



Abflusstrends in Österreichs Fließgewässern 1977–2020

Gregor Laaha · Johannes Laimighofer · Juraj Parajka · Miriam Bertola · Günter Blöschl

Angenommen: 19. November 2024 / Online publiziert: 21. Januar 2025

© The Author(s) 2025

Zusammenfassung In diesem Beitrag werden die Abflusstrends in Österreich für 250 Pegel (Niederwasser und Mittelwasser) bzw. 331 Pegel (Hochwasser) im Zeitraum 1977–2020 analysiert. Während sich im Mittel über Österreich der Mittelwasserabfluss wenig verändert hat, sind regionale Verschiebungen des Wasserdargebots zu verzeichnen, mit signifikant abnehmenden Trends im Westen, Nordwesten (Innviertel, Mühlviertel) und Südosten (etwa 20% in 43 Jahren), und leicht zunehmenden Trends im Alpenraum. Beim Hochwasser haben sich die steigenden Trends in den letzten Jahren verstärkt. Vor allem im südlichen Niederösterreich und in der Obersteiermark sowie in Gebieten entlang des Alpenhauptkamms ist eine deutliche Zunahme von bis zu über +20% (+5% pro Dekade) zu verzeichnen. Der Anstieg ist in kleineren Einzugsgebieten ausgeprägter als in größeren Gebieten. Im Osten Österreichs zeigt sich auch eine saisonale Verschiebung der Jahreshochwasser vom Winter und Frühjahr in den Sommer. Beim Niederwasser sind unterhalb von 900 m ü. A. fallende Trends in etwa 16% der Einzugsgebiete zu beobachten, die mit Abflussrückgängen im Sommer von über –20% in 43 Jahren (etwa –5% pro Dekade) im Südosten sowie im Innviertel besonders stark ausgeprägt sind. In diesen Regionen zeichnet sich eine Verschärfung der Niederwassersituation ab, die bei der wasserwirtschaftlichen Planung berücksichtigt werden sollte.

Assoc. Prof. PD DI Dr. G. Laaha (✉) ·
Mag. Dr. J. Laimighofer, M.Sc.
Institut für Statistik, Universität
für Bodenkultur Wien,
Peter-Jordan-Straße 82, 1190 Wien,
Österreich
gregor.laaha@boku.ac.at

PD J. Parajka, PhD · Dr. M. Bertola ·
Univ.-Prof. DI Dr. Dr. h.c. mult. G. Blöschl
Institut für Wasserbau
und Ingenieurhydrologie,
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13, 1040 Wien, Österreich

Schlüsselwörter Hochwasser ·
Niederwasser · Jährlicher Abfluss ·
Hydrologische Strömungsregime ·
Klimawandel · Abflussregime

Runoff trends in Austrian streams 1977–2020

Abstract This article analyses streamflow trends in Austria for 250 gauges (low flows and mean flows) and 331 gauges (floods) in the period 1977–2020. While the mean streamflow has changed little on average in Austria, regional shifts are observed, with significantly decreasing trends in the west, north-west (Innviertel, Mühlviertel) and south-east (about 20% in 43 years), and slightly increasing trends in the Alpine region. The increasing trends of floods have intensified in recent years. In particular, southern Lower Austria and Upper Styria, as well as areas along the main Alpine ridge, have experienced significant increases of up to more than +20% (+5% per decade). The increase is more pronounced in smaller catchments than in larger ones. In the East of Austria, there has also been a seasonal shift in annual floods from winter and spring to summer. With regard to low flows, decreasing trends are observed in about 16% of the catchments below 900 m a.s.l., which are particularly pronounced in the southeast and in the Innviertel region with summer runoff decreases of more than –20% in 43 years (about –5% per decade). In these regions, the low flow situation is becoming more acute, a fact that should be taken into account in water management planning.

Keywords Floods · Low flows · Annual runoff · Hydrological flow regimes · Climate change · Runoff regime

1 Einleitung

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Österreichs Wasserwirtschaft wurden in einer Reihe von Studien untersucht. Der Wissensstand 2011 wurde in der Studie „Anpassungsstrategien an

den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft“ (ZAMG/TU-Wien-Studie 2011) dargestellt. Ein aktualisierter Statusbericht wurde zuletzt im Jahr 2017 veröffentlicht (Blöschl et al. 2017). Eine Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse findet sich in Blöschl et al. (2011a, b, 2018).

Seit den letzten Untersuchungen ist eine Häufung von extremen Jahren zu beobachten. In der letzten Dekade kam es einerseits zu mehreren Hochwasserereignissen, wie zuletzt etwa das katastrophale Hochwasser in Mitteleuropa im September 2024, von dem ein Gebiet von Wien und Niederösterreich über Mähren bis nach Schlesien besonders betroffen war. Zum anderen gab es auch eine Häufung von Trockenjahren, die zu verschärften Niederwasserabflüssen, Absinken der Grundwasserspiegel und historischen Tiefstständen des Neusiedlersees seit Beginn der Messreihen 1965 geführt haben. Aus meteorologischer Sicht zählen die letzten Jahre zu den heißesten der Messgeschichte und es waren Dürren und intensive Starkregenereignisse zu beobachten. Auch ist mit fortschreitender Klimaerwärmung ein Anstieg der Verdunstung zu verzeichnen, der eine Veränderung des Wasserdargebots bewirkt hat (Duethmann und Blöschl 2018).

2 Methode der Trendanalyse

Die Untersuchung von Trends erfolgt auf Basis von jährlichen Reihen für den Mittelwasser-, Hochwasser- und Niederwasserabfluss. Dabei wurden neben den Jahreswerten (Jahresmittel, -maximum, -minimum) auch Jahresreihen von saisonalen Kennwerten (z.B. jährliche Werte des Sommermaximums) untersucht. Ausgewertet wird der Zeitraum 1977–2020, d.h. sechs zusätzliche Jahre im Vergleich zu Blöschl et al. (2017). Die Pegelauswahl orientiert sich an den Vorgängerstudien, beschränkt sich aber auf die aktuell im eHYD (<https://ehyd.gv.at>) verfügbaren Zeitreihen mit einer einheitlichen Beobachtungsperiode von 43 Jahren, wobei maximal ein Fehljahr toleriert wird.

Tab. 1 Vergleich der Trendtests für Jahresreihen von Mittel- (MQ), Hoch- (HQ) und Niederwasserabfluss (NQ) bei einem Signifikanzniveau von 90 %. Betrachtet werden der originale Mann-Kendall-Test (MK), Varianzkorrekturansätze Mmkh (Hamed und Rao 1998) und Mmky (Yue und Wang 2004), das trendfreie Prewhitening Tfpwmk (Yue et al. 2002), das simultane bias-korrigierte Prewhitening Bcpw (Hamed 2009), sowie der Block-Bootstrapping MK-Test BBS-MK. Signifikanzraten über dem MK-Test sind mit einem Stern (*) gekennzeichnet

	MK	Mmkh	Mmky	Tfpwmk	Bcpw	BBS-MK
MQ	27,2	30,4*	66,8*	30,4*	18,8	23,2
HQ	26,3	28,7*	55,3*	24,8	21,5	26,0
NQ	41,2	40,4	72,0*	43,6*	32,4	38,8

Dadurch soll eine bestmögliche Vergleichbarkeit der regionalen Trendmuster erzielt werden. Die Datengrundlage umfasst somit für Niederwasser und Mittelwasser einen Datensatz von 250 Pegeln und für die Hochwasseranalysen einen Datensatz von 331 Gebieten. Die Einzugsgebietsflächen liegen zwischen 8,9 und 6990,1 km².

Für Mittel- und Niederwasser wurde auf die Stationsauswahl von Laaha und Blöschl (2006) zurückgegriffen, wobei nur Stationen mit höchstens geringen Beeinflussungen des Niederwassers ausgewählt wurden. Den Trendanalysen wird jeweils das Wasserhaushaltsjahr mit Beginn im April zugrunde gelegt, wodurch sich Jahresreihen von 1977–2019 mit einer Reihenlänge von 43 Jahren ergeben. Die Zeitreihen der Mittelwasser wurden durch Aufsummierung der gemessenen Tagesabflüsse über das Kalenderjahr ermittelt. Für saisonale Trendanalysen werden die entsprechenden Summen für die Sommersaison (April–Oktober) und die Wintersaison (November–März) auf Jahressummen hochgerechnet, um sie mit den Jahresmittelwassern vergleichbar zu machen. Die Niederwasserzeitreihen wurden durch das 95%-Quantil der Tagesabflussdauerlinie (Q_{95%}) jedes Jahres sowie der jeweiligen Sommer- und Wintersaison bestimmt.

Beim Hochwasser wurde auf die Stationsauswahl aus dem HORA-Projekt (Merz et al. 2008) zurückgegriffen, bei der die Abflussreihen bei Fehlern oder starken Beeinflussungen korrigiert bzw. aus dem Datensatz entfernt wurden. Die Hochwasserzeitreihen werden durch Scheitelwerte auf der Basis von Stundendaten bestimmt. Die Trendanalysen für das Kalenderjahr werden auf der Grundlage des hydrologischen Jahrs mit Beginn im November durchgeführt. Für saisonale Trendanalysen (Abschn. 4.5) wird der Beginn im Dezember gewählt, um eine Analyse nach meteorologischen Jahreszeiten zu er-

möglichen. Wie die Untersuchungen zeigen, liegt die Abweichung der mittleren Trendkoeffizienten beider Definitionen bei einem Prozent und sind somit vernachlässigbar gering.

Die durchschnittliche jährliche Änderung der betrachteten Kennwerte wurde, wie in den Vorgängerstudien, anhand der Methode von Sen (1968) geschätzt, die den Median aller möglichen paarweisen Steigungen zwischen den Datenpunkten, den sogenannten Sen's Slope, berechnet. Die Methode ist ein robuster Schätzer des linearen Trendkoeffizienten des Mittelwerts. Positive Werte stehen für einen zunehmenden Trend, negative Werte für einen abnehmenden Trend.

Um belastbare Trendaussagen von Stichprobenunsicherheiten zu unterscheiden, wurden die Trends mit dem Mann-Kendall (MK)-Test auf Signifikanz geprüft. Die Irrtumswahrscheinlichkeit wurde wie in den Vorgängerstudien bei 5 % an beiden Enden der Verteilung gewählt, was einem Signifikanzniveau von 90 % entspricht. Der Test erfordert statistisch unabhängige Daten, was bei Jahresreihen der Abflussgrößen nicht immer der Fall ist. Für den Trendtest bei autokorrelierten Daten wurden in den letzten Jahren mehrere Verfahren entwickelt. Sie verwenden entweder einen Varianzkorrekturansatz (Hamed und Rao 1998; Yue et al. 2002; Yue und Wang 2004) oder ein sogenanntes Prewhitening, bei dem die Autokorrelation nach Abzug des Trends (Yue und Wang 2004) oder simultan zur Trendschätzung (Hamed 2009) entfernt wird. Der nichtparametrische Block-Bootstrapped MK-Test (Önöz und Bayazit 2012) simuliert die Bootstrap-Verteilung zufälliger Trends durch Resampling aus der Messreihe. Dabei werden die Jahreswerte in Blöcken zusammengehalten, um die Autokorrelation zu berücksichtigen. Die Blocklänge wird daher auf der Grundlage der signifikanten Zeitverschiebun-

gen (Lags) der Autokorrelationsfunktion gewählt. Wenn der berechnete Trend in den Enden (obere und untere 5 %) der Bootstrap-Verteilung liegt, ist eine Zufälligkeit des Trends unwahrscheinlich, und es wird ein signifikanter Trend ausgewiesen.

Im Rahmen einer Voruntersuchung wurden die Trendtests anhand der Jahresreihen des Mittelwasserabflusses für 250 Pegel in Österreich angewendet. Der Block-Bootstrapping MK-Test (BBS-MK) liefert mit 23 % eine Signifikanzrate, die unter der des originalen MK-Tests (27 %) liegt. Im Vergleich dazu liefert der MK-Test nach Hamed (2009), der ein simultanes bias-korrigiertes Prewhitening verwendet, mit 19 % eine etwas geringere Signifikanzrate. Die Ergebnisse der beiden modifizierten Tests sind aber durchaus vergleichbar. Alternative modifizierte MK-Tests unter Verwendung der Varianzkorrekturansätze nach Hamed und Rao (1998) und Yue und Wang (2004) sowie das trendfreie Prewhitening nach Yue et al. (2002) führen mit 30 %, 67 % und 30 % zu höheren Signifikanzraten als der originale MK-Test, was dem theoretischen Hintergrund der modifizierten Trendtests widerspricht. Die Untersuchungen wurden anschließend analog für den Hochwasser- und Niederwasserabfluss durchgeführt, wobei die gleichen Tendenzen beobachtet wurden (Tab. 1). Aufgrund der Ergebnisse und seiner vorzüglichen theoretischen Eignung erscheint der BBS-MK als robustes Verfahren mit den geringsten Annahmen am besten geeignet und wird daher für die Trendanalysen in dieser Studie verwendet.

3 Mittelwasserabfluss

3.1 Ausgangslage der Untersuchung

Der Mittelwasserabfluss beschreibt das Wasserdargebot, das im Jahresmittel in einem Einzugsgebiet zur Verfügung steht. Er steht in engem Zusammenhang mit der klimatischen Wasserbilanz zwischen Niederschlag und Verdunstung bei vernachlässigbarer Speicheränderung (Blöschl et al. 2017). Europa weit zeigen Klimaregionen ohne Frostperiode im Jahresverlauf abnehmende Abflusstrends, während solche mit Frostperiode abnehmende Trends im Sommer und zunehmende Trends im Winter aufweisen (Peña-Angulo et al. 2022). Die Trends sind regional konsistent, aber meist nicht signifikant, mit

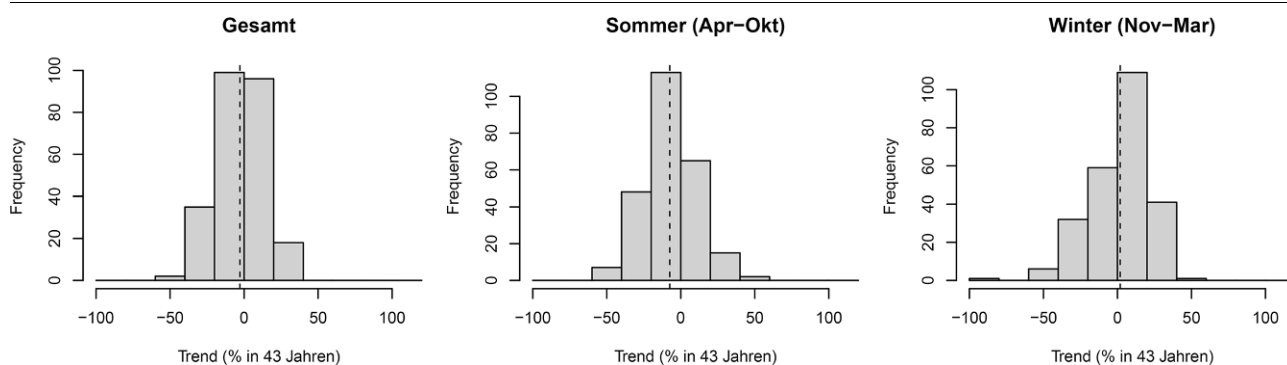
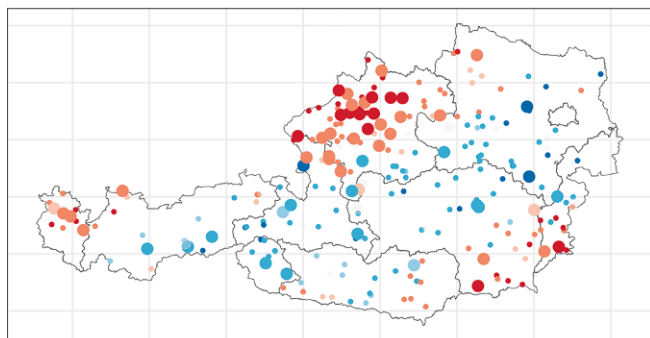
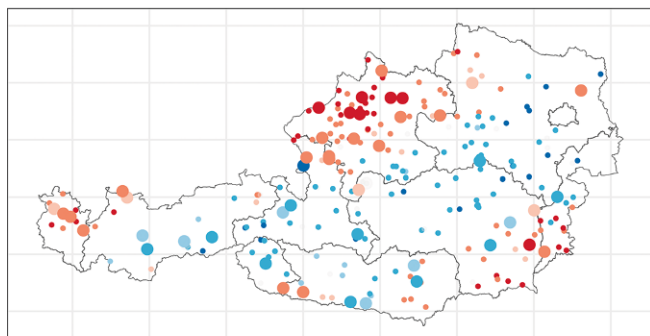


Abb. 1 Trends der Jahresmittelwasser in Österreich 1977–2019: **(a)** gesamt, sowie unterteilt nach **(b)** Sommer (April–Oktober) und **(c)** Winter (November–März). Die Werte der Trends sind Änderungen der Einzugsgebietsspenden bezogen auf den Mittelwert in diesem Zeitraum

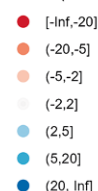
Jahr



Sommer



Trend (% in 43 Jahren)



Winter

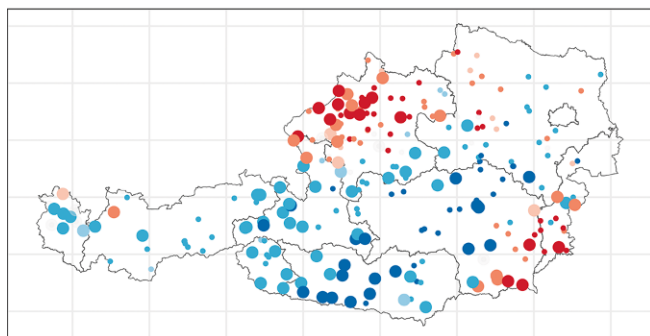


Abb. 2 Trends der Jahresmittelwasser **(a)** und der Sommer- **(b)** und Wintermittelwasserabflüsse **(c)** in Österreich 1977–2019. *Große Kreise*: Pegel mit signifikanten Trends (90 % Signifikanzniveau), *kleine Kreise*: Pegel mit nicht signifikanten Trends

Ausnahme signifikanter Wintertrends in den Alpen, Nord- und Westeuropa und signifikanter Sommertrends in SW-Europa.

Für das österreichische Bundesgebiet wurden die Trends der Wasserhaushaltskomponenten für den Zeitraum 1978–2013 von Duethmann und Blöschl (2018) ausgewertet. Die Ergebnisse zeigen eine Zunahme des durchschnittlichen Niederschlags um insgesamt etwa 120 mm/a über 35 Jahre. Der erhöhte Niederschlag kompensiert den Verdunstungstrend von etwa +110 mm/a über 35 Jahre. Der durchschnittliche Abfluss hat sich damit wenig verändert in Einklang mit früheren Auswertungen (Blöschl et al. 2017). Der beobachtete Anstieg der Verdunstung kann auf den Anstieg der verfügbaren Energie, die Verlängerung der Vegetationsperiode und die größeren Sommerniederschläge zurückgeführt werden (Duethmann und Blöschl 2018).

3.2 Generelle Entwicklung

Die Auswertungen der Mittelwasserabflüsse zeigen einen signifikanten Trend an 23 % der 250 Stationen. Im Durchschnitt über alle Einzugsgebiete ist der Trend mit -1 mm/a über die Beobachtungsperiode von 43 Jahren jedoch sehr gering (Abb. 1). Insgesamt halten sich in Österreich beim Jahresmittelwasser steigende und fallende Trends also die Waage, womit die Einschätzung einer insgesamt ausgeglichenen Wasserbilanz für Österreich aus früheren Studien bestätigt wird.

3.3 Saisonale Verschiebungen

Im Sommer gibt es mit einem Signifikanzanteil von 19 % weniger Statio-

Tab. 2 Prozent der Pegel mit fallenden und steigenden Trends der Jahresmittelwasser 1977–2019 in Österreich für das Wasserhaushaltsjahr mit Beginn im April und unterteilt nach Sommer (April–Oktober) und Winter (November–März) sowie mittlere Trends. Signifikanzniveau 90 %

	Anteil der Pegel (%) mit				Mittl. Trend	
	signif. fallendem Trend	nicht signif. Trend	signif. steigendem Trend	signif. Trend	über 43 Jahre	pro Dekade
Gesamt	14,0	75,6	10,4	24,4	–1 mm/a	–0,2 mm/a
Sommer	14,0	80,8	5,2	19,2	–43 mm/a	–10,0 mm/a
Winter	6,4	60,0	33,6	30,0	+52 mm/a	+12,1 mm/a

Tab. 3 Prozent der Pegel mit fallenden und steigenden Trends der Jahreshochwasser 1978–2020 in Österreich und unterteilt in kleine Gebiete < 500 km² und große Gebiete > 500 km² sowie mittlere Trends. Signifikanzniveau 90 %

	Anteil der Pegel (%) mit				Mittl. Trend	
	signif. fallendem Trend	nicht signif. Trend	signif. steigendem Trend	signif. Trend	über 43 Jahre	pro Dekade
Gesamt	4,2	74,0	21,8	26,0	+11,8 %	+2,7 %
< 500 km ²	5,1	70,8	24,1	29,2	+13,2 %	+3,1 %
> 500 km ²	1,3	87,2	11,5	12,8	+6,9 %	+1,6 %

nen mit signifikantem Trend als beim Jahresmittelwasser. Im Winter gibt es hingegen mit 40 % überdurchschnittlich viele signifikante Trends. Dieser Umstand deutet auf eine saisonale Verschiebung des Wasserdargebots hin.

Auch die Trendwerte zeigen gegenläufige Tendenzen zwischen Sommer und Winter mit einem abnehmenden Trend von durchschnittlich –43 mm/a in 43 Jahren (–10 mm/a pro Dekade) im Sommer und einem zunehmenden Trend von durchschnittlich +52 mm/a in 43 Jahren (+12,1 mm/a pro Dekade) im Winter. Während das jährliche Wasserdargebot im Beobachtungszeitraum also ausgeglichen ist, zeigt sich österreichweit eine Verschiebung der Abflüsse vom Sommer in den Winter.

Ein analoges Bild ergibt sich für die saisonale Verschiebung bei den Pegeln mit signifikanten Trends. In Tab. 2 sind die Signifikanzanteile der abnehmenden und zunehmenden Trends jeweils für das Gesamtjahr als auch für die Sommer- und Wintersaison aufgeschlüsselt. Während sich die signifikanten Trends im Gesamtjahr etwa die Waage halten, überwiegen im Sommer die signifikanten Abnahmen (14 % der Pegel) und im Winter die signifikanten Zunahmen (34 % der Pegel).

3.4 Regionale Trends

Die räumliche Verteilung der Trends der jährlichen Mittelwasserabflüsse ist in Abb. 2a dargestellt. Es zeigt sich eine klare Gliederung in alpine und außeralpine Gebiete. Insgesamt werden die Alpen etwas feuchter, die Gebiete nördlich der Alpen und im Südosten etwas trockener. Die räumlich homogenen Muster der Vorzeichen der Trends wei-

sen auf die Zuverlässigkeit der Aussagen hin. Die geringen Signifikanzraten deuten jedoch auf eine relativ schwache Evidenz eines linearen Trends aus den Messreihen hin, sodass die Trends zu einem erheblichen Teil auch auf klimatische Schwankungen zurückzuführen sein könnten. Eine Ausnahme bildet der Nordwesten (Oberösterreich) wo die Mittelwasserabflüsse um etwa 20 % in 43 Jahren (4,6 % pro Dekade) abgenommen haben.

Im Sommerhalbjahr (Abb. 2b) ist die räumliche Verteilung der Trends ähnlich wie für das gesamte Jahr, allerdings sind die Trends betragsmäßig etwas geringer. Die zunehmende Verdunstung (Duethmann und Blöschl 2018) wurde offensichtlich zum Teil durch größere Sommerniederschläge kompensiert. Signifikant abnehmende Trends der Sommerabflüsse sind im Norden und Westen zu verzeichnen. Auch im Südosten sind abnehmende Trends zu beobachten, die jedoch meist nicht signifikant sind.

Prozentual größere Änderungen des Abflussregimes sind im Winter zu beobachten, wobei hier signifikante Zunahmen im Alpenraum dominieren, wo die Abflüsse im Winter generell gering sind. Diese sind vor allem entlang einer Linie am Südostrand der Alpen mit Werten um +20 % in 43 Jahren (4,6 % pro Dekade) besonders ausgeprägt. Abnahmen des Abflusses gibt es auch außerhalb der Alpen, vor allem im Südosten (Werte um –20 %). Geringere Abnahmen treten im Norden auf, während im Westen im Winter keine Abnahmen zu verzeichnen sind.

Überlagert man die saisonalen Muster im Sommer und Winter, so ergibt sich insgesamt folgendes Bild: Abnah-

men im Westen, die nur den Sommer betreffen, Abnahmen im Südosten, die hauptsächlich den Winter betreffen und Abnahmen im Norden, die sowohl den Sommer als auch den Winter betreffen. Im übrigen Alpenraum sind dagegen Zunahmen zu verzeichnen, die vor allem den Winter betreffen.

4 Hochwasser

4.1 Ausgangslage der Untersuchung

Das Auftreten von Hochwasserereignissen weist generell zeitliche Variabilität auf dekadischen Skalen auf, sodass in fast allen Regionen der Erde Perioden mit überdurchschnittlich vielen oder großen Hochwasserereignissen im Wechsel mit hochwasserarmen Dekaden zu beobachten sind (Blöschl et al. 2023). Werden also Trends des Hochwasserdurchflusses festgestellt, so kann das auch an der Wahl des Zeitfensters liegen. Hochwasser können dabei im Wesentlichen durch drei Faktoren verstärkt werden: Klimaänderung, Landnutzung und wasserbauliche Maßnahmen (Blöschl 2022).

Europaweit reichen die beobachteten Trends des mittleren jährlichen Hochwassers im Zeitraum 1960–2010 von einer Zunahme von ca. 11 % pro Dekade bis zu einer Abnahme von 23 % pro Dekade (Blöschl et al. 2019). Dabei lassen sich drei unterschiedliche Regionen mit annähernd ähnlichem Trendverhalten beobachten: zunehmende Hochwasser in Nordwesteuropa aufgrund zunehmender Herbst- und Winterniederschläge, abnehmende Hochwasser in mittleren und großen Einzugsgebieten in Südeuropa aufgrund abnehmender Niederschläge

Jahr

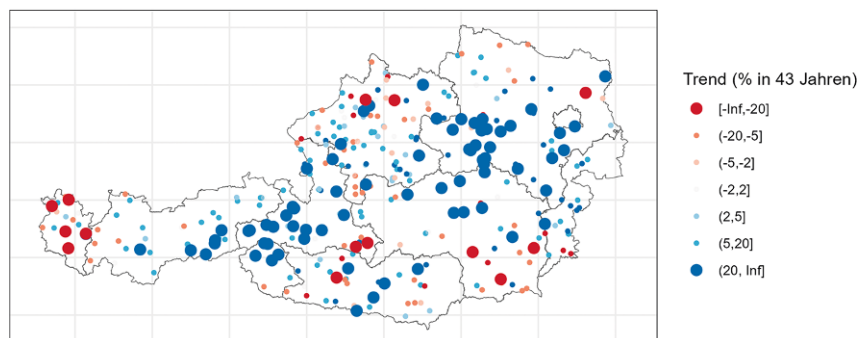


Abb. 3 Trends der Jahreshochwasser in Österreich 1978–2020. Große Kreise: Pegel mit signifikanten Trends (90 % Signifikanzniveau), kleine Kreise: Pegel mit nicht signifikanten Trends

und zunehmender Verdunstung und abnehmende Hochwasser in Osteuropa aufgrund abnehmender und früherer Schneeschmelze infolge wärmerer Frühjahrstemperaturen. Österreich liegt im Schnittpunkt dieser Regionen mit der Topografie der Alpen, was zu einem komplexen Zusammenspiel der hochwassergenerierenden Prozesse führt.

4.2 Generelle Entwicklung

Rund 25 % der Stationen weisen einen signifikanten Trend des mittleren jährlichen Hochwassers auf. Im Durchschnitt über alle Einzugsgebiete beträgt der Trendkoeffizient +11,8 % über den Beobachtungszeitraum (1978–2020) von 43 Jahren (+2,7 % pro Dekade). Das bedeutet eine erhebliche Verschärfung der Hochwassersituation. In 22 % der Gebiete mit zunehmenden Trends ist die Änderung signifikant.

4.3 Kleine vs. große Einzugsgebiete

In früheren Studien wurde eine Abhängigkeit der Trends von der Einzugsgebietsgröße gefunden. Für den hier untersuchten Zeitraum 1978–2020 (Tab. 3) zeigt sich in ähnlicher Weise, dass 29 % der Gebiete kleiner 500 km² einen signifikanten Trend aufweisen, während es für Gebiete mit einer Fläche größer 500 km² nur 13 % sind. Bei kleinen Einzugsgebieten gibt es fünfmal so viele steigende wie fallende Trends. Dies spiegelt sich auch im Trendkoeffizienten wider, der im österreichweiten Mittel +13,2 % in 43 Jahren beträgt. Größere Gebiete weisen mit rund 13 % einen niedrigeren Signifikanzanteil auf, wobei aber neunmal mehr zunehmende Trends auftreten. Im Mittel ergibt sich für Österreich eine Zunahme der

mittleren jährlichen Hochwasserabflüsse für die großen Einzugsgebiete von +6,9 % über den Zeitraum von 43 Jahren.

4.4 Regionale Trends

Die regionale Verteilung der der prozentualen Änderungen der Jahreshochwasser im Vergleich zum mittleren Hochwasserabfluss zeigt Abb. 3. Vor allem im südlichen Niederösterreich und in der Obersteiermark sowie in Gebieten entlang des Alpenhauptkamms ist eine signifikante Zunahme der Hochwasserereignisse zu verzeichnen, die in 43 Jahren oft mehr als +20 % beträgt. In Vorarlberg gibt es hingegen signifikante Abnahmen der Hochwasser um rund –20 % in 43 Jahren. Abnehmende Trends gibt es vereinzelt auch in den Zentralalpen sowie im Südosten und Norden Österreichs.

4.5 Saisonale Verschiebungen

Neben dem Trend der Jahreshochwasser gibt es auch deutliche Verschiebungen in ihrem saisonalen Verhalten (Abb. 4 und Tab. 4). Zunehmende Hochwassertrends werden für die Herbst- und Wintersaison beobachtet, in denen die jährlichen Hochwasser in 19 % bzw. 29 % der Einzugsgebiete signifikant zugenommen haben. Der durchschnittliche Trend ist +14,7 % in 43 Jahren (+3,4 % pro Dekade) bzw. +22,5 % in 43 Jahren (+5,2 % pro Dekade). In diesen Jahreszeiten ist vor allem im Alpenraum eine deutliche Zunahme der Hochwasserdurchflüsse festzustellen. Geringere Zunahmen sind im Frühjahr (7 % der Stationen) und Sommer (14 % der Stationen) zu verzeichnen. Hier treten auch verstärkt

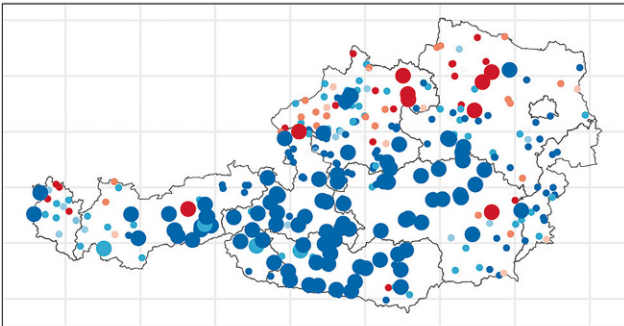
abnehmende Trends auf, die in 6 % bzw. 3 % der Stationen signifikant ausfallen. Mit durchschnittlich +1,0 % und +11,4 % in 43 Jahren sind die Steigerungsraten deutlich kleiner als die in Herbst und Winter.

Um genauere Aussagen über jahreszeitliche Verschiebungen der Hochwasser zu erhalten, wurden die vorherrschende Saisonalität und die Stärke der Saisonalität ausgewertet. Die vorherrschende Saisonalität entspricht der Jahreszeit, in der die meisten Jahreshochwasser auftreten. Die Stärke der Saisonalität wird durch die Häufigkeit der Jahreshochwasser in dieser Saison im Vergleich zum gesamten Jahr bestimmt. Ihre Werte liegen zwischen 0,25 (schwache Saisonalität, d.h. die Ereignisse sind gleichmäßig über alle Jahreszeiten verteilt) und 1,00 (starke Saisonalität, d.h. alle Ereignisse treten in derselben Jahreszeit auf). Die Saisonalität wurde für einen Zeitabschnitt zu Beginn (1978–1992) und am Ende (2006–2020) der Beobachtungsperiode untersucht (Abb. 5). Es lassen sich die folgenden saisonalen Verschiebungen zwischen den beiden Zeitabschnitten feststellen:

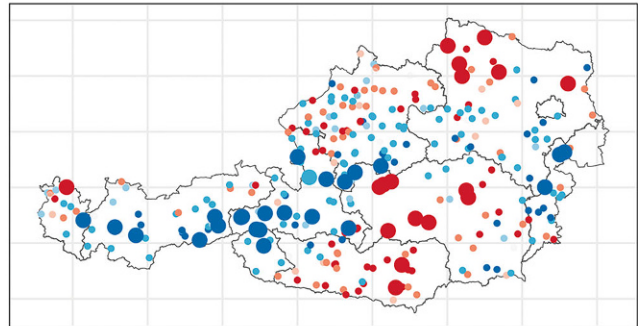
In Westösterreich treten die Jahreshochwasser vorwiegend im Sommer auf. Die Hochwasser haben hier eine sehr starke Saisonalität (mehr als 75 % aller Ereignisse im Sommer), und es gibt hier innerhalb der letzten 43 Jahre keine nennenswerten saisonalen Verschiebungen. Sommerhochwasser dominieren nach wie vor auch im Südosten Österreichs und haben dort ihren Anteil am Hochwassergeschehen weiter erhöht.

Bedeutende Änderungen gibt es hingegen im restlichen Österreich. Im Norden (insbes. im Innviertel und im Mostviertel) traten die Jahreshochwasser früher vorwiegend im Winter auf (>50 % der Ereignisse), während sie jetzt vorwiegend im Sommer auftreten. Im Osten Österreichs (z. B. im Waldviertel) traten die Jahreshochwasser häufig im Frühjahr auf, oft in Verbindung mit Schneeschmelze (Merz und Blöschl 2003), in den letzten Jahren hingegen vorwiegend im Sommer. Dies ist wohl auf den Rückgang der Schneedecke und der Schneeschmelze wegen der höheren Lufttemperaturen zurückzuführen. Im Süden ist ein leichter Trend zu Sommer- und Herbsthochwasser zu beobachten. Dies dürfte einerseits mit der geringeren Schneeschmelze zusammenhängen, andererseits mit ei-

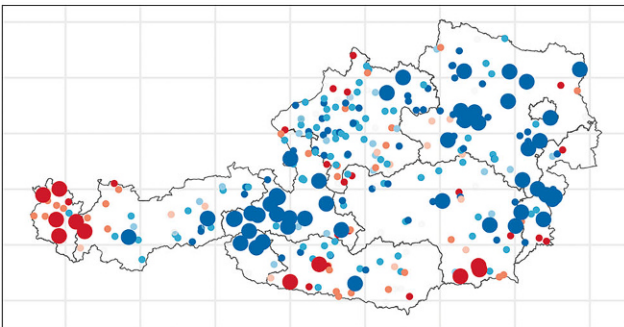
Winter DJF



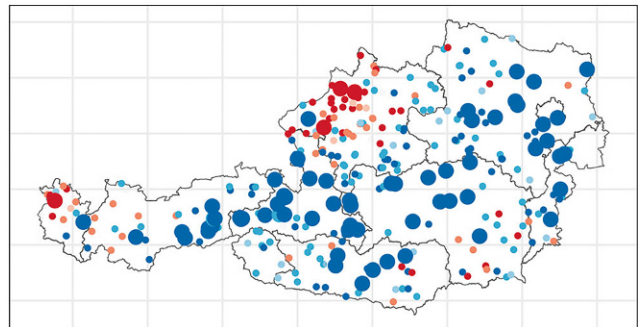
Frühling MAM



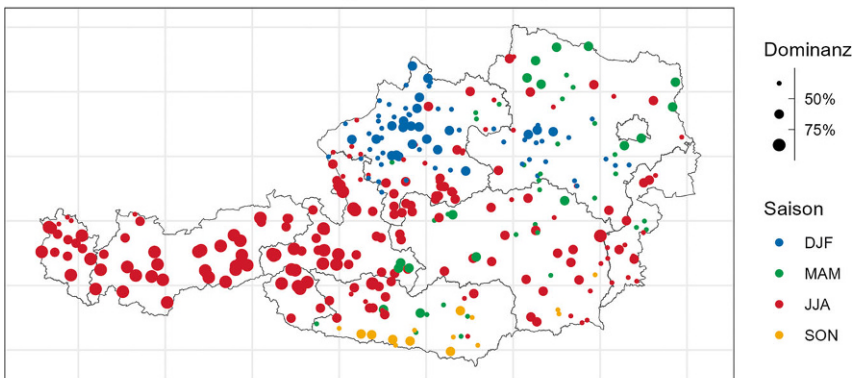
Sommer JJA



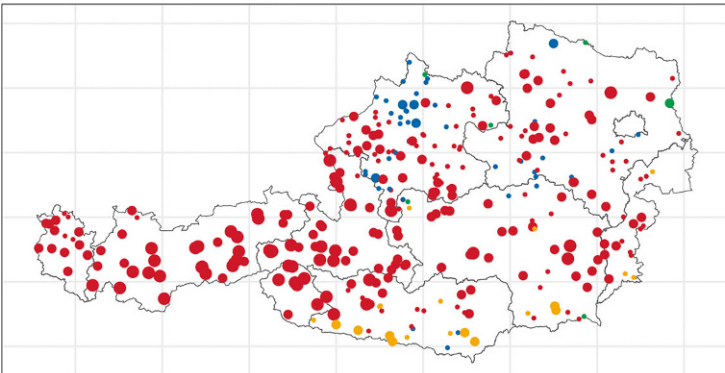
Herbst SON

**Abb. 4** Wie Abb. 3, jedoch getrennt für die Saisonen

Saisonalität der Hochwasserereignisse (1978-1992)



Saisonalität der Hochwasserereignisse (2006-2020)

**Abb. 5** Saisonalität der Jahreshochwasser in Österreich für 1978–1992 (a) und 2006–2020 (b). Die Farbe entspricht der Jahreszeit mit den meisten Ereignissen (vorherrschende Saisonalität). Die Größe der Punkte entspricht der Häufigkeit der Ereignisse in dieser Saison (Stärke der Saisonalität)

Tab. 4 Prozent der Pegel mit fallenden und steigenden Trends der Jahreshochwasser 1978–2020 in Österreich unterteilt nach Jahreszeiten (z. B. Winter: Dezember–Februar) sowie mittlere Trends. Signifikanzniveau 90 %

	Anteil der Pegel (%) mit				Mittl. Trend	
	signif. fallendem Trend	nicht signif. Trend	signif. steigendem Trend	signif. Trend	über 43 Jahre	pro Dekade
Winter	2,7	68,3	29,0	31,7	+22,5%	+5,2%
Frühling	4,9	87,7	7,4	12,3	+1,0%	+0,2%
Sommer	3,4	82,5	14,2	17,5	+11,4%	+2,6%
Herbst	1,2	80,0	18,8	20,0	+14,7%	+3,4%

Tab. 5 Prozent der Pegel mit fallenden und steigenden Trends der Niederwasserabflüsse $Q_{95\%}$ 1977–2019 in Österreich und unterteilt in niedere < 900 m ü. A. und alpine Gebiete > 900 m ü. A. sowie mittlere Trends. Signifikanzniveau 90 %

	Anteil der Pegel (%) mit				Mittl. Trend	
	sign. fallendem Trend	nicht signif. Trend	signif. steigendem Trend	signif. Trend	über 43 Jahre	pro Dekade
Gesamt	12,8	61,2	26,0	38,8	+2,6%	+0,1%
< 900 m	15,6	78,1	6,2	21,9	-16,7%	-3,9%
> 900 m	2,5	56,6	41,0	43,4	+22,8%	+5,3%

Tab. 6 Prozent der Pegel mit fallenden und steigenden Trends der Jahresniederwasser $Q_{95\%}$ in Österreich für das Wasserhaushaltsjahr mit Beginn im April und unterteilt nach Sommer (April–Oktober) und Winter (November–März) sowie mittlere Trends. Signifikanzniveau 90 %

	Anteil der Pegel (%) mit				Mittl. Trend	
	sign. fallendem Trend	nicht signif. Trend	signif. steigendem Trend	signif. Trend	über 43 Jahre	pro Dekade
Gesamt	12,8	61,2	26,0	38,8	+2,6%	+0,1%
Sommer	15,2	63,2	21,6	36,8	-1,1%	-0,3%
Winter	4,0	66,8	29,2	33,2	+13,6%	+3,2%

nem Trend zu höheren Sommer- und Herbstniederschlägen (Blöschl et al. 2018).

5 Niederwasser

5.1 Ausgangslage der Untersuchung

In Österreich unterscheiden sich die Niederwasserbildungsprozesse je nach Höhenlage: Im Flachland werden Niederwasser durch Niederschlagsdefizite und Verdunstung im Sommer ausgelöst, im Alpenraum durch Schneerückhalt in den Gebieten und Frost im Winter (Laaha und Blöschl 2006). Da die Prozesse sich grundlegend unterscheiden, muss die Saisonalität bei der Interpretation der Auswirkungen des Klimawandels auf Niederwasserereignisse berücksichtigt werden (Laaha et al. 2016; Tallaksen und Van Lanen 2023). Niedrige Abflüsse im Sommer führen im Allgemeinen zu

größeren wasserwirtschaftlichen Auswirkungen als die Winterniederwasser und können Probleme mit der Wasserversorgung, überhöhte Wassertemperaturen und eine Verschlechterung der Wasserqualität bewirken.

5.2 Generelle Entwicklung

Rund 13 % der Stationen in Österreich weisen einen signifikant fallenden Trend des Niederwasserkennwerts $Q_{95\%}$ auf, 26 % einen signifikant steigenden Trend. Im Durchschnitt über alle Einzugsgebiete ist der Trend mit 2,6 % über die Beobachtungsperiode von 43 Jahren jedoch sehr gering, da sich steigende und fallende Trends in etwa die Waage halten (Abb. 6).

5.3 Alpenraum vs. niedere Gebiete

Eine Unterscheidung nach der mittleren Einzugsgebietshöhe ergibt allerdings große Unterschiede. In Gebieten unterhalb von 900 m ü. A. hat der Niederwasserabfluss $Q_{95\%}$ in den letzten 43 Jahren in 16 % der Stationen signifikant abgenommen (Tab. 5), aber nur in 6 % signifikant zugenommen (Zeitraum 1977–2019). Für den Zeitraum 1976–2014 hatten Blöschl et al. (2018) signifikante Ab- bzw. Zunahmen in 4 % bzw. 11 % der Gebiete festgestellt. Es ist also eine Verschärfung der Niederwasserproblematik zu verzeichnen. Der mittlere Trend der Gebiete unterhalb von 900 m ü. A. beträgt -16,7 % über 43 Jahre (-3,9 % pro Dekade). Deutlich abnehmende Trends sind vor allem im Südosten Österreichs sowie im nördlichen Innviertel zu beobachten.

Oberhalb von 900 m Seehöhe haben die Niederwasserabflüsse in den letzten 43 Jahren in 41 % der Gebiete signifikant zugenommen, jedoch nur in 3 % signifikant abgenommen. Der mittlere Trend der Stationen oberhalb von 900 m ü. A. beträgt +22,8 % über 43 Jahre (+5,3 % pro Dekade). Diese klaren zunehmenden Trends sind im Zusammenhang mit geringerem Schneerückhalt und der Frostabschwächung zu sehen.

5.4 Saisonale Trends

Ähnliche Trendmuster sind bei den saisonalen Niederwasserabflüssen zu beobachten (Tab. 6 und Abb. 7), wobei die Sommerniederwasserabflüsse in tieferen Lagen fallende Tendenzen und die Winterniederwasserabflüsse im Alpenraum steigende Tendenzen aufweisen. Beim Sommerniederwasser beträgt die mittlere Änderung -1,1 % in 43 Jahren (-0,3 % pro Dekade). Hier weisen rund 15 % der Pegel einen signifikant fallenden Trend auf. Beim Winterniederwasser beträgt die mittlere Änderung +13,6 % in 43 Jahren (+3,2 % pro Dekade), und es weisen 29 % der Pegel einen signifikant steigenden Trend auf.

Insgesamt zeigen die Sommer- und Winterniederwasserabflüsse in ganz Österreich ein konsistentes Muster von steigenden und fallenden Trends, mit Ausnahme des Südwestens (etwa Unterkärnten), wo die Trends zu höheren Winterabflüssen die Trends zur Sommertrockenheit übersteigen.

Für das Innviertel ergeben sich stark fallende Trends in allen Saisonen, im Sommer von über -20 % in 43 Jahren

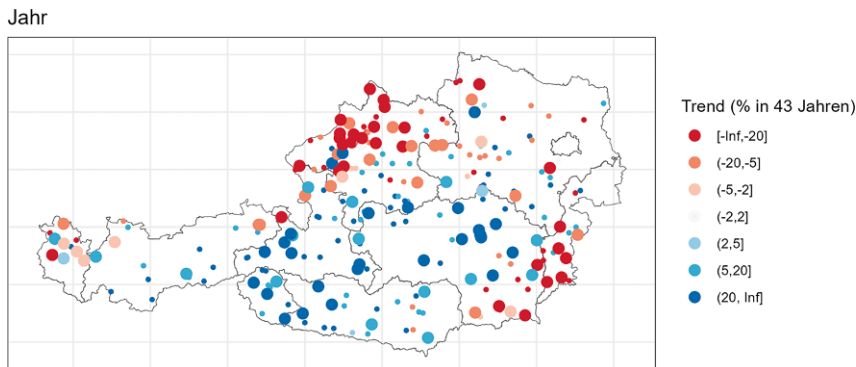


Abb. 6 Trends der Jahresniederschlag $Q_{95\%}$ in Österreich 1977–2019. Große Kreise: Pegel mit signifikanten Trends (90 % Signifikanzniveau), kleine Kreise: Pegel mit nicht signifikanten Trends

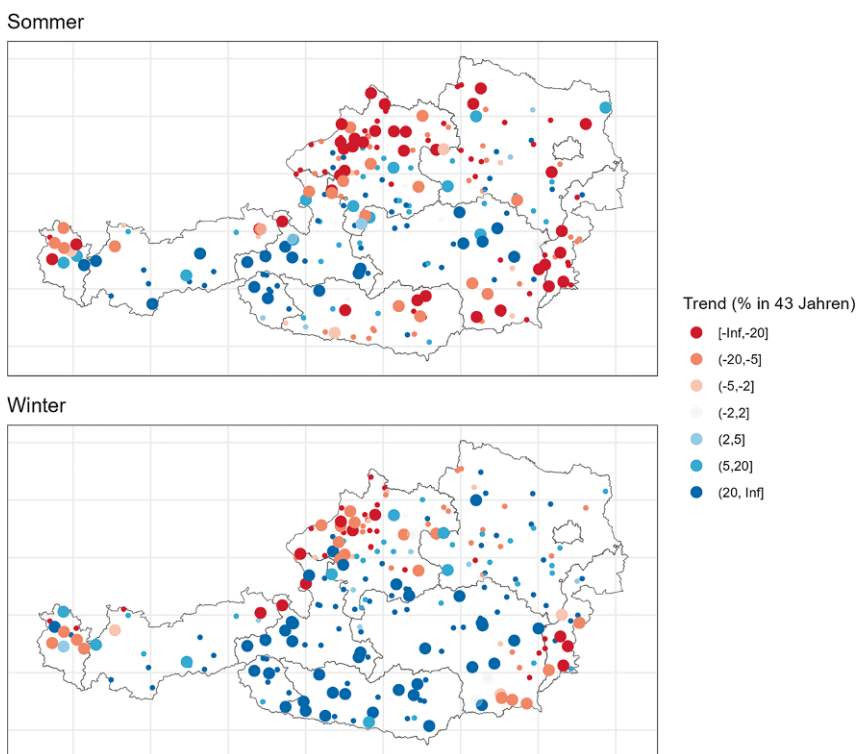


Abb. 7 Trends der saisonalen Niederschlag $Q_{95\%}$ in Österreich 1977–2019 im (a) Sommer (April–Oktober) und (b) Winter (November–März)

(etwa -5% pro Dekade), im Winter etwas schwächer, ebenso im Südburgenland. Steigende Trends sind hingegen im Alpenraum zu verzeichnen, die im Mittel rund $+22,8\%$ über 43 Jahre ($+5,3\%$ pro Jahrzehnt) betragen. Im Nordosten (Wald- und Weinviertel) sind die Änderungen in allen Saisonen klein und wenig signifikant.

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In der ersten Analyse wurde das *mittlere Wasserdargebot* anhand der jährlichen Mittelwasserspense für die Wasserhaushaltsjahre 1977–2019 untersucht. Im Durchschnitt über alle Einzugsgebiete ist der Trend mit -1 mm/a über die Beobachtungsperiode von 43 Jahren klein, da sich steigende und fallende Tendenzen die Waage halten. Hingegen sind saisonale Verschiebungen des Wasserdargebots zu verzeichnen, mit einem

abnehmenden Trend von durchschnittlich -43 mm/a in 43 Jahren im Sommer und einem zunehmenden Trend von durchschnittlich $+52\text{ mm/a}$ in 43 Jahren im Winter. Die abnehmenden Trends treten im Westen, Nordwesten (Innviertel, Mühlviertel) und Südosten auf. Die zunehmenden Trends sind vor allem im Alpenraum zu finden, wohl zum Teil zufolge höherer Lufttemperaturen. Im Nordwesten betreffen die Rückgänge alle Jahreszeiten, während sie im Westen auf den Sommer beschränkt und schwächer sind und im Südosten vor allem im Winter auftreten.

In der zweiten Analyse wurden die *Jahreshochwasserdurchflüsse* der hydrologischen Jahre 1978–2020 untersucht. Im Laufe der 43 Jahre haben die Hochwasser in 22 % der Einzugsgebiete signifikant zugenommen. Gegenüber dem Zeitraum 1976–2014 (signifikante Zunahme in 26 % der Gebiete) ist damit zwar ein leichter Rückgang der Stationen mit steigenden Trends (etwa in Oberösterreich) zu verzeichnen, jedoch gibt es regionale Verschärfungen. Von steigenden Hochwassertrends sind v. a. das südliche Niederösterreich und die Obersteiermark sowie die Gebiete entlang des Alpenhauptkamms mit Trends von oft mehr als $+20\%$ in 43 Jahren betroffen. Der Trend ist in kleineren Einzugsgebieten unter 500 km^2 (mit durchschnittlich $+13,2\%$ in 43 Jahren) stärker ausgeprägt als in größeren Einzugsgebieten ($+6,9\%$ in 43 Jahren). Die Jahreshochwasser verschieben tendenziell vom Winter/Frühjahr in den Sommer, was sowohl mit der abnehmenden Schneeschmelze im Osten als auch mit zunehmenden Niederschlagsintensitäten zusammenhängen dürfte.

In der dritten Analyse wurde die *Entwicklung der Niederschlagsabflüsse* $Q_{95\%}$ für die Wasserhaushaltsjahre 1977–2019 untersucht. Unterhalb von 900 m ü. A. haben die Niederschläge in 16 % der Einzugsgebiete abgenommen. Dies entspricht gegenüber dem Zeitraum 1976–2014 (4 %) einer Erhöhung der Anzahl der Gebiete. Deutlich abnehmende Trends sind vor allem im Südosten Österreichs sowie im Innviertel im Norden zu beobachten. In den alpinen Einzugsgebieten oberhalb von 900 m ü. A. überwiegen steigende Trends. Auch das Ausmaß der Niederschlagsabflüsse hat sich für die Gebiete unterhalb von 900 m ü. A. mit $-16,7\%$ über 43 Jahre ($-3,9\%$ pro Dekade) gegenüber $+2,2\%$ pro Dekade für die Zeitraum 1976–2014 verstärkt. Im Ver-

gleich zur Auswertung von Blöschl et al. (2018) hat sich damit die Niederwasser-situation in Österreich in den letzten Jahren deutlich verschärft.

Danksagung Die Daten wurden vom Hydrographischen Zentralbüro und den hydrografischen Diensten der Länder zur Verfügung gestellt. Die Arbeiten wurden aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Programms „ACRP14“ (Projekt-nummer C265154 „ACRP14 – DIRT – KR21KB0K00001“) durchgeführt. Dem Fonds zur Förderung der Wissenschaftlichen Forschung (FWF) (Projekt-nummer I3174 und I4776) wird gedankt.

Funding Open access funding provided by University of Natural Resources and Life Sciences Vienna (BOKU).

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden. Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges

Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen. Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>. ■

Literatur

- Blöschl G (2022): Three hypotheses on changing river flood hazards. *Hydrol Earth Syst Sci* 26:5015–5033. <https://doi.org/10.5194/hess-26-5015-2022>
- Blöschl G, Schöner W, Kroiß H, et al (2011a): Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft – Ziele und Schlussfolgerungen der Studie für Bund und Länder. *Österr Wasser- Abfallwirtsch* 63: 1–10
- Blöschl G, Viglione A, Merz R, et al (2011b): Auswirkungen des Klimawandels auf Hochwasser und Niederwasser (Climate impacts on floods and low flows). *Österr Wasser- Abfallwirtsch* 63: 21–30
- Blöschl G, Parajka J, Blaschke AP, et al (2017): Klimawandel in der Wasserwirtschaft – Follow-up zur ZAMG/TU-Wien Studie (2011): Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Sektion Wasser, Marxergasse 2, 1030 Wien
- Blöschl G, Blaschke AP, Haslinger K, et al (2018): Auswirkungen der Klimaänderung auf Österreichs Wasserwirtschaft – ein aktualisierter Statusbericht. *Österr Wasser- Abfallwirtsch* 70:462–473
- Blöschl G, Hall J, Viglione A, et al (2019): Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature* 573:108–111. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1495-6>
- Blöschl G, Bertola M, Lun D, et al (2023): Langfristige Änderungen der Hochwasserwahrscheinlichkeiten in Europa. *Hydrol Wasserbewirtsch* 67 (6):289–300. https://doi.org/10.5675/HYWA_2023.5_6
- Duethmann D, Blöschl G (2018): Why has catchment evaporation increased in the past 40 years? A data-based study in Austria. *Hydrol Earth Syst Sci* 22:5143–5158. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5143-2018>
- Hamed KH (2009): Enhancing the effectiveness of prewhitening in trend analysis of hydrologic data. *J Hydrol* 368:143–155
- Hamed KH, Rao AR (1998): A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *J Hydrol* 204:182–196
- Laaha G, Blöschl G (2006): A comparison of low flow regionalisation methods—catchment grouping. *J Hydrol* 323:193–214. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.09.001>
- Laaha G, Haslinger K, Koffler D, Parajka J, Schöner W, Viglione A, Zehetgruber J & Blöschl G (2016): Ein Drei-Standbeine-Ansatz zur Ermittlung zukünftiger Niederwasserabflüsse in Österreich. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 1(68):54–57. <https://doi.org/10.1007/s00506-015-0284-1>
- Merz R, Blöschl G (2003): A process typology of regional floods. *Water Resour Res* 39:1340. <https://doi.org/10.1029/2002WR001952>
- Merz R, Blöschl G, Humer G (2008): Hochwasserabflüsse in Österreich – das HORA-Projekt. *Österr Wasser- Abfallwirtsch* 60:129–138. <https://doi.org/10.1007/s00506-008-0019-7>
- Önöz B, Bayazit M (2012): Block bootstrap for Mann-Kendall trend test of serially dependent data. *Hydrol Process* 26:3552–3560. <https://doi.org/10.1002/hyp.8438>
- Peña-Angulo D, Vicente-Serrano SM, Domínguez-Castro F, Lorenzo-Lacruz J, Murphy C, Hannaford J et al. (2022): The complex and spatially diverse patterns of hydrological droughts across Europe. *Water Resources Research* 58:e2022WR031976. <https://doi.org/10.1029/2022WR031976>
- Sen PK (1968): Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *J Am Stat Assoc* 63:1379–1389
- Tallaksen LM, & Van Lanen HA (Eds.) (2023): Hydrological drought: processes and estimation methods for streamflow and groundwater. ISBN: 9780323916790.
- Yue S, Wang C (2004): The Mann-Kendall Test Modified by Effective Sample Size to Detect Trend in Serially Correlated Hydrological Series. *Water Resour Manag* 18:201–218. <https://doi.org/10.1023/B:WARM.0000043140.61082.60>
- Yue S, Pilon P, Phinney B, Cavadias G (2002): The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrol Process* 16:1807–1829

Hinweis des Verlags Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.