

Mittlere Abflüsse grosser Einzugsgebiete

Zusammenfassung

Die Karten zeigen die Veränderungen der mittleren monatlichen, saisonalen und jährlichen Abflüsse für die drei Emissionsszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 für die drei zukünftigen Perioden 2020–2049, 2045–2074 und 2070–2099 verglichen mit der Referenzperiode 1981–2010. Der Fokus liegt auf den Abflüssen grosser Einzugsgebiete, welche mehrheitlich eine Fläche > 1000 km² aufweisen. Abflüsse in mesoskaligen Einzugsgebieten können der Karte L01 entnommen werden. Stark vergletscherte alpine Einzugsgebiete werden in der Karte L03 behandelt. Dabei ist zu beachten, dass sich das methodische Vorgehen bei den drei Karten unterscheidet.

Autoren: Massimiliano Zappa¹, Florian Lustenberger¹, Rolf Weingartner², Alain Bühlmann², Regula Mülchi³

¹Eidg. Forschungsanstalt WSL, Gebirgshydrologie und Massenbewegungen, Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf

²Hydrologischer Atlas der Schweiz, Hallerstrasse 12, CH-3012 Bern

³Universität Bern, Geographisches Institut, Hallerstrasse 12, CH-3012 Bern

1 Einleitung

Das globale Klima verändert sich. Durch den Menschen verursacht, haben die Treibhausgaskonzentrationen in den letzten Jahrzehnten immer stärker zugenommen, was zu einem globalen Temperaturanstieg [1] mit entsprechenden Auswirkungen auf die Kryosphäre geführt hat. Damit einhergehend verändern sich auch die Niederschlagsverhältnisse [2]. Es wird davon ausgegangen, dass die Niederschlagsmengen im Winter zu- und im Sommer abnehmen werden ([1]; s. Karte K01), was sich direkt auf den Abfluss auswirkt. So haben die sommerlichen Abflussmengen in diversen Einzugsgebieten bereits in den letzten vierzig Jahren abgenommen [3]. Geringe Abflussmengen oder gar Wasserknappheit werden in der Schweiz dann vor allem auch für den Sommer prognostiziert, wobei das Mittelland davon voraussichtlich stärker betroffen sein wird als der Alpenraum [4]. Abflussszenarien sind wichtig, um diese Veränderung der Ressource Abfluss besser und vor allem auch quantitativ abschätzen zu können.

2 Daten und Methoden

Für die vorliegende Karte L02 wurden die mittleren Abflüsse der grossen Einzugsgebiete mit dem hydrologischen Modell PREVAH (Precipitation-Runoff-EVApotranspiration-HRU related Model) simuliert. Es wurde die räumlich explizite Modellversion mit einer Auflösung von 200 m · 200 m verwendet [5]. Die Modellparameter wurden für die Schweiz bereits in den Studien von Viviroli et al. [6], Viviroli et al. [7] und Köplin et al. [8] kalibriert, validiert und regionalisiert. Daraus wurde ein komplettes, gegittertes Parameterset mit einer räumlichen Auflösung von 2 km · 2 km zusammengestellt, das bereits von Bernhard und Zappa [9] und Speich et al. [5] verwendet wurde. Für die räumliche Interpolation wurde dabei die Kriging-Methode verwendet. Die PREVAH-Parameter wurden diesem Parameterset entnommen.

Als meteorologischer Modellinput dienten die Parameter Niederschlag, Temperatur, relative Luftfeuchte, Globalstrahlung und oberflächennaher Wind re-

präsentativer Stationen von MeteoSchweiz aus dem Zeitraum 1975–2016. Die meteorologischen Daten wurden mit einer höhenabhängigen Regression und einer abstandsabhängigen Interpolation räumlich interpoliert [6]. Für die Landnutzung und das digitale Höhenmodell wurde auf die Arealstatistik des Bundesamts für Statistik (GEOSTAT) zurückgegriffen (Version 1992/97). Die verwendeten Schneemessungen stammen vom Interkantonalen Mess- und Informationssystem (IMIS) und dem WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) [10]. Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) lieferte schliesslich tägliche Abflussdaten für die Kalibration und Validation des Modells. Die meteorologischen Daten wurden vor der Verwendung mit einer höhenabhängigen Regression und einer abstandsabhängigen Interpolation räumlich interpoliert [6].

Die zukünftige Gletscherausdehnung wurde mit der von Zekollari et al. [11] entwickelten und bereits von Brunner et al. [4] für die Abflussmodellierung eingesetzten Methode berechnet (siehe auch Karte L04).

Als Input für die Modellierung der zukünftigen mittleren Abflüsse dienten die CH2018-Daten [2]. Dabei wurden die Outputs der Klimamodelle auf die Stationen herunterskaliert (s. «Daily Local» in CH2018). Insgesamt wurden 39 Modellketten verwendet, die auf den Emissionsszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 basieren (siehe Tabelle 1). Diese Modellauswahl ist geringfügig kleiner als jene in Karte L01, da zur Berechnung der Verdunstung zusätzliche Variablen (wie z.B. Wind) benötigt werden, welche nicht in allen Klimamodellen verfügbar sind.

Die Abflusssimulationen beziehen sich auf vier Perioden: Referenzperiode (1981–2010), nahe Zukunft (2020–2049), mittlere Zukunft (2045–2074) und ferne Zukunft (2070–2099). Aus den Simulationen der Modellketten, die zu einem RCP gehören, wurde das Vertrauensintervall abgeleitet.

3 Resultate

Unabhängig von der Region und vom Emissionsszenario lassen die Ergebnisse eine Abflusszunahme in Winter und Frühling und eine Abflussabnahme in Som-

GCM	init	RCM	RCP8.5		RCP4.5		RCP2.6	
			0.11°	0.44°	0.11°	0.44°	0.11°	0.44°
ICHEC-EC-EARTH	r1i1p1	KNMI-RACMO22E		☑		☑		
		DMI-HIRHAM5	☑		☑		☑	
	r12i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17		☑				
		SMHI-RCA4	☑		☑		☑	
MOHC-HadGEM2-ES	r1i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17		☑				
		CLMcom-CCLM5-0-6		☑				
		ICTP-RegCM4-3		☑		☑		
		KNMI-RACMO22E		☑		☑		☑
		SMHI-RCA4	☑		☑		☑	☑
MPI-M-MPI-ESM-LR	r1i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17		☑				
		CLMcom-CCLM5-0-6		☑				
		MPI-CSC-REM02009		☑				
	r2i1p1	MPI-CSC-REM02009	☑		☑		☑	
MIROC-MIROC5	r1i1p1	CLMcom-CCLM5-0-6		☑				
		SMHI-RCA4		☑		☑		☑
CCCma-CanESM2	r1i1p1	SMHI-RCA4		☑		☑		
CSIRO-QCCCE-CSIRO-Mk3-6-0	r1i1p1	SMHI-RCA4		☑		☑		
IPSL-IPSL-CM5A-MR	r1i1p1	SMHI-RCA4		☑		☑		
NCC-NorESM1-M	r1i1p1	SMHI-RCA4		☑		☑		☑
NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M	r1i1p1	SMHI-RCA4		☑		☑		☑

Tabelle 1. Das Modellensemble der Klimaszenarien CH2018 resultiert aus verschiedenen Modellketten (Simulationen). Diese stellen eine Abfolge von globalen (GCM) und regionalen Klimamodellen (RCM) dar und werden teilweise auf Grundlage unterschiedlicher Ausgangsbedingungen (init) initiiert. Der Begleittext zur Karte K01 oder K02 gibt einen Überblick über alle in CH2018 verfügbaren Modellläufe. In der rechten Hälfte der Tabelle sind die in der vorliegenden Studie zur Berechnung der Ensemble-Statistik (Median, Minimum, Maximum) berücksichtigten Modellläufe – aufgeteilt nach Emissionsszenarien (RCP) und deren räumlicher Auflösung (0.11° oder 0.44°) – gekennzeichnet (☑). Der Vergleich dieser Tabelle mit derselben aus anderen Karten (K01/K02 und L01, L03 und L04) zeigt die Unterschiede in den berücksichtigten Modellläufen auf. Tabelle auf Grundlage von [2] umgesetzt.

mer und Herbst erkennen. Die mittleren Jahresabflüsse der 30-Jahresperioden sind bei allen drei RCPs bis Ende des Jahrhunderts eher rückläufig. Diese Tendenz ist allerdings weniger stark ausgeprägt als bei den saisonalen Veränderungen.

In den alpinen Grosseinzugsgebieten Rhone und Inn nimmt der Einfluss der Schnee- und insbesondere Gletscherschmelze im Laufe des 21. Jahrhunderts ab. In Kombination mit dem Rückgang der Sommerniederschläge (Karte K01) führt dies zu einer Abflussabnahme im Sommer; sie ist am Ende des Jahrhunderts und unter RCP8.5 am stärksten ausgeprägt. Zwischen Dezember und Mai zeigen die Szenarien generell eine Zunahme der Abflüsse.

Entlang der Aare erkennt man vom Oberlauf zum Unterlauf bis Ende Jahrhundert grundsätzlich dieselben Abflussveränderungen: eine Abflusszunahme im Winter infolge höherer Temperaturen und leichter Niederschlagszunahme sowie eine Abflussabnahme im Sommer infolge fehlender Niederschläge (K01) und, vor allem gegen Ende Jahrhundert, sehr geringer Gletscherschmelze. Diese Abflussveränderungen bewirken im Unterlauf, dass das Maximum der Monatsabflüsse bis zum Ende des Jahrhunderts, unter RCP8.5, zwar immer noch im Frühsommer auftritt, aber es ist nun eine Zweiteilung mit ähnlich hohen Monatsabflüssen zwischen Dezember und Juni und tiefen Monatsabflüssen zwischen Juli und November erkennbar. Bemerkenswert ist, dass die kleinsten Monatsabflüsse nun nicht mehr im Winter, sondern vermehrt – in Abhängigkeit des RCPs und der betrachteten Zeitperiode – im Sommer auftreten. Auch beim stärker alpin beeinflussten Oberlauf sind dieselben Muster erkennbar. So zum Beispiel bei der Aare in Thun. Da hier der Einfluss der Gletscherschmelze relativ gross ist, führt die dramatische Gletscherabnahme, insbesondere unter dem RCP8.5, von Juli bis September zu einem sehr starken Abflussrückgang. Dasselbe gilt für die Ober- und Unterläufe von Reuss und Limmat. Entlang des Rheins erkennt man prinzipiell denselben Verlauf wie bei der Aare.

Beim Rhein in Basel, der die gesamte Alpennordseite entwässert und somit alpine, voralpine und mittelländische Einzugsgebiete enthält, zeigen sich die oben beschriebenen Veränderungen nochmals in aller Deutlichkeit: Abflusszunahme im Winter, Verfrühung der Abflüsse im Frühjahr und Abflussabnahme im Sommer. Interessant ist, dass sich ab der Periode 2020–2049 unter allen Emissionsszenarien das Minimum der Monatsabflüsse vom Winter in den Sommer verschiebt. Insgesamt sind bei Grosseinzugsgebieten, welche alpine, voralpine und mittelländische Einzugsgebiete enthalten, die Veränderungen der mittleren Monats- und Jahresabflüsse bis Ende Jahrhundert, unter allen RCPs, prozentual weniger stark ausgeprägt als bei den Einzugsgebieten im Alpenraum. Dies liegt vor allem daran, dass alpine Gebiete stärker von den höheren Temperaturen (K02) und deren Einfluss auf die Schnee- und Gletscherschmelze betroffen sind (siehe auch L04).

4 Hinweise zu Interpretation und Nutzung

Die folgenden Hinweise sollten bei der Verwendung der Karte berücksichtigt werden:

Hydrologische Projektionen basieren auf einer langen Kette unterschiedlicher Modelle. Darin enthalten sind Emissionsszenarien, die daraus resultierende Antwort der Klimamodelle sowie die hydrologischen Modelle. Jedes Modell in dieser Modellkette beinhaltet Unsicherheiten. Diese Unsicherheiten werden zu einem gewissen Grad berücksichtigt, indem eine grosse Anzahl von Klimamodellen und drei Emissionsszenarien als Grundlage für die hydrologische Modellierung verwendet werden. Es wurde hingegen nur ein hydrologisches Modell verwendet, wobei die Verwendung anderer hydrologischer Modelle potenziell zu anderen Resultaten führen könnte. Ein Vergleich mit anderen Studien (siehe Karte L01) hat allerdings eine gute Übereinstimmung der Vorzeichen der Änderungssignale gezeigt.

Da Klimasimulationen jeweils nur eine Realisierung des zukünftigen Klimas repräsentieren und jedes Modell leicht anders strukturiert ist, ist es wichtig zu beachten, dass die einzelnen Simulationen nur eine Möglichkeit aus dem gesamten Ensemble repräsentieren. Deshalb wird empfohlen, das gesamte Modellenensemble (Vertrauensintervall) zu berücksichtigen und langjährige Mittelwerte zu verwenden (z.B. 30-Jahres-Perioden). Dies ermöglicht eine Abschätzung der Robustheit der Resultate und eine Reduzierung des Einflusses der internen Klimavariabilität. Die Karte zeigt deshalb neben dem Median aller Modellläufe – auch «mittlere Schätzung» genannt – auch die minimale und maximale Schätzung des Ensembles. Diese dienen als Indikator der Robustheit, indem sie zeigen, wie stark die Übereinstimmung der einzelnen Modellläufe ist. Die Minima und Maxima von L02 dürfen nicht direkt mit jenen in den Niederschlags- und Temperaturkarten (K01, K02) verglichen werden, bei welchen das 5%- und 95%-Perzentil gezeigt wird. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass bei der Abflussmodellierung insgesamt weniger Modelle zur Verfügung standen, weshalb die Perzentile nicht robust bestimmt werden können.

Die Bandbreite aller Abflussszenarien der Grosseinzugsgebiete kann als potenzielles zukünftiges Wasserdargebot der jeweiligen Szenarioperiode betrachtet werden. Da die Abflussszenarien der Referenzperiode (Abflusssimulationen mit den CH2018-Meteodaten) in Einzelfällen mehr oder weniger stark von den Kontrollsimulationen der Referenzperiode (Abflusssimulationen mit gemessenen Meteodaten) abweichen und diese wiederum mehr oder weniger stark von den Messdaten der Referenzperiode abweichen, ist bei der Betrachtung der absoluten Werte der Abflussszenarien [mm] allerdings Vorsicht geboten. Einer der Gründe dafür ist, dass der Einfluss der Seen in den Grosseinzugsgebieten im hydrologischen Modell nur grob berücksichtigt wurde, indem die Seen als Einzellinearer Speicher repräsentiert wurden. Wehrreglemente zur Seeregulierung wurden nicht implementiert. Weitere Gründe dafür sind diverse Unsicherheiten in der ge-

samten Modellkette sowie in den gemessenen Daten. Es sollten deshalb eher die Veränderungen zwischen den Szenarien angeschaut werden.

5 Anwendungsbeispiel

Die Karte L02 zeigt 25 Stationen, für welche Abfluss-szenarien verfügbar sind. Um zu den beiden Grafiken mit der möglichen künftigen Abflussentwicklung zu gelangen, klickt man auf einen der Standorte und dann auf den Link «Abflussszenarien».

Der erste Tab «Abflussregime» zeigt die monatlichen Abflüsse. Es besteht die Möglichkeit, das Regime für die verschiedenen Perioden und Emissionsszenarien zu vergleichen. Zur besseren Übersicht können dazu mittels der Kontrollkästchen in der Legende einzelne Kurven oder das Vertrauensintervall ein- und ausgeblendet werden. Weiter ist es möglich, die Einheit der y-Achse von absoluten [mm] auf relative Werte [%] umzustellen. In der Mitte oberhalb der Grafik kann schliesslich das gewünschte Emissionsszenario bzw. die Zeitperiode gewählt werden. **Abbildung 1** zeigt die Entwicklung der mittleren monatlichen Abflüsse bis zum Ende des 21. Jahrhunderts am Beispiel der Aare bei Untersiggenthal unter dem Emissionsszenario RCP8.5. Während in den Sommermonaten mit einer Abflussabnahme zu rechnen ist, nimmt der Abfluss in den Wintermonaten leicht zu.

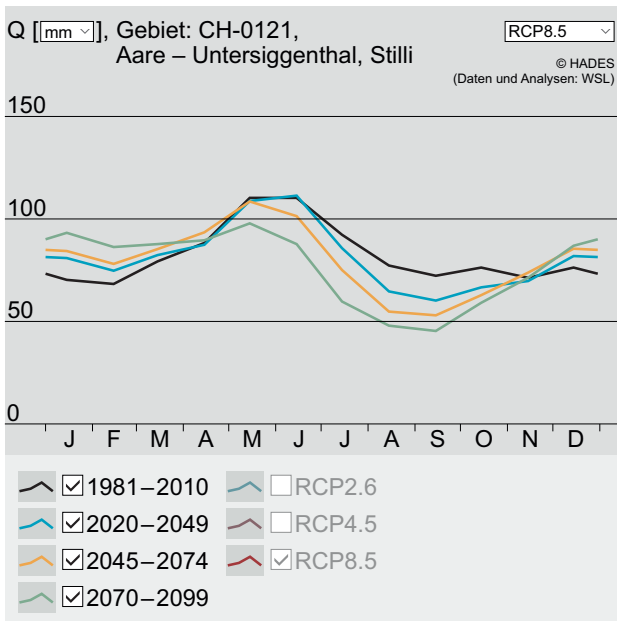


Abbildung 1. Aare–Untersiggenthal, Stilli: Veränderung des Abflussregimes bis zum Ende des 21. Jahrhunderts unter dem Emissionsszenario RCP8.5, beginnend in schwarz (Referenzperiode) über blau (2035) und gelb (2060) und endend in grün (2085)

Im zweiten Tab «Mittlere Abflüsse» kann die zeitliche Entwicklung der mittleren Abflüsse einzelner Monate, Jahreszeiten oder der Jahresabflüsse für die drei Emissionsszenarien verglichen werden. **Abbildung 2** zeigt, dass der mittlere Jahresabfluss der Station tendenziell leicht abnimmt. Die Abnahme der Sommerabflüsse

und die Zunahme der Winterabflüsse heben sich praktisch auf.

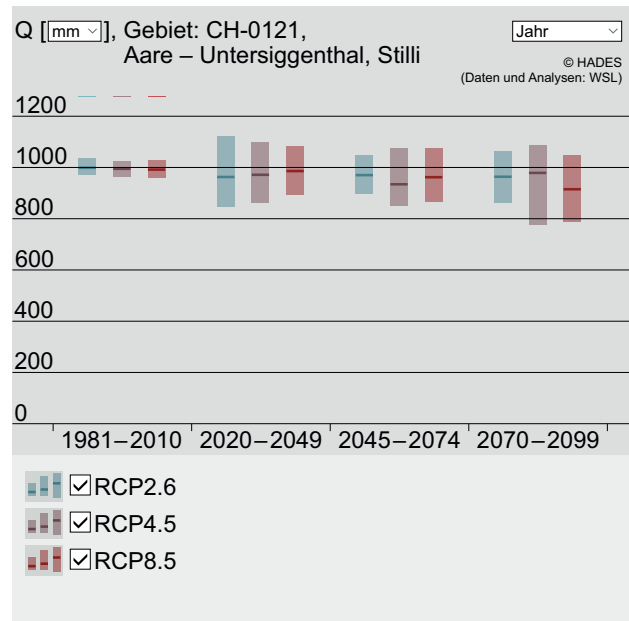


Abbildung 2. Aare–Untersiggenthal, Stilli: Abnahme der Jahresabflüsse bis Ende des 21. Jahrhunderts, unterteilt nach den drei Emissionsszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5

Im dritten Tab «Grundlegenden Daten» werden die zugrundeliegenden Niederschlags-, Temperatur- und Gletscherszenarien, welche zur Abflussmodellierung berücksichtigt wurden, für das zugehörige Einzugsgebiet zusammengefasst. Diese Informationen können zur Interpretation der Abflussszenarien beigezogen werden. Die Abbildungen deuten, für das obige Beispiel, auf eine Zunahme der Winterniederschläge in Kombination mit höheren Temperaturen (mehr Abfluss im Winter) und weniger Niederschlag im Sommer (weniger Abfluss im Sommer) hin. Die vergletscherte Fläche für dieses Einzugsgebiet beträgt schon heute nur rund 1.5% und ist daher eher von untergeordneter Bedeutung.

Schliesslich ist es möglich, die räumlichen Muster der Abflussveränderungen von Einzugsgebieten ähnlicher Grössenordnung untereinander zu vergleichen. Dazu wird in der linken Seitenleiste bei L02 «Einzugsgebiete» gewählt und mittels des Dropdowns die gewünschte Einzugsgebietsfläche definiert. Nun kann in der rechten Seitenleiste das gewünschte Emissionsszenario, die Zeitperiode etc. gewählt werden. **Abbildung 3** zeigt die relativen Veränderungen der Frühlingsabflüsse bis Ende des 21. Jahrhunderts unter dem Emissionsszenario RCP8.5 für Einzugsgebiete mit einer Grösse von rund 3250 km². Für rein inneralpine Einzugsgebiete (Rhone, Rhein) ist eine Zunahme der Abflüsse zu erwarten. Diese Tendenz kann für die Einzugsgebiete der Aare und Reuss nicht beobachtet werden, da deren Anteil an tieferliegenden Flächen grösser ist und somit die Veränderung der Schneeschmelze im Frühling von vergleichsweise geringer Bedeutung ist.

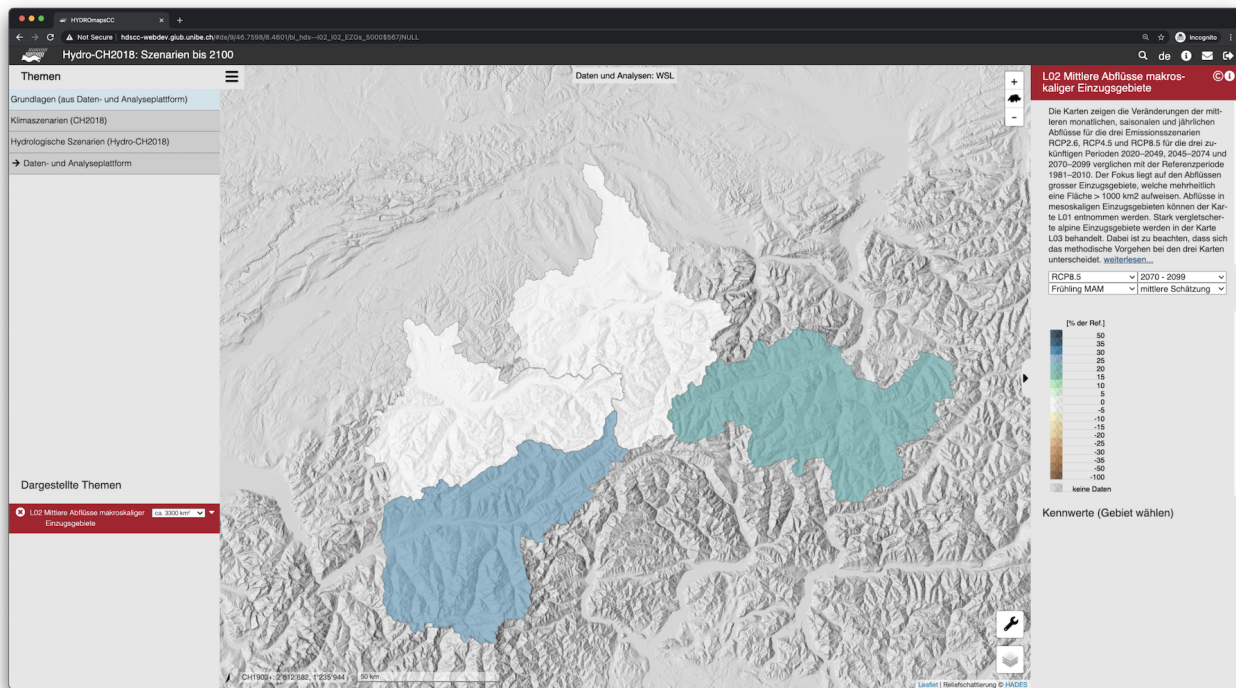


Abbildung 3. Relative Veränderung der Abflussmengen im Frühling unter dem Emissionsszenario RCP8.5. Dargestellt sind Gebiete mit einer Fläche von rund 3250 km²: Rhone bei Sion, Aare bei Bern-Schönau, Reuss bei Mellingen und Rhein bei Domat/Ems (von links unten nach rechts).

6 Versionen

Tabelle 2. Versionen

Version	Beschreibung
v1.0 (2020)	Version des angebotenen Datensatzes: Version 1.0, September 2018.

Literatur

- [1] IPCC, Pachauri, R. und Meyer, L., Hrsg. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: IPCC.
- [2] CH2018 (2018). *CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report*. Zurich: National Centre for Climate Services.
- [3] Michel, A., Brauchli, T., Lehning, M., Schaeffli, B. und Huwald, H. (2020). Stream temperature and discharge evolution in Switzerland over the last 50 years: annual and seasonal behaviour. en. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 24.1. <https://hess.copernicus.org/articles/24/115/2020/>, S. 115–142. ISSN: 1607-7938. DOI: 10.5194/hess-24-115-2020.
- [4] Brunner, M. I. et al. (2019). Present and future water scarcity in Switzerland: Potential for alleviation through reservoirs and lakes. en. In: *Science of The Total Environment* 666. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969719306576>, S. 1033–1047. ISSN: 00489697. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.169.
- [5] Speich, M. J., Bernhard, L., Teuling, A. J. und Zappa, M. (2015). Application of bivariate mapping for hydrological classification and analysis of temporal change and scale effects in Switzerland. en. In: *Journal of Hydrology* 523. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169415001055>, S. 804–821. ISSN: 00221694. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.01.086.
- [6] Viviroli, D., Mittelbach, H., Gurtz, J. und Weingartner, R. (2009a). Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland – Part II: Parameter regionalisation and flood estimation results. en. In: *Journal of Hydrology* 377.1-2. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169409005186>, S. 208–225. ISSN: 00221694. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.022.
- [7] Viviroli, D., Zappa, M., Schwanbeck, J., Gurtz, J. und Weingartner, R. (2009b). Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland – Part I: Modelling framework and calibration results. en. In: *Journal of Hydrology* 377.1-2. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169409005174>, S. 191–207. ISSN: 00221694.

00221694. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.023.
- [8] Köplin, N., Viviroli, D., Schädler, B. und Weingartner, R. (2010). How does climate change affect mesoscale catchments in Switzerland? – a framework for a comprehensive assessment. en. In: *Advances in Geosciences* 27. <https://adgeo.copernicus.org/articles/27/111/2010/>, S. 111–119. ISSN: 1680-7359. DOI: 10.5194/adgeo-27-111-2010.
- [9] Bernhard, L. und Zappa, M. (2012). *Schlussbericht CCHydrologie: Teilprojekt WHH- CH-Hydro: Natürlicher Wasserhaushalt der Schweiz und ihrer bedeutendsten Grosseinzugsgebiete*. Birmensdorf: Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL.
- [10] Jörg-Hess, S., Fundel, F., Jonas, T. und Zappa, M. (2014). Homogenisation of a gridded snow water equivalent climatology for Alpine terrain: methodology and applications. en. In: *The Cryosphere* 8.2. <https://tc.copernicus.org/articles/8/471/2014/>, S. 471–485. ISSN: 1994-0424. DOI: 10.5194/tc-8-471-2014.
- [11] Zekollari, H., Huss, M. und Farinotti, D. (2019). Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble. en. In: *The Cryosphere* 13.4. <https://tc.copernicus.org/articles/13/1125/2019/>, S. 1125–1146. ISSN: 1994-0424. DOI: 10.5194/tc-13-1125-2019.