



---

<sup>b</sup>  
**UNIVERSITÄT  
BERN**

**OESCHGER CENTRE  
CLIMATE CHANGE RESEARCH**

Geographisches Institut  
Gruppe für Hydrologie

Bern, 22. Dezember 2011  
[überarbeitete Version]

*Schlussbericht CCHydro – Modul 3*

# **Klimaänderung und Wasserhaushalt in sensitiven Bilanzierungsgebieten**

Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt BAFU

---

**Nina Köplin, Bruno Schädler, Daniel Viviroli, Rolf Weingartner**

Geographisches Institut der Universität Bern, Gruppe für Hydrologie

Nina Köplin, Ph.D. student  
Geographisches Institut  
Gruppe für Hydrologie  
Hallerstr. 12, CH-3012 Bern

Tel. +41 31 631 85 50  
Fax +41 31 631 85 11  
nina.koepelin@giub.unibe.ch  
www.hydrologie.unibe.ch

## **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:** Universität Bern, Geographisches Institut
- Autoren:** Nina Köplin, Bruno Schädler, Daniel Viviroli, Rolf Weingartner
- Begleitung BAFU:** David Volken, Bruno Schädler, Hugo Aschwanden, Dominique Bérod, Gian Reto Bezzola, Willy Geiger, Roland Hohmann, Adrian Jakob, Ronald Kozel, Petra Schmocker-Fackel
- Hinweis:** Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

## **Zusammenfassung**

Im Modul 3 „Klimaänderung und Wasserhaushalt in sensitiven Bilanzierungsgebieten“ wurden mit dem prozessorientierten hydrologischen Modellsystem PREVAH (Precipitation-Runoff-EVApOration-Hydrotope-based model, Viviroli et al. 2009a) für 189 mesoskalige Einzugsgebiete Simulationen in stündlicher Auflösung erstellt. Diese Simulationen wurden mit den Klimaänderungssignalen aus dem Modul 1 „Klimatologisches Downscaling“ für zehn verschiedene regionale Klimamodelle (RCMs) und zwei Zukunftsperioden (2025-2046 und 2074-2095) relativ zur Kontrollperiode (1984-2005) skaliert.

Eine generelle Tendenz, die für alle Einzugsgebiete festgestellt werden konnte, ist der abnehmende Sommerabfluss als Folge abnehmender Sommerniederschläge und zunehmender Verdunstung. Die Stärke der Abnahme ist abhängig vom Regimetyp eines Einzugsgebietes: Nival und glazial geprägte Einzugsgebiete zeigen eine deutlichere Abnahme der Sommerabflüsse als pluviale Gebiete, da hier der geringere Schnee- und Eisspeicher effektverstärkend wirkt. Zudem konnte für diese Regimetypen eine Zunahme der Herbst- und Winterabflüsse beobachtet werden, als Folge des erhöhten Anteils flüssigen Niederschlags aufgrund höherer Temperaturen.

Mithilfe einer Clusteranalyse konnten die Untersuchungsgebiete gruppiert und dadurch sogenannten *Sensitivitätstypen* zugeordnet werden. Es zeichneten sich deutliche Unterschiede zwischen den Clustern ab: so wird z.B. für den Typ 2, der im wesentlichen durch einen hohen Vergletscherungsgrad gekennzeichnet ist, für beide Szenarioperioden ein deutlicher Jahresgang der Änderung projiziert, der für die ferne Zukunft sehr ausgeprägt ist. Der Jahresgang ist hier weniger auf die zurückgehenden Gletscherflächen zurückzuführen, als viel mehr auf die veränderten Schneeakkumulations- und –schmelzphasen. Typ 3 dagegen, dessen Einzugsgebiete im Mittelland und Jura gelegen sind, zeigt fast ganzjährig eine geringfügige Abnahme des Abflusses und eine leichte Zunahme des Winterabflusses. Dieser Typ weist also keine ausgeprägte Sensitivität auf ein Klimaänderungssignal auf.

Die Analyse der Hochwasserverhältnisse zeigte eine Tendenz hin zu höheren Abflussspitzen. Auch hier ist der Effekt für die ferne Zukunft deutlicher zu beobachten.

Hinsichtlich der Gletscheränderung zeigten die Untersuchungsgebiete eine deutliche Inputsensitivität. Diese ist erwartungsgemäss vom Vergletscherungsgrad eines Gebietes abhängig. In stark vergletscherten Gebieten (> 30 % Vergletscherung in der Kontrollperiode) würde der projizierte Abfluss für die ferne Zukunft (2074-2095) im Einzelfall um rund 20 % überschätzt werden, bis hin zur Projektion einer Zunahme der Sommerabflüsse anstelle eine Abnahme. In gering vergletscherten Gebieten (< 5 % Vergletscherung in der Kontrollperiode) ist dieser Effekt dahingegen zu vernachlässigen.

# Inhalt

<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>3</b>
<b>ABBILDUNGEN UND TABELLEN .....</b>	<b>5</b>
<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>6</b>
ZIELSETZUNG .....	6
FRAGESTELLUNGEN .....	7
AUFBAU DES BERICHTS .....	7
<b>UNTERSUCHUNGSGEBIETE UND DATENGRUNDLAGE.....</b>	<b>7</b>
NOMENKLATUR DER UNTERSUCHUNGSGEBIETE .....	9
<b>METHODEN.....</b>	<b>10</b>
PARAMETRISIERUNG DER UNTERSUCHUNGSGEBIETE .....	10
<i>Kalibrierung</i> .....	10
<i>Regionalisierung</i> .....	11
PLAUSIBILITÄTSTESTS DER REGIONALISIERTEN PARAMETERSÄTZE .....	12
MODELLÄUFE MIT KLIMASZENARIEN .....	13
ERMITTLUNG DER SENSITIVITÄT .....	14
<i>Clusteranalyse</i> .....	15
<i>Korrelationsanalyse der statischen Variablen</i> .....	16
GLETSCHER- UND WALDÄNDERUNGSSZENARIEN .....	18
<b>RESULTATE.....</b>	<b>19</b>
QUANTITATIVE ÄNDERUNGEN DES WASSERHAUSHALTS .....	19
SENSITIVE EINZUGSGEBIETE .....	21
<i>Clusteranalyse</i> .....	21
<i>Änderungen einzelner Wasserhaushaltsgrößen</i> .....	24
VERGLEICH VON CLUSTER UND KLASSIFIKATIONEN .....	26
ÄNDERUNG DER HOCHWASSERKENNGRÖSSEN .....	27
EINFLUSS DER LANDNUTZUNG .....	29
<b>FAZIT.....</b>	<b>30</b>
<b>VERÖFFENTLICHUNGEN .....</b>	<b>30</b>
<b>DANKSAGUNG .....</b>	<b>31</b>
<b>LITERATUR .....</b>	<b>32</b>
<b>ANHANG .....</b>	<b>I</b>

## Abbildungen und Tabellen

<b>ABBILDUNG 1:</b> ÜBERSICHT ÜBER DIE 189 UNTERSUCHUNGSGBIETE .....	8
<b>ABBILDUNG 2:</b> BENENNUNG DER UNTERSUCHUNGSGBIETE .....	9
<b>ABBILDUNG 3:</b> SCHEMA DES REGIONALISIERUNGSVERFAHRENS .....	12
<b>ABBILDUNG 4:</b> DENDROGRAMM DER CLUSTERANALYSE SAISONALER ÄNDERUNGEN .....	15
<b>ABBILDUNG 5:</b> VERGLEICH DER CLUSTERRESULTATE BEI UNTERSCHIEDLICHER KLASSENZAHL $K$ .....	16
<b>ABBILDUNG 6:</b> KORRELATIONSANALYSE DER STATISCHEN EINZUGSGEBIETSGRÖSSEN .....	17
<b>ABBILDUNG 7:</b> GLETSCHERRÜCKGANG AM BEISPIEL DES GEBIETS 202 (URBACHWASSER).....	18
<b>ABBILDUNG 8:</b> PROJIZIERTE REGIMEÄNDERUNGEN IN AUSGEWÄHLTEN UNTERSUCHUNGSGBIETEN .....	20
<b>ABBILDUNG 9:</b> CLUSTERRESULTATE FÜR DIE NAHE UND FERNE ZUKUNFT .....	22
<b>ABBILDUNG 10:</b> VERGLEICH DES MITTLEREN JAHRESGANGES MONATLICHER ABFLUSSSUMMEN DER CLUSTER .....	24
<b>ABBILDUNG 11:</b> VERÄNDERUNG EINZELNER WASSERHAUSHALTSKOMPONENTEN, CLUSTER 2 .....	25
<b>ABBILDUNG 12:</b> VERGLEICH MIT KLIMA- UND HOCHWASSERREGIONEN UND REGIMETYPEN.....	27
<b>ABBILDUNG 13:</b> JAHRESHOCHWASSER UND ANGEPASSTE <i>GENERALIZED EXTREME VALUE (GEV)</i> -VERTEILUNG .....	28
<b>ABBILDUNG 14:</b> RÜCKGANG DER GLETSCHERFLÄCHE IN DEN UNTERSUCHUNGSGBIETEN .....	29
<b>ABBILDUNG 15:</b> EINFLUSS DER GLETSCHERFLÄCHE AUF DEN PROJIZIERTEN ABFLUSS .....	30
<b>TABELLE 1:</b> PARAMETERGRUPPIERUNG FÜR DIE KALIBRIERUNG.....	11
<b>TABELLE 2:</b> STATISCHE EINZUGSGEBIETSGRÖSSEN .....	14
<b>TABELLE 3:</b> JE CLUSTER GEMITTELTE EINZUGSGEBIETSEIGENSCHAFTEN .....	23
<b>TABELLE 4:</b> CLUSTERMITTELWERTE DER SAISONALEN $\Delta T$ , $P$ UND $Q$ FÜR EINZELNE CLUSTERMEMBER. ....	23
<b>TABELLE 5:</b> ÄNDERUNG DER JAHRESSUMMEN EINZELNER WASSERHAUSHALTSKOMPONENTEN.....	26
<b>TABELLE 6:</b> JAHRESHOCHWASSER STÜNDLICHER SIMULATIONEN, GEBIET 105U, VORDERRHEIN BIS ILANZ.....	27

## Einleitung

Ein veränderter klimatischer Input in ein hydrologisches System, wie etwa höhere Temperaturen und infolge dessen stärkere Schnee- und Gletscherschmelze oder ein hinsichtlich der Intensität, Dauer und jahreszeitlichen Verteilung veränderter Niederschlag, verändert auch das Abflussverhalten eines Einzugsgebietes. Hydrologische Kenngrößen (z.B. NQ, MQ, HQ) oder der Regimetyp eines Gebietes können von dieser Änderung betroffen sein. Es ist anzunehmen, dass nicht jedes Einzugsgebiet in gleicher Weise reagiert, sondern einige Gebiete gepuffert, andere hingegen verstärkt, und dass unterschiedliche Komponenten des Wasserhaushalts von einer Änderung betroffen sind. Eine vertiefte Kenntnis dieser Änderungen ist Grundlage für eine nachhaltige Bewirtschaftung des zukünftigen Wasserdargebots und für die vorausschauende Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen.

In den letzten Jahren ist eine Reihe von Studien erschienen, die sich mit dieser Problemstellung auseinandersetzen. Das jüngste Beispiel ist das Projekt „Klimaänderung und Wasserkraft“, in dem verschiedene Aspekte der Klimaänderung und deren spezifischen Auswirkungen auf die Wasserkraftnutzung betrachtet wurden (Synthesebericht, SGHL & Chy 2011). Eine flächendeckende Untersuchung mesoskaliger Schweizer Einzugsgebiete auf Basis der jüngsten Generation von Klimaszenarien und in Bezug auf unterschiedliche wasserwirtschaftliche Fragestellungen fehlt jedoch bislang für die Schweiz. Die vorliegende Studie leistet einen Beitrag, um diese Lücke zu schliessen.

## Zielsetzung

Das Modul 3 „Klimaänderung und Wasserhaushalt in sensitiven Bilanzierungsgebieten“ gliederte sich in zwei Teilprojekte. Untersuchungsgegenstand im ersten Teil der Studie waren 189 *Bilanzierungsgebiete* (gemäss Schädler & Weingartner 1992) mit einer mittleren Einzugsgebietsgrösse von rund 250 km<sup>2</sup>, für welche mit dem prozessorientierten hydrologischen Modellsystem PREVAH (Precipitation-Runoff-EVApotation-Hydrotope-based model Viviroli et al. 2009a) Simulationen in stündlicher Auflösung erstellt wurden. Diese Simulationen wurden mit den Klimaänderungssignalen aus dem Modul 1, „Klimatologisches Downscaling“, für zehn verschiedene regionale Klimamodelle (RCMs) und zwei Zukunftsperioden (2025-2046 und 2074-2095, relativ zur Kontrollperiode 1984-2005) skaliert (Bosshard et al. 2011). Dieser erste Teil der Studie diente dazu, quantitative Aussagen bezüglich potenzieller Änderungen der hydrologischen Systeme zu treffen und besonders sensitive Einzugsgebiete zu benennen. Ein möglicher kausaler Zusammenhang von ermittelter Sensitivität und spezifischen Gebietseigenschaften wurde hierbei geprüft.

In einer vertiefenden Analyse im zweiten Teil der Studie wurde eine Auswahl an unterschiedlich sensitiven Einzugsgebieten detaillierter betrachtet. Insbesondere wurde das Hochwasserverhalten untersucht ebenso wie die Inputsensitivität gegenüber Änderungen in der Landnutzung, wobei hierunter eine Änderung der Gletscher- und Waldflächenanteile eines Einzugsgebietes verstanden wird. Die notwendigen Änderungsszenarien zum Gletscherrückgang wurden durch das GIUZ im Modul 2, „Natürlicher Wasserhaushalt der Schweiz und ihrer bedeutendsten Großeinzugsgebiete“, im Teilprojekt GLAC bereitgestellt. Die Waldent-

wicklungsszenarien konnten im Rahmen von CCHydro nicht generiert werden, daher werden für diese Fragestellungen zu einem späteren Zeitpunkt potentielle, an die Temperaturänderung angepasste Verschiebungen der Waldgrenze, sowie extreme synthetische Szenarien in einer Art Sensitivitätsstudie getestet.

Die folgenden Fragestellungen waren Grundlage für die anschliessenden Untersuchungen.

## **Fragestellungen**

1. Wie lässt sich ein klimainduzierter, hydrologischer Wandel quantitativ beziffern?
2. Welche Bilanzierungsgebiete reagieren besonders sensitiv auf eine Änderung des Klimas?
3. Gibt es einen kausalen Zusammenhang von Gebietseigenschaften und ermittelter Sensitivität?
4. Wie ändern sich die Hochwasserkenngrossen in den sensitiven Gebieten?
5. Wie ist die Inputsensitivität gegenüber Änderungen in der Gletscher- respektive Waldfläche eines sensitiven Einzugsgebietes zu bewerten?

## **Aufbau des Berichts**

Im Folgenden werden zunächst die Untersuchungsgebiete und die verwendete Datengrundlage vorgestellt. Im Methodenteil werden die Parametrisierung der Untersuchungsgebiete mithilfe von Kalibrierung und Regionalisierung kurz vorgestellt, sowie die Methoden zur Auswertung der Modellierungsergebnisse erläutert. Der Ergebnisteil folgt in seinem Aufbau den oben angegebenen Fragestellungen. Im DVD-Anhang zu diesem Bericht finden sich Abbildungen und tabellarische Informationen zu allen Untersuchungsgebieten.

## **Untersuchungsgebiete und Datengrundlage**

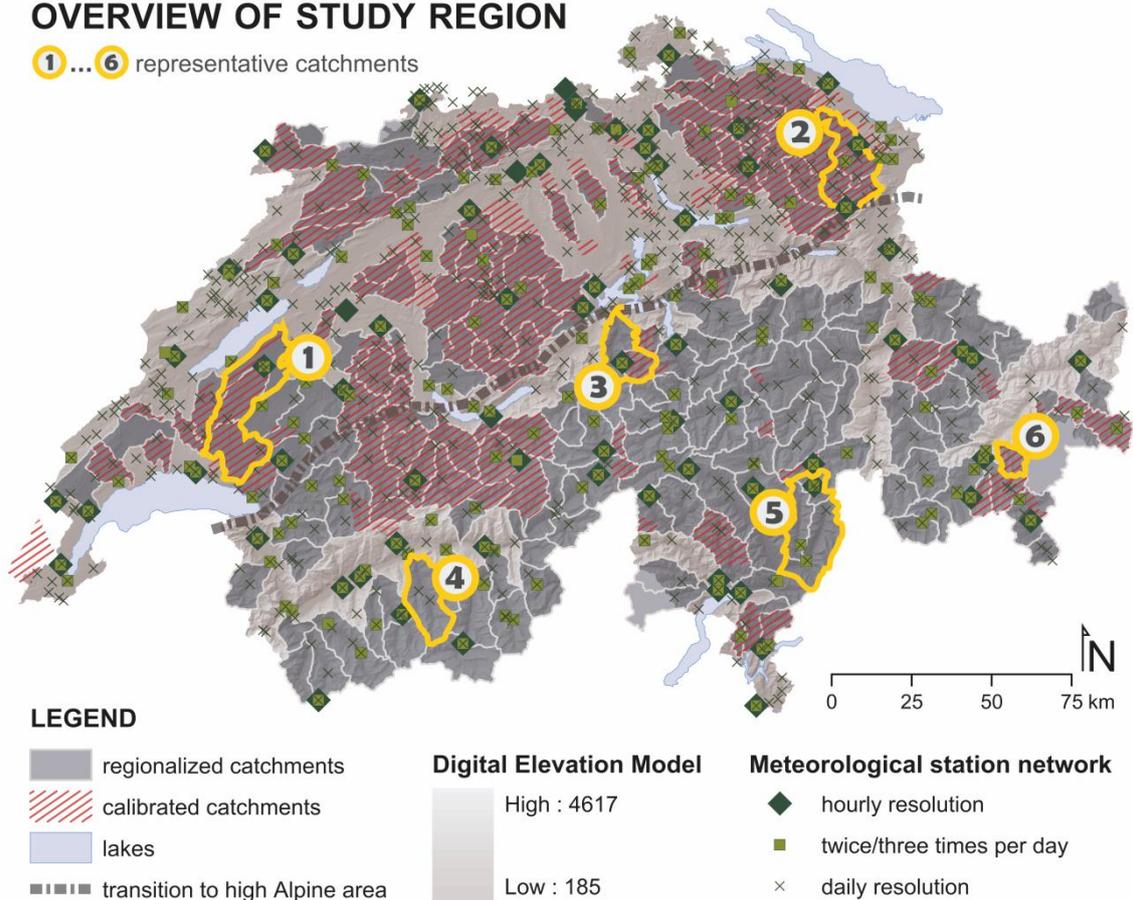
In **Abbildung 1** sind die 189 Untersuchungsgebiete dargestellt (*regionalized catchments*, dunkelgraue Polygone), für die mit PREVAH regionalisierte Modellparametersätze erstellt wurden (von hier an als *regionalisierte Gebiete* bezeichnet, Einzelheiten zur Regionalisierung im nächsten Kapitel). Diese Gebiete machen einen Flächenanteil von rund 65 % der Gesamtfläche der Schweiz aus. Einzugsgebiete, die flussabwärts der grossen Alpenrandseen gelegen sind, wurden von der Untersuchung ausgeschlossen, da sie stark durch das Seemanagement beeinflusst sind. Die somit verbleibenden Gebiete decken jedoch alle Naturräume und Klimaregionen der Schweiz ab, wodurch eine angemessene Repräsentativität gegeben ist.

Die mittlere Einzugsgebietshöhe reicht von 394 bis 3027 m ü.d.M., das Mittel aller Einzugsgebiete liegt bei etwa 1600 m ü.d.M. Die Einzugsgebietsflächen decken einen Bereich zwischen 20 und 1752 km<sup>2</sup> ab, wobei die mittlere Einzugsgebietsgrösse 250 km<sup>2</sup> beträgt. Wie der Abbildung zu entnehmen ist, haben die einzelnen Gebiete eine relativ gleichmässige Fläche.

Die dennoch grosse Spanne der Einzugsgebietsflächen resultiert daher, dass bei einem Unterliegergebiet die flussaufwärts gelegenen Gebiete integriert werden (vgl. z.B. *representative catchments* 1, 2, 3 und 5 in **Abbildung 1**), damit für jedes Gebiet eine geschlossene Wasserbilanz erstellt werden kann. Im Abschnitt „Nomenklatur der Untersuchungsgebiete“ wird das Vorgehen bei der Benennung der Einzugsgebiete erläutert.

## OVERVIEW OF STUDY REGION

① ... ⑥ representative catchments



**Abbildung 1:** Übersicht über die 189 Untersuchungsgebiete mit regionalisierten Modellparametern (dunkelgraue Flächen). Rot schraffiert hervorgehoben sind diejenigen Einzugsgebiete, deren Modellparameter kalibriert wurden. Ebenfalls dargestellt sind die verwendeten Stationen des MeteoSchweiz-Messnetzes, sowie sechs repräsentative Einzugsgebiete, für die beispielhaft Resultate präsentiert werden (vgl. **Abbildung 8**).

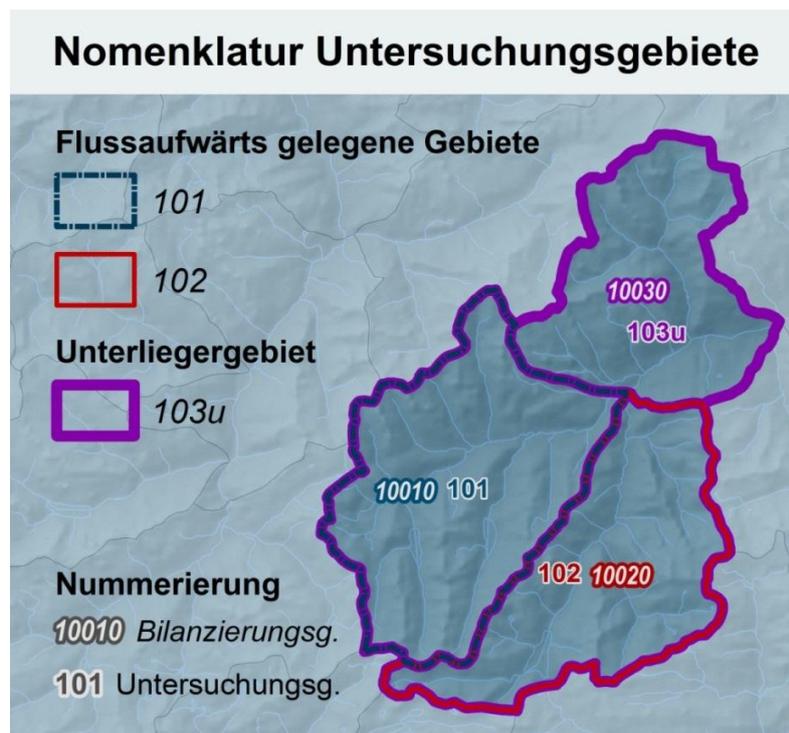
Die rot schraffierten Flächen markieren die Gebiete, die anhand unbeeinflusster Abflussmessreihen kalibriert werden konnten (Einzelheiten zur Kalibrierung im nächsten Kapitel) und auf denen die Regionalisierung basiert. Für diese Gebiete lagen Abflussmessreihen in stündlicher Auflösung für die Periode 1983 bis 2005 vor.

Die zeitliche Auflösung der verwendeten meteorologischen Stationen variiert zwischen stündlich (ANETZ-Stationen) und täglich (Niederschlagsammler). Die zur Modellierung benötigten meteorologischen Variablen sind Temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ ), Niederschlag ( $\text{mm h}^{-1}$ ), relative Luftfeuchtigkeit (%), Windgeschwindigkeit ( $\text{m s}^{-1}$ ), Globalstrahlung ( $\text{W m}^{-2}$ ) und Sonnen-

scheindauer (–). Dieser Satz an Variablen ist vollständig lediglich für die 76 verwendeten ANETZ-Stationen verfügbar, und das hydrologische Modell daher massgeblich auf diese Informationen angewiesen. Im Gegensatz zur oben erwähnten mittleren Einzugsgebietshöhe von 1600 m ü.d.M., beträgt die mittlere Höhe der ANETZ-Stationen etwa 1000 m ü.d.M. und nur 28 % der Stationen sind über eine Höhe von 1500 m ü.d.M. gelegen, dem Übergang (*transition* in **Abbildung 1**) zu hochalpinen Regionen. Da jedoch 58 % der regionalisierten Gebiete oberhalb dieser Grenze gelegen sind, bedeutet das, dass für eine Vielzahl der Gebiete die meteorologischen Informationen stark in die Höhe extrapoliert werden mussten und damit als potentiell weniger zuverlässig erachtet werden müssen. Dies wird im Abschnitt “Modellläufe mit Klimaszenarien” von Bedeutung sein.

## Nomenklatur der Untersuchungsgebiete

Die Bezeichnung der Untersuchungsgebiete leitet sich aus der Bilanzierungsgebietsnummer ab (vgl. Schädler und Weingartner 1992). Aus methodischen Gründen wurde diese fünfstellige Nummer zusammengefasst, indem die zweite und fünfte Ziffer (in jedem Gebiet eine “0”) gestrichen wurde. Bei Unterliegergebieten, die den Abfluss der flussaufwärts gelegenen Gebiete integrieren, wurde der dreistelligen Nummer zusätzlich ein “u” angefügt (für *upstream*, **Abbildung 2**). Im Anhang findet sich eine Abbildung der Untersuchungsgebiete inklusive Gebietsnummer-Label (Anhang Error! Reference source not found.). Im DVD-Anhang findet sich ausserdem eine Auflistung der je Untersuchungsgebiet integrierten Bilanzierungsgebiete, sowie eine Zuordnung des jeweiligen Hauptflusses zum Untersuchungsgebiet (siehe *Gebietsinformationen.xlsx*).



**Abbildung 2:** Benennung der Untersuchungsgebiete am Beispiel der Gebiete 101 bis 103u (Vorderrhein).

## Methoden

### ***Parametrisierung der Untersuchungsgebiete***

Die Parametrisierung der Untersuchungsgebiete erfolgte nach dem Kalibrierungs- und Regionalisierungsverfahren, das Daniel Viviroli im Rahmen seiner Dissertation entwickelt hat. Das Kalibrierungsverfahren ist in Viviroli et al. (2009b) beschrieben, das Vorgehen bei der Regionalisierung in Viviroli et al. (2009c). Es konnten die von Daniel Viviroli erstellten regionalisierten Parametersätze für 127 Bilanzierungsgebiete der Nordalpinen Schweiz übernommen und um weitere 65 Gebiete in Süd- und Inneralpinen Regionen erweitert werden (Köplin et al. 2010), so dass insgesamt 189 Bilanzierungsgebiete für die weiteren Untersuchungen zur Verfügung standen. Es wird im Folgenden kurz das Kalibrierungs- und Regionalisierungsverfahren nach Viviroli zusammengefasst, für detaillierte Informationen sei hier auf die entsprechenden Publikationen verwiesen.

#### **Kalibrierung**

Die in PREVAH implementierte automatische Kalibrierungsroutine basiert auf einem iterativen Verfahren, das paarweise und nacheinander je zwei Modellparameter anpasst und anschliessend die Güte des Modelllaufs bewertet. Das Parameterpaar wird weiter angepasst, sofern die erzielte Modellgüte besser bewertet wird, als im vorherigen Schritt, andernfalls gilt das Parameterpaar als optimiert. Die freien Modellparameter und die Gruppierung zu Parameterpaaren ist **Tabelle 1** zu entnehmen.

Der Kalibrierungszeitraum beträgt immer fünf Jahre, wenn möglich von 1993 bis 1997, wobei das erste Jahr als Initialisierungsjahr verworfen wird. Die übrigen Jahre der gesamten stündlichen Abflussmessreihe werden zur Validierung der kalibrierten Parameter verwendet. Ein maximaler Modellierungszeitraum beginnt 1983 und endet 2005, was durch die Verfügbarkeit der meteorologischen Daten begründet ist: ab 1983 ist das Messnetz der ANETZ-Stationen annähernd vollständig aufgebaut und nach 2005 wurde das ANETZ in das SwissMetNet überführt, wobei einige Stationen räumlich versetzt oder aufgegeben wurden.

Da sowohl Änderungen des Wasserhaushalts wie auch der Hochwasserkenngrößen untersucht werden sollten, wurden je Gebiet zwei Parametersätze kalibriert: ein MQ-Datensatz, der mit mittelwassersensitiven Gütemassen bewertet wurde und ein HQ-Parametersatz, für den in einem weiteren Modelllauf zusätzlich hochwassersensitive Gütemasse erhoben wurden. Das bedeutet, dass pro Gebiet je zwei Modellparametersätze zur Verfügung stehen und jede weitere Berechnung in den Gebieten zweimal durchgeführt wird.

Insgesamt konnten 36 Einzugsgebiete im Süd- und Inneralpinen Raum kalibriert werden, jedoch mussten 13 dieser Gebiete aufgrund unzureichender Resultate verworfen werden. Dies konnte in allen Fällen der Qualität der Abflussdaten dieser ausnahmslos kantonalen Messstationen zugeschrieben werden. Zusammen mit den 140 erfolgreich kalibrierten Gebieten der Alpennordseite, stehen also 163 Modellparametersätze für die anschliessende Regionalisierung zur Verfügung.

**Tabelle 1:** Parametergruppierung für die paarweise, iterative Kalibrierung (gemäss Viviroli et al. 2009b).

<b>Pair</b>	<b>Parameter</b>	<b>Parameter description unit</b>	<b>Unit</b>
1	PKOR	Precipitation adjustment	%
	SNOKOR	Snow adjustment	%
2	T0	Threshold temperature snowmelt	°C
	TMFSNOW	Temperature melt factor for snow	mm d <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
3	T0	Threshold temperature snowmelt	°C
	RMFSNOW	Radiation melt factor for snow	mm h <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> W <sup>-1</sup> m <sup>2</sup>
4	SGR	Threshold storage for surface runoff	mm
	K0H	Storage time for surface runoff	h
5	K1H	Storage time for interflow	h
	PERC	Percolation rate	mm h <sup>-1</sup>
6	CG1H	Storage time for quick base flow	h
	SLZ1MAX	Maximum content of the quick base flow storage	mm
7	K2H	Storage time for slow base flow	h
	PERC	Percolation rate	mm h <sup>-1</sup>
8*	ICETMF	Temperature melt factor for ice	mm d <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
	ICERMF	Radiation melt factor for ice	mm h <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> W <sup>-1</sup> m <sup>2</sup>

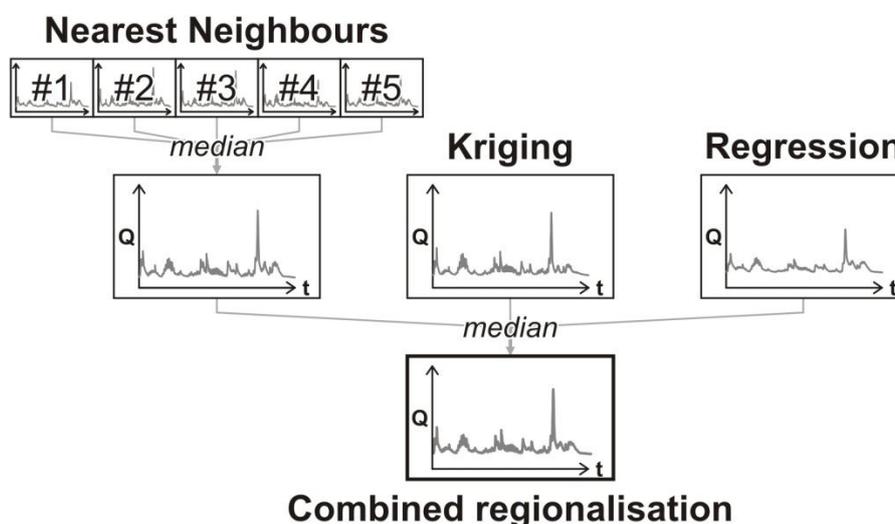
\* Verwendung nur bei vergletscherten Einzugsgebieten

## Regionalisierung

Die kalibrierten PREVAH-Parametersätze werden analog dem Vorgehen von Viviroli et al. (2009c) mittels einer Kombination dreier Regionalisierungsverfahren (Nearest Neighbours, Kriging, Regression) auf ungemessene oder beeinflusste Gebiete übertragen, um die hydrologische Datenbasis für die anschliessenden Modellrechnungen mit Szenariodaten als Klimainput zu erweitern. Dabei wird grundsätzlich der gesamte Datensatz der 163 kalibrierten Gebiete als *Spendergebiete* genutzt, jedoch je nach Regionalisierungsverfahren in Teilmengen aufgeteilt. Für die Methoden Regression und Nearest Neighbours konnten die besten Resultate erzielt werden, wenn der Pool der Spendergebiete in Gebiete aufgeteilt wurde, die über- bzw. unterhalb einer Höhenlinie von 1550 m ü.d.M. gelegen sind. Beim Nearest Neighbours-Ansatz wurden zudem die fünf ähnlichsten Gebiete bestimmt und nicht nur ein ähnlichstes Gebiet. Beim Kriging wurde der Datensatz der Spendergebiete durch den Suchradius (hier 200 km) und die maximale Anzahl an Stützstellen (25) begrenzt. Diese beiden Grenzen sind sehr weit

gewählt, so dass auch für Gebiete in Randlagen, z.B. im südlichen Wallis, genug Stützstellen für das Kriging einbezogen werden konnten.

Insgesamt liegen nun also für jedes Gebiet 14 Modellparametersätze vor: die der fünf Nearest Neighbours, einer aus dem Regressions-Verfahren und einer der Kriging-Methode. Diese sieben Parametersätze wurden jeweils für den MQ- und den HQ-Datensatz (s.o.) bestimmt. Für alle Auswertungen gilt es nun, zunächst die sieben Simulationen der einzelnen Regionalisierungsvarianten zu mitteln (z.B. durch die Bestimmung des Medians je Zeitschritt, siehe **Abbildung 3**) und erst dann die Auswertung auf Basis dieser kombinierten Ganglinie durchzuführen. Für alle Wasserhaushalts-Untersuchungen wurde in der vorliegenden Studie mit dem Mittelwert der Ganglinien gerechnet, für die Untersuchung der Hochwasserverhältnisse wurde die kombinierte Ganglinie mithilfe des Medians gebildet.



**Abbildung 3:** Schema des Regionalisierungsverfahrens (Viviroli et al. 2009c). Die Modelloutputs der drei Regionalisierungsmethoden werden je Zeitschritt gemittelt, so dass eine kombinierte Ganglinie entsteht.

Vergleicht man in **Abbildung 1** die ungleiche Verteilung der kalibrierten Gebiete, die vorrangig im Schweizer Mittelland gelegen sind, so wird der Nutzen der Regionalisierung deutlich: Alle weiteren Analysen konnten dadurch in einem ausgewogenen Satz an unterschiedlichen Bilanzierungsgebieten durchgeführt werden. Die Abflussprojektionen in den regionalisierten Gebieten, in denen ein grosser Teil der Gewässer für die Stromproduktion aus Wasserkraft genutzt wird (Margot et al. 1992), bilden jedoch nur einen möglichen natürlichen Abfluss in diesen Gebieten ab. Dies muss für die Interpretation der Resultate gegebenenfalls berücksichtigt werden.

### **Plausibilitätstests der regionalisierten Parametersätze**

Die Regionalisierungsergebnisse wurden mit Hilfe einer Kreuzvalidierung an denjenigen Gebieten überprüft, für die Abflussmessungen vorliegen. Der resultierende mediane Nash-

Sutcliffe-Index von  $> 0.7$  zeigt eine angemessene Modellgüte auch mit regionalisierten Parametersätzen. Des Weiteren zeigt ein Vergleich des simulierten Jahresabflusses mit den Werten für die Bilanzierungsgebiete aus der HADES-Tafel 6.3, „Komponenten des natürlichen Wasserhaushaltes 1961–1990“ (Schädler & Weingartner 2001) eine gute Übereinstimmung, die Werte weichen  $\pm 5\%$  voneinander ab (Viviroli et al. 2011), was im Bereich der Modellierungsungenauigkeit liegt.

## **Modellläufe mit Klimaszenarien**

Das tägliche Klimaänderungssignal von zehn RCMs und zwei Szenarioperioden wurde auf die gemessenen stündlichen Zeitreihen der Temperatur (additiv) und des Niederschlags (multiplikativ) aufgeprägt und anschliessend analog dem Vorgehen in der Kontrollperiode mit der *Detrended Inverse Distance Weighting*-Methode (*DTIDW*) für jedes Untersuchungsgebiet interpoliert. Je RCM und Szenarioperiode und je Gebiet wurden 14 Modellläufe (s.o.) durchgeführt, wodurch 53760 Modelloutputs generiert wurden.

Bei der Auswertung der Resultate zeigten sich unplausibel hohe Abflussprojektionen, die auf Inhomogenitäten im interpolierten Niederschlag zwischen der Kontrollperiode und den Szenarioperioden zurückzuführen sind, was wiederum im *DTIDW*-Verfahren begründet ist. Das *Detrending* wird bei diesem Interpolationsverfahren mit Hilfe einer höhenabhängigen Regression der Klimavariablen je Zeitschritt durchgeführt. Sollte die berechnete Regression nicht zuverlässig genug sein, was der Fall ist, sobald per Definition ein Schwellenwert des Korrelationskoeffizienten von 0.3 unterschritten wird, so wird die höhenabhängige Regression der Klimavariablen für diesen Zeitschritt verworfen und die Stationsdaten nur mit Hilfe des *IDW*-Ansatzes räumlich interpoliert.

Da der Niederschlag multiplikativ skaliert wird und das Niederschlagsänderungssignal weniger homogen ist als das Temperatursignal, ist es möglich, dass für dieselbe Stationsauswahl in der Kontrollperiode eine Regression durchgeführt wird, in der Szenarioperiode jedoch nicht und umgekehrt. Im direkten Vergleich der beiden interpolierten Meteorologien kann dann ein sehr viel grösseres Niederschlagsänderungssignal resultieren, als durch das „Klimatologische Downscaling“ berechnet wurde. Wird dieses unverhältnismässige Signal noch stark in die Höhe extrapoliert (siehe Abschnitt „Untersuchungsgebiete“), potenzieren sich die Unterschiede zwischen interpolierter Kontroll- und Szenariometeorologie bis hin zu 20-fachen Niederschlagswerten in einzelnen Zeitschritten. Eine Korrektur der interpolierten Gebietsniederschlagstabellen war für die weiteren Untersuchungen unumgänglich.

Dabei wurde zunächst für jeden Zeitschritt das *Delta P* zwischen interpolierter Kontroll- und Szenariometeorologie berechnet. Unverhältnismässige Änderungssignale, d.h. Signale ausserhalb der definierten Grenzen von 0.2 und 1.8 wurden mit einem spezifischen und für das Gebiet und den betreffenden Tag im Jahr abgeleiteten Änderungssignal ersetzt (das Korrekturverfahren wurde von Thomas Bosshard, IAC entwickelt).

Das interpolierte Temperaturänderungssignal ist weniger problematisch, da hier die Werte nur additiv skaliert werden und sich dadurch das relative Verhältnis der Stationsdaten auch im Szenariozeitraum nicht ändert. Mit den korrigierten Gebietsniederschlagstabellen wurden erneut in allen Untersuchungsgebieten Modellrechnungen durchgeführt.

## Ermittlung der Sensitivität

Da es nicht möglich ist, einen Schwellenwert festzulegen, ab dem ein Gebiet als sensitiv eingestuft werden kann, wurden die Untersuchungsgebiete zunächst aufgrund ihrer spezifischen Gebietsantwort auf das Klimaänderungssignal mit Hilfe einer Clusteranalyse gruppiert. Für die so ermittelten Gruppen von Untersuchungsgebieten, oder auch *Sensitivitätstypen*, werden diejenigen Wasserhaushaltsgrößen bestimmt, die innerhalb einer Gruppe deutlich auf eine Änderung im Klimainput reagieren. Zudem wurden verschiedene statische Einzugsgebietseigenschaften erhoben (vgl. **Tabelle 2**, siehe auch DVD-Anhang, *Gebietsinformationen.xlsx*), die auf einen potentiellen kausalen Zusammenhang mit dem für den *Sensitivitätstyp* spezifischen hydrologischen Änderungssignal untersucht wurden.

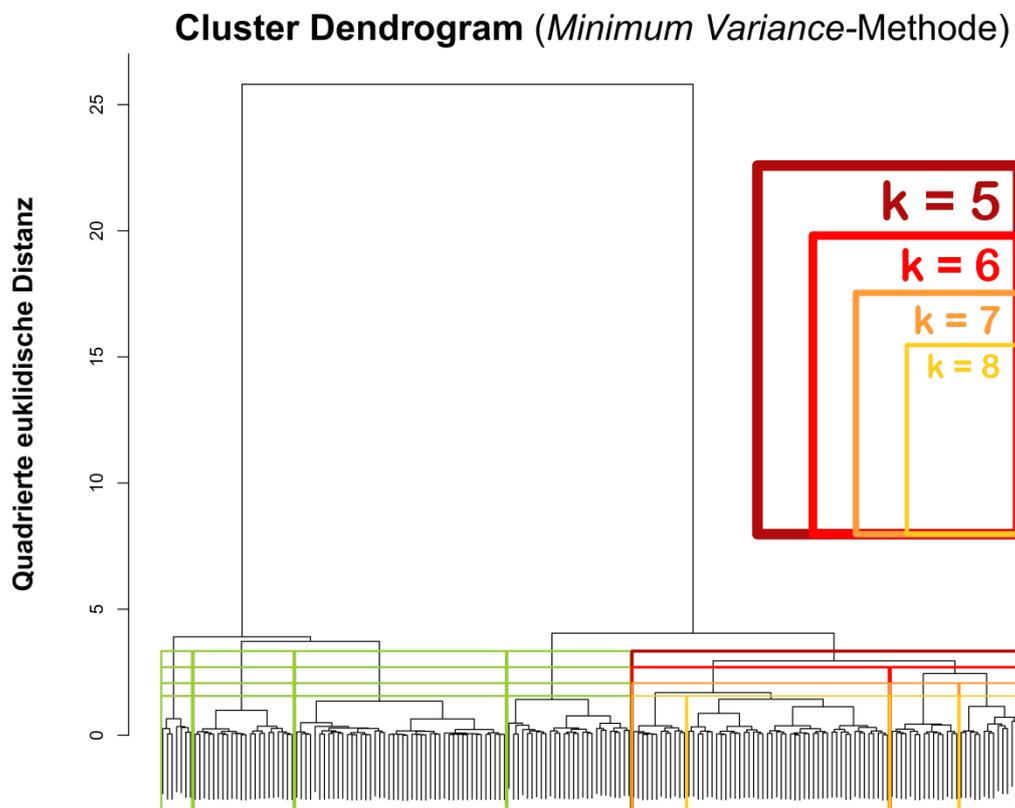
**Tabelle 2:** Statische Einzugsgebietsgrößen. IDs 1 bis 8: Quantitative Variablen (Ratioskala). IDs 9 bis 13: Kategorielle Variablen (Nominalskala).

<b>ID</b>	<b>Abbreviation</b>	<b>Description</b>	<b>Unit</b>
1	catch_area	Catchment area	km <sup>2</sup>
2	mean_alt	Mean altitude	m a.s.l.
3	elv_range	Elevation range (altitude <sub>max</sub> – altitude <sub>min</sub> )	m
4	mean_slo	Mean slope of the catchment	°
5	mean_afc	Mean plant available field capacity	Vol%
6	mean_sdp	Mean soil depth	m
7	gl_area_abs	Glaciated area (absolut)	km <sup>2</sup>
8	gl_area_rel	Glaciated area (relative)	%
9	mean_asp	Dominant aspect (1=N, 2=E, 3=S, 4=W)	-
10	domnt_lu	Dominant land use (i.e. the mode of land use types)	-
11	regime_type	Regime type of the catchment (Weingartner & Aschwanden 1992)	-
12	clim_reg	Corresponding climate region (Schwarb et al. 2001)	-
13	flood_reg	Corresponding flood region (Weingartner et al. 1999)	-

Die spezifische Gebietsantwort, die die Datengrundlage für die Clusteranalyse ist, besteht aus einem *Delta T* und *Delta P*, die zusammen ein *Delta Q* hervorrufen. Diese drei Deltas werden zusammenfassend als *Delta<sub>Gebiet</sub>* bezeichnet. Die Deltas können für unterschiedliche Zeitskalen bestimmt werden, beispielsweise auf monatlicher oder saisonaler Basis (Übersicht aller *Delta<sub>Gebiet</sub>* siehe DVD-Anhang, *Gebietsinformationen.xlsx*).

## Clusteranalyse

Bei einer hierarchisch-agglomerativen Clusteranalyse werden zunächst alle Untersuchungsgebiete als Individuen betrachtet und sukzessive die einander ähnlichsten Gebiete in einer Klasse zusammengeführt, bis schliesslich alle Individuen nur zwei Klassen zugeordnet sind. Die Wahl des Distanzmasses, des Cluster-Algorithmus sowie der Anzahl der Cluster sind dabei entscheidende Schritte, die das Resultat einer Clusteranalyse massgeblich beeinflussen. Da es keine objektiven Kriterien gibt, mit denen diese Wahl getroffen werden kann, wird hier eine häufig angewandte und erprobte Kombination aus Distanzmass und Cluster-Algorithmus verwendet. Mit Hilfe der *Euklidischen Distanz* wird die Unähnlichkeit zwischen den Clustern, bzw. indirekt die Ähnlichkeit innerhalb der Cluster bestimmt. Die *Wards-* oder auch *Minimum Variance-Methode* ist ein Cluster-Algorithmus, der die Summe der quadrierten Distanzen innerhalb eines Clusters minimiert. Resultat einer solchen Clusteranalyse ist immer ein Dendrogramm (**Abbildung 4**).



**Abbildung 4:** Dendrogramm der Clusteranalyse saisonaler Änderungen in der Szenarioperiode 2025-2046. Die unterschiedliche Aufteilung der Cluster bei fünf bis acht Klassen  $k$  ist in Rot- und Gelbtönen gekennzeichnet; grün markierte Cluster bleiben für diese  $k$  unverändert.

An dieser Stelle wird die Herleitung der Klassenanzahl  $k$  beschrieben, auf der die ermittelten *Sensivitätstypen* (Kapitel „Resultate“) beruhen. **Abbildung 4** zeigt das Resultat der Clusteranalyse als Dendrogramm des saisonalen  $\Delta_{\text{Gebiet}}$  für die Szenarioperiode 2025-2046 für unterschiedliche  $k$ . **Abbildung 5** zeigt dieselben Resultate in einer räumlichen Darstellung für jedes  $k$ . Für die Unterteilung in fünf bis acht Klassen bleibt die Zuordnung von Gebieten zu

den Klassen 1-4 jeweils unverändert, d.h. diese Cluster sind sehr stabil, oder anders ausgedrückt: die Ähnlichkeit innerhalb der Cluster bzw. die Unähnlichkeit zwischen den Clustern ist gross.

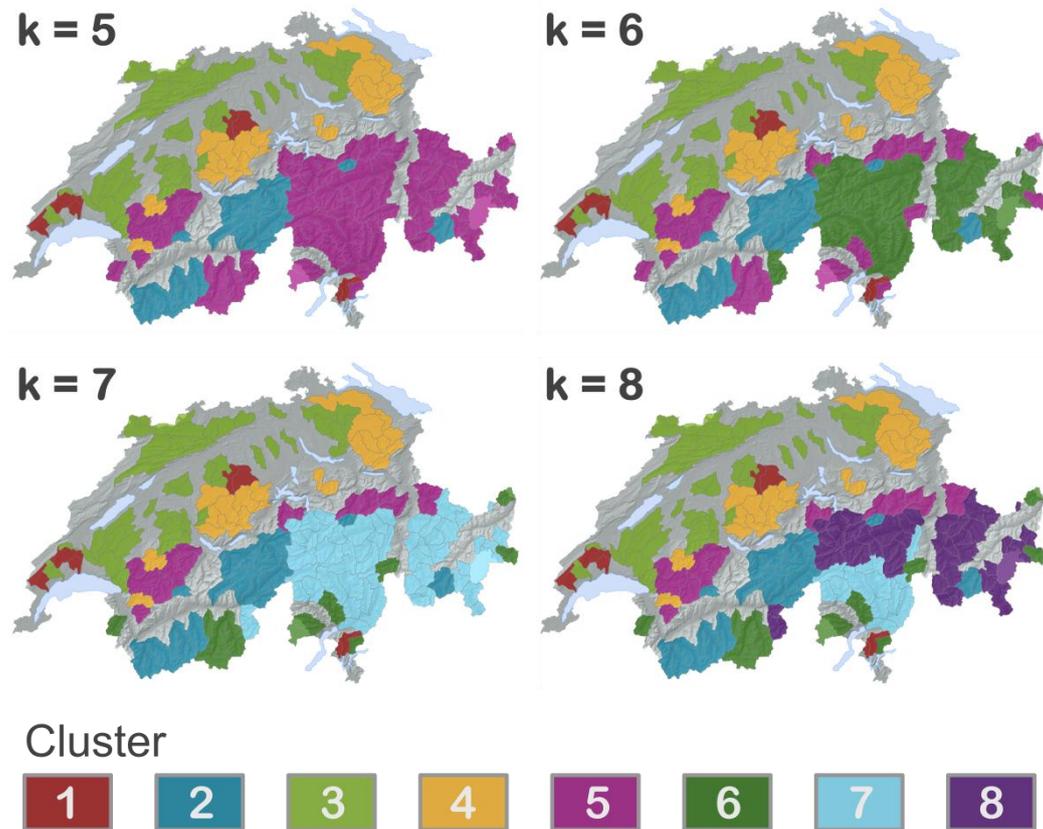


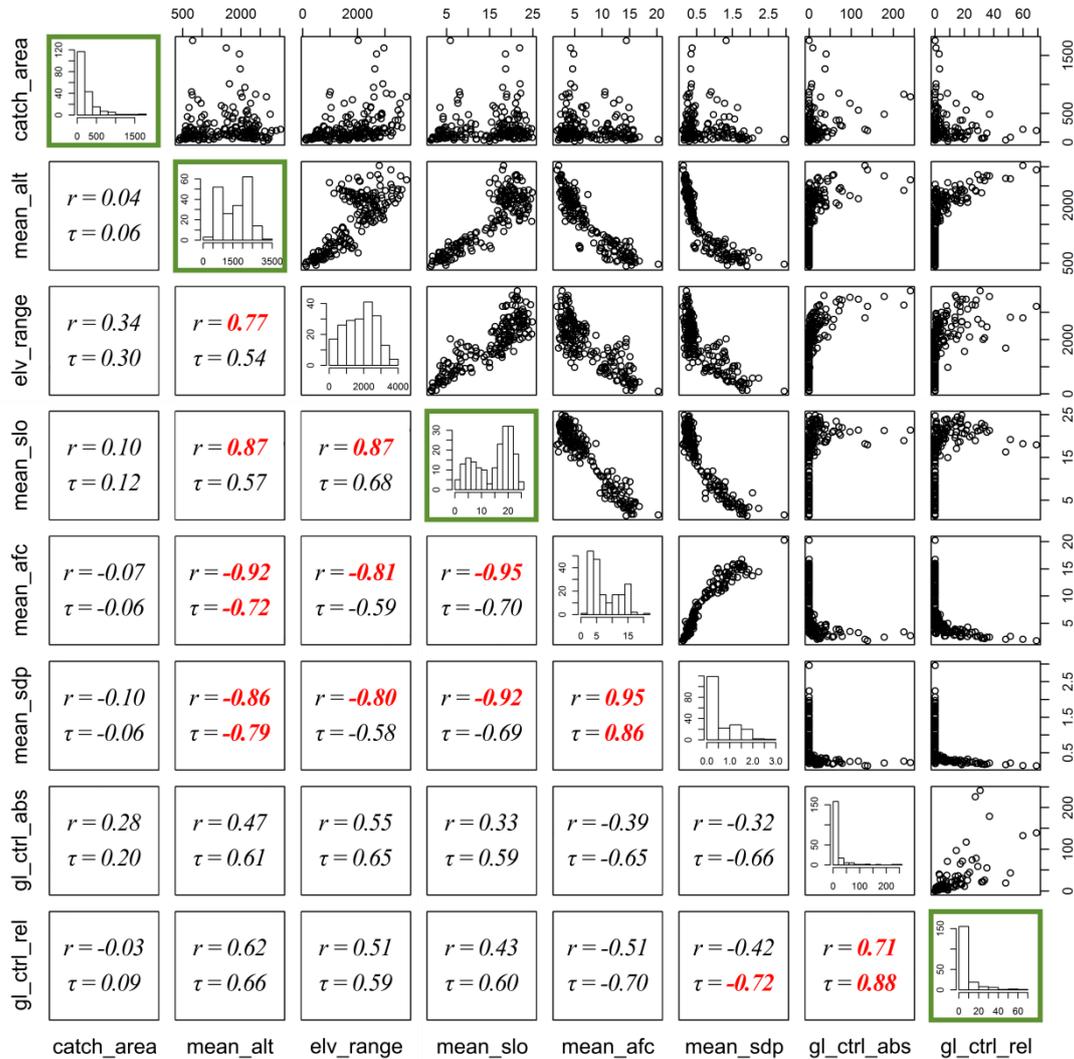
Abbildung 5: Vergleich der Clusterresultate bei unterschiedlicher Klassenzahl  $k$ .

Aus dem Dendrogramm und der räumlichen Darstellung lässt sich nun eine für die Fragestellung angemessene Klassengrösse bestimmen. Eine Aufteilung in nur fünf Klassen erscheint nicht sinnvoll, da so annähernd die Hälfte der Gebiete in einer Klasse zusammengefasst werden (Abbildung 4). Ob sechs, sieben oder acht Klassen die beste Gruppierung darstellen, kann objektiv anhand des Dendrogramms allein nicht entschieden werden. Vergleicht man jedoch die räumlichen Darstellungen für diese  $k$  miteinander, erscheint die Aufteilung in acht Cluster (Abbildung 5 rechts unten) am plausibelsten, denn nur hier werden Tessiner Einzugsgebiete nicht mit den benachbarten Nordalpinen Einzugsgebieten zusammengefasst, was aufgrund der sehr unterschiedlichen klimatischen Verhältnisse in diesen Regionen nicht sinnvoll wäre. In diesem Fall kann also das Vorwissen über die Daten als Entscheidungshilfe dienen.

### Korrelationsanalyse der statischen Variablen

Da die Möglichkeit besteht, dass mehrere der statischen Einzugsgebietsgrössen einen gleichen oder ähnlichen Anteil der Variation des hydrologischen Klimaänderungssignals ( $\Delta_{\text{Gebiet}}$ ) erklären, wird dies zunächst mit Hilfe einer Korrelationsanalyse getestet. Die

quantitativen Variablen (Ratioskala, IDs 1 bis 8 in **Tabelle 2**) werden mithilfe der Korrelationsanalyse (siehe **Abbildung 6**) auf ihre Eignung als erklärende Variable geprüft; bei stark korrelierenden Paaren wird eine der betreffenden Variablen von der Untersuchung ausgeschlossen.



**Abbildung 6:** Korrelationsanalyse der statischen Einzugsgebietsgrößen. Die Variablenkürzel sind in Tabelle 2 erläutert. Je Variablenpaar sind ein Scatterplot sowie der Pearson Korrelationskoeffizient  $r$  und Kendalls  $\tau$  dargestellt; rot markierte Werte zeigen einen starken Zusammenhang an ( $> 0.7$ ). Zusätzlich ist die Verteilung der Werte je Variable in einem Histogramm dargestellt. Diejenigen Variablen, die für die weiteren Untersuchungen genutzt werden, sind durch einen grünen Rahmen gekennzeichnet.

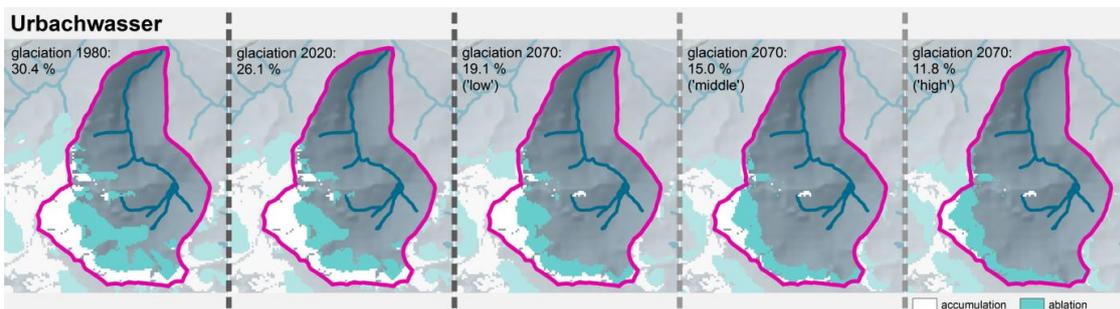
Ein Korrelationskoeffizient grösser 0.7 zeigt tendenziell einen starken Zusammenhang zwischen einzelnen statischen Gebietseigenschaften an. Die mittlere Gebietshöhe ( $mean\_alt$ ) und der maximale Höhenunterschied ( $elv\_range$ ) eines Gebietes korrelieren demnach stark miteinander. Da angenommen wird, dass die mittlere Höhe eine charakteristischere Grösse für ein Einzugsgebiet darstellt, wird diese Eigenschaft als erklärende Variable in der weiteren Analyse verwendet und der Höhenunterschied von den weiteren Untersuchungen

ausgeschlossen. Die drei Grössen mittlere Hangneigung (*mean\_slo*), mittlere nutzbare Feldkapazität (*mean\_afc*) und mittlere Bodentiefe (*mean\_sdp*) korrelieren ebenfalls stark untereinander. Da die mittlere Hangneigung in der Gebietskennwerte-Datei ursprünglich aus dem Höhenmodell abgeleitet wird, die anderen beiden Grössen aber aus der weniger hoch aufgelösten Bodenkarte, wird hier die potenziell zuverlässigere Variable „Hangneigung“ weiter verwendet. Schliesslich wird noch die relative Gletscherfläche (*gl\_ctrl\_rel*) als erklärende Variable der absoluten Gletscherfläche (*gl\_ctrl\_abs*) vorgezogen, da angenommen wird, dass der relative Gletscheranteil für das Abflussverhalten eines Gebietes eine stärkere erklärende Funktion besitzt als die absolute Vergletscherung.

Von den verbleibenden erklärenden Variablen (grüne Umrandung) korrelieren nur die mittlere Gebietshöhe und die mittlere Hangneigung stark miteinander. Da jedoch davon ausgegangen wird, dass diese beiden Grössen unterschiedliche hydrologische Prozesse beeinflussen (die Hangneigung eher den Abflussbildungsprozess und die mittlere Höhe die klimatischen Eingangsgrössen) werden beide als erklärende Variablen verwendet.

## Gletscher- und Waldänderungsszenarien

Die digitalen Karten, die vom Geographischen Institut der Universität Zürich (GIUZ) für den Gletscherrückgang zur Verfügung gestellt wurden, liegen in 5-Jahres-Schritten vor. Die hier verwandte Modellversion von PREVAH, die auf dem Hydrotop-Ansatz beruht, ist jedoch für eine stationäre Landoberflächeninformation ausgelegt. Das bedingt, dass die einzelnen Entwicklungsstufen nicht berücksichtigt werden können. In Ansprache mit dem GIUZ wurden für die Simulation für die nahe Zukunft (2025-2046) der projizierte Gletscherstand von 2020 verwendet. Für die ferne Zukunft bestehen drei verschiedene Entwicklungspfade (vgl. **Abbildung 7**), als Folge unterschiedlich stark ansteigender Temperaturen; hier wird jedem Szenariomodelllauf das der Modellkette entsprechende Gletscherszenario zugeordnet. Den vom Gletscher freigegebenen Flächen wurde generell die PREVAH Landnutzungs-Kategorie „Fels“ zugewiesen, dies ebenfalls in Absprache mit dem GIUZ.



**Abbildung 7:** Gletscherrückgang am Beispiel des Gebiets 202 (Urbachwasser). In der fernen Zukunft gibt es für unterschiedliche Temperaturanstiege modellkettenspezifische Entwicklungspfade.

Leider konnten im Rahmen von CCHydro keine flächendeckenden Waldentwicklungsszenarien bereit gestellt werden. Um den Einfluss einer veränderten Waldflächenbedeckung auf den Wasserhaushalt dennoch testen zu können, werden synthetische Waldflächenänderungsszenarien erstellt, die z.B. einen der Temperaturzunahme angepassten Anstieg der Waldgrenze simulieren oder aber ein extremes Änderungsszenario darstellen, wie etwa eine Zunahme der

Waldbedeckung auf 30, 50 oder 70 % der Einzugsgebietsfläche. Generell muss jedoch zu bedenken gegeben werden, dass durch eine Änderung der Wäldfläche im Modell nur die Landbedeckung, nicht aber der Boden darunter geändert wird. Gleichzeitig ist anzunehmen, dass nur ein Teil des Waldeinflusses auf die Vegetation selbst und die damit verbundenen Verdunstungsprozesse zurückgeführt werden kann. Ein anderer und möglicherweise entscheidender Aspekt des Waldeinflusses ist die durch die tiefer wurzelnde Vegetation veränderte Bodenstruktur und die damit veränderten Abflussbildungsprozesse.

Diese Vermutung gründet auf den Erkenntnissen zweier Masterarbeiten, die im Rahmen dieses CCHydro-Moduls am Geographischen Institut der Universität Bern (GIUB) durchgeführt wurden. Felder (2011) hat in einer Modellierungsstudie mit PREVAH unterschiedliche Landnutzungsszenarien getestet, u.a. einen Anstieg der Waldgrenze, eine Verbuschung alpiner Weidelandschaft und eine Veränderung von Nadelwald zu Mischwald. Dabei zeigte sich, dass erst ab einer Landnutzungsänderung auf 30-50 % der Einzugsgebietsfläche signifikante Änderungen im Abfluss registriert werden konnten. Lustenberger (2012) untersuchte langjährige Abflussmessreihen auf Änderungen der Jahresabflusssummen sowie der Abflussbeiwerte von Einzelereignissen. Letzteres unter der Annahme, dass bei einem grösseren Waldflächenanteil der Abflussbeiwert kleiner wird. Weder bezüglich der Jahressummen, noch hinsichtlich der Abflussbeiwerte konnten deutliche Änderungen ermittelt werden, was zum Teil auf die prozentual wie flächenmässig geringen Waldflächenänderungen zurückgeführt werden kann.

Es ist also anzunehmen, dass sich eine geringfügige Änderung der Waldfläche aufgrund der ansteigenden Waldgrenze nicht im modellierten Abfluss zeigen wird. Daher sollten auch extremere Szenarien (s.o.) getestet werden. Da mutmasslich auch die geänderten Bodeneigenschaften einen Einfluss auf den Abfluss haben, könnten zusätzlich noch Änderungen der Bodentiefe wie auch der Leitfähigkeit getestet werden. Alle Szenarien werden für eine Auswahl an repräsentativen Einzugsgebieten angewendet, beispielsweise ein Gebiet je Sensitivitätstyp, und die Resultate werden zu einem späteren Zeitpunkt in einem wissenschaftlichen Artikel veröffentlicht.

## **Resultate**

### ***Quantitative Änderungen des Wasserhaushalts***

Beispielhaft werden hier die projizierten quantitativen Änderungen des Abflusses für eine Auswahl unterschiedlicher Einzugsgebiete vorgestellt. Die betreffenden Einzugsgebiete sind in **Abbildung 1** hervorgehoben. Im DVD-Anhang (..\Abbildungen\Wasserhaushalt) finden sich erweiterte Darstellungen der quantitativen Änderungen für jedes der 189 Untersuchungsgebiete (je Gebiet sind zusätzlich die absoluten Änderungen einzelner Wasserhaushaltsgrössen dargestellt).

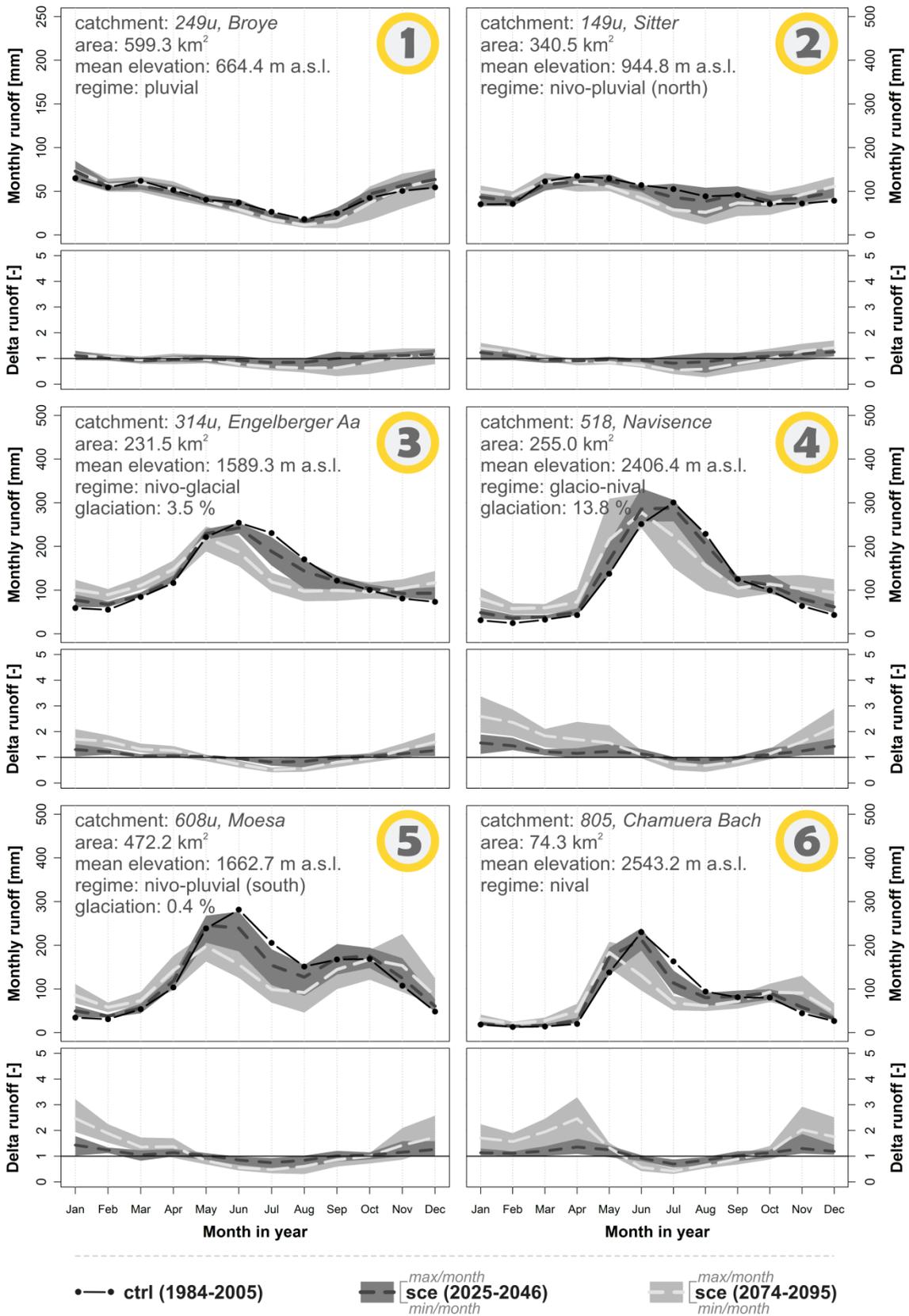


Abbildung 8: Projizierte Regimeänderungen in ausgewählten Untersuchungsgebieten. Die Nummern beziehen sich auf Abbildung 1. Je Gebiet sind einige charakterisierende Grössen angegeben.

**Abbildung 8** zeigt für die Beispielgebiete den mittleren Jahresgang der monatlichen Abflusssummen (oberer Bereich einer Teilabbildung) für Kontroll- und Szenariozeitraum, sowie den Jahresgang des monatlichen  $\Delta Q$ , das – analog zur Berechnung des Niederschlagsänderungssignals – der Quotient aus Kontroll- und Szenario-Wert ist. Ein  $\Delta Q$  von 0.9 zeigt also beispielsweise an, dass für das Szenario 90 % des Abflusses der Kontrollperiode projiziert wurden.

Für die Szenariozeiträume sind sowohl das *Ensemble Mean* dargestellt, als auch die Realisierungen aller Modellketten als Umhüllende des mittleren Jahresganges. Zu beachten ist die abweichende Skala des Gebietes 249u (Nr. 1), die aus Gründen der Lesbarkeit angepasst wurde. Die Datengrundlage für diese und alle weiteren Untersuchungsgebiete ist dem Bericht im DVD-Anhang (..\Daten\Wasserhaushalt) beigelegt.

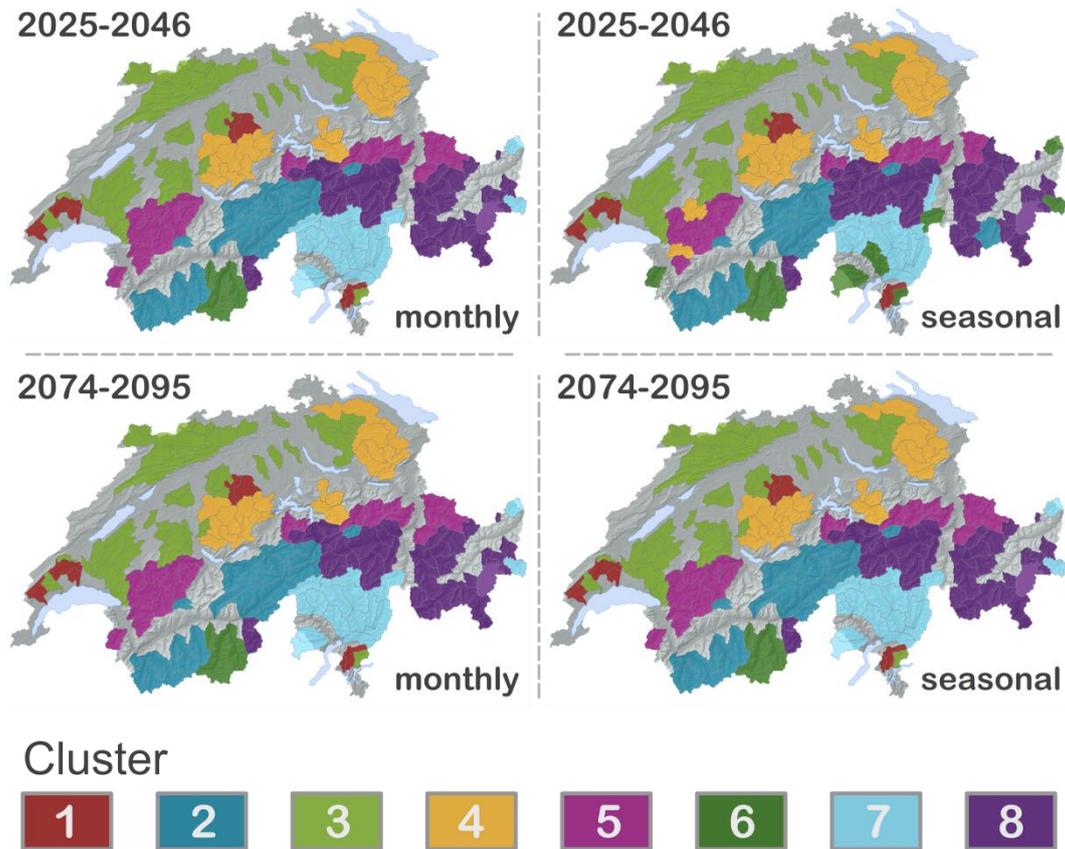
Allen Gebieten gemein ist das deutlichere Änderungssignal im Abfluss der fernen Zukunft, das die projizierten Tendenzen der nahen Zukunft verstärkt abbildet. Dies kann in erster Linie auf das deutlichere Klimaänderungssignal in dieser Periode zurückgeführt werden. Sowohl im Vergleich der absoluten als auch der relativen Änderungen lassen sich jedoch auch deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Gebieten erkennen.

Die pluvial geprägten Gebiete 1 und 2 lassen lediglich eine schwache Reaktion während beider Szenarioperioden erkennen, die sich vorrangig in einem abnehmenden Sommerabfluss zeigt. Die Umhüllende der Projektionen umschließt jedoch die Kontrollsimulation, d.h. einzelne Modellketten projizieren eine Zunahme des Abflusses, während andere eine Abnahme bewirken, d.h. diese Projektionen sind unsicher. Die Gebiete 3 bis 6 lassen ein differenzierteres Bild erkennen. Den vier Gebieten gemein ist der deutlichere Jahresgang des  $\Delta Q$ : zunehmende Abflüsse im Herbst und Winter und ein abnehmender Sommerabfluss. Das Minimum der projizierten Abflüsse verschiebt sich dabei mit zunehmendem Gletschereinfluss von einem früheren zu einem späteren Zeitpunkt im Jahr.

## **Sensitive Einzugsgebiete**

### **Clusteranalyse**

Die Clusteranalyse zeigt sowohl für die monatliche und saisonale Auflösung des  $\Delta Q_{\text{Gebiets}}$ , wie auch für beide Szenarioperioden ein nahezu identisches Bild (**Abbildung 9**). Einzig die Klassifikation des saisonalen Signals für die nahe Zukunft unterscheidet sich von den übrigen drei Klassifikationen, bei denen die Untersuchungsgebiete in dieselben Klassen aufgeteilt werden. Dies lässt zwei mögliche Schlüsse zu: Entweder erlaubt die höhere Auflösung des monatlichen  $\Delta Q_{\text{Gebiets}}$  eine genauere Gruppenzuordnung schon in der frühen Szenarioperiode, oder aber die saisonale Auflösung filtert ein Signal im Jahresgang heraus, das bei der monatlichen Auflösung verdeckt bleibt. Da das Resultat des monatlichen  $\Delta Q_{\text{Gebiets}}$  also keine Zusatzinformationen beinhaltet (die monatlichen Resultate sind identisch mit dem saisonalen Resultat der fernen Zukunft), werden die weiterführenden Untersuchungen mit den Clustern auf Basis des saisonalen  $\Delta Q_{\text{Gebiets}}$  durchgeführt.



**Abbildung 9:** Clusterresultate für die nahe und ferne Zukunft (obere bzw. untere Zeile) und unterschiedlich zeitliche Auflösung des  $\Delta_{\text{Gebiet}}$  (linke Spalte monatlich, rechte Spalte saisonal).<sup>1,2</sup>

Eine Tabelle mit der Zuordnung jedes Gebietes zum entsprechenden Cluster in der nahen und fernen Zukunft findet sich im DVD-Anhang (*Gebietsinformationen.xlsx*). **Tabellen 3 und 4** fassen die oben erwähnten Einzugsgebieteigenschaften sowie das  $\Delta_{\text{Gebiet}}$  je Cluster zusammen. Ein wesentliches Clusterkriterium ist der Vergletscherungsgrad eines Gebietes. Zudem ist die mittlere Gebietshöhe eine differenzierende Grösse, die einen deutlichen Zusammenhang mit der mittleren Hangneigung aufweist, was bereits in der Korrelationsanalyse (**Abbildung 6**) erkannt wurde. Kein klares Bild ergibt sich bei der Einzugsgebietsgrösse, die Mittelwerte variieren zwischen den Clustern kaum, wohingegen die Streuung innerhalb der Cluster gross ist. Die erklärende Funktion dieser Variablen ist demnach gering.

<sup>1</sup> Für der Interpretation der räumlichen Darstellung der Clusterresultate muss bedacht werden, dass hier nur die einzelnen Bilanzierungsgebiete farblich dargestellt werden können. So kann z.B. ein flussaufwärts gelegenes Gebiet allein einem Cluster zugeordnet werden, mit dem Unterliegergebiet zusammen aber einem anderen.

<sup>2</sup> Das Gebiet der Kander (Untersuchungsgebiete 209, 210 und 211u) stellt hinsichtlich des  $\Delta_{\text{Gebiet}}$  einen Ausreisser dar. Diese drei Untersuchungsgebiete wurden von der Clusteranalyse ausgenommen, da sie in jeder Clustervariante eine eigene Klasse gebildet haben, was auf Artefakte im interpolierten  $\Delta T$  zurückgeführt werden kann (vgl. Kapitel „Modellläufe mit Klimaszenarien“) und nicht auf charakteristische Gebietseigenschaften. Die gebietsbasierten Untersuchungen zu quantitativen Änderungen des Wasserhaushalts und Änderungen des Hochwasserverhaltens werden für das Gebiet der Kander analog zu den übrigen Gebieten durchgeführt.

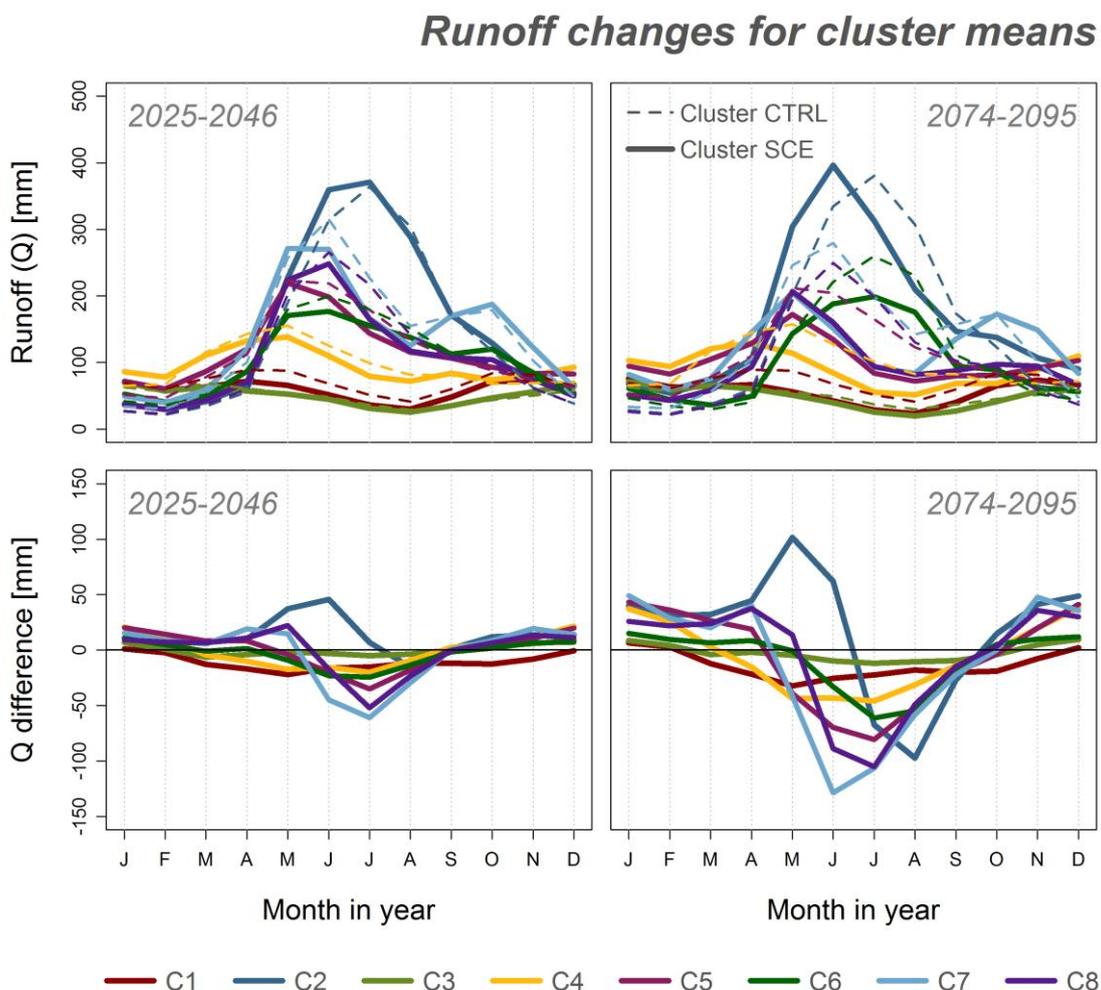
**Tabelle 3:** Je Cluster gemittelte Einzugsgebietseigenschaften (Szenarioperiode 2074-2095). Angegeben ist das Clustermittel (*mean*) sowie die Standardabweichung (*stdv*).

		<i>catch_area</i>	<i>mean_alt</i>	<i>elv_range</i>	<i>mean_slo</i>	<i>gl_ctrl_rel</i>	<i>gl_20</i>	<i>gl_70_l</i>	<i>gl_70_m</i>	<i>gl_70_h</i>
Cluster 1 n = 7	mean	140.61	825.14	1156.43	7.33	---	---	---	---	---
	stdv	61.35	121.16	342.39	4.57	---	---	---	---	---
Cluster 2 n = 29	mean	235.27	2351.25	2806.21	21.03	21.95	19.20	12.79	10.81	8.75
	stdv	188.82	213.18	551.95	2.17	14.19	12.97	10.82	10.07	8.87
Cluster 3 n = 47	mean	184.35	720.64	747.36	5.74	---	---	---	---	---
	stdv	181.11	173.73	386.44	3.14	---	---	---	---	---
Cluster 4 n = 21	mean	310.45	1132.52	1502.62	10.53	---	---	---	---	---
	stdv	372.82	200.05	323.05	3.06	---	---	---	---	---
Cluster 5 n = 19	mean	272.79	1693.80	2305.11	18.76	1.95	1.42	0.42	0.26	0.17
	stdv	176.00	145.76	318.13	2.61	2.34	1.71	0.59	0.45	0.37
Cluster 6 n = 5	mean	360.30	2755.11	3222.80	20.15	34.66	30.08	21.53	18.62	16.05
	stdv	246.11	160.11	415.89	1.41	14.08	13.28	10.32	9.17	8.24
Cluster 7 n = 17	mean	351.69	1851.79	2334.35	20.71	1.19	0.57	0.14	0.06	0.03
	stdv	386.81	266.08	432.95	2.22	1.86	1.22	0.39	0.16	0.07
Cluster 8 n = 41	mean	284.95	2208.24	2099.68	19.26	5.45	4.19	2.24	1.56	1.24
	stdv	328.30	201.61	514.51	2.09	7.14	5.90	4.26	3.46	2.92

**Tabelle 4:** Clustermittelwerte der saisonalen *DeltaT*, *P* und *Q* für die Szenarioperiode 2074-2095. Die Clustermittel basieren auf den *Ensemble Mean*-Werten der einzelnen Clustermitglieder.

		<i>dT_DJF</i>	<i>dT_MAM</i>	<i>dT_JJA</i>	<i>dT_SON</i>	<i>dP_DJF</i>	<i>dP_MAM</i>	<i>dP_JJA</i>	<i>dP_SON</i>	<i>dQ_DJF</i>	<i>dQ_MAM</i>	<i>dQ_JJA</i>	<i>dQ_SON</i>
Cluster 1 n = 7	mean	1.20	1.04	1.35	0.94	0.95	0.88	0.83	0.93	0.98	0.80	0.72	0.84
	stdv	0.07	0.09	0.07	0.07	0.04	0.03	0.05	0.03	0.07	0.02	0.05	0.04
Cluster 2 n = 29	mean	1.23	0.92	1.62	1.08	1.02	0.99	0.96	1.05	1.40	1.20	1.01	1.10
	stdv	0.03	0.05	0.07	0.05	0.02	0.01	0.01	0.01	0.10	0.05	0.09	0.05
Cluster 3 n = 47	mean	1.22	0.93	1.27	0.89	1.05	1.01	0.94	1.08	1.09	0.95	0.90	1.06
	stdv	0.03	0.05	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.03
Cluster 4 n = 21	mean	1.26	1.03	1.30	0.92	1.03	1.03	0.95	1.09	1.27	0.93	0.86	1.10
	stdv	0.01	0.03	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.09	0.05	0.02	0.01
Cluster 5 n = 19	mean	1.20	1.00	1.47	0.98	1.04	1.01	0.94	1.07	1.34	1.04	0.85	1.07
	stdv	0.02	0.02	0.04	0.04	0.02	0.02	0.02	0.01	0.05	0.07	0.04	0.03
Cluster 6 n = 5	mean	1.31	0.99	1.67	1.15	0.99	0.98	0.98	1.02	1.12	1.05	1.00	1.05
	stdv	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.05	0.04	0.01
Cluster 7 n = 17	mean	1.21	1.11	1.63	1.12	0.97	0.97	0.95	1.00	1.30	1.08	0.79	1.06
	stdv	0.04	0.07	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.09	0.09	0.06	0.05
Cluster 8 n = 41	mean	1.18	0.95	1.63	1.12	1.01	1.00	0.98	1.05	1.30	1.17	0.85	1.11
	stdv	0.02	0.04	0.06	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.08	0.07	0.05	0.04

Vergleicht man den mittleren Jahresgang des monatlichen Abflusses (**Abbildung 10**), so zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Clustern wie auch zwischen den Szenarioperioden: Das Änderungssignal ist in der fernen Zukunft stärker ausgeprägt, in den Clustern mit mässig bis stark vergletscherten Einzugsgebieten (Cluster 2, 6 und 8, vgl. **Tabelle 3**) ist zudem eine Verschiebung des jährlichen Abflussmaximums zu einem früheren Zeitpunkt im Jahr erkennbar.



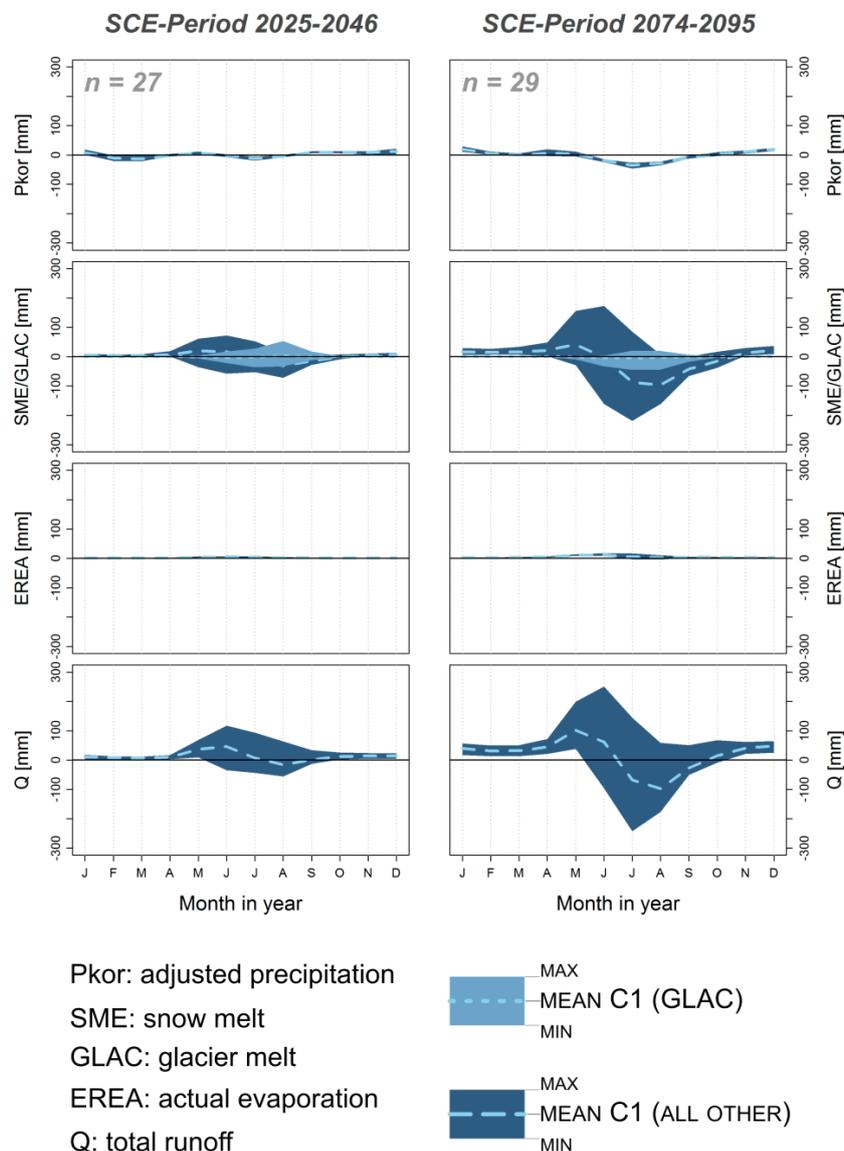
**Abbildung 10:** Vergleich des mittleren Jahresganges monatlicher Abflusssummen (obere Zeile), bzw. Abflussänderungen (untere Zeile) der Clustermittelwerte. Die Clustermittel basieren auf den *Ensemble Mean*-Werten der einzelnen Clustermember. Links: nahe Zukunft; rechts: ferne Zukunft.

### Änderungen einzelner Wasserhaushaltsgrössen

Für jeden *Sensitivitätstyp* wurde der mittlere Jahresgang der Wasserhaushaltskomponenten Niederschlag (interpolierter und bilanzkorrigierter Gebietsniederschlag, Pkor), aktuelle Verdunstung (EREA), Schnee- (SME) und gegebenenfalls Gletscherschmelze (GLAC) sowie der Gesamtabfluss (Q) untersucht. Beispielhaft ist in **Abbildung 11** das Resultat für Cluster 2 dargestellt. Der Niederschlag verändert sich in der nahen Zukunft (linke Spalte) kaum, in der fernen Zukunft ist eine deutliche Abnahme erkennbar. Die enge Umhüllende weist darauf hin,

dass die Werte innerhalb des Clusters kaum schwanken. Die Änderungen der Schnee- und Gletscherschmelze weisen einen ausgeprägteren Jahresgang auf als der Niederschlag. In der fernen Zukunft übertrifft die Änderung der Schneeschmelze diejenige der Gletscherschmelze deutlich, was auf den geringeren Abflussbeitrag der Gletscherschmelze aufgrund der kleineren Gletscherfläche zurückzuführen ist. Hier wird ersichtlich, dass der für die ferne Zukunft projizierte zunehmende Abfluss im Frühsommer (Abbildung 10) auf den Schneespeicher zurückzuführen ist. Der Einfluss der Verdunstung ist in diesem Cluster vergleichsweise gering. Im Anhang sind analoge Darstellungen für die übrigen Sensitivitätstypen zu finden (A 2 bis A 8). Der starke Einfluss des Schneespeichers, bzw. der Schneeschmelze auf den Abfluss zeigt sich nicht nur in diesem Cluster, sondern generell für die meisten hochgelegenen Gebiete (vgl. DVD- Anhang, ..\Abbildungen\Wasserhaushalt).

## Absolute Differences Cluster 2



**Abbildung 11:** Veränderung einzelner Wasserhaushaltskomponenten in der nahen Zukunft (2025-2046, linke Spalte) und fernen Zukunft (2074-2095, rechte Spalte) am Beispiel von Cluster 2.

**Tabelle 5:** Änderung der Jahressummen einzelner Wasserhaushaltskomponenten.

		Pkor [mm]		PSME [mm]		GLAC [mm]		EREA [mm]		Q [mm]	
		2025-2046	2074-2095	2025-2046	2074-2095	2025-2046	2074-2095	2025-2046	2074-2095	2025-2046	2074-2095
Cluster 1 n = 7/7	mean	-138	-162	-52	-91	0	0	-8	8	-129	-168
	stdv	63	87	16	31	0	0	19	27	56	76
Cluster 2 n = 27/29	mean	12	-22	13	-98	-3	-12	24	57	151	225
	stdv	16	11	72	193	42	41	3	9	80	212
Cluster 3 n = 46/47	mean	20	7	-33	-64	0	0	19	35	2	-28
	stdv	16	32	15	34	0	0	6	15	16	36
Cluster 4 n = 23/21	mean	29	8	-87	-207	0	0	32	77	-3	-68
	stdv	12	17	24	66	2	0	5	10	13	21
Cluster 5 n = 14/19	mean	23	-19	-91	-252	5	-3	26	64	10	-79
	stdv	23	37	20	46	8	8	2	7	24	35
Cluster 6 n = 13/5	mean	-45	-52	-111	-213	15	-27	12	22	-40	-100
	stdv	50	7	46	26	30	53	7	3	67	57
Cluster 7 n = 12/17	mean	-15	-99	-156	-346	-1	-3	15	33	-28	-136
	stdv	8	34	26	82	4	4	4	9	5	41
Cluster 8 n = 44/41	mean	10	-11	-96	-246	-1	-11	21	52	-5	-65
	stdv	11	16	24	59	14	19	3	8	23	42

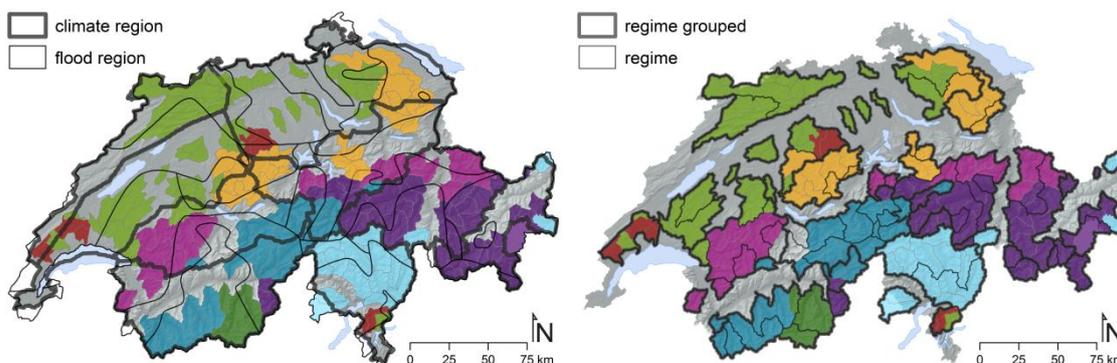
Vergleicht man die absoluten Änderungen der Jahressummen der einzelnen Wasserhaushaltsgrößen in **Tabelle 5**, so fällt auf, dass in Cluster 2 in der fernen Zukunft, trotz geringfügig abnehmender Niederschläge, abnehmender Schnee- und Gletscherschmelze sowie zunehmender Verdunstung, der Jahresabfluss zunimmt, was zunächst fragwürdig erscheint. Im Zusammenhang mit **Abbildung 11** erkennt man jedoch, dass die Nettozunahme des Abflusses in den Herbst und Wintermonaten generiert wird, was auf einen grösseren Anteil flüssigen Niederschlags gegenüber der Kontrollperiode zurückzuführen ist. Da die Gebiete sehr hoch gelegen sind, kann sich dennoch ein genügend grosser Schneespeicher aufbauen, der im Vergleich zur Kontrollperiode früher abgebaut wird (früheres Abflussmaximum), so dass im Sommer gegenüber der Kontrollperiode ein Abflussdefizit entsteht.

## Vergleich von Cluster und Klassifikationen

Um zu überprüfen, ob bestehende Klassifikationen, wie etwa die Einteilung des Alpenraumes in Klimaregionen (Schwarb et al. 2001), mit den Resultaten der Clusteranalyse übereinstimmen oder zumindest Überschneidungen aufweisen, wurden die Klassifikationen überlagert (**Abbildung 12**). Die Regimetypen nach Weingartner & Aschwanden (1992) wurden einmal mit allen 16 Typen dargestellt (rechte Hälfte, *regime*) und einmal gruppiert nach glazialen, nivalen, pluvialen und Südalpinen Einzugsgebieten (*regime grouped*).

Bezüglich der Hochwasserregionen lässt sich optisch kein klares Muster erkennen. Tendenziell stimmen die Klimaregionen etwas besser mit der Clusteranalyse überein. Die Regimetypklassifikation mit allen 16 Typen ist zu hoch aufgelöst, als dass man ein

allgemeineres Muster erkennen könnte; die gruppierten Regimetypern stimmen besser mit der Clusteranalyse überein. Eine detaillierte Analyse des Zusammenhangs zwischen verschiedenen statischen Einzugsgebietseigenschaften (vgl. **Tabelle 2**) und der Gruppierung der Einzugsgebiete folgt und wird in einer wissenschaftlichen Publikation veröffentlicht.



**Abbildung 12:** Vergleich der Klima- und Hochwasserregionen sowie der Regimetypern mit dem Ergebnis der Clusteranalyse (Periode 2074-2095).

## Änderung der Hochwasserkenngrossen

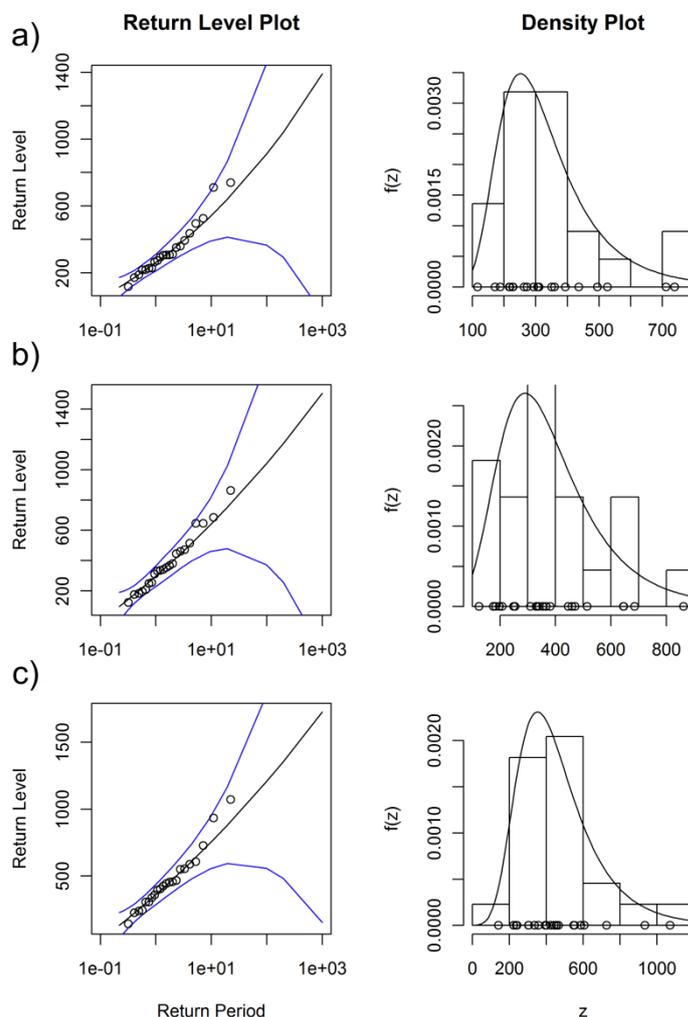
**Tabelle 6** und **Abbildung 13** zeigen beispielhaft für das Gebiet 105u (Vorderrhein bis Illanz) den Datensatz, der für die Analyse der Hochwasserkenngrossen für jedes Gebiet zur Verfügung steht (siehe DVD-Anhang, ..\Daten\Hochwasser und ..\Abbildungen\Hochwasser). Die Jahreshochwasser ( $m^3 s^{-1}$ ) wurden aus den stündlichen Abflussimulationen ermittelt. Verglichen mit der BAFU-Hochwasserstatistik für den Pegel 875, Vorderrhein – Illanz, dessen Einzugsgebiet mit dem Gebiet 105u übereinstimmt, zeigt sich, dass die statistischen Kenngrossen der Kontrollperiode nur geringfügig von den auf Abflussmessungen basierenden Grössen des BAFU abweichen. Auch die Hochwassermodellierung und deren Projektionen zeigen also eine angemessene Güte.

**Tabelle 6:** Jahreshochwasser stündlicher Simulationen, Gebiet 105u, Vorderrhein bis Illanz.

CTRL/SCE	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	Max	Min	Mean	Median	Stdev	VarC
CTRL	218.35	495.03	305.94	711.56	526.57	116.86	171.93	738.9	293.56	350.29	227.65	306.26	307.15	264.05	393.96	359.25	272.47	310.43	436.68	216.88	188.01	228.77	738.90	116.86	338.21	306.10	160.58	0.47
CNRM_ARPEGE_ALADIN	251.55	495.79	268.9	728.08	583.06	162.4	198.75	773.63	287.86	416.54	235.13	316.28	384.46	281.76	404.19	464.41	300.05	381.16	730.74	167.75	149	219.13	773.63	149.00	372.76	308.16	188.30	0.51
DMI_ECHAM5_HIRHAM	346.32	540.84	253.43	635.45	654.93	105.38	216.49	900.53	366.61	458.85	334.62	408.12	339.28	315.89	509.99	448.66	337.88	384.11	567.91	194.83	168.59	178.91	900.53	105.38	393.98	356.47	188.45	0.48
ETHZ_HadCM3Q0_CLM	394.8	430.82	258.25	570.7	790.3	113.81	191.65	912.49	255.82	564.79	297.47	352.1	453.72	258.78	423.39	467.02	387.97	368.92	933.09	249.03	250.81	131.42	933.09	113.81	411.69	378.45	226.63	0.55
HC_HadCM3Q0_HadRM3Q0	359.81	420.73	237.93	489.7	673.93	132.11	283.19	874.8	272.96	481.2	313.96	351.02	327.76	202.06	431.92	414.93	350.55	321.43	720.92	168.8	168.57	129.24	874.80	129.24	369.43	339.15	191.71	0.52
ICTP_ECHAM_REGCM	363.55	539.62	236.28	682.47	674.15	112.97	182.54	916.14	384.2	486.23	341.53	420.56	355.96	264.63	509.8	463.08	365.99	373.64	604.54	199.44	166.02	223.24	916.14	112.97	403.03	369.81	197.14	0.49
MPI_ECHAM_RACMO	356.69	496.39	222	589.43	662.58	118.98	240.73	894.31	350.12	472.15	338.9	409.51	395.29	245.51	503.52	480.18	336.71	375.99	575.63	180.66	170.4	175.66	894.31	118.98	390.52	366.34	186.89	0.48
KNMI_ECHAM_REMO	401.73	583.68	271.39	665.34	706.3	145.44	227.23	957.2	432.39	502.34	385.85	455.19	338.5	237	566.91	446.25	369.15	327.72	677.64	157.17	167.48	225.26	957.20	145.44	420.33	393.79	208.45	0.50
SMHI_ECHAM_RCA	174.79	498.49	281.13	778.65	465.05	122.44	187.42	669.96	281.64	315.62	182.65	286.56	389.84	292.57	347.84	428.65	226.05	351.65	547.75	200.67	173.43	256.42	778.65	122.44	339.06	289.56	168.76	0.50
SMHI_HadCM3Q0_RCA	338.47	531.66	223.09	598.06	663.72	109.14	177.82	872.22	329.66	469.23	312.03	381.21	331.24	217.09	478.53	430.09	329.95	330.81	777.47	156.51	160.06	173.09	872.22	109.14	381.42	331.02	206.35	0.54
CNRM_ARPEGE_ALADIN	404.99	468.62	450.7	530.36	531.18	222.45	665.61	734.97	293.43	443.48	270.52	325.81	608.06	233.84	408.92	445.35	207.73	325.28	743.48	144.48	132.69	141.55	743.48	132.69	396.98	406.96	186.22	0.47
DMI_ECHAM5_HIRHAM	522.95	554.78	204.96	574.72	767.21	111.46	618.3	976.43	412.42	581.37	396.58	442.45	363.74	270.99	535.32	453.34	356.29	350.58	1007.13	280.48	210.8	160.71	1007.13	111.46	461.41	427.44	236.65	0.51
ETHZ_HadCM3Q0_CLM	433.95	404.4	566.06	569.58	862.77	294.98	519.61	859.41	389.12	625.81	283.59	338.91	758.52	292.16	364.11	492.08	616.53	376.84	1327.76	511.19	294.28	95.81	1327.76	95.81	512.61	463.01	264.72	0.52
HC_HadCM3Q0_HadRM3Q0	407.03	247.37	360.53	605.21	661.63	195.96	694.17	746.4	273.28	504.59	212.31	383.23	590.44	265.77	271.49	504.39	461.44	386.29	1117.81	341.89	182.53	95.75	1117.81	95.75	430.43	384.76	234.65	0.55
ICTP_ECHAM_REGCM	474.61	545.26	431.19	541.24	733.62	248.95	553.86	923.27	388.31	572.91	391.85	434.7	569.3	197.82	528.37	419.47	349.27	299.02	1028.89	266.67	206.1	174.35	1028.89	174.35	467.23	432.94	219.53	0.47
KNMI_ECHAM_REMO	575.77	512.18	399.03	519.04	881.22	191.94	618.71	1097.9	432.5	673.27	492.35	539.58	667.05	229.21	628.29	488.73	433.48	239.78	1013.12	300.43	237.48	135.61	1097.88	135.61	513.94	502.26	254.01	0.49
MPI_ECHAM_REMO	603.77	573.49	531.64	498.85	883.52	328.62	795.1	1051.2	429.13	656.18	469.56	498.95	574.99	203.71	606.63	446.68	428.03	237.18	1157.64	344.78	261.48	138	1157.64	138.00	532.69	498.90	259.83	0.49
SMHI_ECHAM_RCA	291.74	460.62	451.23	634.38	447.08	217.41	305.66	658.47	255.23	343.86	243.25	273.41	627	323.63	337.32	479.39	173.89	368.94	797.19	141.82	141.34	185.12	797.19	141.34	370.82	330.48	180.92	0.49
SMHI_HadCM3Q0_RCA	418.03	428.88	414.11	402.41	694.5	219.26	667.04	1127.5	293.86	533.52	315.89	367.37	577.93	180.18	439.6	317.98	396.24	187.75	1134.79	275.94	283.11	112.9	1134.79	112.90	444.94	399.33	267.16	0.60
SMHI_HadCM3Q0_RCA	418.79	472.92	437.12	616.01	805.21	337	629.8	1166.8	412.63	594.4	295.87	342.67	576.98	223.37	418.48	380.94	596.24	266.59	1378.53	444.35	281.73	175.37	1378.53	175.37	512.35	427.96	291.18	0.57
ENSEMBLE MEAN 2025-2046	334.74	514.74	249.02	645.12	646.59	124.40	207.28	861.82	340.78	459.98	310.01	380.76	366.29	254.16	471.05	445.95	330.72	353.92	685.72	184.17	176.08	196.88	874.75	122.78	388.19	349.16	196.21	0.51
ENSEMBLE MEAN 2074-2095	455.16	466.85	424.66	549.18	726.79	236.80	606.59	934.23	357.99	552.94	337.18	394.71	587.40	242.07	453.85	442.83	401.91	303.82	1070.63	305.20	223.15	141.52	1079.11	131.33	464.34	427.40	239.49	0.52

An die extrahierten Jahreshochwasser wurden je CTRL- und SCE-Periode eine *Generalized Extreme Value (GEV)*- Verteilungen angepasst (**Abbildung 13**, linke Spalte). Beim Vergleich der drei Abbildungen ist der unterschiedliche Massstab der Skalen zu beachten. Für das Beispielgebiet wird eine grössere Abflussspitze bei gleicher Jährlichkeit projiziert: ein zehnjähriges Hochwasser, das in der Kontrollperiode einem Abfluss von ca.  $550 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  entspricht, hat in der fernen Zukunft einen Abflusswert von etwa  $700 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Die Änderungen der Hochwasserverhältnisse wird in einer detaillierten Studie in einem wissenschaftlichen Artikel veröffentlicht.

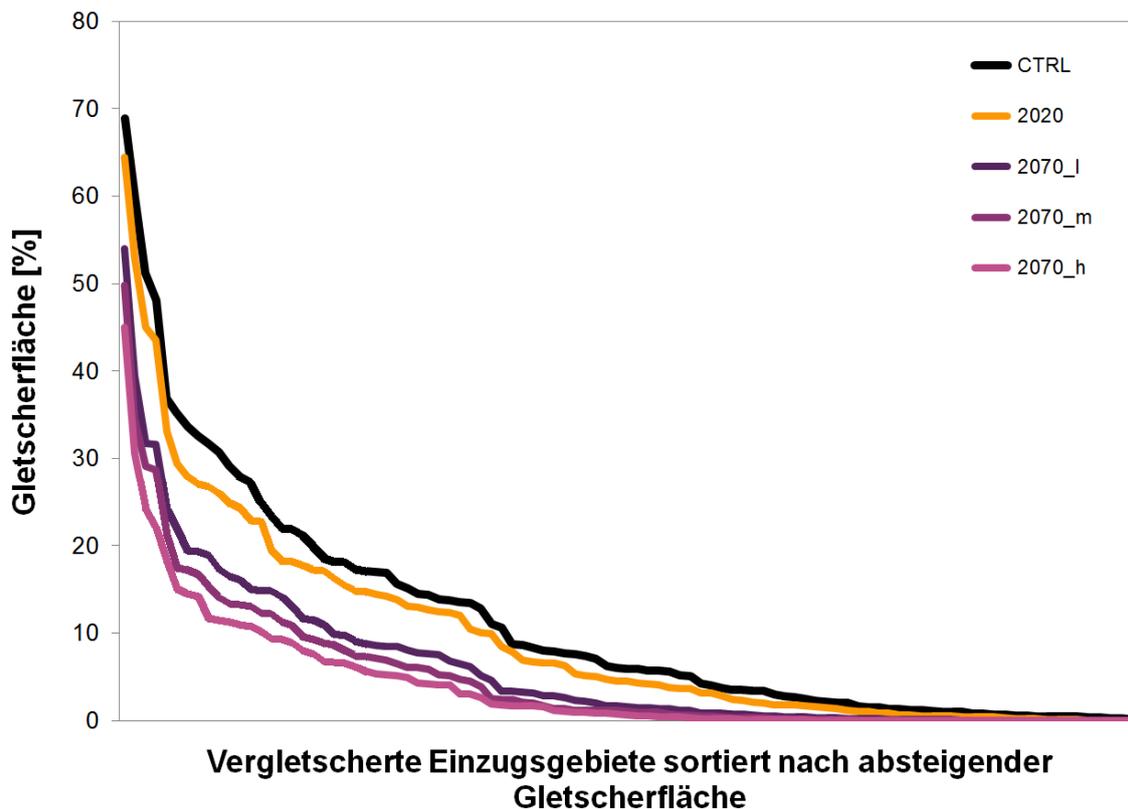
### Gebiet 105u, Vorderrhein bis Ilanz



**Abbildung 13:** Jahreshochwasser (*Ensemble Mean*) und angepasste *Generalized Extreme Value (GEV)*-Verteilung (links), sowie *Kernel*-Verteilung der Jahreshochwasser („Density Plot“, rechts) des Gebiets 105u (Vorderrhein bis Ilanz); a) Kontrollperiode (1984-2005), b) nahe Zukunft (2025-2046), c) ferne Zukunft (2074-2095). Zu beachten sind die unterschiedlichen Skalierungen der Achsen.

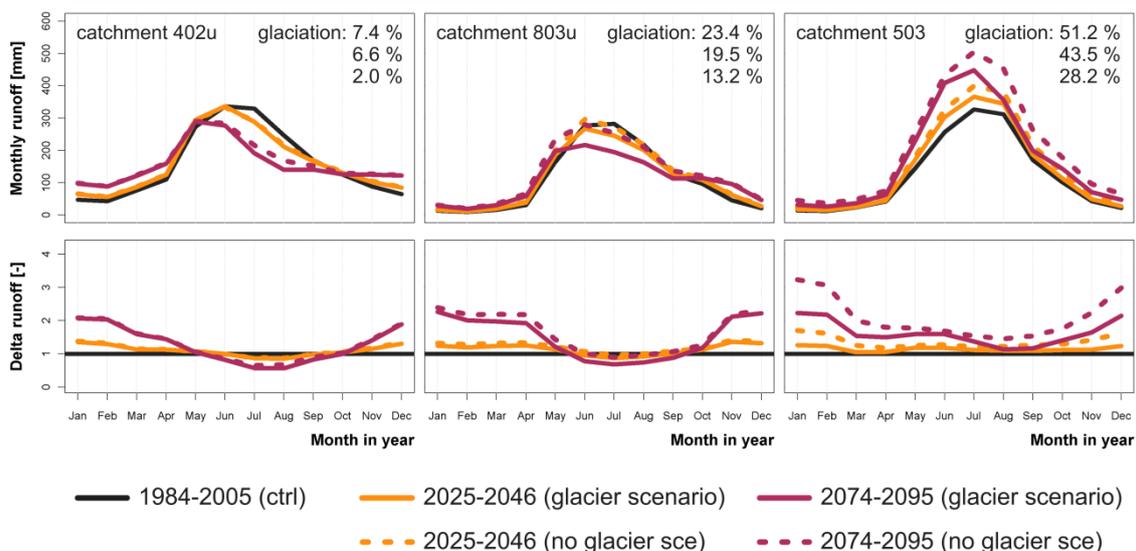
## Einfluss der Landnutzung

Der Rückgang der Gletscherflächen in den 97 vergletscherten Untersuchungsgebieten und für die hier verwendeten Gletscherstände für 2020 und 2070 ist in dargestellt **Abbildung 14**. Für die späte Periode gibt es, wie bereits erwähnt, drei verschiedene Gletscherstände je nach Temperaturanstieg. Die Abbildung veranschaulicht, dass für ca. die Hälfte der untersuchten Gebiete die Gletscherfläche in der fernen Zukunft gegen Null geht, während die stark vergletscherten Gebiete bei diesen Rückgangsszenarien auch in Zukunft noch einen hohen Vergletscherungsgrad aufweisen.



**Abbildung 14:** Rückgang der Gletscherfläche in allen vergletscherten Untersuchungsgebieten.

Beispielhaft für unterschiedliche Vergletscherungsgrade sind in **Abbildung 15** die *Ensemble Means* für die nahe und ferne Zukunft dargestellt, und zwar sowohl die Modellierungsergebnisse mit den integrierten Gletscherrückzugsszenarien, als auch die Simulationen mit Szenarioklimainput aber den Gletscherständen von 1980. In diesen Beispielgebieten würde der projizierte Jahresabfluss für die ferne Zukunft bis zu 20 % oder rund 250 mm überschätzt werden (Gebiet 803u), wenn keine Gletscherszenarien in die Modellierung integriert werden. Im stark vergletscherten Gebiet 503, das auch in der fernen Zukunft noch zu 28 % vergletschert ist, ist der relative Fehler weniger gross, da der Gletscherabfluss auch dann nicht begrenzt ist. Für das Gebiet 402u liegt der Fehler bei 4 % Überschätzung des Jahresabflusses und befindet sich damit im Ungenauigkeitsbereich der Modellierung.



**Abbildung 15:** Einfluss der Gletscherfläche auf den projizierten Abfluss bei unterschiedlichem Vergletscherungsgrad. Die drei Angaben zur relativen Vergletscherung beziehen sich auf die Kontrollperiode, die nahe und die ferne Zukunft (in dieser Reihenfolge); für die ferne Zukunft sind nicht die drei Werte gemäss der unterschiedlichen Rückgangsszenarien dargestellt, sondern der Mittelwert der drei Szenarien.

## Fazit

Für die nahe Zukunft (2025-2046) wird für die Hälfte der Gebiete (*Ensemble Mean*) eine Abnahme, für die andere Hälfte eine Zunahme der Jahresabflusssummen projiziert; im Mittel beträgt die Abnahme -33 mm, sie schwankt jedoch zwischen 0 und -200 mm. Für die ferne Zukunft (2074-2095) weisen  $\frac{4}{5}$  der 189 untersuchten Einzugsgebiete einen abnehmenden Jahresabfluss auf, im Mittel -73 mm. Hier schwanken die Werte zwischen 0 und -300 mm. Allen Gebieten gemein ist die Abnahme des Sommerabflusses aufgrund der abnehmenden Niederschläge in dieser Jahreszeit und eine mehr oder weniger starke Zunahme des Abflusses im Herbst und Winter als Folge vermehrten flüssigen Niederschlags.

Das Ausmass der Änderung ist letztlich spezifisch für jedes Gebiet. Dennoch konnten die Untersuchungsgebiete acht sogenannten *Sensivitätstypen* zugeordnet werden. Jeder Typ weist einen charakteristischen Jahresgang der Änderung einzelner Wasserhaushaltskomponenten auf. So gibt es *Sensivitätstypen*, deren Abflussprojektionen massgeblich durch veränderte Schneeakkumulations- und Schmelzprozesse (zeitliche Verschiebung der Schmelze) bestimmt werden. Hier ist die mittlere Einzugsgebietshöhe ein massgebliches Kriterium für die projizierte Abflussänderung. Zwei Typen, in denen vor allem nordalpine Voralpengebiete vereint sind, wird entscheidend durch die in der fernen Zukunft fehlende Schneeakkumulation und -schmelze geprägt, der abnehmende Sommerniederschlag verstärkt das Signal des abnehmenden Sommerabflusses zusätzlich.

Allgemein betrachtet ist die Einzugsgebietshöhe also eine Grösse, die die Gebietsantwort auf ein Klimaänderungssignal massgeblich bestimmt. Die geographische Lage (Nord vs. Süd, West vs. Ost) ist ein weiterer Faktor, der unterschiedliche Abflussreaktionen beeinflusst.

Die Analyse der Hochwasserverhältnisse zeigte eine Tendenz hin zu höheren Abflussspitzen, besonders in der fernen Zukunft. Am Beispiel des Gebiets 105u (Vorderrhein) konnte beobachtet werden, dass ein zehnjähriges Ereignis in der Kontrollperiode einem Abfluss von ca.  $550 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  entspricht, in der fernen Zukunft steigt der Wert für dieses Ereignis auf etwa  $700 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

Hinsichtlich der Gletscheränderung zeigten die Untersuchungsgebiete eine deutliche Inputsensitivität, die erwartungsgemäss vom Vergletscherungsgrad des Gebiets abhängig ist. Im Einzelfall würde der projizierte Abfluss in stark vergletscherten Gebieten (> 30 % Vergletscherung in der Kontrollperiode) um rund 20 % überschätzt werden, bis hin zur Projektion einer Zunahme der Sommerabflüsse anstelle eine Abnahme. In gering vergletscherten Gebieten (< 5 % Vergletscherung in der Kontrollperiode) ist dieser Effekt dahingegen zu vernachlässigen.

## Veröffentlichungen

Das Modul „Klimaänderung und Wasserhaushalt in sensitiven Bilanzierungsgebieten“ wurde bereits in mehreren Publikation vorgestellt:

1. Köplin, N., Viviroli, D., Schädler, B. & Weingartner, R. (2010): How does climate change affect mesoscale catchments in Switzerland? – a framework for a comprehensive assessment. *Adv. Geosci.*, 8, 1–9, doi:10.5194/adgeo-8-1-2010. (<http://www.adv-geosci.net/27/111/2010/adgeo-27-111-2010.pdf>)
2. Köplin, N., Viviroli, D., Schädler, B. & Weingartner, R. (2010): Klimasensitivität mesoskaliger Einzugsgebiete im Schweizer Alpenraum. *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, Heft 29.10.
3. Köplin, N., Schädler, B., Viviroli, D. & Weingartner, R. (in review): A method to quantify hydrological change for mesoscale catchments in Switzerland. In: *Predictions in Ungauged Basins: Putting PUB into Practice*, eds.: John Pomeroy, Chris Spence, Paul Whitfield.

## Danksagung

Die Autoren möchten sich beim Bundesamt für Umwelt (BAFU) für den Auftrag und die Finanzierung des Moduls bedanken, das als Dissertationsprojekt von Nina Köplin am Geographischen Institut der Universität Bern (GIUB) durchgeführt wurde. Weiterhin danken wir den Projektpartnern im CCHydro, speziell dem Institute für Atmosphären- und Klimawissenschaft (IAC) für die Bereitstellung der Klimaszenarien sowie dem Geographischen Institut der Universität Zürich (GIUZ) für die Berechnung der flächendeckenden

Gletscherszenarien. Für die Bereitstellung umfangreicher Mess- und Flächendaten danken wir dem BAFU, dem Bundesamt für Meteorologie (MeteoSchweiz), sowie dem Bundesamt für Statistik (BFS).

## Literatur

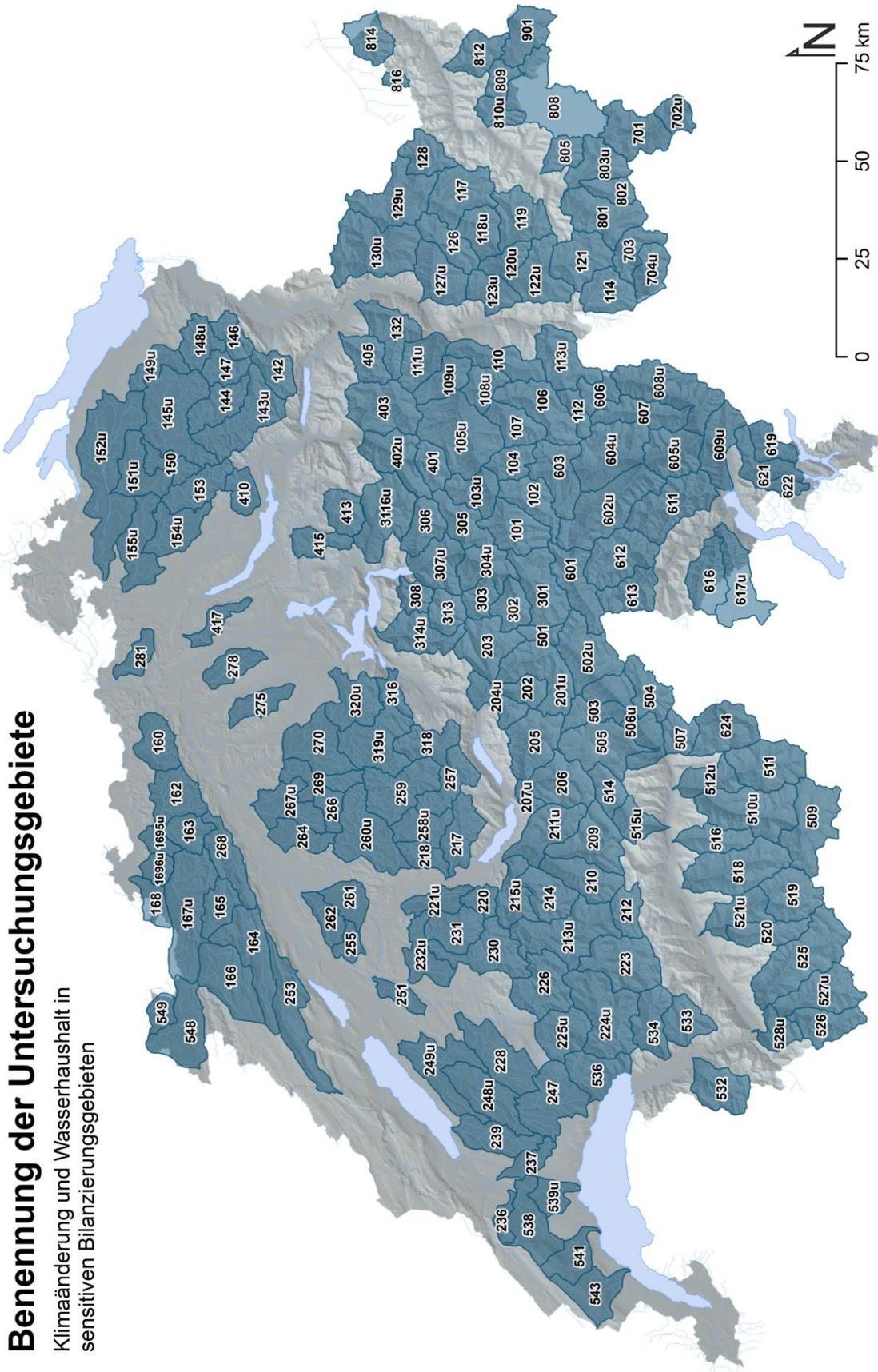
- Bosshard, T., Kotlarski, S., Ewen, T. & Schär, C. (2011): Spectral representation of the annual cycle in the climate change signal. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 2777–2788, doi:10.5194/hess-15-2777-2011.
- CH2011 (2011): Swiss Climate Change Scenarios CH2011, published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, Zurich, Switzerland, 88 pp. ISBN: 978-3-033-03065-7.
- Felder, G. (2011): Sensitivitätsanalyse des hydrologischen Modells PREVAH bezüglich der Landnutzung. Masterarbeit der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern. *Publikationen Gewässerkunde* 489. Bern Geographisches Institut der Universität Bern.
- Margot, A., Schädler, B., Sigg, R. and Weingartner, R. (1992): Beeinflussung der Fliessgewässer durch Kraftwerke ( $\geq 300$  kW) und Seeregulierungen. In: *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel 5.3, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, CH.
- Leyer, I. & Wesche, K. (2008): *Multivariate Statistik in der Ökologie. Eine Einführung*. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, 221 S., DOI 10.1007/b137219.
- Lustenberger, B. (2012): Einfluss der Änderung von Wald- und Gletscherflächen auf die Hydrologie der Schweiz. Was kann man aus der Vergangenheit lernen? Masterarbeit der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern.
- Schädler, B. & Weingartner, R. (1992): Natürliche Abflüsse 1961-1980. In: *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel 5.4, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, CH.
- Schädler, B. & Weingartner, R. (2001): Komponenten des natürlichen Wasserhaushaltes 1961–1990. In: *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel 6.3, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, CH.
- Schwarb, M., Daly, C., Frei, C., Schär, C. (2001a): Mittlere jährliche Niederschlagshöhen im europäischen Alpenraum 1971-1990. In: *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel 2.6, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, CH.
- Schwarb, M., Daly, C., Frei, C., Schär, C. (2001b): Mittlere saisonale Niederschlagshöhen im europäischen Alpenraum 1971-1990. In: *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel 2.7, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, CH.
- SGHL & CHy (2011): Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung – Synthesebericht. Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie (SGHL) und Hydrologische Kommission (CHy) (Hrsg.), *Beiträge zur Hydrologie der Schweiz*, No. 38, 28 S., Bern.
- Viviroli, D., Zappa, M., Gurtz, J. & Weingartner, R. (2009a): An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing tools. *Environ. Modell. Softw.*, 24(10), 1209–1222.
- Viviroli, D., Zappa, M., Schwanbeck, J., Gurtz, J. & Weingartner, R. (2009b): Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland – Part I: Modelling framework and calibration results. *J. Hydrol.*, 377, 191–207.
- Viviroli, D., Mittelbach, H., Gurtz, J. and Weingartner, R. (2009c): Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland – Part II: Parameter regionalisation and flood estimation results, *J. Hydrol.*, 377, 208–225.

- Viviroli, Daniel; Weingartner, Rolf (2011): Umfassende hochwasserhydrologische Beurteilung ungemessener mesoskaliger Einzugsgebiete im schweizerischen Rheineinzugsgebiet durch prozessorientierte Modellierung. *Hydrol. Wasserbewirts.*, 55, 258–272.
- Volken D. (2010): CCHydro – Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserressourcen und die Gewässer in der Schweiz, *Hydrol. Wasserbewirts.*, 54, 143-146.
- Weingartner, R. & Aschwanden, H. (1992): Abflussregimes als Grundlage zur Abschätzung von Mittelwerten des Abflusses. In: *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel 5.2, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, CH.
- Weingartner, R. (1999): Regionalhydrologische Analysen – Grundlagen und Anwendungen. Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie (SGHL) und Hydrologische Kommission (CHy) (Hrsg.), *Beiträge zur Hydrologie der Schweiz*, No. 37, 28 S., Bern.



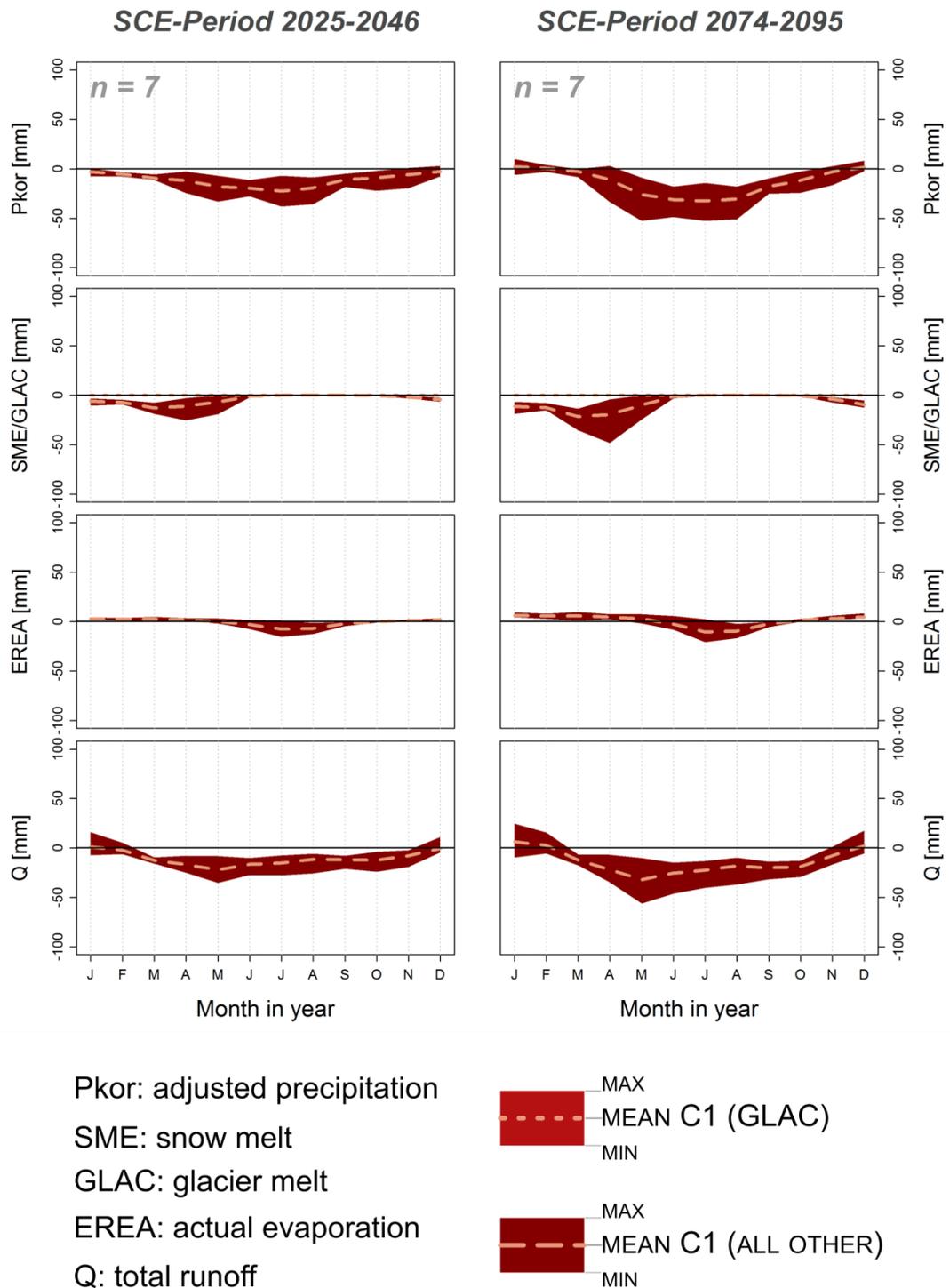
# Anhang

<b>A 1:</b> ÜBERSICHT ÜBER DIE UNTERSUCHUNGSGEBIETE INKLUSIVE EINZUGSGEBIETSNUMMER. ....	II
<b>A 2:</b> ABSOLUTE ÄNDERUNG EINZELNER WASSERHAUSHALTSGRÖSSEN, CLUSTER 1. ....	III
<b>A 3:</b> ABSOLUTE ÄNDERUNG EINZELNER WASSERHAUSHALTSGRÖSSEN, CLUSTER 3. ....	IV
<b>A 4:</b> ABSOLUTE ÄNDERUNG EINZELNER WASSERHAUSHALTSGRÖSSEN, CLUSTER 4. ....	V
<b>A 5:</b> ABSOLUTE ÄNDERUNG EINZELNER WASSERHAUSHALTSGRÖSSEN, CLUSTER 5. ....	VI
<b>A 6:</b> ABSOLUTE ÄNDERUNG EINZELNER WASSERHAUSHALTSGRÖSSEN, CLUSTER 6. ....	VII
<b>A 7:</b> ABSOLUTE ÄNDERUNG EINZELNER WASSERHAUSHALTSGRÖSSEN, CLUSTER 7. ....	VIII
<b>A 8:</b> ABSOLUTE ÄNDERUNG EINZELNER WASSERHAUSHALTSGRÖSSEN, CLUSTER 8. ....	IX



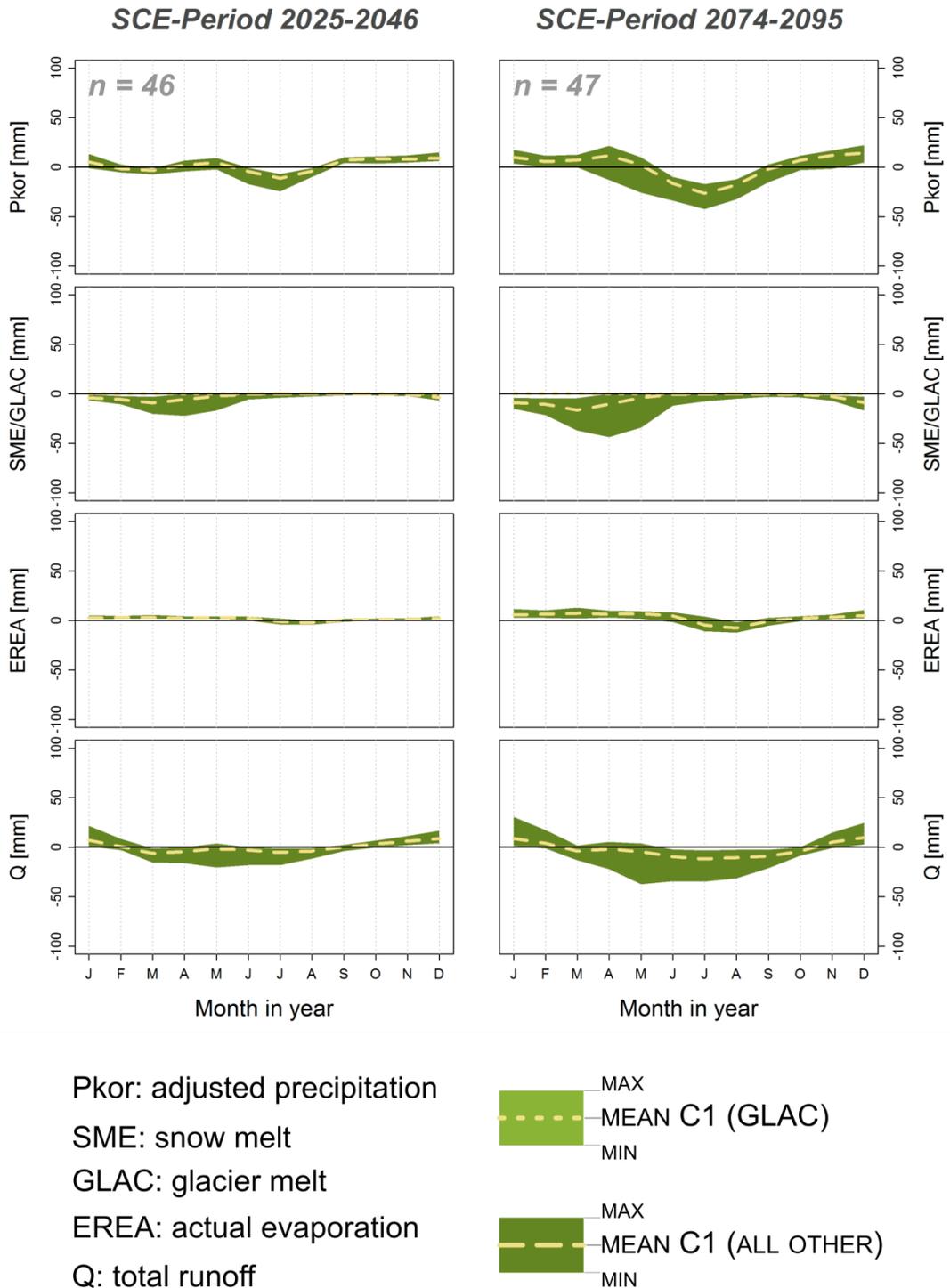
A 1: Übersicht über die Untersuchungsgebiete inklusive Einzugsgebietsnummer.

# Absolute Differences Cluster 1



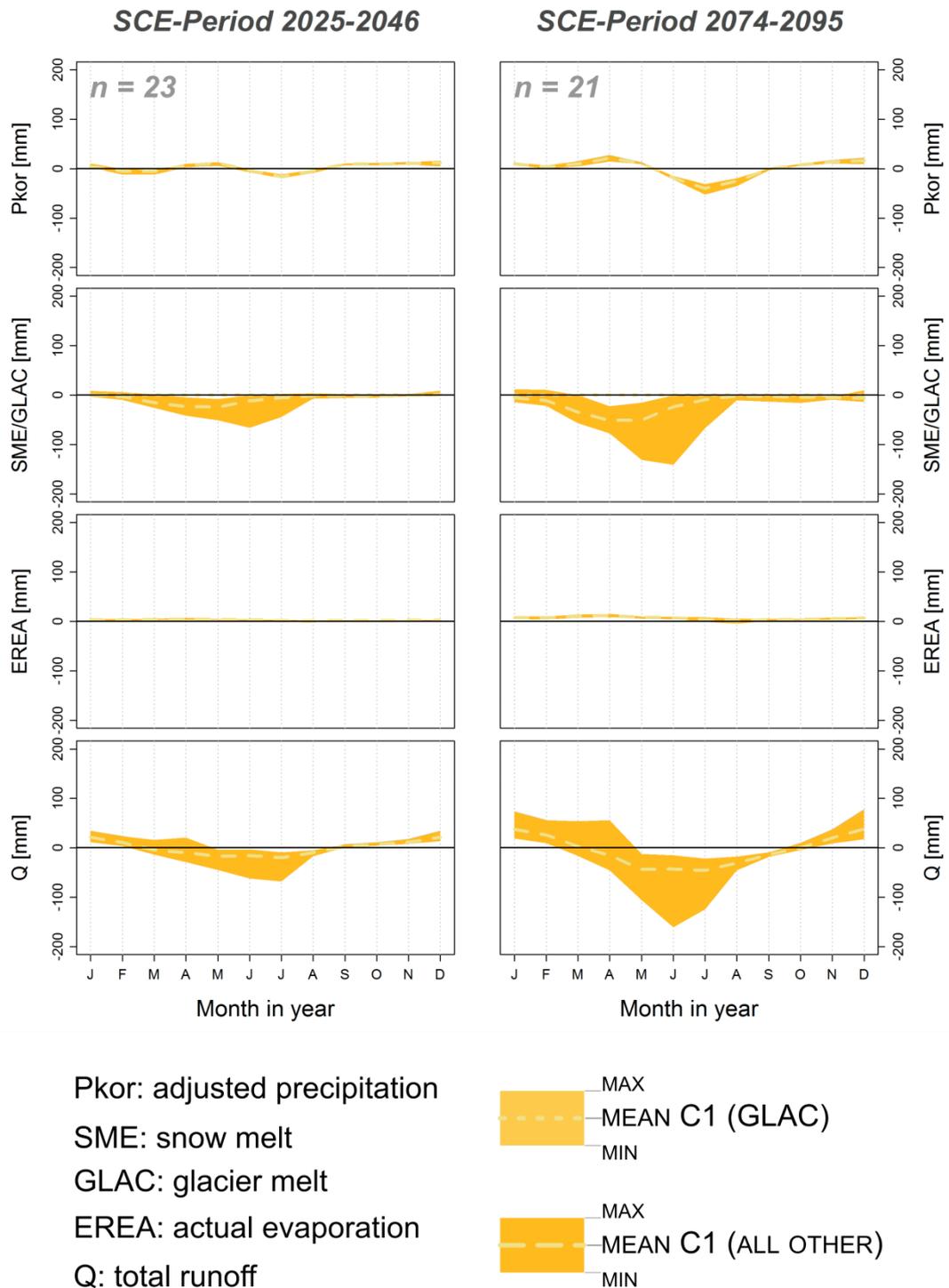
A 2: Absolute Änderung einzelner Wasserhaushaltsgrößen in der nahen und fernen Zukunft, Cluster 1.

# Absolute Differences Cluster 3



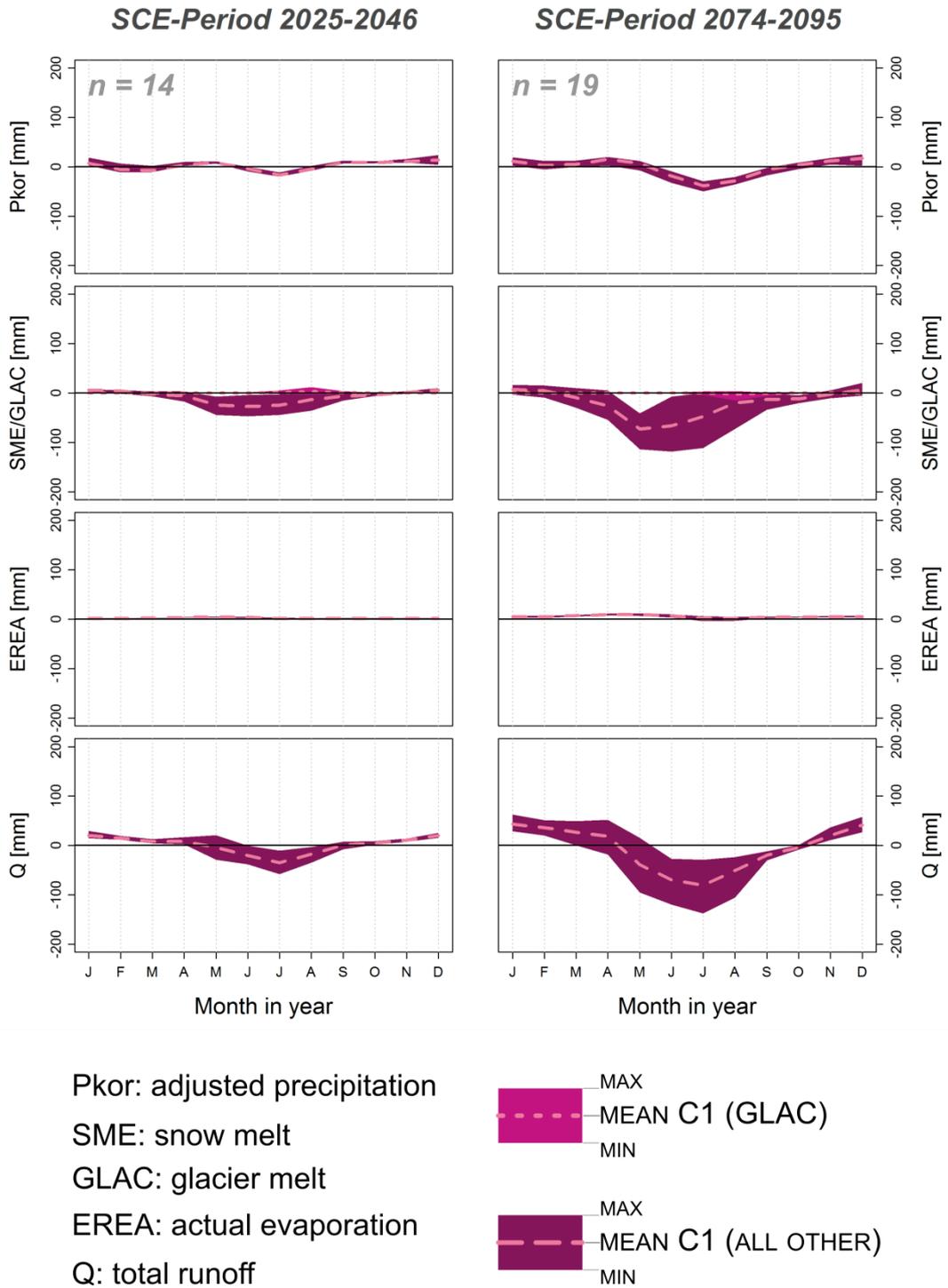
A 3: Absolute Änderung einzelner Wasserhaushaltsgrößen in der nahen und fernen Zukunft, Cluster 3.

## Absolute Differences Cluster 4



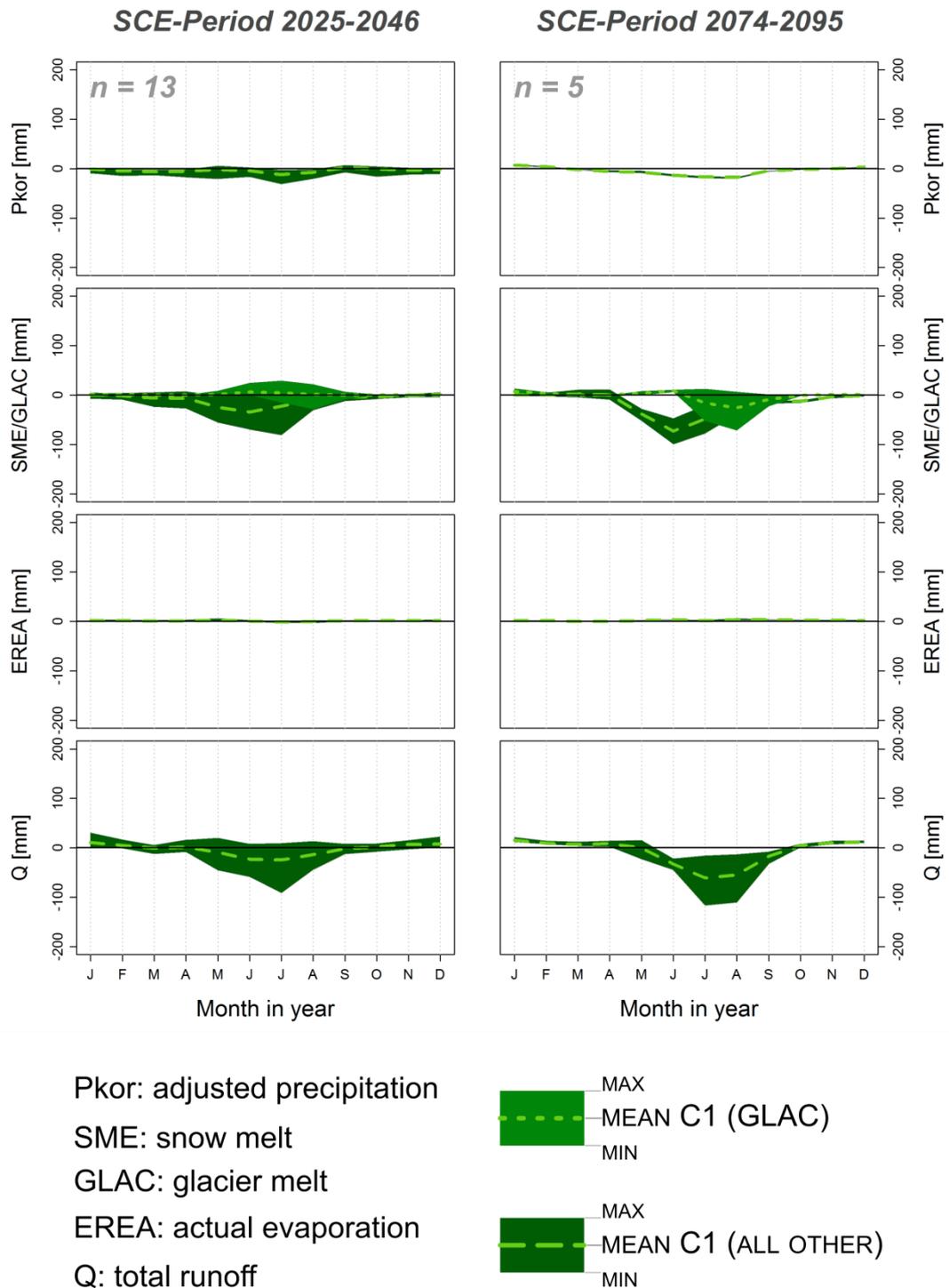
A 4: Absolute Änderung einzelner Wasserhaushaltsgrößen in der nahen und fernen Zukunft, Cluster 4.

# Absolute Differences Cluster 5



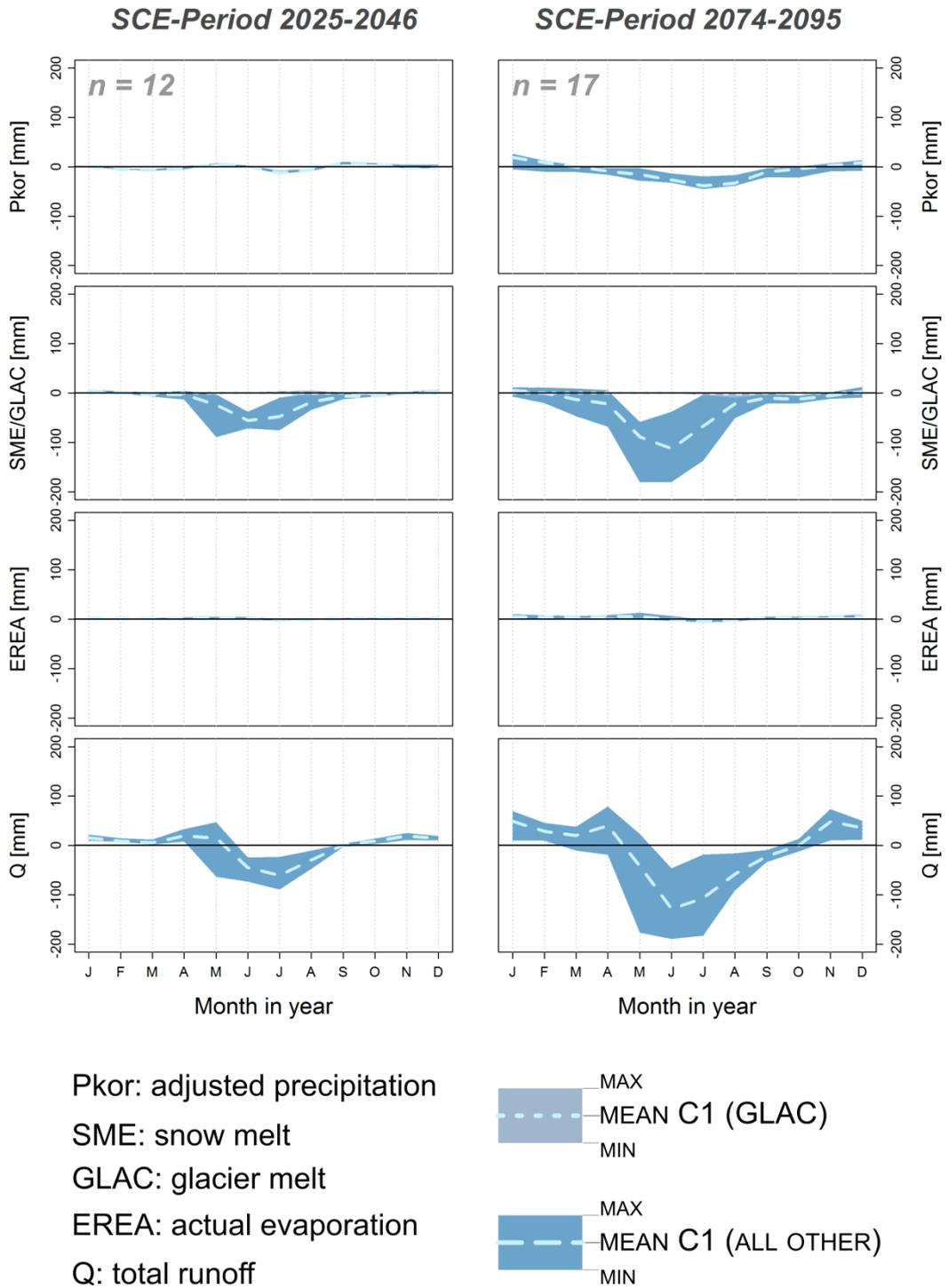
A 5: Absolute Änderung einzelner Wasserhaushaltsgrößen in der nahen und fernen Zukunft, Cluster 5.

## Absolute Differences Cluster 6



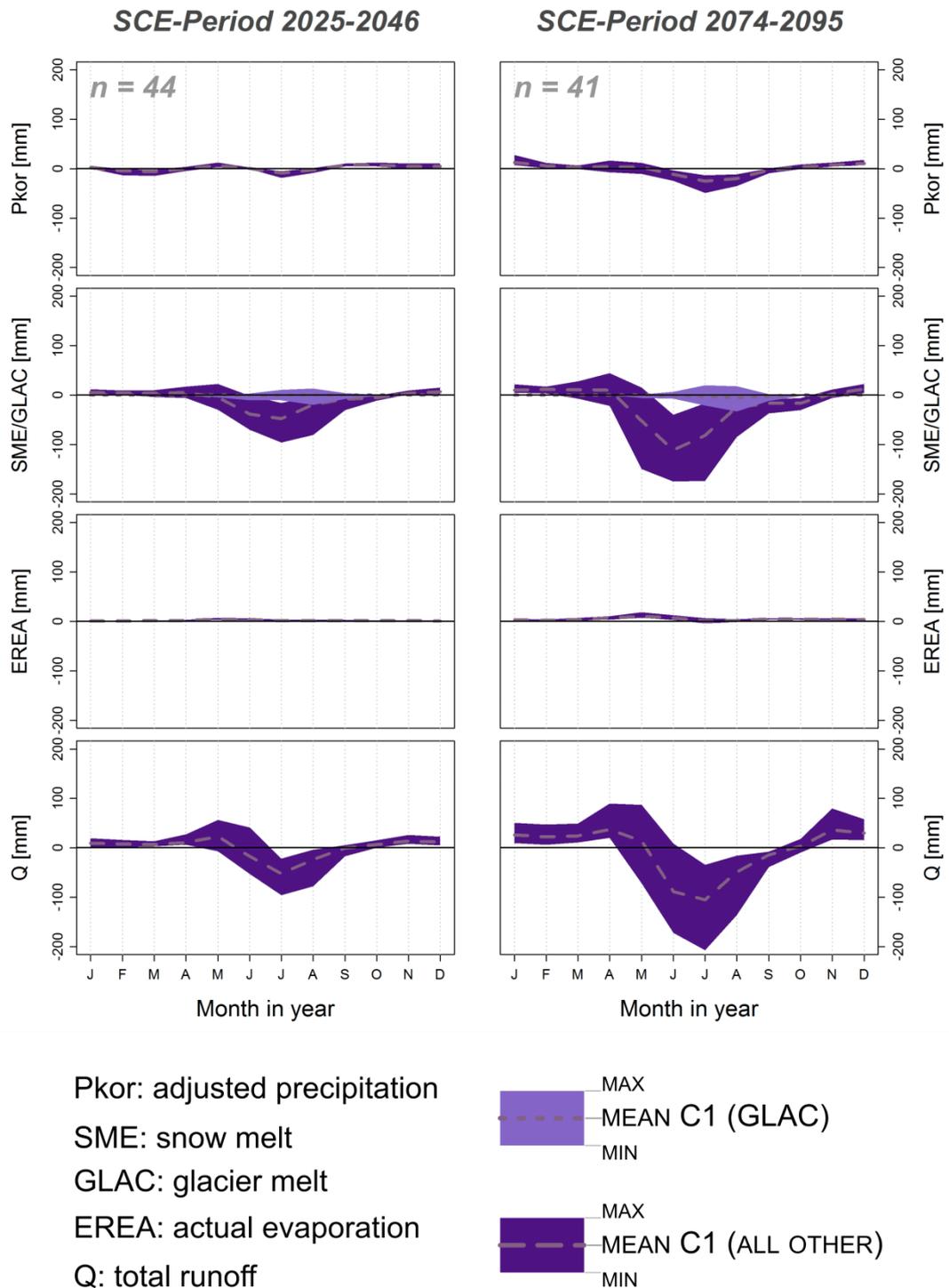
A 6: Absolute Änderung einzelner Wasserhaushaltsgrößen in der nahen und fernen Zukunft, Cluster 6.

# Absolute Differences Cluster 7



A 7: Absolute Änderung einzelner Wasserhaushaltsgrößen in der nahen und fernen Zukunft, Cluster 7.

## Absolute Differences Cluster 8



A 8: Absolute Änderung einzelner Wasserhaushaltsgrößen in der nahen und fernen Zukunft, Cluster 8.