinen Gletscher vorhersagen sind weiss dargestellt. Die gezeigten Gletscherumrisse entsprechen dem Stand 2007.

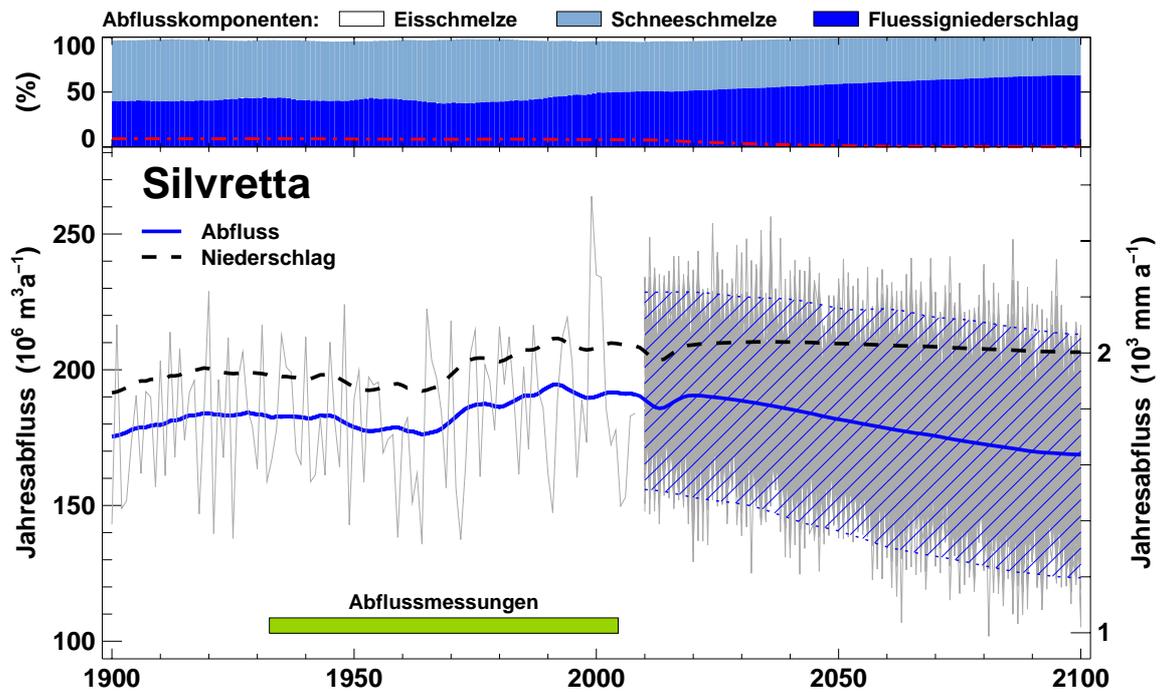
**Tabelle 5.16:** Entwicklung glaziologischer Kenngrößen im Einzugsgebiet Silvretta. Angaben sind Mittelwerte über 30 Jahre. 'Vergl.': Vergletscherungsgrad, 'A<sub>GI</sub>': Gletscherfläche, 'V<sub>GI</sub>': Gletschereisvolumen, 'b<sub>n</sub>': Jahresmassenbilanz, 'b<sub>w</sub>': Wintermassenbilanz, 'ELA': Höhe der Gleichgewichtslinie.

Periode	Vergl. %	A <sub>GI</sub> (km <sup>2</sup> )	V <sub>GI</sub> (km <sup>3</sup> )	b <sub>n</sub> (cm w.e.)	b <sub>w</sub> (cm w.e.)	ELA (m ü.M.)
1940–1969	7	7.3 ± 0.1	0.32 ± 0.01	-30 ± 80	110 ± 30	2750 ± 160
1980–2009	6	7.0 ± 0.2	0.27 ± 0.02	-55 ± 75	125 ± 35	2850 ± 160
2021–2050	2	2.6 ± 1.2	0.08 ± 0.04	-160 ± 80	110 ± 30	2990 ± 80
2070–2099	0	0.1 ± 0.2	0.00 ± 0.00	-	-	-

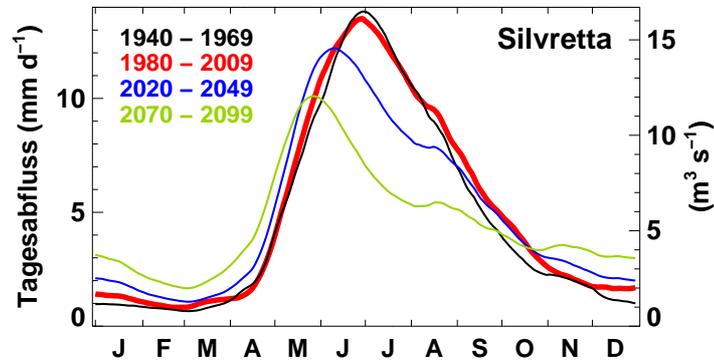
den Jahresabfluss dementsprechend reduzieren. Dadurch werden die Jahresabflussmengen noch deutlicher als in der Vergangenheit unter dem Niveau des Jahresniederschlags zu liegen kommen. Die mittlere Jahresabflussmenge um 2090 sollte  $170 \pm 23 \text{ Mio. m}^3 \text{ a}^{-1}$  betragen (Abb. 5.23) was gegenüber der Referenzperiode einer Abnahme um etwa 11 % entspricht. Obwohl die Gletscher im Einzugsgebiet eine sehr marginale Rolle spielen, wird der Abflussjahresgang aufgrund der Verschiebung der Schneeschmelzperiode und den wärmeren Wintermonaten markanten Änderungen unterworfen sein. Für den Monat Juli wird bis 2090 eine Abnahme des Monatsabflusses um etwa 50 % erwartet, während für die Monate Dezember und Januar von einer Verdoppelung des Monatsabflusses ausgegangen wird (Abb. 5.24).

**Tabelle 5.17:** Entwicklung von Temperatur und Niederschlag im Einzugsgebiet Silvretta. Angaben sind Gebietsmittelwerte über 30 Jahre. 'Festanteil' bezeichnet den Anteil Jahresniederschlag, der in fester Form anfällt.

Periode	Temperatur (°C)	Niederschlag (mm a <sup>-1</sup> )	Festanteil (%)
1940–1969	-0.2 ± 1.2	1880 ± 475	53
1980–2009	0.7 ± 1.2	2020 ± 470	48
2021–2050	1.9 ± 1.1	2015 ± 480	39
2070–2099	3.9 ± 1.4	2010 ± 490	31



**Abbildung 5.23:** Entwicklung von Abfluss und Niederschlag im Einzugsgebiet Silvretta. Gezeigt sind 100 mögliche Realisierungen des Jahresabflussverlaufs in der Periode 1900–2100 (graue Linien) und ein über 30 Jahre geglätteter Mittelwert (blaue Linie). Das blau schraffierte Band enthält 95 % der Realisierungen. Für den Jahresniederschlag ist nur der geglättete Mittelwert gezeigt (schwarz gestrichelte Linie). Die relativen Beiträge zum Gesamtabfluss sind im oberen Bereich der Graphik gezeigt. Aufgeschlüsselt sind die Beiträge von Eis- und Schneeschmelze sowie Flüssigniederschlag. Im selben Bereich ist auch der Verlauf der Vergletscherung im Gebiet dargestellt (rote Punkt-Strich Linie). Der grüne Balken im unteren Bereich der Graphik zeigt die Periode in welcher gemessene Abflussdaten zur Verfügung stehen.



**Abbildung 5.24:** Zeitliche Entwicklung des Abflussregime im Einzugsgebiet Silvretta. Gezeigt ist der Verlauf des mittleren Tagesabflusses gemittelt über eine Periode von 30 Jahre.

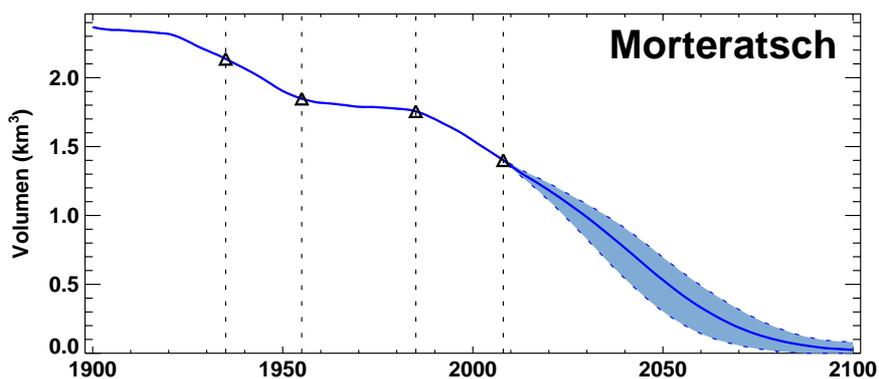
**Tabelle 5.18:** Entwicklung von Abfluss und Evapotranspiration (ET) im Einzugsgebiet Silvretta.  $M_{\text{Eis}}$ ,  $M_{\text{Schnee}}$  und ' $P_{\text{fl}}$ ' bezeichnen den Abflussanteil der durch Eisschmelze, Schneeschmelze oder Niederschlag verursacht wird. Angaben sind Gebietsmittelwerte über 30 Jahre.

Periode	Abfluss (mm a <sup>-1</sup> )	$M_{\text{Eis}}$ (%)	$M_{\text{Schnee}}$ (%)	$P_{\text{fl}}$ (%)	ET (mm a <sup>-1</sup> )
1940–1969	1730 ± 230	3	55	42	215 ± 30
1980–2009	1850 ± 260	3	50	46	240 ± 30
2021–2050	1810 ± 190	2	44	54	295 ± 30
2070–2099	1660 ± 220	0	36	64	380 ± 30

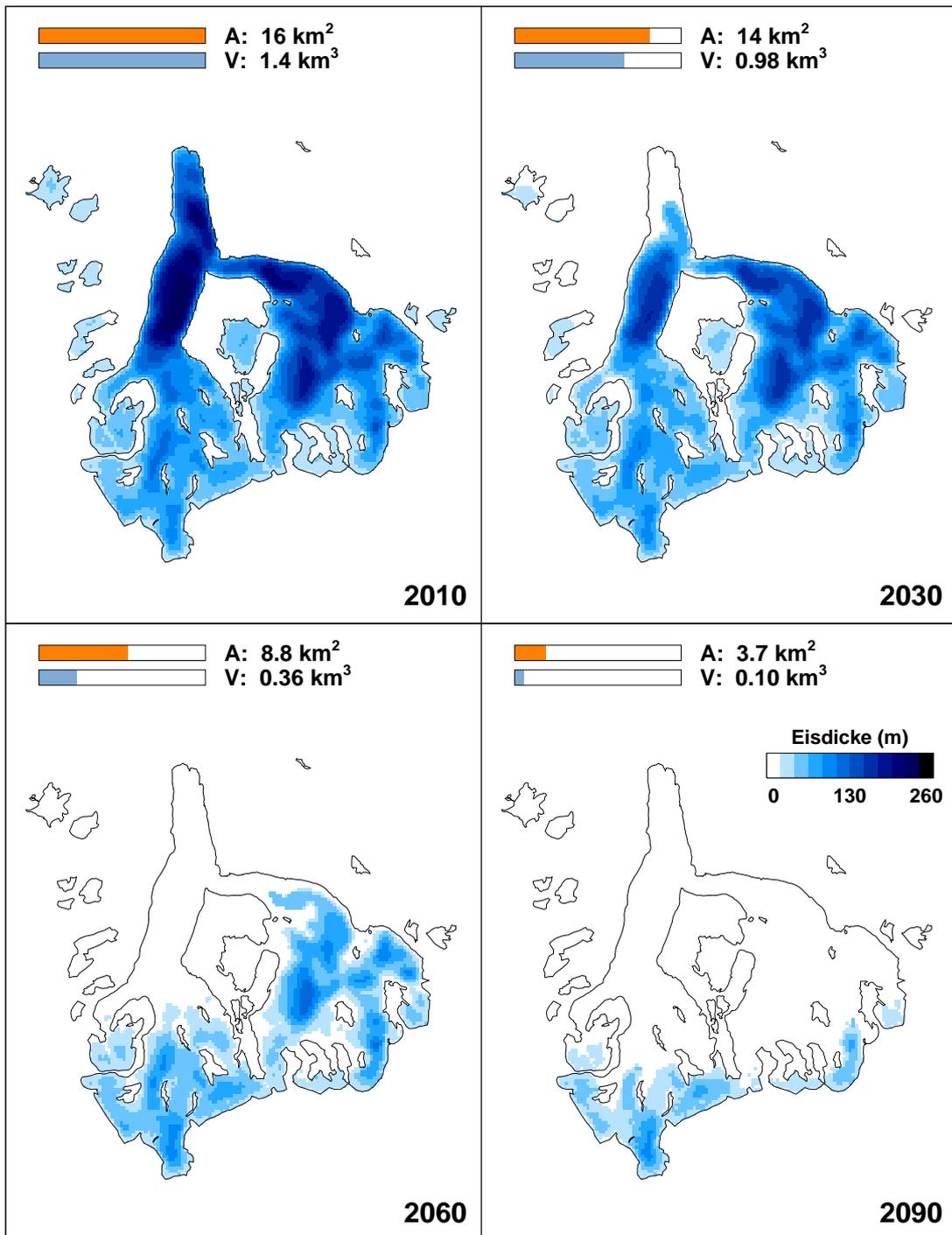
## 5.7 Einzugsgebiet Morteratsch

### 5.7.1 Gletscherentwicklung

Gemäss Berechnungen wird sich das Eisvolumen im Einzugsgebiet Morteratsch gegenüber der Referenzperiode bis 2030–2045 halbiert haben (Abb. 5.25). Bis Ende des Jahrhunderts ist davon auszugehen, dass sich die Vergletscherung auf ein Minimum reduziert haben wird (Abb. 5.26). Durch die besondere Geometrie des Vadret da Morteratsch, der eine grosse, flache Zunge und ein eher steiles Akkumulationsgebiet aufweist, wird für die Wintermassenbilanzen eine Zunahme prognostiziert (Tab. 5.19). Gemäss Berechnungen dürfte diese bis 2090 etwas mehr als 20% betragen. Der Effekt wird allerdings durch eine Zunahme der Schmelze kompensiert, so dass für die Jahresmassenbilanzen mit einer Abnahme zu rechnen ist. In der Periode um 2050 werden die negativsten Massenbilanzen vorhergesehen, mit einem Mittelwert von etwa  $-2 \text{ m a}^{-1}$ . Gegen Ende des Jahrhundert dürften die Jahresmassenbilanzen wieder leicht zunehmen. Für die Periode um 2090 sagen die Modellresultate einen Mittelwert von  $130 \pm 70 \text{ cm a}^{-1}$  voraus. Bis Ende des Jahrhunderts wird davon ausgegangen, dass sich die Höhe der Gleichgewichtslinie um etwa 700 m angestiegen sein wird.



**Abbildung 5.25:** Entwicklung des Eisvolumens im Einzugsgebiet Morteratsch. Die durchgezogene Linie entspricht einem gleitenden Mittelwert über 15 Jahre. Das hellblaue Band enthält 95% aller Realisierungen. Zeitpunkte für welche ein Geländemodell zur Verfügung steht sind mit einem Dreieck gekennzeichnet.



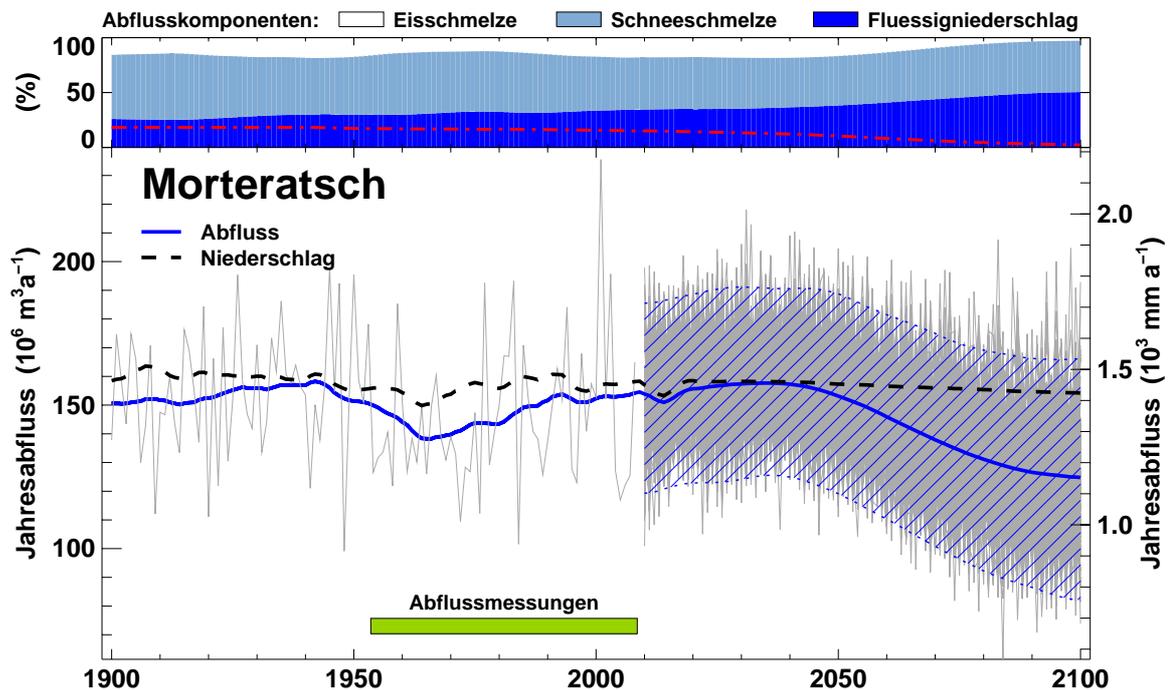
**Abbildung 5.26:** Gletscherentwicklung im Einzugsgebiet Morteratsch. Die Farbtonung entspricht der mittleren Eisdicke sämtlicher Realisierungen. Bereiche in denen mehr als die Hälfte der Realisierungen keinen Gletscher vorhersagen sind weiss dargestellt. Die gezeigten Gletscherumrisse entsprechen dem Stand 2008.

**Tabelle 5.19:** Entwicklung glaziologischer Kenngrößen im Einzugsgebiet Morteratsch. Angaben sind Mittelwerte über 30 Jahre. 'Vergl.': Vergletscherungsgrad, 'A<sub>Gl</sub>': Gletscherfläche, 'V<sub>Gl</sub>': Gletschereisvolumen, 'b<sub>n</sub>': Jahresmassenbilanz, 'b<sub>w</sub>': Wintermassenbilanz, 'ELA': Höhe der Gleichgewichtslinie.

Periode	Vergl. %	A <sub>Gl</sub> (km <sup>2</sup> )	V <sub>Gl</sub> (km <sup>3</sup> )	b <sub>n</sub> (cm w.e.)	b <sub>w</sub> (cm w.e.)	ELA (m ü.M.)
1940–1969	17	18.7 ± 0.5	1.89 ± 0.07	-50 ± 70	110 ± 40	2980 ± 110
1980–2009	16	17.2 ± 0.6	1.60 ± 0.14	-75 ± 60	105 ± 40	3070 ± 130
2021–2050	12	13.6 ± 1.4	0.87 ± 0.22	-166 ± 70	105 ± 40	3280 ± 240
2070–2099	3	4.1 ± 1.6	0.10 ± 0.06	-120 ± 70	130 ± 40	3730 ± 200

## 5.7.2 Abflussentwicklung

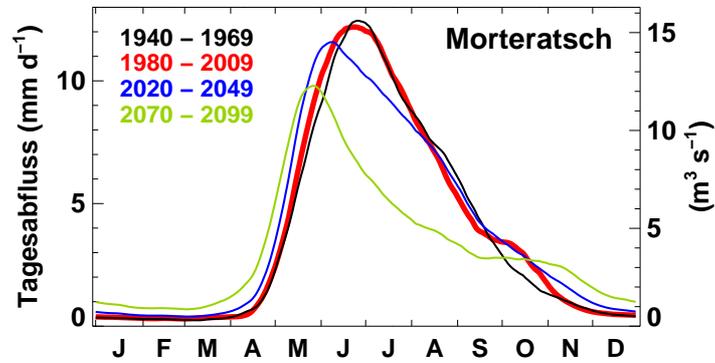
Durch die Grösse des Einzugsgebiets und dessen geringe Vergletscherung tritt der Effekt der Gletscherveränderung nur gedämpft zu Tage. Der Trend zu zunehmenden Jahresabflüssen, der seit Mitte der 1960er Jahre zu beobachten ist, wird voraussichtlich bis 2030–2040 anhalten (Abb. 5.27). Für diese Periode ist gemäss Modellrechnungen ein mittlerer Jahresabfluss von  $157 \pm 17 \text{ Mio. m}^3 \text{ a}^{-1}$  zu erwarten, was im Vergleich zur Referenzperiode einer Zunahme von 3% entspricht. In dieser Periode wird somit die Jahresabflussmenge etwa dem Jahresniederschlag entsprechen, was bedeutet, dass die erhöhte Gletscherschmelze in etwa den Betrag der Evapotranspiration kompensiert. Ab 2040 ist mit einer Abnahme der Abflüsse zu rechnen, die im Vergleich zur Referenzperiode, bis 2090 voraussichtlich -17% betragen wird. Die Abnahme ist neben dem dann fehlenden Abfluss aus Eisschmelze auf einer erhöhten Evapotranspiration zurückzuführen. Gemäss Berechnungen wird diese gegenüber der Referenzperiode bis 2090 um etwa 54% ansteigen (Tab. 5.20). Der Niederschlag wird dabei keinen signifikanten Änderungen unterworfen sein (etwa -2% bis 2090). Bei der Verteilung der Abflussmenge über das Jahr ist festzustellen, dass für die Sommermonate eine markante Reduktion zu erwarten ist während eine Zunahme der Monatsabflüsse insbesondere für die Monate November und Dezember vorausgesagt wird (Abb. 5.28). Für die Abflussspitze wird von einer Verschiebung von Ende Juni in der Referenzperiode auf Ende Mai um 2090 ausgegangen.



**Abbildung 5.27:** Entwicklung von Abfluss und Niederschlag im Einzugsgebiet Morteratsch. Gezeigt sind 100 mögliche Realisierungen des Jahresabflussverlaufs in der Periode 1900–2100 (graue Linien) und ein über 30 Jahre geglätteter Mittelwert (blaue Linie). Das blau schraffierte Band enthält 95 % der Realisierungen. Für den Jahresniederschlag ist nur der geglättete Mittelwert gezeigt (schwarz gestrichelte Linie). Die relativen Beiträge zum Gesamtabfluss sind im oberen Bereich der Graphik gezeigt. Aufgeschlüsselt sind die Beiträge von Eis- und Schneeschmelze sowie Flüssigniederschlag. Im selben Bereich ist auch der Verlauf der Vergletscherung im Gebiet dargestellt (rote Punkt-Strich Linie). Der grüne Balken im unteren Bereich der Graphik zeigt die Periode in welcher gemessene Abflussdaten zur Verfügung stehen.

**Tabelle 5.20:** Entwicklung von Temperatur und Niederschlag im Einzugsgebiet Morteratsch. Angaben sind Gebietsmittelwerte über 30 Jahre. 'Festanteil' bezeichnet den Anteil Jahresniederschlag, der in fester Form anfällt.

Periode	Temperatur (°C)	Niederschlag (mm a <sup>-1</sup> )	Festanteil (%)
1940–1969	-2.2 ± 1.1	1430 ± 470	62
1980–2009	-1.4 ± 1.2	1460 ± 465	57
2021–2050	-0.1 ± 1.1	1450 ± 475	50
2070–2099	2.1 ± 1.3	1430 ± 495	41



**Abbildung 5.28:** Zeitliche Entwicklung des Abflussregime im Einzugsgebiet Morteratsch. Gezeigt ist der Verlauf des mittleren Tagesabflusses gemittelt über eine Periode von 30 Jahre.

**Tabelle 5.21:** Entwicklung von Abfluss und Evapotranspiration (ET) im Einzugsgebiet Morteratsch.  $M_{\text{Eis}}$ ,  $M_{\text{Schnee}}$  und  $P_{\text{fi}}$  bezeichnen den Abflussanteil der durch Eisschmelze, Schneeschmelze oder Niederschlag verursacht wird. Angaben sind Gebietsmittelwerte über 30 Jahre.

Periode	Abfluss (mm a <sup>-1</sup> )	$M_{\text{Eis}}$ (%)	$M_{\text{Schnee}}$ (%)	$P_{\text{fi}}$ (%)	ET (mm a <sup>-1</sup> )
1940–1969	1370 ± 210	16	54	30	160 ± 15
1980–2009	1410 ± 250	16	51	33	175 ± 20
2021–2050	1450 ± 160	18	46	36	210 ± 20
2070–2099	1190 ± 190	5	47	48	265 ± 20

# Kapitel 6

## Schlussfolgerungen

Dieses Kapitel fasst die Resultate, die in den vorangehenden Abschnitten präsentiert wurden, zusammen. Bei den hier aufgeführten Werten und Aussagen handelt es sich um Mittelwerte. Einzelne Gebiete können davon zum Teil markant abweichen. In diesem Sinne muss auch unbedingt erwähnt werden, dass eine mögliche Übertragung der Resultate auf weitere, nicht untersuchte Gebiete, mit grossen Unsicherheiten behaftet wäre.

### 6.1 Untersuchte Gebiete

Die sieben untersuchten Einzugsgebiete Aletsch, Rhone, Trift, Gries, Findelen, Silvretta und Morteratsch sind typische, hochalpine Gebiete. Sie unterschieden sich aber angesichts ihrer Grösse, Lage und morphologischen Charakteristiken beträchtlich. Das Aletschgebiet erstreckt sich über knapp 200 km<sup>2</sup> und beinhaltet die grössten, zusammenhängenden Eismassen der Europäischen Alpen während das Griesgebiet flächenmässig 20 Mal kleiner ist und ein etwa 15 mal geringeres Eisvolumen aufweist. Die Vergletscherung der untersuchten Gebiete variiert zwischen 60 % (Aletsch) und 6 % (Silvretta) und die abgedeckten Höhenlagen erstrecken sich zwischen 1320 (Abflussmessstation Underi Trift, Einzugsgebiet Trift) und 4199 ü.M. (Rimpfischhorn, Einzugsgebiet Findelen). Während der Referenzperiode 1980–2009 betrug die Jahresmitteltemperatur im Mittel über die sieben Gebiete  $-2.0 \pm 0.5$  °C und der Jahresniederschlag  $1900 \pm 170$  mm. Unterschiede gehen bei der Jahresmitteltemperatur mit der mittleren Gebietshöhe einher und sind bei den durchschnittlichen Jahresnieder-

**Tabelle 6.1:** Charakteristiken der analysierten Einzugsgebiete. 'Vergl.' bezeichnet die Vergletscherung im Gebiet. Unter 'Höhe' ist die minimale (min), die maximale (max) und die mittlere (avg) Einzugsgebiethöhe angegeben. Die Angaben zu den Gletschern beziehen sich auf die Referenzperiode 1980-2009.

Gebiet	Fläche km <sup>2</sup>	Gletscher			Höhe		
		Fläche km <sup>2</sup>	Volumen km <sup>3</sup>	Vergl. %	min m ü.M.	max	avg
<b>Aletsch</b>	198.0	123 ± 3	18.4 ± 0.3	61	1435	4185	2925
<b>Rhone</b>	39.5	19.1 ± 0.4	2.09 ± 0.10	48	1760	3630	2710
<b>Trift</b>	39.3	18.3 ± 0.7	1.44 ± 0.12	46	1320	3500	2570
<b>Gries</b>	10.0	5.6 ± 0.5	0.29 ± 0.05	56	2380	3370	2775
<b>Findelen</b>	37.4	19.4 ± 0.7	2.25 ± 0.11	51	2075	4199	3060
<b>Silvretta</b>	103.1	7.0 ± 0.2	0.27 ± 0.02	6	1325	3250	2340
<b>Morteratsch</b>	108.3	17.2 ± 0.6	1.60 ± 0.14	16	1790	4035	2605

schlagsmengen durch die geographische Lage bedingt. So ist zum Beispiel die Jahresmitteltemperatur im hochgelegenen Einzugsgebiet Findelen etwa 2.5 °C niedriger als im Gebiet Silvretta. Die Einzugsgebiete Findelen und Morteratsch im südlichen Wallis bzw. im Engadin sind bedeutend niederschlagsärmer als das Einzugsgebiet Trift auf der Alpennordseite.

**Tabelle 6.2:** Klimatische Bedingungen in den untersuchten Einzugsgebieten mit dem Jahresmittelwert der Temperatur und Jahressumme des Niederschlags während der Referenzperiode 1980-2009.

Gebiet	Temperatur °C	Niederschlag mm
<b>Aletsch</b>	-2.9 ± 1.2	1970 ± 395
<b>Rhone</b>	-2.4 ± 1.3	2260 ± 455
<b>Trift</b>	-1.7 ± 1.3	2450 ± 505
<b>Gries</b>	-3.1 ± 1.3	1980 ± 575
<b>Findelen</b>	-3.5 ± 1.3	1240 ± 320
<b>Silvretta</b>	0.7 ± 1.2	2020 ± 470
<b>Morteratsch</b>	-1.4 ± 1.2	1460 ± 465

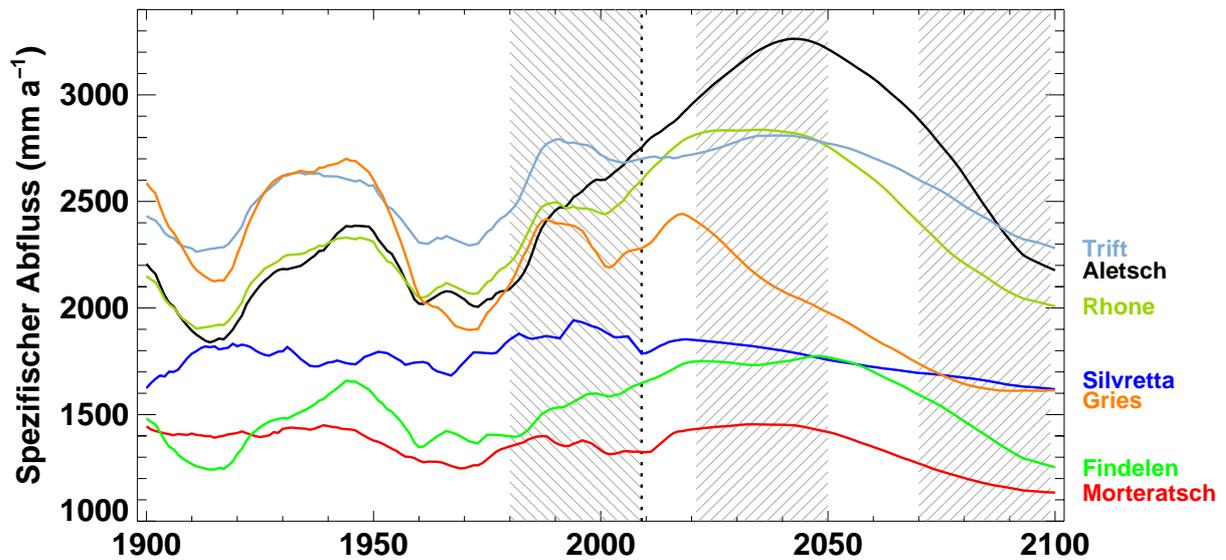
## 6.2 Gletscherentwicklung

In allen untersuchten Einzugsgebieten muss in den nächsten Jahrzehnten mit einem markanten Rückgang der heutigen Eismassen gerechnet werden. Wie genau sich der Gletscherrückzug verhält, ist hauptsächlich vom heute vorhandenem Eisvolumen sowie dessen räumlichen Verteilung abhängig. So kann gemäss Modellrechnungen davon ausgegangen werden, dass eine Halbierung des heutigen Eisvolumen im Aletschgebiet bis 2040–2070 eintreffen wird, während dies im Einzugsgebiet Gries bereits 2020–2025 der Fall sein dürfte. Bis zum Ende des Jahrhunderts wird für jedes Einzugsgebiet erwartet, dass die Vergletscherung weniger als 15 % betragen wird. Für die Einzugsgebiete Silvretta und Gries wird sogar von einem kompletten Gletschreschwund ausgegangen. Obwohl für die meisten Gebiete keine signifikanten Änderungen der Wintermassenbilanzen erwartet werden, zeichnet sich für die Jahresmassenbilanzen ein markanter, negativer Trend ab. Ab 2050 werden für alle Gebiete stark negative Jahresbilanzen erwartet, die das Niveau des Jahres 2003 regelmässig egalisieren oder sogar überschreiten dürften. Diese vom erwarteten Temperaturanstieg verursachte Tendenz zeichnet sich auch im Anstieg der Gleichgewichtslinie ab. Bis Ende des Jahrhunderts dürfte sich diese in die Nähe der oberen Grenze der verschiedenen Gebiete verlagert haben was die jeweiligen Akkumulationszonen auf ein Minimum reduzieren würde. Quantitative, allgemeingültige Aussagen dazu sind schwierig, da diese vom betrachteten Einzugsgebiet abhängig sind.

## 6.3 Abflussentwicklung

Die Entwicklung der Jahresabflussmengen ist sehr stark gebietsabhängig. Beinahe in jedem Gebiet ist jedoch ein analoges Muster von zwei Phasen erkennbar, in welchem die Jahresabflüsse zuerst ansteigen und dann wieder abklingen. Dieses ist die direkte Folge der schwindenden Eismassen. Das Ausmass des Anstiegs und der darauffolgenden Abnahme sowie der Zeitpunkt des Wendepunktes sind jedoch gebietspezifisch. Zum Vergleich ist in Abbildung 6.1 die Entwicklung des spezifischen Jahresabflusses für alle Einzugsgebiete einander gegenübergestellt.

Gemäss den verwendeten Klimaszenarien werden die Jahresniederschlagsmengen in allen Gebieten keinen grösseren Variationen unterworfen sein. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Gebieten sind deshalb hauptsächlich auf deren Vergletscherungs-

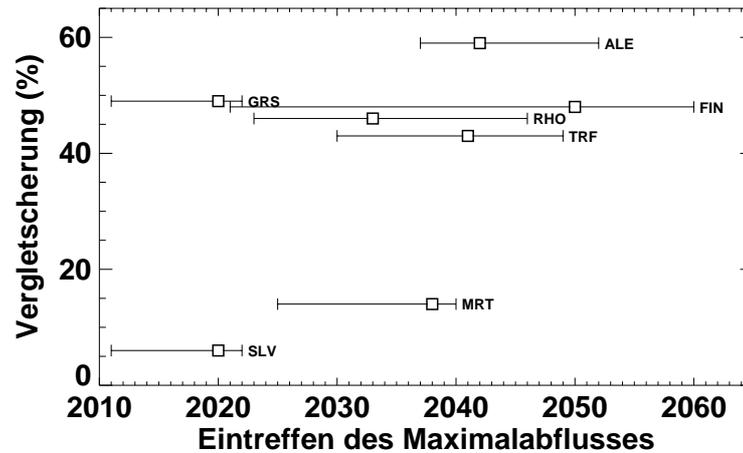


**Abbildung 6.1:** Entwicklung des spezifischen Abflusses in den untersuchten Einzugsgebieten. Im Zeitraum 2009–2100 ist für jedes Gebiet nur das Mittel aller 100 Realisierungen gezeigt. Die Referenzperiode sowie die beiden Szenarioperioden sind durch die schraffierten Flächen markiert.

grad zurückzuführen. Gebiete mit hoher Vergletscherung und grossem Eisvolumen (z.B. Aletsch, Rhone oder Findelen), zeigen das zweiphasige Muster sehr offensichtlich, während dieses bei gering vergletscherten Gebieten (z.B. Silvretta) praktisch nicht erkennbar ist. In den präsentierten Resultaten findet der Übergang zwischen den beiden Phasen für alle Gebiete vor 2050 statt. Massgebend für den Zeitpunkt ist wiederum die Vergletscherung des Einzugsgebiets sowie die Verteilung des Eises innerhalb des Gebiets selbst (Abb. 6.2). Liegt das grösste Eisvolumen in hohen Lagen, so verzögert sich das Eintreffen der Trendumkehr, da sich der zu erwartende Temperaturanstieg erst spät bemerkbar macht. Verallgemeinerte Aussagen über das Ausmass der Zu- und Abnahmen der Jahresabflussmengen sind wenig sinnvoll, da diese ebenfalls gebietsgebunden sind.

Homogener präsentieren sich die Änderungen in der Verteilung der Gesamtabflussmengen über das Jahr. Während heute die maximalen Tagesabflüsse zwischen Ende Juli und Anfangs August auftreten, wird für Ende des Jahrhunderts erwartet, dass diese einen bis zwei Monate früher, also zwischen Ende Juni und Anfangs Juli, zu verzeichnen sein werden.

Bei der Evapotranspiration, die in der Abflussentwicklung einzelner Gebiete eine



**Abbildung 6.2:** Abhängigkeit zwischen Vergletscherung und Zeitpunkt für welchen der maximale Jahresabfluss erwartet wird. Das Viereck auf den Balken markiert den Zeitpunkt für welchen der maximale Jahresabfluss im Mittel aller Realisierungen erwartet wird. Links und rechts sind die Balken durch diejenigen Zeitpunkte begrenzt, für welchen der maximale Jahresabfluss aufgrund der Verläufe der 5 % und 95 % Jahresabflussquantile erwartet werden.

wesentliche Rolle spielen dürfte, ist ein eindeutiger, zunehmender Trend feststellbar. Es sei aber ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Prognosen für diese Grösse mit beträchtlichen Unsicherheiten behaftet sind, da die zugrunde liegenden Prozesse im verwendeten Modell nur summarisch dargestellt sind und auf dem Gebiet noch relativ grosser Forschungsbedarf besteht. Die vorgestellten Werte sollten also mit entsprechender Vorsicht interpretiert werden.

## 6.4 Unsicherheiten und weiterer Forschungsbedarf

In der vorliegenden Studie wurden einzelne, stark vergletscherte Einzugsgebiete untersucht. Dazu wurde das dafür ausgelegte glazio-hydrologische Modell GERM verwendet (siehe Kapitel 3). Kern darin sind das Massenbilanz- und Gletscherentwicklungsmodell. Verglichen mit der ersten Version des Modells, welche von Huss et al. (2008b) präsentiert wurde, konnten entscheidende Fortschritte bei der Berechnung der Entwicklung der Gletschergeometrie erzielt werden. Mittlerweile liegt auch ein neues 3D Gletscherfliessmodell (Jouvet et al., 2008) vor, welches für operationelle Anwendungen zur Verfügung steht. Das Massenbilanzmodell basiert auf einen ro-

busten Ansatz, dessen Parameter für jedes Einzugsgebiet separat kalibriert werden müssen. Allerdings zeigten Studien (z.B. Huss et al., 2009), dass die verwendeten Parameter insbesondere bei grossen Veränderung der Vergletscherung über längere Zeit nicht unbedingt konstant bleiben. Weiterer Forschungsbedarf besteht auch bei der Berechnung der räumlichen wie zeitlichen Verteilung der Akkumulation.

Ebenso wäre es empfehlenswert, das Modul, welches die Evapotranspiration innerhalb des Modells abbildet, auf seine Genauigkeit zu überprüfen. Für Alpine Einzugsgebiete wird in der Regel davon ausgegangen, dass aufgrund der relativ tiefen Temperaturen und der spärlichen Vegetation der Evapotranspiration nur eine untergeordnete Rolle im Wasserkreislauf zukommt (z.B. Bernath, 1991; Verbunt et al., 2003). Die vorgelegten Resultate deuten jedoch darauf hin, dass dieses Verhältnis sich in Zukunft signifikant ändern könnte. Auch in diesem Falle wären entsprechende Abklärungen von grosser Bedeutung.

Die präsentierten Vertrauensintervalle und Bandbreiten beschränken sich auf die Unsicherheiten in der zukünftigen Entwicklung des Klimas. Weitere Unsicherheiten, die aufgrund des gewählten Modellansatzes entstehen (z.B. die oben erwähnten Modellparameter oder das Evaporationsmodul), wurden in der vorliegenden Studie nicht untersucht.

Eine Erweiterung des Modells für grössere Einzugsgebiete, um die Auswirkungen der Gletscherveränderungen auch weiter fluss- bzw. stromabwärts besser zu quantifizieren, ist nicht notwendig. Solange die Niederschlagsverhältnisse bekannt sind, lassen sich bereits verbesserte Aussagen machen, wenn alle bedeutenden Eismassen und deren Veränderung in den teileinzugsgebieten ermittelt sind. Die systematische Erarbeitung der entsprechenden Datengrundlage ist der logische nächste Schritt.

Zu den in diesem Bericht präsentierten Resultate haben Dr. Daniel Farinotti, Stephanie Usselman und Jeannette Gabbi entscheidend beigetragen.

Zürich, Mai 2011

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich

Prof. Dr. M. Funk  
Leiter Abteilung Glaziologie

Dr. A. Bauder  
Projektleiter

# Literaturverzeichnis

- Bauder, A., Funk, M., and Huss, M. (2007). Ice volume changes of selected glaciers in the Swiss Alps since the end of the 19th century. *Annals of Glaciology*, 46:145–149.
- Becker, A. (2005). Runoff processes in mountain headwater catchments: Recent understanding and research challenges. *Advances in Global Change Research*, 23(III):283–295.
- Begert, M., Schlegel, T., and Kirchhofer, W. (2005). Homogeneous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000. *International Journal of Climatology*, 25(1):65–80.
- Bernath, A. (1991). Wasserhaushalt im Einzugsgebiet der Rhône bis Gletsch. Untersuchungen zu Niederschlag, Verdunstung und Abfluss in einem teilweise vergletscherten Einzugsgebiet. *Zürcher Geographische Schriften*, 43.
- Bosshard, T., Kotlarsky, S., Ewen, T., and Schär, C. (2011). Spectral representation of the annual cycle in the climate change signal. *Hydrology and Earth System Sciences Discussion*, 8:1161–1192.
- Bruce, J. P. and Clark, R. H. (1981). *Introduction to hydrometeorology*. Pergamon Press, Oxford.
- Farinotti, D., Huss, M., Bauder, A., Funk, M., and Truffer, M. (2009). A method to estimate ice volume and ice thickness distribution of alpine glaciers. *Journal of Glaciology*, 55(191):422–430.
- Farinotti, D., Usselman, S., Huss, M., and Funk, A. B. (in press). Runoff evolution in the Swiss Alps: Projections for selected high-alpine catchments based on *ENSEMBLES* scenarios. *Hydrological Processes*.

- Fliri, F. (1986). Synoptisch-klimatologische niederschlagsanalyse zwischen genfersee und hohen tauern. *Wetter Leben*, 38:140–149.
- Frei, C. and Schär, C. (1998). A precipitation climatology of the Alps from high-resolution rain-gauge observations. *International Journal of Climatology*, 18(8):873–900.
- Hamon, W. R. (1961). Estimating potential evapotranspiration. *Journal of the Hydraulics Division*, 87(HY3):107–120.
- Hock, R. (1999). A distributed temperature-index ice- and snowmelt model including potential direct solar radiation. *Journal of Glaciology*, 45(149):101–111.
- Huss, M., Bauder, A., and Funk, M. (2009). Homogenization of long-term mass balance time series. *Annals of Glaciology*, 50(50):198–206.
- Huss, M., Bauder, A., Funk, M., and Hock, R. (2008a). Determination of the seasonal mass balance of four Alpine glaciers since 1865. *Journal of Geophysical Research*, 113:F01015.
- Huss, M., Farinotti, D., Bauder, A., and Funk, M. (2008b). Modelling runoff from highly glacierized alpine catchment basins in a changing climate. *Hydrological Processes*, 22(19):3888–3902.
- Huss, M., Juvet, G., Farinotti, D., and Bauder, A. (2010). Future high-mountain hydrology: a new parameterization of glacier retreat. *Hydrology and Earth System Sciences Discussion*, 7:345–387.
- Juvet, G., Picasso, M., Rappaz, J., and Blatter, H. (2008). A new algorithm to simulate the dynamics of a glacier: theory and applications. *Journal of Glaciology*, 54(188):801–811.
- Lang, H., Schädler, B., and Davidson, G. (1977). Hydroglaciological investigations on the Ewigschneefeld-Grosser Aletschgletscher. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 12:109–124.
- L+T (1993). Digitales Höhenmodell DHM25. Bundesamt für Landestopographie, Wabern, Switzerland. Produktinformation.
- Mercanton, P. L. (1916). Vermessungen am Rhonegletscher, Mensurations au Glacier du Rhône, 1874–1915. *Neue Denkschriften der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft*, 52.

- Peck, E. L. and Brown, M. J. (1962). An approach to the development of isohyetal maps for mountainous areas. *Journal of Geophysical Research*, 67:681–694.
- Schwarb, M., Daly, C., Frei, C., and Schär, C. (2001). Mean annual and seasonal precipitation throughout the European Alps 1971-1990. Technical report, Hydrological Atlas of Switzerland. Plates 2.6, 2.7.
- Tarboton, D. G., Chowdhury, T. G., and Jackson, T. H. (1995). A spatially distributed energy balance snowmelt model. In Tonnessen, K. A., Williams, M. W., and Tranter, M., editors, *Biogeochemistry of seasonally snow-covered catchments, Proceedings of a Boulder Symposium*, pages 141–155. IAHS Publ. No. 228.
- van der Linden, P. and Mitchell, J. F. B. (2009). *ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project*. Met Office Hadley Centre, UK. 160 pp.
- Verbunt, M., Gurtz, J., Jasper, K., Lang, H., Warmerdam, P., and Zappa, M. (2003). The hydrological role of snow and glaciers in alpine river basins and their distributed modeling. *Journal of Hydrology*, 282(1-4):36–55.