

Veränderungen der Abflussregimes der Schweiz in den letzten 150 Jahren

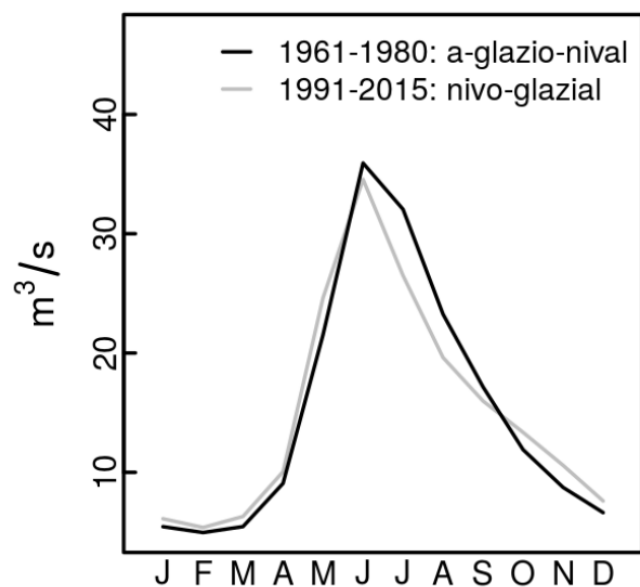
R. WEINGARTNER



IM AUFTRAG DES BUNDESAMTES FÜR UMWELT BAFU – FEBRUAR 2018

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

Veränderungen der Abflussregimes der Schweiz in den letzten 150 Jahren



Rolf Weingartner

Gruppe für Hydrologie

Geographisches Institut der Universität Bern

Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Impressum

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: Gruppe für Hydrologie, Geographisches Institut der Universität Bern

Autor/Autorin: Rolf Weingartner

Begleitung BAFU: Petra Schmocker-Fackel, Fabia Hüsler, Caroline Kan, Martin Barben

Hinweis: Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) im Rahmen des Themenschwerpunkts Hydro-CH2018 verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Zusammenfassung

Die vorliegenden Analysen basieren auf allen verfügbaren Messstellen des BAFU in Einzugsgebieten mit naturnahen Abflussverhältnissen. Mit dem Rhein in Basel wurden die Regimeveränderungen seit 1871 räumlich integral für die Alpennordseite beschrieben. Über die mesoskaligen Einzugsgebiete (10 - 1000 km²) konnten für den Zeitraum 1931 - 2015 bzw. 1961 - 2015 regionale Tendenzen und Trends im Mittelland/Jura und Alpenraum sowie – bruchstückhaft – auf der Alpensüdseite abgeleitet werden. Die makroskaligen Gebiete (> 1000 km²) zeigen schliesslich, wie sich die durch die mesoskaligen Gebiete erfassten Veränderungen auf die übergeordneten Einzugsgebiete auswirken.

Die Ergebnisse belegen schlüssig, dass sich die Abflussregimes in den letzten Jahrzehnten verändert haben und dass dabei der Klimawandel eine entscheidende Rolle spielt. Es liegen nun regional differenzierte und wo immer möglich quantifizierte Angaben zum Ausmass der Veränderungen vor. Primär betroffen ist der Alpenraum. Aber auch im Mittelland sind klare Tendenzen erkennbar. Die Aussagen zur Alpensüdseite sind aufgrund der schlechten Datelage vage. Aus saisonaler Sicht finden die grössten Veränderungen im Winter und Sommer sowie – untergeordnet – im Frühling statt. Ein unklares Bild besteht im Herbst. Die mittleren Jahresabflussmengen haben sich in den letzten Jahrzehnten – beim Rhein sogar seit 1871 – nicht verändert. Die saisonale Umverteilung der Abflüsse ist damit aus wasserwirtschaftlicher Sicht massgebend. Wir stehen allerdings erst am Anfang einer Entwicklung, die vor allem im Sommer zu Problemen führen könnte.

Résumé

Les analyses disponibles sont basées sur tous les points de mesure disponibles de l'OFEV, situés dans les bassins versants avec des conditions de drainage naturelles. Avec le Rhin à Bâle, les changements de régime intervenus depuis 1871 ont été décrits intégralement pour le nord des Alpes. Les bassins versants à méso-échelle (10 à 1000 km²) ont permis d'identifier les tendances régionales du Plateau, du Jura et région alpine et – partiellement – du sud des Alpes. Les zones à macro-échelle (> 1000 km²) montrent enfin comment les changements détectés par les régions à méso-échelles affectent les bassins versants sus-jacents.

Les résultats prouvent de manière concluante que les régimes d'écoulement ont changé au cours des dernières décennies et que le changement climatique joue un rôle crucial. Il y a des informations régionales différenciées et, quand possible, quantifiées sur l'ampleur des changements. Les tendances sont claires principalement pour la région alpine, mais également pour le Plateau. Le mauvais état des données au sud des Alpes permet seulement des déclarations très vagues. D'un point de vue saisonnier, les plus grands changements ont lieu en hiver et en été et – de façon subordonnée - en printemps. Une image incertaine existe en automne. Les moyennes des débits annuels au cours des dernières décennies – celles du Rhin même depuis 1871 – n'ont pas changé. La redistribution saisonnière des débits est donc décisive pour la

gestion de l'eau. Nous ne sommes cependant qu'au début d'un développement, qui pourrait entraîner des problèmes, en particulier en été.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Definition und Bedeutung des Abflussregimes	1
1.2	Prozesshafte Betrachtung des Abflussregimes	3
1.2.1	Der Einfluss von Schnee und Eis	4
1.2.2	Anthropogene Beeinflussung	7
1.3	Abflussregimes in Raum und Zeit	8
1.3.1	Einfache und komplexe Abflussregimes	8
1.3.2	Langjährige Mittelwerte versus Einzeljahre	9
1.4	Abflussregimes der Schweiz	11
1.4.1	Überblick	11
1.4.2	Alpine Abflussregimes	11
1.4.3	Mittelländisch-jurassische Abflussregimes	13
1.4.4	Südalpine Abflussregimes	14
1.4.5	Komplexe Abflussregimes zweiter Ordnung	15
2	Problemstellung und Zielsetzung, Aufbau der Studie	17
2.1	Fragestellung und Hypothesen	17
2.2	Aufbau der Studie	19
3	Daten und Methoden	23
3.1	Kriterien der Gebietsauswahl	23
3.2	Methodische Grundlagen	24
3.2.1	Veränderung des Regimetyps	24
3.2.2	Trendanalysen	24
3.2.3	Beurteilung der Variabilität der Tagesabflüsse	25
3.2.4	Beurteilung der räumlichen Muster	25
4	Veränderungen beim Rhein in Basel seit 1871 bzw. 1811	27
4.1	Abflussregime	27
4.2	Saisonale Abflüsse	28
4.3	Variabilität der Tagesabflüsse	28
5	Veränderung des Abflussregimetyps	31
5.1	Alpine Gebiete	31
5.2	Mittelländische und jurassische Gebiete	33
5.3	Südalpine Gebiete	34
6	Veränderungen in der Periode 1931–2015	39
6.1	Saisonale Mittelwerte	39
6.2	Variabilität der Tagesabflüsse	44

7	Veränderungen in der Periode 1961–2015	45
7.1	Saisonale Abflüsse	45
7.1.1	Vergleich mit der Periode 1931–2015	47
7.2	Variabilität der Tagesabflüsse	49
8	Diskussion	53
8.1	Einordnung der Resultate	53
8.2	Veränderungen des Abflussregimes auf dem Hintergrund des Klimawandels .	56
8.3	Kritik	59
9	Schlussfolgerungen	61
	Literaturverzeichnis	63
	Danksagung	67

1 Einleitung

1.1 Definition und Bedeutung des Abflussregimes

Ein wesentliches Merkmal eines Einzugsgebietes ist das saisonale Muster im Abflussverhalten, das als Abflussregime bezeichnet wird. Letzteres integriert die hydrologischen Verhältnisse eines Einzugsgebietes in Raum und Zeit. Es erfasst dessen grundlegenden hydrologischen Eigenschaften: Klima, Geologie, Landnutzung und Vegetation. Zudem kann das Abflussregime durch menschliche Eingriffe in den Wasserhaushalt (z.B. Wasserableitungen) verändert werden. Das Abflussregime trägt damit nicht nur zum hydrologischen Grundverständnis bei, sondern ist auch ein sensitiver Indikator für Veränderungen im Einzugsgebiet. Dadurch ist es hervorragend geeignet, klimabedingte Einflüsse auf die hydrologischen Verhältnisse zu detektieren. Veränderungen im Abflussregime sind zudem ein deutlicher Hinweis darauf, dass weitere hydrologische Charakteristiken – Hoch- und Niedrigwasser, Abflussvariabilität etc. – von Veränderungen betroffen sein könnten (vgl. Weingartner et al., 2013a).

Die Saisonalität des Abflusses – also das Abflussregime – kann mit kontinuierlichen oder diskreten Beobachtungen erfasst werden. Sehr häufig werden (langjährige) Monatsmittel als absolute oder relative Werte verwendet. Steht die Saisonalität des Abflusses im Vordergrund, kommen oftmals dimensionslose Koeffizienten zum Einsatz, welche den Anteil des jeweiligen Monatsmittels am Gesamtabfluss beschreiben (Dettinger und Diaz, 2000). In diesem Zusammenhang weit verbreitet ist der Pardé-Koeffizient (Pardé, 1933):

$$PK_i = \frac{MQ_i}{MQ_{Jahr}} \quad (1)$$

mit:

PK_i Pardé-Koeffizient des i-ten Monats [-]
 MQ_i Mittlerer Abfluss des i-ten Monats [m^3/s]
 MQ_{Jahr} Mittlerer Jahresabfluss [m^3/s]

Wegen seines integrativen Charakters eignet sich das Abflussregime zum Vergleich und zur Typisierung von Einzugsgebieten. Bei der Typisierung werden Einzugsgebiete mit ähnlichen Pardé-Koeffizienten zu Regimetypen zusammengefasst. Dabei wird erwartet, dass die dominanten hydrologischen Prozesse in Einzugsgebieten, welche demselben Regimetyp angehören, ähnlich sind (s. Weingartner et al., 2013a). Neben der Typisierung lassen sich weitere Bereiche identifizieren, für welche Kenntnisse zum Abflussregime unerlässlich sind:

1. Die saisonalen Schwankungen des Abflusses beeinflussen verschiedene ökologische Prozesse in Bächen und Flüssen (z.B. Biggs und Close, 1989; Poff et al., 1997; Cattaneo, 2005; Beechie et al., 2006). Nach Richter et al. (1996) ist die Saisonalität des Abflusses zur Erhaltung der Biodiversität von aquatischen Ökosystemen sehr wichtig.

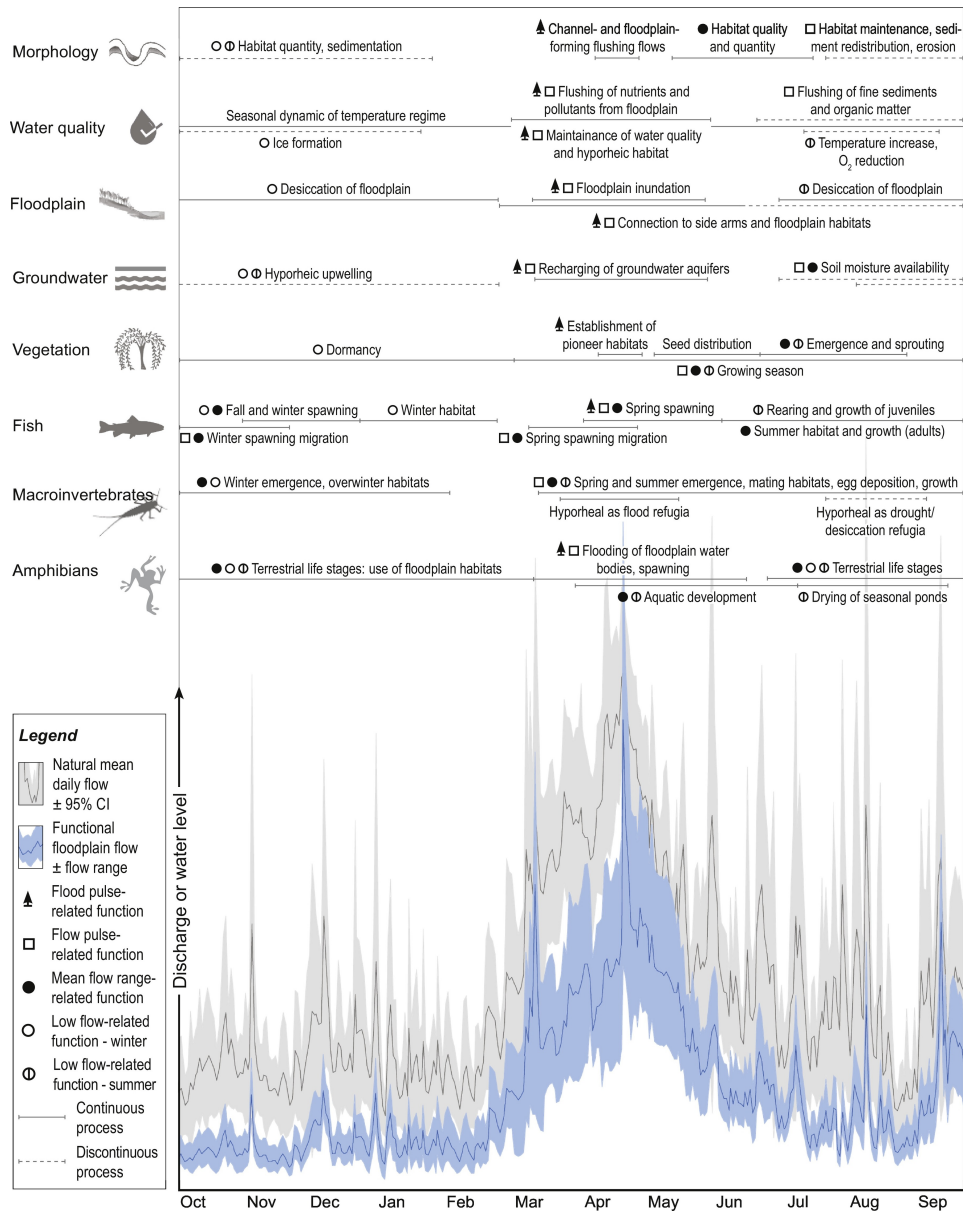


Abbildung 1: Zur ökohydrologischen Bedeutung des Abflussregimes (aus: Hayes et al., 2018).

Hayes et al. (2018) illustrieren die ökologische Bedeutung des Abflussregimes in Abb. 1. Die Grafik zeigt, dass verschiedenste Aspekte des aquatischen Ökosystems vom Abflussregime beeinflusst werden.

2. Informationen zum Abflussregime sind für die Bewirtschaftung der Wasserressourcen grundlegend. Darüber hinaus ist die Kenntnis des natürlichen Abflussregimes in Einzugsgebieten, in denen der Abfluss durch menschliche Einflüsse verändert wurde, für die Planung von Sanierungsmassnahmen unerlässlich.
3. Abflussregimes reagieren sehr sensitiv auf klimatisch bedingte Veränderungen des Wasserhaushaltes (OcCC, 2007; Weingartner et al., 2013b). Es existiert bereits eine Vielzahl von Studien, bei denen die hydrologischen Auswirkungen des Klimawandels auf der Grundlage des Abflussregimes untersucht wurden: Schädler (1990), Arnell (1999), Krasovskaia und Gottschalk (2002), Barnett et al. (2005), Adam et al. (2009), Stewart (2009), SGHL und CHy (2011), BAFU (2012).

Der dritte Aspekt motivierte zu dieser im Rahmen des Projektes Hydro-CH2018 durchgeführten Studie. Im Mittelpunkt stehen die Veränderungen der Abflussregimes der Schweiz. Angestrebt wird eine umfassende gesamtschweizerische Studie, die auf allen verfügbaren langjährigen Abflussdaten des Bundesamts für Umwelt (BAFU) basiert. Der Begriff Abflussregime wird dabei sehr breit verstanden. Er umfasst sowohl die klassische Regimekurve und die daraus abgeleiteten Regimetypen, als auch den mittleren Jahresabfluss, die saisonalen Abflussmittelwerte und die Variabilität der Tagesabflüsse.

1.2 Prozesshafte Betrachtung des Abflussregimes

Das Abflussregime ist die räumlich-zeitlich integrale Antwort eines Einzugsgebietes und ein Spiegelbild der spezifischen Gebietseigenschaften und der damit zusammenhängenden Prozesse. Es wird durch die saisonalen Zyklen von Niederschlag und Verdunstung geprägt. Der wechselnde Einfluss der hydrologischen Speicher modifiziert diese klimatisch bzw. meteorologisch bedingten Muster. Dabei sind der Schnee- und Eisspeicher sowie der Boden- und Grundwasserspeicher von zentraler Bedeutung. Die Wasserspeicherung im Boden- und Grundwasser führt dazu, dass die grossen Schwankungen im Niederschlagsgeschehen ausgeglichen werden. Im Gegensatz verstärkt der Einfluss von Schnee und Eis die intra-annualen Abflussschwankungen, indem die Niedrigwasserphasen durch den Rückhalt des Niederschlags in Form von Schnee und Eis verstärkt werden. Diese Zusammenhänge sollen am Beispiel eines alpinen Einzugsgebietes in Abb. 2 vertieft werden: Der Niederschlag ist der wichtigste Inputfaktor. Im Winter wird der grösste Teil des Niederschlags als Schnee zwischengespeichert – der Abfluss ist dadurch stark reduziert – im Sommer ist er durch die Schneeschmelze deutlich erhöht. Der Grundwasserspeicher zeigt ein zeitlich komplementäres Verhalten: Er wird im Sommer erneuert und trägt im Winter zum (Basis-)Abfluss bei. Die Verdunstung weist zwar ein ausgeprägtes saisonales Muster auf. Ihre Bedeutung ist aber im Alpenraum mit Jahresverdunstungswerten um 300 mm/a eher klein, wenn man bedenkt, dass die Niederschlagssummen zwischen 1500–2000 mm/a liegen.

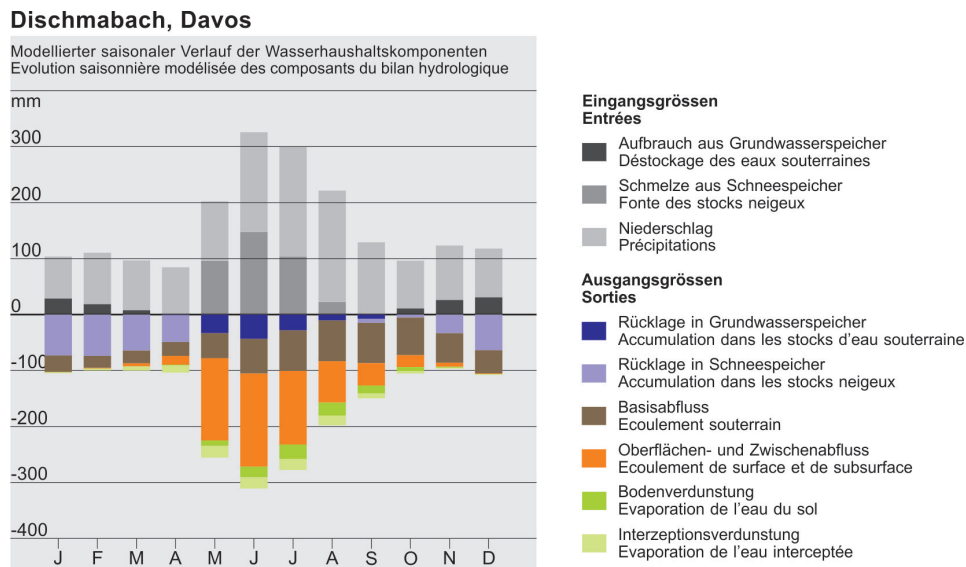


Abbildung 2: Dischmabach, Davos: Abflussregime als integrale Antwort der in einem Einzugsgebiet ablaufenden hydrologischen Prozesse (aus: Barben et al., 2010).

1.2.1 Der Einfluss von Schnee und Eis

Wie in Abb. 2 ausgewiesen, beeinflusst der Schnee das saisonale Abflussgeschehen alpiner Einzugsgebiete entscheidend. Nach Aschwanden und Weingartner (1985) treten alpine Einzugsgebiete mit dominantem Schneeeinfluss ab einer mittleren Gebietshöhe von 1550 m ü.M. auf, voralpine Einzugsgebiete mit bedeutendem Schneeeinfluss zwischen einer mittleren Höhe von 1000 und 1550 m ü.M. Alpine und voralpine Einzugsgebiete umfassen rund 50 % der Fläche der Schweiz (vgl. hypsographische Kurve der Schweiz), was die Bedeutung des Schnees im schweizerischen Wasserhaushalt unterstreicht. In hochalpinen Einzugsgebieten kommen die Gletscher als zusätzliche wichtige Speicher hinzu.

Modellierungsexperimente von Bernhard und Zappa (2012) und Stahl et al. (2016) belegen die Bedeutung dieser temporären Speicher. Die beiden Autorenkollektive stimmen darin überein, dass rund 40 % des Abflusses des Rheins in Basel dem Schneespeicher und rund 2 % dem Eisspeicher entstammen. Bei alpinen Einzugsgebieten kann der Schneebeitrag bis zu 60 % ausmachen, während der Abflussbeitrag der Gletscher je nach Vergletscherungsgrad stark variiert. So beträgt er nach Stahl et al. (2016) bei der Aare in Brienzwiler 13 %. Das Einzugsgebiet besitzt eine mittlere Gebietshöhe von 2135 m ü.M. und einen Vergletscherungsgrad von 15.5 % (Stand 2016). Feldversuche im Oberlauf der Simme (Hunkeler, 2013; Kröpfl, 2013) und Lütchine (Aeschlimann, 2018) bestätigen diese Modellierungsergebnisse: Mit Hilfe der EMMA-Methode (End Member Mixing Analyse) wurden die saisonal unterschiedlichen Beiträge von Schnee und Eis identifiziert. In den erwähnten Gebieten tragen die Schnee- und Eisschmelze insgesamt mit einem Anteil von 50 % bis 65 % zum Gesamtabfluss bei.

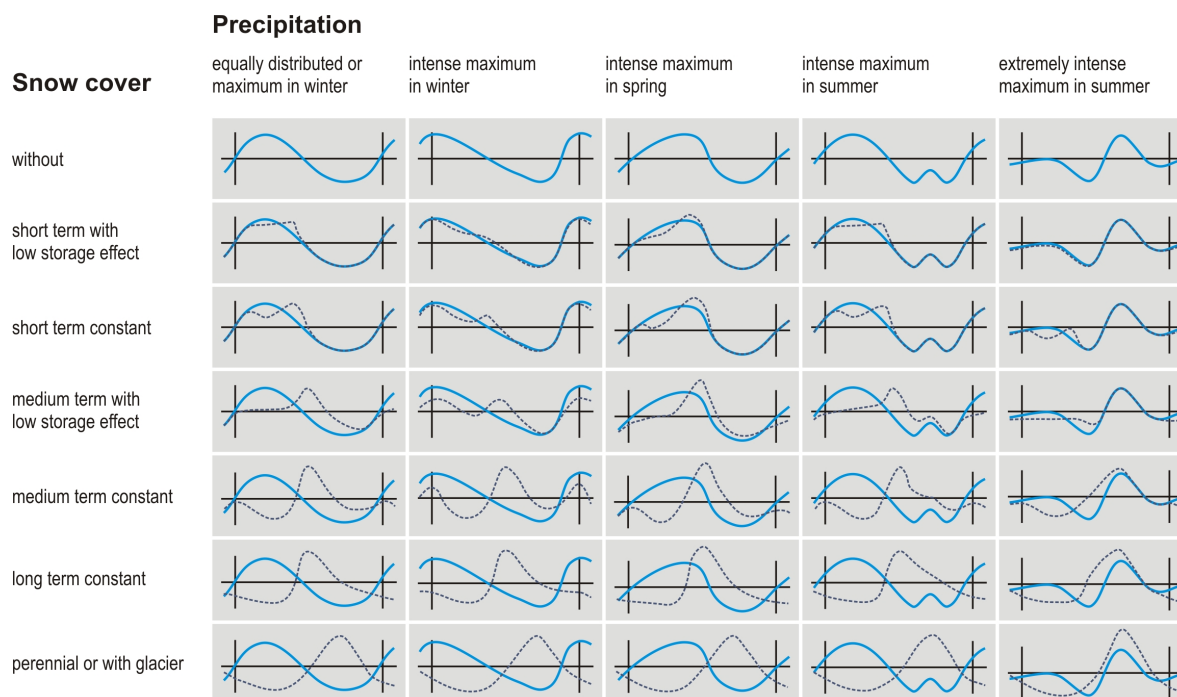


Abbildung 3: Einfluss von Niederschlag, Verdunstung sowie Schnee und Gletscher auf die Ausprägung des Abflussregimes (nach Grimm, 1968). Die blaue Kurve in der ersten Spalte zeigt das klimabedingte Abflussregime eines Einzugsgebietes mit gleichmässiger saisonaler Verteilung des Niederschlags, deutlich höheren Verdunstungsraten im Sommerhalbjahr und keiner Beeinflussung durch Schnee und Gletscher. Die unterschiedlichen Verläufe des Abflussregimes (blaue Kurven) in der ersten Zeile der Grafik sind das Ergebnis unterschiedlicher Muster der saisonalen Verteilung der Niederschläge. Je nach dem Grad des Einflusses von Schnee und Gletscher werden diese klimatologisch bedingten Grundmuster überprägt, wie dies die Spalten der Grafik verdeutlichen (gestrichelte schwarze Linie).

Grimm (1968) illustrierte die Wechselwirkung des Einflusses von Niederschlag, Verdunstung sowie von Schnee und Eis auf das Abflussregime in einer Grafik (vgl. Abb. 3). Je nach Einfluss von Schnee und Eis unterscheidet sich das beobachtete Abflussregime (gestrichelte Kurve) deutlich vom klimabedingten, das sich aus der Differenz zwischen monatlichem Niederschlag (N) und monatlicher Verdunstung (E) ergibt (N–E). Ist der Einfluss von Schnee (und Eis) dominant, entstehen eingipflige Abflussregimes.

In Abb. 4 wurde der grafische Ansatz von Grimm (1968) in unterschiedlichen Einzugsgebieten der Schweiz quantitativ umgesetzt. Basierend auf Daten aus dem Hydrologischen Atlas der Schweiz (HADES, 2018) wurde der aus der klimatischen Wasserbilanz (N–E) resultierende Abfluss berechnet und mit dem effektiv beobachteten Abfluss verglichen, so dass der Effekt des Schnees und der Gletscher direkt erkennbar ist. Die Abb. 4 bestätigt die Grafik von

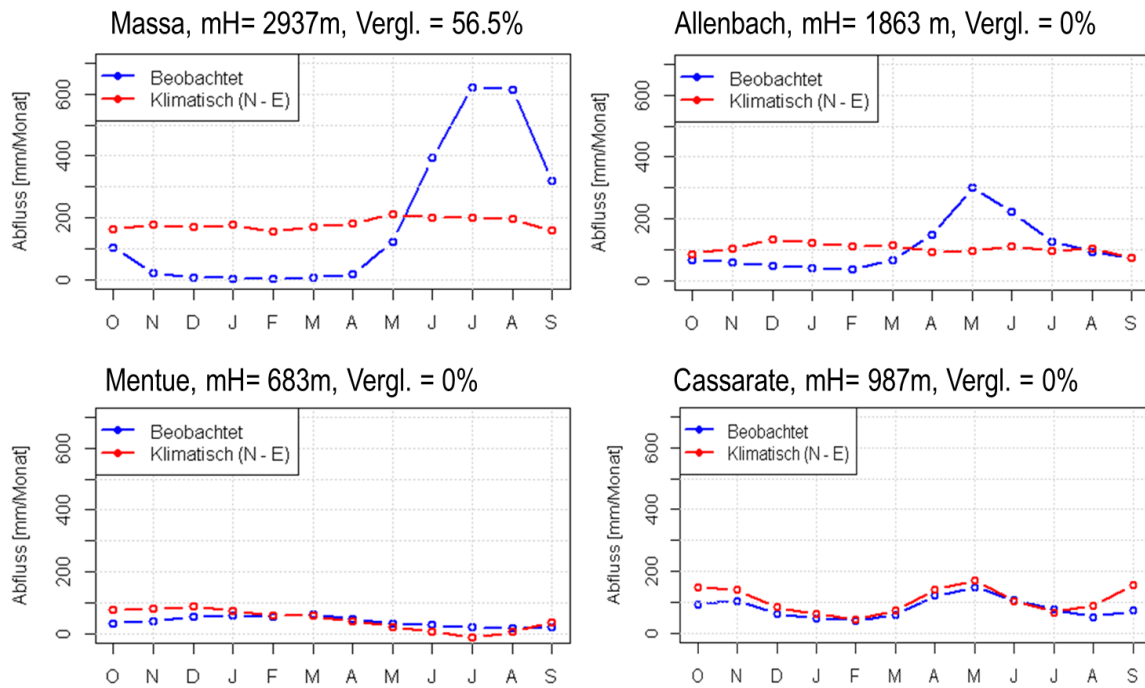


Abbildung 4: Aus der Differenz zwischen Niederschlag und Verdunstung (N - E) berechnete klimatische Abflussregimes im Vergleich zu beobachteten mittleren Abflussregimes ausgewählter Einzugsgebiete (Massa: hochalpin; Allenbach: alpin; Mentue: mittelländisch; Cassarate: südalpin). Hydrologische Jahre. Daten: HADES (2018), BAFU, Kummer (2017)

Grimm (1968) weitgehend: Während das klimatische und das beobachtete Abflussregime in den beiden vom Schnee wenig beeinflussten, tiefliegenden Einzugsgebieten (Mentue, Cassarate) sehr ähnlich sind, zeigt sich der Schnee- und Gletschereinfluss bei den beiden alpinen Einzugsgebieten (Massa, Allenbach) deutlich in Form der Schneerücklage im Winter und der Schnee- und Eisschmelze im Frühling und Sommer.

Abb. 5 geht noch einen Schritt weiter: Es wird das aus der Differenz zwischen klimatischem und beobachtetem Abfluss abgeschätzte Schneewasseräquivalent mit dem modellierten SWE nach HADES (2018) verglichen. Es besteht ein relativ enger Zusammenhang ($r^2 = 0.86$), so dass über die winterliche Abflussdifferenz (\rightarrow SWE abgeschätzt) eine Schätzung des maximalen SWE möglich ist.

Diese Zusammenstellung verdeutlicht die tragende Rolle der Kryosphäre beim Wasserhaushalt der Schweiz im Allgemeinen und bei den Abflussregimes im Speziellen. Mit der Klimaerwärmung wird sich diese Bedeutung wandeln. In der vorliegenden Studie soll untersucht werden, ob dieser Wandel bereits heute erkennbar ist und wie gross die Veränderungen bereits sind.

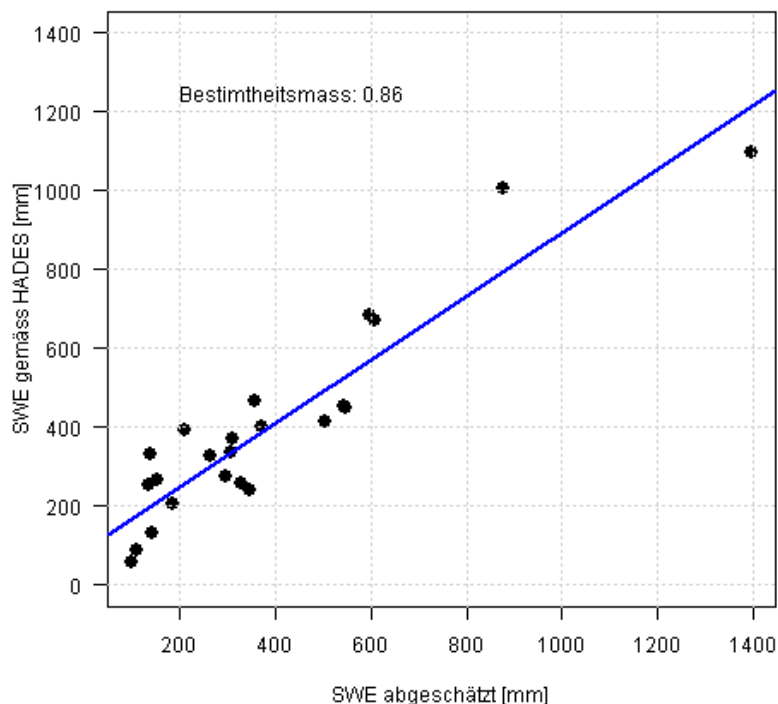


Abbildung 5: Vergleich zwischen abgeschätztem und modelliertem Schneewasseräquivalent (SWE) für ausgewählte alpine und voralpine mesoskalige Einzugsgebiete. Abgeschätztes SWE: Volumendifferenz zwischen klimatischem und beobachtetem Abflussregime in den Monaten Oktober bis März (vgl. Abb. 4). Modelliertes Schneewasseräquivalent nach HADES (2018).

1.2.2 Anthropogene Beeinflussung

Die anthropogene Beeinflussung der Abflussregimes im Alpenraum ist vor allem bedingt durch die Nutzung der Wasserkraft sehr gross. Nach Weingartner (1999) ist die Wasserführung im Einzugsgebiet der Rhone bis zum Genfersee in rund 40 % der Fliesstrecken beeinflusst. In Tab. 1 sind Ausmass und Grad der Beeinflussung in den alpinen Flussgebieten detailliert zusammengestellt. Nach Baumgartner et al. (2007) weisen in der Schweiz rund 10 % der Flusstrecken anthropogen veränderte Abflussregimes auf.

Insgesamt sind die anthropogenen Veränderungen des Abflussregimes um einiges grösser als die klimabedingten. Sie werden in der vorliegenden Studie aber nicht betrachtet. Wegen der anthropogenen Beeinflussung sind in manchen Regionen des Alpenraums – insbesondere im Wallis und im Tessin – nur wenige beobachtete Einzugsgebiete verfügbar, die über anthropogen nicht oder nur unwesentlich beeinflusste Abflussverhältnisse aufweisen. In diesen Regio-

Tabelle 1: Prozentsatz alpiner Fliessstrecken, deren Wasserführung durch die Wasserkraftnutzung beeinflusst ist (aus: Weingartner, 1999).

Flussgebiet	Beeinflussung der Wasserführung					unbeeinflusst	L [km]
	sehr gross	gross	mittel	mittel bis klein	klein		
Rhein–Felsberg	12.4%	5.8%	1.0%	1.0%	2.8%	77.0%	1730.7
Aare–Bern	4.3%	2.4%	1.4%	0.6%	3.5%	87.8%	1387.8
Reuss–Luzern	3.8%	3.6%	1.4%	1.5%	7.3%	82.4%	1857.5
Limmat–Zürich	4.2%	4.3%	4.4%	2.1%	4.7%	80.3%	1308.8
Rhône–Porte du Scex	16.4%	8.1%	3.3%	2.0%	8.0%	62.2%	2128.3
Ticino–Bellinzona	15.1%	6.5%	1.5%	2.2%	6.9%	67.8%	888.1
Inn–Martina	5.5%	5.0%	0%	0%	0.1%	89.4%	869.7

Grad der Beeinflussung der Wasserführung:

sehr gross	$MQ_b \leq 0.2 \cdot MQ_{nat}$
gross	$0.2 \cdot MQ_{nat} < MQ_b \leq 0.4 \cdot MQ_{nat}$
mittel	$0.4 \cdot MQ_{nat} < MQ_b \leq 0.6 \cdot MQ_{nat}$
mittel bis klein	$0.6 \cdot MQ_{nat} < MQ_b \leq 0.8 \cdot MQ_{nat}$
klein	$MQ_b > 0.8 \cdot MQ_{nat}$

MQ_{nat} mittlerer natürlicher Jahresabfluss

MQ_b mittlerer Jahresabfluss in beeinflusster Fliessstrecke

L Länge der Fliessgewässer, erhoben im Massstab 1:200'000

Beispiel: Im Einzugsgebiet des Rheins-Felsberg ist in 12.4% der Gewässerstrecken eine sehr grosse Beeinflussung der Wasserführung festzustellen

nen sind die Möglichkeiten zu regional differenzierten Aussagen zu den Auswirkungen des Klimawandels deshalb eingeschränkt.

1.3 Abflussregimes in Raum und Zeit

1.3.1 Einfache und komplexe Abflussregimes

In der Hydrologie unterscheidet man in Anlehnung an Němec (1993) im Wesentlichen drei räumliche Skalen:

1. Mikroskala: $< 10 \text{ km}^2$ (Schweiz: dito)
2. Mesoskala: $10\text{--}100'000 \text{ km}^2$ (Schweiz: $10\text{--}1000 \text{ km}^2$)
3. Makroskala: $> 100'000 \text{ km}^2$ (Schweiz: $> 1000 \text{ km}^2$)

Diese Skalen wurden für die Schweiz angepasst und vereinfacht. Wir verwenden im Folgenden die Begriffe "mesoskalige Einzugsgebiete" für Gebiete unter 1000 km^2 und "makroskalige Einzugsgebiete" für solche über 1000 km^2 .

Bei mesoskaligen Einzugsgebieten besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Ausprägung des Abflussregimes und den Wechselwirkungen zwischen den im Einzugsgebiet ab-

laufenden Prozessen (vgl. Kap. 1.2). Bei makroskaligen Einzugsgebieten ist dieser direkte Zusammenhang nicht mehr gegeben. Die Systemantwort, also das Abflussregime, besteht aus dem Zusammenspiel der Systemantworten mesoskaliger Einzugsgebiete mit meist unterschiedlichen Prozesskombinationen (vgl. Gustard, 1992). Beckinsale (1969) bringt es auf den Punkt: "Whereas the river regimes of small and moderately sized basins may closely reflect regional runoff controls, especially climate, the main watercourses of many large and complex basins often acquire regimes unrepresentative of the territory they are crossing." Aus diesem Grund und unter Einbezug des hauptsächlichlichen Prozessgeschehens unterschied Pardé (1933) bereits vor über achtzig Jahren drei Grundtypen:

1. Einfache Regimes ("régimes simples") in kleinen bis mittelgrossen Einzugsgebieten mit einem einzigen dominanten Prozess. Die entsprechende Regimekurve ist eingipflig.
2. Komplexe Regimes erster Ordnung ("régimes complexes du 1^{er} degré") in kleinen bis mittelgrossen Einzugsgebieten als Resultat der Überlagerung verschiedener Prozesse. Das Abflussregime ist in diesem Fall mehrgipflig.
3. Komplexe Regimes zweiter Ordnung ("régimes complexes du 2^e degré") in grossen Einzugsgebieten als Kombination von Zuflüssen mit einfachen Regimes und/oder mit komplexen Regimes erster Ordnung.

In der vorliegenden Studie wird diese Struktur aufgenommen, in dem bei den Analysen explizit zwischen mesoskaligen Einzugsgebieten mit Flächen $\leq 1000 \text{ km}^2$ auf der einen Seite und makroskaligen Einzugsgebieten $> 1000 \text{ km}^2$ auf der anderen Seite unterschieden wird. Bei den mesoskaligen Gebieten kann ein direkter Bezug zwischen dem Abflussregime bzw. Veränderungen des Abflussregimes und den massgeblichen Prozessen hergeleitet werden. Bei den makroskaligen Gebieten hingegen lässt sich primär untersuchen, ob und wie sich das Abflussregime verändert hat. Rückschlüsse auf ein verändertes Prozessgeschehen sind aus den genannten Gründen nur bedingt möglich, zumal in vielen grossen Einzugsgebieten auch grössere Seen vorhanden sind, welche das Regime weiter modifizieren.

1.3.2 Langjährige Mittelwerte versus Einzeljahre

Die meisten und insbesondere die "klassischen" Regime-Analysen (z.B. Pardé, 1933; Lvovich, 1938; Keller, 1968; Aschwanden und Weingartner (1985)) basieren auf langjährigen Monatsmittelwerten des Abflusses (s. Formel (1)). Es handelt sich also um eine klimatologische Betrachtungsweise, welche den dynamischen Charakter des hydrologischen Systems nicht direkt miteinbezieht. Für die Entwicklung und Bewirtschaftung der Wasserressourcen spielen jedoch die inter-annuellen Schwankungen des Abflussregimes eine entscheidende Rolle. In Abb. 6 sind diese Schwankungen für vier typische mittelgrosse Einzugsgebiete in unterschiedlicher Höhenlage für die Jahre 1993 bis 2006 mit einem "Teppichmuster" dargestellt. Je homogener dieses Muster in der Vertikalen ist, um so geringer sind die inter-annuellen Schwankungen, je ausgeprägter die Farbgegensätze auf der Horizontalen sind, um so grösser sind die intra-annuellen Schwankungen.

- Im alpinen Einzugsgebiet der Rhone sind sich die einzeljährlichen saisonalen Abflussmuster aufgrund des dominanten Einflusses von Schnee und Eis sehr ähnlich. Deshalb sind die Unterschiede zwischen dem Abflussregime eines einzelnen Jahres und dem langjährigen Mittelwert klein.
- In tieferen Lagen – mit abnehmendem Einfluss von Schnee und Eis und zunehmender Dominanz des Niederschlagsgeschehens – erhöht sich die inter-annuelle Variabilität. Die zeitliche Repräsentativität des mittleren Abflussregimes für die einzelnen Jahre ist weniger oder gar nicht mehr gegeben. Trotzdem besitzt die langjährige mittlere Regimekurve eine hohe Aussagekraft wenn es darum geht, Abflussregimes zu typisieren, d.h., Gebiete mit ähnlichen saisonalen Mustern zusammenzufassen. Bei Gebieten mit zwar stark von Jahr zu Jahr schwankenden, aber ähnlichen Abflussregimes ist auch die langjährige mittlere Abflussregimekurve ähnlich.

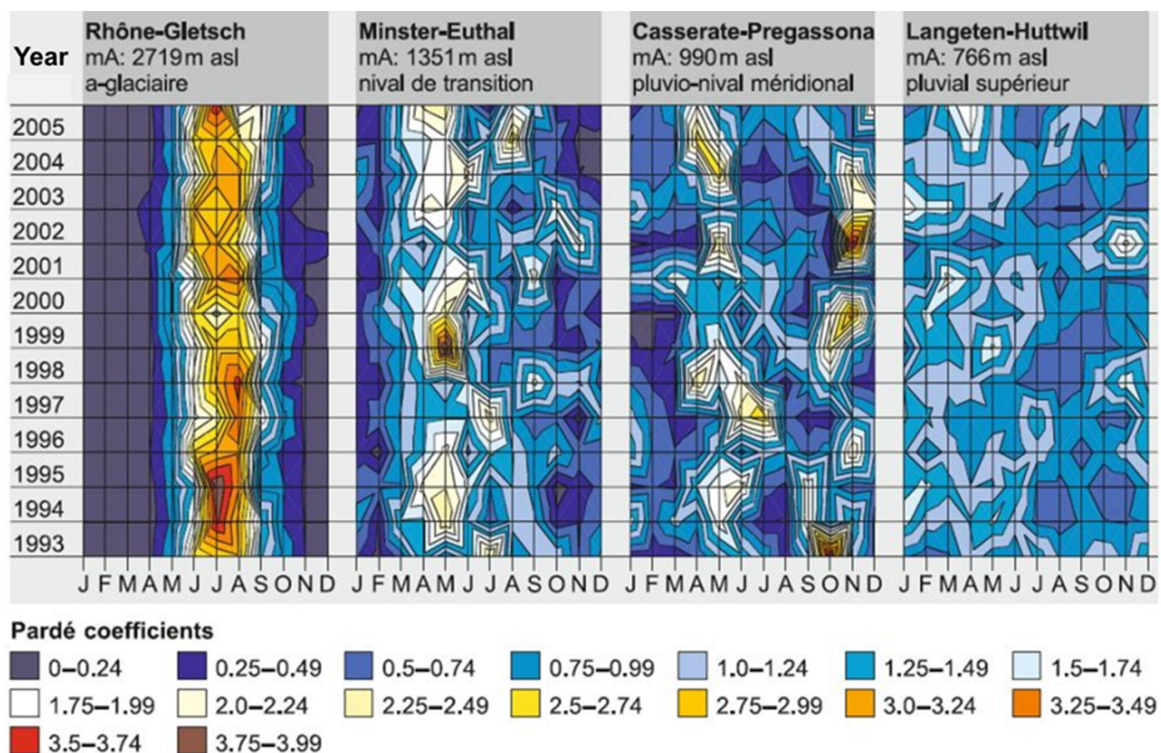


Abbildung 6: Inter-annuelle Schwankungen des Abflussregimes in vier ausgewählten mittl-grossen Einzugsgebieten der Schweiz. mA: Mittlere Gebietshöhe. Berechnung des Pardé-Koeffizienten s. Formel (1) (aus: Pfandler et al., 2006).

Bei der Analyse der Veränderung der Abflussregimes über die Zeit sind sowohl das langjährige mittlere Abflussregime als auch die inter-annuellen Schwankungen zu berücksichtigen. Nimmt beispielsweise die Bedeutung des Schnees ab, zeigt sich dies auch in einer Veränderung der intra- und inter-annuellen Schwankungen.

1.4 Abflussregimes der Schweiz

1.4.1 Überblick

Die Abflussregimes der mittelgrossen Einzugsgebiete der Schweiz wurden von Aschwanden und Weingartner (1985) umfassend untersucht. Entstanden ist eine Unterteilung der Einzugsgebiete in 16 Regimetypen, welche in Weingartner und Aschwanden (1992) auf einer Karte 1:500'000 ausgewiesen sind. Die Typisierung von Aschwanden und Weingartner (1985) basiert auf 10–500 km² grossen Einzugsgebieten. Die verwendeten Abflussdaten stammen vorwiegend aus dem Zeitraum zwischen 1951 und 1980. Dies ist insofern von Bedeutung, als sie einen Zeitraum abdecken, der von der Klimaänderung noch wenig betroffen war (Reid et al., 2016), so dass nun in der vorliegenden Arbeit eine klimabedingte Veränderung des Regimes untersucht werden kann. Verwendet wurden langjährige Monatsmittelwerte des Abflusses, welche nach Formel (1) in Pardé-Koeffizienten umgerechnet wurden.

In einer ersten Gliederung weisen Aschwanden und Weingartner (1985) drei Grundtypen aus: Alpine, mittelländisch-jurassische und südalpine Regimes, welche sich vor allem in der Anzahl der Maxima unterscheiden. Abflussregimes mit einem einzigen Maximum – also "einfache Regimes" (Pardé, 1933, vgl. Kap. 1.3.1) – finden sich auf der Alpennordseite oberhalb einer mittleren Gebietshöhe von 1550 m ü.M. Darunter treten "komplexe Regimes erster Ordnung" auf. Die besonderen Bedingungen auf der Alpensüdseite – alpiner und mediterraner Einfluss – führen zu den südalpinen Regimes.

Mittels spezifischer, also dem jeweiligen Prozessgeschehen angepassten Typisierungsverfahren, wurden diese Grundtypen weiter unterteilt (s. Aschwanden und Weingartner, 1985). Dies wird in den folgenden Kapiteln beschrieben.

1.4.2 Alpine Abflussregimes

Die Abflussregimes alpiner Einzugsgebiete werden vom Schnee und Eis dominiert (vgl. Kap. 1.2.1). Je nach Art und Zeitpunkt dieses Einflusses lassen sich nach Aschwanden und Weingartner (1985) sechs Regimetypen unterscheiden. Entscheidend für die Typisierung des Abflussregimes sind die Monate Mai bis September, also die Phase der Schnee- und Eisschmelze, während in den übrigen Monaten und insbesondere im Winterhalbjahr keine Differenzierung möglich ist.

In den Monaten Mai bis September sind die Abflüsse grösser als das Jahresmittel. Das Ausmass der Eisschmelze bestimmt die Ausprägung der mittleren Abflüsse der Monate Juli bis September. Je grösser der Vergletscherungsgrad eines Einzugsgebietes ist, um so grösser ist der glaziale Einfluss. In den Monaten Mai und Juni werden die Abflüsse alpiner Gebiete durch die Schneeschmelze dominiert. In tieferen Lagen tritt das grösste Monatsmittel im Mai, in höheren Lagen im Juni auf.

Durch die Rangierung der langjährigen Monatsmittel der Monate Mai bis August nach ihrer Grösse können die alpinen Regimetypen unterschieden werden (vgl. Abb. 7). Dies ist zwar eine einfache, aber effiziente Methode, die zu einer eindeutigen Typisierung alpiner Einzugs-

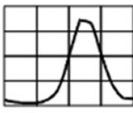
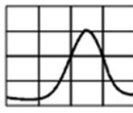
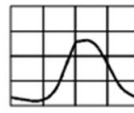
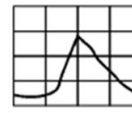
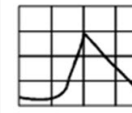
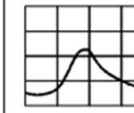
Regimetyp	a-glaciaire	b-glaciaire	a-glacio-nival	b-glacio-nival	nivo-glaciaire	nival
Regimekurve						
Rang	Jul-A-Jun-S	Jul-A-Jun-S	Jul-Jun-A-Mai	Jun-Jul-A-Mai	Jun-Jul-Mai-A	Jun-Mai-Jul-A

Abbildung 7: Alpine Abflussregimetypen nach Aschwanden und Weingartner (1985) (aus: Weingartner, 1999).

gebiete führt. Veränderungen des Regimetyps über die Zeit sind somit ein klarer Beleg für eine Veränderung der abflusssteuernden Prozesse.

Tabelle 2: Räumliche Einordnung der alpinen Abflussregimetypen aufgrund der mittleren Höhe und des Vergletscherungsgrads eines Einzugsgebiets (nach Aschwanden und Weingartner, 1985), gültig für den Zeitraum 1951–1980.

Regimetyp	mittlere Gebietshöhe [m ü.M.]	Vergletscherungsgrad [%]
Alpennordseite		
a-glazial	> 2400	> 36
b-glazial	> 2100	22–40
a-glazio-nival	> 2000	12–22
b-glazio-nival	> 2300	1–12
b-glazio-nival	1900–2300	6–12
nivo-glazial	1900–2300	1–6
nivo-glazial	1550–1900	3–12
nival	> 1900	0–1
nival	1550–1900	0–3
Engadin		
a-glazial	> 2400	> 30
b-glazial	> 2100	20–30
a-glazio-nival	> 2000	12–20
b-glazio-nival	> 2300	6–12
nivo-glazial	1900–2300	1–6
nivo-glazial	1550–1900	3–12
nival	> 1900	0–1 oder
nival	1550–1900	0–3

Bei den alpinen Einzugsgebieten sind die inter-annuellen Schwankungen des Abflussregimes eher klein (vgl. Abb. 6), so dass die langjährige mittlere Regimekurve die Saisonalität des Abflusses in den einzelnen Jahren sehr gut widerspiegelt.

Die alpinen Abflussregimetypen lassen sich auch räumlich verorten (regionalisieren). Sie treten generell ab einer mittleren Gebietshöhe von 1550 m ü.M. auf. Aschwanden und Weingartner (1985) konnten für die einzelnen Regimetypen Bereiche der mittleren Gebietshöhe und des Vergletscherungsgrades identifizieren (Tab. 2). Die mittlere Gebietshöhe ist ein Proxy für den Einfluss der Schneeschmelze, der Vergletscherungsgrad für den Einfluss der Gletscherschmelze. So ist in Einzugsgebieten mit einem Vergletscherungsgrad $> 36\%$ und einer mittleren Gebietshöhe > 2400 m ü.M. ein a-glaziales Regime zu erwarten, d.h. das grösste Monatsmittel tritt im Juli auf, gefolgt von August, Juni und September (vgl. Abb. 7). Im Engadin unterscheiden sich die räumlichen Werte vor allem bei den glazial geprägten Einzugsgebieten von jenen im übrigen Alpenraum. Dies hängt vor allem mit dem allgemein geringeren Vergletscherungsgrad der Ostalpen zusammen.

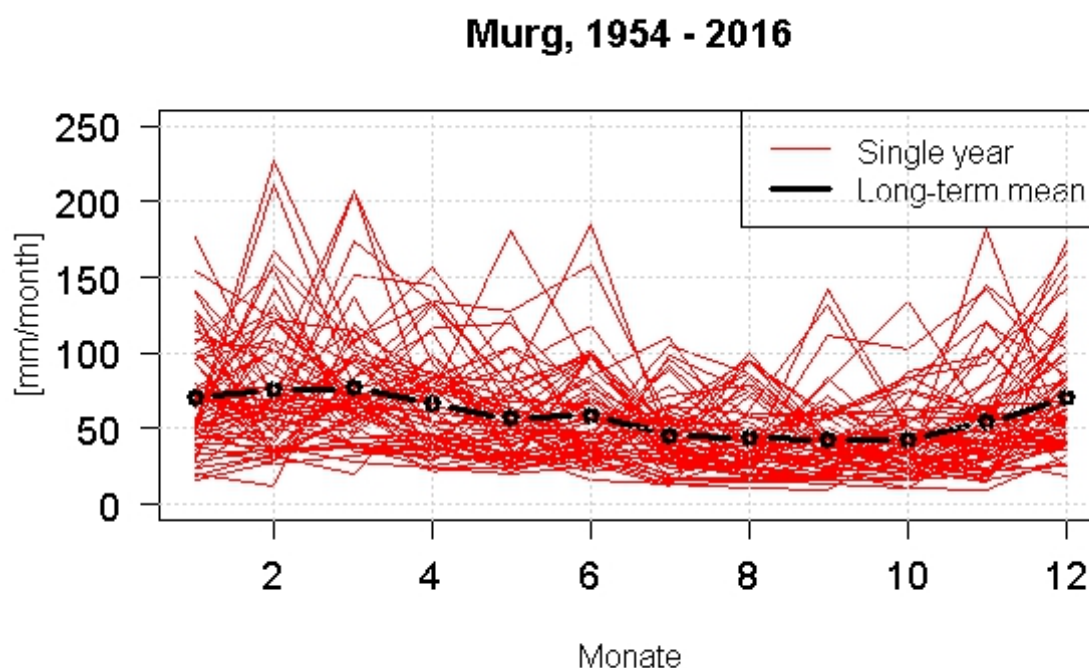


Abbildung 8: Vergleich des langjährigen mittleren Abflussregimes mit den Abflussregimes der einzelnen Jahre am Beispiel der Murg in Wängi. Daten: BAFU

1.4.3 Mittelländisch-jurassische Abflussregimes

Komplexe Abflussregimes erster Ordnung mit meist mehr als einem Maximum treten in nord-alpinen Gebieten mit mittleren Einzugsgebietshöhen unter 1550 m ü.M. auf. Massgebend für deren Ausprägung sind vor allem die Niederschläge sowie die Verdunstung in Kombination mit der dämpfenden Wirkung von Boden- und Grundwasserspeichern (vgl. Abb. 4, Mentue).

”Pluviale”(regengesteuerte) Abflussregimes dominieren. In höheren Lagen ist jedoch auch ein gewisser Einfluss von Schnee erkennbar. Bei pluvialen Abflussregimes sind nicht nur die Unterschiede zwischen der langfristigen mittleren Abflussregimekurve und jener einzelner Jahre sehr gross (vgl. Abb. 6, Langeten), sondern das Regime schwankt von Jahr zu Jahr erheblich, wie dies in Abb. 8 klar zum Ausdruck gelangt. Die Aussagekraft der mittleren Abflussregimekurve für eine Regimetypisierung scheint damit eher beschränkt zu sein. Analysen zeigten aber, dass Abflüsse aus Flussgebieten mit ähnlichem Verhalten in einzelnen Jahren zu ähnlichen mittleren Abflussregimen führen (Aschwanden und Weingartner, 1985). Somit besitzt die mittlere Abflussregimekurve eine geringe zeitliche, aber eine hohe räumliche Aussagekraft und eignet sich deshalb zur Typisierung.

Die hierarchische Anwendung folgender drei Kriterien:

1. Zeitpunkt des Auftretens des kleinsten Monatsmittels,
2. Doppelmonat, in dem die mittleren Monatsmittel zusammen am grössten sind sowie
3. die Amplitude der Regimekurve,

führt zu insgesamt sechs Abflussregimetypen (Tab. 3). Die Regionalisierung dieser Typen erfolgte aus der kombinierten Anwendung einer Fourier- und Trendflächenanalyse (vgl. Aschwanden und Weingartner, 1985). Darauf soll hier nicht weiter eingegangen werden. Tab. 3 zeigt in welchem Höhenbereich die Regimetypen vornehmlich auftreten.

Tabelle 3: Mittelländisch-jurassische Abflussregimetypen nach Aschwanden und Weingartner (1985). Die Amplitude berechnet sich aus der Differenz zwischen dem maximalen und minimalen Pardé-Koeffizienten der langjährigen mittleren Regimekurve. Mit der Angabe der mittleren Gebietshöhe (mH) wird gezeigt, in welchen Höhenbereichen die einzelnen Typen in etwa auftreten.

Typ	Lage des Minimums	Max. Doppelmonat	Amplitude	mH [m ü.M.]
nival de transition	Dez–Feb	Mai/Juni	>1	1200–1550
nivo-pluvial préalpin	Dez–Feb	April/Juni	$\pm >1$	900–1350
pluvial supérieur	Jul–Okt	März/April	<1	700–900
pluvial inférieur	Jul–Okt	Februar/März	<1	< 700
nivo-pluv. jurass.	Jul–Okt	März/April	>1	800–1100
pluvial jurassien	Jul–Okt	Februar/März	>1	< 900

1.4.4 Südalpine Abflussregimes

Auf der Alpensüdseite finden wir das ganze Spektrum von alpinen bis pluvialen Regimes:

Alpine Regimes treten ab einer mittleren Gebietshöhe von ca. 1800 m ü.M. auf. Der starke pluviale Einfluss unterhalb dieser Schwellenhöhe führt zu vier weiteren Regimetypen, die sich durch

- die Amplitude der Regimekurve und

- einen sog. "Nivalitätskoeffizienten"

unterscheiden. Der Nivalitätskoeffizient beschreibt das Verhältnis zwischen der Summe der mittleren Abflüsse im Mai und Juni und der Summe der mittleren Abflüsse im April und Mai. Je grösser dieser Koeffizient ist, um so grösser ist der Einfluss des Schnees. Darauf basierend ergeben sich nach Aschwanden und Weingartner (1985) schliesslich vier südalpine Regimetypen:

1. nival méridional: Mittlere Höhe (mH) 1800–2300 m ü.M., Nivalitätskoeffizient (NK) > 1.5
2. nivo-pluvial méridional: mH: 1200–1800 m ü.M., NK: 1.03–1.5
3. pluvio-nival méridional: mH: 700–1200 m ü.M., NK < 1.03
4. pluvial méridional: mH: < 700 m ü.M.

Auf der Alpensüdseite existieren allerdings nur sehr wenige Einzugsgebiete mit natürlichen bzw. naturnahen Abflussverhältnissen. Dadurch bleiben die Analysemöglichkeiten betreffend der Veränderung der Abflussregimes beschränkt.

1.4.5 Komplexe Abflussregimes zweiter Ordnung

Komplexe Regimes zweiter Ordnung treten in grossen Einzugsgebieten als Kombination von einfachen Regimes und komplexen Regimes erster Ordnung auf. In der Schweiz sind viele dieser komplexen Regimes zweiter Ordnung alpin geprägt, da die Abflüsse aus den Alpen bei den grossen Flüssen einen wesentlichen Teil ausmachen. Eine eigentliche Typisierung wurde aber bisher nicht vorgenommen.

2 Problemstellung und Zielsetzung, Aufbau der Studie

2.1 Fragestellung und Hypothesen

Abflussregimes sind sensitive Indikatoren für Veränderungen in einem Einzugsgebiet. Verändern sich die dominanten abflusssteuernden Faktoren, zeigt sich das im Abflussregime. Die stärksten Veränderungen gehen von anthropogenen Eingriffen wie Ableitungen und Speicherungen aus (vgl. Margot et al., 1992; Baumgartner et al., 2007). Bei Einzugsgebieten mit naturnahen Abflussverhältnissen sind vor allem klimatische Faktoren für (allfällige) Veränderungen verantwortlich (vgl. BAFU, 2012). Zwar könnten auch Landnutzungsänderungen eine Rolle spielen; ihr Einfluss ist in der Schweiz aber insofern von untergeordneter Bedeutung, weil sie zu kleine Flächen betreffen (vgl. BfS, 2018), als dass diese einen direkten Einfluss auf das Abflussgeschehen ausüben.

Wir können also davon ausgehen, dass Veränderungen der Abflussregimes naturnaher Einzugsgebiete vor allem auf die sich ändernden Klimabedingungen zurückzuführen sind, insbesondere von Temperatur und Niederschlag (BAFU, 2012; Weingartner et al., 2013b). Das Klima in der Schweiz hat sich bereits geändert, wie eine Fülle von Studien aufzeigt und belegt. Einen zusammenfassenden Überblick vermittelt der Bericht "Brennpunkt Klima Schweiz" (Akademien der Wissenschaften Schweiz, 2016). Ausgehend von diesem Bericht und ergänzt mit weiteren Literaturhinweisen und Zitaten sollen hier kurz und selektiv die wichtigsten regimerelevanten Fakten zusammengetragen werden:

- Das Jahresmittel der Lufttemperatur hat sich, gemittelt über die Schweiz, seit 1864 um 1.8 Grad Celsius erhöht.
- Beim mittleren Jahresniederschlag zeigen sich "gesamtschweizerisch betrachtet [...] zum heutigen Zeitpunkt keine eindeutigen Trends [...]. Die Variationen des Niederschlags sind aber stark von regionalen Einflüssen und vom Jahresgang geprägt. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass sich in der Schweiz ein nordalpines und ein südalpines Niederschlagsregime gegenüberstehen, beide mit ihren spezifischen Eigenheiten. Dies zeigt sich in der langfristigen Entwicklung des Jahresniederschlags seit Messbeginn 1864, bei der für das Schweizer Mittelland eine Niederschlagszunahme von 7.8 Prozent pro 100 Jahre beobachtet wird [...]. Für die Südschweiz ist keine solche Tendenz vorhanden" (Akademien der Wissenschaften Schweiz, 2016). Die MeteoSchweiz (2014) differenzierte die beobachteten Veränderungen des Niederschlags räumlich und saisonal:
 - Jura und Mittelland: Erhöhung des Niederschlags im Winterhalbjahr um 20 % (im 20. Jahrhundert), keine Veränderung im Sommerhalbjahr.
 - Alpen: Keine eindeutigen Signale vorhanden.
 - Alpensüdseite: Keine eindeutigen Signale vorhanden.
- Klar und eindeutig sind die Veränderungen beim Schnee: "Im Schweizer Mittelland wurde in den letzten Jahrzehnten parallel zur Erhöhung der Lufttemperatur ein deutlicher Rückgang der Schneedeckendauer beobachtet" (Akademien der Wissenschaften

Schweiz, 2016). Marty (2008) belegte zudem, dass die Anzahl der Tage mit Schnee Ende der 1980er Jahre abrupt abnahm, und zwar um 20–60 %. Neuere Analysen von Klein et al. (2016) bestätigen und differenzieren dieses Bild: "Overall, our results demonstrate a marked decline in all snowpack parameters, irrespective of elevation and region, and whether for drier or wetter locations, with a pronounced shift of the snowmelt in spring, in connection with reinforced warming during this season."

- Nach BAFU (2012) wurde das Gletschervolumen seit 1850 wegen der Temperaturerhöhung halbiert, nämlich von rund 100 km³ auf rund 50 km³, wobei sich die Abnahme seit den 1980er Jahren beschleunigte (Akademien der Wissenschaften Schweiz, 2016).
- Tendenziell hat die Verdunstung in den letzten Jahrzehnten zugenommen (vgl. Hubacher und Schädler, 2010). Allerdings sind die absoluten Zunahmen vergleichsweise klein, was ihr Einfluss auf Wasserhaushalt und Abflussregime relativiert.

Wie in Kap. 1.2.1 bereits diskutiert, spielen aus der Sicht des Abflussregimes die temperaturbedingten Veränderungen der Kryosphäre und die Erhöhung des Anteils des flüssigen Niederschlags eine entscheidende Rolle. Man kann von einer Verflüssigung des Wasserhaushalts sprechen, bei der die Bedeutung von Schnee und Eis als steuerndes Element ab- und jene des Niederschlags zunimmt (vgl. BAFU, 2012; Akademien der Wissenschaften Schweiz, 2016; Weingartner und Messerli, 2017).

Für diese Studie stellen wir die Hypothese auf, dass der Klimawandel bereits zu einer Verflüssigung des Wasserhaushaltes geführt hat, der sich auch bei den Abflussregimes zeigt, und dass der Alpenraum mit den glazialen und nivalen Abflussregimes davon besonders stark betroffen ist. Aufgrund dieser Hypothese erwarten wir in alpinen Einzugsgebieten:

- **Eine Veränderung des Abflussregimes** durch den abnehmenden nivalen und den zunehmenden pluvialen Einfluss.
- **Eine Abflusszunahme im Winter:** Der Anstieg der mittleren Schneefallgrenze um ca. 300 m in den letzten Jahrzehnten (Akademien der Wissenschaften Schweiz, 2016) hat dazu geführt, dass ein immer grösserer Anteil des Niederschlags in Form von Regen fällt, dadurch nicht zwischengespeichert wird und direkt zum Abfluss gelangt.
- **Eine Abflusszunahme im Frühling:** Die Temperaturerhöhung bewirkt eine frühere Schneeschmelze und dadurch ein früheres Einsetzen (Verfrühung) des schmelzbedingten Abflusses.
- **Eine Abflussabnahme im Sommer in nicht oder wenig vergletscherten Gebieten:** Der Anteil der glazial geprägten Abflüsse im Juli und August nimmt mit dem Schrumpfen der Gletscher ab. Gleichzeitig ist die Schneeschmelze durch die Verkürzung der Schneesaison früher abgeschlossen, was ebenfalls eine Abnahme der sommerlichen Abflüsse bewirkt.
- **Eine Abflusszunahme im Sommer in (noch) stark vergletscherten Gebieten:** Die Abflusszunahme ist bedingt durch das sehr starke Abschmelzen der Gletscher.
- **Eine Abflusszunahme im Herbst:** In stark vergletscherten Einzugsgebieten nehmen die Abflüsse im September als Folge der starken Gletscherschmelze zu. Im Oktober

und vor allem November ist zu erwarten, dass der Anteil des flüssigen Niederschlags zunimmt.

- **Geringfügige bis keine Veränderungen beim Jahresabfluss:** Die langjährigen Jahresniederschlagsmengen haben sich nicht oder nur wenig verändert, d.h., die insgesamt verfügbare Wassermenge hat weder zu- noch abgenommen.

Aufgrund dieser Überlegungen kann man also von einer saisonalen Umverteilung des Abflusses bei unveränderten mittleren jährlichen Abflussvolumina ausgehen.

Im Mittelland und Jura, wo der Schnee eine untergeordnete Bedeutung hat, dürften die Signale des Klimawandels weniger klar sein. Wir erwarten

- **eine Zunahme der Abflüsse im Winterhalbjahr** (Oktober–März) wegen der Zunahme des Winterniederschlags und
- **eine tendenzielle Abnahme des Abflusses im Sommer** wegen der (leicht) erhöhten Verdunstung.

Für die südalpinen Gebiete ist es – abgesehen von den hochalpinen Regionen – schwierig, Hypothesen oder Erwartungen zu formulieren.

In verschiedenen Studien (u.a. Schädler, 1990; Birsan et al., 2005; Hänggi und Weingartner, 2011; SGHL und CHy, 2011; BAFU, 2012) wurde die Hypothese der Verflüssigung des Wasserhaushaltes zumindest in Teilaspekten verifiziert. So wurde in der Studie von SGHL und CHy (2011) eine Übersicht über bereits beobachtete oder zu erwartende Regimeveränderungen publiziert (vgl. Abb. 9).

Die Fragestellung der vorliegenden Untersuchung ist somit weder neu, noch öffnet sie ein neues Forschungsfeld. Ihr Ziel ist es vielmehr, die bisherigen Erkenntnisse zur Regimeveränderung räumlich breit abgestützt zu konsolidieren und regional zu verorten.

2.2 Aufbau der Studie

Im Mittelpunkt dieser Studie stehen die Veränderungen der Abflussregimes. Die zentrale Frage lautet, welche regimerelevanten Parameter sich in den letzten Dekaden in welchem Ausmass verändert haben. Zur Beantwortung dieser Frage werden möglichst viele Einzugsgebiete mit naturnahen Abflussverhältnissen und langen Messreihen beigezogen (vgl. Kap. 3.1). Auf der Grundlage dieser Gebiete sollen dann regionale Tendenzen und Trends der Regimeveränderungen abgeleitet werden, und zwar bezogen auf die Regionen Mittelland/Jura, Alpen und Alpensüdseite (vgl. "Grundtypen" in Kap. 1.4).

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, fassen wir hier den Begriff "Abflussregime" relativ weit. Die Wahl der Parameter zur Kennzeichnung des Regimes wird von folgenden Überlegungen geleitet: Zuerst soll das Abflussregime als Ganzes betrachtet werden. Die Abflussregimetypen nach Aschwanden und Weingartner (1985) eignen sich dazu ausgezeichnet. Sie integrieren die in einem Einzugsgebiet ablaufenden Prozesse und reagieren sensitiv auf Veränderungen. Zur Erweiterung der Erkenntnisse werden in einem anschliessenden Schritt der Jahresabfluss und die mittleren saisonalen Abflüsse betrachtet. Regimeveränderungen verursacht durch

Abflussregimetypen	Rhone – Gletsch	Kraftwerk Göschenalp	Simme – Oberried	Kraftwerk Mattmark	Kraftwerk Gougra	Hinterrhein – Hinterrhein	Landquart – Klosters	Kraftwerk Oberhasli	Dischmabach – Davos	Mönchbach – Trittwald	Stützbach – Davos	Plessur – Chur	Löntsch – Staumauer	Taschinasbach – Grüsch	Minster – Euthal	Simme – Oberwil	Sitter – Appenzell	Sense – Thörishaus	Glatt – Herisau	Broye – Payerne	Töss – Neftenbach	Ergolz – Liestal	Birse – Moutier	Riale di Calneggia – Cavigno	Cassarate – Pregassona
a-glaciaire	H K K																								
b-glaciaire	S1	H K K																							
a-glacio-nival			S1		K H																				
b-glacio-nival		S1		S1	K H K	H K	K H																		
nivo-glaciaire					S1 S1		S1 K K K																		
nival alpin		S2	S2				S2 S1 S1 S1	H K K						H											
nival de transition				S2								S1		K S1	H	H K S1	H K S1								
nivo-pluvial préalpin															K S1			H K S1							
pluvial supérieur																			H						
pluvial inférieur																				H	H K				
nivo-pluvial jurassien																						K	H		
pluvial jurassien																						H			
nival méridional																								H K	
nivo-pluvial méridional																								S1	
pluvio-nival méridional																									H K
pluvial méridional																									S1

Abbildung 9: Übersicht über die zeitlichen Veränderungen der Abflussregimes aller untersuchten Einzugsgebiete. Blau hervorgehoben sind Einzugsgebiete mit einer Regimeveränderung (aus: SGHL und CHy, 2011).

Änderungen bei den dominanten Prozessen zeigen sich unter anderem auch bei der Variabilität der Tagesabflüsse. So erhöht beispielsweise ein zunehmender Einfluss des flüssigen Niederschlags die Variabilität der Tagesabflüsse. Darauf soll in einem letzten Untersuchungsschritt eingegangen werden.

Trendanalysen sind in der vorliegenden Studie von zentraler Bedeutung. Dabei beeinflusst die Wahl der Untersuchungsperiode das Ergebnis massgeblich. Vergleichende Analysen zwischen Einzugsgebieten und Regionen sollten sich auf denselben Zeitraum beschränken. Aufgrund der verfügbaren Daten wurden drei Zeitperioden gewählt (s. Kap 3.1).

Abb. 10 vermittelt einen Überblick zum Aufbau der Untersuchungen. Die Ergebnisse der Analysen werden in den Kapiteln 4 bis 7 im Sinne von *Fakten und Figures* dargestellt. In Kapitel 8 und 9 folgen dann die Interpretation der Resultate und die Schlussfolgerungen.

Die Motivation zur Unterscheidung in mesoskalige und makroskalige Einzugsgebiete wurde in Kap. 1.3.1 diskutiert.

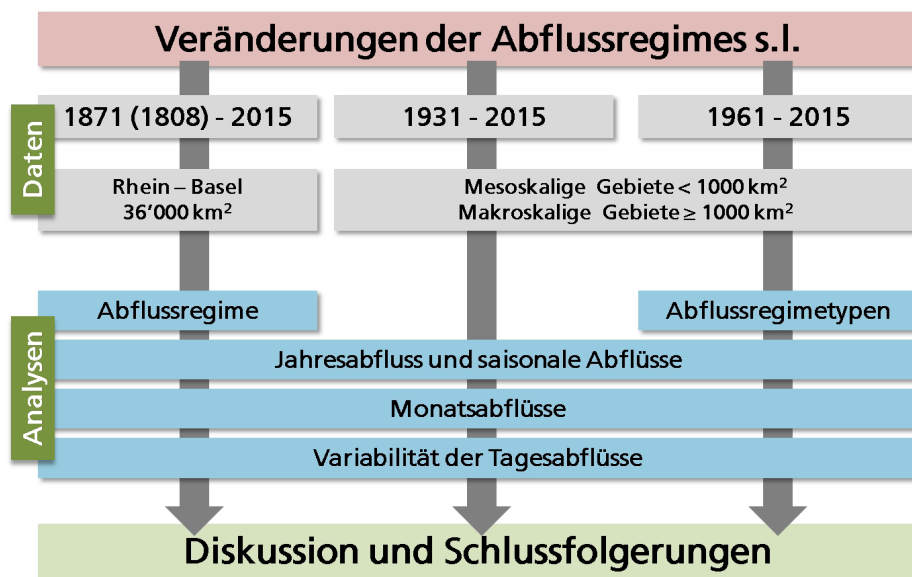


Abbildung 10: Aufbau der Studie.

3 Daten und Methoden

3.1 Kriterien der Gebietsauswahl

Dank der vielen eidgenössischen und kantonalen Abflussmessstationen verfügt die Schweiz heute über ein bemerkenswert dichtes Messnetz (vgl. HADES, 2018). Für die vorliegende Studie können allerdings nur Einzugsgebiete verwendet werden, deren Abfluss aktuell (d.h. im Jahr 2015) gemessen wird, welche über lange Messreihen verfügen und welche naturnahe Abflussverhältnisse aufweisen. *Naturnah* bedeutet im vorliegenden Fall, dass die klimatischen Bedingungen die Ausprägung des Abflussregimes dominieren. Diese Bedingungen sind eine Grundvoraussetzung zur Detektierung des Einflusses des Klimawandels. Die aufgrund dieser Kriterien ausgewählten Gebiete wurden anschliessend nach ihrer Messreihenlänge gruppiert. Darauf basierend wurden drei zeitliche Betrachtungsebenen definiert, welche möglichst lang und gleichzeitig durch möglichst viele Messstellen abgedeckt sind:

1. Die Periode 1808–2015 bzw. 1871–2015 ist die längste Periode und wird nur durch die Zeitreihe des Rheins in Basel abgedeckt. Für 1808–1871 liegen manuelle Beobachtungen, ab 1871 kontinuierliche Aufzeichnungen vor. Mit dem Rhein (Einzugsgebietsfläche rund 36'000 km²) kann die generelle Entwicklung auf der Alpennordseite optimal erfasst werden.
2. Für die Periode 1931–2015 stehen insgesamt 29 mesoskalige und 14 makroskalige Einzugsgebiete zur Verfügung. Diese Periode ist für die vorliegenden Untersuchungen aufgrund ihrer Länge von 85 Jahren sehr wichtig. Die räumliche Abdeckung der für diese Periode verfügbaren mesoskaligen Einzugsgebiete ist vor allem im Wallis und auf der Alpensüdseite, aber auch im östlichen Mittelland schlecht. Andererseits genügt sie, um regionale Aussagen für die Regimeregionen "Alpen" und "Mittelland/Jura" zu machen. Mit nur zwei verfügbaren Stationen ist dies für die Alpensüdseite nicht möglich. Die makroskaligen Gebiete befinden sich fast ausschliesslich im Einzugsgebiet des Rheins.
3. Der Zeitraum 1961–2015 wird mit insgesamt 61 mesoskaligen und 16 makroskaligen Einzugsgebieten abgedeckt. Mit dieser ansehnlichen Anzahl von Gebieten lassen sich die Ergebnisse der Periode 1931–2015 räumlich besser differenzieren.

Abb. 11 stellt die Messstellen der ausgewählten Gebiete dar. Es handelt sich ausschliesslich um Messstellen des BAFU, weil es keine kantonalen Stationen gibt, welche die gewählten Perioden abdecken (Kan, 2002). Da in der vorliegenden Untersuchung regionale Aussagen zum Mittelland/Jura, zum Alpenraum sowie zur Alpensüdseite angestrebt werden, ist in der Karte auch die Regionszugehörigkeit der Messstellen ersichtlich. Im hydrologischen Alpenraum befinden sich alle nordalpinen Gebiete mit einer mittleren Gebietshöhe mit mehr als 1550 m ü.M.

Zur Analyse der Veränderung des Regimetyps wurden ausschliesslich die von Aschwanden und Weingartner (1985) als "repräsentativ" bezeichneten mesoskaligen Stationen verwendet (s. Tab. 4). Letztere bilden eine Teilmenge der in Abb. 11 dargestellten Stationen.

halb durch Autokorrelation in der Zeitreihe verfälscht werden (Zhang und Zwiers, 2004). Um dem vorzubeugen, wird ein sogenanntes "Prewhitening" angewendet, welches die Autokorrelation rechnerisch entfernt. Der Trend wird schliesslich auf der bereinigten Zeitreihe bestimmt und auf Signifikanz getestet. In der vorliegenden Studie wird ein Prewhitening angewendet, wenn die Autokorrelation positiv und statistisch auf dem Niveau 0.05 signifikant ist. Die technischen Details des hier verwendeten Prewhitening finden sich in Wang und Swail (2001).

Bei der Darstellung der Ergebnisse wird von einem signifikanten Trend gesprochen, wenn die Irrtumswahrscheinlichkeit $p < 0.05$ ist. Als "hochsignifikant" werden Trends mit $p \leq 0.01$ bezeichnet. Man beachte, dass die ausgewiesenen Trends in Prozent des langjährigen saisonalen Mittels ausgewiesen werden.

3.2.3 Beurteilung der Variabilität der Tagesabflüsse

Über die Analyse der Variabilität der Tagesabflüsse innerhalb eines bestimmten Zeitraums (Saison, Jahr) sollen mögliche Änderungen der regimesteuernden Faktoren erkannt werden. Dabei nimmt man an, dass sich die Variabilität der Tagesabflüsse beim Übergang von einem nivalen zu einem pluvialen Regime allmählich erhöht. Bei Ersterem dominiert das Speicherelement Schnee, das auf das Abflussverhalten ausgleichend wirkt, bei Letzterem der Regen, der eine grosse räumliche und zeitliche Variabilität aufweist und das Abflussregime entsprechend beeinflusst. Zur Quantifizierung der Variabilität der Tagesabflüsse wird der Interquartilsabstand (IQR) beigezogen:

$$IQR = x_{0.75} - x_{0.25} \quad (2)$$

$x_{0.75}$: Oberes Quartil

$x_{0.25}$: Unteres Quartil

3.2.4 Beurteilung der räumlichen Muster

Die vorliegende Untersuchung baut auf einzelnen Einzugsgebieten auf. Das Ziel ist es aber, von diesen Gebieten regionale Aussagen zu den Regimeveränderungen abzuleiten, und zwar für die drei Regimeregionen Mittelland/Jura, Alpen und Alpensüdseite. Dazu wurde folgendes Vorgehen gewählt:

Für jedes Einzugsgebiet kann für jede Kenngrösse (z.B. mittlerer saisonaler Abfluss im Winter) bestimmt werden, ob sie a) innerhalb der betrachteten Zeitperiode zu- oder abgenommen hat und b) ob ein signifikanter Trend vorliegt. Aus dem Gesamtverhalten der Einzugsgebiete innerhalb einer Region können dann regionale Tendenzen oder Trends abgeleitet werden, und zwar aufgrund folgender Kriterien:

1. Nimmt eine Kenngrösse in $\geq 75\%$ der Gebiete einer Region zu, so wird von einer Zunahme \uparrow in der betreffenden Region gesprochen. Dabei wird kein Unterschied zwischen einer signifikanten und einer nicht-signifikanten Zunahme gemacht.

2. Über die Auszählung der Anzahl der Gebiete mit einer signifikanten Zunahme eines Parameters ($p \leq 0.05$) wird die Stärke der Veränderung abgeleitet:
 - Regionale Tendenz zur Zunahme (Symbol: \uparrow): Bei 25 % der Gebiete mit einer Zunahme ist die Veränderung signifikant.
 - Mittlerer regionaler Trend zur Zunahme ($\uparrow\uparrow$): Bei 25–50 % der Gebiete mit einer Zunahme ist die Veränderung signifikant.
 - Starker regionaler Trend zur Zunahme ($\uparrow\uparrow\uparrow$): Bei mehr als 50 % der Gebiete mit einer Zunahme ist die Veränderung signifikant.
3. Für Abnahmen gelten die analogen Kriterien. Es werden die folgenden Symbole verwendet: \downarrow , $\downarrow\downarrow$, $\downarrow\downarrow\downarrow$

Resultate

4 Veränderungen beim Rhein in Basel seit 1871 bzw. 1811

Das Rhein-Einzugsgebiet mit einer Fläche von rund 36'000 km² deckt den grössten Teil der Alpennordseite ab und vermittelt somit einen optimalen Überblick über die langzeitigen Regimeveränderungen auf der Alpennordseite, zumal seit 1808 bzw. 1871 Beobachtungen des Abflusses vorliegen (vgl. Kap. 3.1). Es hat eine mittlere Gebietshöhe von 1052 m ü.M. und einen Vergletscherungsgrad von 1 %. Der langjährige mittlere Jahresabfluss beträgt 1051 m³/s (Basel, Rheinhalle; s. Hydrologisches Jahrbuch 2010 (BAFU, 2016)). Für die Messperiode ab 1808 werden nur die Abflussregimes betrachtet, für die Messperiode ab 1871 können auch Trendanalysen durchgeführt werden, weil hier die Daten auf systematischen Messungen beruhen.

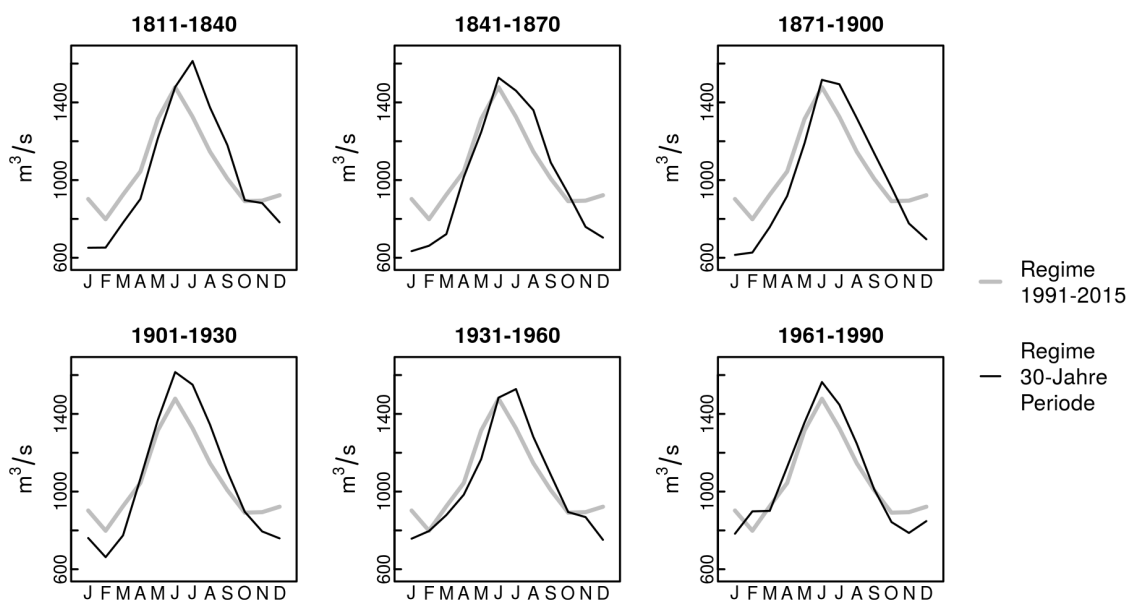


Abbildung 12: Mittleres Abflussregime des Rheins in Basel in 30-Jahres-Perioden ab 1811 verglichen mit dem mittleren Regime der aktuellen Periode 1991–2015.

4.1 Abflussregime

In Abb. 12 wird die Entwicklung der 30-Jahres-Mittel des Abflussregimes des Rheins seit 1811 dargestellt. Die Ausprägung der Regimekurve zeigt deutlich den alpinen Einfluss. Das Regime ist mit der Abfolge der Monatsmittel Juni - Juli - Mai - August jenem nivo-glazialer mesoskaliger Einzugsgebiete sehr ähnlich (vgl. Kap. 1.4.2). Einzig in der Periode 1931–1960 tritt das grösste Monatsmittel nicht im Juni, sondern im Juli auf. Diese auf der Regimekurve

basierenden Feststellungen werden durch Modellierungen von Stahl et al. (2016) bestätigt: Aktuell sind beim Rhein in Basel rund 40 % des Abflusses nivalen, und 2 % glazialen Ursprungs.

In allen Perioden ist das Grundmuster des Regimes ähnlich, wobei eine allmähliche Annäherung an die aktuelle Situation (Periode 1991–2015) zu erkennen ist. Auffallend ist die Erhöhung des winterlichen Abflusses. Da sich die grössten Monatsmittel wenig verändert haben, führt dies zu einer Abnahme der Variationsbreite der mittleren Monatsabflüsse. Deutlich ist auch die Vorverschiebung der Regimekurve erkennbar: die sommerlichen Abflüsse haben ab-, jene im Frühjahr hingegen zugenommen. Insgesamt ist aber beim Rhein in Basel die Stabilität des saisonalen Abflussmusters über die letzten 200 Jahre das herausragende Merkmal.

4.2 Saisonale Abflüsse

Bei den saisonalen Abflüssen sind in den Zeitreihen ab 1871 signifikante monotone Veränderungen zu beobachten, welche die Erkenntnisse aus der Veränderung der Abflussregimes bestätigen und vertiefen:

- Hochsignifikant ist die Zunahme der winterlichen Abflüsse; sie beträgt $2.03 \text{ m}^3/\text{s}$ pro Jahr. Das saisonale Abflussmittel hat sich von rund $650 \text{ m}^3/\text{s}$ in der Periode 1871–1900 auf rund $880 \text{ m}^3/\text{s}$ in der Periode 1991–2015 erhöht. Dadurch hat auch der Beitrag der winterlichen Abflüsse zum Gesamtabfluss signifikant zugenommen: von rund 15 % auf rund 20 %.
- Auch im Frühling ist eine signifikante Erhöhung der mittleren Abflüsse um $1.02 \text{ m}^3/\text{s}$ pro Jahr feststellbar.
- Die Abflussmittel im Sommer haben in den letzten 150 Jahren mit durchschnittlich $1.26 \text{ m}^3/\text{s}$ pro Jahr signifikant abgenommen, und zwar von rund $1440 \text{ m}^3/\text{s}$ in der Periode 1871–1900 auf rund $1320 \text{ m}^3/\text{s}$ in der Periode 1991–2015. Dadurch hat sich ihr Beitrag zum Gesamtabfluss um einige wenige Prozentpunkte vermindert.
- Keine signifikanten Veränderungen sind beim mittleren Abfluss im Herbst und auch beim Jahresabfluss erkennbar.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich im Rheineinzugsgebiet das jährliche Abflussdargebot in den letzten 150 Jahre nicht verändert hat, dass aber bis zu einem gewissen Grad eine saisonale Umverteilung stattfindet. Letzter dürfte nicht nur klimabedingt sein, sondern ist zumindest teilweise auch dem Einfluss der Wasserkraftnutzung geschuldet (vgl. Kap. 8.1). Bemerkenswert ist, dass die angesprochenen zeitlichen Veränderungen mehr oder weniger kontinuierlich ablaufen, also keine sprunghaften Veränderungen aufgetreten sind.

4.3 Variabilität der Tagesabflüsse

Im Zeitraum 1871–2015 hat sich auch die Variabilität der Tagesabflüsse innerhalb einer Saison und innerhalb eines Jahres verändert, wie Abb. 14 aufzeigt. Diese Variabilität wird mit

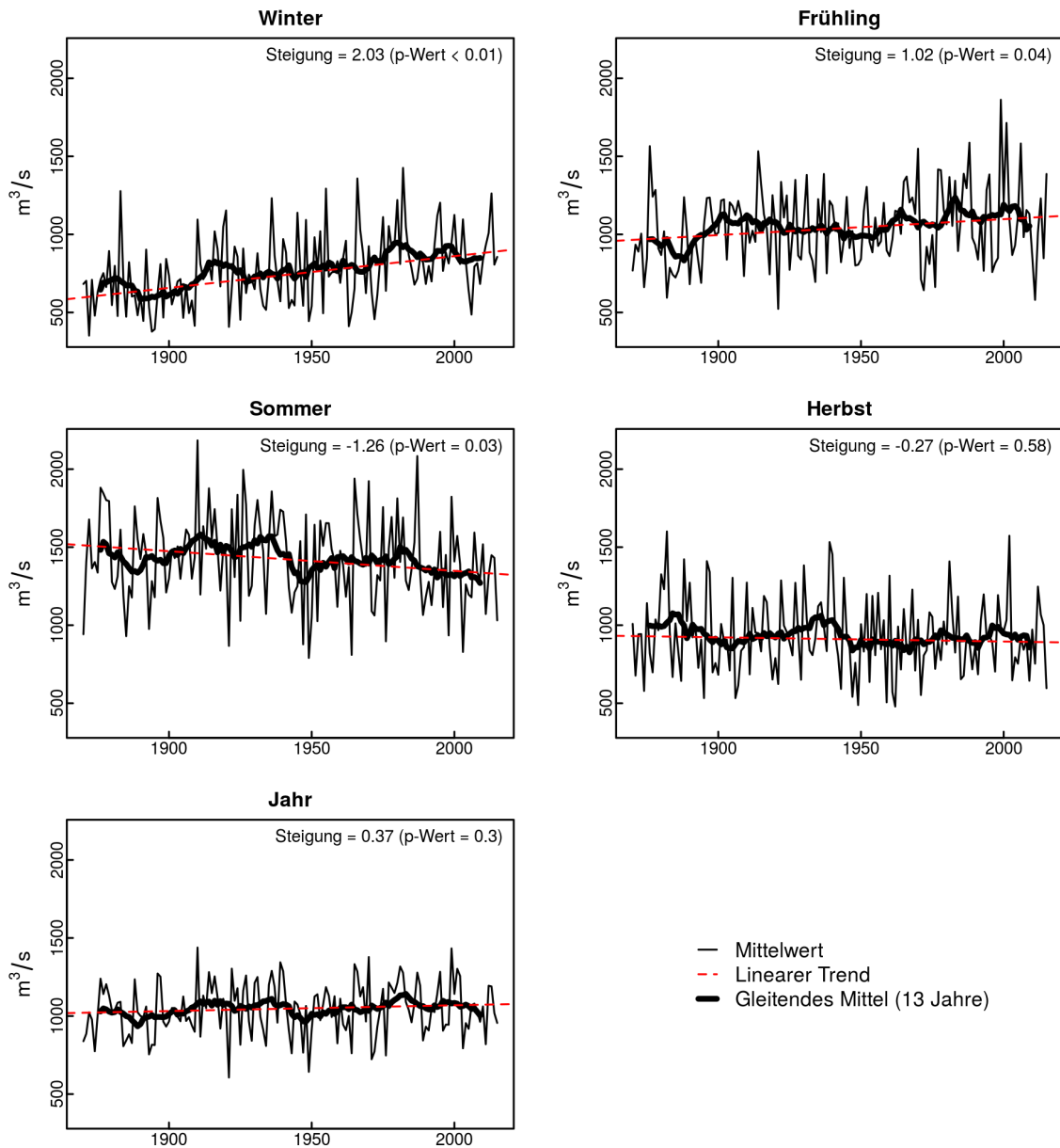


Abbildung 13: Veränderung der mittleren saisonalen Abflüsse sowie des Jahresabflusses beim Rhein, Basel, in der Periode 1871–2015. Daten: BAFU

dem Interquartilsabstand gemessen. Im Winter hat die Variabilität der Tagesabflüsse hochsignifikant zu- und im Sommer signifikant abgenommen. Frühling und Herbst zeigen wenig Veränderungen. Die Zunahme der Variabilität im Winter und die Abnahme im Sommer verläuft parallel zur Zu- bzw. Abnahme der saisonalen Mittelwerte.

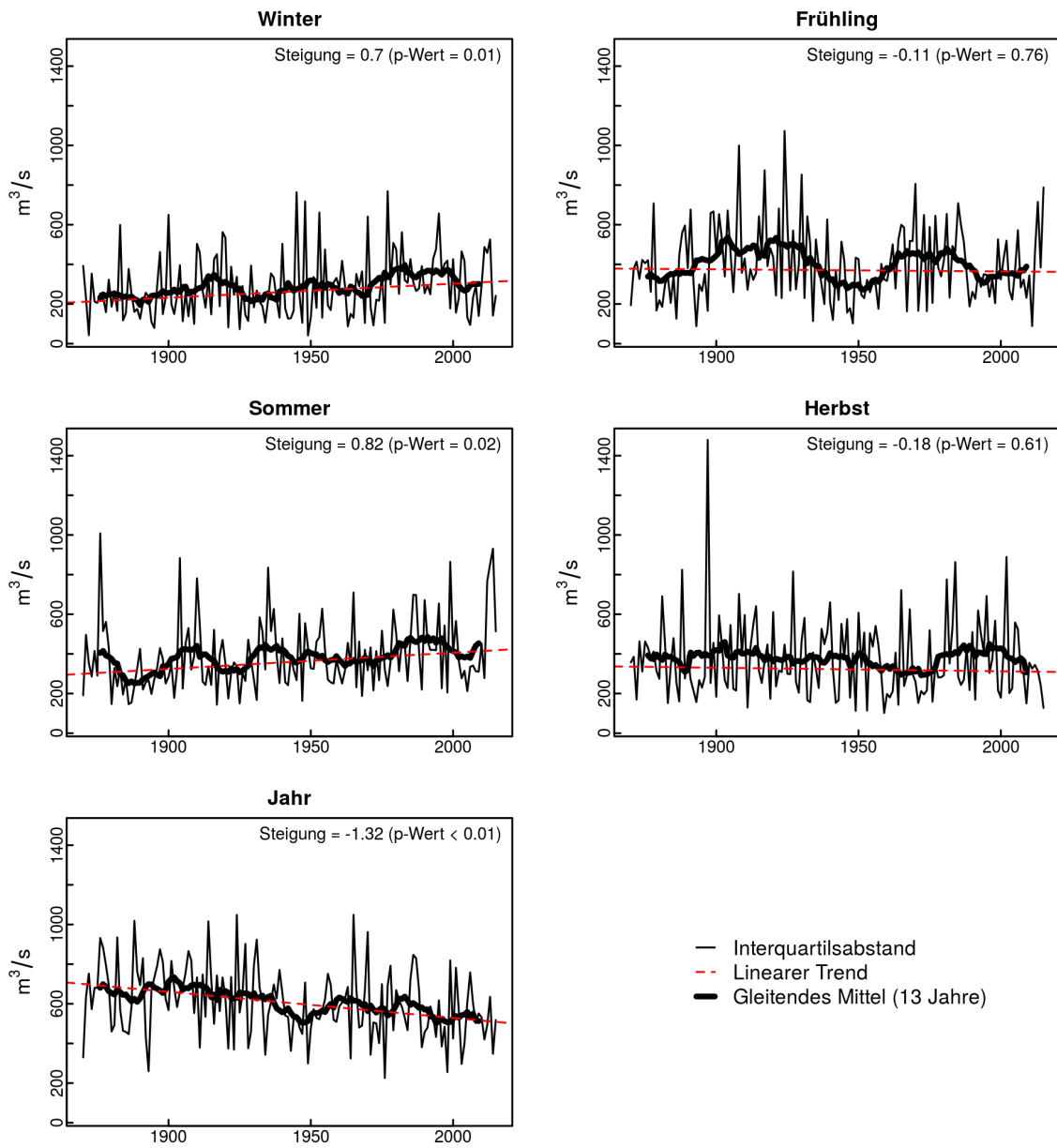


Abbildung 14: Veränderung des Interquartilsabstandes der Tagesabflüsse beim Rhein, Basel, in der Periode 1871–2015. Daten: BAFU

5 Veränderung des Abflussregimetyps

Bei den Untersuchungen in diesem Kapitel stehen die Veränderungen der saisonalen Abflussmuster – beschrieben durch die Abflussregimetypen nach Aschwanden und Weingartner (1985) – im Mittelpunkt. In jedem Einzugsgebiet wird untersucht, ob und wie sich der Regimetyp der Periode 1951–1980 und jener der Periode 1991–2015 unterscheiden. Da in diesem Kapitel die Veränderung der Saisonalität im Mittelpunkt steht, werden hier die dimensionslosen Pardé-Koeffizienten verwendet.

5.1 Alpine Gebiete

Die Ergebnisse sind eindeutig: Die Saisonalität der alpinen Abflussregimes hat sich systematisch verändert. In 18 der 25 untersuchten Gebiete kann im Vergleich mit der Periode 1951–1980 eine Veränderung festgestellt werden (vgl. Tab. 4). Konkret handelt es sich in den meisten Fällen um eine Verschiebung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Regimetypen, also z.B. vom einem b-glazialen zu einem nivo-glazialen Regime. Solche Verschiebungen wurden zwar bereits in der Untersuchung der SGHL und CHy (2011) festgehalten (vgl. Abb. 9), aber es sind nun weit mehr Gebiete betroffen: bei rund 75 % der alpinen Einzugsgebiete wurde hier eine Verschiebung festgestellt.

In den stark vergletscherten Gebieten mit einer Vergletscherung von mehr als 22 % wurde keine Veränderung des saisonalen Musters festgestellt. Die meisten Einzugsgebiete mit glazionivalen Regimes in der Periode 1951–1980 weisen heute ein nivo-glaziales Regime auf. Dies hängt insbesondere von der Abnahme des glazialen Einflusses ab: Nach Tab. 4 ist die vergletscherte Fläche in diesen Gebieten stark zurückgegangen, was zu einer Abnahme der glazial gesteuerten Abflüsse geführt hat. Bei den nivalen Regimes ist eine Vorverschiebung des schmelzbedingten Frühjahresmaximums erkennbar, so dass das Maximum statt im Juni nun bereits im Mai auftritt.

Typische Veränderungen des Regimetyps sind in Abb. 15 dargestellt. Man beachte dabei, dass die Regimes auf der Basis der dimensionslosen Pardé-Koeffizienten dargestellt sind, also ausschliesslich die Veränderung der Saisonalität erfassen und Veränderungen bei der Abflussmenge unberücksichtigt bleiben. In allen Beispielen sieht man deutlich, dass die Abflussanteile im Juli und August abgenommen haben, also in jenen Monaten, in denen die Gletscherschmelze einen substantiellen Beitrag leistet. Ausser beim nivalen Regime hat sich der Pardé-Koeffizient im Juni nur wenig verändert. Beim nivalen Regime hat der Mai auf Kosten des Juni an Bedeutung gewonnen. Dies hängt auch damit zusammen, dass sich die Regimekurve in der zweiten Periode verfrüht oder – bildlich gesprochen – nach links verschoben hat. Am Beispiel der Plessur kann diese Vorverschiebung veranschaulicht werden (Abb. 16).

In der Tab. 4 werden diese datenbasierten Ergebnisse mit Raumbasierten verglichen. Dazu wurden die Schwellenwerte der Tab. 2 verwendet. Bei dieser Analyse wird nur die Abnahme der vergletscherten Fläche berücksichtigt. Letztere hat bei den in der Tabelle aufgeführten Einzugsgebieten zwischen 1980 und 2015 um rund 45 % abgenommen. Die Ergebnisse wei-

Tabelle 4: Vergleich der Abflussregimetyphen mittelgrosser alpiner Einzugsgebiete der Perioden 1951–1980 und 1991–2015. Gliederung der Tabelle nach den Regimetyphen, welche auf der Basis der Periode 1951–1980 bestimmt wurden. V80: Vergletscherungsgrad um 1980, V15: Vergletscherungsgrad um 2015 (Datenquelle: BAFU, 2018). Datenbasiert: Regimetypp wurde ausgehend von Abflussdaten nach den Kriterien von Aschwanden und Weingartner (1985) typisiert. Raumbasiert: Regimetypp wurde aufgrund der für ein Regimetypp charakteristischen Gebietskenngrössen bestimmt (vgl. Tab. 2). →: Regimetypp hat sich zwischen 1951/80 (linke Seite) und 1991/15 (rechte Seite) verändert.

Gebiet	mH	V80 [%]	V15 [%]	datenbasiert	raumbasiert
Glaziale Regimes					
Massa, Blatten	2937	66.6	56.6	a-glazial	a-glazial
Rhone, Gletsch	2710	56.4	41.8	a-glazial	a-glazial
Lonza, Blatten	2524	40.6	24.7	a-glazial	a-glazial → b-glazial
Simme, Oberried	2347	38.2	22.6	b-glazial	b-glazial
Rosegbach, Pontresina	2704	32.8	21.7	a-glaz → b-glaz	a-glaz → b-glaz
Rhone, Brig	2339	27.1	19.2	b-glaz → a-glaz-nival	b-glaz → a-glaz-nival
Alpbach, Erstfeld	2205	25.6	19.7	b-glaz → a-glaz-nival	b-glaz → a-glaz-nival
Glazio-nivale Regimes					
W'Lütschine, Z'lütschinen	2165	20.8	13.1	a-glaz-nival	a-glaz-nival
Berninabach, Pontresina	2615	19.7	14.4	a-glaz-nival → b-glaz-nival	a-glaz-nival
Lütschine, Gsteig	2050	19.5	13.5	a-glaz-nival	a-glaz-nival
Kander, Hondrich	1854	12.2	5.1	b-glaz-nival → nivo-glaz	nivo-glaz
Inn, St. Moritz	2399	8.6	3.8	b-glaz-nival → nivo-glaz	b-glaz-nival → nivo-glaz
Saltina, Brig	2014	7.9	2.5	b-glaz-nival → nivo-glaz	b-glaz-nival → nivo-glaz
Engelberger Aa, Buochs	1609	4.3	2.5	b-glaz-nival → nivo-glaz	nivo-glaz → nival
Dischmabach, Davos	2376	2.6	0.7	b-glaz-nival → nivo-glaz	nivo-glaz → nival
Chamuerabach, La Punt	2548	1.3	0.1	b-glaz-nival → nivo-glaz	nivo-glaz → nival
Albula, Tiefencastel	2128	1.6	0.5	a-glaz-nival → nivo-glaz	nivo-glaz → nival
Landwasser, Davos	2224	1.0	0.3	b-glaz-nival → nivo-glaz	nivo-glaz → nival
Nivo-glaziale Regimes					
Ova da Cluozza, Zernez	2371	1.7	0	nivo-glaz → nival (Juni)	nivo-glaz → nival
Nivale Regimes					
Ova da Fuorn, Zernez	2327	0.03	0	nival (Juni) → nival (Mai)	nival
Plessur, Chur	1868	0	0	nival (Juni) → nival (Mai)	nival
Allenbach, Adelboden	1863	0	0	nival (Juni) → Nt (Mai)	nival
Grosstalbach, Isental	1819	9.1	6.7	nival (Juni) → Nt (Mai)	b-glaz-nival
Landquart, Felsenbach	1797	1.5	0.7	nival (Juni)	nival
Simme, Oberwil	1641	4.2	2.4	nival (Juni) → Nt (Mai)	nivo-glaz → nival

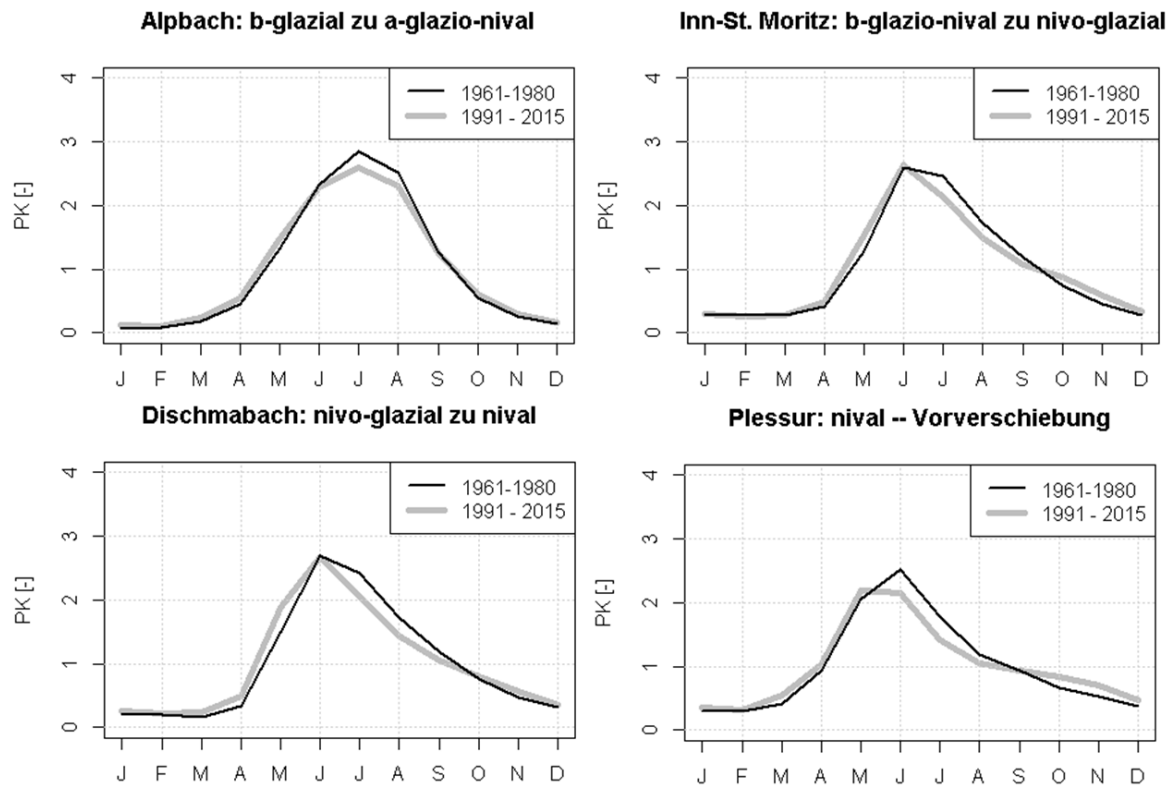


Abbildung 15: Typische Veränderung der alpinen Abflussregimes (vgl. Tab. 4).

sen einerseits auf die Unschärfe dieser Schwellenwerte hin, bestätigen aber andererseits die Verschiebung beim Regimetyp.

5.2 Mittelländische und jurassische Gebiete

Bei den Abflussregimes mittelländischer und jurassischer Einzugsgebiete wurden keine systematischen Veränderungen des Regimetyps festgestellt, wie dies die Übersicht in Abb. 17 mit repräsentativen Beispielen verdeutlicht. Das saisonale Muster bleibt weitgehend erhalten. Was aber grundsätzlich auffällt ist eine Abnahme der Variationsbreite der mittleren monatlichen Abflüsse, also der Differenz zwischen maximalem und minimalem mittleren Monatsabfluss. Wie Abb. 18 verdeutlicht, handelt es sich um eine systematische Veränderung. In keinem Gebiet wurde eine Zunahme der Variationsbreite festgestellt. Es ist eine gewisse räumliche Differenzierung erkennbar. Bei den Regimes mit einer nivalen Komponente ist die Abnahme grösser als beim Regimetyp pluvial inférieur und bei den jurassischen Regimes. Gebiete des Typs pluvial supérieur liegen im Übergangsbereich. Die Werte streuen hier stark.

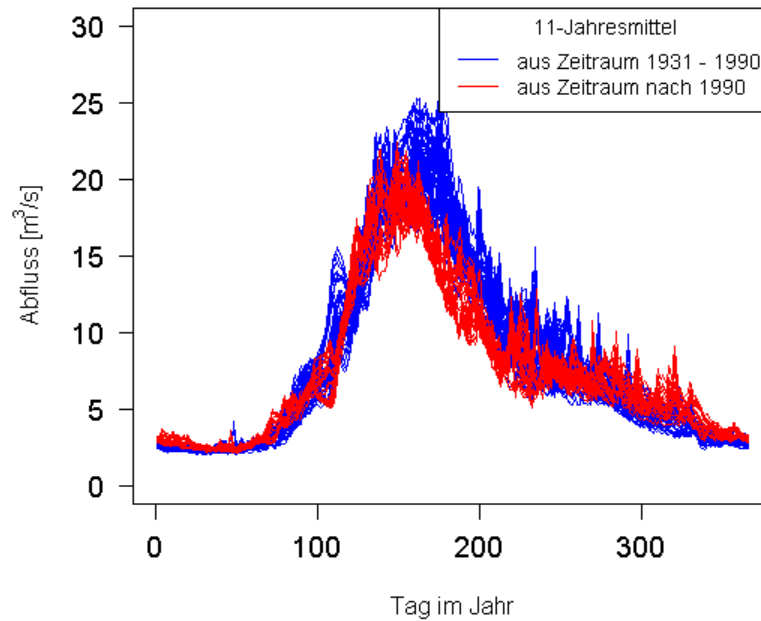


Abbildung 16: Veränderung des nivalen Regimes der Plessur seit 1931. Eine Kurve repräsentiert das über 11 Jahre gemittelte Abflussregime. Die Kurvenschar repräsentiert die gleitenden Mittel ab 1931.

5.3 Südalpine Gebiete

Die Datenlage ist hier derart schlecht, dass keine repräsentativen Aussagen über langfristige Veränderungen gemacht werden können. In den Beispielen in Abb. 19 erkennt man bei den nival geprägten Regimes die Abnahme der Pardé-Koeffizienten (PK) in den Sommermonaten und eine Verfrühung der Regimekurve. Auffallend ist, dass der PK im November zugenommen hat, was die Zweigipfligkeit der südalpinen Regimes verstärkt.

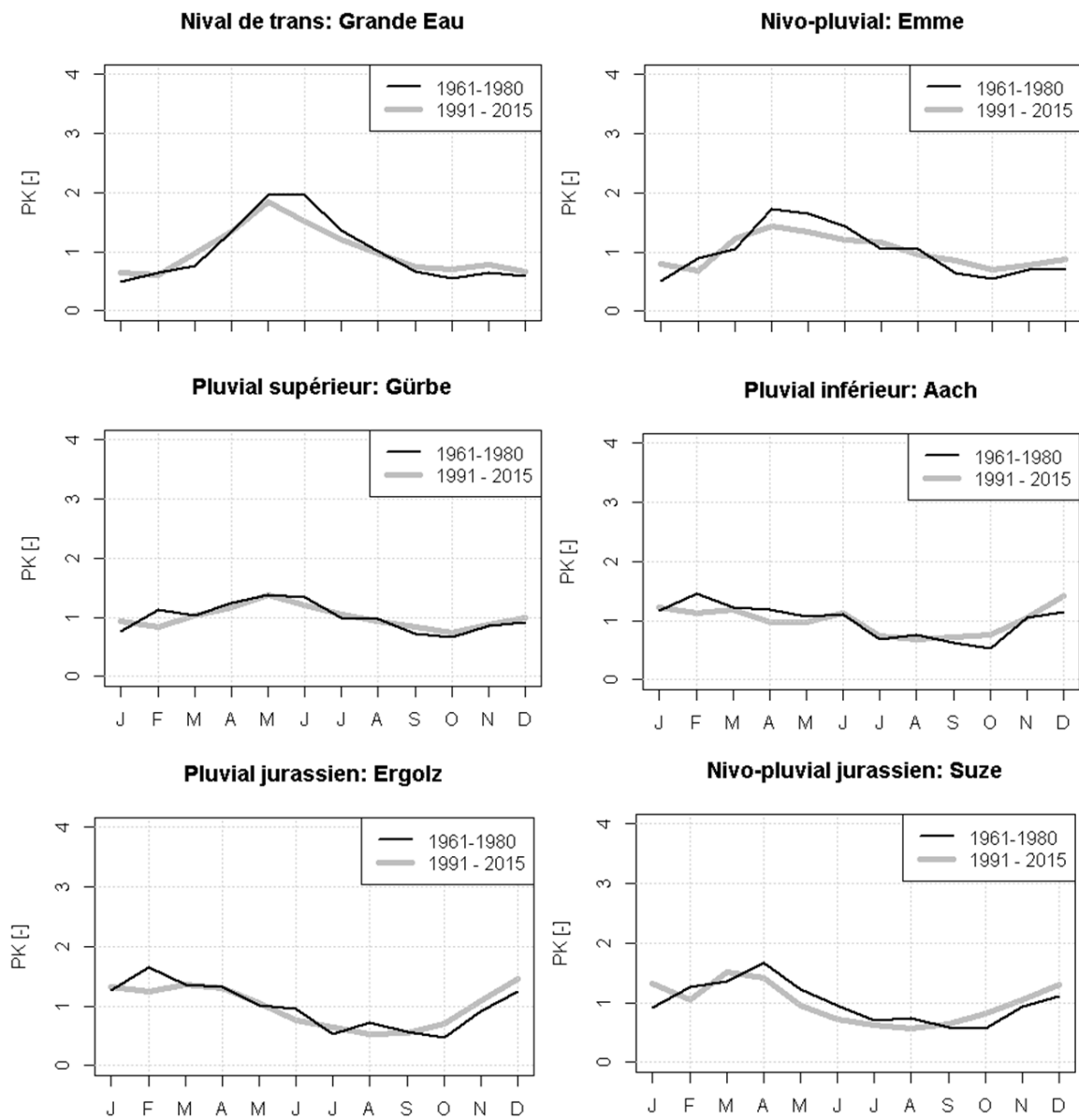


Abbildung 17: Charakteristische Veränderungen der mittleren Abflussregimes im Mittelland und im Jura.

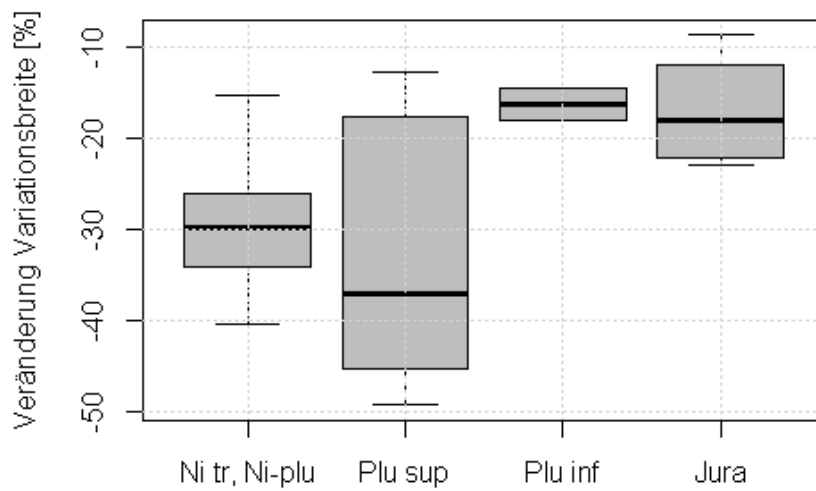


Abbildung 18: Veränderung der Variationsbreite der Pardé-Koeffizienten zwischen der Periode 1961–1980 und 1991–2015 in Prozent. Negative Prozentwerte: Variationsbreite hat in der Periode 1991–2015 im Vergleich zur Periode 1961–1980 abgenommen. Ni tr: Nival de transition, Ni-plu: Nivo-pluvial, Plu sup: Pluvial supérieur, Plu inf: Pluvial inférieur.

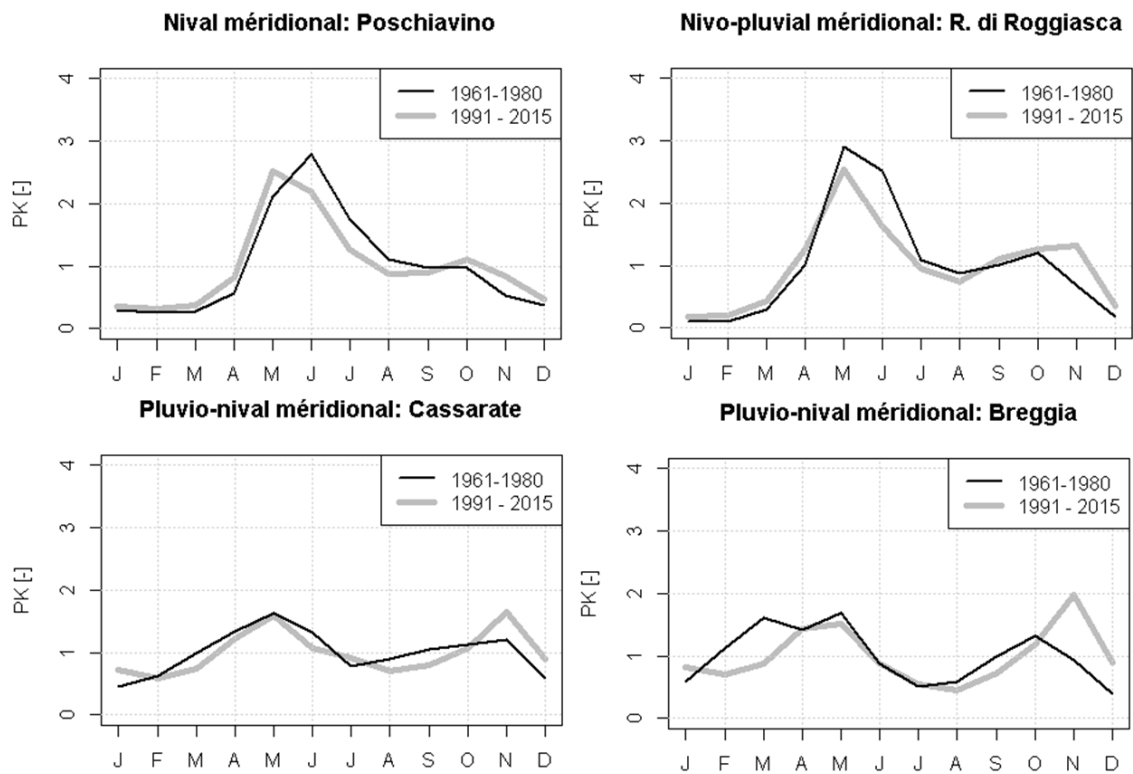


Abbildung 19: Veränderungen der mittleren Abflussregimes auf der Alpensüdseite.

6 Veränderungen in der Periode 1931–2015

Im Mittelpunkt dieses Kapitels steht die Frage, ob sich das Jahresmittel und die saisonalen Abflussmittel in der Periode 1931–2015 (signifikant) verändert haben? Zur Erweiterung und Vertiefung der damit zusammenhängenden Aspekte wird auch die Variabilität der Tagesmittel betrachtet. Bei allen Analysen steht die regionale Sicht im Vordergrund. In den nachfolgenden Ausführungen wird der Ausdruck "Winter" für die Monate Dezember bis Februar (DJF), "Frühling" für die Monate März bis Mai (MAM), "Sommer" für die Monate Juni bis August (JJA) und "Herbst" für die Monate September bis November (SON) verwendet.

6.1 Saisonale Mittelwerte

In Tab. 5 und in den Abb. 20 und 21, auf die im Folgenden Bezug genommen wird, sind die wichtigsten Ergebnisse der Untersuchungen zusammengestellt.

Tabelle 5: Prozentsatz und Anzahl der Gebiete mit Zunahme bzw. Abnahme des Abflussmittelwertes in der Periode 1931–2015. Lesebeispiel: Im Mittelland/Jura hat das saisonale Abflussmittel im Winter (DJF) in 100 % der betrachteten Einzugsgebiete zugenommen. Das entspricht einem Total von 17 Gebieten. In drei Gebieten war die Zunahme signifikant.

Mittelland/Jura (n=17)	DJF	MAM	JJA	SON	Jahr
Gebiete mit Zunahme [%] (Anzahl sig./total)	100 (3/17)	77 (0/13)	12 (0/2)	42 (0/7)	71 (0/12)
Gebiete mit Abnahme [%] (Anzahl sig./total)	0	23 (0/4)	88 (4/15)	58 (0/10)	29 (1/5)
Trend [%/a]	NA	NA	-0.5 bis -0.4	NA	NA
Alpen ohne glaz. Gebiete (n=9)	DJF	MAM	JJA	SON	Jahr
Gebiete mit Zunahme [%] (Anzahl sig./total)	100 (4/9)	78 (0/7)	22 (0/2)	22 (0/2)	33 (0/3)
Gebiete mit Abnahme [%] (Anzahl sig./total)	0	22 (0/2)	78 (5/7)	78 (0/7)	67 (0/6)
Trend [%/a]	0.2 bis 0.3	NA	um -0.2	NA	NA
Makro. Gebiete (n=14)	DJF	MAM	JJA	SON	Jahr
Gebiete mit Zunahme [%] (Anzahl sig./total)	100 (6/14)	100 (1/14)	0	14 (0/2)	50 (0/7)
Gebiete mit Abnahme [%] (Anzahl sig./total)	0	0	100 (7/14)	86 (0/12)	50 (0/7)
Trend [%/a]	0.2 bis 0.3	NA	-0.3 bis -0.2	NA	NA

In der Periode 1931–2015 sind die deutlichsten Veränderungen im Winter und Sommer aufgetreten, auch im Frühjahr und Herbst sind gewisse regionale Tendenzen zu erkennen. Beim mittleren Jahresabfluss hingegen hat sich praktisch nichts verändert. Nur in einem einzigen mesoskaligen Gebiet hat er signifikant (Irrtumswahrscheinlichkeit p-Wert ≤ 0.05) abgenommen.

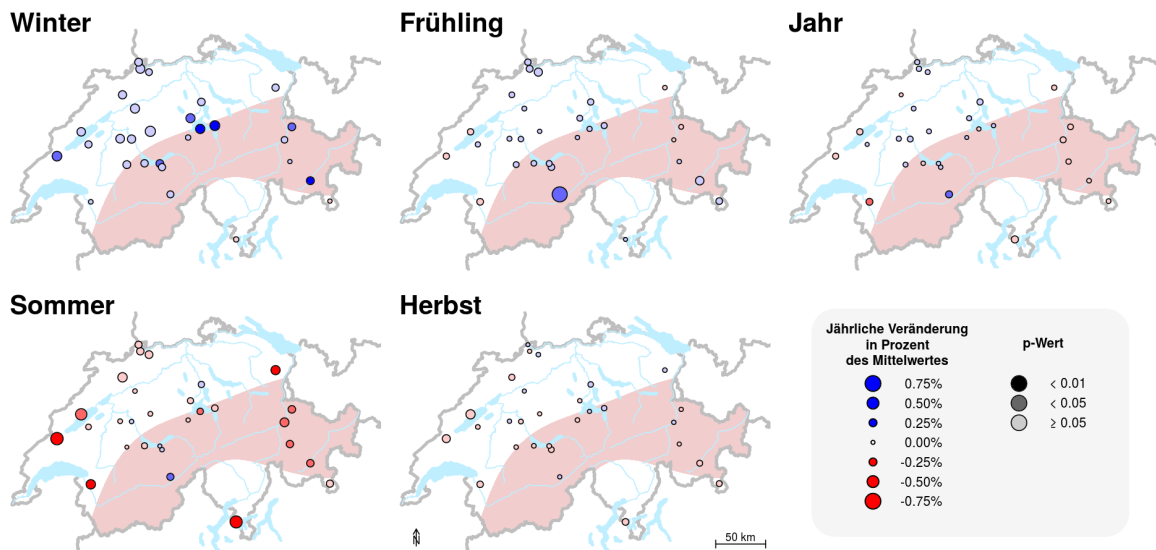


Abbildung 20: Trends 1931–2015 der mittleren saisonalen Abflüsse sowie des mittleren Jahresabflusses in mesoskaligen Einzugsgebieten.

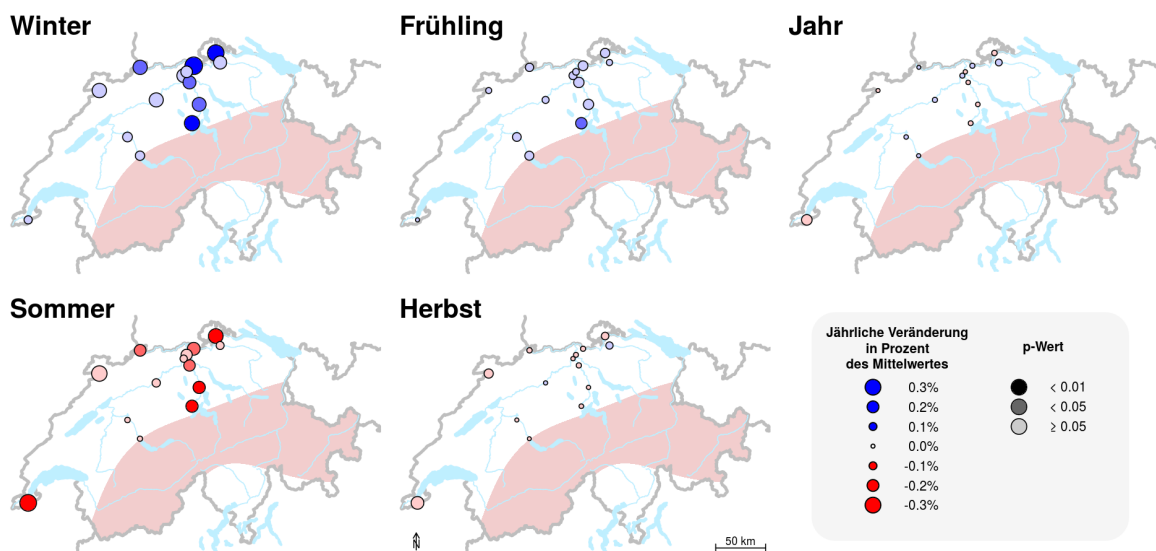


Abbildung 21: Trends 1931–2015 der mittleren saisonalen Abflüsse sowie des mittleren Jahresabflusses in makroskaligen Einzugsgebieten.

Ein eindeutiges Bild ergibt sich im Winter. In allen Gebieten hat der mittlere Abfluss zugenommen. Im Mittelland/Jura konnte allerdings in keinem der Gebiete eine signifikante Zunahme nachgewiesen werden. Bei den alpinen Gebieten ist die Zahl der signifikanten Zunahmen beträchtlich; sie liegt etwas unter 50 %. Bemerkenswert ist, dass die Grössenordnung des Trends in alpinen Gebieten mit signifikanten Zunahmen überall sehr ähnlich ist; er liegt bei jährlich

0.2 bis 0.3 % des langjährigen saisonalen Mittelwerts. Umgerechnet auf die 85-jährige Periode ergibt das eine Zunahme von 17 bis 25 % des langjährigen saisonalen Mittelwerts. Aus räumlicher Sicht haben die Abflüsse in den mesoskaligen Einzugsgebieten im Westen der Schweiz stärker zugenommen als im Osten.

Sechs der vierzehn makroskaligen Gebiete weisen eine signifikante Zunahme auf, so alle betrachteten Stationen an der Reuss und am Rhein. Das bei den mesoskaligen Gebieten beobachtete Verhalten wird somit von den makroskaligen Gebieten, welche das räumliche Integral der mesoskaligen Gebiete bilden, bestätigt.

In zusätzlichen Analysen wurden die saisonalen Trends auf die Monate herunter gebrochen. Sie zeigen, dass die Abflüsse vor allem in den Monaten Dezember und Januar zugenommen haben, im Dezember eher im Mittelland, im Januar eher im Alpenraum.

Im Sommer hat der mittlere saisonale Abfluss – im Gegensatz zum Winter – mehrheitlich abgenommen. Im Mittelland liegen die signifikanten jährlichen Abnahmen bei -0.4 bis -0.5 % des langjährigen saisonalen Mittelwerts, also bei etwa 30–40 % in 85 Jahren. Der regionale Trend ist im Sommer stärker als im Winter: Im Alpenraum und bei den makroskaligen Gebieten ist in der Mehrzahl der Fälle eine signifikante jährliche Abnahme im Bereich von etwa -0.2 % des langjährigen saisonalen Mittelwerts zu beobachten. Aus der Sicht der mesoskaligen Einzugsgebiete häufen sich die Gebiete mit signifikanten Abnahmen im Osten – vor allem dort – und im Westen der Schweiz. Das Einzugsgebiet der Massa wurde nicht in die regionale Analyse miteinbezogen. Wie aus der Karte (Abb. 20) ersichtlich, weist es eine signifikante Abflusszunahme auf. Dieses Phänomen kommt in den Analysen zur Periode 1961–2015, welche auf einer grösseren Zahl von Messtationen beruht, besser zum Tragen.

Bei den makroskaligen Einzugsgebieten ist das räumliche Muster der signifikanten Veränderungen ähnlich wie im Winter. Nun zeigt aber auch die Arve ein signifikantes Signal.

Die saisonale Abnahme im Sommer ist – je nach Region – unterschiedlich auf die einzelnen Monate verteilt. Auffallend ist, dass im Juli am häufigsten signifikante Abnahmen auftreten.

Auch im Frühling ist das Signal ziemlich eindeutig. In allen Regionen haben die Abflüsse mehrheitlich, d.h. in mehr als 75 % der Fälle, zugenommen, allerdings nur in einem einzigen Fall signifikant. In der Karte der mesoskaligen Gebiete (Abb. 20) ist anhand der kleinen Kreis-symbole klar erkennbar, dass die beobachteten Veränderungen im Allgemeinen sehr klein sind. Aus diesem generellen Bild sticht wiederum das stark vergletscherte Einzugsgebiet der Massa heraus. Dort hat der mittlere saisonale Abfluss stark und signifikant zugenommen. Verantwortlich dafür ist vor allem eine starke Zunahme des mittleren Abflusses im Monat Mai. Bei den anderen Einzugsgebieten sind im Frühling die Unterschiede zwischen den Monaten klein.

Auch im Herbst sind die quantitativen Veränderungen sehr klein und nirgends signifikant. Während die Zahl der Gebiete mit tendenzieller Zu- bzw. Abnahme im Mittelland/Jura in etwa gleich ist, verzeichnen die alpinen und die makroskaligen Gebiete in mehr als 75 % der Fälle ein Abnahme. Die Veränderungen sind aber – wie im Frühling – sehr klein und auch die Unterschiede zwischen den Monaten sind klein.

Insgesamt sind also in der Periode 1931–2015 in allen Regionen und auch bei den makroskaligen Gebieten ein regionaler Trend zur Zunahme im Winter und ein starker regionaler Trend zur Abnahme im Sommer erkennbar. Abb. 22 liefert dazu vier charakteristische Beispiele.

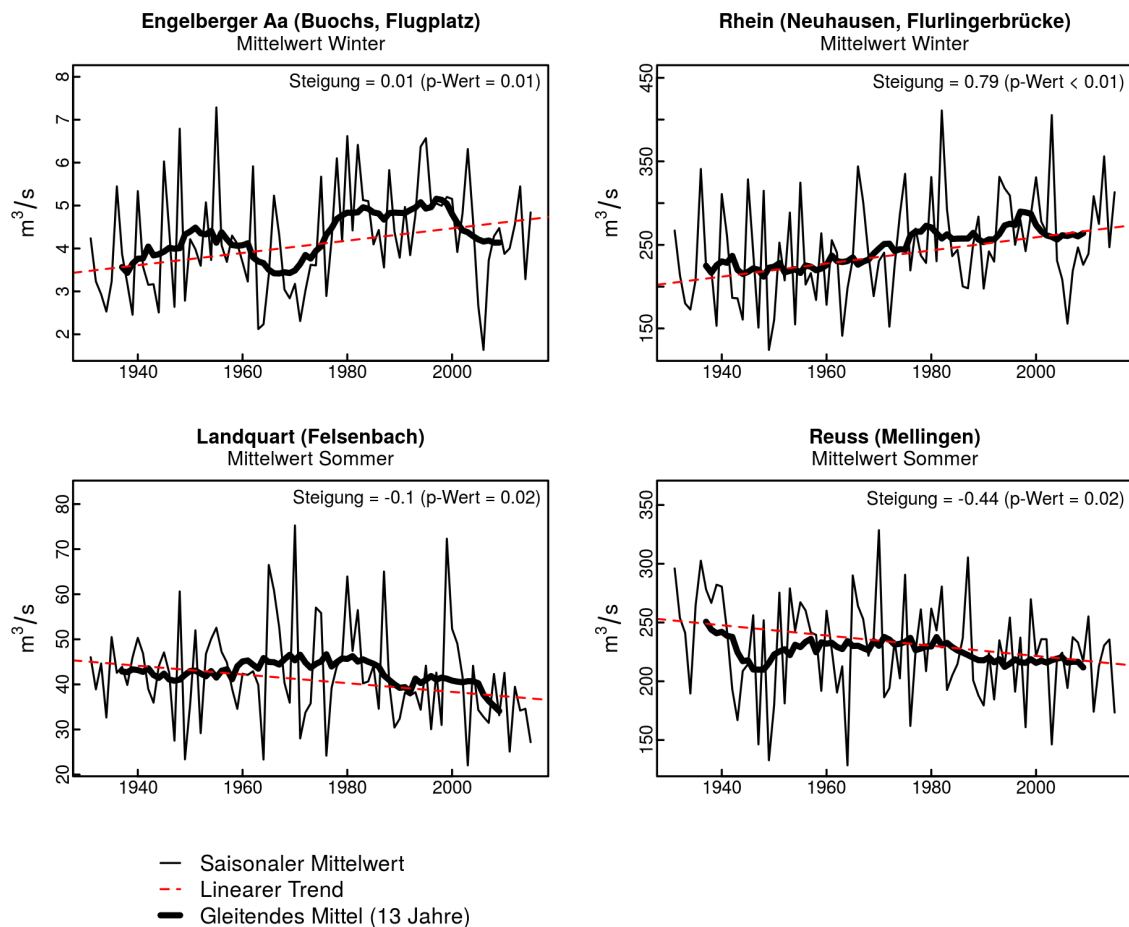


Abbildung 22: Veränderung der saisonalen Abflüsse 1931–2015 in vier ausgewählten Einzugsgebieten. Engelberger Aa und Landquart sind mesoskalige Einzugsgebiete, Rhein und Reuss makroskalige. Die Steigung gibt an, um welchen jährlichen Betrag (m^3/s) sich die Abflüsse verändern.

Die saisonalen Veränderungen werden nun in einem nächsten Schritt in den Regimekontext eingeordnet. Konkret geht es um die Frage, ob sich der Beitrag der saisonalen Abflüsse zum Jahresabfluss (signifikant) verändert hat. Die Ergebnisse sind für die mesoskaligen Gebiete in Abb. 23 und für die makroskaligen Gebiete in Abb. 24 zusammengestellt.

Im Winter hat der Beitrag des saisonalen Abflusses in 97 % der mesoskaligen Gebiete (davon 43 % signifikant) zu- und im Sommer in 90 % der Fälle (davon 46 % signifikant) abgenommen. Bei den makroskaligen Gebieten weisen alle Gebiete im Winter eine Zunahme (davon 57 %

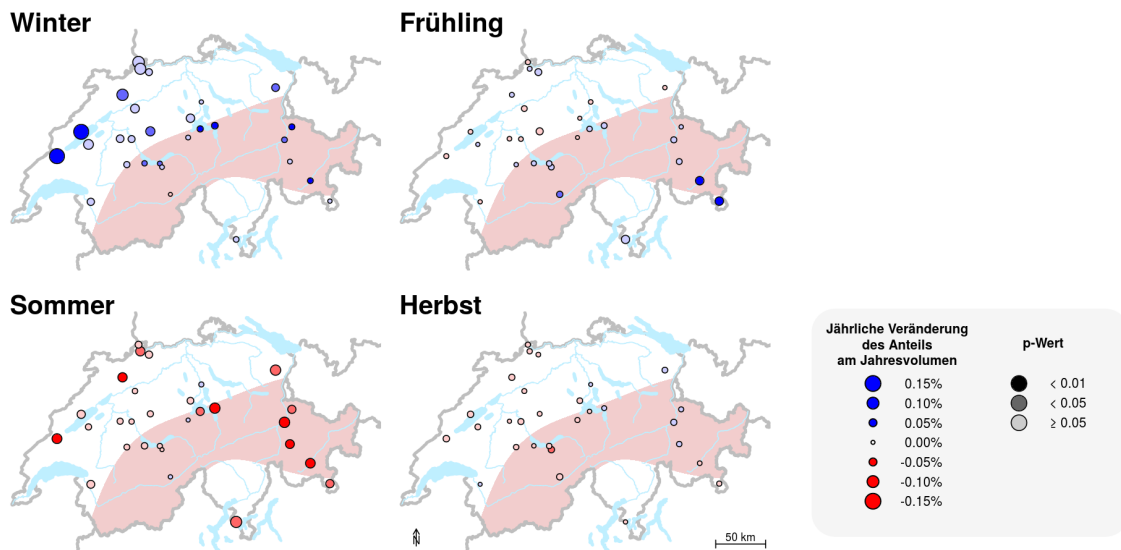


Abbildung 23: Trends 1931–2015 der Anteile der mittleren saisonalen Abflüsse am mittleren Jahresabfluss in mesoskaligen Einzugsgebieten.

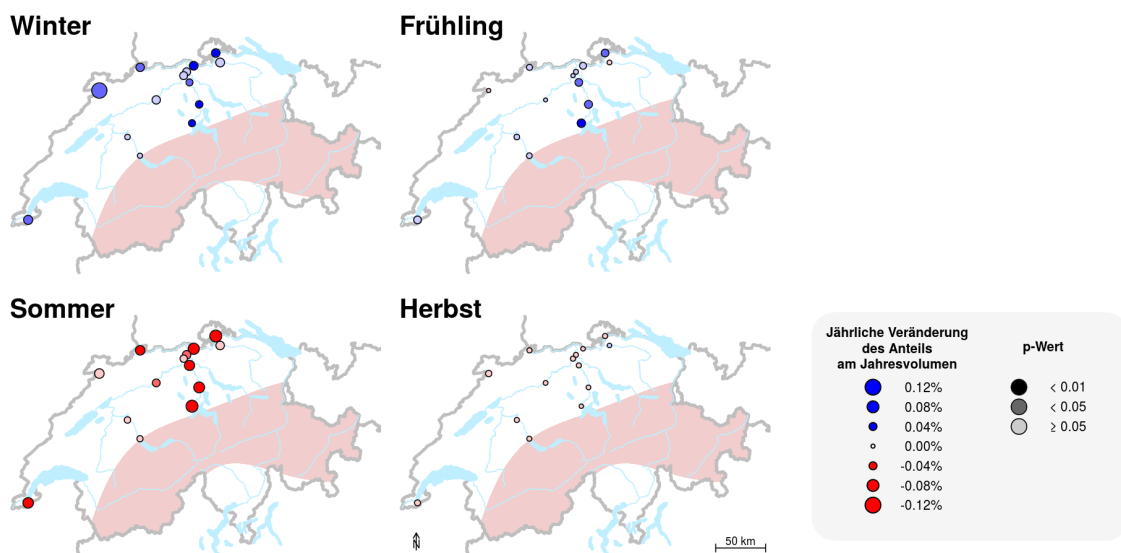


Abbildung 24: Trends 1931–2015 der Anteile der mittleren saisonalen Abflüsse am mittleren Jahresabfluss in makroskaligen Einzugsgebieten.

signifikant) und im Sommer eine Abnahme (davon 64 % signifikant) auf. Im Alpenraum haben die Frühjahresabflüsse in allen Einzugsgebieten an Bedeutung gewonnen (davon in 20 % der Fälle signifikant). Der Bedeutungsgewinn der mittleren Abflüsse im Frühling in den mesoskaligen alpinen Einzugsgebieten führt dazu, dass der Beitrag des Frühlings zum Jahresabfluss in den übergeordneten makroskaligen Einzugsgebieten signifikant zugenommen hat. Der Beitrag

der Herbstabflüsse zum Jahresabfluss nimmt zwar tendenziell ab; die Veränderungen sind aber sehr klein.

6.2 Variabilität der Tagesabflüsse

In den letzten 85 Jahren hat der IQR im Winter in allen Regionen und bei den makroskaligen Gebieten in der grossen Mehrheit der Einzugsgebiete zugenommen, in einem Drittel der Fälle sogar signifikant. Auch im Frühling hat die Variabilität der Tagesabflüsse in 90 % der alpinen Einzugsgebiete und in den von ihnen gespeisten makroskaligen Gebieten zugenommen. In den übrigen Jahreszeiten und auf Jahresbasis sind mit einer Ausnahme keine regionalen Trends erkennbar. Die Ausnahme betrifft den Alpenraum im September mit tendenziellen Abnahmen des IQR in allen Fällen.

Tabelle 6: Prozentualer Anteil der Gebiete mit Zunahme bzw. Abnahme des Interquartilsabstandes der Tagesabflüsse auf saisonaler und jährlicher Basis in der Periode 1931–2015. Zahl links: Prozent der Zunahmen, Zahl rechts: Prozent der Abnahmen. Fett hervorgehoben sind jene Regionen, in den mehr als 75% der Gebiete eine Zunahme verzeichnen.

Region	DJF	MAM	JJA	SON	Jahr
Mesoskalige Gebiete					
Mittelland/Jura	94 – 6	47 – 53	29 – 71	59 – 41	53 – 47
Alpen	100 – 0	90 – 10	40 – 60	0 – 100	30 – 70
Makroskalige Gebiete	100 – 0	93 – 7	64 – 36	43 – 57	29 – 71

7 Veränderungen in der Periode 1961–2015

Die Periode 1961–2015 deckt einen grösseren Teil der längeren Periode 1931–2015 ab. Deshalb sind hier keine grundsätzlich anderen Ergebnisse zu erwarten, zumal die in der langen Periode beobachteten Veränderungen vor allem in der kurzen Periode ab 1961 aufgetreten sind, wie dies Abb. 22 verdeutlicht. Diese kürzere Periode wird aber in die Untersuchung miteinbezogen, weil hier eine grössere Anzahl von beobachteten Einzugsgebieten verfügbar ist. Im Alpenraum können nun die stark vergletscherten Einzugsgebiete gesondert betrachtet werden. Die Stichprobe umfasst im Weiteren auch sechs südalpine Gebiete.

7.1 Saisonale Abflüsse

In Tab. 7 sind die in den Karten der Abb. 25 und 26 dargestellten Ergebnisse für die einzelnen Regionen zusammengefasst.

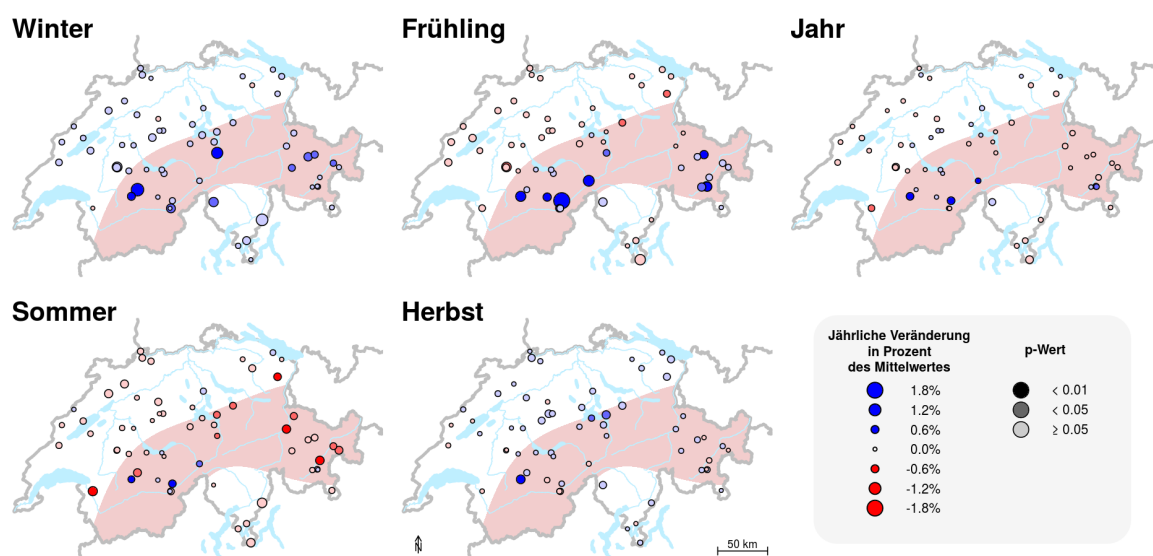


Abbildung 25: Trends 1961–2015 der mittleren saisonalen Abflüsse sowie des mittleren Jahresabflusses in mesoskaligen Einzugsgebieten. Daten: BAFU

Im Winter haben die Abflüsse generell zugenommen, im Alpenraum in rund einem Drittel der Fälle sogar signifikant. Mit einer jährlichen Zunahme von 0.5–0.7 % des langjährigen saisonalen Mittels ist diese Zunahme bedeutend. Sogar in den stark vergletscherten Einzugsgebieten haben die winterlichen Abflüsse zugenommen. Die makroskaligen und die südalpinen mesoskaligen Gebiete zeigen dasselbe Verhalten.

Im Frühling verhalten sich Mittelland/Jura und Alpenraum gegensätzlich. Während die Abflüsse in allen mittelländischen und jurassischen Einzugsgebieten abgenommen haben, haben sie im Alpenraum mehrheitlich zugenommen; bei den stark vergletscherten Einzugsgebieten ist diese Zunahme nicht nur in allen Fällen signifikant, sondern mit 0.6 bis 1.0 % des

Tabelle 7: Prozentsatz und Anzahl der Gebiete mit Zunahme bzw. Abnahme des Abflussmittelwertes in der Periode 1961–2015. Lesebeispiel: Im Mittelland/Jura hat das saisonale Abflussmittel im DJF in 90 % der Fälle zugenommen. Das entspricht einem Total von 27 Gebieten. In keinem dieser Gebiete war aber die Zunahme signifikant.

Mittelland/Jura (n=30)	DJF	MAM	JJA	SON	Jahr
Gebiete mit Zunahme [%] (Anzahl sig./total)	90 (0/27)	0	10 (0/3)	80 (1/24)	33 (0/10)
Gebiete mit Abnahme [%] (Anzahl sig./total)	10 (0/3)	100 (3/30)	90 (4/27)	20 (0/6)	67 (1/20)
Trend [%/a]	NA	NA	NA	NA	NA
Alpen ohne glaz. Gebiete (n=18)	DJF	MAM	JJA	SON	Jahr
Gebiete mit Zunahme [%] (Anzahl sig./total)	100 (6/18)	77 (3/14)	11 (0/2)	77 (1/14)	33 (1/6)
Gebiete mit Abnahme [%] (Anzahl sig./total)	0	23 (0/4)	89 (6/16)	23 (0/4)	67 (0/12)
Trend [%/a]	0.5 bis 0.7	NA	-0.7 bis -0.5	NA	NA
Alpen nur glaz. Gebiete (n=7)	DJF	MAM	JJA	SON	Jahr
Gebiete mit Zunahme [%] (Anzahl sig./total)	100 (2/7)	100 (7/7)	86 (4/6)	43 (1/3)	86 (4/6)
Gebiete mit Abnahme [%] (Anzahl sig./total)	0	0	14 (1/1)	57 (0/4)	14 (0/1)
Trend [%/a]	0.7 bis 1.0	0.6 bis 1.0	0.2 bis 0.5	NA	0.3 bis 0.6
Alpensüdseite (n=6)	DJF	MAM	JJA	SON	Jahr
Gebiete mit Zunahme [%] (Anzahl sig./total)	100 (1/6)	33 (0/2)	0	83 (0/5)	17 (0/1)
Gebiete mit Abnahme [%] (Anzahl sig./total)	0	67 (0/4)	100 (0/6)	17 (0/1)	83 (0/5)
Trend [%/a]	NA	NA	NA	NA	NA
Makro. Gebiete (n=16)	DJF	MAM	JJA	SON	Jahr
Gebiete mit Zunahme [%] (Anzahl sig./total)	81 (0/13)	25 (0/4)	0	94 (2/15)	38 (0/6)
Gebiete mit Abnahme [%] (Anzahl sig./total)	19 (0/3)	75 (0/12)	100 (1/16)	6 (0/1)	62 (0/10)
Trend [%/a]	NA	NA	NA	NA	NA

langjährigen saisonalen Mittels auch sehr gross. Bei den makroskaligen Gebieten kommt das gegensätzliche Verhalten von Mittelland/Jura und Alpen insofern zum Tragen, als 25 % der Gebiete eine Zunahme und 75 % ein Abnahme verzeichnen.

Im Sommer ist eine generelle Abflussabnahme erkennbar. In rund 90 % der Gebiete hat der Abfluss tendenziell oder gar signifikant abgenommen, auch bei den makroskaligen Gebieten und bei den Einzugsgebieten auf der Alpensüdseite. Eine grosse Ausnahme bilden die stark vergletscherten Einzugsgebiete, bei denen in sechs von sieben Fällen die Abflüsse zugenommen haben, in zwei Drittel der Fälle sogar signifikant (vgl. Abb. 27). Aus räumlicher Sicht fallen die Einzugsgebiete im Kanton Graubünden auf, wo die mittleren Abflüsse in fünf Gebieten signifikant abgenommen haben.

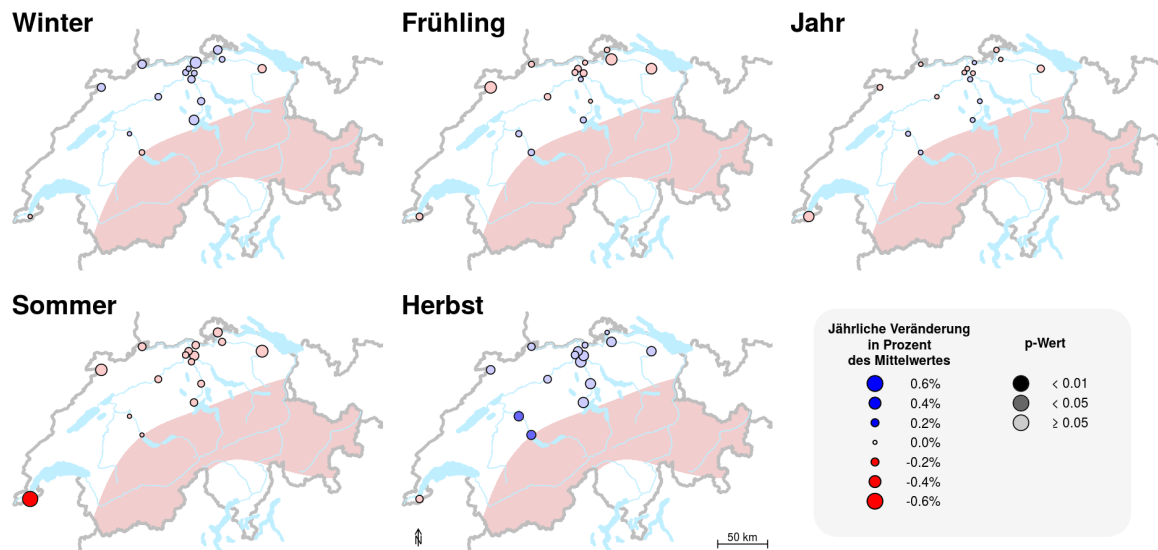


Abbildung 26: Trends 1961–2015 der mittleren saisonalen Abflüsse sowie des mittleren Jahresabflusses in makroskaligen Einzugsgebieten. Daten: BAFU

Im Herbst sind zwar nur wenige signifikante Veränderungen vorhanden, aber in der Mehrheit der Fälle haben die Abflüsse tendenziell zugenommen.

Beim Jahresabfluss hat sich in der Periode 1961–2015 wenig verändert: Die Anzahl der Gebiete mit tendenziellen Zu- oder Abnahmen lässt keine eindeutige Tendenz erkennen und nur gerade in einem Einzugsgebiet hat sich der Jahresabfluss signifikant verändert. Von dieser Aussage ausgenommen sind die stark vergletscherten Gebiete, wo sich die Abflusszunahmen im Winter, Frühling und Sommer auch auf den Jahresabfluss auswirken.

Die Ergebnisse der Periode ab 1961 erlauben auch einen ersten, allerdings nicht repräsentativen Blick auf die Veränderungen auf der Alpensüdseite. Im Winter, Frühling und Herbst verhalten sich die betrachteten Gebiete gleich wie jene auf der Alpennordseite. Der Jahresabfluss nimmt in fünf von sechs Fällen ab, was im Vergleich zu den anderen Regionen eine Ausnahme darstellt.

7.1.1 Vergleich mit der Periode 1931–2015

Die Ergebnisse der Periode 1961–2015 bestätigen jene der langen Periode 1931–2015 weitgehend:

- generelle Abflusszunahme im Winter,
- generelle Abflussabnahme im Sommer,
- unveränderter Jahresabfluss.

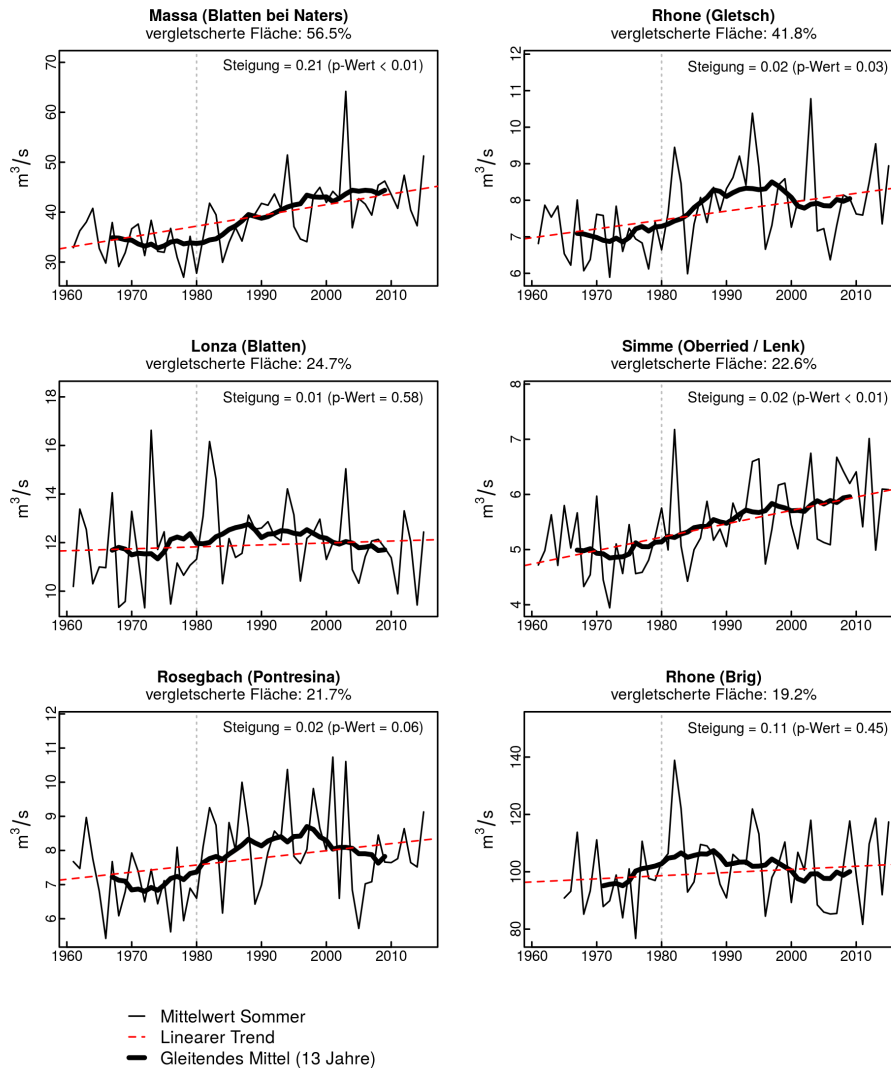


Abbildung 27: Abflusszeitreihen der mittleren saisonalen Abflüsse im Sommer (JJA) der stark vergletscherter Einzugsgebiete. Steigung: jährliche Abflusszunahme [m^3/s]. Daten: BAFU

Aus diesem Rahmen fallen die Einzugsgebiete mit einem glazialen Regime mit einer starken Abflusszunahme (vgl. Abb. 27).

Im Vergleich der beiden Perioden fallen folgende Unterschiede auf:

- Im Frühling haben die mittleren Abflüsse im Mittelland und bei den makroskaligen Einzugsgebieten in der langen Periode 1931–2015 in 77 % der Einzugsgebiete zugenommen (davon 0 % signifikant). Für die kurze Periode 1961–2015 hingegen wurde in allen Fällen eine Abnahme der mittleren Abflüsse beobachtet (davon 10 % signifikant).

- Im Herbst haben die mittleren Abflüsse in der langen Periode mehrheitlich abgenommen oder sind unverändert geblieben; in der kurzen Periode hingegen haben sie in der Mehrzahl der Fälle zugenommen.

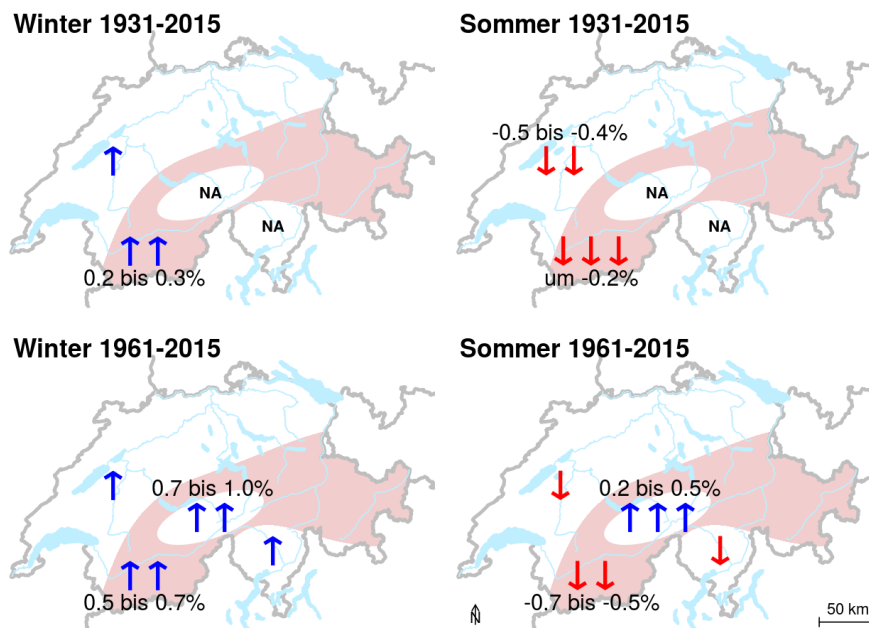


Abbildung 28: Veränderung der saisonalen Abflüsse im Winter (DJF) und Sommer (JJA) in den Perioden 1931–2015 und 1961–2015 [% pro Jahr]. ↑: Zunahme, ↓: Abnahme. Anzahl der Pfeile als Indikator für die Stärke des regionalen Trends (zur Herleitung der Stärke s. Kap. 3.2.4). Innerhalb des Alpenraums werden die glazialen Einzugsgebiete gesondert betrachtet. Deren räumliche Verbreitung ist sehr generalisiert dargestellt.

In Abb. 28 werden die regionalen Tendenzen bzw. Trends im Winter und im Sommer für beide Perioden kartographisch dargestellt. Allgemein ist zu bemerken, dass die jährlichen Veränderungen zwar relativ klein sind, über die ganze Periode aufsummiert aber dennoch beträchtliche Veränderungsrate im zweistelligen Prozentbereich zur Folge haben.

7.2 Variabilität der Tagesabflüsse

In der Tab. 8 wird die Variabilität der Tagesabflüsse der Periode 1931–2015 mit jener der kürzeren Periode verglichen. Da sich beide Perioden teilweise überschneiden, erwarten wir grundsätzlich ähnliche Ergebnisse.

Im Winter nimmt die Variabilität der Tagesabflüsse generell zu. Dies gilt auch für die Alpensüdseite, wo allerdings nur wenige Daten für die neuere Periode vorliegen. Die Unterschiede zwischen den beiden Perioden sind klein.

Tabelle 8: Prozentualer Anteil der Gebiete mit Zunahme bzw. Abnahme des Interquartilsabstands der Tagesabflüsse auf saisonaler und jährlicher Basis in der Periode 1931–2015 sowie 1961–2015. Zahl links: Prozent der Zunahmen, Zahl rechts: Prozent der Abnahmen. Fett hervorgehoben sind jene Regionen, in denen mehr als 75 % der Gebiete eine Zunahme oder Abnahme verzeichnen.

Region	DJF	MAM	JJA	SON	Jahr
Mesoskalige Gebiete					
Mittelland/Jura 31/15	94 – 6	47 – 53	29 – 71	59 – 41	53 – 47
Mittelland/Jura 61/15	80 – 20	7 – 93	13 – 87	90 – 10	3 – 97
Alpen 31/15	100 – 0	90 – 10	40 – 60	0 – 100	30 – 70
Alpen 61/15	76 – 24	76 – 24	16 – 84	20 – 80	40 – 60
Alpensüdseite 61/15	100 – 0	67 – 33	0 – 100	67 – 33	0 – 100
Makroskalige Gebiete 31/15	100 – 0	93 – 7	64 – 36	43 – 57	29 – 71
Makroskalige Gebiete 61/15	94 – 6	19 – 81	75 – 25	81 – 19	0 – 100

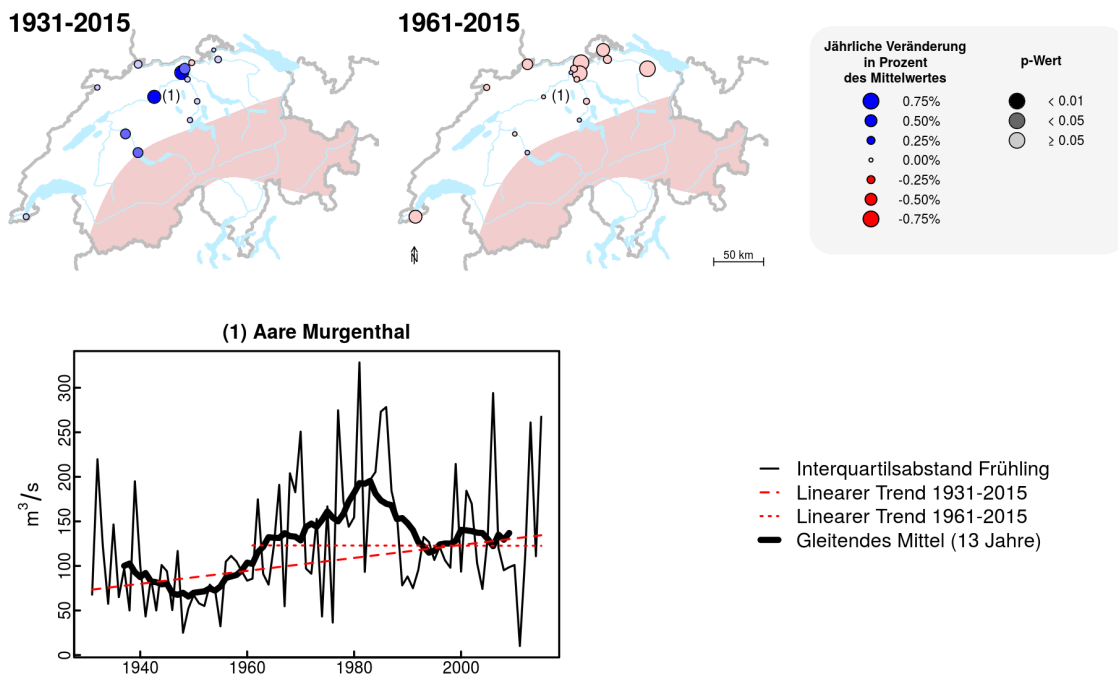


Abbildung 29: Trend der IQR-Werte im Frühling in den Perioden 1931–2015 und 1961–2015. Das Beispiel des makroskaligen Gebiets Aare, Murgenthal, zeigt, wie sich die in den Karten aufgezeigte Entwicklung in der Zeitreihe der jährlichen IQR-Werte präsentiert. Daten: BAFU

Im Frühjahr besteht im Mittelland nur in der kürzeren Periode 1961–2015 eine regionale Tendenz zur Abnahme der Variabilität der Tagesabflüsse. Im Alpenraum ist in beiden Perioden eine regionale Tendenz zur Zunahme erkennbar. Auf der Alpensüdseite besteht keine klare Tendenz zur Zu- oder Abnahme. Bei den makroskaligen Gebieten fällt in Tab. 8 auf, dass die Variabilität der Tagesabflüsse in der langen Periode 1931–2015 in der Mehrzahl der beobachteten Gebiete zu-, hingegen in der kürzeren Periode 1961–2015 in der Mehrzahl der Fälle abgenommen hat. Diese rein numerische Feststellung wird durch das Kartenbild in Abb. 29 ergänzt und am Beispiel der Zeitreihe der Aare, Murgenthal, graphisch erfasst. Dabei zeigt es sich, dass die Variabilität der Tagesabflüsse ab den 1960er Jahren stark zugenommen hat, dann wieder abnimmt und sich auf dem Niveau von etwa $140 \text{ m}^3/\text{s}$ einpendelt. Somit resultiert für die lange Periode eine signifikante Zunahme, für die kürzere Periode eine sehr kleine und nicht signifikante Abnahme. Viele makroskalige Gebiete liegen unterhalb von Seen, so dass ein Einfluss der Seeregulierung nicht auszuschliessen ist.

Die Resultate zum Sommer zeigen in den mesoskaligen Gebieten in der zweiten Periode eine verstärkte regionale Tendenz zur Abnahme, auch auf der Alpensüdseite. Dies gilt auch für die alpinen Gebiete im Herbst.

Die Variabilität der Tagesabflüsse innerhalb eines Jahres hat vor allem in der kürzeren Periode tendenziell abgenommen, und zwar sowohl bei den mesoskaligen Gebieten im Mittelland/Jura und auf der Alpensüdseite als auch bei den makroskaligen Gebieten. Beispiele dazu sind in der Abb. 30 zusammengestellt. Deutlich treten in der linken Karte die beiden vergletscherten Gebiete der Massa und der Simme, Oberried, hervor, bei denen die Variabilität entgegen des allgemeinen Trends signifikant zugenommen hat.

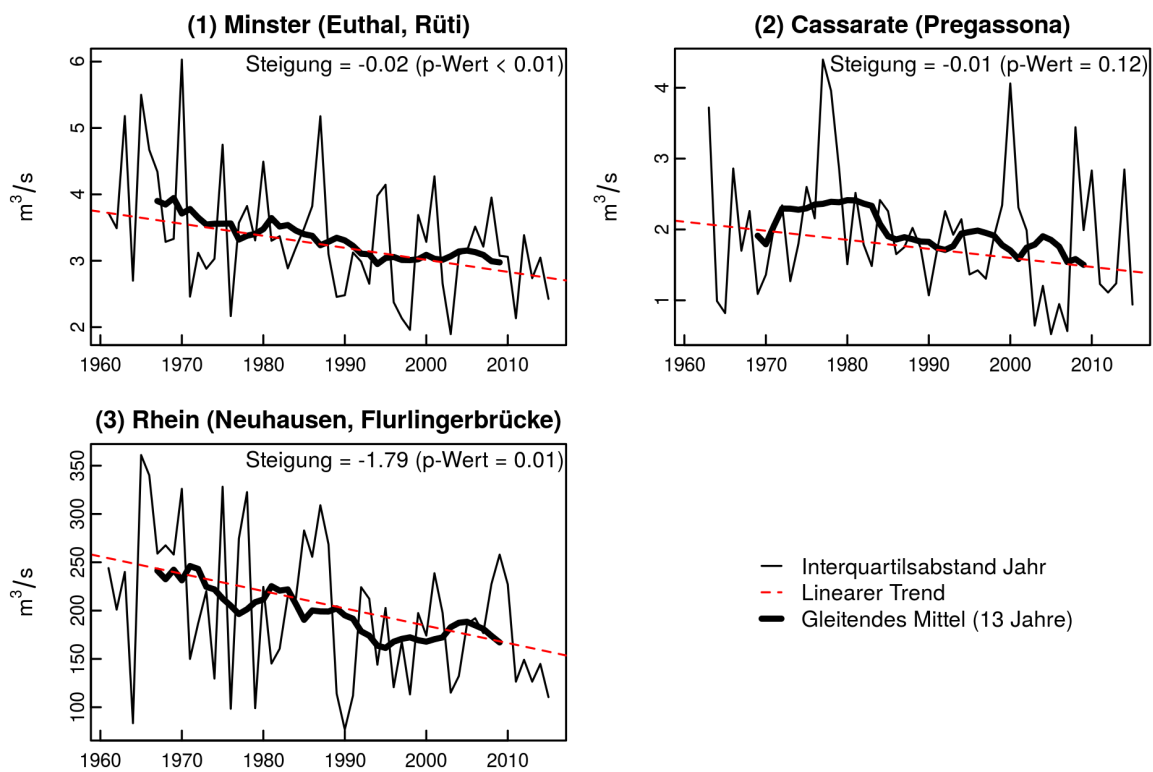


Abbildung 30: Oben: Kartographische Darstellung der Veränderung des IQR, welcher auf der Basis von Tagesmitteln eines Jahres berechnet wurde. Periode 1961–2015. Rote Kreise: Zunahmen, blaue Kreise: Abnahmen. Kräftige Farbe: signifikanter Trend. Unten: Zeitreihe des IQR bei ausgewählten Einzugsgebieten. Daten: BAFU

8 Diskussion

8.1 Einordnung der Resultate

Die vorliegenden Analysen basieren auf allen verfügbaren Messstellen des BAFU in Einzugsgebieten mit naturnahen Abflussverhältnissen. Mit dem Rhein in Basel konnten die Regimeveränderungen seit 1871 räumlich integral für die Alpennordseite beschrieben werden. Über die mesoskaligen Einzugsgebiete ($\leq 1000 \text{ km}^2$) liessen sich regionale Tendenzen und Trends im Mittelland/Jura und Alpenraum sowie – bruchstückhaft – auf der Alpensüdseite ableiten. Die makroskaligen Gebiete ($> 1000 \text{ km}^2$) zeigen schliesslich, wie sich die durch die mesoskaligen Gebiete erfassten Veränderungen auf die übergeordneten Einzugsgebiete auswirken.

Tabelle 9: Regionale Veränderung der mittleren saisonalen Abflüsse und des Jahresabflusses in den Perioden 1931–2015 und 1961–2015.

1931–2015					
Region	DJF	MAM	JJA	SON	Jahr
Mesoskalige Gebiete					
Mittelland/Jura	↑	↑	↓↓	→	→
Alpen (ohne glaz. Gebiete)	↑↑	↑	↓↓↓	↓	→
Makroskalige Gebiete	↑↑	↑	↓↓↓	↓	→

1961–2015					
Region	DJF	MAM	JJA	SON	Jahr
Mesoskalige Gebiete					
Mittelland/Jura	↑	↓	↓	↑	→
Alpen (ohne glaz. Gebiete)	↑↑	↑	↓↓	↑	→
Alpen (nur glaz. Gebiete)	↑↑	↑↑↑	↑↑↑	→	↑↑↑
Alpensüdseite	↑	→	↓	↑	↓
Makroskalige Gebiete	↑	↓	↓	↑	→

Legende:

- ↑: Regionale Tendenz zur Zunahme
- ↑↑: Mittlerer regionaler Trend zur Zunahme
- ↑↑↑: Starker regionaler Trend zur Zunahme
- ↓: Die Abnahme wird analog beurteilt
- : Keine Veränderung

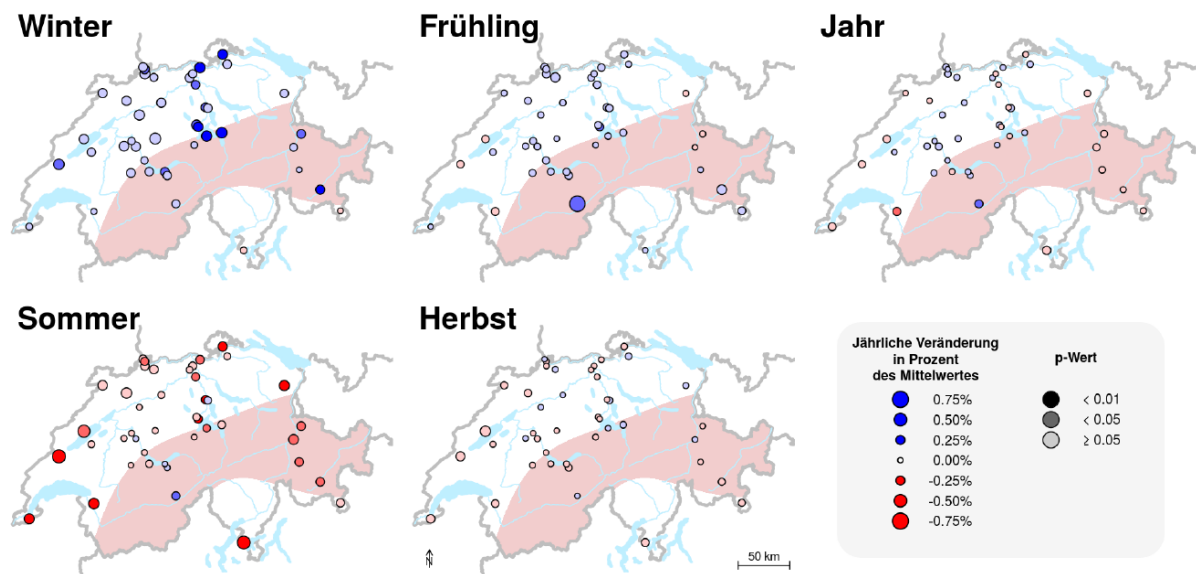


Abbildung 31: Veränderungen der mittleren saisonalen Abflüsse aller untersuchten meso- und makroskaligen Einzugsgebiete in der Periode 1931–2015.

Die Abflussregimes der schweizerischen Einzugsgebiete haben sich in den letzten Jahrzehnten verändert. Die räumlichen und zeitlichen Muster dieser Veränderungen ergeben ein klares und weitgehend widerspruchsfreies, schlüssiges Gesamtbild. Der beobachtete Wandel der Abflussregimes scheint aus wasserwirtschaftlicher Sicht noch problemlos verkraftbar zu sein. Wir stehen aber erst am Anfang einer Entwicklung, die vor allem im Sommer zu Problemen führen könnte. So lassen sich die Resultate in Kürzestform zusammenfassen. Tab. 9 vermittelt einen Überblick über die wichtigsten Ergebnisse. Abb. 31 stellt die Veränderungen aller mesoskaligen und makroskaligen Gebiete in der Periode 1931–2015 dar.

Der Jahresabfluss hat sich ausser bei den stark vergletscherten Einzugsgebieten kaum verändert. Aus saisonaler Sicht ist der generelle Wandel der mittleren Abflüsse im Winter (DJF) und Sommer (JJA) herausragend. Im Frühling besteht eine Tendenz zur Abflusszunahme. Die geringsten Veränderungen sind im Herbst zu beobachten.

Aus räumlicher Sicht sind die Veränderungen im Alpenraum am ausgeprägtesten. Dies äussert sich beim Regimetypp, der sich in der Mehrzahl der Einzugsgebiete in den letzten Jahrzehnten um mindestens eine Stufe verschoben hat, was auf einen abnehmenden glazialen und/oder nivalen Einfluss hinweist. Im Winter wurde ein mittlerer, im Sommer ein mittlerer bis starker regionaler Trend zur Veränderung beobachtet. Im Weiteren sind die Unterschiede zwischen den stark vergletscherten Einzugsgebieten mit glazialen Regime und den restlichen alpinen Einzugsgebieten augenfällig. Die glazial geprägten Gebiete heben sich durch ihren starken Trend zur Abflusszunahme im Frühling und Sommer von den übrigen Gebieten ab (vgl. Tab. 9, 1961–2015). Dies ist die Folge des überproportionalen Schmelzens der Gletscher (vgl. BAFU,

2012 und Tab. 4). Erstaunlicherweise weisen bei den glazialen Einzugsgebieten die mittleren Abflüsse auch im Winter einen Trend zur Abflusszunahme auf.

Die Abflussveränderungen im Mittelland haben im Winter und Sommer dasselbe Vorzeichen wie im Alpenraum. Bemerkenswert ist, dass sich im Sommer bereits ein mittlerer regionaler Trend zur Abflussabnahme abzeichnet.

Da sich die mittleren Abflüsse bei den mesoskaligen Gebieten im Mittelland/Jura und im Alpenraum im Winter und Sommer mehrheitlich in dieselbe Richtung wandeln, zeigt sich dies auch bei den makroskaligen Gebieten.

Die Regimeveränderungen sind also im Gange. Wie sind sie aus quantitativer Sicht zu beurteilen? Zuerst ist hervorzuheben, dass sich die mittleren Jahresabflüsse in den letzten Jahrzehnten bzw. im letzten Jahrhundert kaum verändert haben, und zwar im Rhein in der Periode ab 1871, bei den anderen Gebieten zumindest ab 1931. Diese Stabilität ist aus wasserwirtschaftlicher Sicht natürlich sehr günstig. Wenn wir also von einer Regimeveränderung sprechen, dann handelt es sich um eine saisonale Umverteilung der Abflüsse. Generell gewinnen die winterlichen Abflüsse an Bedeutung, während die sommerlichen Abflüsse gleichzeitig an Bedeutung verlieren. Die einzige Ausnahme machen hier die Einzugsgebiete mit glazialen Regime, deren saisonalen Abflusszunahmen im Winter, Frühling und Sommer auch auf den Jahresabfluss durchschlagen, der in der Periode 1961–2015 jährlich um rund 0.3 bis 0.6 % des langjährigen Jahresmittelwerts zugenommen hat. Dabei handelt es sich aber um einen vorübergehenden Trend, der sich bei einer weiteren Abnahme der vergletscherten Fläche abschwächen und dann sogar umdrehen dürfte. Die glazialen Gebiete weisen zur Zeit ein einmaliges Abflussoptimum auf (vgl. BAFU, 2012).

Beim Rhein in Basel hat der Abfluss im Winter seit 1871 jährlich um $2.03 \text{ m}^3/\text{s}$ zugenommen; das bedeutet einen Anstieg von rund $300 \text{ m}^3/\text{s}$ in den letzten 145 Jahren. Nach Weingartner und Pfister (2007) sind davon rund ein Viertel anthropogenen Ursprungs: Die Wasserkraftproduktion hat den Rheinabfluss im Winterhalbjahr um rund $70 \text{ m}^3/\text{s}$ erhöht. Im Sommer hat der mittlere Abfluss um rund $150 \text{ m}^3/\text{s}$ abgenommen, wobei auch dieser Wert durch die Stromproduktion (Wasserrückhalt in den Stauseen) beeinflusst ist. Vergleicht man diese saisonalen Veränderungen mit dem mittleren Abfluss von $1051 \text{ m}^3/\text{s}$, erkennt man das beträchtliche Ausmass der ablaufenden saisonalen Umverteilung. Letztere führt auch dazu, dass das Abflussregime – hier beschrieben durch die mittleren Monatsabflüsse – im Lauf der Zeit ausgeglichener geworden ist.

In den einzelnen Regionen wurden bei den saisonalen Abflüssen folgende quantitativen Veränderungen beobachtet, die durch eine grössere Zahl von Einzugsgebieten mit signifikanten Veränderungen belegt sind (vgl. Abb. 28). Die folgenden jährlichen Veränderungen werden in Prozent des langjährigen saisonalen Abflussmittelwerts ausgewiesen:

- Winter:
 - +0.2 – +0.3 % (1931–2015) bzw. +0.5 – +0.7 % (1961–2015) im Alpenraum (ohne glaziale Regimes)
 - +0.7 – +1.0 % (1961–2015) bei den glazialen Regimes

- Frühling:
 - +0.6 – +1.0 % (1961–2015) bei Einzugsgebieten mit glazialen Regime
- Sommer:
 - -0.5 – -0.4 % (1931–2015) im Mittelland/Jura
 - um -0.2 % (1931–2015) bzw. -0.7 – -0.5 % (1961–2015) im Alpenraum (ohne glaziale Regimes)
 - +0.2 – +0.5 % (1961–2015) bei den glazialen Regimes

Viele der jährlichen prozentualen Veränderungen liegen in der Grössenordnung von 0.2–1.0 % des langjährigen saisonalen Mittelwertes, das bedeutet in 85 Jahren (1931–2015) immerhin Veränderungen von 17–85 % und in 55 Jahren (1961–2015) rund 10–60 %. In jenen Fällen, in denen Daten für beide Perioden vorliegen, zeigt sich eine Beschleunigung des Wandels in der Periode 1961–2015.

Die beobachtete Abflusszunahme im Winter ist im Alpenraum aus wasserwirtschaftlicher Sicht insofern günstig, als sich die kleinsten Monatsmittel, welche im Winter auftreten, erhöht haben, so dass nun mehr Wasser verfügbar ist. Im Sommer sind die Abnahmen im Alpenraum zwar relativ gross; dabei ist aber zu beachten, dass die Abflüsse in dieser Periode in der Regel noch (weit) über dem Abflussmittel liegen (vgl. Abb. 15) und somit immer noch viel Wasser verfügbar ist.

8.2 Veränderungen des Abflussregimes auf dem Hintergrund des Klimawandels

Die Untersuchungen haben gezeigt, wann, wo und in welchem Ausmass sich die Abflussregimes verändern. Die Ergebnisse basieren hauptsächlich auf Trendanalysen ausgewählter regimerelevanter Kenngrössen. Eine direkte Attributierung der Ergebnisse zum sich bereits im Gang befindlichen Klimawandel ist aufgrund des hier gewählten Vorgehens nicht möglich. Hierzu müssten Modellsimulationen durchgeführt werden. Allerdings können aufgrund des Klimasignals Erwartungen formuliert werden, in welche Richtung sich die Abflussregimes entwickeln müssen, wenn sich das Klima ändert, insbesondere wenn die Lufttemperatur zunimmt. Diese Erwartungen werden in Kap. 2.1 formuliert. Die Resultate der vorliegenden Studie können nun genutzt werden, um zu prüfen, ob sich die Abflussregimes (bereits) gemäss diesen Erwartungen verändert haben.

Veränderung des Regimetyps im Alpenraum

Erwartung: Der Klimawandel führt allgemein zu einem abnehmenden glazialen und/oder nivalen Einfluss.

Beobachtungen: Die Regimetypen der mesoskaligen Einzugsgebiete haben sich mehrheitlich um mindestens eine Stufe in Richtung abnehmender Glazialität und/oder Nivalität verändert. Es ist eine Verfrühung der Regimekurve erkennbar.

Generelle Abflusszunahme im Winter

Erwartung: Die Klimaerwärmung führt zu einem grösseren Anteil des flüssigen Niederschlags am Gesamtniederschlag im Winter und dadurch zu höheren Abflussmengen. Gleichzeitig hat der Winterniederschlag im Mittelland und Jura in den letzten Jahrzehnten um 20 % zugenommen, was ebenfalls zu erhöhten Abflüssen führt.

Beobachtungen: Die Ergebnisse sind klar und eindeutig: Beim Rhein, bei den makro- und mesoskaligen Einzugsgebieten sowie in den beiden Zeitperioden ist eine generelle Zunahme des mittleren Abflusses in den Monaten Dezember bis Februar zu beobachten. Zudem hat sich die Variabilität der Tagesabflüsse gesamtschweizerisch in über 90 % der mesoskaligen und in allen makroskaligen Einzugsgebieten erhöht, was auf den zunehmenden Einfluss des Niederschlags hinweist.

Abflusszunahme im Frühling bei alpinen Gebieten

Erwartung: Die Temperaturerhöhung bewirkt eine frühere Schneeschmelze und dadurch eine Verfrühung des schmelzbedingten Abflusses.

Beobachtungen: Im Frühling ist im Alpenraum generell eine Zunahme des mittleren Abflusses erkennbar: Die Trends sind aber – mit Ausnahme der Gebiete mit glazialen Regime – weniger ausgeprägt als im Winter und im Sommer. Beim Rhein, der mit einer mittleren Gebietshöhe von 1050 m ü.M. und einem Schneeanteil von rund 40 % (vgl. Stahl et al., 2016) stark alpin geprägt ist, hat sich nicht nur die Regimekurve verfrüht, sondern auch der mittlere saisonale Abfluss im Frühling hat seit 1871 jährlich um $1.02 \text{ m}^3/\text{s}$ ($p=0.04$) zugenommen. Dabei spielt aber auch die Bewirtschaftung der Speicher eine gewisse Rolle.

Bei den mesoskaligen alpinen Einzugsgebieten hat die Variabilität der Tagesabflüsse in den meisten Einzugsgebieten zugenommen. Dies ist ein weiterer Hinweis darauf, dass sich das Prozessgeschehen verändert hat.

Abflussabnahme im Sommer bei wenig oder nicht vergletscherten alpinen Gebieten

Erwartung: Der Anteil der glazial geprägten Abflüsse im Juli und August nimmt mit dem Schrumpfen der Gletscher ab. Gleichzeitig ist die Schneeschmelze durch die Verkürzung der Schneesaison früher abgeschlossen, was ebenfalls eine Abnahme der sommerlichen Abflüsse bewirkt.

Beobachtungen: Die Ergebnisse belegen die allgemeine Abflussabnahme:

- Rhein: Die Vorverschiebung der Regimekurve zeigt den Bedeutungsverlust der sommerlichen Abflüsse vor allem seit den 1960er Jahren (vgl. Abb. 12). Die sommerlichen Abflüsse haben seit 1871 signifikant abgenommen. Die Variabilität der Tagesabflüsse hingegen hat signifikant zugenommen; dies ist ein Indiz für ein verändertes Prozessgeschehen.
- Regimetyp: Bei den Regimetypen ist eine Veränderung um mindestens eine Stufe erkennbar (vgl. Tab. 4).

- Saisonale Abflüsse: Es besteht ein starker regionaler Trend zur Abnahme. Die saisonalen Abflussmittel haben in Gebieten mit signifikanten Trends seit 1951 um 25–50 % des langjährigen saisonalen Mittels abgenommen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Veränderungen auch aus quantitativer Sicht bereits relativ gross sind.

(Vorübergehende) Abflusszunahme im Sommer bei den glazialen Gebieten

Erwartung: Das starke Abschmelzen der Gletscher führt zu einer vorübergehenden Abflusszunahme bei den glazial geprägten Einzugsgebieten.

Beobachtungen: Im Mittel der Periode 1961–2015 haben die sommerlichen Abflussmittel der glazial geprägten Einzugsgebiete jährlich um +0.2 – +0.5 % zugenommen. Dieses Verhalten wurde bei Einzugsgebieten beobachtet, die um 2015 noch mindestens 20 % vergletschert waren.

Abflussabnahme im Mittelland und Jura im Sommer

Erwartung: Die (leicht) erhöhte Verdunstung führt zu einer Verminderung des Abflusses.

Beobachtungen: Im Mittelland/Jura haben die saisonalen Abflüsse abgenommen, und zwar in einem stärkeren Ausmass als erwartet. So liegt für die Periode 1931–2015 ein mittlerer regionaler Trend zur Abnahme vor und die sommerlichen Abflussmittel haben bis zu 50 % des langjährigen saisonalen Mittels abgenommen. Hier scheint eine Entwicklung eingeleitet zu sein, die sich in Zukunft mit der erwarteten Abnahme der sommerlichen Niederschlagsmengen (Akademien der Wissenschaften Schweiz, 2016) weiter verstärken könnte. So wird das Auftreten eines neuen Regimetyps "pluvial de transition" mit einem ausgeprägten Minimum im Sommer erwartet (BAFU, 2012).

Tendenzielle Zunahme im Herbst im Alpenraum

Erwartung: In stark vergletscherten Einzugsgebieten nehmen die Abflüsse im September als Folge der starken Gletscherschmelze zu. Im Oktober und vor allem November ist zu erwarten, dass der Anteil des flüssigen Niederschlags zunimmt.

Beobachtungen: Im Herbst besteht bei den Abflussveränderungen ein diffuses und widersprüchliches Bild: In der Periode 1931–2015 stellt man eine regionale Tendenz zur Abflussabnahme, auf der Grundlage der Periode 1961–2015 aber eine Tendenz zur Abflusszunahme fest, während die Gebiete mit glazialen Regime keine Veränderungen aufweisen. Bei der Variabilität der Tagesmittel des Abflusses ist eine Abnahme in nahezu allen Gebieten zu beobachten.

Keine Veränderungen beim Jahresabfluss

Erwartungen: Da sich die Jahresniederschlagssummen nicht oder nur geringfügig verändert haben, bleiben die mittleren Jahresabflüsse weitgehend unverändert.

Beobachtungen: Die mittleren Jahresabflussmengen haben sich in den betrachteten Perioden weder beim Rhein, noch in den Regionen, noch in den makroskaligen Einzugsgebieten verändert. Eine Ausnahme bilden die Einzugsgebiete mit glazialen Regime, bei denen sich die saisonalen Zunahmen im Winter, Frühling und Sommer auch auf den Jahresabfluss auswirken. Auf der Alpensüdseite ist im Zeitraum 1961–2015 eine regionale Tendenz zur Abnahme erkennbar; diese Aussage basiert allerdings auf nur wenigen Stationen und ist eher unsicher. Bemerkenswert ist, dass die Variabilität der Tagesabflüsse innerhalb eines Jahres in der Periode 1961–2015 in allen Regionen ausser dem Alpenraum tendenziell abgenommen hat. Dies könnte mit der Erhöhung der winterlichen Abflüsse und der Erniedrigung der sommerlichen Abflüsse zusammenhängen, was zu einem ausgeglichenerem Regime und zu einer Abnahme der Abflussvariabilität führt.

8.3 Kritik

Aufgrund der vorliegenden Beobachtungen ist der Einfluss des Klimawandels bereits eindeutig zu erkennen. Das Gesamtbild ist schlüssig in Raum und Zeit. Man muss sich aber bewusst sein, dass die vorliegenden Resultate letzten Endes einen "Indizienprozess" darstellen, der allerdings durch viele weitere Studien, welche teilweise auch auf Modellsimulationen basieren, gestützt wird.

Bei der vorliegenden Untersuchung mussten verschiedene Annahmen getroffen werden:

Bei der Definition der Abflussregimes musste definiert werden, welche Kenngrößen unter dem Begriff "Abflussregime" subsumiert werden sollen, welche Veränderungen also bei den Analysen überhaupt betrachtet werden. Die nun vorliegenden Analysen gingen weit über die klassische Regimekurve hinaus und berücksichtigten auch den Jahresabfluss, die saisonalen Abflüsse und die Variabilität der Tagesabflüsse.

Bei den Analysen standen die regionalen Aussagen im Vordergrund. Es geht also darum, die Signifikanz räumlicher Entwicklungen abzuschätzen. Ivanov et al. (2018) sprechen in diesem Zusammenhang von der Feldsignifikanz. Zur Beurteilung der Feldsignifikanz sind keine Masszahlen verfügbar. Es mussten deshalb Kriterien festgelegt werden, um die Feldsignifikanz zu bestimmen. Diese haben einen subjektiven Charakter. In der vorliegenden Studie standen im Wesentlichen zwei Kriterien zur Verfügung.

1. Der Anteil der Einzugsgebiete in einer Region, welche dieselbe Veränderung zeigen, und
2. der Anteil der signifikanten Veränderungen/Trends.

Für das Kriterium 1 wählten wir den Schwellenwert 75 %, d.h., erst wenn in mind. 75 % der Gebiete einer Region dieselbe Veränderung beobachtet wurde, wird von einer regionalen Tendenz gesprochen. Aufgrund des Anteils signifikanter Veränderungen wird dann entschieden, ob gar ein "mittlerer" oder "starker regionaler Trend" vorliegt. Die subjektive Wahl der Schwellenwerte beeinflusst also das Ergebnis. Dabei muss aber auch beachtet werden, dass im Winter und im Sommer oftmals nahezu alle Gebiete dieselben Veränderungen zeigten, so dass

die Wahl des Schwellenwerts zumindest in diesen beiden Jahreszeiten von untergeordneter Bedeutung ist.

9 Schlussfolgerungen

Die vorliegende Studie hat – basierend auf allen geeigneten Messstellen des BAFU – das bestehende Wissen verschiedener vorangehender Studien konsolidiert. Mit dem konsequenten Einbezug der regionalen Komponente, also dem Fokus auf regionale Aussagen, hat man das Bild des bereits ablaufenden Klimawandels weiter differenziert. Es wird aufgezeigt, wie der Klimawandel und insbesondere der Temperaturanstieg die Abflussregimes der Schweiz mit klaren räumlich-zeitlichen Mustern verändert hat. Die vorliegende Untersuchung bestätigt also die Ergebnisse früherer Studien weitgehend und belegt – einmal mehr – die Konsistenz der Aussagen im Bereich der Regimeveränderungen.

Der Klimawandel hat unzweifelhaft auch bereits die Abflussregimes der Schweiz verändert. Die festgestellten Veränderungen sind primär temperaturgesteuert. Damit sind sie auch ein guter Proxy für die weiteren temperaturgesteuerten Veränderungen in der Zukunft. Mit der in Klimamodellen aufgezeigten Abnahme der Niederschläge im Sommer (Akademien der Wissenschaften Schweiz, 2016) wird ein weiteres, die Situation verschärfendes Element hinzukommen. Der Weg in die Zukunft ist also vorgezeichnet: Der Sommer wird zum eigentlichen zeitlichen Hotspot werden. Dringend benötigt wird nun eine wasserwirtschaftliche Planung vor allem auf Stufe Kanton und Region, welche die wissenschaftlichen Erkenntnisse im Bereich der Hydrologie und der Wasserwirtschaft (NFP61) aufnimmt, und in pro-aktive Massnahmen umsetzt. Ansätze dazu sind bereits vorhanden (vgl. z.B. Wasser-Agenda 21, 2011).

Literaturverzeichnis

- Adam, J. C.; Hamlet, A. F. und Lettenmaier, D. P. (2009). Implications of global climate change for snowmelt hydrology in the twenty-first century. In: *Hydrological Processes* 23 (7), 962–972.
- Aeschlimann, M. (2018). *Möglichkeiten und Grenzen von natürlichen Tracern zur Herkunftsbestimmung des Abflusses im Hochgebirge*. Masterarbeit Universität Bern, Bern: Geographisches Institut der Universität Bern.
- Akademien der Wissenschaften Schweiz (2016). *Brennpunkt Klima Schweiz: Grundlagen, Folgen und Perspektiven*. Swiss Academies Reports, 11 (5). Bern: Akademien der Wissenschaften Schweiz.
- Arnell, N. W. (1999). The effect of climate change on hydrological regimes in Europe: a continental perspective. In: *Global Environmental Change* 9 (1), 5–23.
- Aschwanden, H. und Weingartner, R. (1985). *Die Abflussregimes der Schweiz*. Publikation der Gewässerkunde, 65. Bern: Geographisches Institut der Universität Bern.
- BAFU (2012). *Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer: Synthesebericht zum Projekt "Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz" (CCHydro)*. Umwelt-Wissen, 1217. Bern: Bundesamt für Umwelt.
- BAFU (2016). *Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz 2010*. Umwelt-Zustand, 1631. Bern: Bundesamt für Umwelt.
- BAFU (2018). *Aktuelle Situation der Abflüsse und Wasserstände*. Bern: Bundesamt für Umwelt. URL: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/zustand/daten/hydrologisches-jahrbuch.html>.
- Barben, M.; Hänggi, P. und Viviroli, D. (2010). *Wasserhaushalt ausgewählter mittelgrosser Einzugsgebiete 1961-2007*. Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.3. Bern: Bundesamt für Umwelt.
- Barnett, T. P.; Adam, J. C. und Lettenmaier, D. P. (2005). Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. In: *Nature* 438, 303–309.
- Baumgartner, M.; Devanbéry, D. und Kummer, M. (2007). *Wasserentnahmen und -rückgaben*. Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.10. Bern: Bundesamt für Umwelt.
- Beckinsale, R. P. (1969). River regimes. In: Chorley, R. J. und Barry, R. G. (Hrsg.): *Water, earth and man: a synthesis of hydrology, geomorphology, and socio-economic geography*. London: Methuen, 487–512.
- Beechie, T.; Buhle, E.; Ruckelshaus, M.; Fullerton, A. und Holsinger, L. (2006). Hydrologic regime and the conservation of salmon life history diversity. In: *Biological Conservation* 130 (4), 560–572.
- Bernhard, L. und Zappa, M. (2012). *Schlussbericht CCHydrologie - Teilprojekt WHH-CH-Hydro: Natürlicher Wasserhaushalt der Schweiz und ihrer bedeutendsten Grosseinzugsgebiete*. Birmensdorf: WSL.
- BfS (2018). *Arealstatistik Schweiz*. Neuenburg: Bundesamt für Statistik. URL: <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/raum-umwelt/erhebungen/area.html>.
- Biggs, B. J. und Close, M. E. (1989). Periphyton biomass dynamics in gravel bed rivers: the relative effects of flows and nutrients. In: *Freshwater Biology* 22 (2), 209–231.

- Birsan, M.-V.; Molnar, P.; Burlando, P. und Pfaundler, M. (2005). Streamflow trends in Switzerland. In: *Journal of Hydrology* 314 (1-4), 312–329.
- Brönnimann, S.; Appenzeller, C.; Croci-Maspoli, M.; Fuhrer, J.; Grosjean, M.; Hohmann, R.; Ingold, K.; Knutti, R.; Liniger, M. A.; Raible, C. C.; Røthlisberger, R.; Schär, C.; Scherrer, S. C.; Strassmann, K. und Thalman, P. (2014). Climate change in Switzerland: a review of physical, institutional, and political aspects. In: *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 5 (4), 461–481.
- Cattanéo, F. (2005). Does hydrology constrain the structure of fish assemblages in French streams? Regional scale analysis. In: *Archiv für Hydrobiologie* 164 (3), 367–385.
- Dettinger, M. D. und Diaz, H. F. (2000). Global Characteristics of Stream Flow Seasonality and Variability. In: *Journal of Hydrometeorology* 1 (4), 289–310.
- Grimm, F. D. (1968). Zur Typisierung des mittleren Abflussganges (Abflussregime) in Europa. In: *Freiburger Geographische Hefte* 6, 51–64.
- Gustard, A. (1992). Analysis of river regimes. In: Calow, P. und Petts, G. E. (Hrsg.): *The rivers Handbook*. 1. Oxford: Blackwell, 29–47.
- HADES (2018). *Hydrologischer Atlas der Schweiz: Daten- und Analyseplattform*. Bern: Bundesamt für Umwelt. URL: <https://hydromaps.ch>.
- Hänggi, P. und Weingartner, R. (2011). Inter-annual variability of runoff and climate within the Upper Rhine River basin, 1808–2007. In: *Hydrological Sciences Journal* 56 (1), 34–50.
- Hayes, D. S.; Brändle, J. M.; Seliger, C.; Zeiringer, B.; Ferreira, T. und Schmutz, S. (2018). Advancing towards functional environmental flows for temperate floodplain rivers. In: *Science of The Total Environment* 633, 1089–1104.
- Hubacher, R. und Schädler, B. (2010). *Wasserhaushalt grosser Einzugsgebiete im 20. Jahrhundert*. Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 6.6. Bern: Bundesamt für Umwelt.
- Hunkeler, S. (2013). *Bestimmung der Wasserzusammensetzung in den Abflüssen im Gebiet des Plaine-Morte Gletschers. Durchführung einer End-Member-Mixing Analyse zur Bestimmung verschiedener Ursprungswasser des Abflusses im Kanton Bern*. Masterarbeit Universität Bern, Bern: Geographisches Institut der Universität Bern.
- Ivanov, M.; Warrach-Sagi, K. und Wulfmeyer, V. (2018). Field significance of performance measures in the context of regional climate model evaluation. Part 1: temperature. In: *Theoretical and Applied Climatology* 132 (1-2), 219–237.
- Kan, C. (2002). *Hydrometrische Netze*. Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.1 (2). Bern: Bundesamt für Umwelt.
- Keller, R. (1968). Die Regime der Flüsse der Erde. In: *Freiburger Geographische Hefte* 6, 65–86.
- Klein, G.; Vitasse, Y.; Rixen, C.; Marty, C. und Rebetez, M. (2016). Shorter snow cover duration since 1970 in the Swiss Alps due to earlier snowmelt more than to later snow onset. In: *Climatic Change* 139 (3-4), 637–649.
- Krasovskaia, I. und Gottschalk, L. (2002). River flow regimes in a changing climate. In: *Hydrological Sciences Journal* 47 (4), 597–609.
- Kröpfl, D. (2013). *Bestimmung der Abflusszusammensetzung im Gebiet des Plaine Morte Gletscher im Kanton Wallis. Durchführung einer End Member Mixing Analyse (EMMA)*

- zur Bestimmung der Abflusskomponenten. Masterarbeit Universität Bern, Bern: Geographisches Institut der Universität Bern.
- Kummer, D. (2017). *Charakterisierung der Verdunstungsverhältnisse in der Schweiz anhand repräsentierbarer Stationen: Anwendung verschiedener Verdunstungsmodelle*. Masterarbeit Universität Bern, Bern: Geographisches Institut der Universität Bern.
- Lvovich, M. L. (1938). *Experience from classification of the UDSSR's rivers*. Trudy GGI, 6. Leningrad.
- Margot, A.; Sigg, R.; Schädler, B. und Weingartner, R. (1992). *Beeinflussung der Fließgewässer durch Kraftwerke ($\geq 300\text{kW}$) und Seeregulierungen*. Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.3. Bern: Bundesamt für Umwelt.
- Marty, C. (2008). Regime shift of snow days in Switzerland. In: *Geophysical Research Letters* 35 (12).
- MeteoSchweiz (2014). *Klimaszenarien Schweiz - eine regionale Übersicht*. Fachbericht MeteoSchweiz, 243. Zürich: MeteoSchweiz.
- Němec, J. (1993). *Comparison and selection of existing hydrological models for the simulation of the dynamic water balance processes in basins of different sizes and on different scales*. Berichte der KHR, II-7. Lelystad: CHR/KHR.
- OcCC (2007). *Klimaänderung und die Schweiz 2050: Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft*. Bern: OcCC / ProClim.
- Pardé, M. (1933). Fleuves et rivières. In: *Revue de géographie alpine* 21 (4), 851–854.
- Pfandler, M.; Weingartner, R. und Diezig, R. (2006). Versteckt hinter den Mittelwerten - die Variabilität der Abflussregimes. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 50 (3), 116–123.
- Poff, N. L.; Allan, J. D.; Bain, M. B.; Karr, J. R.; Prestegard, K. L.; Richter, B. D.; Sparks, R. E. und Stromberg, J. C. (1997). The Natural Flow Regime: A paradigm for river conservation and restoration. In: *BioScience* 47 (11), 769–784.
- Reid, P. C.; Hari, R. E.; Beaugrand, G.; Livingstone, D. M.; Marty, C.; Straile, D.; Barichivich, J.; Goberville, E.; Adrian, R.; Aono, Y.; Brown, R.; Foster, J.; Groisman, P.; Hélaouët, P.; Hsu, H.-H.; Kirby, R.; Knight, J.; Kraberg, A.; Li, J.; Lo, T.-T.; Myneni, R. B.; North, R. P.; Pounds, J. A.; Sparks, T.; Stübi, R.; Tian, Y.; Wiltshire, K. H.; Xiao, D. und Zhu, Z. (2016). Global impacts of the 1980s regime shift. In: *Global Change Biology* 22 (2), 682–703.
- Richter, B. D.; Baumgartner, J. V.; Powell, J. und Braun, D. P. (1996). A Method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems. In: *Conservation Biology* 10 (4), 1163–1174.
- Schädler, B. (1990). Abfluss. In: Vischer, D. (Hrsg.): *Schnee, Eis und Wasser der Alpen in einer wärmeren Atmosphäre*. Mitteilungen der VAW, 108. Zürich: Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), 109–125.
- SGHL und CHy (2011). *Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung - Synthesebericht*. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz, 38. Bern: Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie (SGHL).
- Stahl, K.; Weiler, M.; Kohn, I.; Freudiger, D.; Seibert, J.; Vis, M.; Gerlinger, K. und Böhm, M. (2016). *Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels: Synthesebericht*. Berichte der KHR, I-25. Lelystad: CHR/KHR.

- Stewart, I. T. (2009). Changes in snowpack and snowmelt runoff for key mountain regions. In: *Hydrological Processes* 23 (1), 78–94.
- Wang, X. L. und Swail, V. R. (2001). Changes of Extreme Wave Heights in Northern Hemisphere Oceans and Related Atmospheric Circulation Regimes. In: *Journal of Climate* 14 (10), 2204–2221.
- Wasser-Agenda 21 (2011). *Einzugsgebietsmanagement. Leitbild für die integrale Bewirtschaftung des Wassers in der Schweiz*. Bern: Bundesamt für Umwelt.
- Weingartner, R. (1999). *Regionalhydrologische Analysen: Grundlagen und Anwendungen*. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz, 37. Bern: Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie (SGHL).
- Weingartner, R. und Aschwanden, H. (1992). *Abflussregimes als Grundlage zur Abschätzung von Mittelwerten des Abflusses*. Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.2. Bern: Bundesamt für Umwelt.
- Weingartner, R.; Blöschl, G.; Hannah, D. M.; Marks, D. G.; Parajka, J.; Pearson, C. S.; Rogger, M.; Salinas, J. L.; Sauquet, E.; Srikanthan, R.; Thompson, S. E. und Viglione, A. (2013a). Prediction of seasonal runoff in ungauged basins. In: Blöschl, G.; Sivaplan, M.; Wagener, T.; Viglione, A. und Savenije, H. (Hrsg.): *Runoff Prediction in Ungauged Basins*. Cambridge: Cambridge University Press, 102–134.
- Weingartner, R. und Messerli, P. W. (2017). Die Verflüssigung des alpinen Wasserhaushaltes und die Rolle von Mehrzweckspeichern. In: *Montagna* 28 (4), 12–13.
- Weingartner, R. und Pfister, C. (2007). Wie ausserordentlich war das Niedrigwasser im Winter 2005/06? - Eine hydrologisch-historische Betrachtung des Rheinabflusses in Basel. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 51 (1), 22–26.
- Weingartner, R.; Schädler, B. und Hänggi, P. (2013b). Auswirkungen der Klimaänderung auf die schweizerische Wasserkraftnutzung. In: *Geographica Helvetica* 68 (4), 239–248.
- Zhang, X. und Zwiers, F. W. (2004). Comment on “Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test” by Sheng Yue and Chun Yuan Wang. In: *Water Resources Research* 40 (3).

Danksagung

Bei der Ausarbeitung der vorliegenden Studie konnte ich auf die stete Unterstützung von Simon Schick zählen. Auch seine konstruktiv-kritischen Beiträge waren sehr hilfreich. Ebenso danke ich Tom Reist und Stefan Schürmann für die sorgfältige Abschlussredaktion.