

Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt des Engadiner Inns und seiner Teileinzugsgebiete



Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft

Birmensdorf, Juni 2015

Autoren

Luzi Bernhard, WSL

Andrea Rücker, WSL

Massimiliano Zappa, WSL

Inhaltsverzeichnis

1 Projektbeschreibung.....	1
2 Datengrundlagen.....	3
2.1 Methodik in Kürze.....	4
2.1.1 Hydrologisches Modell	5
2.1.2 Klimafolgeabschätzung.....	6
3 Methoden.....	8
3.1 Klimaszenarien.....	8
3.2 Das Niederschlags-Abfluss-Modell PREVAH.....	10
3.2.1 Modelbeschreibung.....	10
3.2.2 Regionalisierung der freien Modellparameter	11
3.3 Gravitative Verlagerung der Schneedecke	12
3.4 Transiente Aufdatierung der sich verändernden Gletscherflächen.....	13
4. Beschreibung des Inn Einzugsgebietes	15
5 Ergebnisse	16
5.1 Klimaszenarien.....	16
5.2 Validierung des hydrologischen Modells.....	17
5.3 Wasserhaushalt des Inn	18
5.3.1 Erwartete Veränderung des Abflussverhaltens.....	22
5.3.2 Erwartete Veränderung der Schneedecke	23
5.3.3 Beobachtete und erwartete Veränderung der Gletscherflächen.....	24
5.3.4 Erwartete Veränderung der Gletscherschmelze	25
5.3.5 Erwartete Veränderung der Verdunstung und Bodenfeuchte	26
5.4 Wasserhaushalt der Teileinzugsgebiete des Inn.....	28
5.4.1 Ist-Werte der Hydrologischen Variablen.....	28
5.4.2 Szenarien der hydrologischen Variablen im Engadin	34
5.5 Probabilistische Extremereignisse	42
5.5.1 Probabilistische Extremereignisse am Beispiel Samedan.....	42
5.5.2 Extremereignisse der Teileinzugsgebiete des Inn.....	45
5.6 Natürliche Variabilität vs. prognostizierte Veränderung	51

5.7 Wie plausibel, resp. unsicher sind die Abfluss-Prognosen?	51
6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	52
Literaturverzeichnis	54
Anhang A.....	57
Anhang B.....	58

1 Projektbeschreibung

Die prognostizierte Klimaänderung wird einen bedeutenden Einfluss auf Schneedecke und Gletscher und somit auf die Wasserressourcen im gesamten Alpenraum haben.

Wie gross diese Änderungen in der Wasserverfügbarkeit sein wird (Trinkwasser, Wasserkraftproduktion, Schifffahrt, Landwirtschaft etc.) und wie genau sich die Flüsse v.a. in Grosseinzugsgebieten zeitlich (saisonal) und mengenmässig verändern werden, ist im Auftrag vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) in der Überregionalen Studie CCHydro von der WSL (Bernhard & Zappa 2012) bearbeitet worden.

Im Rahmen dieses Projekts hat die WSL neue Szenarien betreffend der Abflüsse in der Schweiz berechnet (Zappa *et al.*, 2012). Dieser neue Datensatz wurde dazu verwendet, die vom WWF benötigten Daten zum Wasserdargebot für das Einzugsgebiet des Inn im Engadin (EZG) zu realisieren.

In dieser Studie wurden zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Szenarien des Wasserkreislaufes und des Abflusses erstellt, welche auf den heutigen aktuellen Klimaszenarien basieren und die verschiedenen Klimaregionen, Höhenstufen und geomorphologischen Ausprägungen in der Schweiz einbeziehen.

Die Modellkonfiguration ist gestützt auf die Emissionsszenarien A1B („*moderates*“ Szenario) und A2 („*worst case*“ Szenario) und auf die regionalen Klimaszenarien CH2011 für die nahe Zukunft (S1, 2021-2050) und die ferne Zukunft (S2, 2070-2099). Die Kontrollperiode bezieht sich auf die Jahre 1980-2009.

Im Rahmen dieses Projekts wird folgenden Fragenstellungen nachgegangen:

- Wie verändert sich der Wasserhaushalt im Einzugsgebiet des Inn, seine Komponenten sowie seine Teileinzugsgebiete?
- Wie verändert sich die Gletscherfläche und -volumen und als Folge davon das Wasserangebot im Sommer in stark vergletscherten Teileinzugsgebieten?
- Wie verändert sich das Abflussregime und -volumen?
- Wie verändert sich das Niedrigwassergeschehen?
- Wie verändert sich das Hochwassergeschehen?
- Wie verändern sich entsprechend die statistischen Kenngrössen für Hochwasser und Niedrigwasser?
- Wie verändert sich Hochwasservolumen?

Für die Berechnung der hydrologischen Auswirkungen des Klimawandels sind neben den aktuellsten Klimaszenarien auch weitere relevante Randbedingungen zu berücksichtigen. Für die auf Messreihen basierende Simulation des Wasserkreislaufes bleiben die für die Parametrisierung eines hydrologischen Modelles notwendigen physiogeographischen Datengrundlagen während der gesamten Berechnungsperiode (welche meistens einen Zeithorizont von 20 bis 30 Jahren abdeckt) in der Regel unverändert. Diese Annahme ist für nicht vergletscherte Gebiete unproblematisch. Der rapide Schwund der alpinen Gletscher seit Mitte der 70er Jahre stellt die Geltung solcher Annahmen für (stark) vergletscherte Gebiete in Frage. Trotz erfolgreichen Erfahrungen in Modellsimulationen (Verbunt *et al.* 2003) ist es notwendig gewesen, diese neuen Simulationsexperimente so zu konzipieren,

dass die Veränderung der Gletscherflächen berücksichtigt wird. Für gekoppelte Anwendungen mit Klimaszenarien wird dieses Vorgehen als unerlässlich eingestuft (Stahl *et al.* 2008).

Der vorliegende Bericht fasst die Ergebnisse der Fallstudie *Inn* zusammen. Im vorliegenden Fallbeispiel werden für die Zeiträume von 2021 - 2050 (nahe Zukunft), 2045 - 2074 (mittlere Zukunft) resp. 2070 - 2099 (ferne Zukunft) die lokalen meteorologischen Veränderungen und die daraus resultierenden Änderungen in der Vergletscherung, der Schneedecke und im Abfluss simuliert.

Folgende Gruppen haben hierzu beigetragen: Institut für Atmosphäre und Klima der ETH Zürich (klimatologisches Downscaling), Geographisches Institut der Universität Zürich (Gletschermodellierung) sowie die Eidg. Forschungsanstalt WSL (Schneedecken- und Abflussmodellierung).

2 Datengrundlagen

Für die WWF-Studie *Inn* wurden folgende Daten verwendet:

- a) Digitales Höhenmodell RIMINI (Arealstatistik, Bundesamt für Statistik) mit einer räumlichen Auflösung von 100 m
- b) Landnutzung – aggregiert in 12 hydrologische Klassen – mit einer räumlichen Auflösung von 100 m, basierend auf der Arealstatistik des Bundesamtes für Statistik (GEOSTAT), 1992/97
- c) Meteorologische Messungen (Stundenwerte, Zeitraum 1980 – 2009) der MeteoSchweiz-Stationen, welche für die beiden Einzugsgebiete relevant sind. Wichtige Stationen sind Corvatsch und Samedan. Für die hydrologische Modellierung wurden folgende meteorologische Messgrößen verwendet: Lufttemperatur, relative Feuchte, Globalstrahlung, Niederschlag und Windgeschwindigkeit
- d) Als Grundlage für die Gletscherentwicklung dient das World Glacier Inventory, Stand 1973. Dieses wurde als initiale Gletscherfläche für die Simulation verwendet und dann kontinuierlich mit dem Schrumpfmodell von Paul *et al* (2007) angepasst. Die Rastergrösse des ursprünglichen Gletscherinventars ist 25 m. Für unsere Modellierung wird sie auf 200 m aggregiert
- e) Schneemessungen des Interkantonalen Mess- und Informationssystems IMIS, sowie Beobachter-Schneedaten des SLF Davos
- f) Abflussmessungen des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) für die beiden Einzugsgebiete (Tageswerte, Zeitraum 1980 – 2009)

2.1 Methodik in Kürze

Die prognostizierte Klimaänderung wird einen bedeutenden Einfluss auf Schneedecke und Gletscher und somit auf die Wasserressourcen im gesamten Alpenraum haben. Im Rahmen der Studie *CCHydro* des BAFU (BAFU 2012) wurden für die verschiedenen Klimaregionen und Höhenstufen der Schweiz zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Szenarien des Wasserkreislaufes und der Abflüsse für das 21. Jahrhundert bereitgestellt. Für die Zeiträume 2021 – 2050 und 2070 – 2099 wurden die lokalen meteorologischen Veränderungen und die daraus resultierenden Änderungen in der Vergletscherung, der Schneedecke sowie im Abfluss gegenüber der Kontrollperiode 1980 – 2009 simuliert. Um die prognostizierten lokalen Klimaänderungen für die Grosseinzugsgebiete abzubilden, wurden die Klimaszenarien des ENSEMBLES-Projektes mittels der *Delta-Change*-Methode auf Tagesbasis berechnet, welche auf dem A1B-Emissionsszenario für Temperatur und Niederschlag beruht.

Diese Untersuchungen wurden in Rahmen von Folgeprojekte (www.ch2014.ch) durch die Verwendung der Klimaszenarien *CH2011-plus* der MeteoSchweiz erweitert. Diese weiteren Szenarien basieren auf einer probabilistischen Methode, welche durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung („lower“, „medium“ und „upper“ Bänder) Auskunft über die Modellunsicherheit und die dekadische Variabilität zulassen.

Im Gegensatz zum *CCHydro*-Bericht, basieren die prognostizierten Klimadaten in diesem Ansatz nicht auf Stationsbasis, sondern auf fünf Klimaregionen der Schweiz. Zusätzlich werden neben dem Emissionsszenario A1B zwei weitere angewandt: das moderate RCP3PD-Szenario sowie das „worst case“-Szenario A2.

Einen Überblick über die Methode für die verschiedenen Grossregionen (Abbildung 1) der nationalen Studie gibt Abbildung 2. Die Daten der Kontrollperiode (1980-2009) wurden für die Verifikation der Simulation benutzt. Für die Berechnung der Zukunftsprognosen wurden die genannten Emissionsszenarien einbezogen.

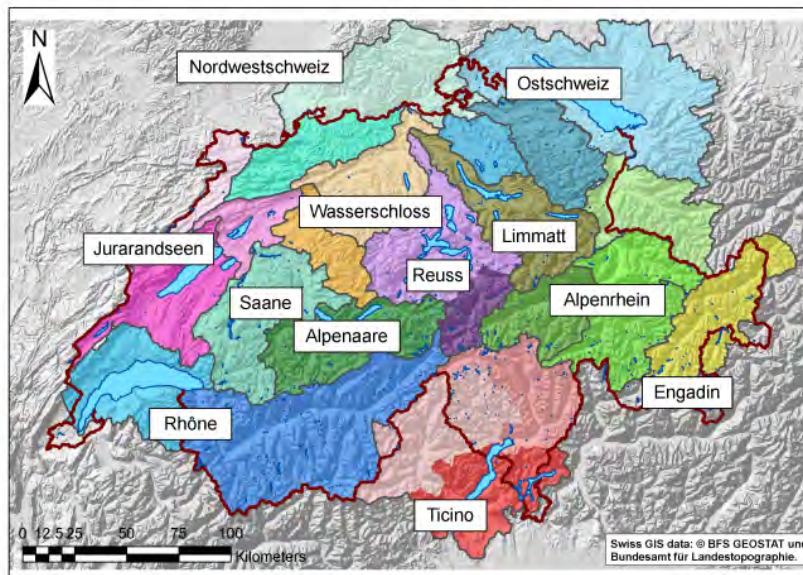


Abbildung 1: 25 Grossregionen, 5 Klimaregionen

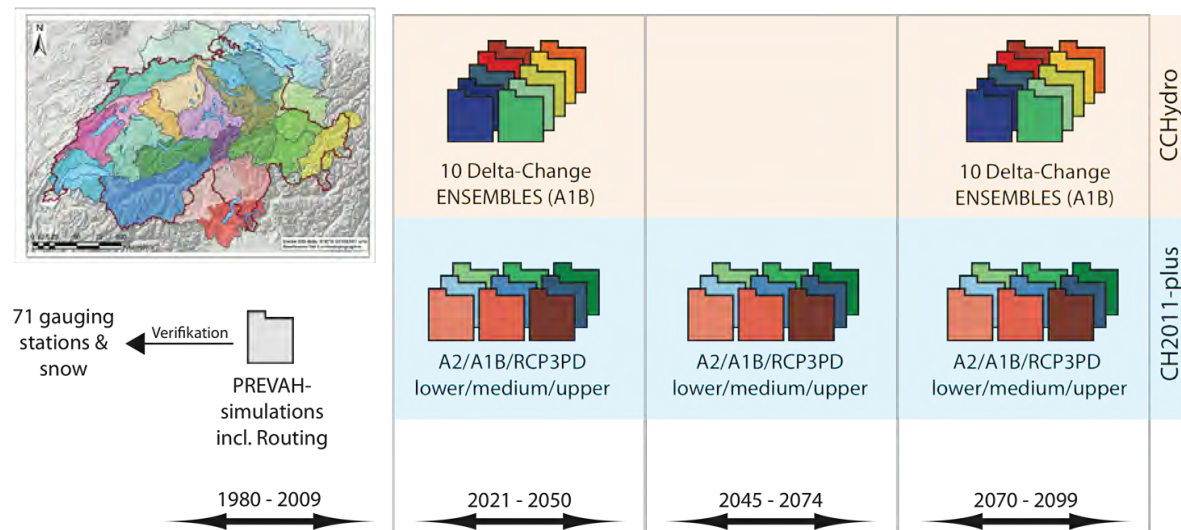


Abbildung 2: Setup der Experimente zur Abschätzung der Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserressourcen der Vergleichsstudie von CCHydro und CH2011-plus (Quelle: Bernhard et al., 2013). Neben der Kontrollperiode 1980-2009, bis zu drei Zukunftsperiode wurden in der Abschätzung evaluiert, indem das hydrologische Modell PREVAH mehrfach unter jeweiligen Verwendung der Szenarien für die untersuchten Einzugsgebiete integriert wurde. Die Gegenüberstellung zeigt die zusätzliche Zeitperiode von 2045 – 2074 sowie die integrierten A2 und RCP3PD Emissionsszenarien, welche durch die zehn Delta-Change Ensembles nicht abgedeckt werden. Eine solche Konfiguration wurde für diese Studie verwendet.

Für die Abschätzungen betreffend der Einzugsgebiete des Inn ist eine identische Konfiguration verwendet worden. Für die vorliegende Studie wurden jedoch nur die beiden Emissionsszenarien A1B und A2 analysiert.

2.1.1 Hydrologisches Modell

Unter Verwendung von gemessenen mittleren Jahresabflüssen haben Hubacher und Schädler (2010) den Wasserhaushalt der Schweiz für die Periode 1901-2000 ermittelt. Dabei ergab sich, dass rund zwei Drittel (981 mm) des Jahresniederschlages von 1431 mm unser Land in Form von Abfluss verlässt. Die Speicherverluste (vor allem durch die Gletscherschmelze) betragen rund 14 mm pro Jahr. Die Verdunstung betrug dem folgend rund 464 mm pro Jahr. Um entsprechende Aussagen für die unterschiedlichen Regionen der Schweiz zu erarbeiten, können räumlich und zeitlich hochaufgelöste hydrologische Modelle als Werkzeug beigezogen werden.

Solche Modelle erfassen durch Assimilation von digitaler Information zum Gelände, zur Landnutzung und zu den Bodeneigenschaften alle nötigen Grundlagen, um die kleinskalige räumliche Variabilität der hydrologischen Prozesse mit physikalisch begründeten und/oder konzeptionell gestalteten Ansätze nachzubilden. Die zeitliche Variabilität des hydrologischen Kreislaufs wird durch die Assimilation der beobachteten meteorologischen Variablen bestimmt. Neben der Lufttemperatur und dem Niederschlag benötigen komplexere hydrologische Modelle zudem Daten zu Windgeschwindigkeit, Luftfeuchte, Sonnenscheindauer und Globalstrahlung.

Ein solches Modell ist das an der WSL, ETH und UNI-Bern entwickelte und für solche Forschungsfragen verwendete Modell PREVAH (Viviroli et al., 2008; Pfändler und Zappa, 2006; Viviroli et al., 2009). Mit diesem Modell wurde im Rahmen des vom Bundesamt für Umwelt koordinierte Projekt CCHYDRO (BAFU, 2012) eine Simulation des Wasserhaushalts für die gesamte hydrologische Schweiz (Abbildung 3) in einer räumlichen Auflösung von 200x200 Metern für die Periode 1980 bis 2009 realisiert, verifiziert und analysiert (Bernhard und Zappa, 2012).

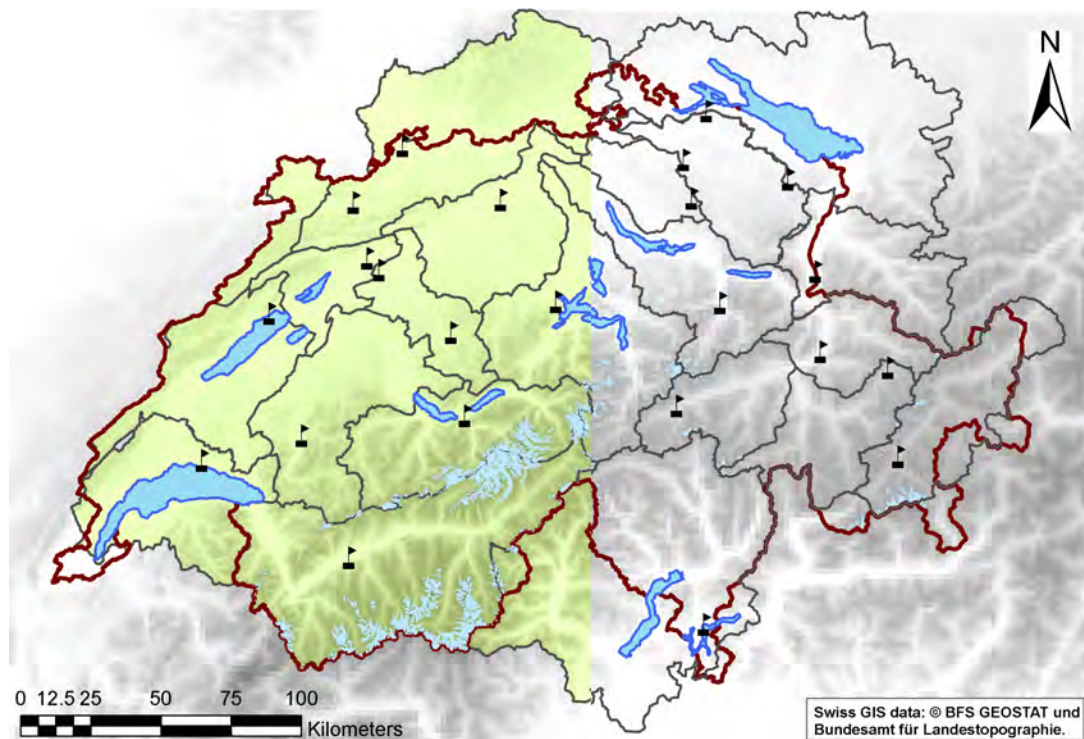


Abbildung 3: Konzeptionelle Darstellung der verwendeten räumlichen Auflösungen. Die Klimatelemente und die regionalisierten Modellparametern wurden auf einer Rasterauflösung von 2 x 2 km aufbereitet (grob gegittertes Geländemodell in Grautöne). Die Einzugsgebiete wurden auf einer Auflösung von 200 x 200 m definiert (fein gegittertes Geländemodell in Grüntönen auf der linken Seite des Untersuchungsgebietes). Die Gletscherumrisse wurden ebenfalls in 200 x 200 m Auflösung aufbereitet (hellblaue Flächen). Die Klimafolgenzenarien wurden regional auf einzelne Stationen bezogen (schwarze Symbole) und in der Simulation als repräsentativ für die jeweilige Grossregion betrachtet.

2.1.2 Klimafolgeabschätzung

Für die Beantwortung der Frage „Wie wird sich die Klimaänderung auf die Wasserressourcen der Schweiz auswirken?“ musste eine Kette von Modellen konzipiert und realisiert werden. Solch eine Kette basiert auf den aktuellsten Klima- und Gletscherszenarien und einer gezielten Anwendung von PREVAH. Abbildung 3 zeigt schematisch für die Szenarien-Variante CCHYDRO-Ensembles, wie die durchgeführte Experimente für die Berechnung der Klimafolgen auf die Wasserressourcen der Schweiz durch Assimilation von Klimaszenarien (zwei Perioden von 30 Jahre) und Gletscherschwundsszenarien (alle fünf Jahre) implementiert wurde.

Die Grundlagen für die Ableitung der Klimafolgenzenarien für die Zukunftsperioden 2021 – 2050 und 2070 – 2099 wurden im Rahmen des europäischen Projektes ENSEMBLES (van der Linden und Mitchell, 2009), welche alle vom Emissionsszenario A1B (moderate Erwärmung) ausgehen (CH2011, 2011), geschaffen.

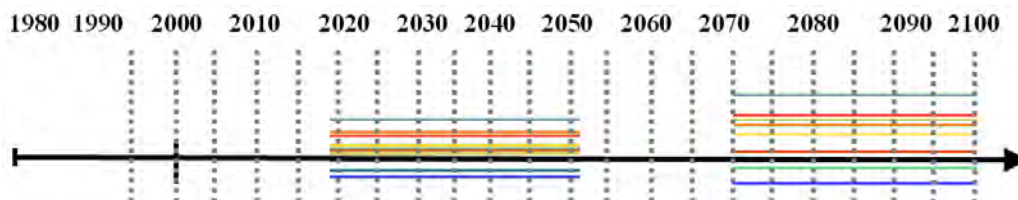


Abbildung 4: CCHYDRO-Ensembles: Zeitachse Kontrollperiode 1980 – 2009, Szenarien für nahe 2021 – 2050 (kleine Unterschiede in den 10 Klimaszenarien) und ferne Zukunft 2070 – 2099 (grössere Unsicherheit der möglichen Klimaentwicklung). Die vertikalen Linien zeigen auf die Jahre, in welchen die Gletscherausdehnung transient aktualisiert wurde.

Die Änderungssignale basieren auf zehn Kombinationen von globalen und regionalen Klimamodellen und wurden mit der in Bosshard *et al.* (2011) beschriebenen Methodik (Delta-Change auf Tagesbasis) aufbereitet. Diese zehn GCM-RCM Kombinationen widerspiegeln die Unsicherheits-Bandbreite der Klimamodelle (Stähli *et al.*, 2011). Für die beiden Zukunftsszenarien blieb die Konfiguration des hydrologischen Modells unverändert. Nur die meteorologischen Daten wurden mit den prognostizierten täglichen Änderungen angepasst. Somit entstanden zwei neue 30-jährige Zeitreihen mit ähnlicher Variabilität, wie sie in der Kontrollperiode 1980-2009 beobachtet worden war, aber mit der erwarteten Bandbreite von Änderungssignalen betreffend Niederschlag und Lufttemperatur (Abb. 3). Bezüglich der Vergletscherung wurde die Fläche der Gletscher für die beiden Zukunftsszenarien ausgehend vom Zustand von 1985 mit einem Schrumpfmodell von Paul *et al.* (2007) in 5-Jahres-Schritten nach und nach reduziert. Das Modell basiert auf der einfachen Annahme, dass die Gleichgewichtslinie der Gletscher entsprechend der Lufttemperaturerhöhung ansteigt. Dadurch wird das Akkumulationsgebiet des Gletschers kleiner. Die Ausdehnung der Gletscher wurde transient im hydrologischen Modell aktualisiert (Abb. 3).

Das CH2011-Team hat im Jahr 2013 weitere Szenarien publiziert, welche neben dem A1B Emissionsszenario, auch das A2-Szenario (pessimistische Entwicklung) und das RCP3PD (aktive Steuerung zur Reduktion der Emissionen) berücksichtigen. Solche Szenarien sind für drei Zukunftsperioden vorhanden (2021-2050; 2045-2074; 2070-2099) und wurden im Rahmen des Projektes berechnet und analysiert.

3 Methoden

3.1 Klimaszenarien

Klimatologische Grundlage der vorliegenden Studie sind die *Szenarien zur Klimaänderung in der Schweiz CH2011* (CH2011, 2011), welche eine umfassende Analyse der im 21. Jahrhundert erwarteten Änderungen von Temperatur und Niederschlag in der Schweiz zur Verfügung stellen (Abb. 5). Basis der CH2011 Szenarien sind Simulationen der neusten Generation globaler und regionaler Klimamodelle, insbesondere die regionalen Klimaprojektionen des europäischen ENSEMBLES Projektes (Van der Linden & Mitchell 2009). Diese Projektionen wurden mit unterschiedlichen Kombinationen regionaler und globaler Klimamodelle (RCMs, GCMs) mit einer räumlichen Auflösung von ca. 25 km und unter Annahme des IPCC SRES A1B Emissionsszenarios erstellt. Sie wurden im Rahmen der CH2011 Initiative auf unterschiedliche Art und Weise für die Schweiz ausgewertet und liefern eine Reihe von Szenarioprodukten zur Verwendung in Klimafolgestudien.

Erster CH2011 Szenariotyp sind probabilistische Szenarien des mittleren saisonalen Klimaänderungssignals für grössere Regionen der Schweiz. Hierfür wurden Simulationen von insgesamt 20 GCM-RCM Modellketten mithilfe eines probabilistischen Algorithmus (Knutti *et al.*, 2011) ausgewertet. Endprodukt sind Abschätzungen der zu erwartenden mittleren saisonalen Temperatur- und Niederschlagsänderungen (unterer, mittlerer und oberer Schätzwert; jeweils für Winter, Frühjahr, Sommer und Herbst) für fünf Regionen der Schweiz (Westschweiz/CHW, Nordostschweiz/CHNE, westliche Schweizer Alpen/CHAW, östliche Schweizer Alpen/CHAE und Schweiz südlich der Alpen/CHS) sowie drei Szenarioperioden (2020 – 2049, 2045 – 2074 und 2070 – 2099) im Vergleich zur Referenzperiode 1980 – 2009.

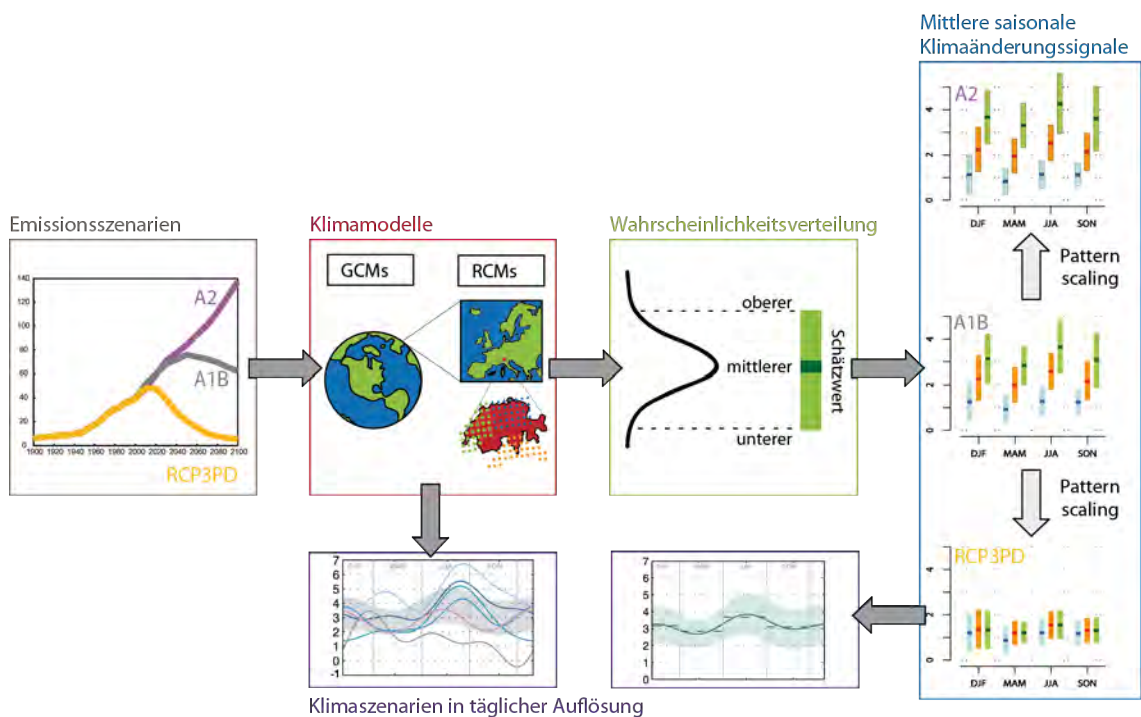


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Modellkette im ENSEMBLES Projekt (CH2011, 2011). Die mittlere saisonale Klimaänderungssignale basieren auf den drei IPCC-Emissionsszenarien unter Einbindung von Klimamodelle.

Die für das A1B Emissionsszenario gültigen Schätzwerte wurden anschliessend mithilfe der Methode des *pattern scaling* auf die beiden zusätzlichen Emissionsszenarien A2 (pessimistischer als A1B, d.h. höhere zukünftige Treibhausgasemissionen) und RCP3PD (optimistisches Mitigationsszenario mit Begrenzung des globalen Temperaturanstiegs bis 2100 auf ca. 2°C) skaliert.

Die globale Temperaturänderung wird aus dem Mittelwert der jährlichen Zeitreihen, aus den GCMs (IPCC, 2007) für das Emissionsszenario A2 und mithilfe des einfach gekoppelten Klima-Carbon Modells MAGICC (Meinshausen *et al.* 2011a; Meinshausen *et al.* 2011b) abgeschätzt. Mittels dieser Berechnungen resultiert ein Wert für jeden Zeitraum und jedes Szenario, welche sich auf die entsprechende globale Erwärmung für das moderate A1B-Emissionsszenario bezieht. Zusätzlich werden die oberen, mittleren und unteren Grenzbereiche anhand der probabilistischen Szenarien definiert. Eine Erweiterung der saisonalen Szenarien wurde durch die Szenarien auf Tagesbasis gewonnen. Dies konnte durch die heuristische Interpolation aus den mittleren saisonalen Schätzwerten erfolgen.

Als zweiter CH2011 Szenariotyp stehen stationsbasierte Abschätzungen des mittleren Jahresgangs der Temperatur- und Niederschlagsänderung in täglicher Auflösung zur Verfügung. Hierzu wurden die Ergebnisse von insgesamt zehn GCM-RCM Modellketten auf Stationsebene herunterskaliert und der mittlere Jahresgang des Klimaänderungssignals mittels harmonischer Analyse (Bosshard *et al.* 2011) für insgesamt 188 Temperaturstationen bzw. 565 Niederschlagsstationen sowie für jede der drei oben genannten Szenarioperioden bestimmt. Da die zehn zugrundeliegenden regionalen Klimaprojektionen das A1B Emissionsszenario annehmen und kein *pattern scaling* durchgeführt wurde, stehen die täglichen Szenarien auf Stationsebene nur für dieses eine Emissionsszenario zur Verfügung. Sie bilden die Grundlage der Untersuchungen des CCHydro Projektes.

Im Rahmen des *ENSEMBLES* Projekts wurde mit jedem der verwendeten Regionalmodelle eine Validierungssimulation durch die ERA40-Reanalysen (Zeitraum 1960 – 2000) durchgeführt. Zusätzlich wurden Szenariensimulationen mit Antrieb durch transiente globale Simulationen gekoppelter Atmosphäre-Ozean Modelle (GCMs) für den Zeitraum 1950 – 2100 erstellt. Diesen Simulationen liegen bis zum Jahr 2000 beobachtete Treibhausgaskonzentrationen und ab 2001 Treibhausgaskonzentrationen entsprechend einem IPCC Emissionsszenario zugrunde (in 16 Fällen A1B, in einem Fall A2). Die überwiegende Zahl der 17 untersuchten Regionalmodelle wurde entweder vom gekoppelten Globalmodell des englischen Hadley Centres (HadCM3) oder des deutschen Max-Planck-Instituts für Meteorologie (ECHAM5/MPI-OM) angetrieben. Aus den 17 regionalen Klimamodellen wurden zehn GCM-RCM Modellketten ausgewählt, so dass alle Ketten den gesamten Zeitraum 1950 – 2100 abdecken und möglichst alle verschiedenen GCMs vertreten sind.

Für die Aufbereitung der Klimaszenarien wurde die bewährte *Delta-Change* Methodik verwendet (Bosshard *et al.* 2011b), die einfach verwendbaren Klimaszenarien an Stationsstandorten liefert. Für die Berechnung der *Delta-Change* Faktoren, welche dem Klimaänderungssignal entsprechen, wurden zunächst die gegitterten RCM-Daten (25 x 25 km) auf die Stationsstandorte interpoliert. Aus diesen interpolierten Zeitreihen wurden anschliessend die *Delta-Change* Faktoren zwischen den Szenarioperioden (SCE) und der Kontrollperiode (CTL) berechnet. Dazu wurde mit einem gleitenden Mittel sowohl für die CTL- als auch die SCE-Periode der klimatologische mittlere Jahresgang ermittelt. Die Änderung des Jahresganges zwischen der CTL- und SCE-Periode entspricht dem Klimaänderungssignal. Diese *Delta-Change* Szenarien sind auf der Website des *Center for*

Climate Systems Modelling (C2SM; <http://data.c2sm.ethz.ch/dataset/DeltaChange>) aufbereitet und können dort heruntergeladen werden.

Die CH2011 Szenarioprodukte geben einen umfassenden Überblick über die zu erwartenden klimatischen Änderungen in der Schweiz im 21. Jahrhundert und erlauben eine direkte Verwendung dieser Information in Klimaimpaktstudien. Je nach Emissionsszenario, Jahreszeit und Region ist mit einer Erwärmung zwischen 1.2 und 4.8°C bis zum Ende des Jahrhunderts zu rechnen. Im Sommer wird zudem eine deutliche Reduktion der Niederschlagsmengen von bis zu 28% erwartet. Jedoch ist zu beachten, dass die CH2011 Szenarien trotz ihrer vielseitigen Verwendbarkeit Einschränkungen unterliegen. So basieren alle Szenarioprodukte auf dem sogenannten *Delta Change Ansatz*, d.h. es werden lediglich Änderungssignale bereitgestellt, mit denen Beobachtungen im heutigen Klimazustand skaliert werden müssen, um Zeitreihen für zukünftige Perioden zu erhalten. Dieser Ansatz hat deutliche Vorteile (z.B. räumliche Konsistenz und Erhaltung physikalischer Konsistenz zwischen verschiedenen Klimaparametern), kann allerdings Änderungen der zeitlichen Temperatur- und Niederschlagsvariabilität nur bedingt abbilden. Weitere Einschränkungen betreffen die unvollständige Abbildung der Modellunsicherheit durch die 20 verwendeten GCM-RCM Modellketten, den einfachen Skalierungsansatz der *pattern scaling* Methode oder die unabhängige Schätzung von Temperatur- und Niederschlagsänderungen.

Für die vorliegende Studie *WWF Engadin* wurden ausschliesslich die probabilistischen Klimaszenarien der beiden Emissionsszenarien A1B sowie A2 verwendet.

3.2 Das Niederschlags-Abfluss-Modell PREVAH

Für die Abflussberechnung wurde die Gitterversion des hydrologischen Modelles PREVAH (Viviroli *et al.* 2009) für die ganzen Einzugsgebiete mit regionalisierten Parametern aufgesetzt. Anhand von gemessenen Abflussdaten des BAFU wurden die Modellparameter optimiert. Danach wurden für die Kontrollperiode 1980 – 2009 in täglicher Auflösung folgende hydrologischen Grössen berechnet: Niederschlag, Verdunstung, Schneewasserwert, Eis- und Schneeschmelze, Bodenwasserspeicher und Abfluss. Dazu wurden die gemessenen meteorologischen Grössen der nahegelegenen MeteoSchweiz-Stationen über die gesamten Einzugsgebiete hinweg interpoliert. Die nächsten Abschnitte detaillieren einige Aspekte der Anwendung von PREVAH in Rahmen von *CCHydro*.

3.2.1 Modelbeschreibung

PREVAH (*Precipitation-Runoff-Evapotranspiration HRU related Model*) ist ein räumlich verteiltes hydrologisches Modell, welches seit dem Forschungsprogramm NFP31 Mitte der 90er-Jahre des 20. Jahrhunderts als Forschungsmodell im Alpenraum eingesetzt wird (Gurtz *et al.* 1997; Zappa *et al.* 2003; Verbunt *et al.* 2006). Die ursprüngliche Version von PREVAH erfordert die Gliederung eines Einzugsgebietes nach Teilflächen mit ähnlichen hydrologischen Eigenschaften (HRUs). Seit 2009 existiert auch eine räumlich explizite Version von PREVAH, welche unter anderem die direkte Assimilation von Landnutzungsszenarien (e.g. Gletscherschwund) und die Berücksichtigung von Schneeeverlagerung erlaubt. Das eher konzeptionell aufgebaute Modell umfasst als wesentliche Grundbestandteile: ein Schneemodul, ein Gletscherschmelzmodul, ein Interzeptionsmodul, ein Modul zur Feuchteausschöpfung durch Evapotranspiration, ein Bodenspeicher- und Abflussbildungsmodul sowie ein Grundwasser- und Abflusskonzentrationsmodul (Abbildung 6).

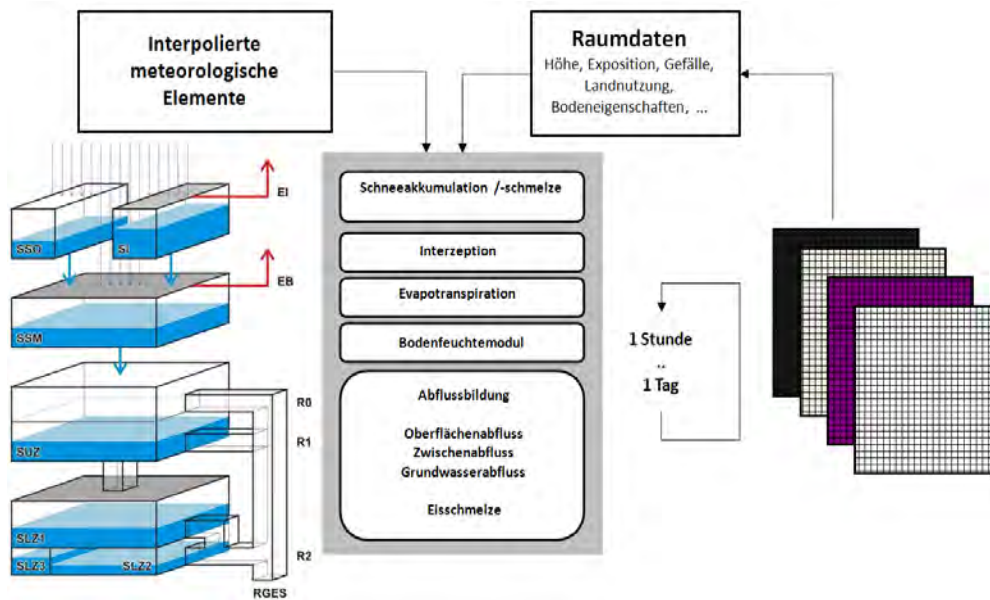


Abbildung 6: Das Niederschlags-Abfluss Modell PREVAH: Precipitation-Runoff-Evapotranspiration HRU related Model (Viviroli et al. 2009). Seit 2009 auch als räumlich explizierte Version verfügbar.

Die räumlich explizite Modellversion PREVAH wurde zuerst für eine Studie auf die nationale Skala für die gesamte Domain der Schweiz auf 200 x 200 m Auflösung aufgesetzt.

3.2.2 Regionalisierung der freien Modellparameter

Wie jedes konzeptionelle Niederschlags-Abfluss Modell besitzt PREVAH mehrere freie Modellparameter, welche üblicherweise an gemessenen Abflussdaten kalibriert werden. Die kalibrierten Parameter für die Teileinzugsgebiete wurden von bereits abgeschlossenen Arbeiten der Universität Bern (GIUB) übernommen.

Die Arbeiten von Viviroli et al. (2009) und Köplin et al. (2010) lieferten die Grundlagen für die Ableitung der *Parameterkarten*. Diese zwei an der UNI Bern durchgeführten Arbeiten betrachteten über 200 mesoskalige Einzugsgebiete der Schweiz. Alle 200 Gebiete wurden mittels eines halbautomatischen Verfahrens kalibriert. Dabei wurde speziell darauf geachtet, dass für die Wiedergabe von Hochwasserspitzen ebenso sensitive Gütemasse erkannt werden (Viviroli 2007). Ziel dieses Ansatzes war die Anwendung von PREVAH in ungemessenen Gebieten (wie zum Beispiel auch Zuflussgebiete von Wasserkraftwerken), für welche die freien Modellparameter ohne Abstimmung auf Abflussmessungen geschätzt werden müssen (Regionalisierung). Die Resultate der vorgängig durchgeführten Kalibrierung dienen als Datengrundlage für eine Regionalisierung. Für ein unbekanntes Gebiet können nun die freien Modellparameter direkt aus den resultierenden Parameterkarten herausgelesen und für eine Simulation benutzt werden. Beispiel für eine regionalisierte Parameterkarte zeigt Abbildung 7, welche die „Speicherkonstante Oberflächenabfluss“ in einer Auflösung von 200x200 m darstellt.

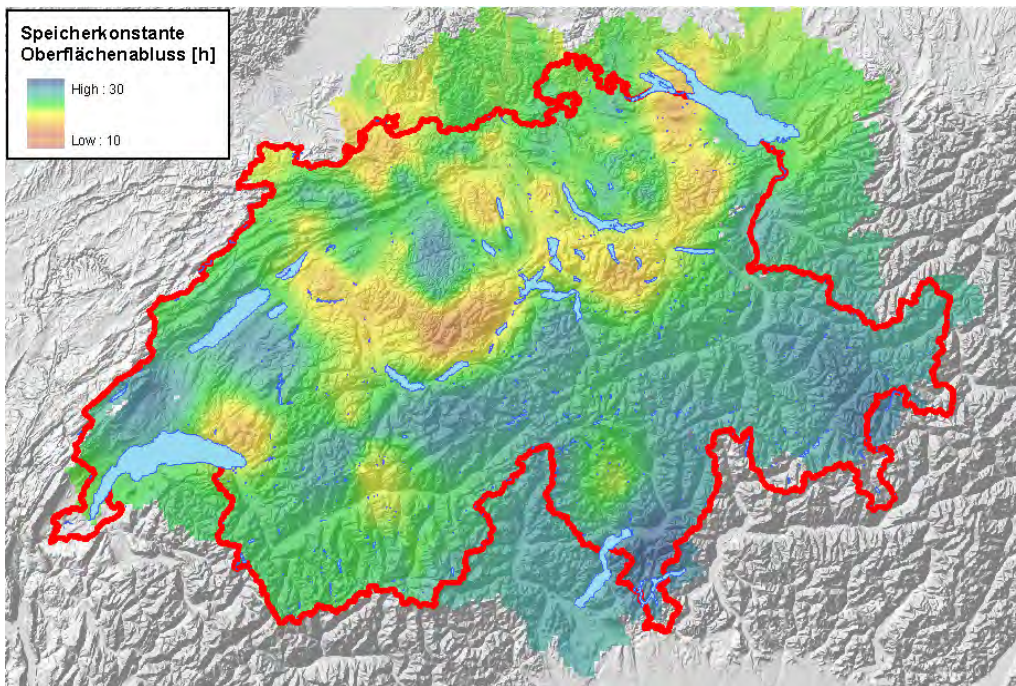


Abbildung 7: Regionalisierte Karte des Parameters „Speicherkonstante Oberflächenabfluss“. Je tiefer der Wert, desto sensitiver ist eine Gegend betreffend der Entstehung von Gewitterhochwasser

3.3 Gravitative Verlagerung der Schneedecke

Seit mehreren Jahren wird beobachtet, dass hydrologische Modelle massenhaft *ewigen* Schnee in den höchsten und steilsten Gipfeln der Einzugsgebiete ansammeln (z.B. Verbunt *et al.* 2003). Es wurden teils Schneewände mit einer Wachstumsrate von über zwei Metern pro Jahr gebildet, welche dem Wasserkreislauf entzogen wurden. Bekannt ist jedoch, dass Schnee nicht unendlich an steilen Hängen deponiert wird. Um diesen Verlust zu kompensieren, wurde in den Modellen oft entweder die Schmelzrate der Gletscher, oder die Schnee- und Regenmengen erhöht. Gruber (2007) liefert eine einfach implementierbare Lösung zu diesem Problem (Abb. 8). Je nach Steilheit des Geländes darf nur eine bestimmte Menge Schnee pro Rasterelement im Modell gespeichert werden. Ist das Element gesättigt, verlagert sich der überschüssige Schnee in ein tiefer gelagertes Rasterelement. In tieferer Lage ist es wahrscheinlicher, dass Schnee geschmolzen werden kann. Nach jedem Zeitschritt wird die Prozedur *Mass Transport and Deposition* (MTD) iterativ durchgeführt, bis alle Rasterelemente im Gleichgewicht sind. Zudem wird darauf geachtet, dass sich der Schnee eines Hanges nicht in einem Einzelelement ansammelt. Wie im rechten Teil der Abb. 8 ersichtlich wird, erreicht die MTD-Version des Simulationsexperimentes nach rund vier Jahren ein Gleichgewicht. Im Testgebiet schwanken die Wasserwerte der Schneedecke zwischen 500 und 1500 mm. In der MTD-freien Version sammeln sich innert weniger Jahre über 3000 mm Schneewasseräquivalent an; meist in steilen Regionen oberhalb von 2500 m ü.M.

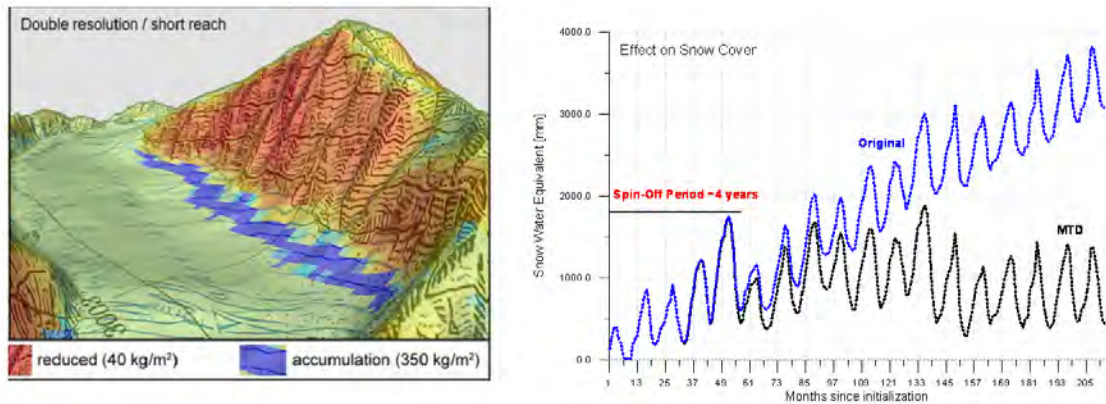


Abb. 8: Links: Gravitative Verlagerung (MTD, Mass Transport and Deposition) von Schnee auf steilen Hänge (Gruber, 2007). Rechts: Tageswerte des Wasserwertes der Schneedecke für ein Teileinzugsgebiet der Reuss (Göscheneralpsee) in der ersten 210 Monate seit Initialisierung. Blau: Ergebnisse ohne MTD Algorithmus. Schwarz: mit MTD Algorithmus

3.4 Transiente Aufdatierung der sich verändernden Gletscherflächen

Dass für die Simulation zukünftiger Gletscherausdehnungen verwendete *GWL Reaktionsmodell* wurde im Rahmen des NFP 48 für das Teilprojekt GISALP entwickelt (Rothenbühler, 2006) und ist in Paul *et al.* (2007) veröffentlicht. Das Modell basiert auf der einfachen Annahme, dass die Gleichgewichtslinie (GWL) ansteigt, wenn sich die Temperatur erhöht (im Mittel um etwa $150\text{ }^{\circ}\text{C}/150\text{ m}$) und sich das Akkumulationsgebiet entsprechend verkleinert. Der Einfachheit halber rechnet das Modell allerdings nur in ganzen Stufen zu je 100 m . Unter der weiteren Annahme, dass ein verkleinertes Akkumulationsgebiet auch einen kleineren Gletscher zur Folge hat, lässt sich mit bekannten Beziehungen zwischen der Größe des Akkumulations- und Ablationsgebietes für eine Gletscherausdehnung, welche im Gleichgewicht mit dem Klima ist, eine neue Gesamtgröße bestimmen. Aus den direkten Messungen der Massenbilanz an neun Gletschern in den Alpen ist bekannt, dass für eine ausgeglichene Bilanz das Akkumulationsgebiet etwa 60% der gesamten Fläche einnimmt (WGMS 2009).

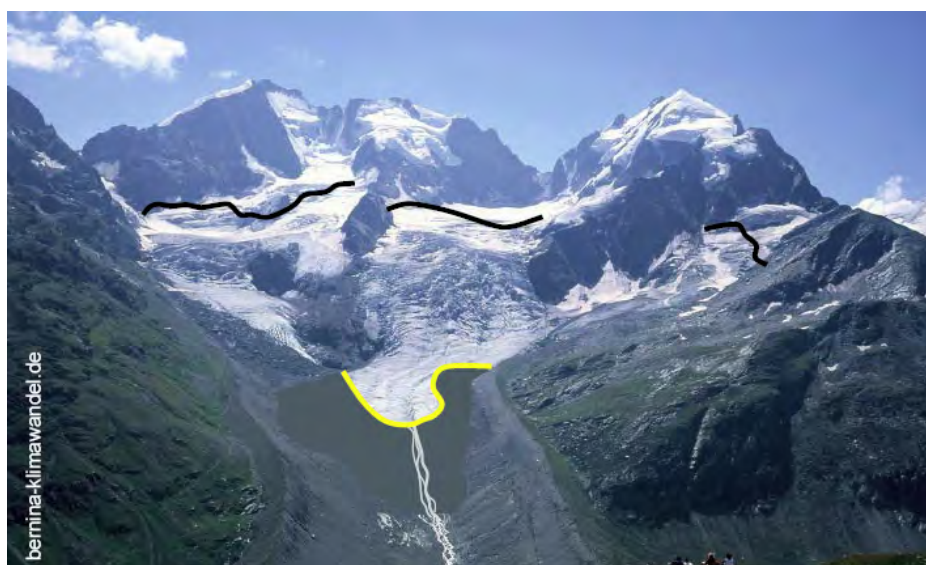


Abbildung 9: Schematische Darstellung potentieller Gletscherrückgangsszenarien am Beispiel des Tschiergletschers. In schwarz die erhöhte Gleichgewichtslinie, in gelb/grau Gletscherzunge/Gletscherverlust

Das Modell berechnet neue Gletscherausdehnungen für Gleichgewichtszustände als Reaktion auf vorgegebene Anstiege der GWL. Damit das Modell zeitabhängig läuft, muss für jeden Gletscher die Anpassungszeit (t_r , response time) berücksichtigt werden. Zur Bestimmung von t_r gibt es einen einfachen Ansatz von Johannesson *et al.* (1989), welcher sich aus der Division der maximalen Dicke durch die Schmelze an der Zunge ergibt. Unter Berücksichtigung der verwendeten Klimaszenarien, welche ausgehend von der Kontrollperiode (1980 – 2009) in jeweils 50 Jahre Abstände vorliegen (2021 – 2050 und 2070 – 2099), wurde entschieden, für alle Gletscher dieselbe 50-jährige Anpassungszeit zu verwenden. Für eine Berechnung der Gletscherausdehnung in 5-Jahres Zeitschritten konnte die gesamte Flächenänderung nach 50 Jahren in zehn Einzelschritte unterteilt werden. Die Geschwindigkeit des Flächenschwundes wird dadurch für die grössten Gletscher über- und für kleinere unterschätzt. Für die nachgeschaltete hydrologische Modellierung kann dieser Umstand von Vorteil sein, wenn es den Anstieg des Abflusses durch das *vertikale* Abschmelzens der Zunge ohne grosse Flächenänderung (*downwasting*) nicht berücksichtigt. Das GWL Reaktionsmodell erlaubt brauchbare Aussagen über das Mittel einer grossen Stichprobe, für Einzelgletscher können die Abweichungen gegenüber der Realität oder anderen physikalisch basierten Gletscherschmelzmodellen erheblich sein.

Während die Änderung der Gletscherfläche (bzw. Länge) verzögert erfolgt und sich als Reaktion auf ein vorgegebenes Klimasignal (d.h. GWL-Anstieg) einstellt, reagiert die GWL direkt und ohne Verzögerung auf die jeweiligen klimatischen Bedingungen. Da für das hydrologische Modell beide Angaben wichtig sind (Gletscherfläche und Fläche des Akkumulationsgebietes), mussten für beide Bereiche zeitversetzte Szenarien angewendet werden. Während sich die Gletscherfläche retrospektiv ändert (als Anpassung an eine vergangene Klimaänderung), folgt die Höhe der aktuellen GWL (um die Ausdehnung des Akkumulationsgebietes zu bestimmen) direkt den vorgegebenen Klimaszenarien und steigt für die Szenarien tief, mittel, bzw. hoch bis 2035, nach jeweils 5 Jahren jeweils um 10, 20 und 30 *m* an. Der weitere Temperaturanstieg nach dem Szenario nahe Zukunft (2021 – 2050) ist für alle Modellketten etwa gleich und ergibt einen zusätzlichen Anstieg der GWL um 200 *m* bis 2085 (Zeitraum ferne Zukunft). Die Gletscher hingegen reagieren ab 2035 auf den weiteren GWL Anstieg um 100, 200 bzw. 300 *m*.

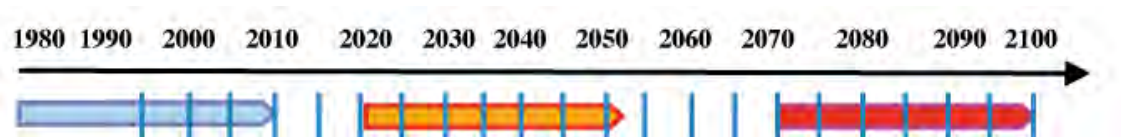


Abbildung 10: Zeitachse Kontrollperiode 1980 – 2009 (blau), Szenarien nahe 2021 – 2050 (orange) und ferne Zukunft 2070 – 2099 (rot)

4. Beschreibung des Inn Einzugsgebietes

Das Einzugsgebiet des Inn liegt im Osten der Schweiz und gehört zu den Regionen Süd- und Mittelbünden. Abbildung 11 zeigt die geographische Lage des Inn sowie die Kennzeichen für die einzelnen Teileinzugsgebiete.

Die Einzugsgebietsgrösse beträgt 1945 km^2 . Die Höhenstufen reichen von 1045 m bis knapp 4000 m ü.M., wobei gut 4% des Einzugsgebietes vergletschert sind (Morger, 2008). Der grösste Anteil der Fläche ist jedoch durch vegetationslosen Fels und Geröll (fast die Hälfte), gefolgt von subalpinen Wiesen (20%) und Nadelwäldern (13%) charakterisiert. Einer der bestuntersuchten Gletscher der Schweiz, der Morteratsch Gletscher, ist ein Teil des Inn Einzugsgebietes.

Das Engadin ist ein inneralpines Trockental mit für die grosse Höhenlage niedrigen Niederschlagszahlen von 1138 m/a . Das Einzugsgebiet des Inn ist stark durch Stauseen und Umleitungen der Abflüsse beeinflusst. Dies hat zur Folge, dass Vergleiche von beobachteten und simulierten Abflüssen des gesamten Gebietes nicht gemacht werden können, da der beobachtete Abfluss beim tiefsten Punkt in Martinsbruck nicht dem natürlichen Abfluss entspricht.

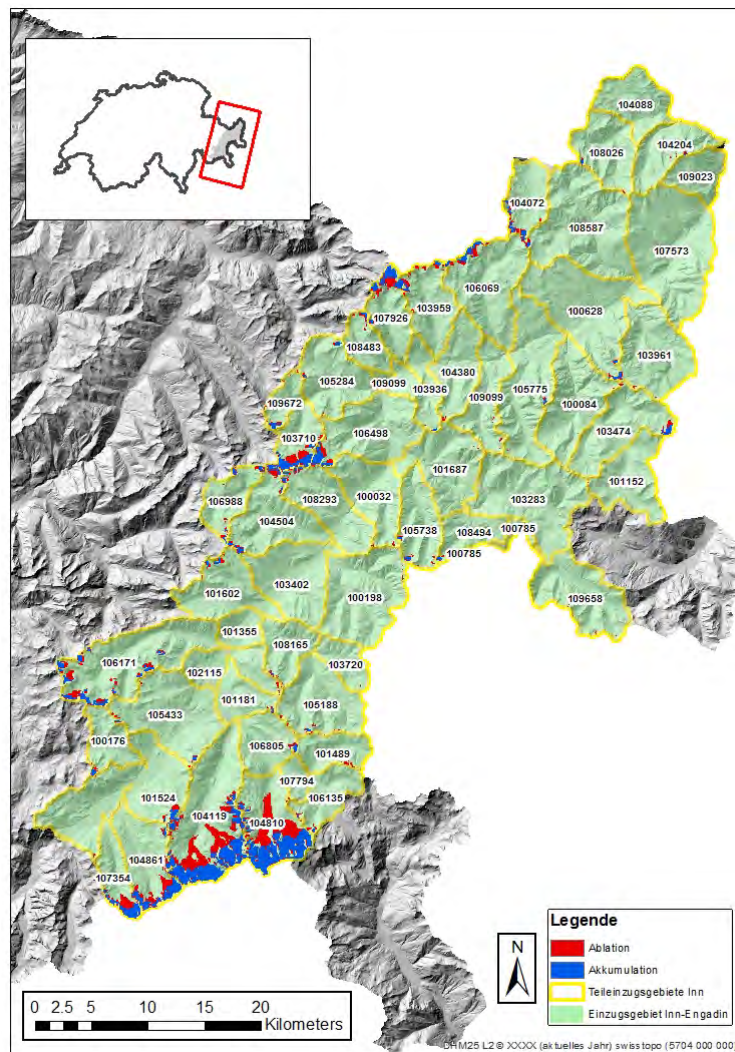


Abbildung 11: Teileinzugsgebiete des Inn-Einzugsgebietes im Engadin. Dargestellt ist auch die Veränderung der vergletscherten Fläche innerhalb der Kontrollperiode (1985-2009).

5 Ergebnisse

5.1 Klimaszenarien

An allen Temperatur- und Niederschlagsmessstationen der MeteoSchweiz wurden Jahrgänge des Klimaänderungssignals für die Temperatur (T) und Niederschlag (P) gemäss zehn GCM-RCM Modellketten für die Szenario Perioden 2021 – 2050 und 2070 – 2099 relativ zur Kontrollperiode 1980 – 2009 berechnet. Abbildung 12 zeigt exemplarisch den prognostizierten Jahrgang der Änderungssignale von T und P für die Station Samedan. Gemäss den verwendeten GCM-RCM Modellketten steigt die Temperatur am stärksten im Sommer und über dem Alpenbogen an. Für den Zeitraum 2021 – 2050 liegt der Temperaturanstieg bei 1.2°C ($0.6 - 1.9^{\circ}\text{C}$) und für den Zeitraum 2070 – 2099 bei 3.4°C ($2.5 - 4.2^{\circ}\text{C}$). Die Unsicherheit der Modellprojektionen ist ebenfalls im Sommer am grössten.

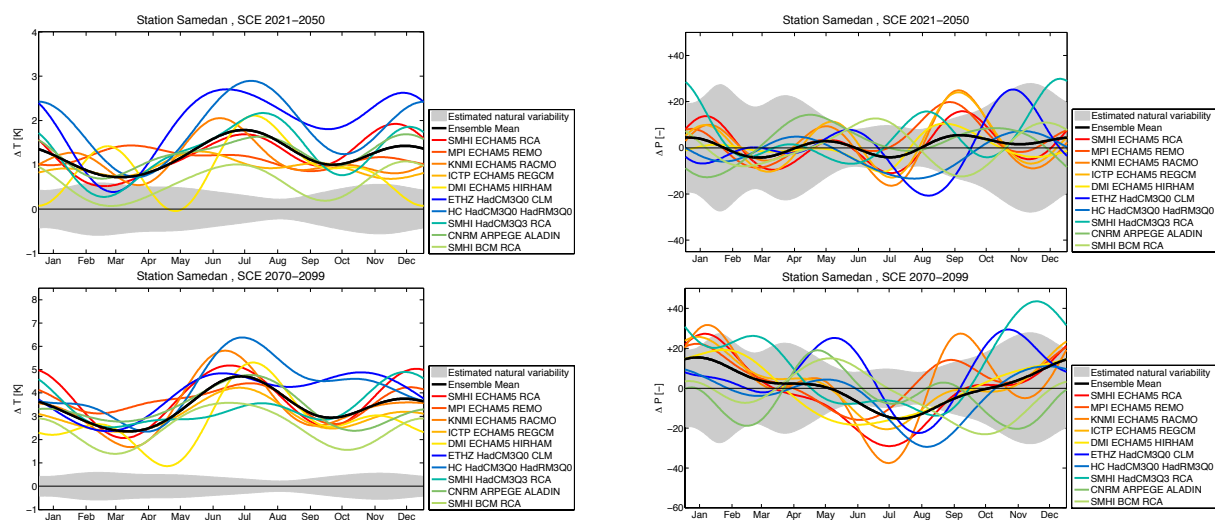


Abbildung 12: Jahrgang des Klimaänderungssignals der Temperatur (ΔT , links) und des Niederschlages (ΔP , rechts) an der Station Samedan für den Zeitraum 2021 – 2050 (oben) und 2070 – 2099 (unten) relativ zur Kontrollperiode 1980 – 2009. Die Änderungssignale basieren auf zehn GCM-RCM-Läufen des ENSEMBLES Projektes (van der Linden, P. & J. Mitchell 2009)

Die projizierten Temperaturveränderungen liegen deutlich ausserhalb der natürlichen Variabilität. Das heisst, das Temperaturänderungssignal kann trotz der grossen Unterschiede zwischen den Modellen nicht alleine durch die natürliche Variabilität erklärt werden und ist als robust zu betrachten.

Der Niederschlag weist gemäss den Modellrechnungen kein deutliches Signal für den Zeitraum 2021 – 2050 auf. Für den Zeitraum 2070 – 2099 zeigt das Modellensemble übereinstimmend eine deutliche Niederschlagsabnahme im Sommer, welche grösser als die natürliche Variabilität ist. Im restlichen Jahr ist eine leichte Zunahme des Niederschlages zu sehen. Diese Zunahme liegt jedoch bei den meisten Modellketten noch innerhalb der natürlichen Variabilität. Für den gesamten Jahresniederschlag der beiden Grosseinzugsgebiete heisst das im Durchschnitt keine Änderung für den Zeitraum 2021-2050 resp. eine leichte Abnahme (-3%) für den Zeitraum 2070-2099.

Ausführliche Angaben zu diesen Klimaszenarien sind verfügbar unter: <http://www.c2sm.ethz.ch/services/CH2011>

5.2 Validierung des hydrologischen Modells

Wie gut kann das hydrologische Modell PREVAH die aktuelle hydrologische Situation des Inns abbilden?

Für den Zeitraum 1980 – 2009 können wir die Modellsimulation anhand von Abflussmessungen des BAFU bei Tarasp (Inn), sowie Schneeprodukten des SLF überprüfen.

Im grossen und ganzen weist das Modell eine gute bis sehr gute Übereinstimmung mit den Schnee- und Abflussmessungen auf (Abbildung 13). Die saisonalen Schwankungen, aber auch die Unterschiede zwischen wasserarmen und wasserreichen Jahren werden realistisch widergegeben. Der Nash-Sutcliffe-Coefficient für den Abfluss liegt bei 0.6, was dem Modell eine gute Leistung attestiert (siehe auch Anhang A).

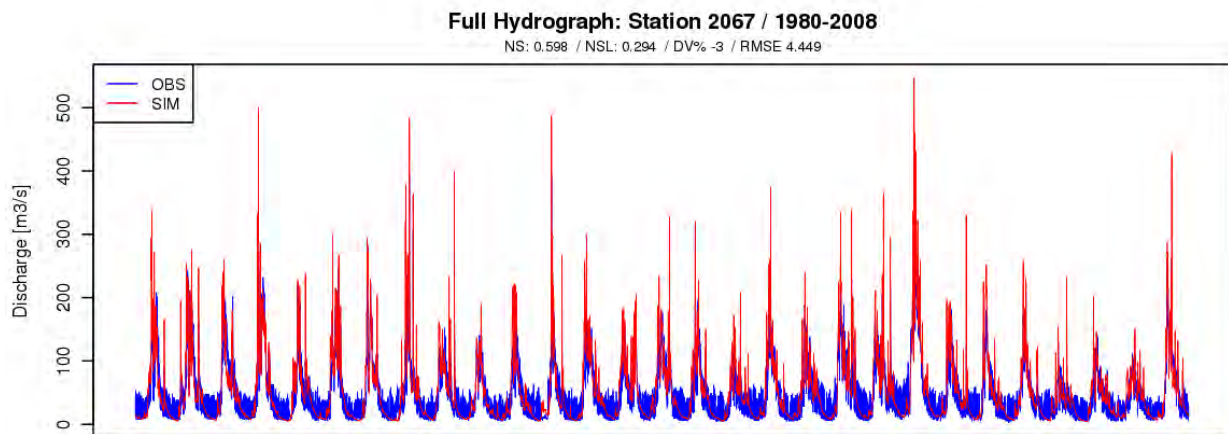


Abbildung 13: Simulierter (rot) und gemessener (blau) täglicher natürlicher Abfluss des Inns bei Martina über die gesamte Kontrollperiode 1980-2009.

In den meisten Teileinzugsgebieten simuliert das Modell die jährliche Abflussmenge mit einer Genauigkeit von $\pm 1.5\%$. Hier gilt zu berücksichtigen, dass bereits beim Niederschlagsinput in das Modell eine grosse Unsicherheit herrscht. Bei der räumlichen Interpolation der Niederschlagsmessstationen gehen wir von einer Unsicherheit in der gleichen Grössenordnung aus. Bei der Kalibrierung des Modelles werden mehrere Parameter angepasst, sodass die simulierten Abflussvolumina so nah wie möglich an der Beobachtung liegen.

Ein Vergleich mit einem kürzlich entwickelten Schneeprodukt des SLF (Jonas *et al.* 2009), welches sämtliche verfügbaren Schneefelderinformationen seit 1979 räumlich und zeitlich optimal interpoliert, deutet auf eine sehr befriedigende Simulation der Schneedecke innerhalb unterschiedlicher Höhenstufen. Wir können das mit einem Vergleich zwischen dem SLF-Produkt Alpine3D und unserer Simulation für das Grosseinzugsgebiet des Inn beispielhaft veranschaulichen (Abbildung 14). Schneearme (z.B. 2007) und schneereiche (z.B. 2001, 2009) Winter werden relativ gut differenziert. Der simulierte jährliche maximale SWE-Wert passt gut zum SLF-Produkt - besonders nach 2000.

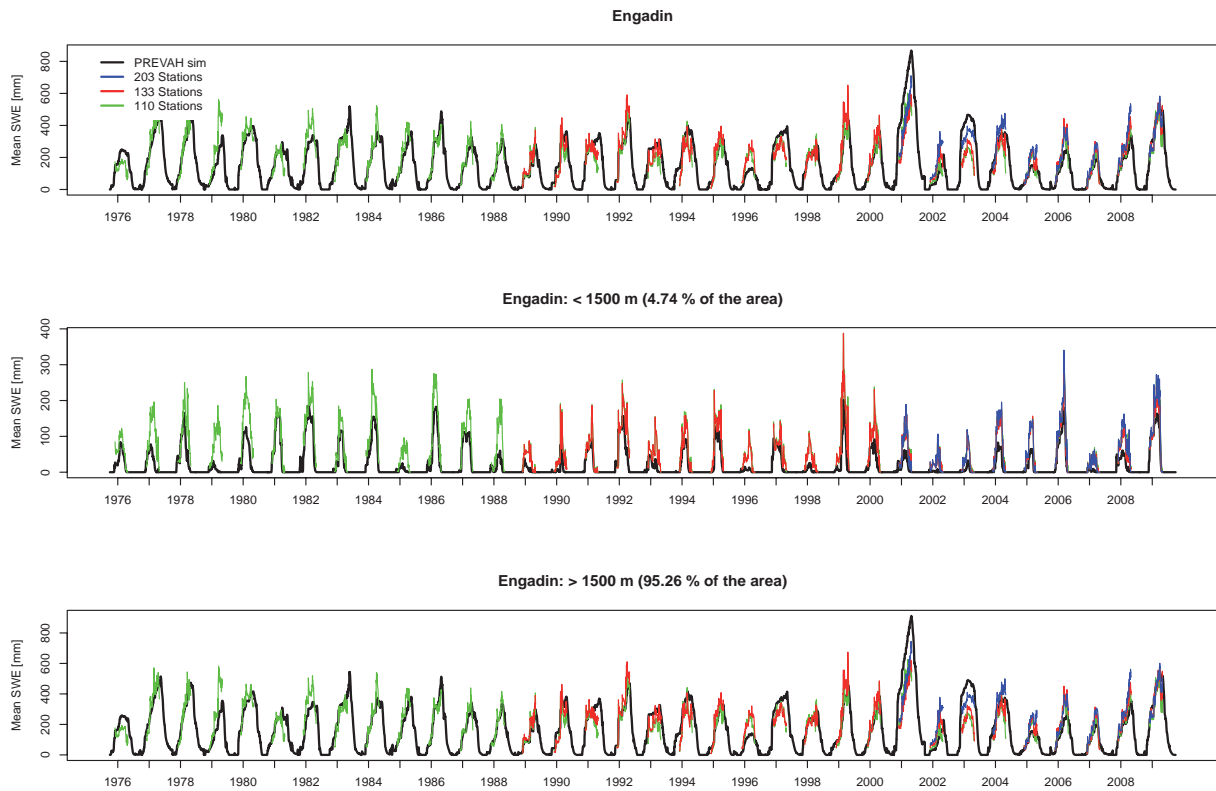


Abbildung 14: Simulierter (schwarz) und beobachteter (farbig) mittlerer Schneewasserwert des Engadins (oben: ganze Region; Mitte: unterhalb 1500 m ü.M.; unten: oberhalb 1500 m ü.M.) für den Zeitraum 1979 – 2009. (Grün: Interpolation aus 110 SLF-Messstationen; rot: 133 SLF-Messstationen; blau: 203 SLF-Messstationen)

5.3 Wasserhaushalt des Inn

Das Einzugsgebiet des Inn wird sich hinsichtlich seines Wasserhaushaltes aufgrund der globalen Temperaturerhöhung zukünftig verändern. Um die Grössenordnung der Veränderung der hydrologischen Parameter einordnen zu können, werden zunächst die Resultate der Jahressummen der hydrologischen Parameter anhand der Abbildung 15 bis Abbildung 17 diskutiert.

Sie zeigen die Prognosen für den korrigierten Niederschlag (P-korr), die Verdunstung (EREA), den Gesamtabfluss (RGES), die Gletscherschmelze (GLAC) und die Schneeschmelze (P-SME) unter Einbeziehung der Klimaszenarien A1B und A2 inklusive deren Unsicherheitsgrenzbereich (bspw. A2L - `low`, A2M - `mean`, A2U - `upper`). Es wird deutlich, dass die Jahressummen der Parameter eine relativ grosse Unsicherheit innerhalb der verwendeten Szenarien aufweisen. Im Folgenden wird vor allem auf die `mean` Prognosen eingegangen, da sie den Trend in der Zukunft mit grosser Wahrscheinlichkeit wiedergeben.

Jahressumme

Die Ergebnisse zeigen deutliche Veränderungen im Einzugsgebiet des Inn im Vergleich zur Kontrollperiode (CTRL: grün) 1980-2009. Die Parameter weisen im Laufe des Jahrhunderts einen signifikanten Trend hinsichtlich ihrer Jahressummen auf, welcher sich stetig stärker ausbildet.

Generell lässt sich anhand dieser Abbildungen feststellen, dass sich der Niederschlag zukünftig reduziert. Aufgrund der Temperaturerhöhung als Folge der globalen Klimaveränderung steigt zudem die Verdunstungsrate. Der Anteil der Gletscherschmelze

nimmt aufgrund der erhöhten Schmelzprozesse zunächst bis Mitte des Jahrhunderts leicht zu und nähert sich dem Jahressummenwert der Kontrollperiode an. Allerdings sinkt er aufgrund stark reduzierter vergletscherter Fläche gegen Ende des Jahrhunderts wieder. Ausserdem ist ein starker Rückgang der Schneeschmelze zu erkennen, da der Niederschlag durch die prognostizierte Temperaturerhöhung vermehrt als Regen anstatt als Schnee fällt. Als Folge der Veränderung der hydrologischen Einflussgrößen wird für den Gesamtabfluss in der Zukunft zunächst nur leichte, und dann eine signifikante Abnahme des Jahresabflusses prognostiziert (4% für den Zeitraum 2021 – 2050, 6% für den Zeitraum 2070 – 2099).

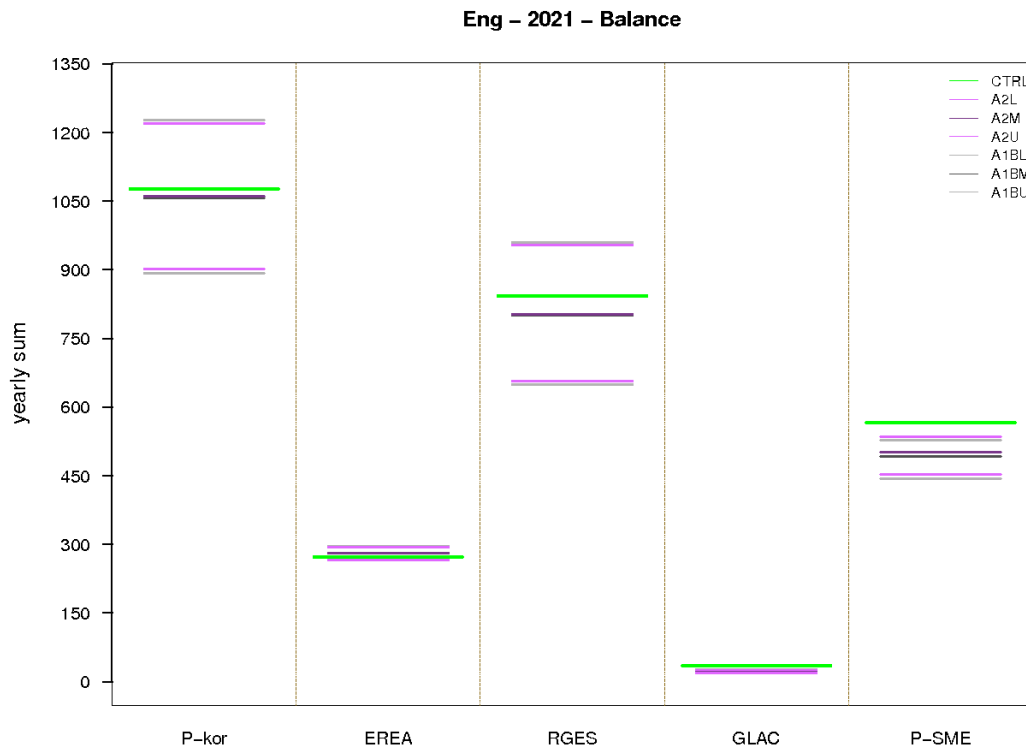


Abbildung 15: Natürlicher Wasserhaushalt des Engadins (2021 – 2050). Dargestellt sind die jeweiligen Parameter korrigierter Niederschlag (P-korr), Verdunstung (EREA), Gesamtabfluss (RGES), Gletscherschmelze (GLAC), Schneeschmelze (P-SME)

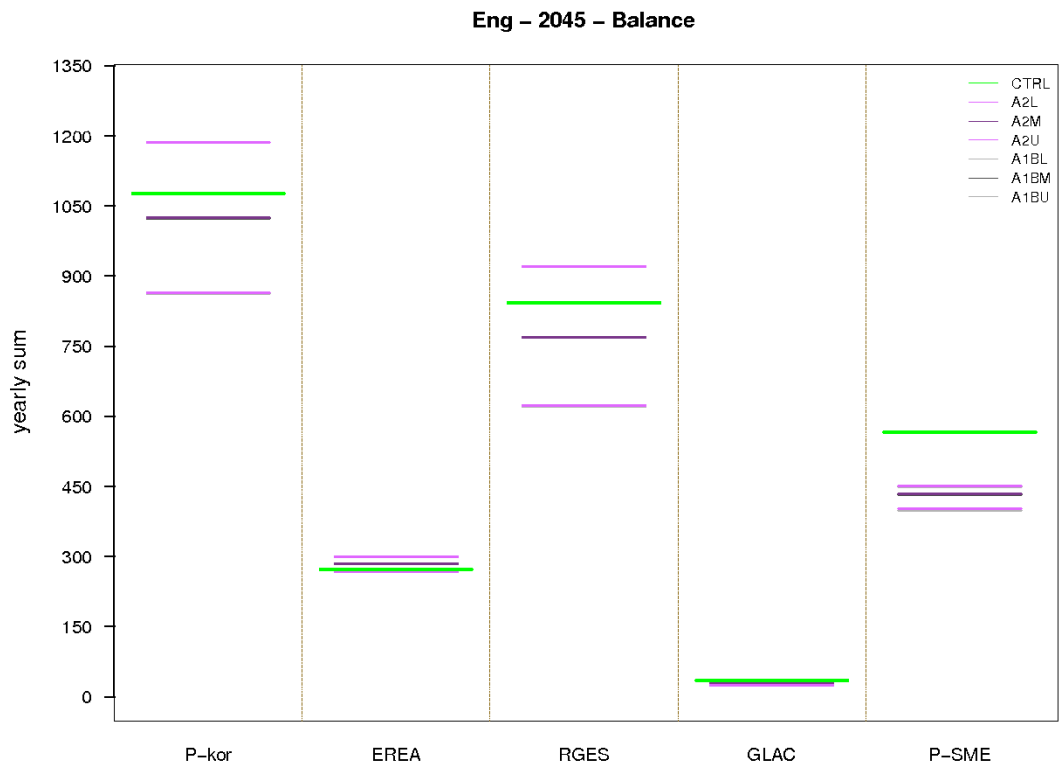


Abbildung 16: Natürlicher Wasserhaushalt des Engadins (2045 - 2075)

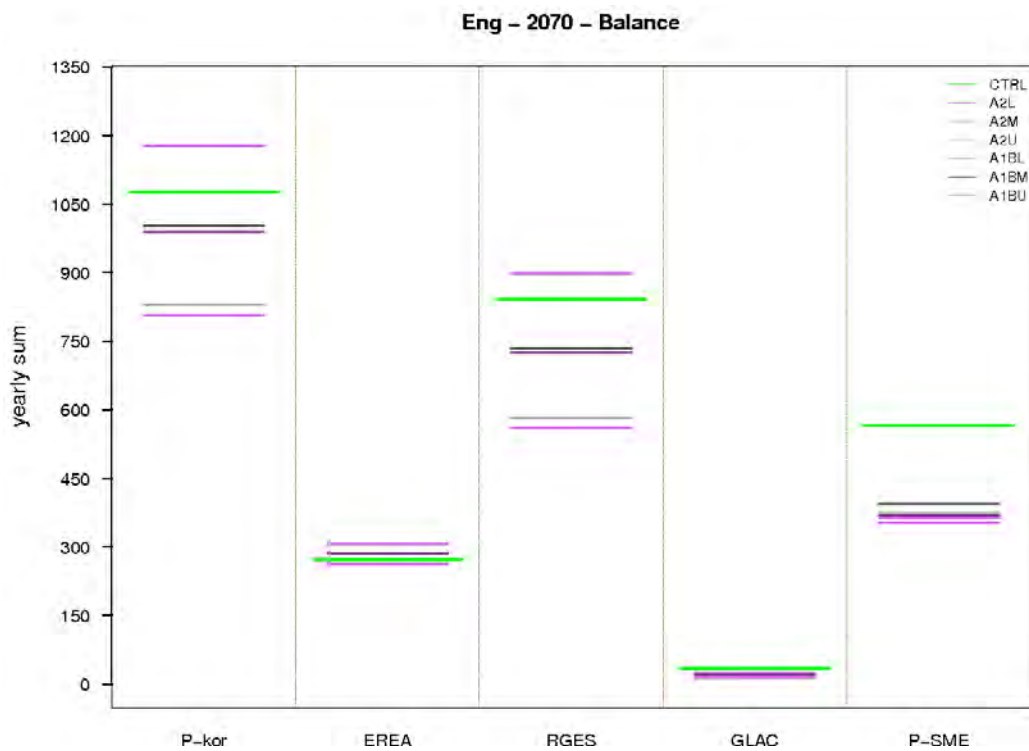


Abbildung 17: Natürlicher Wasserhaushalt des Engadins (2070 - 2099)

Jahresverlauf

Der Wasserhaushalt im Jahresverlauf zeigt anhand der Saisonkurven jedoch im Laufe des Jahrhunderts eine weitere starke Auffälligkeit gegenüber der Kontrollperiode auf (Abbildung 18 & Abbildung 19). Die Bilanz zeigt im Sommer aufgrund der hohen Gletscherschmelze einen starken negativen Trend bis Mitte des Jahrhunderts. Bis zum Ende des Jahrhunderts ist diese negative Bilanz in der Jahresbetrachtung rückläufig.

Gering positive Werte liegen im Frühjahr (Mai) aufgrund der ersten Schneeschmelze vor, wobei diese Werte ab Juni stets negativer werden bis sie ihr Minimum im August erreichen. Dieses Minimum verschiebt sich jedoch zeitlich nach vorne und tendiert von Anfang-Mitte August zu Ende Juli.

Denn sobald die Schneeressourcen geschmolzen sind, verursachen erhöhte Schmelzraten der Gletscher eine negative Bilanz in den vergangenen Jahrzehnten. Da diese langfristigen Wasserspeicher in Form von Gletschern durch Niederschläge in Form von Schnee und dadurch durch Akkumulation von Schnee nicht mehr ausgeglichen werden können und die Gletscher somit zunehmend rückläufig sind, wird der Beitrag zum Abfluss stets geringer. Dieses Verhalten äussert sich besonders in den Sommermonaten, in denen die Prognosen eine geringere negative Bilanz des zukünftigen Wasserhaushaltes zeigen. Die Wasserbilanz im Jahresverlauf wird aus diesem Grund in der Zukunft zusehends ausgeglichener und weist signifikant einheitlichere Werte auf.

Vereinfacht deutet dieses Verhalten auf eine Speicherleerung von langfristigen Wasserressourcen, welche durch den starken rückläufigen Beitrag zum Abfluss zukünftig einen ausgeglichenen Wasserhaushalt im Jahresverlauf verursachen.

Um die Auswirkungen für die hydrologischen Parameter im Jahresverlauf festzustellen, werden in den folgenden Kapitel deren Saisonkurven beschrieben.

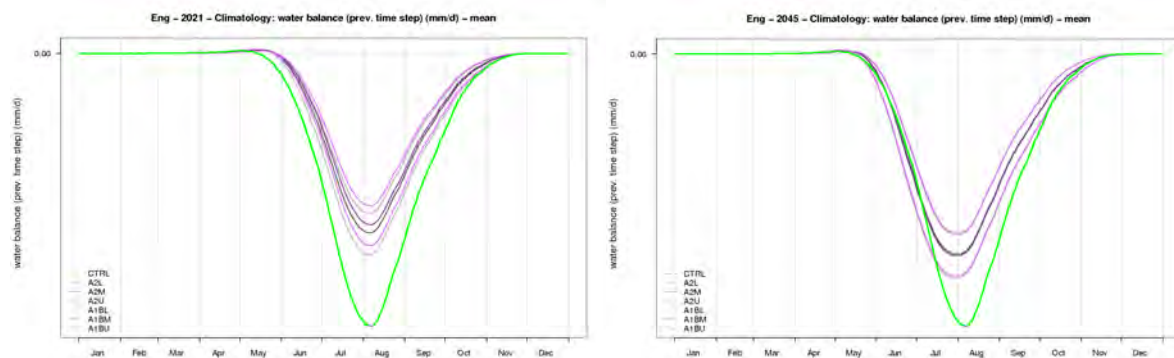


Abbildung 18: Veränderung des Wasserhaushaltes im Jahresverlauf (mm/d) für die Perioden 2021-2050 (links) sowie 2045-2070 (rechts). Auffällig ist die rückläufige negative Bilanz im Sommer.

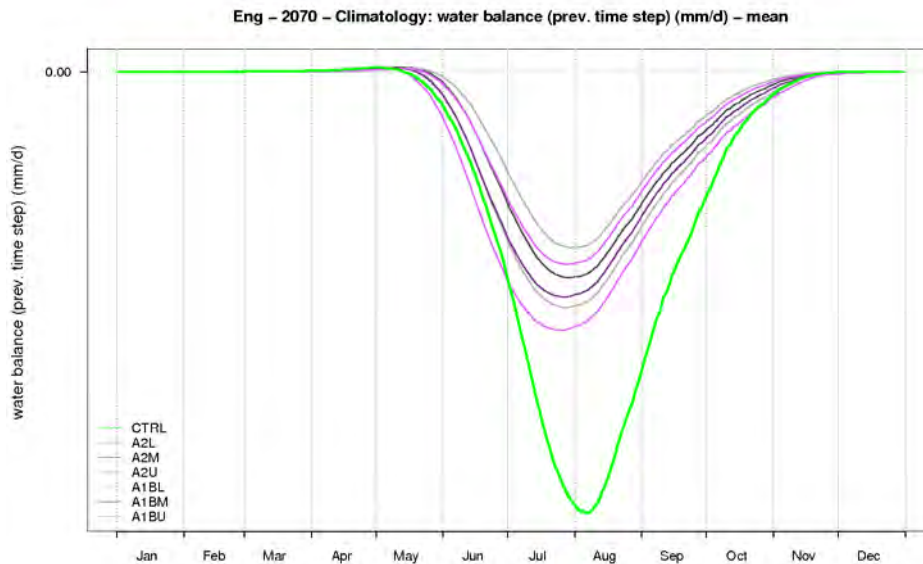


Abbildung 19: Veränderung des Wasserhaushaltes im Jahresverlauf (mm/d) für die Perioden 2070-2099. Auffällig ist die rückläufige negative Bilanz im Sommer.

5.3.1 Erwartete Veränderung des Abflussverhaltens

Um die Auswirkungen für die hydrologischen Parameter im Jahresverlauf festzustellen, werden in den folgenden Kapiteln deren Saisonkurven beschrieben. Als Gesamtergebnis der sich verändernden Teilkomponenten der Wasserbilanz (Gletscher, Schnee, Bodenwasserspeicher und Verdunstung) resultieren aus unseren Analysen die in Abbildung 20 dargestellten Jahresabflüsse.

Für den Zeitraum 2021 – 2050 werden sich in einem *durchschnittlichen* Jahr die höchsten Abflüsse mengenmässig kaum verändern. Auffällig ist jedoch die zeitliche Verschiebung der Jahresganglinie, wobei sich die höchsten Jahresabflusswerte um ca. drei bis fünf Wochen nach vorne verschieben, d.h. Anfang Juni anstatt Mitte Juni. Diese Tendenz wird sich für den Zeitraum 2070 – 2099 noch weiter verstärken und von heutigem Peak Mitte Juni vier Wochen früher ca. Mitte Mai auftreten.

Aus diesem Grund wird sich die Abflussmenge im Sommer im Vergleich zur heutigen Situation generell reduzieren, wobei im Einzugsgebiet des Inn die geringsten Werte weiterhin im Winter (Januar- Februar) auftreten werden. Eine leichte Erhöhung wird dagegen für das Frühjahr sowie eine leichte Reduktion im Spätsommer prognostiziert.

Die gesamte jährliche Abflussmenge wird in einem Normaljahr (je nach Klimamodellkette) gegenüber der Referenzperiode für die nahe Zukunft um 2.5%, resp. für die ferne Zukunft um 6.4% abnehmen. Die hohe Spannweite zeigt die Unsicherheit, welche durch die Fortpflanzung der zehn Klimaszenarien im hydrologischen System entsteht.

In extrem *wasserreichen* Jahren werden die hohen Abflüsse im Sommer für den Zeitraum 2021 – 2050 wahrscheinlich leicht zunehmen. Für den Zeitraum 2070 – 2099 sind die verschiedenen Modellketten diesbezüglich widersprüchlich. Tendenziell ist das Abflussmaxima im Sommer um 25% reduziert, weist hingegen eine starke Erhöhung zwischen 50-70% für die Herbst- und Wintermonate auf. Es besteht jedoch eine grosse Unsicherheit bei den Abflussberechnungen für die Herbst- und Wintermonate. Hier weichen die verschiedenen Modellketten stark voneinander ab.

Eindeutig ist jedoch der Trend zu höheren Abflüssen in diesen Jahreszeiten, wo künftig die Akkumulation der Schneedecke später beginnt und vermehrt Niederschlag in flüssiger Form vorkommen dürfte. In Jahren mit besonderer Wasserknappheit dürften sich die niedrigsten Abflüsse gegenüber der heutigen Situation nur geringfügig verändern.

Diese zeitliche sowie Verschiebung des Abflussverhaltens hat gewisse Auswirkungen auf das Hoch- bzw. Niedrigwasserverhalten des Inn und wird im Abschnitt 5.5 Probabilistische Extremereignisse näher diskutiert.

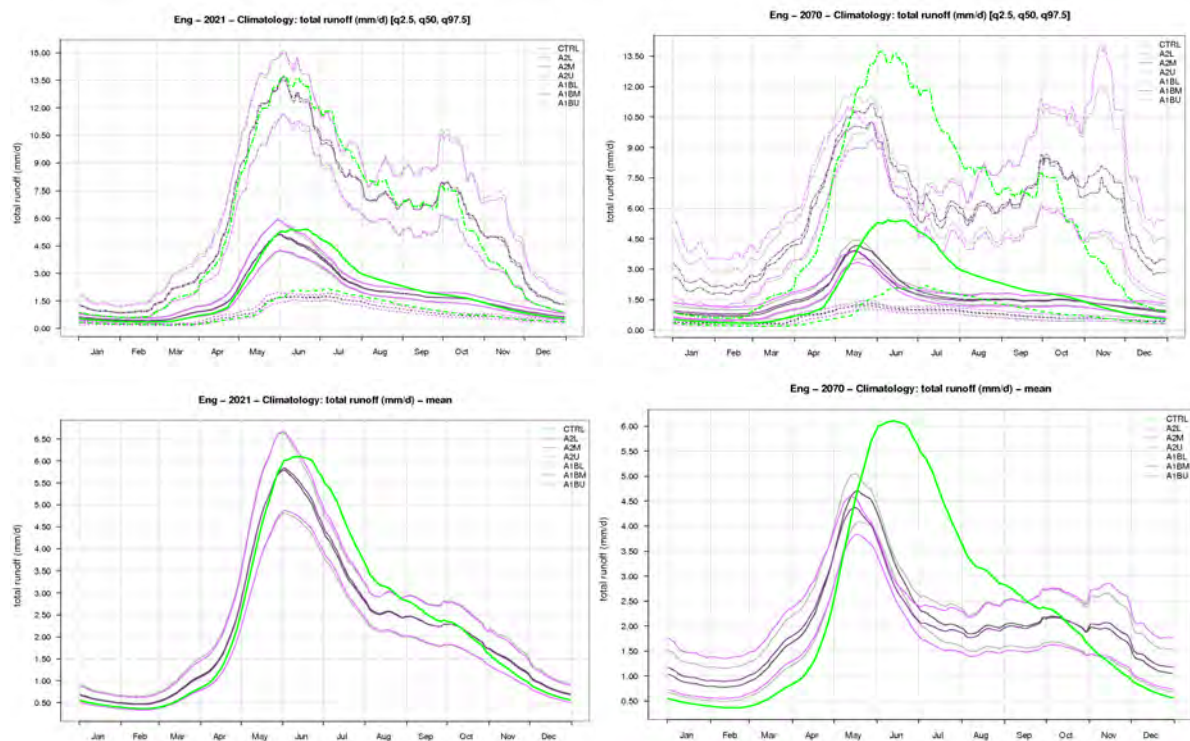


Abbildung 20: Berechnete Veränderung in der Klimatologie des natürlichen Abflusses des Inn [mm/Tag] für den Zeitraum 2021 – 2050 (links) und den Zeitraum 2070 – 2099 (rechts), dargestellt für den Median, das 97.5- und 2.5%-Quantil des Engadins sowie der prognostizierte Mittelwert. Die grüne Linie entspricht der Referenz-Simulation für den Zeitraum 1980 – 2009

5.3.2 Erwartete Veränderung der Schneedecke

Die zu erwartende Erwärmung des Klimas wird im Einzugsgebiet des Inns zu einer bedeutenden Veränderung der Schneedecke führen (Abbildung 21). Das jährliche Schneewasserspeicher-Maximum wird sich zwar zeitlich nur geringfügig nach vorne verschieben (1 – 2 Wochen für den Zeitraum 2070 – 2099), mengenmässig wird aber eine durchschnittliche Reduktion des jährlichen Schneewassersmaximums (je nach Klimamodellkette) von 20 – 50% für den Zeitraum 2021 – 2050, resp. von 50 – 60% für den Zeitraum von 2050 – 2099 erwartet.

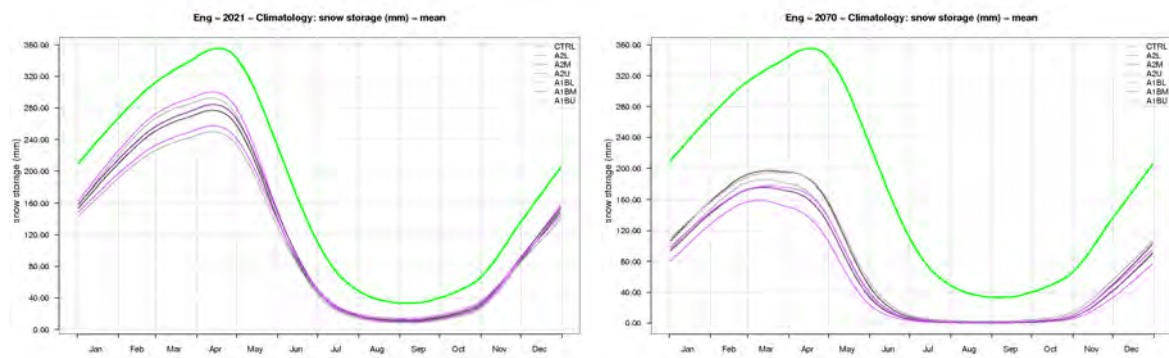


Abbildung 21: Berechnete Veränderung in der Klimatologie des Schneewasserwertes [mm] für den Zeitraum 2021 – 2050 (links) und 2070 – 2099 (rechts), dargestellt den Mittelwert für das Engadin. Die grüne Linie entspricht der Referenz-Simulation für den Zeitraum 1980 – 2009

Die Streuung des jährlichen maximalen Schneewasserwertes zwischen schneearmen und schneereichen Wintern bleibt für den Zeitraum 2021 – 2050 ähnlich gross wie bisher, nimmt dann für den Zeitraum 2070 – 2099 markant ab. Das bedeutet zugleich, dass dann auch in seltenen extrem schneereichen Wintern keine grössere Schneewassermenge als 1000 mm zu erwarten sein wird.

5.3.3 Beobachtete und erwartete Veränderung der Gletscherflächen

Die Gletscher der Alpen reagieren stark auf Änderungen des Klimas. Nach einem zwischenzeitlichen Vorstoss der Gletscher in den 1980er Jahren ist ein allgemeiner Rückgang und ein damit verbundener Massenverlust beobachtet worden. Im Einzugsgebiet des Inn wird sich die Gletscherfläche ebenfalls reduzieren. Im Jahr 1973 betrug die Gletscherfläche 75.7 km², was einem Flächenanteil von gut 4% entspricht. Leider liegen keine aktuellen Messungen oder Abschätzungen des totalen Gletscher-Eisvolumens vor.

Mit der prognostizierten Klimaerwärmung wird ein weiterer Rückgang der Gletscherfläche erwartet (Abbildung 22). Unter Annahme des Emissionsszenarios A1B dürfte sich bis Mitte des Jahrhunderts die vergletscherte Fläche im Einzugsgebiet des Inn im Engadin auf gut 2% reduzieren (40.7 km²). Für den Zeithorizont bis Ende Jahrhundert berechnet das Modell der Universität Zürich eine Reduktion auf 1% (18.5 km²).

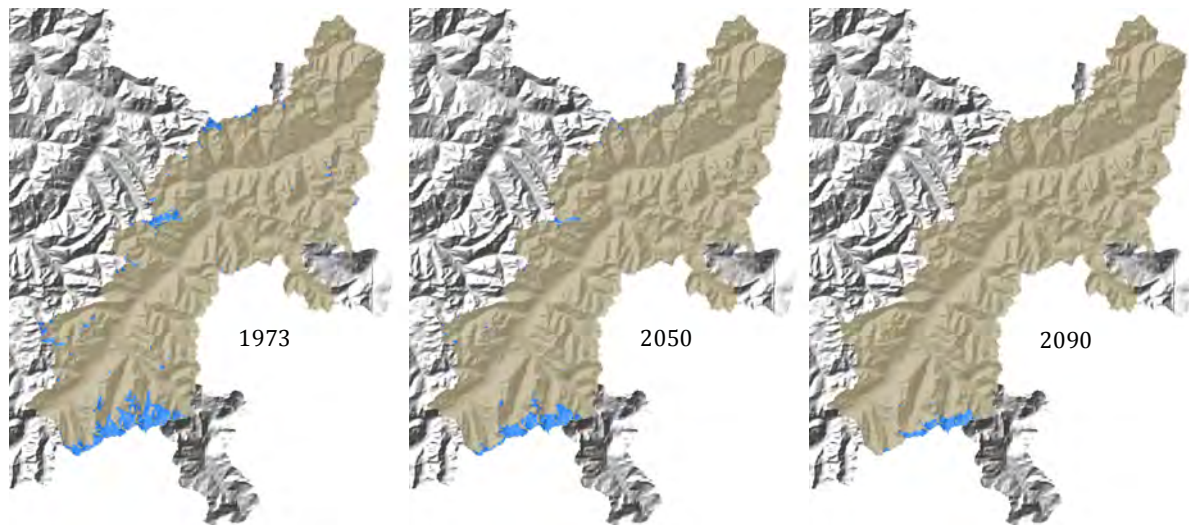


Abbildung 22: Veränderung der Gletscherfläche im Einzugsgebiet des Inn. Links: berechnete Gletscherfläche Stand 1973; Mitte: prognostizierte Gletscherfläche für 2050; rechts: für 2090

5.3.4 Erwartete Veränderung der Gletscherschmelze

Die tägliche Eisschmelze hängt indirekt mit der Gletscherfläche zusammen. Allerdings nimmt die Menge an Gletscherschmelzwasser nicht parallel zur Gletscherfläche ab, da die steigenden Temperaturen im Verlauf dieses Jahrhunderts dem Effekt kleinerer Gletscherflächen entgegenwirken.

Die Plots in Abbildung 23 zeigen die Gletscherschmelze im Engadin innerhalb des Kalenderjahres für die Kontrollperiode (1985-2009) sowie für die Prognosen anhand der verwendeten Szenarien A2 und A1B. Zusätzlich werden die Wahrscheinlichkeitsbereiche der Berechnungen anhand von Quantilen angegeben.

Die Prognose für die Periode 2021 – 2050 zeigt einen Rückgang der Gletscherschmelze gegenüber dem Referenzzeitraum 1980 – 2009 von 20 – 55%. Die Gletscherschmelze zeigt eine leichte Verzögerung im Vergleich zur Kontrollperiode und würde laut der saisonalen Mittelwerte (Abbildung 23 unten links) später im Mai einsetzen. Die maximale Eisschmelze dürfte weiterhin Anfang August auftreten. Die jährliche Schmelzperiode dürfte weiterhin jeweils bis im November anhalten.

Etwas anders präsentiert sich das Bild für den Zeitraum 2070 – 2099. Bei der jährlichen Gletscherschmelze resultiert im Mittel eine Abnahme der Gletscherschmelze von beinahe 50% (Abbildung 23 unten rechts). Diese Schmelzrate fällt damit deutlich niedriger aus als für die Periode 2021 – 2050 und lässt auf einen erhöhten Gletscherrückgang schliessen. Zusätzlich rückt das Datum der maximalen Eisschmelze nach vorne. In einigen Modellen ist dies mit einer markanten Zunahme der Gletscherschmelze in den Monaten Juni/Juli gegenüber der Referenzperiode 1980 – 2009 gekoppelt. Umgekehrt ist in den Monaten August – Oktober ein Rückgang der Schmelze zu verzeichnen. Zu beachten gilt hingegen, dass die Gletscherverbreitungs-Szenarien für das Ende des Jahrhunderts mit ziemlich grossen Unsicherheiten behaftet sind.

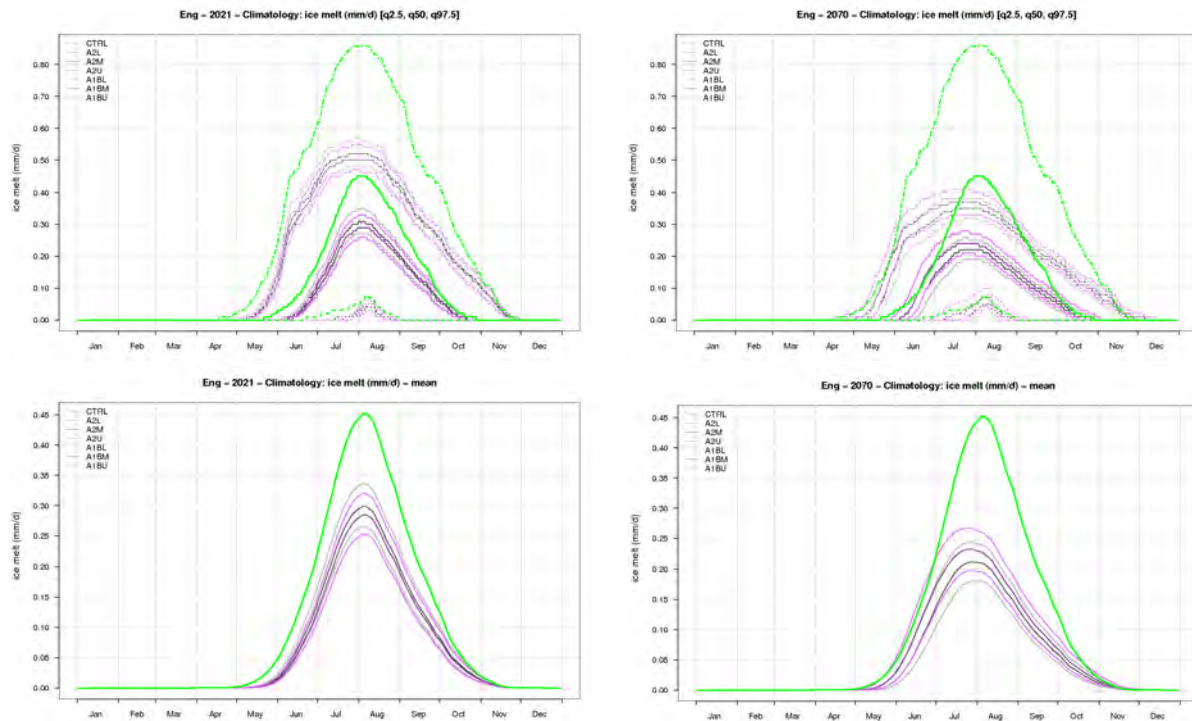


Abbildung 23: Berechnete Veränderung in der Klimatologie der Gletschereisschmelze [mm] für den Zeitraum 2021 – 2050 (links) und 2050 – 2099 (rechts), dargestellt für den Median, das 97.5%- und das 2.5%-Quantil (oben) und den Mittelwert (unten) des Engadins (Szenario-Kürzel inkl. „L“-low, „M“-mean, „U“-upper Quantile). Die grüne Linie entspricht der Referenz-Simulation für den Zeitraum 1980 – 2009.

5.3.5 Erwartete Veränderung der Verdunstung und Bodenfeuchte

Eine Änderung des Klimas wird auch Auswirkungen auf die Verdunstung und die Wasserspeicherung im Boden haben, denn jährlich verdunsten im Einzugsgebiet des Inn ca. 25% des gesamten Jahresniederschlags.

Die Berechnungen des Modelles PREVAH sind jedoch in alpinen Einzugsgebieten mit grossen Unsicherheiten behaftet, da v.a. die Verdunstung grosser Variabilität unterliegt. Dennoch stimmt die Grössenordnung der Berechnungen gut mit Angaben des hydrologischen Atlas der Schweiz überein (Tafel 4.1).

Obwohl die Evaporation in der Summe zukünftig keine grosse Veränderung zeigt, ist eine deutliche Erhöhung im gesamten Jahresverlauf erkennbar. Bereits im März werden erhöhte Verdunstungswerte prognostiziert, welche sich bis Juli konstant erhöhen und ihr Maximum Mitte Juli erreichen. Dieser Wert weicht nur gering von der Kontrollperiode ab. Jedoch ist generell mit einer grösseren potentiellen Verdunstung im Frühling sowie einer geringeren Erhöhung im Herbst zu rechnen.

Im Vergleich zur Unsicherheit im Modell und zum Anteil an der jährlichen Wasserbilanz sind die zu erwartenden Veränderungen in der Verdunstung gering (Abbildung 24). Für den Zeitraum 2021 – 2050 berechnet das Modell eine Zunahme der jährlichen Verdunstung um ca. 9 mm oder 3.5%; für den Zeitraum 2070 – 2099 um ca. 18 mm oder 6.5%. Auch bezüglich der im Boden gespeicherten Wassermenge gibt es eine grosse Unsicherheit. Grundlage für die Berechnung der temporären Bodenwasserspeicherung in dem Inn-Gebiet ist eine angenommene Beziehung zwischen Landnutzung und Bodenkennwerten.

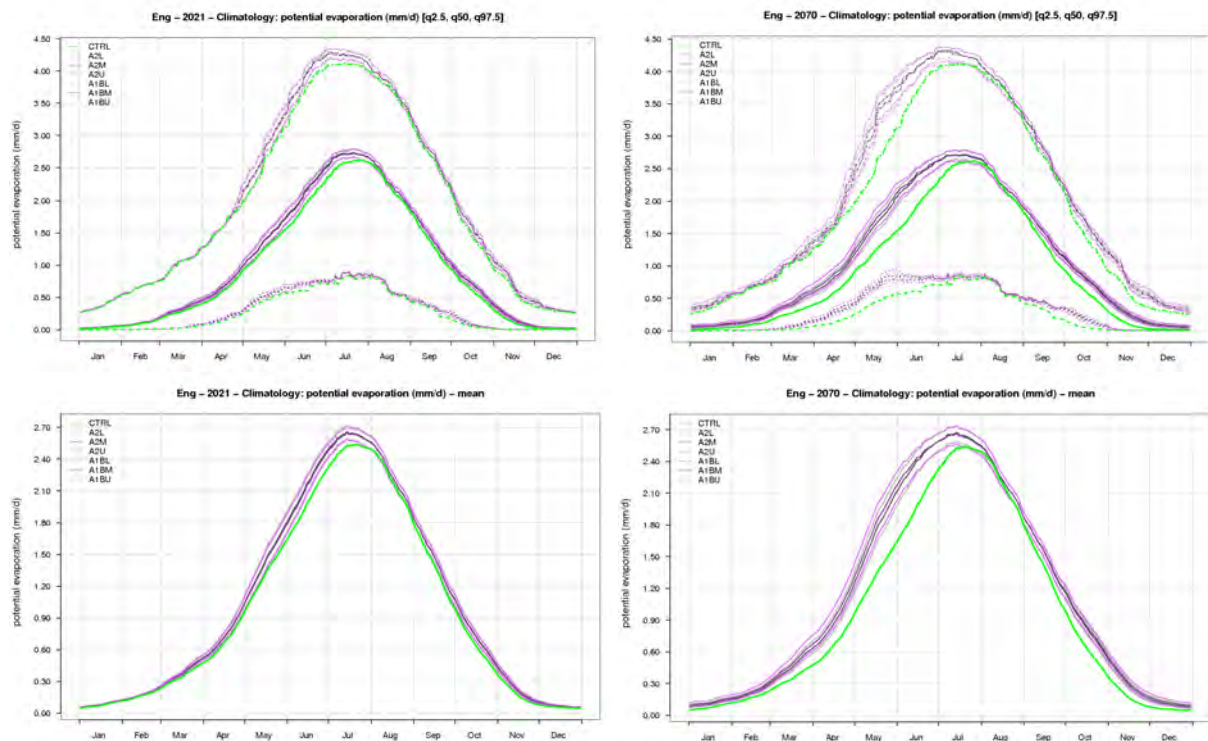


Abbildung 24: Berechnete Veränderung in der Klimatologie der potentiellen Evaporation [mm] für den Zeitraum 2021 – 2050 (links) und 2050 – 2099 (rechts), dargestellt für den Median, das 97.5%- und das 2.5%-Quantil (oben) und den Mittelwert (unten) des Engadins (Szenario-Kürzel inkl. „L“-low, „M“-mean, „U“-upper Quantile). Die grüne Linie entspricht der Referenz-Simulation für den Zeitraum 1980 – 2009.

Gemäss unseren Ergebnissen hinsichtlich der Verdunstung dürfte sich auch eine Veränderung in der Bodenfeuchte einstellen. Dieses hat besonders Einfluss auf das pflanzenverfügbare Bodenwasser (Abbildung 20), welches ebenfalls einen deutlichen Trend für die Zukunft zeigt.

Im Vergleich zur Kontrollperiode sinkt der Wert des pflanzenverfügbaren Bodenwassers bis zum Ende des Jahrhunderts signifikant. Bereits zu Beginn der Vegetationsperiode im März bis Dezember reduziert sich das pflanzenverfügbare Bodenwasser merklich und setzt nicht nur zeitlich bereits früher ein, sondern hat bis in den Frühwinter verminderte Werte. Dieser saisonale Trend wird sich in Zukunft stark auf die lokale Vegetation auswirken. Jedoch sind die Unsicherheiten bezüglich des pflanzenverfügbaren Bodenwassers relativ gross und können deswegen grosse Abweichungen aufweisen.

Die prognostizierten Werte einer erhöhten Verdunstung und einer reduzierten Bodenfeuchte im Jahresverlauf zeigen ein problematisches Verhalten für die Zukunft auf. Denn mit der Temperaturerhöhung steigt die Verdunstungsrate, welche vor allem im Sommer einen reduzierten Bodenwassergehalt verursacht. Zusammenhängend mit der geringeren prognostizierten Schmelzwassermenge für die Sommermonate wird dieses Verhalten ausschlaggebende Auswirkungen für die natürliche Vegetation, aber auch für Nutzpflanzen und Landwirtschaft haben, wobei verstärkt mit Wasserstress im Sommer innerhalb der Vegetationsperiode zu rechnen ist.

Für die Winterperiode sind erhöhte Verdunstungs- sowie reduzierte Bodenfeuchtwerte bis Ende des Jahrhunderts prognostiziert. Da aber aufgrund der geringeren Temperatur, der vermehrten Niederschläge in Form von Regen sowie der Vegetationsruhe ein geringer Wasserverbrauch stattfindet, ist in nass-feuchten, regenreichen Perioden (Spätherbst-Winter) mit gesättigten Böden zu rechnen, welche Hochwasser verstärkt mit herbeiführen können.

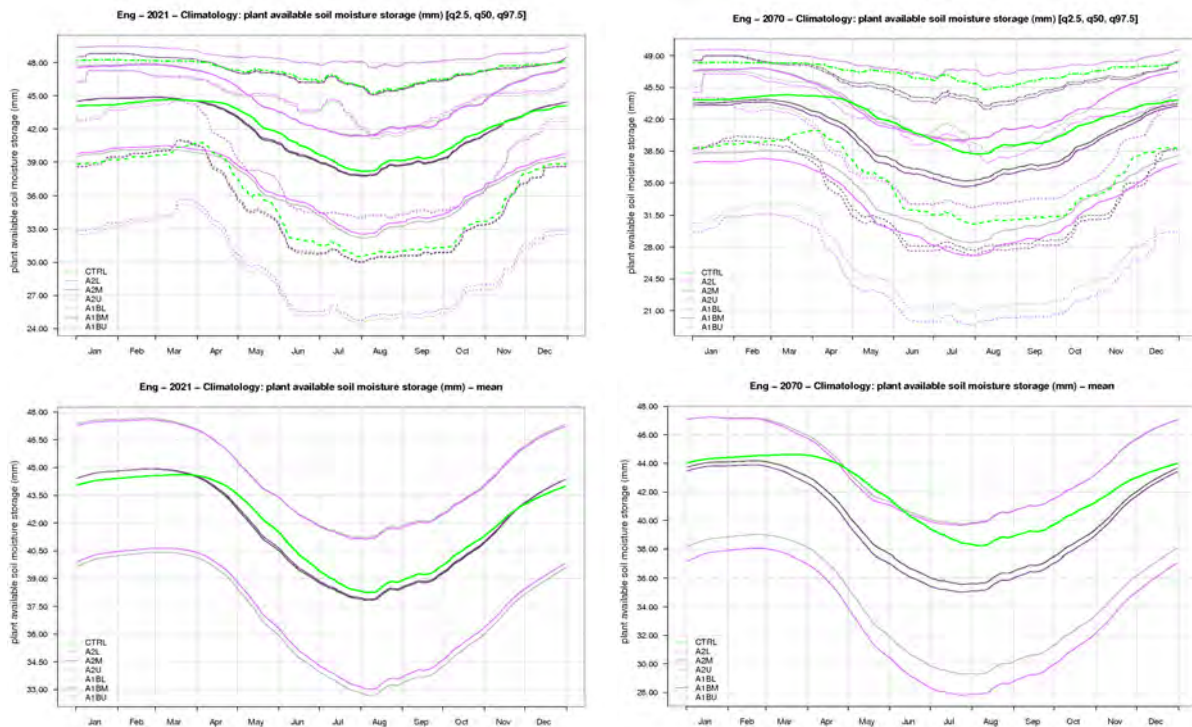


Abbildung 25: Berechnete Veränderung in der Klimatologie des pflanzenverfügbaren Bodenwassers [mm] für den Zeitraum 2021 – 2050 (links) und 2050 – 2099 (rechts), dargestellt für den Median, das 97.5%- und das 2.5%-Quantil (oben) und den Mittelwert (unten) des Engadins (Szenario-Kürzel inkl. „L“-low, „M“-mean, „U“-upper Quantile). Die grüne Linie entspricht der Referenz-Simulation für den Zeitraum 1980 – 2009. Zu beachten ist die Verschiebung der y-Achse für die zwei Prognosezeiträume.

5.4 Wasserhaushalt der Teileinzugsgebiete des Inn

Das Einzugsgebiet des Inn im Engadin wurde in dieser Studie in seine Teileinzugsgebiete gegliedert. Jedem Einzugsgebiet ist eine BAFU-Kodierung zugewiesen, welche in folgendem Kapitel aus den Karten ersichtlich wird.

5.4.1 Ist-Werte der Hydrologischen Variablen

Im folgenden Abschnitt werden die hydrologischen Variablen Niederschlag, Evapotranspiration, Gesamtabfluss, Schnee- und Gletscherschmelzanteil des natürlichen Wasserhaushaltes als langjährige Mittel der Kontrollperiode 1980 – 2009 für das Engadin und seiner Teileinzugsgebiete anhand von Karten dargestellt. zeigt die Teileinzugsgebiete des Inn sowie die Gletscherausdehnung um 1985.

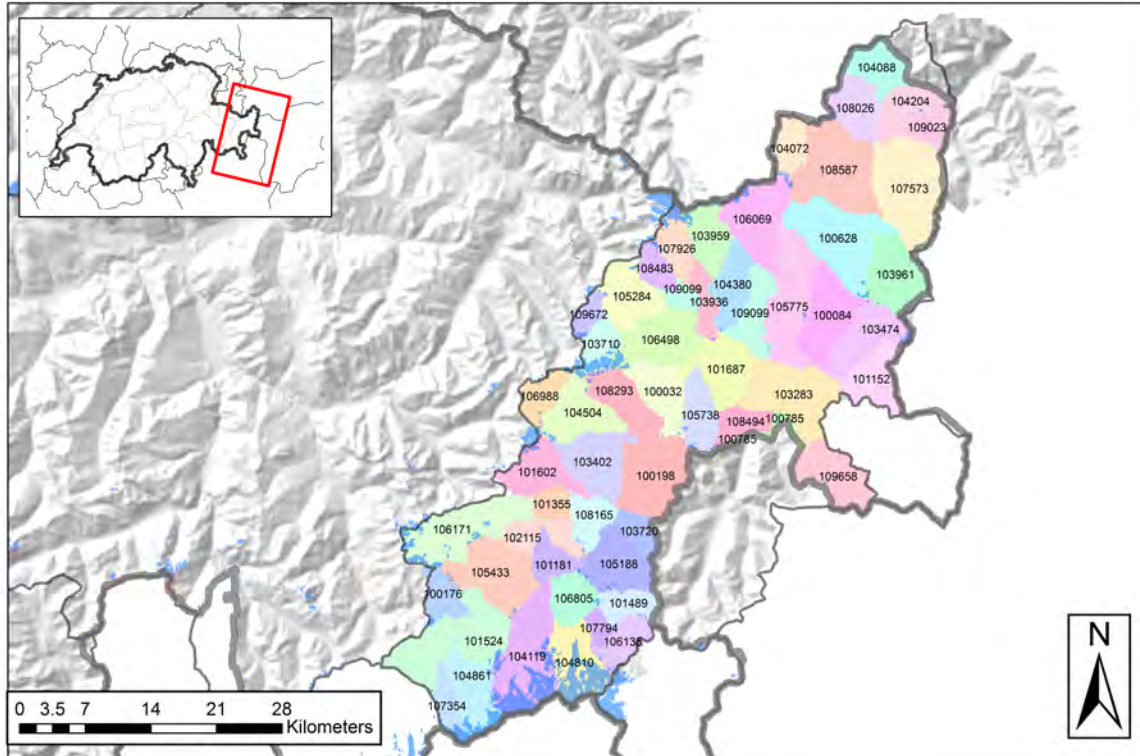


Abbildung 26: Die Teileinzugsgebiete des Inn im Engadin. Die Zahlencodes verweisen auf die Kodierung der Teileinzugsgebiete, welche auch in den nachfolgenden Tabellen aufgeführt werden. In blau ist die Gletscherausdehnung um 1985 ersichtlich.

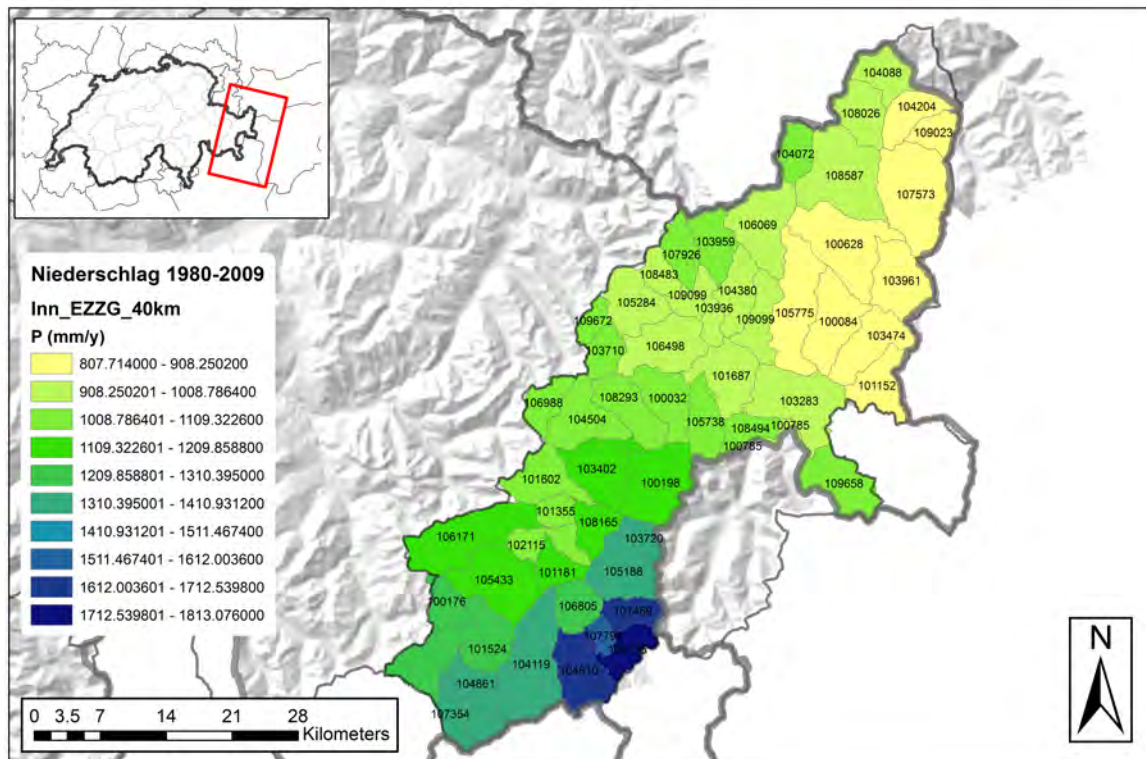


Abbildung 27: Die Teileinzugsgebiete des Inn im Engadin. Dargestellt ist der jährliche Niederschlag der Kontrollperiode 1980 – 2009. Die Berninaregion weist die höchsten Niederschlagsmengen (in blau) auf, welche die nordöstlichen Einzugsgebiete im Unterengadin um 100% übersteigen (in gelb); der Grossteil der Engadiner EZGs weisen Werte zwischen 1000 und 1400 Millimeter pro Jahr auf.

Der Niederschlag für die Kontrollperiode 1980 – 2009 aller Engadiner Teileinzugsgebiete weist eine grosse Streuung auf, welche einem deutlichen Gradienten folgt (). In dunkelblau sind die höchsten mittleren jährlichen Niederschlagsmengen im Bereich von 1800 mm dargestellt, welche sich auf die Berninaregion beschränken. Im Gegensatz dazu weisen die Unterengadiner Einzugsgebiete auf der rechten Seite des Inns nur die Hälfte dessen auf, was im Berninamassiv anfällt, nämlich zwischen 800 – 900 mm pro Jahr (in gelb dargestellt). Die meisten Teileinzugsgebiete weisen grüne Farben auf, welche auf jährlichen Niederschlagsmengen zwischen 1000 und 1500 Millimeter hinweisen; einzig die Corvatschregion sowie die Engadiner Teileinzugsgebiete oberhalb von Pontresina und Livigno liegen durch die Höhenlage (3000 m ü.M.) im Bereich von 1600 mm/y.

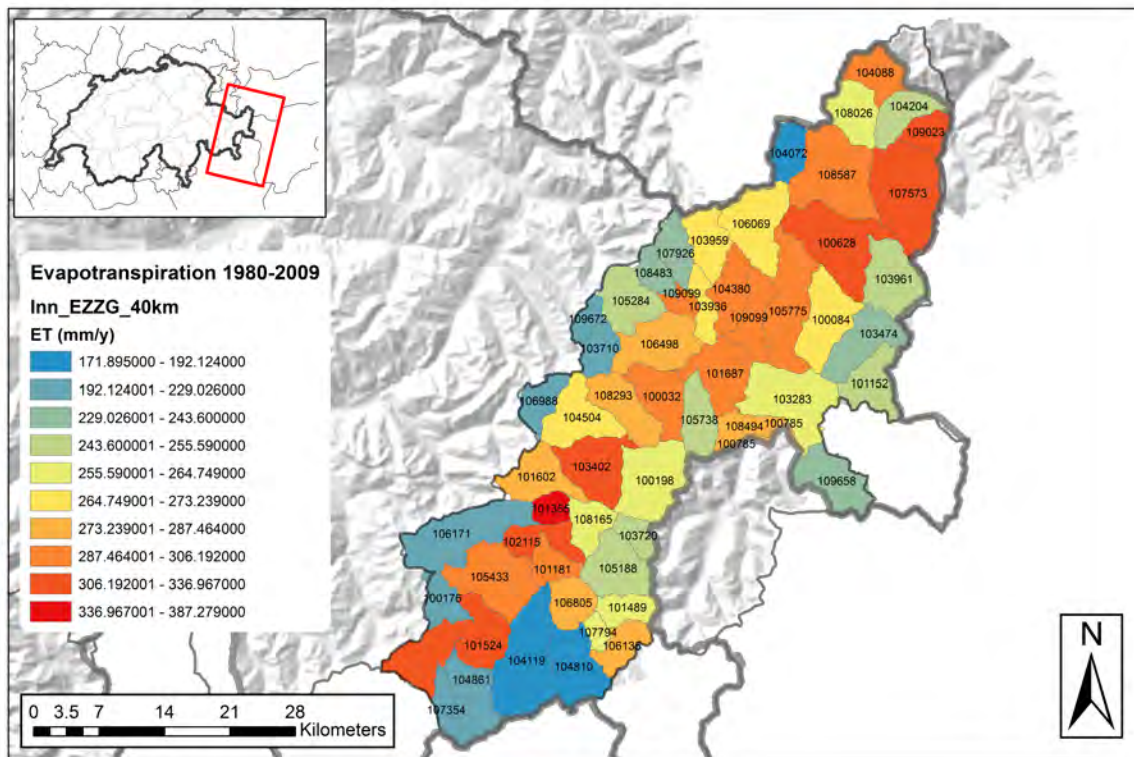


Abbildung 28: Die Teileinzugsgebiete des Inn im Engadin. Dargestellt ist die Evapotranspiration für die Kontrollperiode 1980 – 2009. Die höher gelegenen Einzugsgebiete weisen relativ geringe Werte (in blau) um 200 Millimeter pro Jahr, tiefer gelegene EZGs im Talboden bis gegen 400 (in rot) auf.

In Abbildung 28 ist die Evapotranspiration für die Teileinzugsgebiete dargestellt. Unter Evapotranspiration wird die Summe aus Transpiration (Verdunstung von Wasser aus der Pflanzenwelt) und Evaporation (Verdunstung aus dem Boden und von Wasseroberflächen) verstanden.

Anhand der Karte ist deutlich ersichtlich, dass die Evapotranspiration einem Höhengradienten folgt, welcher stark von der Vegetation beeinflusst ist. Die höchsten Werte mit bis gegen 400 Millimeter pro Jahr konzentrieren sich auf die Teileinzugsgebiete im Talgrund, wohingegen die niedrigsten Werte in den höchsten Lagen anzufinden sind, welche einen schwachen Pflanzenbewuchs bis zu Karland und demzufolge niedrige jährliche Verdunstungswerte aufweisen (bis zu 200 mm/y). Die Teileinzugsgebiete der Oberengadiner Seen fallen durch sehr hohe Evapotranspirationswerte auf. Bedingt durch die grossen Wassermassen kann deutlich mehr verdunstet werden, als normalerweise für diese Höhenlage erwartet würde.

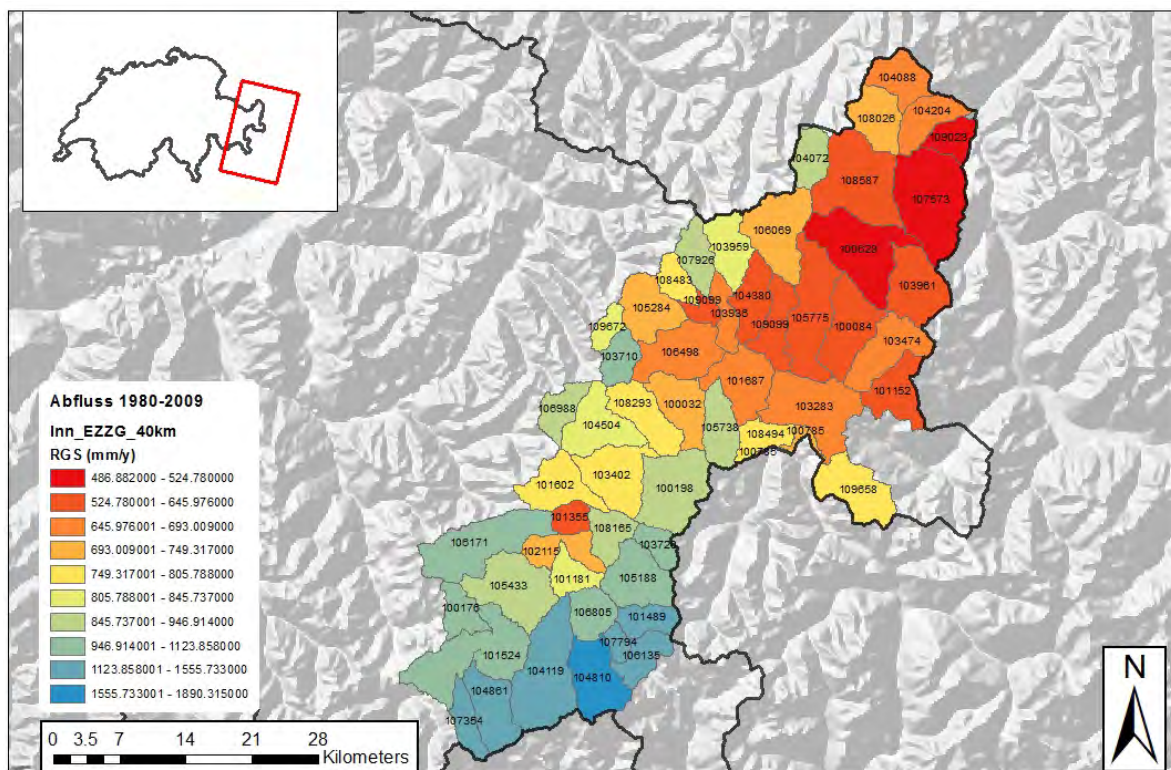


Abbildung 29: Die Teileinzugsgebiete des Inn im Engadin. Dargestellt ist der Gesamtabfluss in Millimeter pro Jahr. Blau eingefärbte Einzugsgebiete weisen einen durchschnittlichen Jahresabfluss von ca 500 mm/y auf, in rot dargestellte EZGs können vereinzelt bis gegen 2000 mm/y pro Jahr Wasser abfliessen. Gut ersichtlich ist ein Gradient vom Ober- ins Unterengadin resp. wird die Höhenlage bedeutend.

Die Abbildung 29 mit den jährlichen Gesamtabflüssen zeigt ein konträres Bild der Evapotranspiration (Abbildung 28) in den Engadiner Teileinzugsgebieten. Je höher das Einzugsgebiet liegt, desto höher sind die Abflüsse pro Jahr (gemittelt über die Jahre 1980 – 2009). Die Abflüsse in den tieferen Lagen (Unterengadin) liegen mehrheitlich unterhalb von 700 mm/y, wohingegen die jährlichen Abflüsse aus den vergletscherten Gebieten des Oberengadins Werte deutlich oberhalb von 1500 mm/y aufzeigen. Hier wird ersichtlich, dass diese Teileinzugsgebiete viel grössere Niederschlagsmengen (vgl. Abb.27) erhalten, weniger als in tieferen Lagen verdunstet wird und dementsprechend eine grössere Menge im Abfluss resultiert.

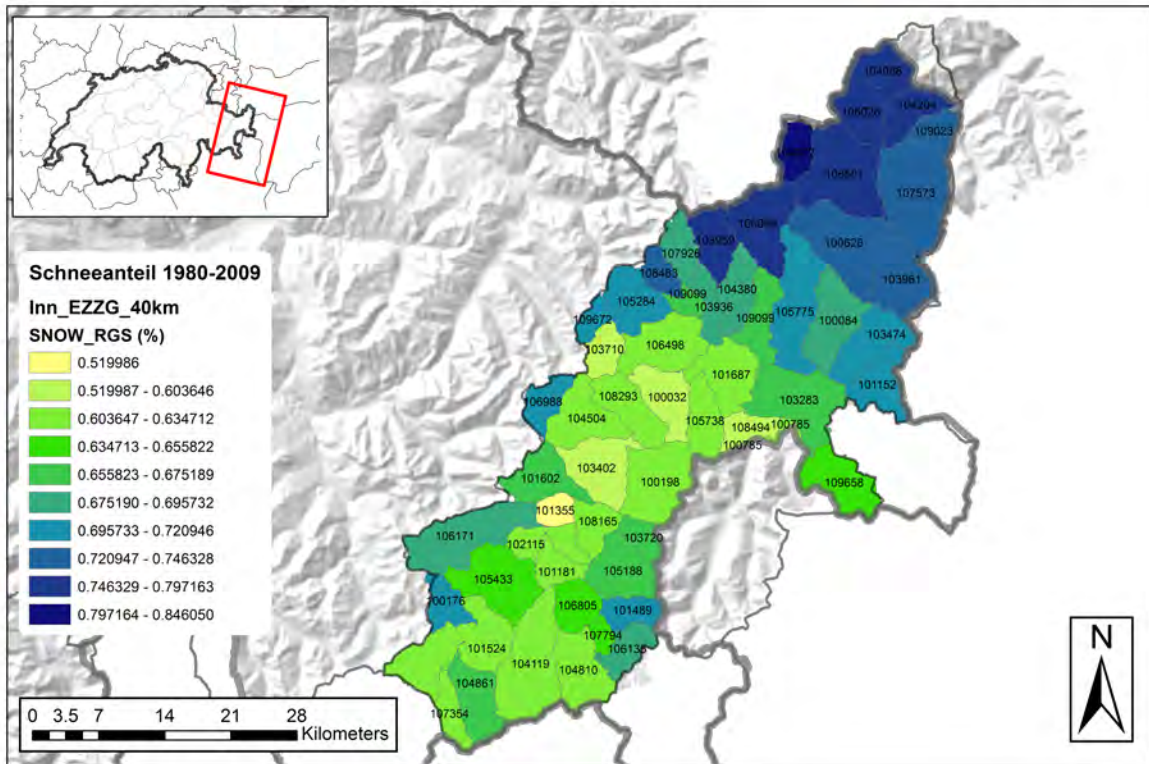


Abbildung 30: Die Teileinzugsgebiete des Inn im Engadin. Dargestellt ist der Anteil der Schneeschmelze am Gesamtabfluss. Der Abfluss in gelben Einzugsgebieten wird zu 50% durch Schneeschmelze bestimmt, in dunkelblau eingefärbten EZGs kann der Gesamtabfluss bis zu 85% durch den Schneeanteil gespeist werden.

Betrachtet man den Anteil der Schneeschmelze am Gesamtabfluss, irritiert der erste Blick allenfalls. Wieder ist ein Höhengradient erkennbar, jedoch in umgekehrter Richtung. Die höchsten Schneeschmelzanteile am Abfluss (über 80%) sind im Unterengadin zu finden, wohingegen die Anteile aus den am stärksten vergletscherten Gebieten bis um 30% tiefer liegen. Bedingt durch den deutlich tieferen Niederschlag und Gesamtabfluss, die höher ausfallende Verdunstung in den Unterengadiner Teileinzugsgebieten nimmt die Schneeschmelze einen grösseren Anteil am Gesamtabfluss ein, da trotz der eher tieferen Lage während der Kontrollperiode der gesamte Winterniederschlag in Form von Schnee gefallen ist und die geringen Sommerniederschläge weniger zu Buche schlagen. So lässt sich auch erklären, warum in den Oberengadiner Teileinzugsgebieten die Schneeschmelzanteile geringer ausfallen: die Niederschläge sowie die Abflüsse sind höher und die Verdunstung tiefer, daher liefen die Anteile der Schneeschmelze am Gesamtabfluss um 10 – 15% tiefer als in den nördlichen Teileinzugsgebieten des Inns.

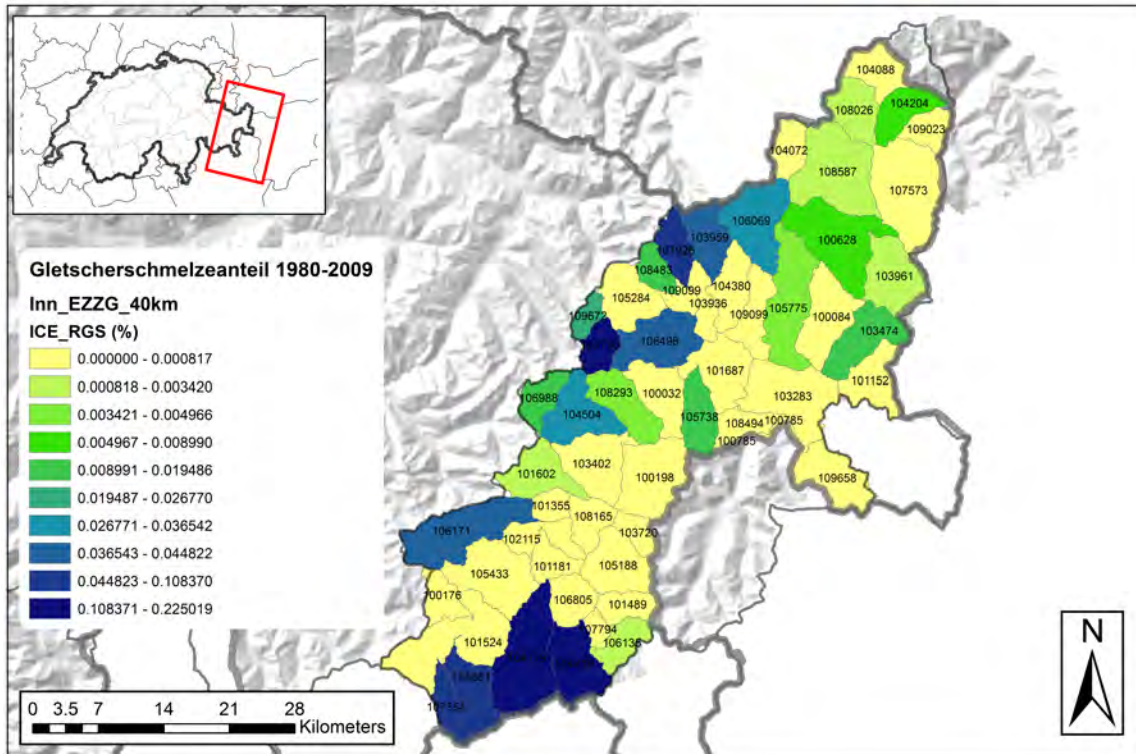


Abbildung 31: Die Teileinzugsgebiete des Inn im Engadin. Dargestellt ist der Anteil der Gletscherschmelze am Gesamtabfluss. Der Abfluss in gelben Einzugsgebieten kommt aus unvergletscherten Gebieten, in blau eingefärbten EZGs kann der Gesamtabfluss bis zu 20% durch Gletscherschmelze gespeist werden.

Der Anteil der Gletscherschmelze am Gesamtabfluss zeigt ein klares und verständliches Bild auf, wenn die Kontrollperiode 1980 – 2009 betrachtet wird. Anteile zwischen 4 – 22% am Gesamtabfluss sind nur in den Teileinzugsgebieten zu verzeichnen, welche auch effektiv aus vergletscherten Gebieten gespeist werden. Diese sind namentlich die Regionen um die Bernina, den Corvatsch, Julier, Sarsura, Grialetsch und Piz Buin. Alle anderen Teileinzugsgebiete schlagen mit keinen oder vereinzelt vernachlässigbar kleinen Werten im Unterpromillebereich zu Buche.

5.4.2 Szenarien der hydrologischen Variablen im Engadin

Die nachfolgenden Tabellen geben eine Übersicht des natürlichen Wasserhaushaltes zu den oben dargestellten hydrologischen Variablen Niederschlag, Evapotranspiration, Abfluss, Schnee- und Gletscherschmelzanteil sowie die Gesamtbilanz, welche für die drei Szenarioperioden 2021 - 2050, 2045 - 2075, 2070 - 2099 und die beiden Emissionsszenarien A1B sowie A2 für den Inn zu erwarten sind. Die Tabellen beinhalten einerseits die Werte pro Teileinzugsgebiet, andererseits sind sie zusätzlich eingefärbt, um die Einzelwerte im Verhältnis zum gesamten Einzugsgebiet des Inns vergleichen zu können: rote Farben weisen im Vergleich zum Engadin auf tiefere, blaue hingegen auf höhere Werte hin; und je bunter (Chromatizität) die Farbe, desto stärker weicht der Wert im Vergleich zum Engadin ab.

Die Karten der bis Abbildung 31 werden in der untenstehenden Tabelle nochmals zusammengefasst, um einen gesamtheitlichen Überblick zwischen den Teileinzugsgebieten innerhalb der Kontrollperiode 1980-2009 zu ermöglichen. Am auffälligsten sind die Einzugsgebiete aus den vergletscherten Regionen des Bernina, Corvatsch, Grialetsch und Sarsura, welche mit hohen Gletscherschmelzanteilen zum Gesamtabfluss beitragen (blau eingefärbt) und dementsprechend mit hohen negativen Werten in der Bilanz herausstechen (rot eingefärbt).

Deutlich zeigt sich auch, dass diese Gletscher innerhalb der Kontrollperiode nicht im Gleichgewicht sind und massiv mehr Abfluss aufgrund der hohen Schmelzrate produzieren als durch den Niederschlag kompensiert werden könnte. Beispielhaft für einen starken Gletscherschmelzanteil ist das rot eingefärbte Berninagebiet (Nr. 104810, Bilanz:-444 mm/y). Werden die Werte dieses Einzugsgebietes 104810 (ID_BAFU_40) beispielhaft für die zukünftigen Perioden und Emissionsszenarien mit der aktuellen Situation verglichen, werden folgende Veränderungen ersichtlich: Der Jahresniederschlag nimmt im laufenden Jahrhundert kontinuierlich ab (die Chromatizität der blauen Farbe sinkt entsprechend in der Tabelle). Durch den zu erwartenden Temperaturanstieg bis zum Ende des 21. Jahrhunderts steigt die Evapotranspiration trotz der Höhenlage und dem geringen pflanzlichen Bewuchs leicht an. Im Gegenzug verringert sich der Gesamtabfluss deutlich, da sich der Schneeschmelzanteil um 50% (heute: 63%, Ende des Jahrhunderts im A2 Emissionsszenario bei 45%) verringert.

Am deutlichsten bewegt sich die negative Gesamtbilanz des exemplarischen Teileinzugsgebiet der Bernina in der Mitte des Jahrhunderts: Der Gletscherschmelzanteil wird bis dahin bedingt durch den Temperaturanstieg um bis zu 45% (von heute 23% auf 29%) ansteigen, wohingegen die Niederschläge abnehmen. Gegen Ende des Jahrhunderts werden die Gletscher ein neues Gleichgewicht finden, in dem sich die Gleichgewichtlinie in höhere Bereiche verschiebt. Weitere auffällige Teileinzugsgebiete sind aufgrund ihrer Vergletscherung die Sarsura (Piz Sarsura) und Susasca (Piz Vadret) sowie die La Clozza (Piz Buin).

Der Schmelzwasseranteil der Gletscher am Gesamtabfluss reguliert sich wieder auf das heutige Niveau, wodurch sich die Schmelze, die Gletscherausdehnung sowie deren Masse reduziert, sodass weniger Eis schmelzen kann.

Tabelle 1: Natürlicher Wasserhaushalt der Engadiner Einzugsgebiete (S01 – S55, BAFU Datensatz 40 km²) sowie das gesamte Einzugsgebiet des Engadins (politische Grenzen) für die Kontrollperiode 1980 – 2009. P: Niederschlag; ET: Evapotranspiration; RGS: Gesamtabfluss; SNOW_RGS: Schneeschmelze [in % vom Abfluss]; ICE_RGS: Gletscherschmelze [in % vom Abfluss]; Bil: Bilanz [P – RGS – ET]

ID_BAFU_40	Kürzel_WSL	P [mm/y]	ET [mm/y]	RGS [mm/y]	SNOW_RGS [%]	ICE_RGS [%]	Bil [mm/y]
Gesamtgebiet	Eng200	1076.9	272.0	843.3	67%	4%	-38.3
100032	S01	1031.0	290.1	749.0	60%	0%	-8.1
100084	S02	865.6	270.7	597.7	70%	0%	-2.9
100176	S03	1304.7	225.8	1086.7	72%	0%	-7.9
100198	S04	1209.0	263.8	946.9	62%	0%	-1.8
100628	S05	807.7	330.1	486.9	73%	1%	-9.2
100785	S06	998.6	277.6	723.3	63%	0%	-2.2
101152	S07	896.5	252.6	646.0	71%	0%	-2.1
101181	S08	1116.0	305.7	814.3	61%	0%	-4.0
101355	S09	1022.9	387.3	637.0	52%	0%	-1.4
101489	S10	1641.1	264.7	1382.7	70%	0%	-6.4
101524	S11	1297.4	324.8	976.5	62%	0%	-3.8
101602	S12	1073.0	278.0	805.8	66%	0%	-10.8
101687	S13	977.0	296.5	686.0	62%	0%	-5.5
102115	S14	1063.7	323.2	741.9	61%	0%	-1.4
103283	S15	950.8	262.2	690.8	67%	0%	-2.2
103402	S16	1115.1	336.5	780.7	57%	0%	-2.1
103474	S17	900.4	240.6	678.0	72%	2%	-18.1
103710	S18	1017.2	206.2	1010.1	58%	19%	-199.1
103720	S19	1317.0	253.2	1068.7	66%	0%	-4.9
103936	S20	934.9	273.2	664.6	70%	0%	-2.9
103959	S21	1045.8	271.1	817.5	76%	4%	-42.8
103961	S22	872.5	254.8	625.2	74%	0%	-7.6
104072	S23	1052.3	171.9	885.1	85%	0%	-4.7
104088	S24	982.3	306.2	680.2	77%	0%	-4.1
104119	S25	1360.4	192.1	1472.8	63%	20%	-304.6
104204	S26	907.0	249.3	669.6	76%	1%	-11.8
104380	S27	926.8	300.5	630.2	69%	0%	-3.8
104504	S28	1075.7	269.3	845.7	63%	4%	-39.4
104810	S29	1620.4	174.4	1890.3	63%	23%	-444.3
104861	S30	1337.0	223.8	1228.7	66%	8%	-115.4
105188	S31	1372.2	255.6	1123.9	68%	0%	-7.3
105284	S32	983.1	249.7	740.3	70%	0%	-6.8
105433	S33	1173.3	291.5	887.7	65%	0%	-5.9
105738	S34	1096.3	251.7	864.9	62%	1%	-20.2
105775	S35	874.9	291.1	592.2	70%	0%	-8.4
106069	S36	980.3	266.7	747.8	77%	4%	-34.2
106135	S37	1813.1	277.7	1555.7	68%	0%	-20.3
106171	S38	1171.0	229.0	996.6	69%	4%	-54.6
106498	S39	944.3	287.5	693.0	63%	4%	-36.1
106805	S40	1300.2	284.4	1017.5	65%	0%	-1.7
106988	S41	1071.7	224.8	872.6	71%	2%	-25.7
107354	S42	1404.4	218.2	1335.1	63%	10%	-148.8
107573	S43	844.1	337.0	511.7	74%	0%	-4.6
107794	S44	1569.4	261.1	1312.0	65%	0%	-3.8
107926	S45	1055.2	243.6	920.5	69%	11%	-109.0
108026	S46	999.4	259.5	749.3	78%	0%	-9.5
108165	S47	1138.5	258.5	882.7	62%	0%	-2.8
108293	S48	1073.4	282.8	802.6	63%	0%	-12.0
108483	S49	1004.8	242.3	783.9	75%	2%	-21.4
108494	S50	1052.4	281.3	778.7	60%	0%	-7.6
108587	S51	930.9	295.0	644.0	80%	0%	-8.1
109023	S52	839.6	319.4	524.8	74%	0%	-4.7
109099	S53	920.5	290.4	634.8	66%	0%	-4.6
109658	S54	1017.2	237.5	783.7	66%	0%	-4.1
109672	S55	1018.4	215.0	834.0	72%	3%	-30.7

Tabelle 2: Natürlicher Wasserhaushalt der Engadiner Einzugsgebiete (S01 – S55, BAFU Datensatz 40 km²) sowie das gesamte Einzugsgebiet des Engadins (politische Grenzen) für die Periode 2021 – 2050, Emissionsszenario A1B. P: Niederschlag; ET: Evapotranspiration; RGS: Gesamtabfluss; SNOW_RGS: Schneeschmelze [in % vom Abfluss]; ICE_RGS: Gletscherschmelze [in % vom Abfluss]; Bil: Bilanz [P – RGS – ET]

ID_BAFU_40	Kürzel_WSL	P [mm/y]	ET [mm/y]	RGS [mm/y]	SNOW_RGS [%]	ICE_RGS [%]	Bil [mm/y]
Gesamtgebiet	Eng200	1057.6	280.9	801.2	62%	3%	-24.6
100032	S01	1012.9	296.9	718.1	55%	0%	-2.1
100084	S02	850.6	275.8	577.4	63%	0%	-2.5
100176	S03	1280.1	238.7	1043.7	66%	0%	-2.3
100198	S04	1186.5	272.3	915.4	56%	0%	-1.2
100628	S05	793.9	336.3	461.2	67%	0%	-3.6
100785	S06	980.9	281.7	701.9	57%	0%	-2.6
101152	S07	880.4	260.5	621.9	65%	0%	-2.0
101181	S08	1094.1	313.0	781.1	54%	0%	0.1
101355	S09	1002.7	393.7	610.4	44%	0%	-1.4
101489	S10	1610.5	271.3	1338.2	64%	0%	1.1
101524	S11	1273.0	334.3	937.9	55%	0%	0.8
101602	S12	1052.5	289.6	764.6	60%	0%	-1.7
101687	S13	960.2	300.8	662.1	56%	0%	-2.7
102115	S14	1042.8	331.2	712.0	53%	0%	-0.4
103283	S15	934.0	267.9	668.4	60%	0%	-2.2
103402	S16	1094.1	345.1	750.6	51%	0%	-1.7
103474	S17	884.5	248.6	642.8	67%	0%	-6.9
103710	S18	999.4	226.0	853.3	61%	8%	-79.9
103720	S19	1291.8	262.6	1030.4	60%	0%	-1.3
103936	S20	919.3	279.2	642.7	63%	0%	-2.7
103959	S21	1028.4	283.9	756.3	73%	1%	-11.8
103961	S22	857.3	261.2	600.6	68%	0%	-4.5
104072	S23	1034.3	193.6	845.6	80%	0%	-4.9
104088	S24	966.2	315.2	654.5	71%	0%	-3.5
104119	S25	1334.8	205.7	1397.1	57%	18%	-267.9
104204	S26	892.2	258.0	638.2	71%	0%	-4.0
104380	S27	911.3	307.7	606.4	63%	0%	-2.7
104504	S28	1056.1	279.5	778.8	60%	0%	-2.3
104810	S29	1590.2	183.9	1835.7	56%	22%	-429.4
104861	S30	1311.9	239.6	1117.7	63%	3%	-45.4
105188	S31	1345.8	263.2	1082.8	61%	0%	-0.2
105284	S32	966.6	258.2	711.1	65%	0%	-2.7
105433	S33	1150.9	301.9	847.6	58%	0%	1.4
105738	S34	1076.9	260.3	818.4	57%	0%	-1.8
105775	S35	859.9	298.4	564.2	64%	0%	-2.7
106069	S36	963.8	278.4	689.4	74%	0%	-4.1
106135	S37	1780.3	283.5	1501.6	61%	0%	-4.8
106171	S38	1148.9	241.9	921.5	65%	1%	-14.5
106498	S39	928.2	294.9	646.0	60%	1%	-12.7
106805	S40	1275.4	291.7	981.6	58%	0%	2.0
106988	S41	1052.4	238.5	824.1	67%	0%	-10.2
107354	S42	1377.8	231.7	1215.3	60%	5%	-69.1
107573	S43	830.0	343.2	490.8	66%	0%	-4.0
107794	S44	1540.5	268.0	1271.0	58%	0%	1.6
107926	S45	1037.7	260.3	788.5	72%	0%	-11.1
108026	S46	982.8	270.2	716.8	73%	0%	-4.1
108165	S47	1116.2	266.8	850.5	55%	0%	-1.1
108293	S48	1054.2	291.7	769.0	58%	0%	-6.5
108483	S49	987.9	252.2	738.9	71%	0%	-3.1
108494	S50	1033.8	286.4	749.3	54%	0%	-1.9
108587	S51	915.3	303.7	616.0	74%	0%	-4.4
109023	S52	826.0	324.5	505.6	68%	0%	-4.1
109099	S53	905.0	296.6	611.4	60%	0%	-3.0
109658	S54	998.9	246.2	752.9	59%	0%	-0.1
109672	S55	1001.0	230.0	773.9	69%	0%	-2.9

Tabelle 3: Natürlicher Wasserhaushalt der Engadiner Einzugsgebiete (S01 – S55, BAFU Datensatz 40 km²) sowie das gesamte Einzugsgebiet des Engadins (politische Grenzen) für die Periode 2021 – 2050, Emissionsszenario A2. P: Niederschlag; ET: Evapotranspiration; RGS: Gesamtabfluss; SNOW_RGS: Schneeschmelze [in % vom Abfluss]; ICE_RGS: Gletscherschmelze [in % vom Abfluss]; Bil: Bilanz [P – RGS – ET]

ID_BAFU_40	Kürzel_WSL	P [mm/y]	ET [mm/y]	RGS [mm/y]	SNOW_RGS [%]	ICE_RGS [%]	Bil [mm/y]
Gesamtgebiet	Eng200	1059.9	280.2	803.1	62%	3%	-23.3
100032	S01	1015.1	296.3	721.0	55%	0%	-2.1
100084	S02	852.5	275.3	579.8	64%	0%	-2.6
100176	S03	1283.1	237.6	1047.6	67%	0%	-2.1
100198	S04	1189.2	271.5	918.9	56%	0%	-1.2
100628	S05	795.6	335.8	463.5	67%	0%	-3.7
100785	S06	983.1	281.5	704.2	57%	0%	-2.6
101152	S07	882.4	259.8	624.6	66%	0%	-2.0
101181	S08	1096.8	312.2	784.5	55%	0%	0.1
101355	S09	1005.1	393.0	613.6	45%	0%	-1.4
101489	S10	1614.3	270.6	1342.7	64%	0%	1.0
101524	S11	1276.0	333.3	941.7	56%	0%	1.0
101602	S12	1055.0	288.6	768.1	61%	0%	-1.7
101687	S13	962.3	300.4	664.6	57%	0%	-2.7
102115	S14	1045.3	330.3	715.4	54%	0%	-0.4
103283	S15	936.1	267.4	670.9	61%	0%	-2.2
103402	S16	1096.6	344.2	754.1	51%	0%	-1.7
103474	S17	886.5	247.9	645.3	68%	0%	-6.7
103710	S18	1001.6	225.0	853.2	62%	8%	-76.7
103720	S19	1294.8	261.7	1034.4	61%	0%	-1.3
103936	S20	921.2	278.6	645.2	64%	0%	-2.7
103959	S21	1030.5	282.8	759.2	74%	1%	-11.5
103961	S22	859.2	260.6	603.1	69%	0%	-4.5
104072	S23	1036.5	192.1	849.3	80%	0%	-4.9
104088	S24	968.2	314.3	657.5	72%	0%	-3.6
104119	S25	1337.9	204.9	1388.9	58%	17%	-255.9
104204	S26	894.0	257.2	641.0	71%	0%	-4.1
104380	S27	913.3	306.9	609.1	63%	0%	-2.7
104504	S28	1058.5	278.8	782.0	60%	0%	-2.3
104810	S29	1593.9	183.7	1808.2	58%	21%	-397.9
104861	S30	1315.0	238.6	1119.3	64%	3%	-42.9
105188	S31	1349.0	262.5	1086.7	62%	0%	-0.2
105284	S32	968.6	257.4	714.0	66%	0%	-2.8
105433	S33	1153.6	300.8	851.4	59%	0%	1.4
105738	S34	1079.3	259.6	821.5	58%	0%	-1.8
105775	S35	861.8	297.7	566.8	65%	0%	-2.8
106069	S36	965.8	277.5	692.4	75%	0%	-4.1
106135	S37	1784.4	283.1	1506.0	62%	0%	-4.7
106171	S38	1151.6	241.0	924.2	66%	0%	-13.6
106498	S39	930.2	294.4	648.0	60%	1%	-12.3
106805	S40	1278.4	291.0	985.4	58%	0%	2.0
106988	S41	1054.8	237.3	827.2	68%	0%	-9.7
107354	S42	1381.1	231.1	1215.4	61%	4%	-65.4
107573	S43	831.8	342.6	493.2	67%	0%	-4.1
107794	S44	1544.1	267.3	1275.3	59%	0%	1.5
107926	S45	1039.8	259.5	791.1	72%	0%	-10.8
108026	S46	984.9	269.2	719.9	73%	0%	-4.2
108165	S47	1118.9	266.0	854.0	56%	0%	-1.1
108293	S48	1056.5	290.9	771.9	58%	0%	-6.3
108483	S49	990.0	251.4	741.8	71%	0%	-3.2
108494	S50	1036.1	286.0	752.0	54%	0%	-1.9
108587	S51	917.2	302.8	618.9	75%	0%	-4.5
109023	S52	827.7	324.0	507.9	68%	0%	-4.2
109099	S53	906.9	296.0	614.0	61%	0%	-3.0
109658	S54	1001.2	245.4	755.9	60%	0%	-0.1
109672	S55	1003.1	228.7	777.3	70%	0%	-2.9

Tabelle 4: Natürlicher Wasserhaushalt der Engadiner Einzugsgebiete (S01 – S55, BAFU Datensatz 40 km²) sowie das gesamte Einzugsgebiet des Engadins (politische Grenzen) für die Periode 2045 – 2075, Emissionsszenario A1B. P: Niederschlag; ET: Evapotranspiration; RGS: Gesamtabfluss; SNOW_RGS: Schneeschmelze [in % vom Abfluss]; ICE_RGS: Gletscherschmelze [in % vom Abfluss]; Bil: Bilanz [P – RGS – ET]

ID_BAFU_40	Kürzel_WSL	P [mm/y]	ET [mm/y]	RGS [mm/y]	SNOW_RGS [%]	ICE_RGS [%]	Bil [mm/y]
Gesamtgebiet	Eng200	1023.4	284.7	768.8	56%	4%	-30.1
100032	S01	979.5	299.1	682.6	50%	0%	-2.2
100084	S02	824.3	276.2	550.6	57%	0%	-2.6
100176	S03	1237.8	247.6	994.1	61%	0%	-3.8
100198	S04	1146.1	278.2	869.3	51%	0%	-1.4
100628	S05	768.9	334.7	437.5	61%	0%	-3.3
100785	S06	950.1	281.3	672.4	51%	0%	-3.6
101152	S07	852.8	264.3	590.8	60%	0%	-2.3
101181	S08	1054.9	315.4	739.7	49%	0%	-0.2
101355	S09	965.2	394.8	572.0	39%	0%	-1.6
101489	S10	1562.6	277.0	1284.3	58%	0%	1.3
101524	S11	1231.0		890.8	50%	0%	-0.2
101602	S12	1014.6	295.8	720.8	56%	0%	-1.9
101687	S13	930.0	301.2	631.5	51%	0%	-2.7
102115	S14	1004.6	334.6	670.7	48%	0%	-0.7
103283	S15	904.8	270.1	637.2	55%	0%	-2.5
103402	S16	1055.1	349.0	707.9	46%	0%	-1.8
103474	S17	856.8	252.2	613.1	62%	0%	-8.4
103710	S18	966.0	232.8	828.9	57%	11%	-95.7
103720	S19	1247.5	270.8	978.0	56%	0%	-1.2
103936	S20	890.6	281.4	611.8	58%	0%	-2.6
103959	S21	996.8	290.3	721.5	69%	1%	-15.1
103961	S22	830.5	263.0	571.8	63%	0%	-4.3
104072	S23	1002.0	205.9	801.0	76%	0%	-4.9
104088	S24	936.9	318.9	621.3	67%	0%	-3.2
104119	S25	1291.0	212.4	1382.7	50%	21%	-304.2
104204	S26	865.2	261.7	607.3	66%	0%	-3.7
104380	S27	883.1	309.4	576.3	58%	0%	-2.6
104504	S28	1019.4	284.1	737.8	56%	0%	-2.5
104810	S29	1541.7	187.6	1941.9	47%	29%	-587.8
104861	S30	1269.5	246.9	1074.3	57%	4%	-51.7
105188	S31	1300.9	269.1	1032.0	56%	0%	-0.2
105284	S32	935.6	262.6	675.6	61%	0%	-2.6
105433	S33	1111.2	308.0	802.0	53%	0%	1.1
105738	S34	1042.2	265.0	779.2	53%	0%	-1.9
105775	S35	833.3	299.7	536.2	59%	0%	-2.7
106069	S36	934.1	283.3	654.6	70%	0%	-3.9
106135	S37	1731.3	287.1	1451.3	55%	0%	-7.0
106171	S38	1109.4	248.5	876.4	60%	1%	-15.5
106498	S39	898.2	295.5	619.2	55%	2%	-16.6
106805	S40	1233.1	296.2	935.2	52%	0%	1.7
106988	S41	1016.2	248.0	779.2	63%	0%	-10.9
107354	S42	1333.9	236.8	1186.0	54%	6%	-88.9
107573	S43	804.4	341.7	466.3	61%	0%	-3.7
107794	S44	1495.0	272.6	1220.6	52%	0%	1.8
107926	S45	1005.5	264.6	753.1	67%	1%	-12.3
108026	S46	952.9	275.8	680.9	68%	0%	-3.8
108165	S47	1075.7	271.6	805.2	50%	0%	-1.2
108293	S48	1018.4	296.4	730.8	53%	0%	-8.8
108483	S49	956.9	257.6	702.2	67%	0%	-2.9
108494	S50	1000.9	287.2	715.8	49%	0%	-2.1
108587	S51	887.2	306.4	584.7	69%	0%	-4.0
109023	S52	801.0	323.4	481.3	62%	0%	-3.7
109099	S53	876.7	297.8	581.9	55%	0%	-3.0
109658	S54	967.7	251.7	716.3	55%	0%	-0.3
109672	S55	967.9	239.1	731.6	66%	0%	-2.8

Tabelle 5: Natürlicher Wasserhaushalt der Engadiner Einzugsgebiete (S01 – S55, BAFU Datensatz 40 km²) sowie das gesamte Einzugsgebiet des Engadins (politische Grenzen) für die Periode 2045 – 2075, Emissionsszenario A2. P: Niederschlag; ET: Evapotranspiration; RGS: Gesamtabfluss; SNOW_RGS: Schneeschmelze [in % vom Abfluss]; ICE_RGS: Gletscherschmelze [in % vom Abfluss]; Bil: Bilanz [P – RGS – ET]

ID_BAFU_40	Kürzel_WSL	P [mm/y]	ET [mm/y]	RGS [mm/y]	SNOW_RGS [%]	ICE_RGS [%]	Bil [mm/y]
Gesamtgebiet	Eng200	1024.5	284.5	769.7	57%	4%	-29.7
100032	S01	980.6	298.9	683.8	50%	0%	-2.2
100084	S02	825.2	276.1	551.6	58%	0%	-2.6
100176	S03	1239.2	247.2	995.8	61%	0%	-3.7
100198	S04	1147.5	277.9	870.9	52%	0%	-1.4
100628	S05	769.8	334.7	438.4	61%	0%	-3.3
100785	S06	951.1	281.3	673.3	52%	0%	-3.5
101152	S07	853.8	264.2	591.9	60%	0%	-2.3
101181	S08	1056.2	315.2	741.2	49%	0%	-0.2
101355	S09	966.5	394.7	573.4	40%	0%	-1.6
101489	S10	1564.2	276.7	1286.2	59%	0%	1.3
101524	S11	1232.4	340.1	892.4	50%	0%	-0.1
101602	S12	1015.9	295.5	722.3	56%	0%	-1.9
101687	S13	931.0	301.1	632.6	52%	0%	-2.7
102115	S14	1005.9	334.4	672.2	49%	0%	-0.7
103283	S15	905.8	270.0	638.3	55%	0%	-2.5
103402	S16	1056.4	348.8	709.4	47%	0%	-1.8
103474	S17	857.8	252.0	614.1	62%	0%	-8.4
103710	S18	967.1	232.5	829.0	57%	10%	-94.4
103720	S19	1249.0	270.5	979.8	56%	0%	-1.3
103936	S20	891.5	281.3	612.9	59%	0%	-2.6
103959	S21	997.8	290.0	722.8	69%	1%	-14.9
103961	S22	831.4	262.9	572.9	63%	0%	-4.3
104072	S23	1003.0	205.5	802.5	76%	0%	-5.0
104088	S24	937.9	318.7	622.5	67%	0%	-3.2
104119	S25	1292.4	212.2	1380.3	51%	21%	-300.1
104204	S26	866.1	261.5	608.4	66%	0%	-3.8
104380	S27	884.1	309.2	577.4	58%	0%	-2.6
104504	S28	1020.6	283.9	739.2	56%	0%	-2.5
104810	S29	1543.4	187.5	1934.9	47%	29%	-579.1
104861	S30	1270.9	246.6	1075.2	58%	4%	-50.8
105188	S31	1302.4	268.9	1033.8	56%	0%	-0.2
105284	S32	936.6	262.4	676.8	61%	0%	-2.6
105433	S33	1112.5	307.7	803.6	53%	0%	1.2
105738	S34	1043.4	264.7	780.6	53%	0%	-1.9
105775	S35	834.2	299.5	537.3	59%	0%	-2.7
106069	S36	935.1	283.1	655.9	70%	0%	-3.9
106135	S37	1733.0	286.9	1453.1	55%	0%	-6.9
106171	S38	1110.7	248.3	877.8	61%	1%	-15.3
106498	S39	899.2	295.4	620.1	55%	2%	-16.4
106805	S40	1234.6	296.0	936.9	53%	0%	1.7
106988	S41	1017.4	247.6	780.7	64%	0%	-10.8
107354	S42	1335.3	236.6	1186.3	54%	6%	-87.5
107573	S43	805.2	341.7	467.2	61%	0%	-3.7
107794	S44	1496.6	272.4	1222.4	53%	0%	1.8
107926	S45	1006.5	264.4	754.3	68%	1%	-12.2
108026	S46	953.9	275.5	682.2	69%	0%	-3.8
108165	S47	1077.0	271.4	806.8	50%	0%	-1.2
108293	S48	1019.6	296.1	732.1	54%	0%	-8.7
108483	S49	958.0	257.4	703.5	67%	0%	-2.9
108494	S50	1002.0	287.2	716.9	49%	0%	-2.1
108587	S51	888.1	306.2	585.9	69%	0%	-4.0
109023	S52	801.8	323.4	482.2	63%	0%	-3.8
109099	S53	877.7	297.7	583.0	55%	0%	-3.0
109658	S54	968.8	251.5	717.6	55%	0%	-0.3
109672	S55	968.9	238.7	733.1	66%	0%	-2.8

Tabelle 6: Natürlicher Wasserhaushalt der Engadiner Einzugsgebiete (S01 – S55, BAFU Datensatz 40 km²) sowie das gesamte Einzugsgebiet des Engadins (politische Grenzen) für die Periode 2070 – 2099, Emissionsszenario A1B. P: Niederschlag; ET: Evapotranspiration; RGS: Gesamtabfluss; SNOW_RGS: Schneeschmelze [in % vom Abfluss]; ICE_RGS: Gletscherschmelze [in % vom Abfluss]; Bil: Bilanz [P – RGS – ET]

ID_BAFU_40	Kürzel_WSL	P [mm/y]	ET [mm/y]	RGS [mm/y]	SNOW_RGS [%]	ICE_RGS [%]	Bil [mm/y]
Gesamtgebiet	Eng200	1002.1	285.9	735.2	54%	2%	-18.9
100032	S01	958.9	298.9	662.2	47%	0%	-2.2
100084	S02	808.6	274.8	536.4	54%	0%	-2.6
100176	S03	1210.6	252.4	955.7	58%	0%	2.6
100198	S04	1119.8	280.4	840.9	49%	0%	-1.5
100628	S05	753.9	331.1	425.8	56%	0%	-2.9
100785	S06	931.4	279.0	656.6	48%	0%	-4.2
101152	S07	836.0	264.2	574.3	57%	0%	-2.6
101181	S08	1027.7	315.5	712.7	45%	0%	-0.5
101355	S09	938.9	392.8	548.0	36%	0%	-1.9
101489	S10	1533.2	280.5	1251.1	54%	0%	1.5
101524	S11	1204.1	343.3	857.9	47%	0%	2.9
101602	S12	989.0	298.2	692.8	53%	0%	-1.9
101687	S13	911.9	299.8	615.0	48%	0%	-2.8
102115	S14	978.0	334.6	644.4	45%	0%	-1.0
103283	S15	887.2	269.5	620.4	52%	0%	-2.7
103402	S16	1029.0	349.5	681.5	44%	0%	-2.0
103474	S17	840.1	253.0	590.4	59%	0%	-3.2
103710	S18	945.5	238.3	710.1	62%	0%	-2.9
103720	S19	1218.0	274.4	944.8	53%	0%	-1.2
103936	S20	874.0	280.8	595.6	55%	0%	-2.4
103959	S21	978.9	292.7	689.2	67%	0%	-3.1
103961	S22	814.5	262.2	556.3	59%	0%	-4.0
104072	S23	983.0	212.0	775.7	74%	0%	-4.7
104088	S24	920.6	318.7	604.7	64%	0%	-2.8
104119	S25	1262.8	220.4	1293.1	49%	18%	-250.6
104204	S26	850.2	261.8	591.7	63%	0%	-3.3
104380	S27	866.9	308.2	561.1	54%	0%	-2.4
104504	S28	995.8	285.6	712.7	53%	0%	-2.5
104810	S29	1511.7	197.4	1672.0	49%	20%	-357.7
104861	S30	1242.6	252.3	998.4	56%	0%	-8.1
105188	S31	1271.1	272.1	999.2	53%	0%	-0.2
105284	S32	917.4	263.4	656.3	58%	0%	-2.4
105433	S33	1084.7	310.6	773.2	50%	0%	0.9
105738	S34	1021.0	266.7	756.2	51%	0%	-1.9
105775	S35	817.5	298.2	521.9	55%	0%	-2.6
106069	S36	917.0	284.3	636.2	67%	0%	-3.5
106135	S37	1703.5	289.0	1424.5	50%	0%	-9.9
106171	S38	1083.5	252.3	831.0	59%	0%	0.2
106498	S39	880.2	294.6	588.3	53%	0%	-2.7
106805	S40	1205.3	298.1	905.8	49%	0%	1.4
106988	S41	993.3	252.5	743.2	62%	0%	-2.5
107354	S42	1306.1	242.2	1067.4	54%	0%	-3.5
107573	S43	789.5	338.1	454.8	56%	0%	-3.3
107794	S44	1467.6	274.4	1191.6	48%	0%	1.6
107926	S45	987.2	266.4	723.9	65%	0%	-3.1
108026	S46	936.1	277.0	662.4	65%	0%	-3.3
108165	S47	1047.6	273.1	775.8	47%	0%	-1.3
108293	S48	995.8	297.9	700.2	51%	0%	-2.3
108483	S49	939.1	259.4	682.3	64%	0%	-2.5
108494	S50	980.8	286.1	697.0	46%	0%	-2.3
108587	S51	871.0	305.7	568.8	66%	0%	-3.5
109023	S52	787.1	320.4	470.0	59%	0%	-3.3
109099	S53	860.3	296.5	566.6	51%	0%	-2.9
109658	S54	948.8	253.3	696.1	52%	0%	-0.6
109672	S55	948.0	242.7	707.7	63%	0%	-2.4

Tabelle 7: Natürlicher Wasserhaushalt der Engadiner Einzugsgebiete (S01 – S55, BAFU Datensatz 40 km²) sowie das gesamte Einzugsgebiet des Engadins (politische Grenzen) für die Periode 2070 – 2099, Emissionsszenario A2. P: Niederschlag; ET: Evapotranspiration; RGS: Gesamtabfluss; SNOW_RGS: Schneeschmelze [in % vom Abfluss]; ICE_RGS: Gletscherschmelze [in % vom Abfluss]; Bil: Bilanz [P – RGS – ET]

ID_BAFU_40	Kürzel_WSL	P [mm/y]	ET [mm/y]	RGS [mm/y]	SNOW_RGS [%]	ICE_RGS [%]	Bil [mm/y]
Gesamtgebiet	Eng200	989.9	286.4	725.1	51%	3%	-21.7
100032	S01	947.1	299.0	650.2	45%	0%	-2.2
100084	S02	799.2	274.4	527.4	51%	0%	-2.6
100176	S03	1195.2	254.9	937.7	55%	0%	2.5
100198	S04	1105.2	281.3	825.5	46%	0%	-1.7
100628	S05	745.1	329.8	418.0	53%	0%	-2.7
100785	S06	920.3	277.3	647.5	46%	0%	-4.5
101152	S07	826.1	264.2	564.6	54%	0%	-2.7
101181	S08	1013.2	316.0	697.9	42%	0%	-0.6
101355	S09	925.1	391.8	535.2	34%	0%	-2.0
101489	S10	1515.4	282.1	1231.8	51%	0%	1.5
101524	S11	1188.7	345.5	840.6	44%	0%	2.6
101602	S12	975.2	299.6	677.6	51%	0%	-2.0
101687	S13	901.3	299.5	604.7	45%	0%	-2.9
102115	S14	963.9	334.7	630.5	43%	0%	-1.2
103283	S15	876.7	269.4	610.2	49%	0%	-2.9
103402	S16	1014.8	350.2	666.7	41%	0%	-2.1
103474	S17	830.2	253.4	580.1	56%	0%	-3.3
103710	S18	933.8	239.4	697.0	59%	0%	-2.7
103720	S19	1201.7	275.9	927.0	50%	0%	-1.2
103936	S20	864.0	280.4	585.8	52%	0%	-2.3
103959	S21	967.9	294.1	676.7	64%	0%	-2.9
103961	S22	804.9	262.0	546.8	56%	0%	-3.8
104072	S23	971.7	214.5	761.6	72%	0%	-4.5
104088	S24	910.5	319.2	593.8	61%	0%	-2.5
104119	S25	1246.7	222.3	1314.8	46%	21%	-290.4
104204	S26	840.8	262.2	581.7	60%	0%	-3.1
104380	S27	857.1	308.2	551.2	51%	0%	-2.3
104504	S28	982.6	286.2	699.0	51%	0%	-2.5
104810	S29	1493.8	198.1	1710.0	45%	23%	-414.4
104861	S30	1227.1	254.6	982.4	53%	0%	-9.9
105188	S31	1254.5	273.4	981.4	50%	0%	-0.3
105284	S32	906.6	263.9	644.9	56%	0%	-2.2
105433	S33	1070.1	312.5	757.0	47%	0%	0.7
105738	S34	1008.6	267.5	743.2	48%	0%	-2.0
105775	S35	808.1	297.9	512.8	52%	0%	-2.5
106069	S36	906.6	285.0	624.9	64%	0%	-3.3
106135	S37	1685.4	289.6	1408.0	47%	0%	-12.2
106171	S38	1069.1	253.8	815.1	56%	0%	0.2
106498	S39	869.6	294.0	578.2	51%	0%	-2.6
106805	S40	1189.7	299.6	888.9	46%	0%	1.2
106988	S41	980.4	254.3	728.4	60%	0%	-2.3
107354	S42	1289.9	243.6	1051.2	51%	0%	-4.9
107573	S43	780.6	336.8	446.9	53%	0%	-3.1
107794	S44	1450.8	275.4	1174.3	45%	0%	1.1
107926	S45	976.1	267.1	711.9	63%	0%	-2.9
108026	S46	925.7	277.9	650.8	63%	0%	-3.0
108165	S47	1032.6	273.8	760.3	45%	0%	-1.5
108293	S48	983.0	298.5	686.8	49%	0%	-2.3
108483	S49	928.3	260.2	670.4	62%	0%	-2.3
108494	S50	969.1	285.9	685.6	43%	0%	-2.5
108587	S51	861.2	305.8	558.7	63%	0%	-3.3
109023	S52	778.5	319.3	462.2	55%	0%	-3.0
109099	S53	850.4	296.2	557.0	48%	0%	-2.8
109658	S54	937.5	253.8	684.5	49%	0%	-0.8
109672	S55	936.5	244.5	694.1	61%	0%	-2.1

5.5 Probabilistische Extremereignisse

Die vorherigen Abschnitte zeigen, dass sich die durchschnittlichen Werte der hydrologischen Parameter zukünftig verändern werden, wobei eine deutliche Tendenz sichtbar wird. Um Aussagen über Extremereignisse machen zu können, wurden Dauerkurven (sog. *cumulative distribution function* = kumulative Verteilungskurven) erstellt. Diese zeigen graphisch, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein bestimmter Abflusswert unterschritten bzw. überschritten wird.

Im nächsten Abschnitt werden die Dauerkurven sowie die Saisonkurven für das Teileinzugsgebiet Samedan beispielhaft erklärt, alle weiteren Abbildungen der Teileinzugsgebiete sind im Anhang B zu finden.

Um probabilistische Aussagen über das Auftreten von Extremwerten der weiteren Teileinzugsgebiete machen zu können, sind die Resultate aller Dauerkurven ausserdem in Tabellenform in Abschnitt 5.5.2 Probabilistische Extremereignisse der Teileinzugsgebiete zusammenfassend dargestellt und erläutert.

5.5.1 Probabilistische Extremereignisse am Beispiel Samedan

In diesem Abschnitt wird das Teileinzugsgebiet Samedan im Oberengadin diskutiert (0,025' entspricht der BAFU-Kodierung 104119), da es sich gegenüber dem Gesamteinzugsgebiet des Inn im Engadin anders verhält.

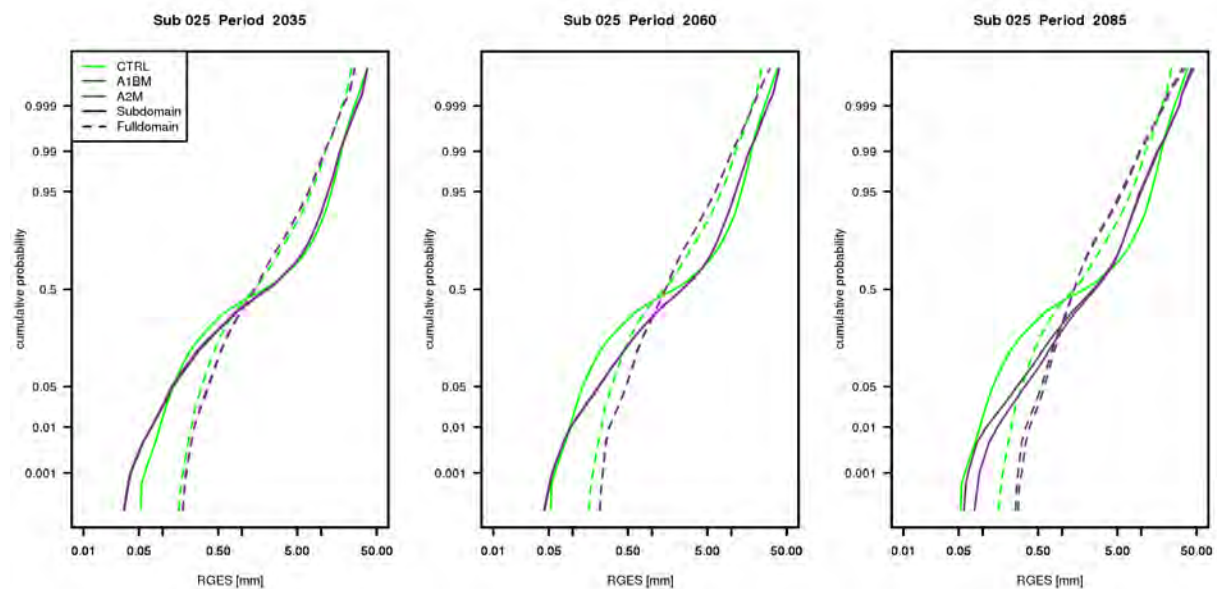


Abbildung 32: Dauerkurven der mittleren Abflüsse des Teileinzugsgebietes Samedan im Oberengadin (0,025' entspricht Teileinzugsgebiet 104119) im Vergleich mit dem Gesamteinzugsgebiet des Engadin. In grün: Kontrollperiode 1980 – 2009 grau: Emissionsszenario A1B (mittleres Band); violett: Emissionsszenario A2 (mittleres Band)

Die Abbildung 32 zeigt die Dauerkurven exemplarisch für die drei berechneten Zukunftsperioden 2021 – 2050 (links), 2045 – 2075 (Mitte) sowie 2070 – 2099 (rechts) für das Teileinzugsgebiet. Aus den Jahressganglinien wird die beobachtete (resp. gemessene) Unter- oder Überschreitungshäufigkeit eines bestimmten Abflusses aufgezeigt (hier: Einheitswert der Abflusswerte von 0.01-50 mm). Diese sogenannten Dauerkurven sind im vorliegenden Fall in einer logarithmischen Skalenfunktion aufgezeichnet. Betrachtet man beispielsweise die Y-Achse, entspricht 0.01 einer Wahrscheinlichkeit von 1%, 0.5 bedeutet 50% und 0.99 dementsprechend 99-prozentiger Wahrscheinlichkeit. So wird bspw. in der Prognose bis 2035 des Gesamtgebietes der Wert 0.5 mm mit einer Wahrscheinlichkeit von 5% unterschritten.

Auffällig bis Mitte des laufenden Jahrhunderts ist, dass dieses Einzugsgebiet im Vergleich zum gesamten Engadin mit grösserer Wahrscheinlichkeit stärker von erhöhten Abflussraten betroffen sein wird. Im Gegensatz dazu dürfte im Niedrigwasserbereich mit geringer Wahrscheinlichkeit das Berninagebiet im Gegensatz zum Gesamteinzugsgebiet niedrigere Abflusswerte aufweisen.

Generell lässt sich sagen, dass laut diesen probabilistischen Szenarien mässige Veränderungen für das gesamte Jahrhundert im Vergleich zur Referenzperiode (1980-2009) zeigen.

Werden die Prognosen mit den verfügbaren Daten der Kontrollperiode anhand von Saisonkurven genauer betrachtet (Abbildung 33), lässt sich eine gewisse Tendenz erkennen. Generell zeigt das Teileinzugsgebiet in der Abflusskurve ein klares nivales Regime, in welchem ab April die Schmelze eine Abflusserhöhung mit Peak anfangs Juli verursacht. Das Gebiet ist zwar teilvergletschert, jedoch trägt die Gletscherschmelze im Teilgebiet nur zu 0.1% zum Abfluss bei und besitzt kein klares Signal in der Jahreganglinie.

Aus der Grafik wird klar ersichtlich, dass das Abflussmaximum im Laufe des 21. Jahrhunderts kontinuierlich in den berechneten Perioden etwa 10-20% zurückgeht und bis zum Ende des Jahrhunderts noch ca. 64 % der heutigen Menge aufweist. Jedoch ist erkennbar, dass der Abfluss in den Wintermonaten eine steigende Tendenz aufweist. Auch der Gletscherbeitrag gewinnt aufgrund des reduzierten Schneeschmelzbeitrages an Gewicht. So ist der Einfluss der Gletscherschmelze im Berninagebiet in der Zukunft durch einen leichten Knick in der stark abfallenden Abflusskurve zu erkennen.

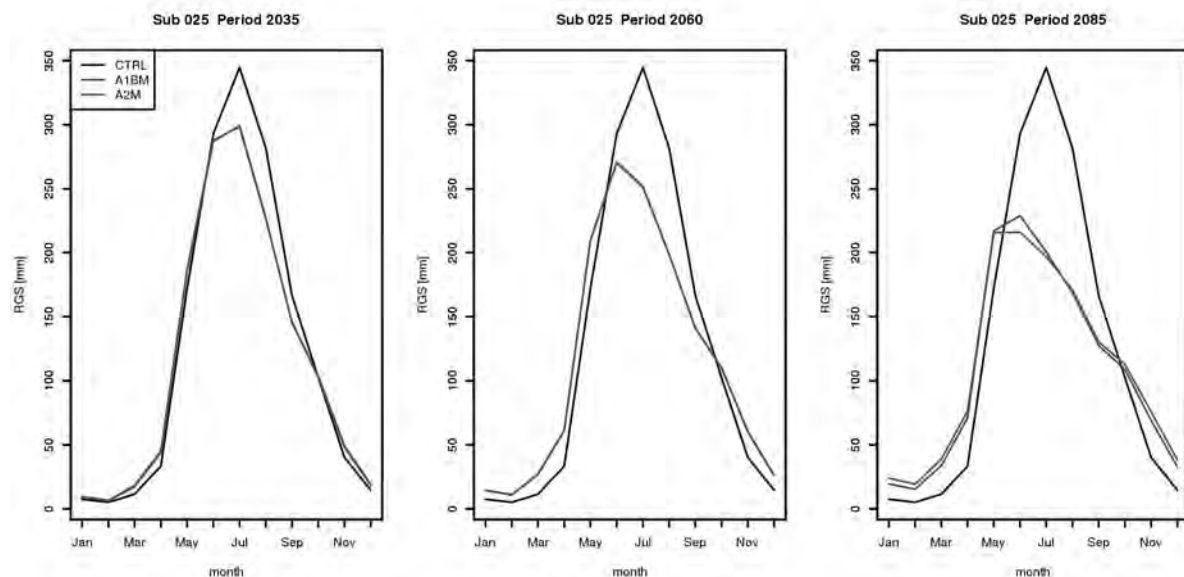


Abbildung 33: Saisonkurven des mittleren Gesamtabflusses des Teileinzugsgebietes Samedan im Oberengadin (.025' entspricht Teileinzugsgebiet 104119) In schwarz: Kontrollperiode 1980 – 2009; grau: Emissionsszenario A1B (mittleres Band); violett: Emissionsszenario A2.

Die Veränderung des Schneewasseräquivalents im Teileinzugsgebiet Samedan ist exemplarisch in Abbildung 34 für die drei berechneten Zukunftsperioden 2021 – 2050 (links), 2045 – 2075 (Mitte) sowie 2070 – 2099 (rechts) abgebildet. Sie zeigt einen kontinuierlichen Rückgang des Schneewasseräquivalents im Laufe des 21. Jahrhunderts um etwa ein Drittel. Bis zum Ende des Jahrhunderts wird dieser Wert vermutlich auf die Hälfte der heutigen Menge zurückgehen.

Ausser der reduzierten Menge an Schneeschmelzwasser, verschiebt sich die Schneeschmelzperiode zeitlich nach vorne. In der Kontrollperiode war das Maximum der

Schneeschnmelzbeiträge im April erreicht, welcher in der Zukunft ca. 2-3 Wochen früher erreicht ist. Ab Juli wird bis Ende des Jahrhunderts kein Schneeschnmelzwasser mehr als Abflussbeitrag zu erwarten sein.

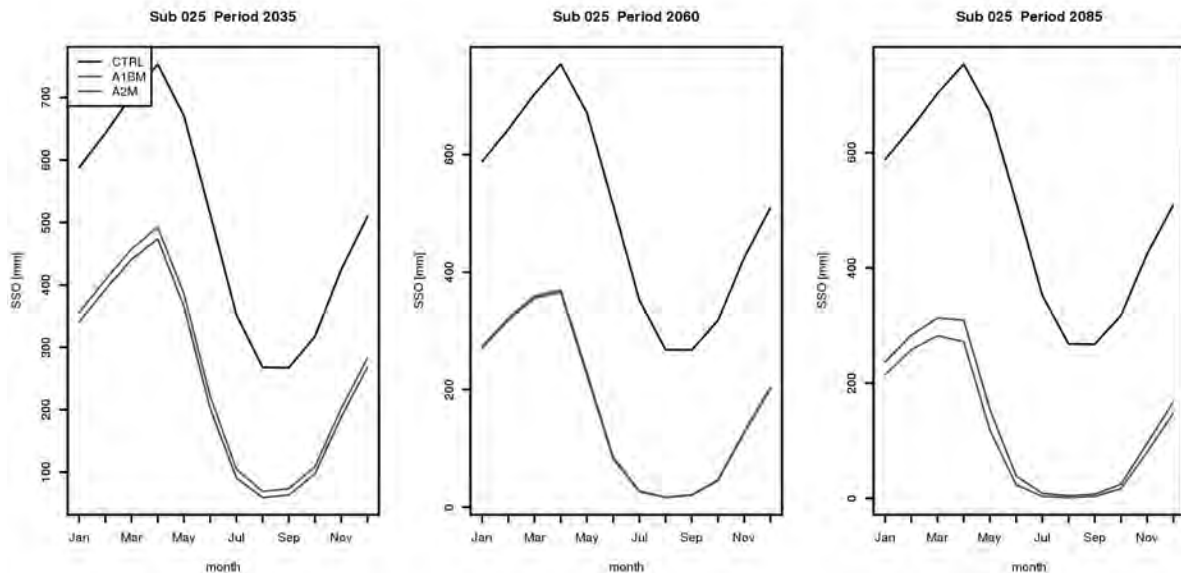


Abbildung 34: Saisonkurven des mittleren Schneewasseräquivalentes des Teileinzugsgebietes Samedan im Oberengadin (,025° entspricht Teileinzugsgebiet 104119) In schwarz: Kontrollperiode 1980 – 2009; grau: Emissionsszenario A1B (mittleres Band); violett: Emissionsszenario A2

Aus dem verminderten Anteil von Schneeschnmelzwasser wird jedoch der relativ geringe Anteil des Gletscherschnmelzwassers etwas stärker hervorgehoben. Dies wird anhand der Schmelzrate des Teileinzugsgebietes deutlich (Abbildung 35). In deren Kurve ist in Periode 2021-2050 eine gemächlichere Abnahme der Schmelzrate ab August bis September aufgrund der Gletscherschnmelze zu erkennen. Ende des Jahrhunderts wird dieses Signal deutlicher und führt auch dort zu einer verzögerten Abnahme des Schmelzwasserbeitrages. Dieses Signal tritt jedoch zeitlich um etwa einen Monat früher auf (Juli-August).

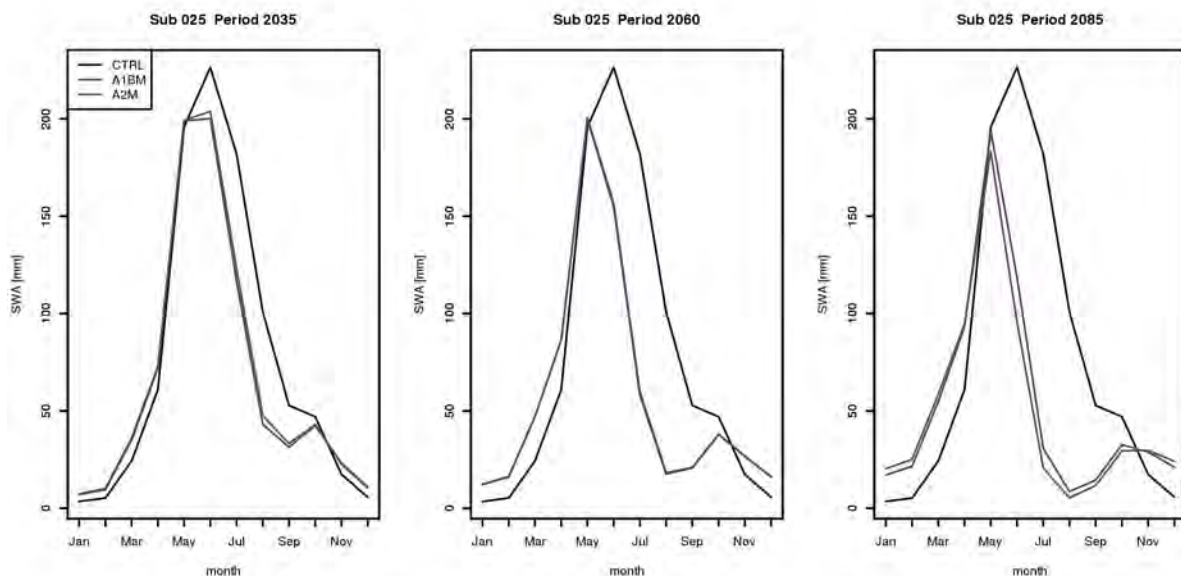


Abbildung 35: Saisonkurven des Schmelzwasserbeitrages von Schnee- und Eisschnmelze im Teileinzugsgebiet Samedan im Oberengadin (,025° entspricht Teileinzugsgebiet 104119) In schwarz: Kontrollperiode 1980 – 2009; grau: Emissionsszenario A1B (mittleres Band); violett: Emissionsszenario A2

Aus den vorherigen Abbildungen wird deutlich, dass sich der Schmelzbeitrag im Teileinzugsgebiet Samedan reduzieren wird. Dies führt zu einer negativen Bilanz, da mehr Abfluss generiert wird, als durch Niederschlag kompensiert werden kann (Kapitel 5.4.2 Szenarien der hydrologischen Variablen im Engadin).

Hinsichtlich der beiden Emissionsszenarien A1B und A2 ist kein signifikanter Unterschied ersichtlich, erst gegen Ende des Jahrhunderts ist der Rückgang bei A1B geringfügig kleiner als bei A2.

Die Dauer- und Saisonkurven für alle Teileinzugsgebiete sind im Anhang B zu finden. Die Ergebnisse der Dauerkurven sind im Folgenden in Tabellenform dargestellt. Diese Übersicht ermöglicht das Auftreten von Hoch- und Niedrigwasser in den jeweiligen Teileinzugsgebieten besser abschätzen zu können.

5.5.2 Probabilistische Extremereignisse der Teileinzugsgebiete des Inn

Die Werte der Dauerkurven aller Teileinzugsgebiete wurden verwendet, um eine relative Veränderung zur Kontrollperiode darzustellen. Das ermittelte Verhältnis der Ergebnisse der Zukunftsszenarien zu den Werten der Kontrollperiode ist in den folgenden Tabellen dargestellt. Sie zeigen sozusagen die relativen Über- bzw. Unterschreitungswahrscheinlichkeiten von Abflusswerten für die jeweiligen Szenarien und Teileinzugsgebiete im Verhältnis zur Kontrollperiode.

Anhand von Perzentilen (Perzentile 0.1%, 5%, 50%, 95% sowie 99.9%) sind die Ergebnisse dargestellt und zeigen anhand der Farbskalierung (rot-Abnahme, blau-Zunahme) die relative Ab- bzw. Zunahme des Abflusswertes im entsprechend dargestellten Perzentil auf. Dies ermöglicht das bessere Einschätzen von Extremereignissen bzw. Auftreten von Hoch- und Niedrigwasser für die Zukunftsszenarien im Vergleich zur heutigen Zeit.

Der Niedrigwasserbereich unterliegt vor allem kleineren Wahrscheinlichkeitsbereichen 0.1-5%, grössere Abflusswerte liegen im grösseren Wahrscheinlichkeitsbereich 95-99.9%. Da der Niedrigwasserabfluss im geringeren Wahrscheinlichkeitsbereich liegt, sind die probabilistischen Aussagen für Abflussmengen unter 5 mm mit grösseren Unsicherheiten behaftet.

Es wird deutlich, dass die Abflusswerte im Niedrigwasserbereich im Vergleich zu heute zukünftig ab Mitte des Jahrhunderts zunehmen werden (0.1 und 5 % Perzentil). Hingegen werden anhand dieser Berechnungen die mittleren Hochwasserabflusswerte stark abnehmen (95% Perzentil). Für höhere Abflusswerte, sichtbar im Perzentil 99.90%, können keine eindeutigen Aussagen für alle Teileinzugsgebiete des Inn gemacht werden. Die Unterschiede werden voraussichtlich grösser, wobei Teileinzugsgebiete an Abflusswerten bis zum Ende des Jahrhunderts abnehmen, andere jedoch werden höhere Werte aufweisen.

Die Resultate zeigen somit einen Trend für die zukünftigen Abflusswerte auf. Die Abflusswerte werden sich tendenziell annähern, denn die erhöhten, mittleren Abflusswerte werden stark abnehmen, wobei die Werte im Niedrigwasserbereich ansteigen. Jedoch unterliegt die Gefahr von Trockenheit bzw. Hochwasser starker räumlicher Variabilität und nimmt je nach Teileinzugsgebiet zu bzw. ab. Somit ist das Risiko für Extremereignisse für Niedrigwasser bzw. grössere Hochwasser erhöht.

Tabelle 8: Probabilistische Veränderung der Abflussmengen im Perzentil 0.1% für die Kontrollperiode (CNTRL) sowie den Zukunftsperioden (2021 – 2050, 2045 – 2075, 2070 – 2099) unter den verwendeten Szenarien A1B und A2 für das Engadin und seine Teileinzugsgebiete. Die Farbskalierung (rot-Abnahme, blau-Zunahme) zeigt die relative Ab- bzw. Zunahme des Abflusswertes im Verhältnis zur Kontrollperiode im Perzentil auf.

ID_BAFU_40	Region	Perzentil:0.1%						
		CTRL	2021		2045		2070	
			A1B	A2	A1B	A2	A1B	A2
		2021_CTRL_0.10	2021_A1B_0.10	2021_A2_0.10	2045_A1B_0.10	2045_A2_0.10	2070_A1B_0.10	2070_A2_0.10
100032	S1	1.000	1.050	1.040	1.262	1.243	1.626	1.898
100084	S2	1.000	1.041	1.032	1.267	1.259	1.442	1.552
100176	S3	1.000	1.376	1.293	2.667	2.583	5.126	7.417
100198	S4	1.000	1.059	1.054	1.082	1.085	1.086	1.129
100628	S5	1.000	1.361	1.321	1.616	1.616	1.530	1.417
100785	S6	1.000	0.978	0.987	0.957	0.959	0.937	0.967
101152	S7	1.000	0.989	0.993	0.964	0.964	0.898	0.904
101181	S8	1.000	1.054	1.032	1.405	1.384	1.865	2.254
101355	S9	1.000	1.079	1.059	1.414	1.381	1.858	2.134
101489	S10	1.000	1.090	1.094	1.032	1.034	1.002	1.038
101524	S11	1.000	1.384	1.325	1.974	1.922	2.683	3.101
101602	S12	1.000	0.968	0.968	0.972	0.972	1.060	1.205
101687	S13	1.000	1.010	1.005	1.167	1.157	1.478	1.774
102115	S14	1.000	1.052	1.039	1.266	1.253	1.581	1.930
103283	S15	1.000	0.984	0.981	0.934	0.934	0.934	0.988
103402	S16	1.000	1.007	1.002	1.074	1.068	1.257	1.495
103474	S17	1.000	1.010	1.002	1.010	1.010	1.014	1.086
103710	S18	1.000	1.013	1.010	1.057	1.053	1.217	1.313
103720	S19	1.000	1.172	1.146	1.318	1.311	1.298	1.311
103936	S20	1.000	1.407	1.342	1.830	1.817	2.088	2.248
103959	S21	1.000	1.149	1.128	1.434	1.425	1.596	1.753
103961	S22	1.000	1.134	1.115	1.412	1.403	1.535	1.635
104072	S23	1.000	0.908	0.898	0.923	0.923	0.956	1.024
104088	S24	1.000	1.567	1.418	2.447	2.417	3.417	4.805
104119	S25	1.000	0.672	0.655	0.933	0.924	1.101	1.529
104204	S26	1.000	1.588	1.496	2.243	2.218	2.823	3.344
104380	S27	1.000	1.367	1.313	1.836	1.811	2.196	2.327
104504	S28	1.000	1.054	1.046	1.127	1.119	1.293	1.528
104810	S29	1.000	0.781	0.759	0.995	0.984	1.075	1.316
104861	S30	1.000	0.729	0.678	1.457	1.423	2.610	3.829
105188	S31	1.000	1.142	1.139	1.125	1.127	1.115	1.123
105284	S32	1.000	1.098	1.087	1.417	1.394	1.716	1.981
105433	S33	1.000	1.079	1.053	2.343	2.263	4.711	7.161
105738	S34	1.000	1.016	1.008	1.029	1.028	1.065	1.151
105775	S35	1.000	1.281	1.251	1.550	1.540	1.716	1.779
106069	S36	1.000	1.223	1.191	1.518	1.510	1.645	1.821
106135	S37	1.000	0.939	0.945	0.935	0.928	0.986	1.075
106171	S38	1.000	0.804	0.804	1.009	0.990	1.430	1.860
106498	S39	1.000	1.186	1.152	1.655	1.622	1.966	2.122
106805	S40	1.000	0.971	0.971	1.198	1.180	1.657	2.187
106988	S41	1.000	1.043	1.040	1.040	1.040	1.080	1.187
107354	S42	1.000	0.662	0.635	1.243	1.189	2.149	2.946
107573	S43	1.000	1.494	1.456	1.736	1.747	1.602	1.494
107794	S44	1.000	0.897	0.901	0.893	0.893	1.073	1.390
107926	S45	1.000	1.108	1.088	1.389	1.377	1.622	1.851
108026	S46	1.000	1.266	1.211	1.734	1.703	1.922	2.251
108165	S47	1.000	0.983	0.983	1.030	1.028	1.055	1.127
108293	S48	1.000	1.029	1.027	1.112	1.102	1.301	1.536
108483	S49	1.000	1.143	1.126	1.403	1.382	1.677	1.861
108494	S50	1.000	1.005	1.009	1.013	1.013	1.083	1.188
108587	S51	1.000	1.377	1.344	1.571	1.557	1.807	2.152
109023	S52	1.000	1.457	1.423	1.772	1.777	1.714	1.563
109099	S53	1.000	1.343	1.294	1.743	1.731	1.997	2.074
109658	S54	1.000	1.097	1.092	1.097	1.093	1.047	1.047
109672	S55	1.000	1.053	1.046	1.139	1.132	1.320	1.523
Engadin	esamtgebiet	1.000	1.111	1.084	1.333	1.333	1.556	1.722

Tabelle 9: 5% -Perzentil

ID_BAFU_40	Region	Perzentil: 5%						
		2021	2021		2045		2070	
		CTRL	A1B	A2	A1B	A2	A1B	A2
		2021_CTRL_5	2021_A1B_5	2021_A2_5	2045_A1B_5	2045_A2_5	2070_A1B_5	2070_A2_5
100032	S1	1.000	1.227	1.202	1.519	1.502	1.697	1.745
100084	S2	1.000	1.230	1.204	1.408	1.403	1.447	1.447
100176	S3	1.000	1.750	1.625	3.354	3.250	5.250	6.792
100198	S4	1.000	1.142	1.126	1.291	1.282	1.441	1.562
100628	S5	1.000	1.194	1.182	1.251	1.252	1.226	1.188
100785	S6	1.000	1.155	1.136	1.316	1.308	1.466	1.563
101152	S7	1.000	1.148	1.129	1.332	1.324	1.490	1.606
101181	S8	1.000	1.352	1.306	1.820	1.801	2.148	2.284
101355	S9	1.000	1.291	1.254	1.519	1.512	1.592	1.575
101489	S10	1.000	1.161	1.142	1.389	1.373	1.619	1.804
101524	S11	1.000	1.342	1.303	1.792	1.769	1.973	2.032
101602	S12	1.000	1.158	1.139	1.365	1.351	1.631	1.822
101687	S13	1.000	1.236	1.202	1.526	1.510	1.649	1.656
102115	S14	1.000	1.282	1.242	1.622	1.605	1.857	1.973
103283	S15	1.000	1.167	1.150	1.309	1.302	1.459	1.559
103402	S16	1.000	1.179	1.156	1.404	1.391	1.612	1.702
103474	S17	1.000	1.157	1.141	1.329	1.319	1.508	1.604
103710	S18	1.000	1.161	1.145	1.355	1.339	1.626	1.826
103720	S19	1.000	1.112	1.096	1.271	1.264	1.408	1.532
103936	S20	1.000	1.311	1.271	1.543	1.533	1.647	1.681
103959	S21	1.000	1.274	1.233	1.695	1.668	2.081	2.325
103961	S22	1.000	1.236	1.205	1.476	1.462	1.563	1.570
104072	S23	1.000	1.013	0.994	1.239	1.223	1.503	1.720
104088	S24	1.000	1.672	1.580	2.515	2.469	3.015	3.183
104119	S25	1.000	1.015	0.970	1.620	1.579	2.030	2.553
104204	S26	1.000	1.522	1.450	2.145	2.113	2.528	2.679
104380	S27	1.000	1.329	1.297	1.550	1.541	1.574	1.585
104504	S28	1.000	1.174	1.155	1.397	1.382	1.642	1.835
104810	S29	1.000	0.974	0.926	1.374	1.353	1.668	2.016
104861	S30	1.000	1.256	1.161	2.344	2.278	3.444	4.200
105188	S31	1.000	1.151	1.130	1.321	1.312	1.495	1.636
105284	S32	1.000	1.255	1.222	1.629	1.605	2.000	2.192
105433	S33	1.000	1.737	1.623	2.857	2.800	3.851	4.314
105738	S34	1.000	1.163	1.143	1.315	1.306	1.517	1.677
105775	S35	1.000	1.246	1.220	1.365	1.360	1.378	1.376
106069	S36	1.000	1.306	1.265	1.692	1.671	2.028	2.186
106135	S37	1.000	1.214	1.179	1.507	1.490	1.828	2.014
106171	S38	1.000	1.073	1.040	1.484	1.460	2.024	2.452
106498	S39	1.000	1.281	1.244	1.559	1.542	1.719	1.780
106805	S40	1.000	1.322	1.278	1.845	1.814	2.299	2.562
106988	S41	1.000	1.177	1.164	1.377	1.364	1.618	1.839
107354	S42	1.000	1.048	0.981	1.886	1.838	2.829	3.510
107573	S43	1.000	1.226	1.208	1.269	1.263	1.244	1.192
107794	S44	1.000	1.280	1.239	1.821	1.790	2.302	2.655
107926	S45	1.000	1.221	1.186	1.615	1.589	2.043	2.294
108026	S46	1.000	1.406	1.346	2.057	2.013	2.721	3.047
108165	S47	1.000	1.146	1.130	1.281	1.273	1.443	1.568
108293	S48	1.000	1.167	1.150	1.402	1.389	1.651	1.795
108483	S49	1.000	1.252	1.220	1.633	1.610	2.037	2.271
108494	S50	1.000	1.157	1.140	1.320	1.308	1.508	1.607
108587	S51	1.000	1.407	1.360	1.787	1.773	1.978	2.022
109023	S52	1.000	1.284	1.261	1.375	1.371	1.341	1.276
109099	S53	1.000	1.279	1.249	1.453	1.447	1.480	1.486
109658	S54	1.000	1.128	1.112	1.281	1.271	1.428	1.541
109672	S55	1.000	1.179	1.150	1.436	1.421	1.731	1.985
Engadin	esamtgebiet	1.000	1.226	1.194	1.516	1.516	1.774	1.935

Tabelle 10: 50%-Perzentil

		Perzentil: 50%						
		2021	2021		2045		2070	
		CTRL	A1B	A2	A1B	A2	A1B	A2
ID_BAFU_40	Region	2021_CTRL_50	2021_A1B_50	2021_A2_50	2045_A1B_50	2045_A2_50	2070_A1B_50	2070_A2_50
100032	S1	1.000	0.987	0.986	0.973	0.974	0.953	0.949
100084	S2	1.000	1.010	1.008	0.984	0.984	0.970	0.964
100176	S3	1.000	1.093	1.074	1.168	1.167	1.184	1.208
100198	S4	1.000	1.017	1.015	1.018	1.018	1.018	1.018
100628	S5	1.000	0.954	0.957	0.924	0.924	0.912	0.904
100785	S6	1.000	1.014	1.012	1.031	1.027	1.031	1.032
101152	S7	1.000	1.013	1.015	1.009	1.007	1.009	1.013
101181	S8	1.000	0.994	0.997	0.967	0.968	0.942	0.936
101355	S9	1.000	1.026	1.028	0.978	0.980	0.944	0.926
101489	S10	1.000	1.028	1.021	1.070	1.069	1.097	1.118
101524	S11	1.000	1.033	1.028	1.044	1.042	1.042	1.046
101602	S12	1.000	0.996	0.995	1.002	1.002	1.005	1.008
101687	S13	1.000	1.019	1.016	1.000	1.002	0.980	0.981
102115	S14	1.000	1.006	1.007	0.977	0.979	0.951	0.943
103283	S15	1.000	1.017	1.012	1.017	1.017	1.005	1.003
103402	S16	1.000	1.027	1.025	1.005	1.005	0.981	0.972
103474	S17	1.000	0.989	0.987	0.987	0.987	0.956	0.953
103710	S18	1.000	1.101	1.088	1.210	1.205	1.003	1.014
103720	S19	1.000	1.049	1.044	1.060	1.059	1.060	1.069
103936	S20	1.000	1.001	1.000	0.980	0.980	0.964	0.960
103959	S21	1.000	0.955	0.951	0.971	0.970	0.931	0.930
103961	S22	1.000	0.996	0.996	0.976	0.979	0.961	0.960
104072	S23	1.000	1.059	1.050	1.092	1.091	1.107	1.134
104088	S24	1.000	1.054	1.049	1.055	1.055	1.047	1.050
104119	S25	1.000	1.106	1.082	1.259	1.252	1.292	1.379
104204	S26	1.000	1.026	1.018	1.036	1.035	1.027	1.027
104380	S27	1.000	1.004	1.003	0.979	0.980	0.964	0.959
104504	S28	1.000	0.944	0.941	0.942	0.942	0.933	0.936
104810	S29	1.000	1.197	1.150	1.552	1.540	1.577	1.713
104861	S30	1.000	1.023	1.004	1.073	1.069	0.956	0.969
105188	S31	1.000	1.045	1.042	1.061	1.061	1.067	1.081
105284	S32	1.000	1.019	1.015	1.026	1.025	1.022	1.025
105433	S33	1.000	1.022	1.020	1.024	1.024	1.012	1.009
105738	S34	1.000	0.966	0.966	0.971	0.971	0.966	0.964
105775	S35	1.000	0.970	0.971	0.939	0.940	0.928	0.923
106069	S36	1.000	0.925	0.923	0.927	0.927	0.925	0.926
106135	S37	1.000	1.039	1.033	1.115	1.112	1.154	1.175
106171	S38	1.000	1.033	1.022	1.091	1.087	1.028	1.051
106498	S39	1.000	0.940	0.937	0.931	0.931	0.870	0.866
106805	S40	1.000	1.039	1.034	1.036	1.035	1.033	1.036
106988	S41	1.000	1.069	1.060	1.105	1.102	1.072	1.089
107354	S42	1.000	1.053	1.034	1.184	1.177	0.953	0.973
107573	S43	1.000	0.988	0.987	0.964	0.965	0.954	0.947
107794	S44	1.000	1.078	1.066	1.148	1.148	1.169	1.191
107926	S45	1.000	0.899	0.898	0.916	0.915	0.884	0.887
108026	S46	1.000	1.034	1.027	1.053	1.052	1.048	1.052
108165	S47	1.000	1.004	1.003	1.000	0.999	0.996	0.996
108293	S48	1.000	0.998	0.992	0.994	0.993	0.955	0.949
108483	S49	1.000	0.974	0.967	0.991	0.990	0.990	0.999
108494	S50	1.000	0.982	0.981	0.985	0.985	0.969	0.966
108587	S51	1.000	1.006	1.005	1.004	1.005	0.993	0.994
109023	S52	1.000	1.011	1.012	0.994	0.995	0.986	0.977
109099	S53	1.000	0.992	0.993	0.965	0.966	0.944	0.940
109658	S54	1.000	0.997	0.995	0.986	0.986	0.979	0.981
109672	S55	1.000	0.998	0.995	1.013	1.013	1.020	1.028
Engadin	esamtgebiet	1.000	1.021	1.007	1.042	1.035	0.993	1.000

Tabelle 11: Perzentil-95%

		Perzentil: 95%						
		2021	2021		2045		2070	
		CTRL	A1B	A2	A1B	A2	A1B	A2
ID_BAFU_40	Region	2021_CTRL_95	2021_A1B_95	2021_A2_95	2045_A1B_95	2045_A2_95	2070_A1B_95	2070_A2_95
100032	S1	1.000	0.919	0.929	0.847	0.847	0.799	0.769
100084	S2	1.000	0.919	0.928	0.838	0.843	0.790	0.750
100176	S3	1.000	0.897	0.905	0.805	0.808	0.728	0.681
100198	S4	1.000	0.935	0.938	0.838	0.841	0.778	0.747
100628	S5	1.000	0.904	0.913	0.817	0.819	0.794	0.769
100785	S6	1.000	0.926	0.935	0.825	0.828	0.763	0.724
101152	S7	1.000	0.916	0.933	0.820	0.825	0.768	0.725
101181	S8	1.000	0.909	0.915	0.828	0.830	0.779	0.742
101355	S9	1.000	0.878	0.888	0.799	0.799	0.741	0.716
101489	S10	1.000	0.965	0.971	0.867	0.873	0.823	0.766
101524	S11	1.000	0.897	0.902	0.811	0.817	0.757	0.713
101602	S12	1.000	0.927	0.936	0.829	0.834	0.767	0.715
101687	S13	1.000	0.925	0.935	0.843	0.847	0.793	0.766
102115	S14	1.000	0.916	0.927	0.809	0.810	0.768	0.739
103283	S15	1.000	0.922	0.928	0.842	0.845	0.785	0.749
103402	S16	1.000	0.905	0.915	0.810	0.814	0.751	0.717
103474	S17	1.000	0.902	0.915	0.830	0.834	0.779	0.741
103710	S18	1.000	0.831	0.839	0.757	0.759	0.692	0.659
103720	S19	1.000	0.947	0.958	0.855	0.861	0.799	0.758
103936	S20	1.000	0.916	0.926	0.854	0.860	0.798	0.771
103959	S21	1.000	0.902	0.913	0.810	0.811	0.765	0.731
103961	S22	1.000	0.920	0.929	0.835	0.839	0.793	0.749
104072	S23	1.000	0.945	0.953	0.838	0.843	0.789	0.744
104088	S24	1.000	0.891	0.902	0.802	0.804	0.745	0.707
104119	S25	1.000	0.908	0.908	0.848	0.847	0.745	0.717
104204	S26	1.000	0.902	0.914	0.820	0.825	0.774	0.727
104380	S27	1.000	0.919	0.928	0.835	0.838	0.790	0.758
104504	S28	1.000	0.907	0.913	0.815	0.818	0.767	0.729
104810	S29	1.000	0.897	0.889	0.888	0.889	0.715	0.706
104861	S30	1.000	0.914	0.928	0.825	0.831	0.771	0.728
105188	S31	1.000	0.943	0.963	0.861	0.865	0.803	0.757
105284	S32	1.000	0.910	0.923	0.828	0.830	0.774	0.740
105433	S33	1.000	0.913	0.923	0.817	0.823	0.758	0.716
105738	S34	1.000	0.921	0.928	0.836	0.841	0.797	0.763
105775	S35	1.000	0.922	0.928	0.848	0.851	0.805	0.771
106069	S36	1.000	0.898	0.908	0.805	0.809	0.757	0.731
106135	S37	1.000	0.952	0.968	0.861	0.868	0.802	0.762
106171	S38	1.000	0.911	0.917	0.830	0.831	0.770	0.728
106498	S39	1.000	0.916	0.923	0.842	0.844	0.776	0.753
106805	S40	1.000	0.919	0.930	0.835	0.841	0.779	0.742
106988	S41	1.000	0.902	0.918	0.804	0.810	0.750	0.715
107354	S42	1.000	0.921	0.926	0.823	0.825	0.765	0.721
107573	S43	1.000	0.908	0.918	0.820	0.827	0.793	0.766
107794	S44	1.000	0.903	0.920	0.799	0.804	0.732	0.689
107926	S45	1.000	0.880	0.890	0.798	0.801	0.745	0.717
108026	S46	1.000	0.907	0.919	0.820	0.826	0.762	0.728
108165	S47	1.000	0.939	0.948	0.840	0.844	0.782	0.751
108293	S48	1.000	0.911	0.921	0.829	0.830	0.774	0.743
108483	S49	1.000	0.901	0.904	0.807	0.814	0.767	0.724
108494	S50	1.000	0.931	0.936	0.854	0.858	0.812	0.773
108587	S51	1.000	0.898	0.911	0.812	0.820	0.764	0.725
109023	S52	1.000	0.921	0.927	0.839	0.843	0.800	0.771
109099	S53	1.000	0.922	0.930	0.859	0.862	0.813	0.787
109658	S54	1.000	0.916	0.923	0.841	0.845	0.794	0.744
109672	S55	1.000	0.889	0.891	0.793	0.797	0.747	0.710
Engadin	esamtgebiet	1.000	0.918	0.926	0.833	0.839	0.782	0.737

Tabelle 12: Perzentil-99.9%

		Perzentil:99.9%							
		2021		2045		2070			
		CTRL	A1B	A2	A1B	A2	A1B	A2	
ID_BAFU_40	Region	2021_CTRL_99.90	2021_A1B_99.90	2021_A2_99.90	2045_A1B_99.90	2045_A2_99.90	2070_A1B_99.90	2070_A2_99.90	
100032	S1	1.000	1.027	1.021	1.002	0.997	0.995	1.055	
100084	S2	1.000	1.037	1.036	0.958	0.960	1.068	1.187	
100176	S3	1.000	1.041	1.058	1.000	0.992	1.017	1.101	
100198	S4	1.000	1.021	0.998	0.940	0.940	0.923	0.912	
100628	S5	1.000	1.042	1.045	1.155	1.153	1.410	1.431	
100785	S6	1.000	1.007	1.015	0.983	0.991	0.959	0.984	
101152	S7	1.000	0.997	0.942	0.989	0.993	0.901	0.986	
101181	S8	1.000	1.044	1.045	1.059	1.059	1.108	1.101	
101355	S9	1.000	0.971	0.965	1.030	1.024	0.981	0.981	
101489	S10	1.000	1.097	1.084	1.118	1.120	1.202	1.245	
101524	S11	1.000	1.097	1.080	1.093	1.085	1.128	1.131	
101602	S12	1.000	0.984	0.963	0.958	0.957	0.951	0.971	
101687	S13	1.000	0.997	0.984	1.027	1.030	1.061	1.115	
102115	S14	1.000	1.070	1.073	1.091	1.093	1.120	1.130	
103283	S15	1.000	1.016	1.006	1.025	1.024	1.057	1.125	
103402	S16	1.000	0.968	0.966	0.978	0.978	0.948	0.968	
103474	S17	1.000	0.998	0.978	0.995	1.005	0.949	1.014	
103710	S18	1.000	0.960	0.980	0.870	0.876	0.820	0.767	
103720	S19	1.000	1.078	1.085	1.046	1.041	1.020	1.031	
103936	S20	1.000	0.988	0.985	0.994	0.998	0.992	1.094	
103959	S21	1.000	0.931	0.941	0.868	0.872	0.796	0.814	
103961	S22	1.000	1.015	1.012	1.043	1.052	1.041	1.062	
104072	S23	1.000	1.081	1.060	1.036	1.035	0.981	0.888	
104088	S24	1.000	0.918	0.923	0.879	0.880	0.853	0.904	
104119	S25	1.000	1.092	1.079	1.100	1.100	1.142	1.161	
104204	S26	1.000	0.947	0.933	0.908	0.907	0.893	1.019	
104380	S27	1.000	1.059	1.049	0.993	0.986	1.108	1.165	
104504	S28	1.000	0.992	0.977	0.923	0.928	0.894	0.881	
104810	S29	1.000	1.056	1.055	1.137	1.126	1.201	1.209	
104861	S30	1.000	1.009	1.006	1.027	1.024	1.104	1.092	
105188	S31	1.000	1.133	1.118	1.056	1.064	1.156	1.208	
105284	S32	1.000	0.943	0.956	0.824	0.824	0.746	0.753	
105433	S33	1.000	1.035	1.032	1.085	1.083	1.117	1.101	
105738	S34	1.000	1.021	1.012	1.006	1.007	0.960	0.989	
105775	S35	1.000	1.064	1.053	1.055	1.043	1.189	1.314	
106069	S36	1.000	0.958	0.963	0.907	0.907	0.869	0.854	
106135	S37	1.000	1.116	1.088	1.154	1.146	1.156	1.210	
106171	S38	1.000	1.058	1.051	1.096	1.081	1.125	1.111	
106498	S39	1.000	1.032	1.022	1.015	1.017	0.971	0.982	
106805	S40	1.000	1.035	1.038	1.035	1.038	1.150	1.149	
106988	S41	1.000	0.981	0.992	0.900	0.902	0.833	0.760	
107354	S42	1.000	1.078	1.080	1.086	1.082	1.148	1.188	
107573	S43	1.000	1.031	1.031	1.228	1.218	1.368	1.486	
107794	S44	1.000	1.043	1.030	1.085	1.086	1.120	1.153	
107926	S45	1.000	0.984	0.985	0.882	0.885	0.858	0.798	
108026	S46	1.000	0.914	0.921	0.868	0.873	0.827	0.839	
108165	S47	1.000	1.008	1.013	0.980	0.988	0.965	0.989	
108293	S48	1.000	1.026	1.021	0.985	0.988	0.994	1.001	
108483	S49	1.000	0.963	0.974	0.848	0.851	0.773	0.723	
108494	S50	1.000	0.973	0.965	0.995	0.993	1.054	1.077	
108587	S51	1.000	0.910	0.927	0.931	0.934	0.908	0.979	
109023	S52	1.000	0.988	0.985	1.016	1.002	1.245	1.232	
109099	S53	1.000	1.048	1.033	1.046	1.038	1.117	1.226	
109658	S54	1.000	1.014	1.016	1.037	1.027	1.019	1.093	
109672	S55	1.000	0.977	0.986	0.846	0.851	0.786	0.741	
Engadin	esamtgebiet	1.000	1.025	1.026	1.042	1.040	1.020	1.077	

5.6 Natürliche Variabilität vs. prognostizierte Veränderung

Das Abflussgeschehen im Einzugsgebiet des Inns unterliegt einer beträchtlichen natürlichen Variabilität. Mit unserer Analyse von 30-jährigen Zeiträumen können wir dieser natürlichen hydrologischen Bandbreite grösstenteils Rechnung tragen, indem wir z.B. die Standardabweichung der Schlüsselgrössen (jährliche Schnee- und Eisschmelze, jährliche Verdunstungs- und Abflussmenge) betrachten. Eine Grundannahme unserer Studie ist, dass die Variabilität in den täglichen meteorologischen Inputgrössen für alle vier Zeiträume (Referenz, nahe, mittlere und ferne Zukunft) gleich bleibt. Unsere Modellierung ergibt, dass sich auch die resultierende Variabilität im Jahresabfluss für die nahe, mittlere und ferne Zukunft kaum verändern wird. Sie nimmt nur geringfügig zu.

Im Vergleich dazu sind die prognostizierten Änderungen relativ klein, so dass alle simulierten Jahresganglinien für den Abfluss in einem zukünftig durchschnittlichen Jahr innerhalb der Grenzen der aktuellen Variabilität liegen.

Obwohl die Variabilität in etwa gleich bleibt, sind deren Änderungen dennoch signifikant und aussagekräftig. Sie zeigen die durchschnittlichen Verhältnisse Ende des 21. Jahrhunderts, welche bereits heute in extremen Jahren beobachtet werden konnten und damit die natürliche Variabilität überschreiten können.

5.7 Wie plausibel, resp. unsicher sind die Abfluss-Prognosen?

Die berechneten Veränderungen im natürlichen Abfluss des Inn-Einzugsgebietes sind mit verschiedenen Unsicherheiten entlang der gesamten Modellkette verbunden:

- 1) Eine erste beträchtliche Unsicherheit liegt in der Wahl der Emissionsszenarios. Diese Unsicherheit ist nicht quantifizierbar.
- 2) Eine zweite Unsicherheit entsteht durch die globale und regionale Klimamodellierung. Diese können wir abschätzen, indem wir für unsere Zielgrössen die Standardabweichungen der zehn verschiedenen Modellketten berechnen. Für den mittleren Jahresabfluss im Inn-Einzugsgebiet ist die Standardabweichung 24 mm oder gut 2%.
- 3) Eine weitere Unsicherheit liegt im Modell zur Berechnung der zukünftigen Gletscherentwicklung. Das hier verwendete Schrumpfmmodell der Universität Zürich ist grundsätzlich für eine grosse Skala (z.B. ganze Schweiz) und längere Zeithorizonte geeignet. Für den Zeitraum 2021 – 2050 dürfte mit diesem Modell der Gletscherrückgang etwas zu rasch simuliert werden. Wir haben überprüft, wie stark sich eine leichte Änderung der Gletscherfläche auf den simulierten Abfluss auswirkt. Dabei erwies sich der simulierte Gesamtabfluss nicht sehr sensitiv auf kleine Änderungen der Gletscherfläche.
- 4) Und schliesslich entsteht auch durch das hydrologische Modell selbst eine gewisse Unsicherheit. Die Verifikation mit Abflussdaten im Einzugsgebiet des Inns (1980 – 2009) attestierte dem Modell im grossen und ganzen eine gute Leistung. Ein direkter Vergleich mit einem detaillierteren, rechnerisch intensiveren hydrologischen Modell (Alpine3D) (Lehning *et al.* 2006) in einem kleineren Einzugsgebiet (Dischma) zeigt, dass es beim hydrologischen Modell eine Unsicherheit bezüglich Schnee- und Eisschmelzintensität gibt. Das konzeptuelle Modell PREVAH ist hier eher etwas konservativ und berücksichtigt (im Gegensatz zu Alpine3D) mögliche Änderungen in der Schnee-/Gletscheroberfläche nicht explizit. Somit liegen die prognostizierten durchschnittlichen Jahresabflüsse bei PREVAH deutlich unter denjenigen von

Alpine3D. Wir können aufgrund des heutigen Wissenstands nicht sagen, welche der beiden Vorhersagen wahrscheinlicher ist. Andererseits scheinen die von PREVAH simulierte Gletscherschmelzraten in guter Übereinstimmung mit von der VAW (Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich) berechneten Gletscherschmelzraten zu sein. Dies können wir aus einem direkten Vergleich am Beispiel Mattmark (Wallis) schliessen.

Die Aussagen des hydrologischen Modells in Bezug auf die jahreszeitlichen Veränderungen, vor allem im Frühling/Sommer und längerfristig auch im Sommer/Herbst können als robust angesehen werden.

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Basierend auf den aktuellsten Klimavorhersagen der ETH Zürich und den jüngsten Gletscherszenarien der Universität Zürich wurden für die Einzugsgebiete des Inn die hydrologischen Veränderungen für die Zeiträume 2021 – 2050 (nahe Zukunft), 2045 – 2075 (mittlere Zukunft) und 2070 – 2099 (ferne Zukunft) berechnet. Dabei wurde mit PREVAH ein Modell verwendet, welches seit über zehn Jahren in vergletscherten und Schneebeeinflussten Gebieten getestet und eingesetzt worden ist und sich bewährt hat. Der Vergleich mit Abflussdaten des Bundes, mit Schneeprodukten des WSL Institutes für Schnee- und Lawinenforschung SLF und mit Gletschermassen der VAW (für ein kleineres Gebiet im Wallis) für den Zeitraum 1980 – 2009 attestiert dem Modell eine gute bis sehr gute Performance. Flussregulierungen wurden in diesem Rahmen nicht berücksichtigt. Generell können trotz der Unsicherheiten im Modell und der damit erstellten Prognosen einige deutliche Aussagen für den zukünftigen Trend im Einzugsgebiet gemacht werden.

Das Engadin ist aufgrund seiner geographischen Lage durch relativ geringen Niederschlag von ca. 1138 mm/a charakterisiert, welcher jedoch räumlich sehr unterschiedlich ausfällt und Werte zwischen ca. 800 bis 1800 mm/Jahr aufweist. Aus diesem Grund ist es in gewissen Gebieten stark von Wasserspeichern wie Gletscher und Schnee abhängig. So weisen vor allem Teileinzugsgebiete mit stark vergletscherten Flächenanteil eine hohe Abflussmenge auf. Das Unterengadin, welches durch relativ geringe Niederschläge geprägt ist und geringe bzw. keine Gletscheranteile aufweist, verzeichnet hingegen um eine bis zu mehr als 1000 mm/y geringere Abflussmenge.

Die Resultate zeigen, dass zukünftig eine signifikante Änderung im Wasserhaushalt des Engadin bemerkbar wird. Denn die Mächtigkeit der Schneedecke wird sich bis Ende des 21. Jahrhunderts um über 50% verringern, wobei sich die Schneeschmelze zusätzlich um drei bis sechs Wochen vorverschiebt und deutlich kürzer ausfällt als bisher. Grund für den verminderten Schneedeckenaufbau ist die Temperaturerhöhung im Rahmen des Klimawandels, wodurch verstärkt Niederschlag in Form von Regen anstatt in Schnee fallen wird und dadurch im Winter ebenfalls verstärkt zur Abflussbildung führt.

Da Gletscher im Einzugsgebiet noch relativ grossen Einfluss haben, beeinflussen sie momentan den Wasserhaushalt des Inns durch ihren Abflussbeitrag von 4% wesentlich. Die heutige vergletscherte Fläche von 4% wird sich bis zum Ende des Jahrhunderts stark reduzieren (1% vergletscherte Fläche).

Zukünftig wird die Gletscherschmelze intensiver sein, jedoch wird auch die Gletscherfläche gleichzeitig kleiner. Daraus resultiert ein Gletscherschmelzabfluss, der vorläufig ähnlich gross bleibt wie bisher oder (bei einigen Klimamodellketten) leicht abnimmt. In der zweiten Hälfte des Jahrhunderts wird der Rückgang des Eisvolumen der Gletscher deutlich und die

Wasserspeicher werden voraussichtlich in fast allen Teileinzugsgebieten nahezu abgeschmolzen sein.

Für den saisonalen Abfluss der Einzugsgebiete des Inns bedeutet dies zukünftig eine markante zeitliche Veränderung der Jahresganglinie mit einem um drei bis sechs Wochen früheren sowie reduzierten Abfluss-Maximum. Daraufhin muss vermehrt mit einer verlängerten abflussarmen Periode gerechnet werden, in der das Risiko für Niedrigwasser erhöht ist.

Generell ist langfristig aufgrund der Änderung der Wasserspeicher mit einem ausgeglichen saisonalen Abflussverhalten zu rechnen. Jedoch steigt die Gefahr für grosse Hochwasser in warmen, feuchten Winterphasen. Erhöhtes Risiko für Niedrigwasser besteht vor allem in trockenen, heissen Sommermonaten in unvergletscherten Teileinzugsgebieten.

Hingegen weist der Gesamtabfluss des Einzugsgebiets des Inn einen nur gering rückläufigen Wert auf (4% für den Zeitraum 2021 – 2050, 6% für den Zeitraum 2070 – 2099). Dieses Änderungssignal ist aber im Vergleich zur natürlichen Variabilität zwischen den Jahren eher klein, welche wir bereits heute beobachten.

Da der Gletscherbeitrag heute noch relativ gross ist und die Niederschläge im Einzugsgebiet relativ gering sind, wird das Fehlen der Gletscher bedeutende Auswirkungen auf den Gesamtabfluss des Inn nach sich ziehen. Teileinzugsgebiete wie der Rosegbach aus der Berninaregion, Sarsurabach westlich des Piz Sarsura sowie La Clozza südlich des Piz-Buin, deren Abfluss stärker von der Gletscherschmelze beeinflusst ist, werden die Folgen des Gletscherrückgangs jedoch stärker wahrnehmen.

Die räumliche Variabilität der Teileinzugsgebiete im Wasserhaushalt wird aufgrund des Schwinden der Gletscher verstärkt von den Niederschlägen dominiert. Aus diesem Grund werden die Teileinzugsgebiete an Gebirgsrändern (z.B. Berninaregion) für Niederschlag begünstigter sein, wohingegen bspw. die Tallage des Unterengadins zu geringeren Niederschlagsmengen führt.

Obwohl sich die mittlere Jahresganglinie zukünftig stärker durch geringere Spitzen auszeichnet, wird das Risiko für Niedrig- und Hochwasser erhöht sein. Vor allem in niederschlagsarmen, heissen Sommermonaten wird der fehlende Schmelzwasserbeitrag Auswirkungen haben und nicht nur zu verminderten Abflussmengen führen, sondern auch zu potentieller Trockenheit. Denn die gesteigerte Verdunstungsrate und das reduzierte pflanzenverfügbare Bodenwasser kann verstärkt Wasserstress für Pflanzen auslösen. Ebenfalls steigt die Gefahr für Hochwasser in warmen, regenreichen Spätherbst-/Winterperioden, in welchen die Wasserspeicherkapazität von gesättigten Böden übersteigt wird und Flüsse sowie Seen über die Ufer treten.

Generell kann durch die erstellten Prognosen die Veränderung des Wasserdargebots für die Zukunft abgeschätzt werden und die Ergebnisse für die zukünftige Wasserversorgung, Wasserkraftnutzung sowie entsprechende Nutzungsänderung berücksichtigt werden.

Literaturverzeichnis

CH2011 2011: Swiss Climate Change Scenario CH2011. Published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, OcCC, Zurich, Switzerland. 88 pp.

Bernhard, L., Pflugshaupt, C., Kotlarski, S. & M. Zappa 2013. *Auswirkungen der CH2011 Klimaszenarien auf die Wasserressourcen – eine Abschätzung für die Schweiz*. In: Weingartner, R. & B. Schädler (eds) *Wasserressourcen im globalen Wandel. Hydrologische Grundlagen – von der Messung zur Anwendung. Beiträge zum Tag der Hydrologie 4. – 6. April 2013 an der Universität Bern. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung Heft 32.13*. D-Hennef, DWA. 93-102

Bernhard, L. & M. Zappa 2012. *Klimaänderung und natürlicher Wasserhaushalt der Grosseinzugsgebiete der Schweiz. Schlussbericht zum Projekt „Klimaänderung Hydrologie in der Schweiz“ (CCHydro)*. Birmensdorf

Bosshard, T., Kotlarski, S., Even, T. & C. Schär 2011a. *Klimaszenarien für Klimaimpaktstudien in der Schweiz. Institut für Atmosphäre und Klima, ETH Zürich*

Bosshard, T., Kotlarski, S., Even, T. & C. Schär 2011b. Spectral representation of the annual cycle in the climate change signal. *Hydrological and Earth System Sciences*, **15** (9)

Gruber, S. 2007. A mass-conserving fast algorithm to parameterize gravitational transport and deposition using digital elevation models. *Water Resources Research*, **43** (W06412)

Gurtz, J., Baltensweiler, A., Lang, H., Menzel, L. & J. Schulla 1996. *Auswirkungen von klimatischen Variationen auf Wasserhaushalt und Abfluss im Flussgebiet des Rheins*. Nationales Forschungsprogramm 31: *Klimaänderungen und Naturkatastrophen*. Abschlussbericht, Vdf Hochschulverlag der ETH Zürich

Johannesson, T., Raymond, C. & Waddington, E. 1989. Time-scale for adjustment of glaciers to changes in mass balance. *Journal of Glaciology*, **35** (121)

Jonas, T., Marty, C. & J. Magnusson 2009. Estimating the snow water equivalent from snow depth measurements in the Swiss Alps. *Journal of Hydrology*, **378** (1-2)

Knutti, R., Schär, C., Bosshard, T., Fischer, A. M., E. M. Fischer, Kotlarski, S., Kress, A., Weigel, A. P. 2011. *Swiss Climate Change Scenario CH2011: The methodological setup*. Published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, OcCC, Zurich, Switzerland. 88 pp.

Köplin, N., Viviroli, D., Schädler, B., & R. Weingartner 2010. How does climate change affect mesoscale catchments in Switzerland? a framework for a comprehensive assessment. *Advances in Geosciences*, **27**

Lehning, M., Völksch, I., Gustafsson, D., Hguyen, T., Stähli, M. & M. Zappa 2006. ALPINE3D: a detailed model of mountain surface processes and its application to snow hydrology. *Hydrological Processes*, **20** (10)

Menzel, L., Lang, H. & M. Rohmann 1999. *Hydrologischer Atlas der Schweiz - Tafel 4.1: Mittlere jährliche aktuelle Verdunstungshöhen 1973-1992*

Morger, A. 2008. Operationelle Schneemodellierung mit dem hydrologischen Modell PREVAH : Validierung und Assimilation von hochauflösenden Schneehöhen- bzw. Schneemuster-Karten für eine verbesserte Echtzeit Abflussvorhersage. Masterarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich

Paul, F., Maisch, M., Rothenbühler, C., Hoelzle, M. & W Haeberli 2007. Calculation and visualisation of future glacier extent in the Swiss Alps by means of hypsographic modelling. *Global and Planetary Change*, **55** (4)

Rothenbühler, C. 2006. GISALP – Räumlich-zeitliche Modellierung der klimasensitiven Hochgebirgslandschaft des Oberengadins. PhD thesis, Geographisches Institut, Universität Zürich

Stahl, K, Moore, R. D., Shea, J. M., Hutchinson, D. & A. J. Cannon 2008. Coupled modelling of glacier and streamflow response to future climate scenarios. *Water Resources Research*, **44** (W02422)

Van der Linden, P. & J. Mitchell 2009. ENSEMBLES: Climate change and its impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK 160.

Verbunt, M., Gurt, J., Lang, H., Warmerdam, P. & M. Zappa 2003. The hydrological role of snow and glaciers in alpine river basins and their distributed modeling. *Journal of Hydrology*, **282** (1-4)

Verbunt, M., Zappa, M., Gurtz, J. & P. Kaufmann 2006. Verification of a coupled hydrometeorological modelling approach for alpine tributaries in the Rhine basin. *Journal of Hydrology*, **324** (1-4)

Viviroli, D., Durr, H. H., Messerli, B., Meybeck, M. & R. Weingartner 2007. Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance. *Water Resources Research*, **43** (W07447)

Viviroli, D., Mittelbach, H., Gurtz, J. & R. Weingartner 2009. Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland - Part II: Parameter regionalisation and flood estimation results. *Journal of Hydrology*, **377** (1-2)

Viviroli, D., Zappa, M., Gurtz, J. & R. Weingartner 2009. An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. *Environmental Modelling & Software*, **24** (10)

WGMS, Haeberli, W., Gärtner-Roer, I., Hoelzle, M., Paul, F. & Zemp, M., (eds) 2009, *Glacier Mass Balance Bulletin No. 9 (2006 - 2007)*, CSU (FAGS) / IUGG (IACS) / UNEP/UNESCO / WMO, World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland

Zappa, M. 2002. Multiple-Response Verification of a Distributed Hydrological Model at Different Spatial Scales. Dissertation No. 14895, Institut für Atmosphäre und Klima, ETH Zurich

Zappa, M., Pos, F., Strasser, U., Warmerdam, P. & J. Gurtz 2003. Seasonal water balance of an Alpine catchments as evaluated by different methods for spatially distributed snowmelt modelling. *Nordic Hydrology*, **34** (3)

Zappa, M., Bernhard, L., Fundel, F. & Jörg-Hess, S. 2012. Vorhersage und Szenarien von Schnee- und Wasserressourcen im Alpenraum. *Forum für Wissen 2012*, pp. 19 – 27. ISSN 1021-2256

Anhang A

Tabelle: Ergebnisse der Kalibration und der Verifikation der Modellierungen an ausgewählten BAFU-Stationen des Inn (Vgl. Abb. 20) für drei Perioden: 1984 – 1996; Verifikation; Gesamtperiode). NS: Nash-Sutcluff-Kriterium [-]; NSL: Logarithmisches Nash-Kriterium [-]; DV: Volumenfehler [%].

Fluss	BAFU-Station	Periode	NS	NSL	DV
Inn	Cinuos-chel	1984 – 1996	0.489	0.803	-2.0%
		Verifikation	0.479	0.79	0.9%
		Gesamt	0.472	0.78	3.1%
Inn	Martina	1984 – 1996	0.727	0.645	-3.6%
		Verifikation	0.731	0.675	-6.1%
		Gesamt	0.732	0.698	-8.0%
Inn	Tarasp	1984 – 1996	0.818	0.898	0.3%
		Verifikation	0.798	0.889	-0.8%
		Gesamt	0.783	0.882	-1.6%

Anhang B