

Veränderung der Niedrigwasserabflüsse und der kleinsten saisonalen Abflüsse in der Schweiz im Zeitraum 1961 - 2018

R. WEINGARTNER UND J. SCHWANBECK



IM AUFTRAG DES BUNDESAMTES FÜR UMWELT BAFU – JANUAR 2020

EINE STUDIE IM RAHMEN DES NCCS THEMENSCHWERPUNKTES “HYDROLOGISCHE
GRUNDLAGEN ZUM KLIMAWANDEL” DES NATIONAL CENTRE FOR CLIMATE SERVICES

- Auftraggeber:** Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Hydrologie, CH-3003 Bern. Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).
- Auftragnehmer:** ecosfera gmbh, Fleur de Lys 10, 2608 Courtelary
- Autor/Autorin:** Rolf Weingartner und Jan Schwanbeck
- Begleitung BAFU:** Petra Schmocker-Fackel und Fabia Hüsler
- Hinweis:** Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.
- Zitiervorschlag:** Weingartner R. und Schwanbeck J. 2020. Veränderung der Niedrigwasserabflüsse und der kleinsten saisonalen Abflüsse in der Schweiz im Zeitraum 1961 – 2018. Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU), Bern, Schweiz, 41 S.

ecosfera gmbh

Wasser • Wald • Ökosystem



**Veränderung
der Niedrigwasserabflüsse und
der kleinsten saisonalen Abflüsse
in der Schweiz im Zeitraum 1961 - 2018**

Schlussbericht, Januar 2020

Rolf Weingartner und Jan Schwanbeck

Impressum

Auftraggeber

Bundesamt für Umwelt BAFU
Abteilung Hydrologie
Papiermühlestrasse 172
CH-3003 Bern

Auftragnehmer

ecosfera gmbh
Fleur de Lys 10
2608 Courtelary
E-Mail: ecosfera@mail.ch

Autoren

Rolf Weingartner und Jan Schwanbeck

Publikationsdatum

2020

Titelbild

Niedrigwasser an der Kander im Januar 2020
(Foto: Rolf Weingartner)

Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie wird untersucht, ob, wie und in welchem Ausmass sich die Niedrigwasserabflüsse und die kleinsten saisonalen Abflüsse in schweizerischen Einzugsgebieten in der Periode 1961–2018 verändert haben. Zur Charakterisierung der Niedrigwasserabflüsse werden die beiden Kenngrössen $NM7Q$ und Q_{347} beigezogen, die hier auf Basis von Kalenderjahren berechnet werden. Zur Beschreibung der kleinsten saisonalen Abflüsse werden die kleinsten 7-Tagesmittel ($NM7Q$) pro Jahreszeit bestimmt. Insgesamt flossen 37 mesoskalige (Fläche $\leq 1000 \text{ km}^2$) und 16 makroskalige Einzugsgebiete ($> 1000 \text{ km}^2$) in die Trenduntersuchungen ein. Die Ergebnisse werden für die einzelnen Einzugsgebiete, gruppiert nach den Regimetypen von Weingartner und Aschwanden (1992) sowie in Form von Karten dargestellt.

Die **Niedrigwasserabflüsse** haben sich in der Periode 1961–2018 fast ausschliesslich in den alpinen Einzugsgebieten verändert: In sehr vielen Gebieten hat die jährlich kleinste Abflussmenge $NM7Q$ und die Abflussmenge Q_{347} deutlich oder gar signifikant zugenommen. Diese Veränderungen stehen in direktem Zusammenhang mit der Klimaänderung: Die Temperaturerhöhung führt zu einer Erhöhung des Regenanteils am Niederschlag im Winter sowie zu einer Veränderung der Dauer der Schneedecke und der Schneeschmelzprozesse.

Die kleinsten saisonalen Abflüsse haben sich vor allem im Frühling und im Sommer gewandelt: Das frühere Ausapern der Schneedecke bewirkt, dass die kleinsten saisonalen Abflüsse in alpinen und voralpinen, nival geprägten Einzugsgebieten im Frühling mehrheitlich zugenommen haben. Im Sommer fällt auf, dass die kleinsten Abflüsse in der Mehrheit der untersuchten nordalpinen Einzugsgebiete signifikant abgenommen haben. Das frühere Ausapern, das für alpine Einzugsgebiete besonders relevant ist, und die Erhöhung der Verdunstung dürften hierbei die entscheidenden Prozesse darstellen.

Resumée

La présente étude examine comment et dans quelle mesure les débits d'étiage et les plus petits débits saisonniers ont changé dans les bassins versants suisses pendant la période 1961–2018. Pour caractériser les débits d'étiage on utilise les deux paramètres $NM7Q$ et Q_{347} , qui sont calculés sur la base des années civiles. Pour décrire les plus petits débits saisonniers on détermine les plus petites moyennes sur 7 jours ($NM7Q$) par saison. Au total 37 bassins versants à méso-échelle ($\leq 1000 \text{ km}^2$) et 16 à macro-échelle ($> 1000 \text{ km}^2$) ont été inclus dans les analyses. Les résultats sont présentés pour les différents bassins versants, regroupés selon les types de régime de Weingartner et Aschwanden (1992) et sous forme de cartes.

Les étiages annuelles ont changé presque exclusivement dans les bassins versants alpins entre 1961 et 2018 : dans nombreuses bassins versants, le $NM7Q$ et le débit Q_{347} ont augmenté de façon importante, voire même significative. Ces changements sont directement liés au changement climatique : l'augmentation de la température entraîne une augmentation de la proportion des précipitations liquides en hiver et une modification de la durée de la couverture neigeuse et du processus de fonte de la neige.

Les plus petits débits saisonniers ont changé principalement au printemps et en été : au printemps, la fonte précoce de la couverture neigeuse signifie que les plus petits débits saisonniers ont augmenté dans la majorité des bassins versants alpins et préalpins, influencés par la fonte de la neige. En été, on constate que les plus petits débits ont diminué de manière significative dans la majorité des bassins versants étudiés au nord des Alpes. La fonte précoce de la couverture neigeuse, particulièrement importante pour les bassins versants alpins, et l'augmentation de l'évaporation sont probablement les processus décisifs.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung, Resumée	iii
1 Einleitung	1
1.1 Kenngrößen	1
1.1.1 Niedrigwasserabflüsse	1
1.1.2 Kleinste saisonale Abflüsse	2
1.1.3 Niedrigwasserabflüsse versus kleinste saisonale Abflüsse	2
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Stand der Kenntnisse	3
2 Daten	5
2.1 Wahl des Untersuchungszeitraums	5
2.2 Auswahl der Abflussmessstationen	6
3 Methodische Grundlagen	7
3.1 Trendanalysen	7
3.2 Erstellen regionaler Übersichten	7
3.3 Zeitliches Auftreten des Niedrigwasserabflusses NM7Q	8
4 Resultate der mesoskaligen Einzugsgebiete	9
4.1 Überblick	9
4.2 Glaziale geprägte Einzugsgebiete	12
4.2.1 Rahmenbedingungen	12
4.2.2 Kleinste saisonale Abflüsse	13
4.2.3 Niedrigwasserabflüsse	15
4.3 Nival geprägte Einzugsgebiete	15
4.3.1 Rahmenbedingungen	15
4.3.2 Kleinste saisonale Abflüsse	17
4.3.3 Niedrigwasserabflüsse	17
4.4 Voralpine, nival geprägte Einzugsgebiete	18
4.4.1 Rahmenbedingungen	18
4.4.2 Kleinste saisonale Abflüsse	20
4.4.3 Niedrigwasserabflüsse	20
4.5 Mittelländisch, pluvial geprägte Einzugsgebiete	21
4.5.1 Rahmenbedingungen	21
4.5.2 Kleinste saisonale Abflüsse	22
4.5.3 Niedrigwasserabflüsse	23
4.6 Jurassische Einzugsgebiete	23
4.6.1 Rahmenbedingungen	23
4.6.2 Kleinste saisonale Abflüsse	24
4.6.3 Niedrigwasserabflüsse	25
4.7 Südalpine Einzugsgebiete	25

5	Resultate der makroskaligen Gebiete	27
5.1	Rahmenbedingungen	27
5.2	Veränderungen der kleinsten saisonalen Abflüsse	28
5.3	Niedrigwasserabflüsse	30
6	Weitere Resultate	31
6.1	Kartographische Darstellung der Ergebnisse	31
6.1.1	Kleinste saisonale Abflüsse	31
6.1.2	Niedrigwasserabflüsse	32
6.1.3	Fazit	32
6.2	Zeitliche Einordnung der Untersuchungsperiode 1961–2018 . . .	36
6.2.1	Vergleich der Perioden 1961–2018 und 1931–2018	36
6.2.2	Die lange Reihe 1871–2018 des Rheins, Basel	36
7	Schlussfolgerungen	39
7.1	Niedrigwasserabflüsse	39
7.2	Kleinste saisonale Abflüsse	39
	Zitierte Literatur	41

1 Einleitung

Das BAFU-Projekt *Hydro-CH2018* untersucht die Auswirkungen der Klimaänderung auf die hydrologischen Verhältnisse der Schweiz. Es umfasst einen retrospektiven Teil – was hat sich in den letzten Jahrzehnten verändert? – und einen in die Zukunft gerichteten Teil – was wird sich in Zukunft verändern? Die wichtigsten Ergebnisse von *Hydro-CH2018* werden in einem Synthesebericht zusammengefasst. Das BAFU beauftragte im Sommer 2019 die *ecosfera gmbh*, eine retrospektive Analyse der Veränderungen der Niedrigwasserabflüsse durchzuführen, um Grundlagen für diesen Synthesebericht bereitzustellen.

1.1 Kenngrössen

1.1.1 Niedrigwasserabflüsse

Im Mittelpunkt der vorliegenden Untersuchungen stehen die Niedrigwasserabflüsse, welche einen Abfluss beschreiben, der – bezogen auf einen bestimmten Zeitraum – deutlich unter dem langjährigen Mittel liegt (vgl. Helbling et al. 2007). Dabei wird der Fokus meistens auf das (Kalender-) Jahr gelegt; d.h., es werden die kleinsten Abflüsse innerhalb eines Jahres betrachtet.

Zur Charakterisierung der Niedrigwasserabflüsse besteht eine Vielzahl von Kenngrössen, die je nach Fragestellung verwendet werden (vgl. Tallaksen und Van Lanen 2004). In der vorliegenden Untersuchung steht eine allgemeine Charakterisierung der Veränderungen der Niedrigwasserverhältnisse im Vordergrund. Dazu eignet sich die Kenngrösse $NM7Q$, welche in vielen Studien eingesetzt wird, ausgezeichnet. Sie beschreibt den kleinsten, über sieben aufeinanderfolgenden Tagen gemittelten Abfluss innerhalb eines betrachteten Zeitraums (Helbling et al. 2007). Die Kenngrösse $NM7Q$ ist weniger anfällig auf Messfehler als das früher oftmals verwendete kleinste Tagesmittel eines bestimmten Zeitraums (NNQ).

Helbling et al. (2007) weisen darauf hin, dass Niedrigwasseranalysen, welche auf Kalenderjahren beruhen, nicht unproblematisch sind: „Bei der Arbeit mit Kalenderjahren käme es häufig zu statistischen Abhängigkeiten der jährlichen Niedrigwasserkenngrossen. Diese Abhängigkeiten ergeben sich dann, wenn sich eine Trockenperiode über die gewählte Jahresgrenze hinaus erstreckt und damit für die zwei aufeinanderfolgenden Jahre je ein Niedrigwasser in die Statistik eingeht, obschon beide eigentlich zur selben Trockenperiode gehören. Solche Abhängigkeiten sind in der Statistik unzulässig.“ Deshalb wählten Helbling et al. (2007) für ihre Berechnungen den Zeitraum vom 1. Mai bis 30. April als Basis.

Für die vorliegende Studie haben wir uns trotzdem entschieden, auf das Kalenderjahr zu setzen, und zwar aus den folgenden Gründen:

1. Stichprobenartige Analysen zeigen, dass die Anzahl der Fälle, in denen die Niedrigwasser im Dezember und im Januar des Folgejahrs auftreten, sehr klein sind. Sie treten nur vereinzelt bei alpinen Einzugsgebieten auf.
2. Die Berechnung der zweiten hier betrachteten Niedrigwasserkenngrösse Q_{347} (s. unten) erfolgt stets auf der Basis von Kalenderjahren. Es macht deshalb für die vorliegende Studie wenig Sinn, für die beiden Niedrigwasserkenngrössen unterschiedliche Zeiträume zu verwenden.
3. Würde man den von Helbling et al. (2007) ausgewählten Zeitraum 1. Mai bis 30. April verwenden, müsste man bei den saisonalen Analysen (s. Kap. 1.1.2) von der „klassischen“ jahreszeitlichen Unterteilung in Dezember, Januar und Februar (DJF, Winter), März, April, Mai (MAM, Frühling), Juni, Juli, August (JJA, Sommer) und September, Oktober, November (SON, Herbst) abweichen.

Bei der Bemessung der Restwassermenge nach Gewässerschutzgesetz, Art. 31, spielt die Niedrigwasserkenngrösse Q_{347} eine zentrale Rolle; sie wird deshalb als zweite Kenngrösse in die Untersuchungen miteinbezogen. In dieser Analyse wird Q_{347} einerseits für die einzelnen Kalenderjahre berechnet; dazu wird aus den täglichen Abflussdaten eines Kalenderjahrs das 95%-Quantil bestimmt. Zur Bemessung der Restwassermenge nach Art. 31 muss andererseits die Abflussmenge Q_{347} einer zehnjährigen (aktuellen) Periode bekannt sein. Die Berechnung erfolgt in diesem Fall abzissengemittelt: Die Kenngrösse Q_{347} entspricht dem 95%-Quantil aller Abflusstagesmittel des betrachteten Zeitraums.

1.1.2 Kleinste saisonale Abflüsse

Zusätzlich zu den oben beschriebenen Kenngrössen der Niedrigwasserabflüsse, welche sich stets auf das Kalenderjahr beziehen, werden auch die kleinsten saisonalen Abflüsse und deren Entwicklung in der Zeit untersucht, um das Bild zu vervollständigen. So kann analysiert werden, welche Jahreszeiten vor allem zum jährlichen Niedrigwasser beitragen oder ob und wie sich die klimabedingten Veränderungen im Abflussregime (vgl. Weingartner 2019) auf die kleinsten Abflüssen auswirken.

Zur Charakterisierung der kleinsten saisonalen Abflüsse wird wiederum die Kenngrösse $NM7Q$ verwendet (s. Kap. 1.1.1).

1.1.3 Niedrigwasserabflüsse versus kleinste saisonale Abflüsse

Begrifflich muss in der vorliegenden Studie deutlich zwischen den Niedrigwasserabflüssen und den kleinsten saisonalen Abflüssen unterschieden werden.

Erstere beschreiben die kleinsten Abflüsse innerhalb eines Kalenderjahrs und sind für die Beschreibung der Niedrigwasserverhältnisse eines Einzugsgebietes entscheidend. Die kleinsten saisonalen Abflüsse sind zwar *per definitionem* innerhalb einer bestimmte Jahreszeit auch unterdurchschnittlich, aber aus Sicht eines Kalenderjahrs können sie sogar überdurchschnittlich ausfallen. Beispielsweise sind die kleinsten saisonalen Abflüsse im Frühling wegen der Schneeschmelze vergleichsweise hoch, so dass es wenig Sinn macht, in dieser Situation vom Niedrigwasser zu sprechen.

1.2 Zielsetzung

Im Mittelpunkt der vorliegenden Untersuchungen steht die Frage, ob, wie und in welchem Ausmass sich die Niedrigwasserabflüsse und die kleinsten saisonalen Abflüsse in schweizerischen Einzugsgebieten in den letzten Jahrzehnten verändert haben?

Um einen umfassenden und gleichzeitig repräsentativen räumlichen Überblick über die Schweiz zu erhalten, werden die Ergebnisse aus der Sicht der Abflussregimetypen nach Weingartner und Aschwanden (1992) differenziert. Für diese Regimetypen liegt zudem eine Studie von Weingartner (2019) vor, die diskutiert, in welchem Ausmass die mittleren saisonalen Abflüsse, also die Abflussregimetypen, in den letzten Jahrzehnten im Zuge des Klimawandels verändert haben. Sie bildet eine wichtige Grundlage für die Interpretation der Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen.

Im Hinblick auf eine Veröffentlichung im eingangs erwähnten Synthesebericht, der sich auch an ein breites Publikum wendet, sollen die Ergebnisse in einfacher, übersichtlicher graphischer Form – in Tabellen und Karten – dargestellt werden, so die Vorgabe des Auftraggebers.

1.3 Stand der Kenntnisse

Kohn et al. (2019) haben in einer abgestützten Studie den aktuellen Kenntnisstand zum Niedrigwasserbereich in der Schweiz dokumentiert und daraus die folgenden „Take-home messages“ formuliert:

1. „Studies agree that annual winter low flows in Switzerland have predominantly increased across all regions and regimes, as have overall winter streamflows; these increases have been explained by climatic trends and where applicable also by reservoir management with the release of stored water for hydropower production in winter. However, for glacierised catchments at high elevations the results of the reviewed studies are not consistent.

2. Studies' results are diverse regarding changes in summer low flows. Trend signals are more heterogeneous, attribution is unclear, and little methodological progress has been made to distinguish climatic and other drivers of change.
3. For the scale of Switzerland there are no published studies that included recent streamflow time series for the specific analysis of low flow trends. Available streamflow trend analyses are based on time periods that ended before the year 2010 and explored and discussed mainly changes of seasonal flow and regime shifts.
4. Overall, there is an unresolved controversy on trend test methodology, including the chosen statistical tests, underlying assumptions, details of data pre-processing, and how to discern trends from decadal scale variability. Most studies' records are limited to a few decades from ca. 1960 onwards, hence not including the low flow events of the 1940s.
5. These difficulties show the value of continued high-quality long-term streamflow monitoring and low flow reference station networks together with good metadata to allow attribution of causes.“

Punkt 3 der „Take-home messages“ weist darauf hin, dass die bisherigen Trendstudien nur auf Datenreihen bis 2010 beruhen. Mit der vorliegenden Untersuchung wird dieser Punkt aufgenommen, indem nun Trendanalysen durchgeführt werden, welche Abflussdaten bis und mit dem Jahr 2018 berücksichtigen und somit die sich im letzten Jahrzehnt häufenden Trockenjahre (2011, 2015 und 2018; vgl. BAFU 2019) miteinbeziehen.

2 Daten

2.1 Wahl des Untersuchungszeitraums

Die Trendanalysen beziehen sich auf die Periode 1961–2018. Diese Periode wird gewählt, weil

- sie genau den Zeitraum abdeckt, in der die Lufttemperatur stark zugenommen hat (s. Abb. 1 und vgl. Akademien der Wissenschaften Schweiz, 2016),
- sie mit rund 60 Jahren lang genug ist, um aussagekräftige Trendanalysen durchführen zu können und
- für diese Periode bereits relativ viele Einzugsgebiete mit lückenlosen Abflussmessreihen verfügbar sind (vgl. Kap. 2.2).

Um zu vergleichbaren Ergebnissen zu gelangen, ist es zudem wichtig, dass Trendanalysen auf der Basis derselben Zeitperiode – hier also 1961–2018 – erfolgen (vgl. Kap. 1.3). Diese Beschränkung auf dieselbe Untersuchungsperiode bedeutet aber strenggenommen, dass eine Verallgemeinerung der Ergebnisse nur bedingt möglich und sinnvoll ist. Deshalb werden in der vorliegenden Untersuchung die auf der Periode 1961–2018 basierenden Resultate zeitlich eingeordnet, indem sie einerseits mit Ergebnissen der Periode 1931–2018 und andererseits mit der langen Reihe des Rheins, Basel, ab 1871 verglichen werden (vgl. Kap. 6.2).

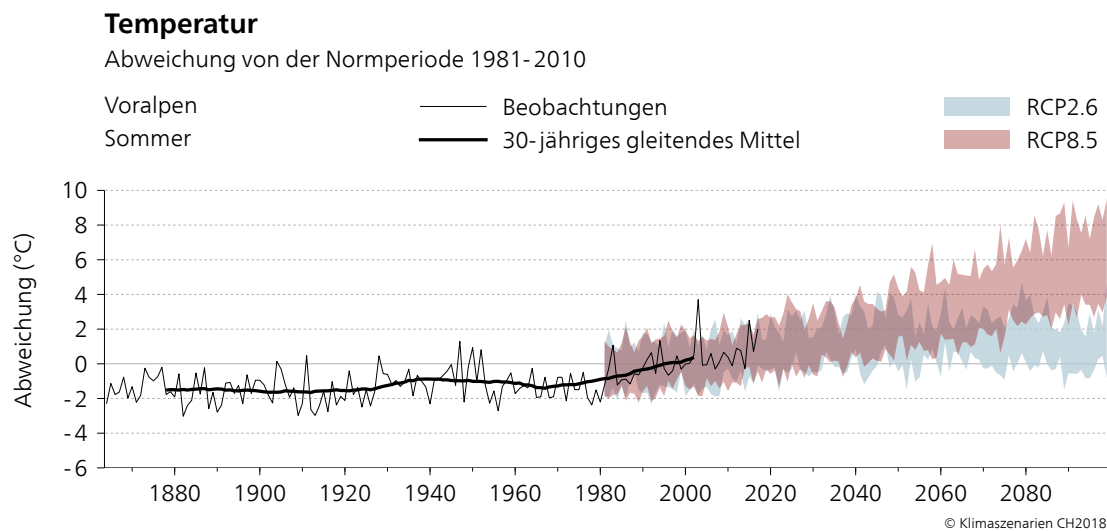


Abbildung 1: Veränderung der Lufttemperatur im Voralpenraum im Sommer. (NCCS 2018)

2.2 Auswahl der Abflussmessstationen

Für die Analysen werden nur Abflussmessstationen verwendet, welche die Periode 1961–2018 (vgl. Kap. 2.1) vollumfänglich abdecken und anthropogen wenig beeinflusst sind. Keine der kantonalen Stationen erfüllt das erste Kriterium, so dass nur Stationen des Bundesamts für Umwelt (BAFU) in die Analysen einfließen. Die finale Auswahl der Stationen orientiert sich an Weingartner (2019), der für eine Studie zur Veränderung des Abflussregimes in der Schweiz bereits eine Liste geeigneter Stationen zusammenstellte. Dabei unterschied er zwischen mesoskaligen Einzugsgebieten mit Einzugsgebietsflächen $\leq 1000 \text{ km}^2$ und makroskaligen Einzugsgebieten mit Flächen $>1000 \text{ km}^2$.

Bei den mesoskaligen Einzugsgebieten wird davon ausgegangen, dass sich Veränderungen der Steuerfaktoren wie Schnee, Gletscher, Niederschlag und Verdunstung direkt auf die kleinsten Abflüsse und die Niedrigwasserabflüsse auswirken. Veränderungen in makroskaligen Einzugsgebieten hingegen sind das Resultat des komplexen Zusammenspiels mesoskaliger Einzugsgebiete, klimatischer Veränderungen und anthropogener Einflüsse wie Wasserkraftproduktion und Seeregulierungen. Deshalb ist es bei diesen Gebieten schwierig, einen direkten Zusammenhang zwischen der Klimaänderung und den Veränderungen im Bereich kleiner Abflüsse herzuleiten.

Um zu einem möglichst vollständigen Bild der aktuellen Situation zu gelangen, sollte das Trockenjahr 2018 unbedingt in die Analysen einfließen. Deshalb werden auch die erst „provisorisch“ veröffentlichten Abflussdaten des BAFU für das Jahr 2018 miteinbezogen. Alle Abflussdaten liegen als Tagesmittelwerte vor.

Im Niedrigwasserbereich können aufgrund der oftmals schwierigen Messbedingungen Datenungenauigkeiten auftreten. Dieser Aspekt wird hier aber nicht berücksichtigt.

3 Methodische Grundlagen

3.1 Trendanalysen

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist die Detektierung signifikanter Veränderungen im Bereich kleiner Abflüsse. Der nicht-parametrische Mann-Kendall-Test wird häufig zur Detektierung von monotonen Trends in Zeitreihen verwendet (Pohlert 2018). Die Nullhypothese des Tests lautet, dass die Daten der Zeitreihen unabhängig voneinander sind und aus derselben Grundgesamtheit stammen. Die Alternativhypothese besagt, dass die Daten einem monotonen Trend folgen. Der Trendtest wurde mit dem „R Trend package“ (Pohlert 2018) durchgeführt. Es wird zwischen

- signifikantem positivem bzw. signifikantem negativem Trend (Irrtumswahrscheinlichkeit $p \leq 0.05$),
- deutlicher Zunahme bzw. deutlicher Abnahme ($0.2 \geq p > 0.05$) und
- keinem Trend ($p > 0.2$)

unterschieden.

3.2 Erstellen regionaler Übersichten

Die Trendanalysen werden auf der Basis geeigneter Einzugsgebiete durchgeführt. Um von diesen Einzelfällen zu übersichtlichen Darstellungen zu gelangen, wurden die Einzugsgebiete nach den Regimetypen von Weingartner und Aschwanden (1992) gruppiert. Diese Regimetypen eignen sich dank ihrer Prozessnähe ausgezeichnet, Einzugsgebiete mit einem ähnlichen hydrologischen Verhalten zu Gruppen zusammenzufassen.

In der vorliegenden Untersuchung werden die Regimetypen verwendet, um in der Schweiz regionale Muster der Veränderungen der kleinsten Abflüsse zu identifizieren. Dazu wird pro Regimetyp untersucht, wie viele Einzugsgebiete gleiche Veränderungsmuster aufweisen. Weisen mindestens 50% der Einzugsgebiete eines Regimetyps einen signifikanten Trend oder eine deutliche Veränderung mit demselben Vorzeichen auf, so wird von einem regionalen Trend gesprochen.

In einigen Fällen ist der Stichprobenumfang zu klein, um für einen einzelnen Regimetyp eine Aussage abzuleiten. Deshalb werden die entsprechenden Regimetypen zu Regimegruppen zusammengefasst, aber nur dann, wenn das aus hydrologischer Sicht sinnvoll ist.

3.3 Zeitliches Auftreten des Niedrigwasserabflusses $NM7Q$

Zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen den kleinsten saisonalen Abflüssen und den jährlichen Niedrigwasserabflüssen muss bekannt sein, in welcher Jahreszeit letztere auftreten. Dazu werden drei Parameter bestimmt:

1. Mittlerer Zeitpunkt des Auftretens der Abflussmenge $NM7Q$: Die Informationen dazu stammen aus Helbling et al. (2007).
2. Zeitliche Verteilung des Auftretens der Abflussmenge $NM7Q$: Mit diesem Parameter soll beschrieben werden, wie stark das Auftreten des Niedrigwassers von Jahr zu Jahr schwankt. Dazu verwenden Helbling et al. (2007) den Parameter „Stärke der Saisonalität“, der Werte zwischen 0 und 1 annimmt. Tritt das $NM7Q$ in jedem Jahr am genau gleichen Datum auf, erhält der Parameter den Wert 1, bei völlig zufälligem Auftreten den Wert 0.
3. Standardabweichung des mittleren Auftretensdatums: Dieser Parameter beschreibt in welchem zeitlichen Bereich (Tage) das jährliche Auftreten des $NM7Q$ um das mittlere Datum charakteristischerweise schwankt. Die Informationen dazu stammen aus Floriancic (2019).

4 Resultate der mesoskaligen Einzugsgebiete

4.1 Überblick

In die Trenduntersuchungen der kleinsten saisonalen Abflüsse und der Niedrigwasserabflüsse fließen insgesamt 37 mesoskalige Einzugsgebiete ein. In der Abbildung 2 sind die statistisch signifikanten Veränderungen für die saisonalen und jährlichen $NM7Q$ sowie für die Kenngrösse Q_{347} im Zeitraum 1961–2018 dargestellt, und zwar differenziert nach den Regimetypen von Weingartner und Aschwanden (1992). So lassen sich die Ergebnisse inhaltlich besser strukturieren. Um den Überblick weiter zu verbessern und direkte Vergleiche zwischen den Regimetypen zu ermöglichen, werden zudem „Regionale Übersichten“ erstellt, welche die regionalen Trends hervorheben (vgl. Kap. 3.2). Zusätzlich werden die Ergebnisse in Kap.6.1 auch kartographisch dargestellt.

Die nachfolgende Abbildung 2, die sich über zwei Seiten erstreckt, zeigt die Ergebnisse der Analyse der mesoskaligen Einzugsgebiete.

Abbildung 2: Veränderung des Niedrigwassers in der Periode 1961–2018 in mesoskaligen Einzugsgebieten (s. nächste Seiten). mH: Mittlere Gebietshöhe, Gl: Vergletscherung Stand 2015 (BAFU 2015), $NM7Q$: Kleinstes Abflussmittel über sieben Tage, Q_{347} : Abflussmenge, die an 347 Tagen erreicht oder überschritten wird, d: Veränderung Q_{347} zwischen 1961/70 und 2009/18 (Veränderungen $\geq 20\%$ bzw. $\leq -20\%$ sind hervorgehoben), p: Irrtumswahrscheinlichkeit

Name	mH [m]	GI [%]	DJF	MAM	JJA	SON	ANN	ANN	d [m ³ /s]	d [%]
Glaziale Regimes										
Massa - Blatten	2937	56.6				-			0.03	11.5
Rhone - Gletsch	2710	41.8				-			0.02	15
Lonza - Blatten	2524	24.7	-	-		-	-	-	0.03	6.4
Simme - Oberried	2347	22.6					-		0.04	26.9
Glazio-nivale Regimes										
Alpbach - Erstfeld	2205	19.7							0.02	23.8
W'Luetschine - Z'luet.	2165	13.1				-			0.17	20.6
Lütschine - Gsteig	2050	13.5				-			0.06	2.3
Nivo-glaziale Regimes										
Chamuerabach - L. P.	2548	0.1	-	-					0.06	11.1
Dischmabach - Davos	2376	0.7							0.12	53.5
Saltina - Brig	2014	2.5		-		-	-	-	-0.04	-5
Nivale Regimes										
Ova da Cluozza - Zer.	2371	0							0.04	29.7
Ova dal Fuorn – Zer.	2327	0	-	-		-	-	-	-0.03	-7.3
Plessur - Chur	1868	0				-			0.35	18.7
Grosstalbach - Isent.	1819	6.7	-	-		-	-		0.04	11.9
Simme - Oberwil	1641	2.4	-		-	-	-		0.04	26.9
Voralpine Regimes mit nivalem Einfluss										
Grande Eau - Aigle	1562	0		-					-0.35	-20.8
Rotenbach - Plaffeien	1455	0			-				0.004	43.6
Minster - Euthal	1352	0	-				-	-	-0.01	-3
Sitter - Appenzell	1256	0	-				-		0.11	24.4

Zunahme Abnahme



Signifikanter Trend ($p \leq 0.05$)



Deutliche Veränderung ($0.2 \geq p > 0.05$)



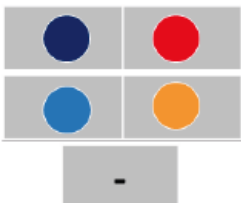
Kein Trend

NM7Q

Q₃₄₇

Name	mH [m]	GI [%]	DJF	MAM	JJA	SON	ANN	ANN	d [m ³ /s]	d [%]
Pluviale Regimes										
Rappengraben - R.	1142	0	-	-	●	-	-	-	-0.39	-20.3
Sperbelgraben - Kurz.	1070	0	●	-	-	●	●	●	0.84	59.6
Emme - Emmenmatt	1065	0	-	-	●	-	-	-	-0.21	-10.4
Kl. Emme - Emmen	1054	0	-	●	●	-	-	-	-0.11	-4.1
Thur - Jonschwil	1021	0	-	-	●	-	●	-	-0.28	-9.2
Emme - Wiler	858	0	-	-	●	-	-	-	0.04	0.9
Gürbe - Belp	846	0	-	-	●	-	-	-	-0.06	-8.2
Wiese - Basel	720	0	●	-	-	-	-	-	0.02	1.8
Aach - Salmsach	467	0	-	-	●	-	-	-	0.02	23.3
Jurassische Regimes										
Orbe - Orbe	1139	0	-	●	●	●	●	●	-0.4	-17.3
Areuse - St. Sulpice	1110	0	-	●	-	-	-	-	0.05	8.1
Areuse - Boudry	1077	0	-	-	●	-	-	-	-0.14	-8.8
Suze - Sonceboz	1036	0	-	-	●	-	-	-	-0.13	-16.7
Birs - Münchenstein	728	0	-	●	●	-	-	-	-0.4	-11.9
Ergolz - Liestal	588	0	-	●	●	●	●	●	-0.2	-37.7
Südalpine nivale Regimes										
Poschiavino - La Rösa	2285	0	●	●	●	-	●	●	0.02	12.9
Südalpine nivo-pluviale Regimes										
Ri. di Calneggia - Ca.	2003	0	●	-	●	-	-	●	0.02	13.3
Ri. di Roggiasca- Ro.	1702	0	-	-	●	-	-	-	0.01	23.3

Zunahme Abnahme



Signifikanter Trend ($p \leq 0.05$)

Deutliche Veränderung ($0.2 \geq p > 0.05$)

Kein Trend

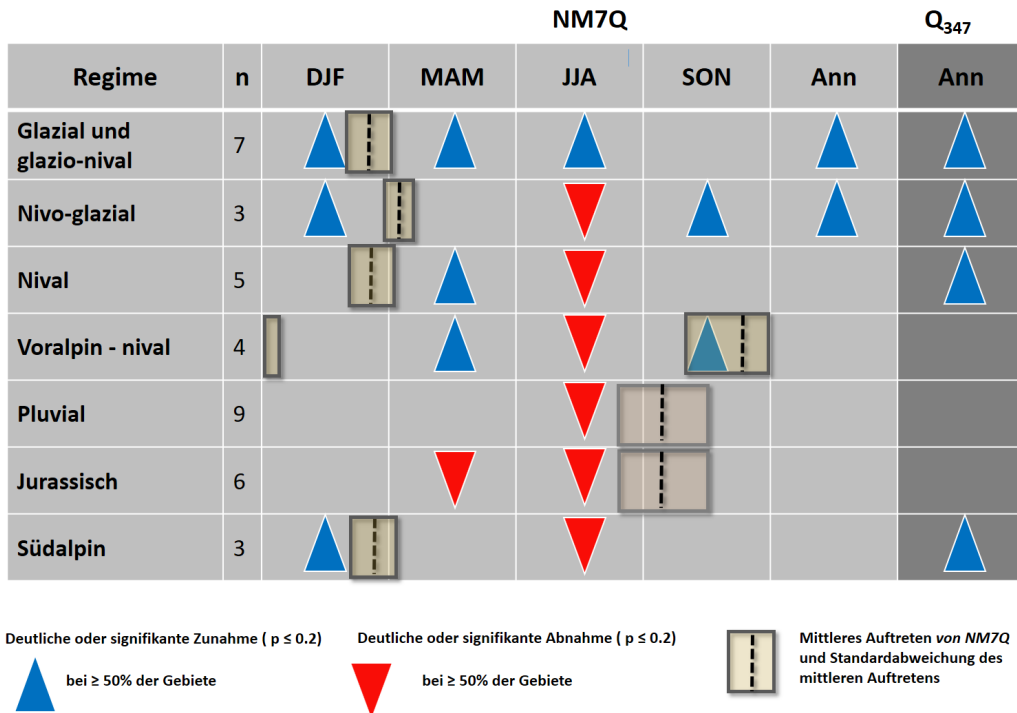


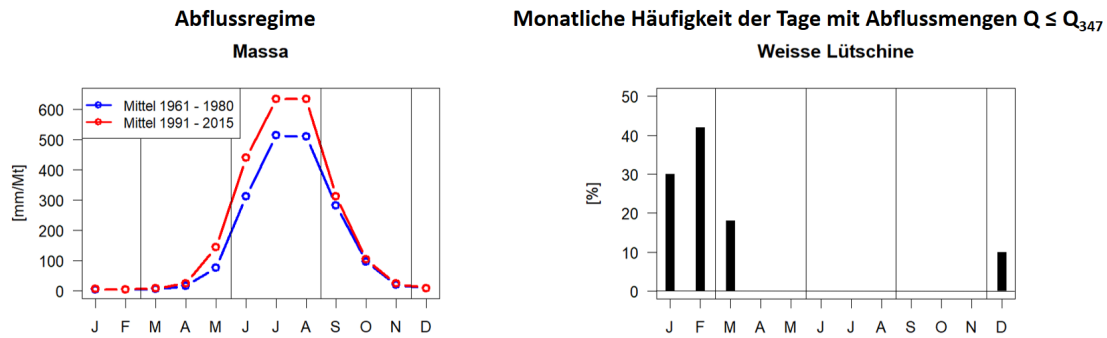
Abbildung 3: Regionale Trends (vgl. Kap. 3.2): Beurteilung der Veränderungen des NM7Q und der Abflussmenge Q_{347} aus der Sicht der Regime-typen. Mittleres Auftreten nach Helbling et al. (2007); Standardabweichung des mittleren Auftretens nach Floriancic (2019)

4.2 Glaziale geprägte Einzugsgebiete

4.2.1 Rahmenbedingungen

Die folgenden Ausführungen stützen sich auf Abbildung 4 ab. Die glazialen **Abflussregimes** werden von der Gletscherschmelze dominiert, welche im Sommer (JJA) zu sehr hohen Abflüssen führt. Die in die Untersuchungen eingeflossenen Gebiete weisen alle einen aktuellen Vergletscherungsgrad von mehr als 12 % auf. Infolge der Klimaerwärmung hat die Gletscherschmelze markant zugenommen (vgl. Akademien der Wissenschaften Schweiz 2016), was in der Periode seit 1961 zu einer starken Erhöhung der sommerlichen Abflüsse geführt hat (vgl. Weingartner 2019): Aber auch die mittleren saisonalen Abflüssen im Winter (DJF) und Frühling (MAM) haben mehrheitlich zugenommen.

In alpinen Einzugsgebieten treten die kleinsten jährlichen **Niedrigwasserabflüsse** hauptsächlich zwischen Januar und März auf, wenn der Niederschlag in der Regel als Schnee zwischengespeichert wird. Bei den glazialen Regimes



Charakteristische Niedrigwassersaison (NM7Q)

Einzugsgebiet	Charakt. Saison	Mittl. Datum	Stärke	Standardabw. [Tage]
Glazial				
Massa - Blatten	DJF	Feb 02	0.95	0 - 20
Lonza - Blatten	MAM	Feb/Mrz	1	0 - 20
Simme - Oberried	DJF	Mitte Feb	0.9	20.1 - 40
Glazio-nival				
Alpbach - Erstfeld	DJF	Feb 01	0.9	40.1 - 60
W Lütschine - Z'lütschine	DJF	Feb 01	0.95	20.1 - 40
Lütschine - Gsteig	DJF	Jan/Feb	0.95	20.1 - 41

Abbildung 4: Einordnung der glazialen Regimes. Feb 02: Mittleres Auftretensdatum in der 2. Hälfte des Monats Februar (Quellen: Aschwanden und Kan 1996, Helbling et al. 2007, Floriancic 2019)

liegt das mittlere Auftretensdatum meist im Spätwinter, also im Februar, und in einzelnen Fällen sogar im März. Wie die Stärke des Signals und die Standardabweichung belegen, ist das zeitliche Auftreten des Niedrigwassers sehr zuverlässig; die Jahr-zu-Jahr-Variabilität ist also sehr klein. Damit ist auch verständlich, dass alle Tage, in denen der Abfluss kleiner als die Abflussmenge Q_{347} ist, in den Monaten Dezember bis März liegen.

4.2.2 Kleinste saisonale Abflüsse

Die kleinsten saisonalen Abflüsse haben in der Periode 1961–2018 in allen Jahreszeiten ausser im Herbst in der Mehrheit der glazial geprägten Einzugsgebiete zugenommen (vgl. Abb. 2 und 5). Die Veränderungen der kleinsten saisonalen Abflüsse folgt demnach den Veränderungen der mittleren saisonalen Abflüsse.

Im **Winter** (DJF) haben die $NM7Q$ zwischen 1961 und 2018 um den Faktor 1.31 (Median der Einzugsgebiete mit deutlichen oder signifikanten Trends) zugenommen. Diese Erhöhung der kleinsten Abflüsse hängt mit der Erwärmung und deren Folgeprozessen zusammen. Dabei scheint vor allem die Verkürzung

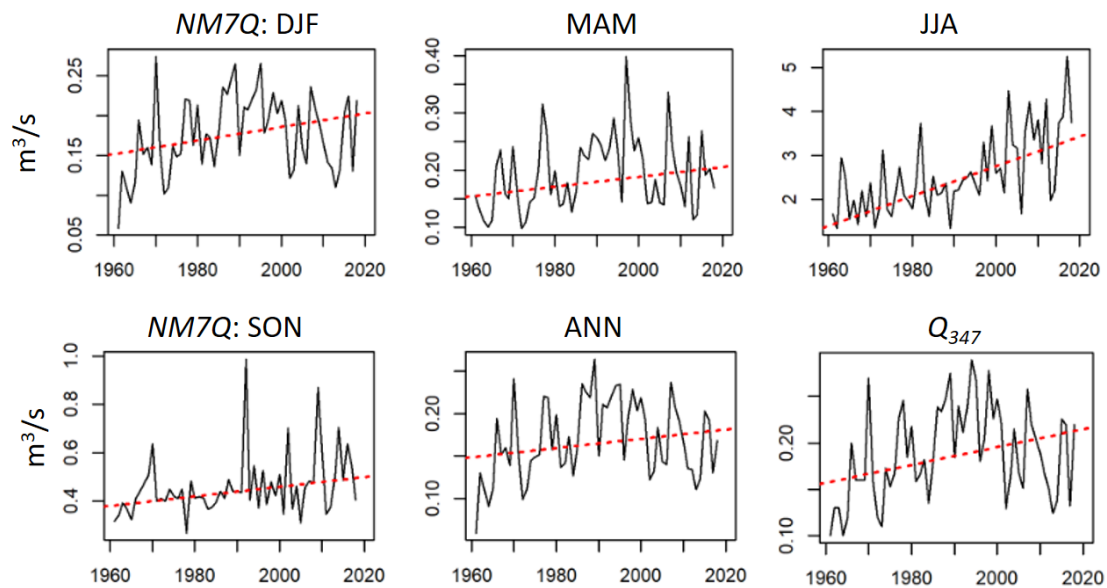


Abbildung 5: Zeitreihen der Kenngössen $NM7Q$ und Q_{347} der Simme, Oberried (34.8 km²), mit einem glazialen Regime. Beachte die unterschiedliche Skalierung der Ordinate.

des Zeitraums mit einer Schneedecke eine wichtige Rolle zu spielen: Wie Klein et al. (2016) darlegen, hat sich die Dauer der Schneebedeckung in der Schweiz seit 1970 im Durchschnitt um 8.9 Tage pro Dekade, also insgesamt um mehr als 40 Tag verkürzt. Diese Verkürzung ist massgeblich auf das frühere Ausapern im Frühjahr um durchschnittlich 5.8 Tage pro Dekade zurückzuführen. Aber auch der Aufbau der Schneedecke im Spätherbst hat sich seit 1970 um rund einen halben Monat verzögert. Damit kommt es im Dezember vermutlich immer häufiger zu abflussrelevanten Regenfällen und damit zu einer Erhöhung des Niedrigwassers. Bei der vorliegenden und den weiteren Interpretationen ist allerdings zu beachten, dass eine Attribuierung der erkannten Trends – also die Erklärung der Ursachen der Veränderungen – nicht im deterministischen Sinne möglich ist, da in dieser Untersuchung die Identifikation von Trends im Vordergrund steht.

Auch im **Frühling** (MAM) ist eine Zunahme der $NM7Q$ zu beobachten, und zwar um den Faktor 1.37 (Median) zwischen 1961 und 2018. Dafür verantwortlich ist wiederum die Veränderung der Schneeschmelzprozesse, in diesem Fall das frühere Ausapern und damit verbunden die frühere Schneeschmelze.

Die Intensivierung der Gletscherschmelze hat zu einer massiven Erhöhung der kleinsten Abflüsse im **Sommer** (JJA) geführt, wie es die entsprechende

Zeitreihe in Abb. 5 veranschaulicht. Seit 1961 haben die $NM7Q$ um den Faktor 1.65 zugenommen, wobei die Unterschiede zwischen den Einzugsgebieten gross sind: Massa: 2.89, Weisse Lutschine: 1.2

4.2.3 Niedrigwasserabflüsse

Aus Kap. 4.2.1 geht hervor, dass die kleinsten jährlichen 7-Tagesmittel ($NM7Q$) mit hoher Konstanz im Spätwinter auftreten. Somit wirken sich die Veränderungen im Winter direkt auf die jährlichen Niedrigwasserabflüsse aus: $NM7Q$ hat in der Mehrzahl der glazialen Einzugsgebiete deutlich bis signifikant zugenommen (mediane Erhöhung um den Faktor 1.27). Entsprechend hat sich auch die Abflussmenge Q_{347} in sechs von sieben Fällen signifikant erhöht (vgl. Abb. 2). Im Vergleich der beiden Perioden 1961–1970 und 2009–2018 haben die 10-jährigen Q_{347} um 2 bis 27%, im Mittel um 12 %, zugenommen. Die Abbildung 6 gibt dazu ein Beispiel.

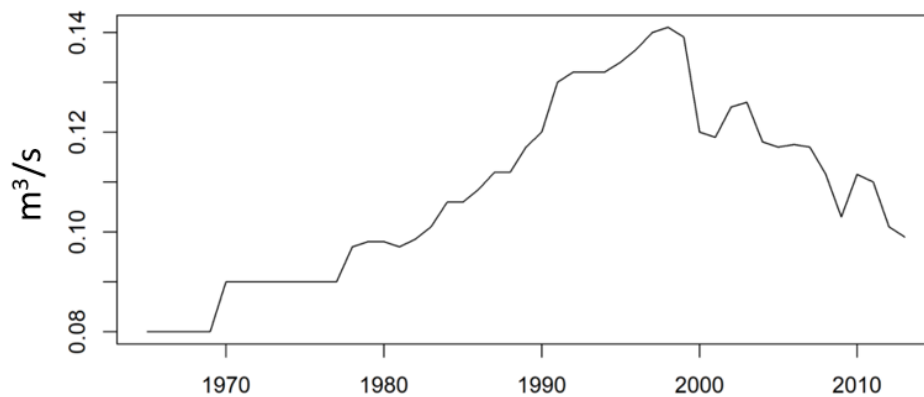


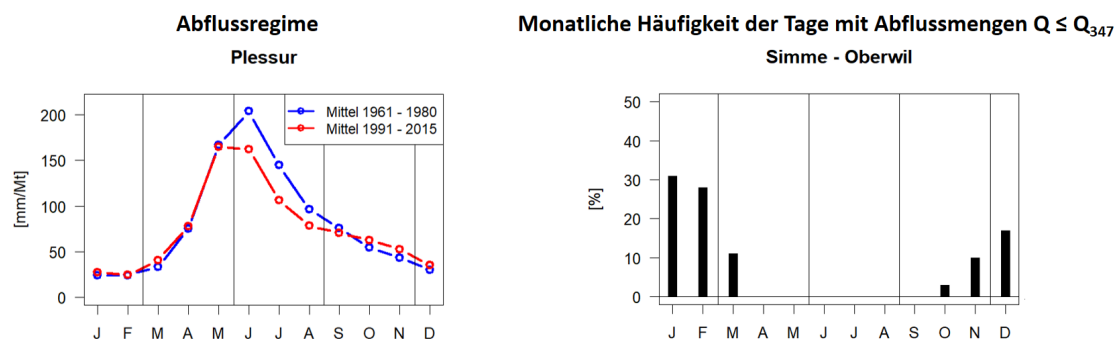
Abbildung 6: 10-jähriges gleitendes Mittel der Kenngrösse Q_{347} beim Alpbach, Erstfeld (20.7 km²), der ein glazio-nivales Regime aufweist. Lesebeispiel: Der im Jahr 1965 eingetragene Wert von 0.08 m³ bezieht sich auf den 10-jährigen Mittelwert der Periode 1961 - 1970

4.3 Nival geprägte Einzugsgebiete

4.3.1 Rahmenbedingungen

Die nival geprägten Einzugsgebiete umfassen die beiden **Abflussregimetypen** nivo-glazial und nival. Nivo-glaziale Einzugsgebiete besitzen in der Regel eine mittlere Gebietshöhe von weniger als 2500 m.ü.M. und einen Vergletscherungsgrad von unter 12 %. Nivale Gebiete sind nicht vergletschert oder nur

geringfügig vergletschert. Ihre mittlere Höhe liegt unter 2500 m.ü.M. im Engadin bzw. unter 1900 m auf der Alpennordseite (Weingartner und Aschwanden 1992). Das saisonale Abflussverhalten wird von der Schneeschmelze, die zwischen Mai und Juli auftritt, dominiert (vgl. Abb. 7). Infolge der Klimaerwärmung haben sich die Prozesse der Schneeschmelze in den letzten fünfzig Jahren aber verändert. Wie in Kap. 4.2.2 aufgezeigt, haben die Tage mit Schneedecke seit 1970 stark abgenommen und die Ausaperung erfolgt heute durchschnittlich rund einen Monat früher als um 1970 (Klein et al. 2016). Dies hat unter anderem dazu geführt, dass der mittlere Abfluss im Juni in der Periode 1991–2015 im Vergleich zur Periode 1961–1980 stark abgenommen hat. Aber auch im Juli und August haben die mittleren Abflüsse in der zweiten Periode abgenommen. Bei den saisonalen Abflüssen im Winter (DJF) besteht nach Weingartner (2019) ein „mittlerer regionaler Trend zur Zunahme“. Die Abflusszunahme im Frühling ist eher klein.



Charakteristische Niedrigwassersaison (NM7Q)

Einzugsgebiet	Charakt. Saison	Mittl. Datum	Stärke	Standardabw. [Tage]
Nivo-glazial				
Chamuerabach - La Punt	MAM	Mär 01	0.9	0 - 20
Dischmabach - Davos	MAM	Mär 01	0.9	0 - 20
Nival				
Ova da Cluozza – Zernez	MAM	Mär 01	0.95	20.1 - 40
Ova dal Fuorn - Zernez	DJF	Feb/Mrz	0.95	20.1 - 40
Grosstalbach - Isental	DJF	Feb 01	0.9	20.1 - 40
Simme - Oberwil	DJF	Jan 02	0.9	20.1 - 40

Abbildung 7: Einordnung der nivalen Regimes (Quellen: Aschwanden und Kan 1996, Helbling et al. 2007, Floriancic 2019)

Bei den nival geprägten Abflussregimes treten die jährlichen **Niedrigwasserabflüsse** mehrheitlich im Januar und Februar, in den hochgelegenen Einzugsgebieten im Engadin auch im März auf. Wie die Stärke des Signals und die Standardabweichung belegen, ist die Jahr-zu-Jahr-Variabilität des Zeitpunkts des Auftretens des kleinsten jährlichen NM7Q eher klein. Die Tage, an denen

der Abfluss kleiner als die Abflussmenge Q_{347} ist, befinden sich ausschliesslich in den Monaten November bis März.

4.3.2 Kleinste saisonale Abflüsse

Mit der deutlichen bis signifikanten Abnahme der kleinsten Abflüsse ($NM7Q$) im **Sommer** unterscheiden sich die nivo-glazialen und nivalen Einzugsgebiete eindeutig von den glazial geprägten. Die bei beiden Abflussregimes festgestellte Abnahme der sommerlichen Abflüsse zeigt sich also auch bei den kleinsten saisonalen Abflüssen. Im Mittel erreichen die $NM7Q$ um 2018 noch 72 % der Werte um 1961 (Median).

Im **Winter** stellen wir bei den kleinsten Abflüssen einen Unterschied zwischen dem nivo-glazialen und dem nivalen Regimetyp fest (wobei diese Aussage durch den kleinen Stichprobenumfang zu relativieren ist). Bei den nivo-glazialen Gebieten haben die kleinsten 7-Tagesmittel seit 1961 mehrheitlich zugenommen (Faktor:1.34), dies im Gegensatz zu den nivalen Regimes, bei denen kein klares Muster erkennbar ist (vgl. Abb. 2).

Auch im **Frühling** besteht ein Unterschied zwischen den nivo-glazialen und den nivalen Abflussregimes: Nun nehmen die Niedrigwasser in der Mehrheit der nivalen Gebiete zu. Die Zunahme zwischen 1961 und 2018 ist relativ gross, wie der Faktor 1.58 (Median) belegt.

Die festgestellten Veränderungen der kleinsten saisonalen Abflüsse hängen sehr wahrscheinlich mit der durch die Klimaänderung bedingten „Verflüssigung des Wasserhaushalts“ (vgl. Weingartner und Messerli 2017) zusammen, also mit der Erhöhung des Regenanteils am Niederschlag im Winter sowie mit der Veränderung der Dauer der Schneedecke und der Schneeschmelzprozesse.

4.3.3 Niedrigwasserabflüsse

Bedingt durch das zeitlich relativ konstante Auftreten des jährlichen kleinsten 7-Tagesmittels im Winter wirken sich die Veränderungen des winterlichen $NM7Q$ direkt auf das jährliche Niedrigwasser aus. Letzteres hat sich bei den nivo-glazialen Einzugsgebieten mehrheitlich erhöht, und zwar um den Faktor 1.43 (Median) (vgl. Abb. 8). Weniger klar ist das Trendsinal bei den nivalen Regimes erkennbar.

Hingegen hat sich die Abflussmenge Q_{347} sowohl in der Mehrzahl der nivo-glazialen wie auch nivalen Gebiete erhöht. Das hängt damit zusammen, dass die Tage, bei denen die Abflussmengen kleiner als die Abflussmenge Q_{347} sind, alle in den Monaten Oktober bis März liegen (vgl. Abb. 7), in einem zeitlichen Bereich also, in dem die kleinsten Abflüsse generell zugenommen haben,

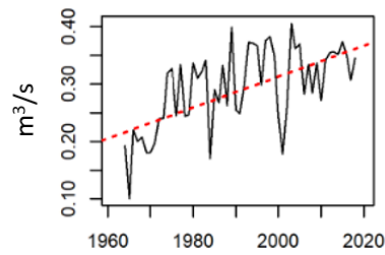


Abbildung 8: Zeitreihe des jährlichen NM7Q beim Dischmabach, Davos (42.9 km²), der ein nivales Regime aufweist.

Die Zunahme der Abflussmenge Q_{347} beträgt im Mittel rund 25 % zwischen den Perioden 1961–1970 und 2009–2018. Ein Beispiel dazu findet sich in Abb. 9).

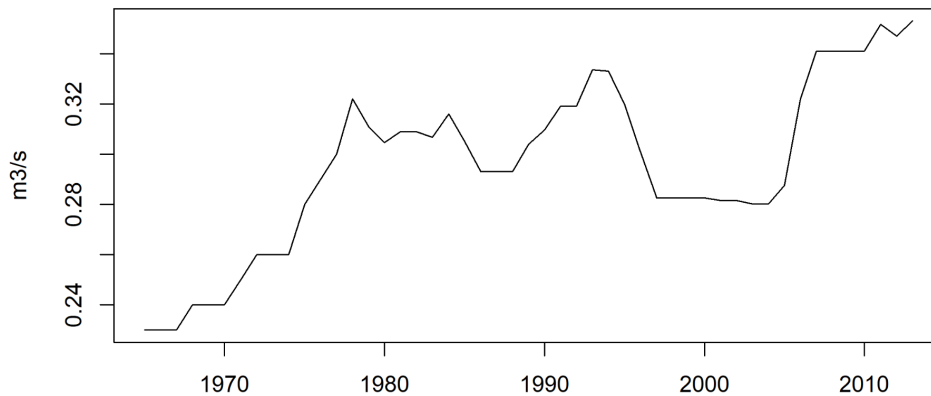


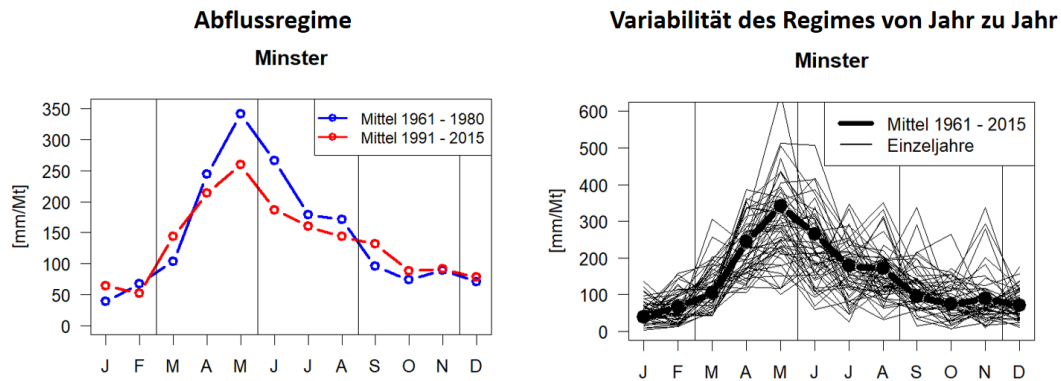
Abbildung 9: 10-jähriges gleitendes Mittel der Kenngröße Q_{347} beim Dischmabach, Davos (42.9 km²), der ein nivales Regime aufweist.

4.4 Voralpine, nival geprägte Einzugsgebiete

4.4.1 Rahmenbedingungen

Die nival geprägten voralpinen Einzugsgebiete befinden sich im Übergang vom Alpenraum zum Mittelland und gehören dem **Regime** nival de transition an (s. Weingartner und Aschwanden 1992). Ihre mittlere Gebietshöhe liegt zwischen 1200 und 1550 m ü. M. Die nivale Prägung kommt mit dem maximalen mittleren Monatsabfluss im Mai zum Ausdruck (vgl. Abb. 10). Durch den Klimawandel hat sich das mittlere Abflussregime aber verändert: Deutlich erkennbar sind die Abnahme im Sommer (JJA) und die Zunahme im Herbst (SON). Uneinheitlich zeigt sich das Bild im Frühling mit einer Zunahme um

den Frühlingsbeginn und einer Abnahme zum Ende des Frühlings, dies als Folge des früheren Ausaperns. Auffallend – und dies im Gegensatz zu den nivalen alpinen Regimes – ist, dass die kleinsten mittleren monatlichen Abflüsse bereits ab Herbst, zwischen Oktober und Februar, auftreten.



Charakteristische Niedrigwassersaison (NM7Q)

Einzugsgebiet	Charakt. Saison	Mittl. Datum	Stärke	Standardabw. [Tage]
Voralpin mit nivalem Einfluss				
Rotenbach	SON	Okt 02	0.25	80 - 100
Minster - Euthal	SON	Mitte Nov	0.5	60.1 - 80

Abbildung 10: Einordnung der voralpinen, nival geprägten Regimes (Quellen: Aschwanden und Kan 1996, Helbling et al. 2007, Floriancic 2019)

Im Übergang vom Alpenraum zum Mittelland verändern sich die **Niedrigwasserverhältnisse** grundlegend. Im Alpenraum werden die Niedrigwasser durch Kältephasen verursacht, während derer der Niederschlag in Form von Schnee zwischengespeichert wird. In tiefer gelegenen Einzugsgebieten werden meteorologische Trockenphasen, welche durch hohe Verdunstungsraten verstärkt und durch die Untergrundspeicher mitgeprägt werden, immer wichtiger für das Niedrigwasserverhalten.

Beim Regimetyp nival de transition verschiebt sich deshalb das mittlere Eintretensdatum des jährlichen NM7Q in die Monate Oktober oder November. Die Jahr-zu-Jahr-Variabilität des Eintretens ist grösser als bei alpinen Gebieten, wie der kleine Wert der Stärke (unter 0.5) und die hohe Standardabweichung von mehr als 60 Tage belegen.

4.4.2 Kleinste saisonale Abflüsse

Die festgestellten Veränderungen des Abflussregimes widerspiegeln sich auch in den saisonalen $NM7Q$ (vgl. Abb. 2 und 3):

- Im **Frühling** haben sie mehrheitlich zugenommen, und zwar zwischen 1961 und 2018 um den Faktor 1.44 (Median). Dafür ist das frühere Ausapern verantwortlich, welches zu einer Erhöhung der Abflüsse im März geführt hat, wo in der Regel die kleinsten Abflüsse im Frühling auftreten.
- Im **Sommer** haben die kleinsten Abflüsse mehrheitlich abgenommen und erreichen um 2018 noch 68 % (Median) der Abflüsse um 1961.
- Im **Herbst** ist eine Zunahme feststellbar (Faktor 1.32 (Median)).

Insgesamt sind bei den nival-geprägten voralpinen Einzugsgebieten grosse Änderungen erkennbar, wie das Beispiel der Sitter in Abb. 11 belegt. Bemerkenswert ist allerdings, dass sich die Grande Eau in Aigle deutlich von diesem Muster abhebt. Hier haben die saisonalen $NM7Q$ im Winter, Sommer und Herbst deutlich bis signifikant abgenommen.

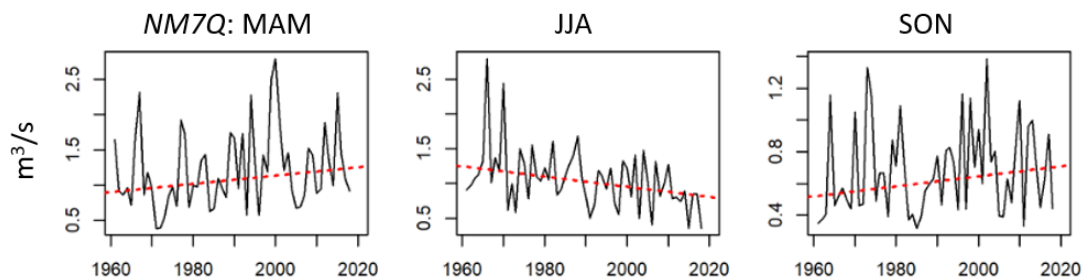


Abbildung 11: Saisonale Zeitreihen der Kenngrößen $NM7Q$ der Sitter, Appenzell (74.4 km^2), mit einem voralpinen Regime mit nivalem Einfluss. Beachte die unterschiedliche Skalierung der Ordinate.

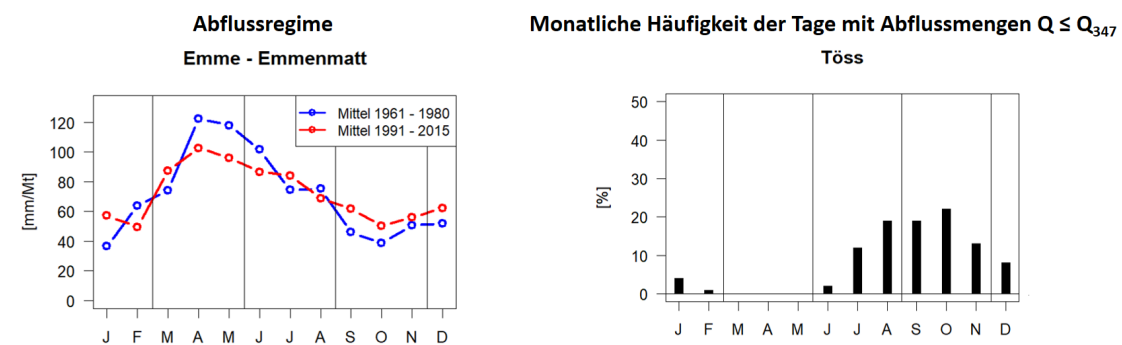
4.4.3 Niedrigwasserabflüsse

Bei den Niedrigwasserabflüssen sind trotz der klaren saisonalen Muster keine Trends vorhanden. Dies hängt damit zusammen, dass das zeitliche Auftreten des Niedrigwassers stark variiert und insbesondere über zwei Jahreszeiten streut, so dass sich die saisonalen Veränderungen nicht direkt auf die jährlichen Niedrigwasserkennwerte auswirken.

4.5 Mittelländisch, pluvial geprägte Einzugsgebiete

4.5.1 Rahmenbedingungen

Mittelländische, pluviale **Abflussregimes** finden sich in nordalpinen Einzugsgebieten mit mittleren Gebietshöhen unter 1200 m ü.M.. Das saisonale Abflussverhalten wird durch das Wechselspiel von Niederschlag und Verdunstung geprägt, so dass von Jahr zu Jahr grosse Unterschiede bestehen (vgl. Abb. 13). Dadurch ist die mittlere Regimekurve zwar für ein einzelnes Jahr nur bedingt aussagekräftig, aber sie repräsentiert das langjährige hydrologische Verhalten. Und dieses hat sich, wie die Abb. 12 zeigt, in den letzten Jahrzehnten deutlich verändert: Die saisonalen Abflüsse haben im Herbst und Winter zu- und im Frühling und Sommer abgenommen (vgl. Weingartner 2019).



Charakteristische Niedrigwassersaison (NM7Q)

Einzugsgebiet	Charakt. Saison	Mittl. Datum	Stärke	Standardabw. [Tage]
Pluvial				
Rappengraben - Wasen	SON	Aug/Sep	0.65	40.1 - 60
Sperbelgraben - Kurzeneialp	SON	Aug/sep	0.55	40.1 - 60
Emme- Emmenmatt	SON	Okt 01	0.4	60.1 - 80
Kleine Emme - Malters	SON	Mitte Nov	0.5	60.1 - 80
Thur - Jonschwil	SON	Nov 02	0.4	80.1 - 100
Emme - Wiler	SON	Sep 02	0.3	60.1 - 80
Gürbe - Belp	SON	Okt/Nov	0.35	60.1 - 80
Wiese - Basel	SON	Sep 01	0.85	40.1 - 60
Aaach - Salmsach	SON	Aug/Sep	0.7	40.1 - 60

Abbildung 12: Einordnung der mittelländischen, pluvial geprägten Regimes (Quellen: Aschwanden und Kan 1996, Helbling et al. 2007, Florianic 2019)

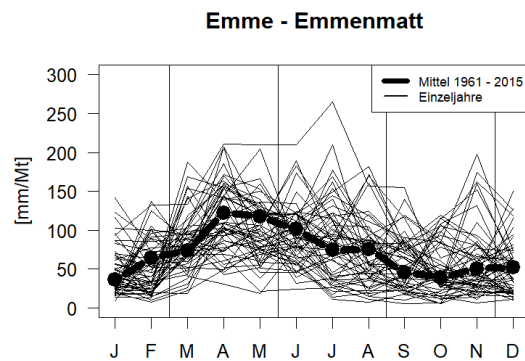


Abbildung 13: Vergleich des langjährigen mittleren Abflussregimes 1961 - 2015 der Emme, Emmenmatt (443 km²), mit den Abflussregimes der einzelnen Jahre

Entsprechend der hohen Variabilität des saisonalen Abflussverhaltens ist auch der zeitliche Bereich des mittleren Auftretens des jährlichen **Niedrigwasserabflusses** relativ gross. Er reicht vom Spätsommer bis Ende Herbst mit einer grossen Schwankungsbreite von Jahr zu Jahr. Ausser von März bis Mai können in allen Monaten zudem Tage mit Abflussmengen kleiner Q_{347} auftreten, am häufigsten im August bis Oktober.

4.5.2 Kleinste saisonale Abflüsse

Der **Sommer** (JJA) ist die einzige Jahreszeit, in der sich die kleinsten $NM7Q$ verändern, d.h., abgenommen haben, und dies in den allermeisten Einzugsgebieten (vgl. Abb. 2 und 14). Zwischen 1961 und 2018 haben sich die Abflüsse um den Faktor 0.71 (Median) reduziert. Weil die sommerlichen Niederschläge in den untersuchten Einzugsgebieten in der Periode 1961–2018 keinen Trend aufweisen (Daten: HADES), kann diese Abflussabnahme auf die höhere Verdunstung zurückgeführt werden.

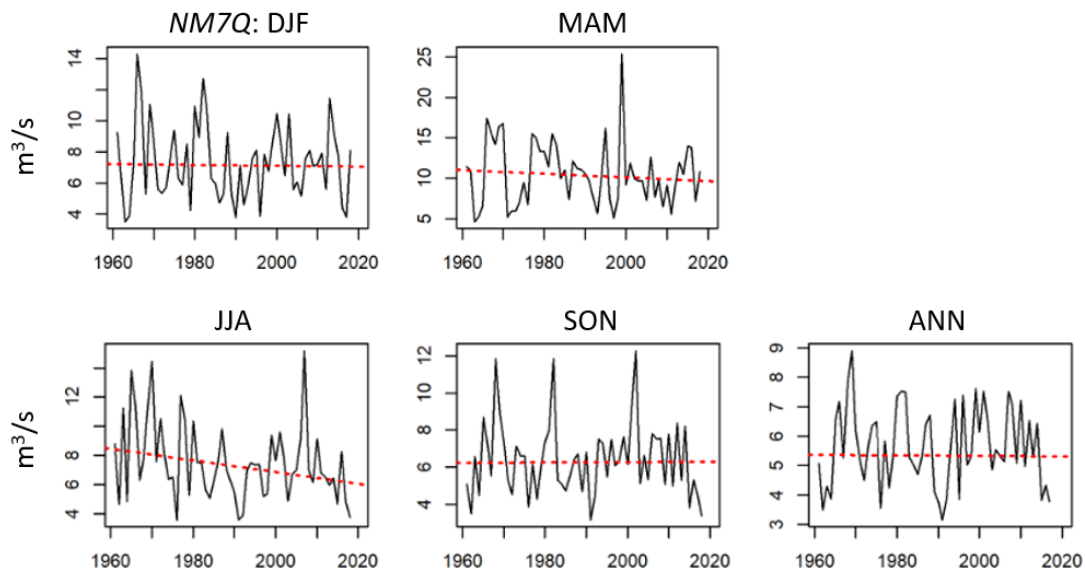


Abbildung 14: Zeitreihen der Kenngössen $NM7Q$ der Emme, Wiler (937 km²), mit einem nival geprägten, voralpinen Regime. Beachte die unterschiedliche Skalierung der Ordinate.

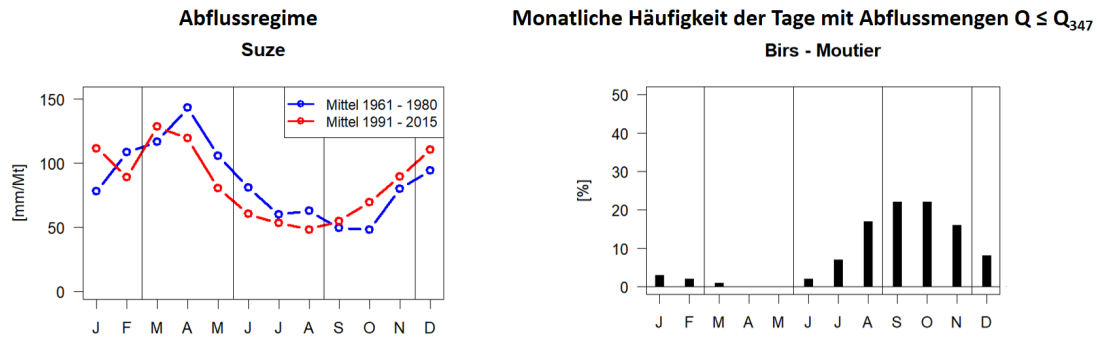
4.5.3 Niedrigwasserabflüsse

Bei den pluvialen Einzugsgebieten haben sich weder die kleinsten 7-tägigen Abflussmengen noch die Abflussmenge Q_{347} signifikant verändert. Dies hängt auch damit zusammen, dass das jährliche Niedrigwasser $NM7Q$ in verschiedenen Jahreszeiten auftritt, so dass sich die festgestellten sommerlichen Abnahmen (noch) nicht direkt auf das jährliche Niedrigwasser ausgewirkt haben.

4.6 Jurassische Einzugsgebiete

4.6.1 Rahmenbedingungen

Die höher gelegenen Einzugsgebiete im Jura gehören dem **Abflussregime-typ** nivo-pluvial jurassien, die tiefer gelegenen dem Typ pluvial jurassien an (Aschwanden und Weingartner 1992). Letztere liegen in der Regel unterhalb einer mittleren Einzugsgebietshöhe von 900 m ü. M. Das mittlere Regime hat sich in der Periode 1961-2015 ähnlich verändert wie jene der mittelländischen Regimes: Im Herbst und Winter haben die saisonalen Abflüsse zugenommen, im Frühling und Sommer abgenommen (vgl. Weingartner 2019).



Charakteristische Niedrigwassersaison (NM7Q)

Einzugsgebiet	Charakt. Saison	Mittl. Datum	Stärke	Standardabw. [Tage]
<i>Jurassisch</i>				
Areuse - Boudry	SON	Sep 01	0.7	60.1 - 80
Suze - Sonzeboz	SON	Sep 01	0.7	60.1 - 80
Birs - Münchenstein	SON	Mtte Sep	0.8	40.1 - 60
Ergolz - Liestal	SON	Sep 01	0.85	40.1 - 60

Abbildung 15: Einordnung der jurassischen Regimes (Quellen: Aschwanden und Kan 1996, Helbling et al. 2007, Floriancic 2019)

Das mittlere Auftretensdatum des jährlichen **Niedrigwasserabflusses** liegt im Frühherbst. Die Jahr-zu-Jahr Variabilität ist kleiner als bei den mittelländischen Einzugsgebieten (vgl. Parameter „Stärke“). Trotzdem können Tage mit Abflussmengen kleiner Q_{347} in fast allen Monaten auftreten.

4.6.2 Kleinste saisonale Abflüsse

Die beim Abflussregime festgestellten Abnahmen der saisonalen Abflüsse im **Frühling** und **Sommer** lassen sich auch bei den kleinsten saisonalen Abflüssen erkennen (vgl. Abbildungen 2 und 3). Um 2018 erreichen die kleinsten saisonalen Abflüsse im Frühjahr und im Sommer noch 72 % (Median) des Abflusses um 1961.

In den übrigen Jahreszeiten sind signifikante Veränderungen nur ausnahmsweise zu beobachten.

Da die Niederschläge der untersuchten Einzugsgebiete in der Periode 1961–2017 weder im Frühling noch im Sommer einen Trend aufweisen (Daten: HADES), sind für die Abnahme der Abflüsse wahrscheinlich das frühere Ausapern (nur bei den höher gelegenen Einzugsgebieten) und die Zunahme der Verdunstung verantwortlich.

4.6.3 Niedrigwasserabflüsse

In der Mehrheit der untersuchten jurassischen Gebiete haben sich die Niedrigwasserkennwerte in der Periode 1961–2018 nicht verändert. Davon ausgenommen sind die Orbe und die Ergolz, wo das jährliche $NM7Q$ und die Abflussmenge Q_{347} deutlich oder signifikant abgenommen haben. Dies hängt auch damit zusammen, dass dort – und nur dort - die kleinsten Abflüsse im Herbst deutlich bzw. signifikant abgenommen haben.

4.7 Südalpine Einzugsgebiete

Die Vielfalt der südalpinen Regimes kann mit der vorliegenden Stichprobe weder erfasst noch beschrieben werden. Gerade mal drei Gebiete stehen zur Verfügung. Deshalb verzichten wir hier auf weitergehende Ausführungen. Bemerkenswert ist höchstens, dass auch in diesen Einzugsgebieten die kleinsten sommerlichen Abflüsse abgenommen haben (vgl. Abb. 2).

5 Resultate der makroskaligen Gebiete

5.1 Rahmenbedingungen

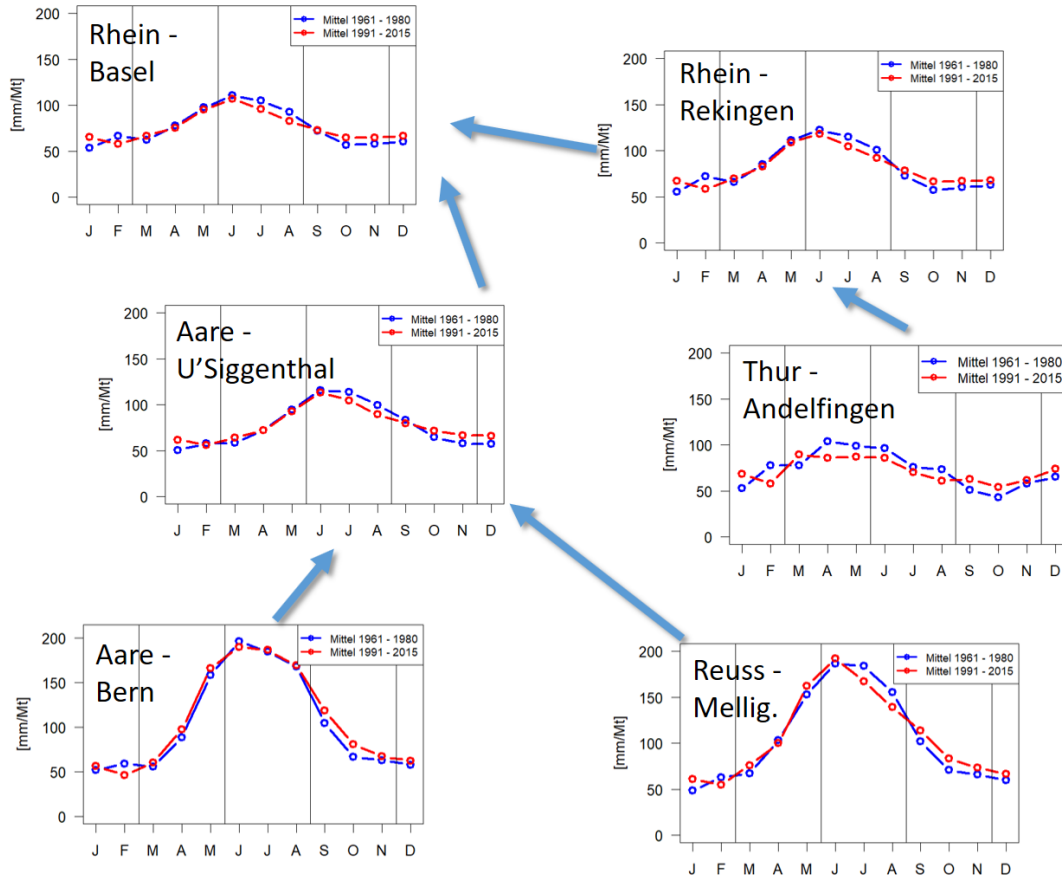


Abbildung 16: Ausgewählte makroskalige Einzugsgebiete mit ihren Abflussregimes im Rheingebiet

Die Karte in Abb. 16 zeigt das mittlere Abflussregime und dessen Veränderung in einigen in dieser Untersuchung betrachteten makroskaligen Einzugsgebieten. Die mittleren Abflussregimes haben sich zwischen den Perioden 1961–1980 und 1991–2018 nur wenig verändert. Es fällt aber auf, dass die mittleren Abflüsse in der zweiten Periode im Juli und August mit Ausnahme der Aare, Bern, überall abgenommen und von Oktober bis Januar überall zugenommen haben.

Im Flussgebiet der Rhone werden zwei Stationen berücksichtigt (Abb. 17).

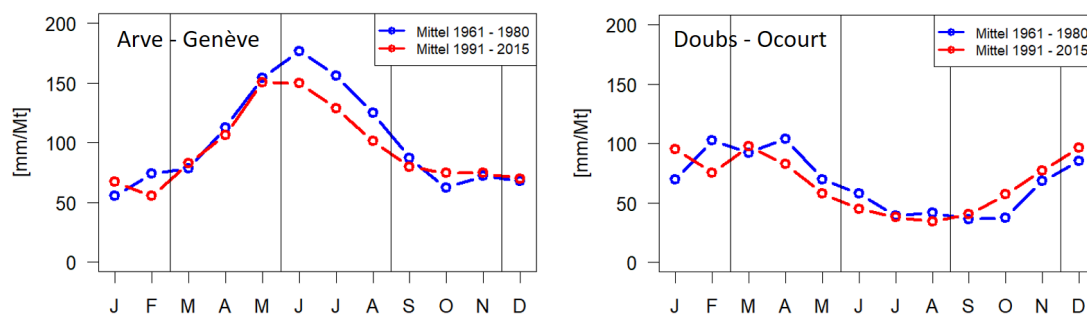


Abbildung 17: Die beiden im Flussgebiet der Rhone gelegenen makroskaligen Einzugsgebiete mit ihren Abflussregimes

Die kleinste jährliche Abflussmenge $NM7Q$ tritt bei den hier betrachteten Einzugsgebieten im Herbst und Winter auf, wie dies aus den Abflussregimes in Abb. 16 abgeleitet werden kann.

5.2 Veränderungen der kleinsten saisonalen Abflüsse

Abbildung 18 zeigt die Ergebnisse der Trenduntersuchungen für die makroskaligen Einzugsgebiete ($\geq 1000 \text{ km}^2$).

Die Abnahme der kleinsten saisonalen Abflüsse ($NM7Q$) im **Sommer** ist – mit Ausnahme der Aare in Thun und Bern und des Doubs in Ocourt – das gemeinsame Merkmal aller makroskaligen Gebiete, was aufgrund der beobachteten Veränderungen in den mesoskaligen Gebieten zu erwarten ist. Die beiden Einzugsgebiete Aare, Thun, und Aare, Bern, weisen unter den untersuchten makroskaligen Einzugsgebieten die grösste Vergletscherung auf (7 % bzw. 6 %). Dies dürfte ein wichtiger Grund sein, wieso die kleinsten Abflüsse im Sommer nicht abgenommen haben. Aber auch Einflüsse durch die Seeregulierung sind nicht auszuschliessen.

Im **Winter** haben die $NM7Q$ am Hochrhein und an der Reuss signifikant zugenommen. Wegen der Grösse der makroskaligen Gebiete und damit der vielfältigen Einflussfaktoren spielen mehrere Faktoren eine Rolle wie wärmere Winter, die Wasserkraftproduktion (vgl. Kap. 6.2.2) und die Regulierung der Seen (nicht beim Bodensee).

Im **Frühling** und **Herbst** haben sich die $NM7Q$ – ausser im Flussgebiet der Reuss – kaum verändert.

Im Reussgebiet haben sich die kleinsten saisonalen Abflüsse nach einem einheitlichen Muster verändert. Da sich die Gebietsgrösse zwischen der Reuss, Luzern (2254 km^2), und der Reuss, Melligen (3386 km^2), nur um etwas mehr als 1000 km^2 erhöht, ist das saisonale Abflussverhalten der Reuss, Luzern, auch

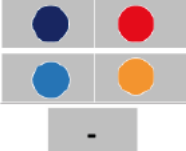
Name	mH [m]	Gl [%]	NM7Q					Q ₃₄₇		d [m³/s]	d [%]
			DJF	MAM	JJA	SON	ANN	ANN			
Rhein und Zuflüsse bis zur Aare											
Thur - Halden	908	0	-	-	●	-	-	-	-0.9	-12.7	
Thur - Andelfingen	770	0	-	-	●	-	-	-	-0.6	-6.6	
Rhein - Neuhausen	1239	0.6	●	-	●	-	●	●	37.1	22.8	
Rhein - Rekingen	1131	0.4	●	-	●	-	●	●	42.6	21.6	
Aare und Zuflüsse											
Aare - Thun	1746	6.9	●	-	-	-	●	●	-5.3	-14.2	
Aare - Bern	1596	5.8	●	-	-	-	●	●	-3.8	-8.7	
Aare - Murgenthal	1000	1.5	-	-	●	-	-	-	-0.5	-0.4	
Aare - Brugg	1066	1.7	-	-	●	●	-	-	-7.5	-5.6	
Reuss - Luzern	1504	2.8	●	●	●	●	●	●	6.6	21.7	
Reuss - Mühlau	1371	2.2	●	●	●	●	●	●	5.8	15.4	
Reuss - Mellingen	1259	1.8	●	●	●	●	●	●	9.5	23.1	
Limmat - Baden	1131	0.7	-	-	●	-	●	●	4.0	9.7	
Aare – U'siggenthal	1064	1.4	-	-	●	-	-	-	15.3	6.8	
Rhein bis Basel											
Rhein - Basel	1052	1.0	-	-	●	-	-	-	63.8	14.2	
Rhone											
Arve - Genève	1370	0	-	●	●	-	-	-	-0.8	-3.8	
Doubs - Ocourt	952	0	-	●	-	-	-	-	0.8	18.7	
Zunahme Abnahme  Signifikanter Trend (p ≤ 0.05) Deutliche Veränderung (0.2 ≥ p > 0.05) Kein Trend											

Abbildung 18: Veränderung des Niedrigwassers in der Periode 1961–2018 in makroskaligen Einzugsgebieten. mH: Mittlere Gebietshöhe, Gl: Vergletscherung Stand 2015 (BAFU 2015), NM7Q: Kleinstes Abflussmittel über sieben Tage, Q₃₄₇: Abflussmenge, die an 347 Tagen erreicht oder überschritten wird, d: Veränderung Q₃₄₇ zwischen 1961/70 und 2009/18 (Veränderungen ≥ 20% bzw. ≤ -20% sind hervorgehoben), p: Irrtumswahrscheinlichkeit

für die unterliegenden Stationen prägend und wird durch die Zuflüsse nur unwesentlich verändert. Wieso sich das Reussgebiet deutlich von den anderen Flussgebieten abhebt, bleibt aber unklar. Ein Rolle könnte dabei die Seeregulierung des Vierwaldstättersees spielen.

5.3 Niedrigwasserabflüsse

Das jährliche $NM7Q$ und die Abflussmenge Q_{347} haben sich an jenen Stationen deutlich oder signifikant verändert, an denen im Winter deutliche oder signifikante Veränderungen aufgetreten sind. Der Winter (DJF) ist, wie in Kap. 5.1 erläutert, die Jahreszeit, in denen bei makroskaligen Einzugsgebieten sehr häufig Niedrigwasser auftreten. An den Rhein-Stationen unterhalb des Bodensees, also am Hochrhein, und an den Reuss-Stationen unterhalb des Vierwaldstättersees haben die jährlichen $NM7Q$ und die Abflussmenge Q_{347} signifikant zugenommen, während sie bei der Aare in Thun und Bern im gleichen Zeitraum deutlich oder signifikant abgenommen haben. Für diesen Gegensatz können kaum nur klimatische Gründe verantwortlich sein, sondern auch anthropogene Faktoren wie Seeregulierung und die Wasserkraftproduktion.

6 Weitere Resultate

6.1 Kartographische Darstellung der Ergebnisse

Die folgenden Abbildungen vermitteln einen räumlichen Überblick über die Veränderung der kleinsten saisonalen Abflüsse (*NM7Q*) und der jährlichen Niedrigwasserabflüsse im Zeitraum 1961–2018. Sie fassen die Ergebnisse der Kapitel 4 und 5 aus einem anderen Blickwinkel zusammen.

6.1.1 Kleinste saisonale Abflüsse

- **NM7Q - DJF:** Im Winter fällt der Gegensatz zwischen den alpinen Einzugsgebieten mit einer Erhöhung der kleinsten Abflüsse und den ausseralpinen Einzugsgebieten auf, deren *NM7Q*-Werte sich nicht verändert haben. Die durch den Anstieg der Lufttemperatur verursachte Erhöhung der Abflüsse in alpinen Gebieten führt auch zu einer Erhöhung der Abflüsse an den Abflussstationen am Hochrhein und an der Reuss. Dieser Trend wird durch die Erhöhung der winterlichen Abflüsse durch die Wasserkraftproduktion verstärkt (vgl. Weingartner und Pfister 2007). An den beiden Stationen Aare, Thun, und Aare, Bern, haben die jährlichen Niedrigwasserabflüsse abgenommen. Ein Einfluss der Regulierung des Thunersees ist nicht auszuschliessen. So werden die Seestände am Thunersee alle vier Jahre künstlich gesenkt, um Sanierungsarbeiten an den Ufern zu ermöglichen.
- **NM7Q - MAM:** Auch im Frühling fällt der Unterschied zwischen den alpinen und ausseralpinen Einzugsgebieten auf, nur dass nun das Kollektiv der alpinen Gebiete mit den voralpinen Gebieten erweitert wird. Der Klimawandel hat in diesen Gebieten zu einer vorgezogenen Schneeschmelze und damit zu einer Erhöhung der *NM7Q* geführt. In einigen jurassischen Einzugsgebieten haben die kleinsten saisonalen Abflüsse abgenommen.
- **NM7Q - JJA:** Die Dominanz der roten und orangen Symbole auf der entsprechenden Karte zeigt, dass die kleinsten saisonalen Abflüsse in den meisten meso- und makroskaligen Gebieten im Sommer abgenommen haben. Der Trend ist klar und eindeutig. Das frühere Ausapern, das besonders relevant für alpine Einzugsgebiete ist, und die Erhöhung der Verdunstung dürften hierbei die entscheidenden Prozesse sein. Hingegen sind bei den Sommerniederschlägen im Zeitraum 1961–2018 keine Trends erkennbar. In hochgelegenen und stark vergletscherten Einzugsgebieten (> 12% Vergletscherung) haben die kleinsten Abflüsse infolge der erwärmungsbedingten, überdurchschnittlichen Gletscherschmelze überall zugenommen.

- **NM7Q - SON:** Im Herbst sind im Zeitraum 1961–2018 nur wenig Veränderungen aufgetreten.

6.1.2 Niedrigwasserabflüsse

- **NM7Q - Jahr:** Die kleinsten jährlichen 7-Tagesabflüsse haben sich in der Periode 1961–2018 hauptsächlich in den glazialen und nivo-glazialen Einzugsgebieten sowie im Flussgebiet der Reuss und am Hochrhein verändert. Der Winter ist in diesen Gebieten die charakteristische Niedrigwassersaison, so dass sich die saisonalen Veränderungen im Winter (Abb. 19) direkt auf den jährlichen Niedrigwasserabfluss auswirken. Dies führt in den meisten Fällen zu einer Erhöhung der Abflüsse (Ausnahme Aare, Thun und Bern). Im Voralpenraum, Mittelland und Jura haben sich die jährlichen *NM7Q* kaum verändert. Nur in drei Einzugsgebieten, nämlich Grande Eau, Orbe und Ergolz, haben die kleinsten jährlichen Abflüsse abgenommen.
- *Q₃₄₇*: Die räumlichen Muster der Veränderungen gleichen jenen der jährlichen *NM7Q*. Einzig bei den alpin-nivalen Einzugsgebieten besteht ein Unterschied: Die Abflussmenge *Q₃₄₇* hat in diesen Gebieten in vielen Fällen zugenommen.

6.1.3 Fazit

In der kartographische Darstellung der Trends lassen sich also klare räumliche Muster erkennen, welche einen Zusammenhang mit dem Klimawandel erkennen lassen, welche aber bei den makroskaligen Einzugsgebieten durch anthropogene Effekte wie Seeregulierung und Wasserkraftproduktion modifiziert werden.

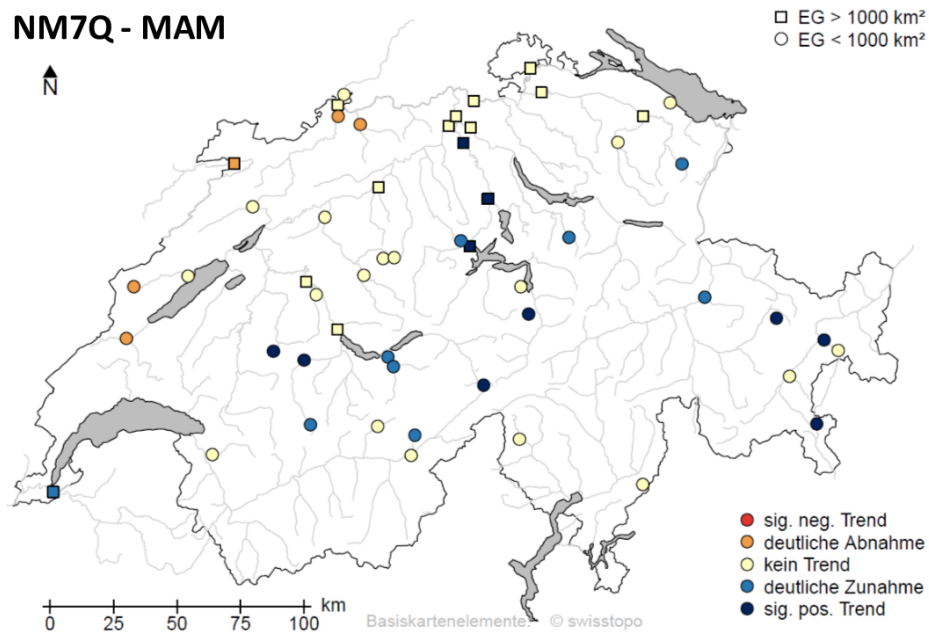
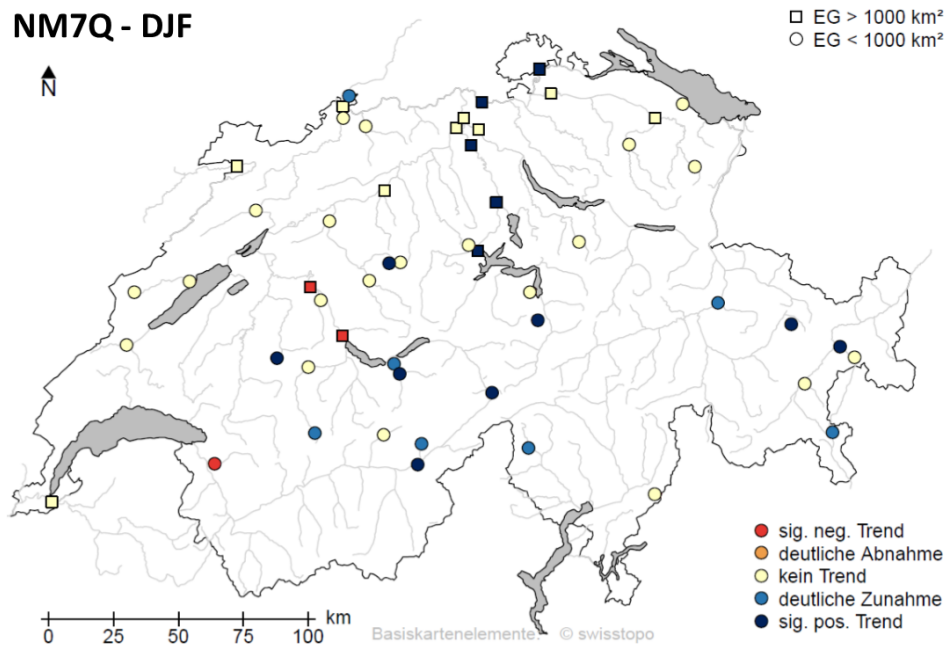


Abbildung 19: Kartographische Darstellung der Veränderung der kleinsten saisonalen Abflüsse in der Periode 1961–2018. DJF: Winter, MAM: Frühling

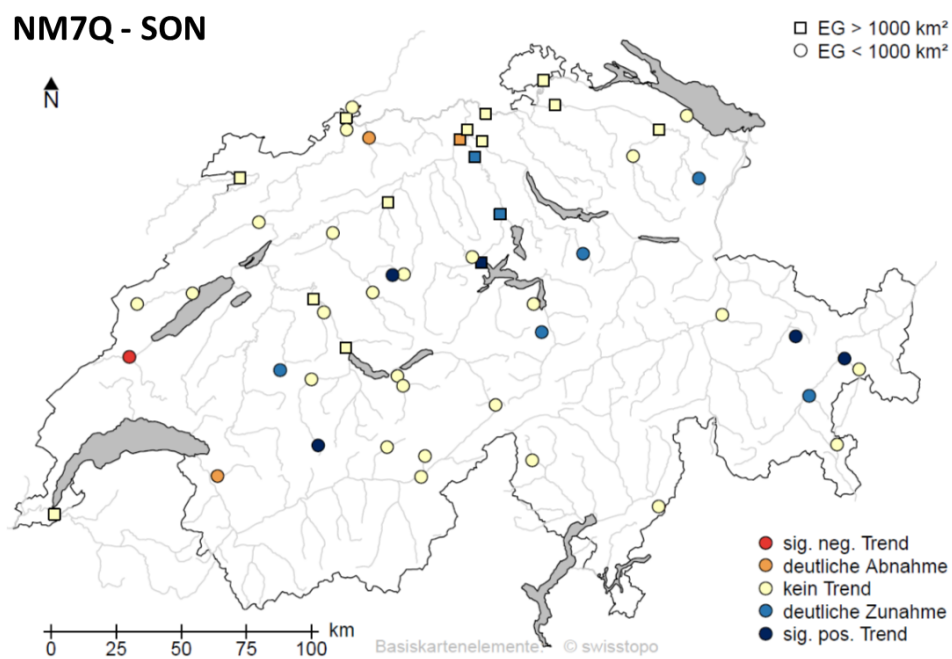
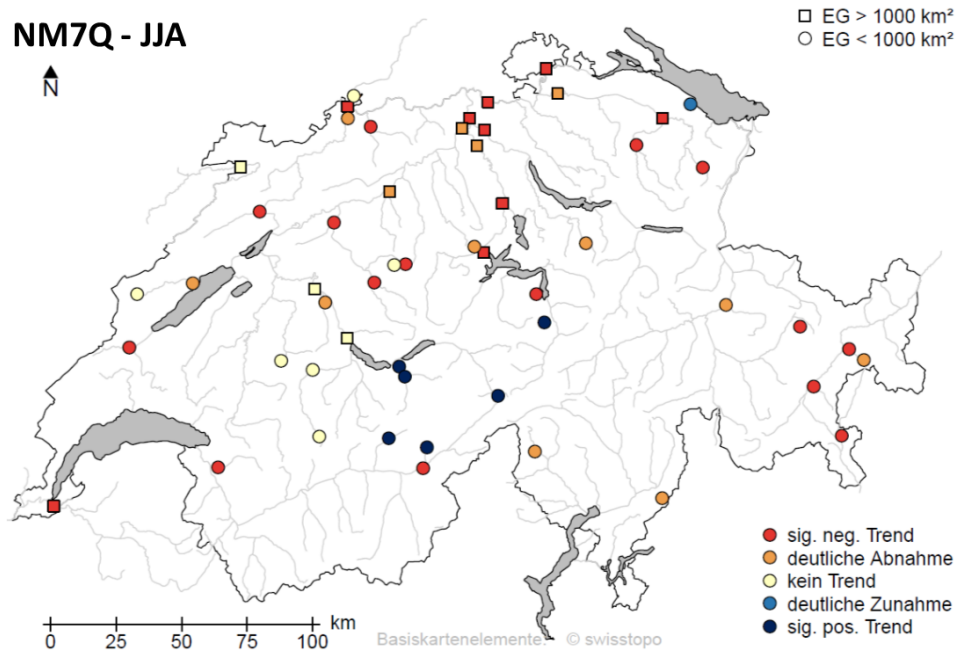


Abbildung 20: Kartographische Darstellung der Veränderung der kleinsten saisonalen Abflüsse in der Periode 1961–2018. JJA: Sommer, SON: Herbst

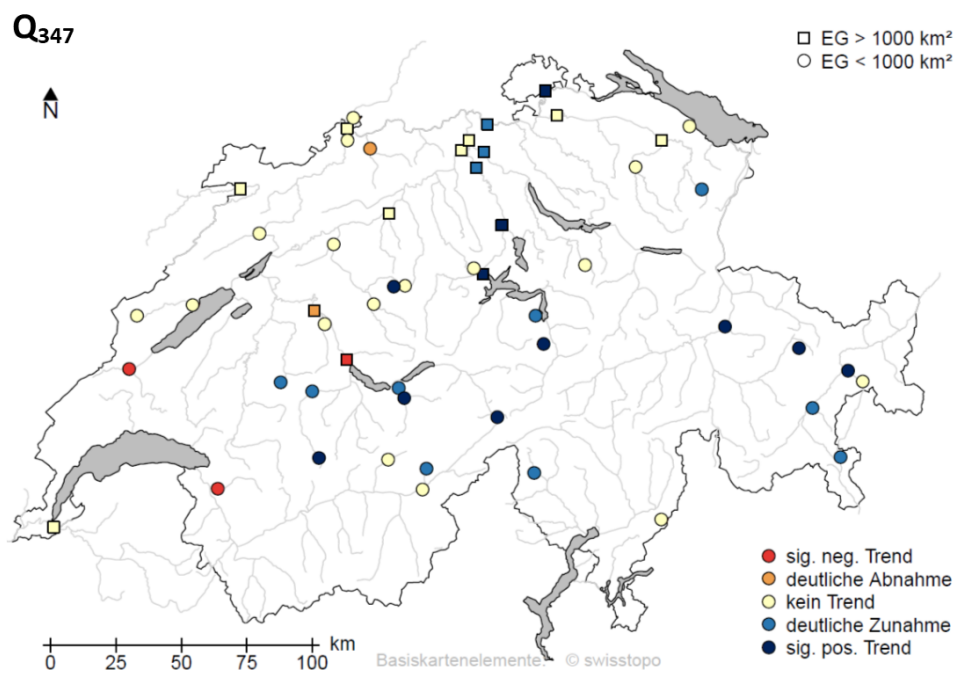
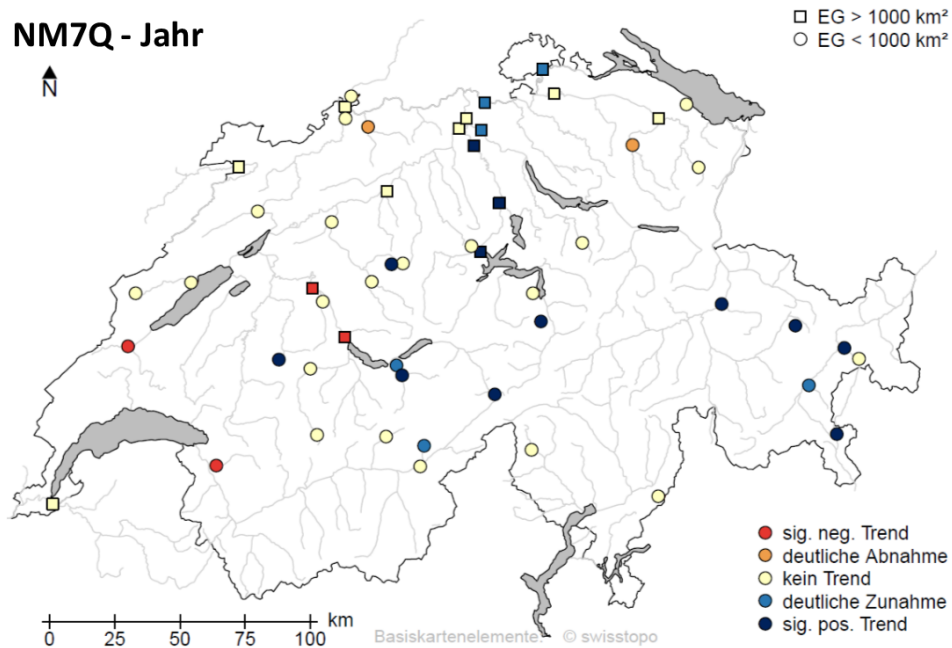


Abbildung 21: Kartographische Darstellung der Veränderung Niedrigwasserkenngrossen $NM7Q$ und Q_{347} in der Periode 1961–2018. Zeitraum: Kalenderjahr

6.2 Zeitliche Einordnung der Untersuchungsperiode 1961–2018

6.2.1 Vergleich der Perioden 1961–2018 und 1931–2018

Bei Trenduntersuchungen werden die Ergebnisse durch die Wahl der Untersuchungsperiode massgeblich beeinflusst (s. z.B. Kohn et al. 2019). Im Kap. 2.1 wird begründet, wieso die vorliegenden Trendanalysen auf den Zeitraum 1961–2018 fokussieren. Zur Einordnung der auf diesem Zeitraum basierenden Ergebnissen haben wir sie mit entsprechenden Analysen für die Periode 1931–2018 verglichen. Dazu konnten dreissig Einzugsgebiete verwendet werden, für welche Abflussdaten für beide Perioden vorhanden sind.

Bezogen auf die beiden Niedrigwasserkenngrössen $NM7Q$ und Q_{347} wurden in mehr als zwei Drittel der Fälle das Trendverhalten identisch beurteilt. Identisch bedeutet, dass in beiden Perioden kein Trend ($p\text{-Wert} > 0.2$) oder aber ein deutlicher oder signifikanter Trend ($p \leq 0.2$) mit gleichem Vorzeichen der Steigung identifiziert wurde.

6.2.2 Die lange Reihe 1871–2018 des Rheins, Basel

Der Rhein, Basel, umfasst die längste Beobachtungsreihe der Schweiz und erlaubt damit eine zeitlich ausgedehnte und gleichzeitig differenzierte Trenduntersuchung im Niedrigwasserbereich.

Die Niedrigwasserperiode erstreckt sich beim Rhein von September bis März. An häufigsten treten die jährlichen Niedrigwasser aber im Januar auf, gefolgt von Februar, März und Dezember (Weingartner und Pfister 2007).

Die Abb. 22 veranschaulicht die zeitliche Entwicklung der Abflussmenge Q_{347} zwischen 1869 und 2018. In dieser Periode besteht ein hochsignifikanter Trend mit einer Zunahme von $0.98 \text{ m}^3/\text{s}$ pro Jahr und insgesamt von $147 \text{ m}^3/\text{s}$.

Um das Trendverhalten differenzierter zu betrachten, wird in Perioden mit Startjahren 1871, 1901, 1931 usf. und Endjahren 1900, 1930, 1960 usf. untersucht, wie sich die Abflussmenge Q_{347} verändert hat. Die Ergebnisse sind auch in Abb. 22 dargestellt. Es lassen sich vier Phasen erkennen:

1. 1869–1900 (1910): Keine signifikante Veränderung von Q_{347} .
2. 1901 (1911)–1960: Erhöhung von Q_{347} gegenüber der ersten Phase, aber keine signifikanter Veränderung innerhalb dieser Phase.
3. 1961–1990: Erhöhung von Q_{347} gegenüber der vorangehenden Phase und deutliche Zunahme ($3.65 \text{ m}^3/\text{s}$ pro Jahr, insgesamt $110 \text{ m}^3/\text{s}$) innerhalb dieser Phase.
4. ab 1991: Keine signifikante Veränderung von Q_{347} .

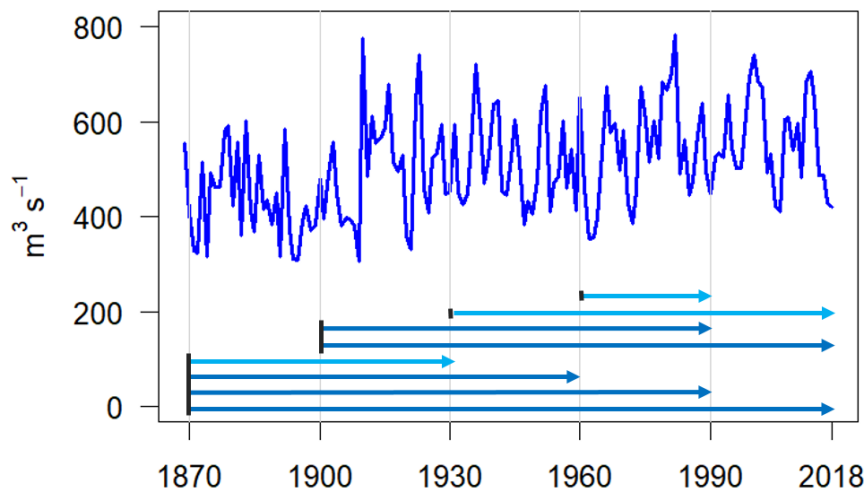


Abbildung 22: Zeitreihe der jährlichen Abflussmenge Q_{347} des Rheins, Basel (Fläche: 35 878 km²). Die blauen Pfeile zeigen, in welchen Perioden deutliche ($0.05 \leq p \leq 0.2$; hellblauer Pfeil) oder signifikante ($p < 0.05$; dunkelblauer Pfeil) monotone Trends beobachtet wurden (Basis: 30-Jahres-Perioden und ein Vielfaches davon). Alle identifizierten Trends sind positiv. Lesebeispiel: Zwischen 1870 und 2018 besteht ein signifikanter positiver Trend.

Weingartner und Pfister (2007) analysierten die Niedrigwasserverhältnisse seit 1540 genauer. Für den Übergang von Phase 1 zu Phase 2 scheint ein relativ starker Anstieg der Wintertemperatur ab 1910 verantwortlich zu sein. Im weiteren Verlauf werden dann zwei Einflussfaktoren entscheidend:

- Die rasante Entwicklung der Wasserkraft mit dem Bau von Stauseen vor allem ab den 1950er Jahren. Dies führt zu einer beträchtlichen Erhöhung des Abflusses durch das turbinierete Wasser; im Mittel des Winterhalbjahrs beträgt die Erhöhung rund 70 m³/s.
- Die klimabedingte Zunahme milderer Winter, welche die Abflussbereitschaft erhöhen.

Unklar ist allerdings, wieso die jährlichen Q_{347} nach 1990 stagnieren, obschon die Lufttemperaturen weiter zugenommen und sich die winterlichen Niederschlagsmengen nicht verändert haben.

Insgesamt belegt das Beispiel des Rheins, wie schwierig es ist, die Veränderungen der Niedrigwassersituation in makroskopischen Einzugsgebieten mit ihrem komplexen Zusammenspiel verschiedener Einflussfaktoren abschliessend zu erklären.

7 Schlussfolgerungen

7.1 Niedrigwasserabflüsse

Die **Niedrigwasserabflüsse** haben sich im Zeitraum 1961–2018 primär und fast ausschliesslich in den alpinen Einzugsgebieten verändert: In sehr vielen Gebieten hat die jährlich kleinste Abflussmenge $NM7Q$ deutlich oder gar signifikant zugenommen. Der Winter ist in diesen Gebieten die charakteristische Niedrigwassersaison, so dass sich die saisonalen Veränderungen im Winter direkt auf die jährlichen Niedrigwasserabflüsse auswirken. Dies gilt auch für die Abflussmenge Q_{347} , die sich in der Mehrheit der alpinen Einzugsgebiete ebenfalls erhöht hat.

Diese Veränderungen stehen in direktem Zusammenhang mit der Klimaänderung: Die Temperaturerhöhung führt zu einer „Verflüssigung des Wasserhaushaltes“, also zur Erhöhung des Regenanteils am Niederschlag im Winter sowie zu einer Veränderung der Dauer der Schneedecke und der Schneeschmelzprozesse.

7.2 Kleinste saisonale Abflüsse

Die kleinsten saisonalen Abflüsse haben sich vor allem im Frühling und im Sommer gewandelt.

Die „Verflüssigung des Wasserhaushaltes“ und hier vor allem das frühere Ausapern der Schneedecke haben bewirkt, dass die kleinsten saisonalen Abflüsse in alpinen und voralpinen, nival geprägten Einzugsgebieten im Frühling in der Periode 1961–2018 mehrheitlich zugenommen haben.

Im Sommer fällt auf, dass die kleinsten Abflüsse in fast allen untersuchten nordalpinen Einzugsgebiete signifikant abgenommen haben. Die frühere Ausapernung, die besonders relevant für alpine Einzugsgebiete ist, und die Erhöhung der Verdunstung dürften hierbei die entscheidenden Prozesse sein. Einzig die hochalpinen, stark vergletscherten Einzugsgebiete machen – bedingt durch die intensive Schmelze der Gletscher – eine Ausnahme. Die Abnahme der kleinsten Abflüsse ist besonders für die mittelländischen und jurassischen Einzugsgebiete relevant, weil hier die jährlichen Niedrigwasser im Spätsommer und Herbst auftreten, so dass damit gerechnet werden muss, dass die Niedrigwasserverhältnisse kurz- bis mittelfristig massgeblich verändern werden.

Zitierte Literatur

Akademien der Wissenschaften Schweiz (2016): Brennpunkt Klima Schweiz. Grundlagen, Folgen und Perspektiven. Swiss Academies Reports 11 (5).

BAFU (2015): Hydrologisches Jahrbuch. Bern.

BAFU et al. (Hrsg.) (2019): Hitze und Trockenheit im Sommer 2018. Auswirkungen auf Mensch und Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1909.

Floriancic, M. (2019): Charakterisierung von Niedrigwasserregimen – Auswertung und Gegenüberstellung von Abflussdatenreihen und Niederschlagsdaten. Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt, Zürich.

HADES: Daten- und Analyseplattform. hydromaps.ch

Helbling, A., Kan, C., Marti, P. (2007): Niedrigwasser – kleinste Mehrtagesmittel des Abflusses. Hydrologischer Atlas der Schweiz, Druckausgabe, Tafel 5.11.

Klein, G., Vitasse, Y., Rixen, Ch., Marty, Ch., Rebetez, M. (2016): Shorter snow cover duration since 1970 in the Swiss Alps due to earlier snowmelt more than to later snow onset. Climatic Change (2016) 139:637-649.

Kohn, I., Stahl, K., Stöltzle, M. (2019): Low flow events - A review in the context of climate change in Switzerland. Comissioned by the Federal Office for the Environment (FOEN), Bern, Switzerland.

NCCS (Hrsg.): CH2018 - Klimaszenarien für die Schweiz. CH2018 - Webatlas. National Centre for Climate Services, Zürich.

Pohlert, T. (2018): Non-parametric trend tests and change-point detection. Trend package in R.

Tallaksen, L., Van Lanen, H. (2004): Hydrological drought. processes and estimation. Methods for streamflow and groundwater. In: Developments in Water Science 48, Amsterdam.

Weingartner, R. (2019): Abflussregimes der Schweiz Veränderungen in den letzten Jahrzehnten. Synthesebericht zum Projekt Hydro CH2018.

Weingartner, R., Aschwanden, H. (1992): Abflussregimes als Grundlage zur Abschätzung von Mittelwerten des Abflusses. Hydrologischer Atlas der Schweiz, Druckausgabe, Tafel 5.2.

Weingartner, R., Messerli, P. (2017): Die Verflüssigung des alpinen Wasserhaushaltes und die Rolle von Mehrzweckspeichern. Montagna, Vol. 28, Nr. 4:12–13.

Weingartner, R., Pfister, Ch. (2007): Wie ausserordentlich war das Niedrigwasser im Winter 2005/06? – Eine hydrologisch-historische Betrachtung des

Rheinabflusses in Basel, In: Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 51/1, Koblenz.