

Auswirkungen des Klimawandels auf Hochwasser und Niederwasser

Zusammenfassung: Für die Entwicklung von Anpassungsstrategien ist die Auswirkung des Klimawandels auf Hochwasser und Niederwasser von größter Bedeutung, da zahlreiche wasserwirtschaftliche Maßnahmen und Entscheidungen darauf abgestellt sind. Die Schwierigkeit bei solchen Analysen besteht allerdings darin, dass selten klar ist, wie sich die Unsicherheiten in den Annahmen auf die Unsicherheiten der Ergebnisse auswirken. Der vorliegende Beitrag richtet deshalb den Blick auf die Mechanismen der Hochwasser- und Niederwasserentstehung. Damit wird es möglich, kausale Zusammenhänge aufzuzeigen und zu unterscheiden, welche Änderungen mit großer Wahrscheinlichkeit zu erwarten sind (harte Aussagen) und welche Änderungen zwar möglich aber nicht abgesichert sind (weiche Aussagen).

Climate impacts on floods and low flows

Summary: Understanding climate impacts on floods and low flows is essential for developing climate adaptation strategies as numerous measures and decisions in water resources management hinge on the estimates of hydrological extremes. The difficulty, however, is that it is rarely clear how the uncertainties in the assumptions propagate to the results. This paper hence focuses on the mechanisms of flood and low flow generation. This allows us to analyse the causal relationships and to separate changes that are likely to occur (hard facts) from changes that are possible but not supported by data evidence (soft facts).

1. Einleitung

Hydrologische Extremwerte stehen oft im Zentrum der Klimadebatte. Für die Wasserwirtschaft ist dies ein essentiell wichtiges Thema besonders für Bemessungswerte der Schutzwasserwirtschaft, aber auch für Fragen der Wasserversorgung und Wassergüte bei Niederwassersituationen. Gerade wenn ein Hochwasser oder

eine längere Trockenperiode aufgetreten ist, wird gerne der Zusammenhang mit einem sich verändernden Klima gesucht. Beispielsweise wird das im Jahr 2002 aufgetretene Hochwasser, im Kapitel „Observations: Surface and atmospheric climate change“ des IPCC Berichts (IPCC 2007, p. 311) angeführt. Meist wird der Klimawandel oft direkt für hydrologische Extremereignisse verantwortlich gemacht (Böhm 2010). In der wissenschaftlichen hydrologischen Literatur wird der Zusammenhang zwischen Extremereignissen und Klimawandel hingegen kontroversiell diskutiert (siehe z. B. Di Baldassarre et al. 2010). Eine zentrale Frage dabei ist, ob Starkniederschläge in der Zukunft zunehmen werden. Die generelle Überlegung dazu basiert darauf, dass nach der Beziehung von Clausius-Clapeyron das Wasserspeichervermögen der Atmosphäre um 7 % pro Grad Temperaturzunahme ansteigt. Wenn man nun annimmt, dass die relative Luftfeuchtigkeit in einer wärmeren Atmosphäre gleich bleibt und das Verhältnis zwischen Niederschlag und Wasserdampf konstant ist, ist eine Zunahme der Starkniederschläge um 7 % bei 1 K Temperaturzunahme zu erwarten. Manche Niederschlagszeitreihen zeigen eine derartigen (und teilweise einen stärkeren) Zusammenhang (z. B. Lenderink and van Meijgaard 2010). Allerdings ergibt sich diese Sensitivität mehr aus der Saisonalität innerhalb eines Jahres als aus den Schwankungen zwischen den Jahren. Deshalb ist die Interpretation in Hinblick auf den Klimawandel problematisch. Auch Klimamodelle ergeben ein gemischtes Bild (siehe z. B. Hanel and Buishand 2010).

In kleinen und Kleinsteinzugsgebieten bei denen Gewitter zu den größten Hochwässern führen ist die Niederschlagsintensität kurzer Dauerstufe der weitaus wichtigste Einflussfaktor, da die hohen Intensitäten zu einer raschen Sättigung des Bodens führen. In mittleren und größeren Gebieten beeinflussen zahlreiche andere hydrologische Prozesse wie die Bodenfeuchte und Schneeschmelze den Abflussvorgang. Hier ist die Beziehung nicht so eindeutig. In ähnlicher Weise werden Nie-

derwässer durch das Wechselspiel von Niederschlag und Verdunstung gesteuert. Deshalb werden in der Regel die Auswirkungen des Klimawandels auf Hochwasser und Niederwasser mittels Szenarienanalysen unter Verwendung einer Modellkette untersucht (Globale Zirkulationsmodelle, Downscaling, Niederschlag-Abflussmodell). Die Schwierigkeit bei solchen Analysen besteht allerdings darin, dass selten klar ist, wie sich die Unsicherheiten in den Annahmen auf die Unsicherheiten der Ergebnisse auswirken. Dadurch können die Ergebnisse nur schwer in ihrer Aussagekraft für die Wasserwirtschaft bewertet werden.

Der vorliegende Beitrag richtet deshalb den Blick auf die Mechanismen der Hochwasser- und Niederwasserentstehung. Damit wird es möglich, kausale Zusammenhänge aufzuzeigen und zu unterscheiden, welche Änderungen mit großer Wahrscheinlichkeit zu erwarten sind (harte Aussagen) und welche Änderungen zwar möglich aber nicht abgesichert sind (weiche Aussagen). Diese Unterscheidung ist essentiell für die Wahl geeigneter Anpassungsmaßnahmen in der Wasserwirtschaft. Die Analysen erfolgen auf Basis von Pegeldaten, sind also für mittlere und große Einzugsgebiete gültig. Details sind in der Studie ZAMG/TU-Wien (2011) zu finden.

2. Hochwasser

2.1. Hochwasserauslösende Prozesse und Saisonalität

In Österreich ist die hydroklimatologische Situation eine wichtige Einflussgröße auf die Hochwasserentstehung. Sie spiegelt sich in der Saisonalität der Hochwasser wider (Abb. 1). In Tirol und Vorarlberg treten Hochwässer vor allem im Hochsommer auf. Dies ist auf die Saisonalität der Niederschläge, die jahreszeitlichen Verteilung der flüssigen Niederschläge (in hohen Lagen), und der erhöhten Abflussbereitschaft im Sommer infolge Schneeschmelze zurückzuführen. In den restlichen Teilen Österreichs ist die jahreszeitliche Verteilung der Hochwässer weni-

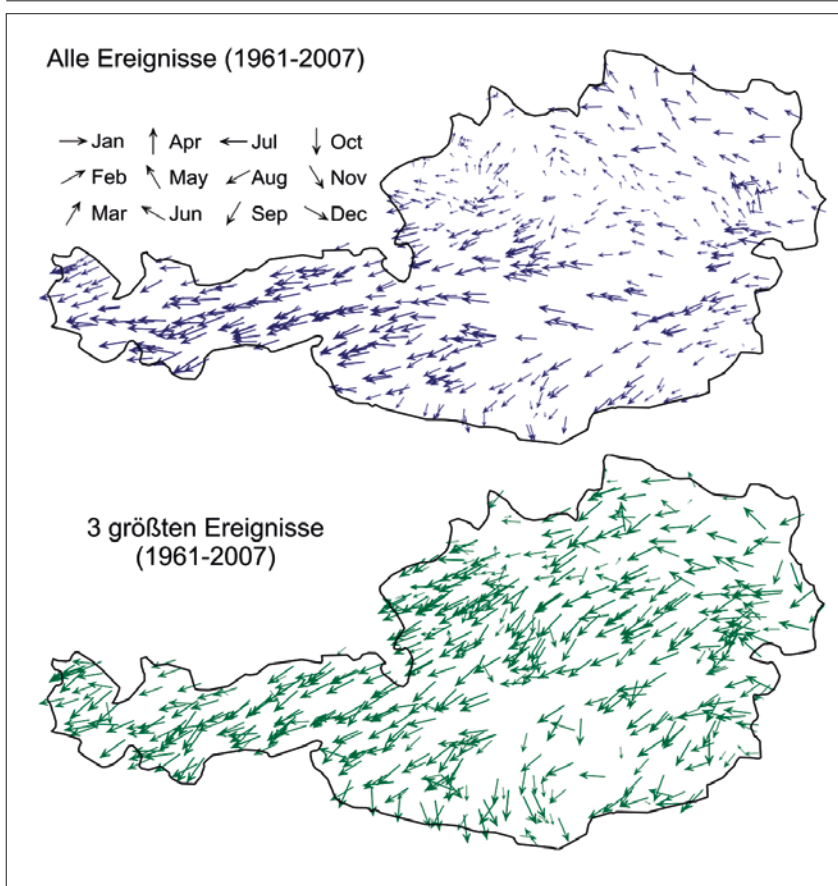


Abb. 1: Saisonalität der maximalen jährlichen Hochwasser in Gebieten < 10000 km². Die Richtung der Pfeile gibt das mittlere Auftretensdatum an (z. B. nach links für Juli, nach rechts für Jänner). Die Länge der Pfeile gibt die Intensität der Saisonalität an (Lange Pfeile: Hochwasser treten nur in einem Monat auf, kurze Pfeile: Hochwasser treten in allen Jahreszeiten gleichmäßig auf). Verändert nach Parajka et al. 2009.

ger stark ausgeprägt. Im nördlichen Alpenvorland führen neben wenigen Hochwasserereignissen während der Schneeschmelzperiode im Winter und Frühjahr langanhaltende großräumige Niederschläge im Sommer zu den maximalen Abflüssen. In den höheren Gebieten des Mühlviertels treten Hochwässer vor allem im Spätwinter auf und sind durch die hohe Vorbefeuchtung zufolge Schneeschmelze bzw. Regen-auf-Schnee Ereignisse (wie auch im Innviertel) geprägt. Für die sommerlichen Maxima im Osten sind lokale Gewitter oft der Auslöser. Im Süden Kärntens und in der Weststeiermark sind Hochwasser im Frühsommer auf Schneeschmelze bzw. Niederschläge auf abflussbereite Böden zurückzuführen, die Hochwasser im Herbst auf Niederschläge, die zumeist von atmosphärischer Feuchtezufuhr aus dem Süden ausgelöst werden (Merz und Blöschl 2003, Parajka et al. 2009). Betrachtet man nur die drei größten Ereignisse (Abb. 1), so verschiebt sich der Zeitpunkt der Hochwässer meist in Richtung Spätsummer, wobei die Saisonalität meist aus-

geprägter ist (*längere Pfeile in Abb. 1*), d. h. extreme Hochwässer treten meist nur in einer bestimmten Jahreszeit auf. Da die Größe der Hochwässer durch das Wechselspiel der Saisonalität von Niederschlag, Schnee und Abflussbereitschaft bestimmt wird, ist die Saisonalität der Schlüssel für das Verständnis des Klimaeinflusses auf Hochwässer.

2.2. Situation in der Vergangenheit

Trendanalysen geben Aufschlüsse über das tatsächliche Verhalten von Hochwasser in der Vergangenheit. Die Vorteile der Trendanalysen bestehen darin, dass sie auf beobachteten Daten aufbauen. Allerdings sind Änderungen in der Landnutzung und im Klima nur schwer nach Anteilen aufzuspalten (Blöschl et al. 2007). Auch wird ihre Aussagekraft durch das Auftreten von Hochwasserdekaden eingeschränkt (Blöschl und Merz 2008). Hochwasserdekaden mit überdurchschnittlichen vielen bzw. großen Hochwässern abgewechselt von hochwasserarmen Dekaden sind in nahezu allen Regionen der

Welt festzustellen (Blöschl and Montanari 2009). Werden Trends in den Hochwasserdaten festgestellt, kann dies durchaus an der Zufälligkeit des Hochwasserprozesses im Zusammenhang mit der Wahl des Zeitfensters liegen und ist kein eindeutiger Beleg für Änderungen in den auslösenden Prozessen. Wegen des Auftretens von Hochwasserjahrzehnten ergeben Trendanalysen oft widersprüchliche Befunde (Kundzewicz et al. 2005). Viele Untersuchungen in Europa zeigen keine konsistenten bzw. interpretierbaren Trends. Allerdings nahmen Winterhochwasser in den letzten 50 Jahren in Süddeutschland deutlich zu (Petrow et al. 2008). Ergebnisse aus der Schweiz zeigen, dass die Häufung von Hochwassern in den letzten Jahren im Rahmen von Hochwasserdekaden früherer Jahrhunderte liegt (Schmocker-Fackel and Naef 2010). Ein aktueller Literaturüberblick über Hochwassertrends ist der ZAMG/TU-Wien Studie (2011) zu entnehmen. Es ist klar, dass sich auch zukünftig Hochwasserdekaden mit Dekaden kleinerer Hochwässer abwechseln und damit eine sehr große natürliche Variabilität bewirken werden.

Um einen aktuellen Überblick über die Situation in Österreich zu erhalten, wurden Reihen der maximalen jährlichen Hochwässer sowie Reihen der maximalen Sommerhochwässer (Mai–Oktober) und Winterhochwässer (September–April) ausgewertet. Alle Hochwasserreihen wurden im Rahmen des HORA Projektes (Merz et al. 2008) qualitätsgeprüft und bei Fehlern oder starken Beeinflussungen korrigiert bzw. aus dem Datensatz entfernt. Hochwasserreihen von 512 Pegelstanden somit zur Verfügung von denen 396 eine Einzugsgebietfläche kleiner 500 km² aufweisen. Mit Hilfe des Mann-Kendall-Tests wurden die Reihen auf das Auftreten von Trends getestet (Burn und Hag Elnur 2002). Das Signifikanzniveau wurde zu jeweils 5% an den beiden Enden der Verteilung gewählt. Da der Test statistisch unabhängige Daten erfordert, wurde die Autokorrelation entfernt (Yue et al. 2003). Als erster Schritt wurde der Trend der Zeitreihe durch den nicht-parametrischen Schätzer nach Sen (1968) geschätzt, wobei β der Median m aller paarweisen Anstiege in der Zeitreihe ist:

$$\beta = m \left[\frac{x_j - x_i}{j - i} \right] \quad (1)$$

für alle $i < j$; x_i, x_j = Abflüsse in den Jahren i, j . Danach wurde der berechnete Trend

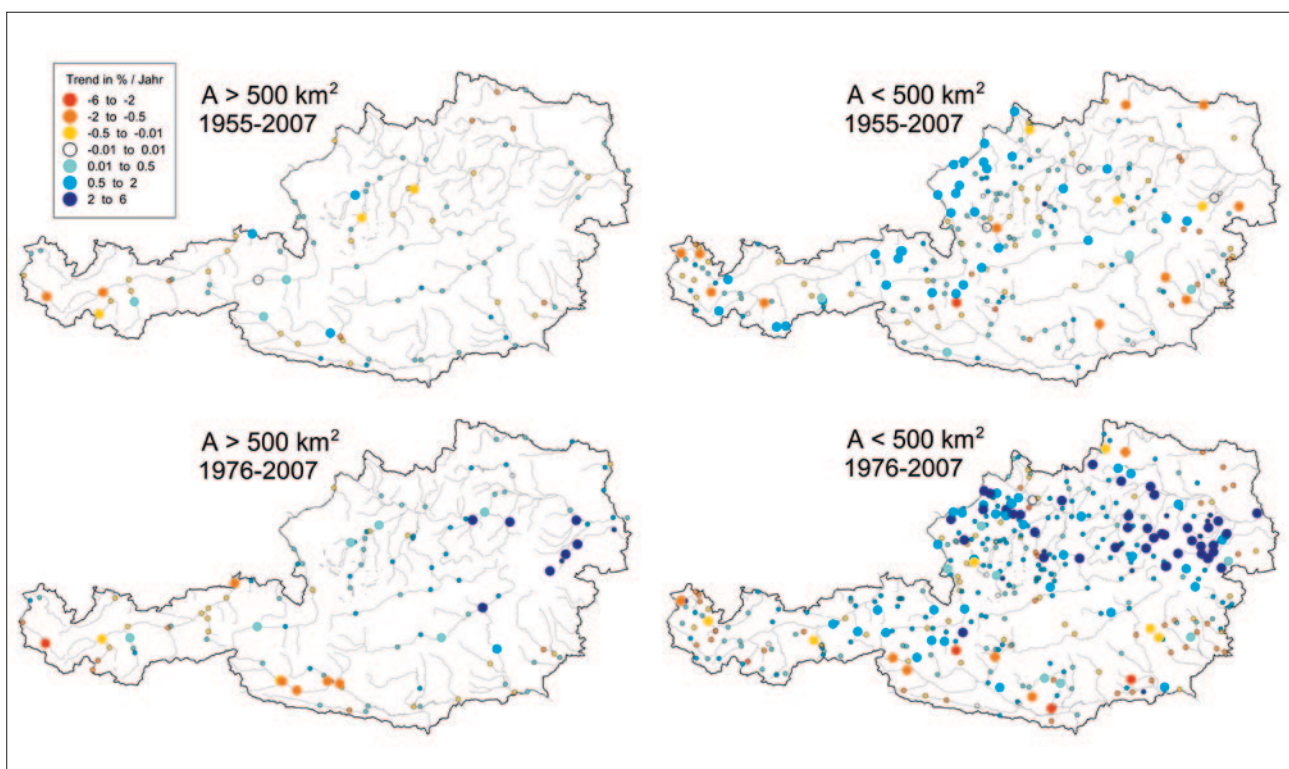


Abb. 2: Trends von Jahresmaxima der Hochwässer für die Reihe 1955–2007 bzw. 1976–2007. Große Kreise blau: steigende Trends, Große Kreise rot: fallende Trends, kleine Kreise: Trends nicht signifikant. Links: Gebiete größer 500 km², rechts: Gebiete kleiner 500 km².

von der Originalreihe abgezogen:

$$Y_t = X_t - \beta \cdot t \tag{2}$$

wobei X_t die Originalzeitreihe und t die Zeit ist. Im dritten Schritt wurde die Lag1-Autokorrelation berechnet. Falls keine signifikante Korrelation ermittelt wurde, wurde der Mann-Kendall-Test direkt auf die Originalzeitreihe angewendet. Andernfalls wurde die Autokorrelation von der Zeitreihe entfernt:

$$Y'_t = Y_t - a_c \cdot Y_{t-1} \tag{3}$$

Dabei ist a_c der Autokorrelationskoeffizient bei einer Zeitdifferenz von einem Jahr ist. Die Zeitreihe Y'_t ist nun frei von einem Trend und serieller Korrelation. Zuletzt wurde der am Anfang abgezogene Trend addiert:

$$Y''_t = Y'_t + \beta \cdot t \tag{4}$$

Die resultierende Zeitreihe Y''_t enthält nun den Original-Trend, ist jedoch ohne Autokorrelation. In den Mann-Kendall-Test fließt die Größetitel treten die hochwasser der Hochwasser nur in ihrem relativen Wert zu den anderen Hochwassern

ein, er ist also nicht auf Ausreißer sensitiv.

Abbildung 2 und Tabelle 1 zeigen die Ergebnisse der Trendanalysen für Österreich. Für den Zeitraum 1955–2007 zeigen 22 % der Gebiete kleiner 500 km² einen signifikant steigenden Trend, jedoch nur 4 % einen fallenden Trend. Diese liegen vor allem nördlich des Alpenhauptkammes. Wird nach Sommer und Winterereignissen unterschieden, so zeigt sich dass bei 30 % der Gebiete die Winterhochwasser zugenommen haben (siehe ZAMG/TU-Wien Studie 2011). Erweitert

man die Trendanalyse auf den Zeitraum 1955–2007, so fallen die Trends weit weniger signifikant aus (Abb. 2 und Tab. 1). Das bedeutet, dass im Zeitraum 1955–1975 große Hochwasser aufgetreten sind wie etwa die Ereignisse 1965 und 1966 in Südösterreich (Rohner et al. 2005). Diese Jahre führen auch vereinzelt zu fallenden Trends. Unter ergänzender Verwendung der einzelnen Zeitreihen können die Trends in Abbildung 2 wie folgt interpretiert werden. Im Rheingebiet dominiert das Hochwasserereignis 2005 die Zeitrei-

TABELLE 1

Prozent der Pegel mit steigenden und fallenden Trends der Jahreshochwasser in Österreich sowie nördlich und südlich des Alpenhauptkammes. Erster Wert: Gebiete >500 km², zweiter Wert: Gebiete <500 km².

	1955–2007 (min. 40 Jahre)			1976–2007 (min. 25 Jahre)		
	Anteil d. Pegel [%] mit			Anteil d. Pegel [%] mit		
	steigendem Trend	nicht signif. Trend	fallendem Trend	steigendem Trend	nicht signif. Trend	fallendem Trend
Alle Gebiete in Österreich	7/17	86/75	7/8	12/22	81/74	7/4
Rhein, Donau und Elbegebiete	7/21	82/71	11/8	14/25	82/72	4/3
Drau, Mur und Raabgebiete	7/5	93/88	0/7	9/10	77/81	14/9

Entsprechend dem gewählten Signifikanzniveau von 5 % sind Werte von 5 % und kleiner als zufällig anzusehen.

hen (z. B. Mellau), im Süden Vorarlbergs liegen jedoch negative Trends vor (z. B. Hoher Steg). Am Tiroler Inn und Zubringer dominiert im Westen wieder das Ereignis 2005, im Süden und Osten liegen jedoch andere große Ereignisse vor, so dass kein Trend abzulesen ist. An der Salzach, Traun, Enns und Zubringer sind besonders in den letzten zwei Jahrzehnten vermehrt Hochwasser (große und kleine) festzustellen. An der Steyr und Traun waren jedoch die Ereignisse 1897, 1899 größer als die im 20. Jahrhundert. Im Innviertel und Mühlviertel liegen keine auffälligen Trends vor. Im Mühl- und Waldviertel sticht jedoch das Ereignis 2002 heraus. Im Osten Österreichs treten wiederum starke steigende Trends in den letzten drei Jahrzehnten auf, die sich jedoch bei Betrachtung einer längeren Reihe relativieren. An der Donau sind steigende Trends seit 1850 in den kleinen Hochwässern, jedoch keine Trends in den großen Hochwässern abzulesen. Bei der Mur und Zubringer ergeben sich keine offensichtlichen Trends in den Hochwasserzeitreihen. Für die Drau und Zubringer dominieren die Hochwässer 1965 und 1966 die Beobachtungsreihen. Die Gail weist steigende Trends kleiner Hochwässer auf. Diese Ergebnisse sind nicht direkt in die Zukunft zu extrapolieren, erlauben aber einen Hintergrund gegen den die Szenarienanalysen betrachtet werden können.

2.3. Situation in der Zukunft

Der Szenarienansatz zur Untersuchung möglicher Auswirkungen des Klimawandels auf hydrologische Größen bringt zahlreiche Unsicherheiten mit sich (Blöschl et al. 2011; Schöner et al. 2011). Beispielsweise kann die zukünftige Entwicklung der Extremwerte des Klimas nicht ausreichend zuverlässig berechnet werden. Dies trifft insbesondere auf Starkniederschläge zu (siehe z. B. Hanel and Buishand 2010). Deswegen sind Prognosen über Hochwasseränderungen nach dem derzeitigen Kenntnisstand nicht möglich. In der Regel werden deshalb Szenarienrechnungen durchgeführt, die eine mögliche zukünftige Entwicklung beschreiben, es handelt sich aber nicht um Prognosen. Szenarienrechnungen in der Literatur über Änderungen der Hochwasser unterscheiden sich z. T. erheblich, ohne auf diese Unsicherheiten einzugehen (siehe ZAMG/TU-Wien Studie 2011). Deshalb sind sie in ihrer Aussagekraft für die Wasserwirtschaft schwer einschätzbar. Blöschl and Monta-

TABELLE 2

Mechanismen möglicher Veränderungen von Hochwässern in Österreich und Einschätzung der Unsicherheit (harte bis weiche Fakten).

Prozess	Erklärung	Fakten
Zunahme Winterniederschlag	Zunahme des Winterniederschlags, Abnahme des Sommerniederschlags (z. B. durch Verschiebung der Zirkulationsmuster)	Mittelhart
Stärkerer konvektiver Niederschlag	Zunahme der Lufttemperatur, dadurch Erhöhung des Anteiles konvektiven Niederschlags und dadurch höhere Niederschlagsintensitäten	Weich
Höhere Schneefallgrenze	Zunahme der Lufttemperatur, dadurch Erhöhung der Schneefallgrenze, dadurch größerer Anteil flüssigen Niederschlags von Ereignissen	Hart
Frühere Schneeschmelze	Zunahme der Lufttemperatur, dadurch Verschiebung der Schneeschmelze in Richtung Winter, dadurch Verschiebung des Jahresverlaufes der Abflussbereitschaft	Hart
Höhere Verdunstung	Zunahme der Lufttemperatur, dadurch Erhöhung der Verdunstung, dadurch Verringerung der Abflussbereitschaft	Hart

nari (2009) schlagen deshalb vor, dass Klimaimpaktanalysen verstärkt untersuchen sollten, durch welche Mechanismen bestimmte Änderungen hervorgerufen werden, anstatt nur auf die Größe der Änderungen abzielen. Dies ist auch der Ansatz, der in dieser Studie verfolgt wird. Den Überlegungen von Blöschl et al. (2011) folgend ist zu erwarten, dass die Reihung von harten bis weichen Fakten der entsprechenden Reihung der wesentlichsten Einflussfaktoren bzw. Prozessen entspricht. Für solche Prozesse, bei denen die Lufttemperatur ein wichtiger Einflussfaktor ist (z. B. Schneeschmelze, Schneerückhalt), sind harte Aussagen für die Hochwasser zu erwarten. Für solche Prozesse, bei denen der mittlere Niederschlag ein wichtiger Einflussfaktor ist, sind mittelharte Fakten zu erwarten, und für Prozesse, bei denen klimatologische Extrema wichtige Einflussfaktoren sind, sind weiche Fakten zu erwarten. Tabelle 2 gibt eine Zusammenstellung der hier betrachteten Mechanismen möglicher Veränderungen von Hochwässern in Österreich.

Zur Einschätzung möglicher Auswirkungen geänderter klimatischer Bedingungen auf das Hochwasserregime wurden Monte Carlo Simulationen für Wenn-Dann Szenarien durchgeführt. Österreich wurde auf Basis der hydroklimatologischen Situation in zehn Regionen unterteilt. Für jede Region wurde ein hypothetisches aber typisches Gebiet modellmäßig beschrieben. Diese Vorgangsweise wurde gewählt, um die möglichen Einflüsse einer Klimaänderung zu verstehen, anstatt ein willkürliches Gebiet zu beschreiben. Es wurde dabei jeweils an ein Einzugsgebiet mit einer Fläche von ca. 500 km² gedacht. Jedes Gebiet beschreibt also

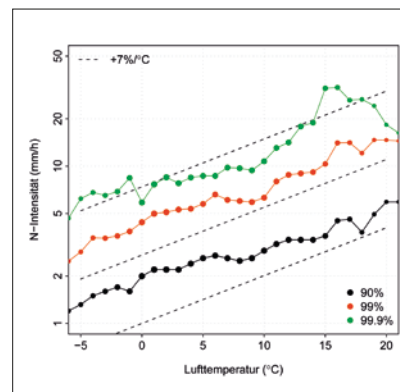


Abb. 3: Abhängigkeit verschiedener extremer Perzentile (90–99,9%) der Verteilung stündlicher Niederschläge von der Lufttemperatur aus Messdaten der Station Pertisau in Tirol. Die strichlierten Linien zeigen eine Zunahme von 7 % pro °C Lufttemperatur.

repräsentativ die Region. Monte Carlo Simulationen wurden durchgeführt, die aus drei Schritten bestehen: (a) Erzeugen einer Niederschlagszeitreihe; (b) Umsetzen dieser Zeitreihe in eine Abflusszeitreihe mittels eines Niederschlag-Abflussmodells; (c) Analyse der Eigenschaften der Niederschlags- und Abflussereignisse. Für die Simulation von Niederschlagszeitreihen wurde das von Sivapalan et al. (2005) entwickelte Modell herangezogen. Die zeitliche Auflösung wurde mit 1 Stunde gewählt. Die insgesamt 16 Parameter, wurden an Niederschlagsdaten jeweils einer typischen Niederschlagsstation in jeder Region geeicht. Das Abflussmodell ist ein Ereignismodell, das die Abflussbildung durch einen Ereignisabflussbeiwert beschreibt. Er wird als Zufallszahl angesehen die einer Beta-Verteilung folgt (siehe Merz et al. 2006). Der Mittelwert des Abflussbeiwertes wurde als jahreszeitlich variabel

angenommen. Die Parameter wurden nach den Ereignisauswertungen von Merz et al. (2006) gewählt. Mit diesem Modell wurden Simulationsläufe zu je 100 000 Jahren durchgeführt. Die Hochwasser mit den größten Scheitelabflüssen in jedem Jahr wurden dann verwendet, um synthetische Hochwasserwahrscheinlichkeitskurven zu erstellen (Ist-Situation).

Das Auftreten jedes Mechanismus laut *Tabelle 2* wurde einzeln als Szenario untersucht, sowie ein kombiniertes Szenario für alle Mechanismen gemeinsam. Gedanklich wurden die Szenarien für den Zeitraum 2021–2050 im Vergleich zu 1976–2007 angesiedelt, obwohl es sich um keine Prognosen, sondern Wenn-Dann Szenarien handelt. Die Szenarien wurden wie folgt festgelegt: Die Verschiebung des Winter/Sommerniederschlag war geleitet durch die Ergebnisse des CLM Klimamodells (Änderungen 2021–2050 bezogen auf den Kontrolllauf, siehe Schönher et al. 2011). Dabei wurde die Anzahl der Ereignisse (und nicht die Niederschlagsintensität) geändert. Die Erhöhung des Anteiles konvektiven Niederschlags wurde durch eine stärkere Variabilität der Intensitäten innerhalb eines Ereignisses beschrieben. Dies hat keinen Einfluss auf die Monatsniederschläge, jedoch einen Einfluss auf die Intensitäten und damit die Regenspendenlinien. Die Parameter des Niederschlagsmodells wurden für dieses Szenario so gewählt, dass die Zunahme des 100 jährlichen Niederschlages für eine Dauer von 6 Stunden – je nach Region – zwischen 2 % und 18 % betrug (im Mittel 7 %). *Abbildung 3* zeigt als Beispiel für eine Station in Tirol, dass die einstündige Niederschlagsintensität um etwa 7 % je 1 °C Lufttemperatur zunimmt. Für 6-Stundenwerte ist die Niederschlagszunahme geringer. Die Erhöhung der Schneefallgrenze wurde durch die Erhöhung des flüssigen Anteils des Niederschlages beschrieben, der aus Beobachtungsdaten verschiedener Regionen in Österreich abgeleitet wurde. Dabei wurde angenommen, dass die Schneefallgrenze um 150 m steigen wird. Die Verschiebung der Schneeschmelze in das Frühjahr wurde durch eine Verschiebung des Jahresverlaufes des Abflussbeiwertes, und die Erhöhung der Verdunstung wurde durch eine Verringerung des Abflussbeiwertes im Sommer in einem Szenario beschrieben. Die Wahl der Parameter war dabei durch kontinuierliche Niederschlag-Abflussimulationen geleitet. Die Monte-Carlo Simulationen wurden geteilt in Hinblick auf die plausible Wiedergabe aller hochwasserrelevanten Parame-

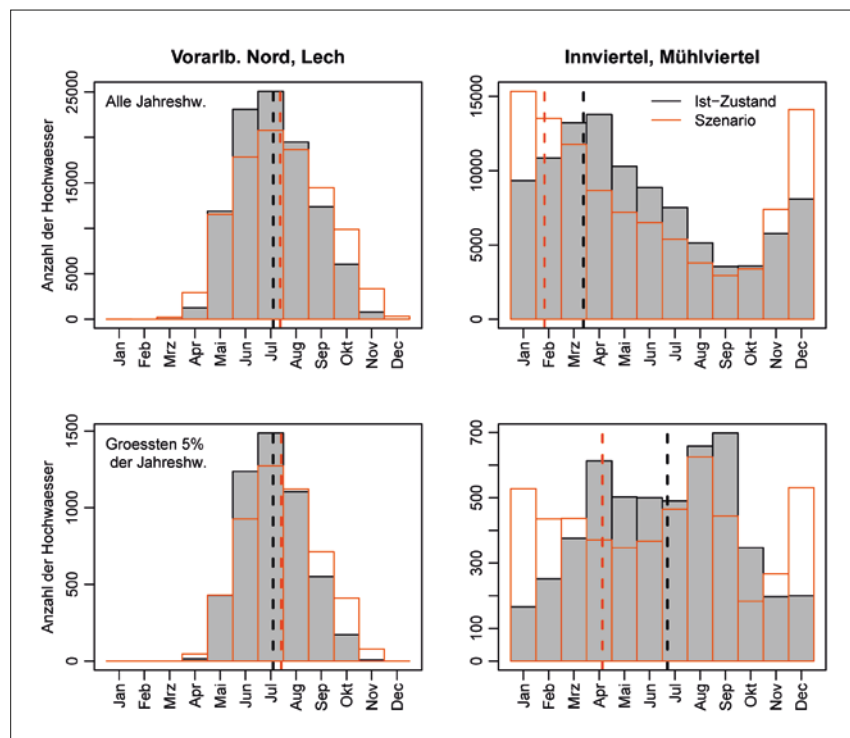


Abb. 4: Simulierte Verteilung des Auftretens der Jahreshochwässer in zwei typischen Einzugsgebieten in der Region Vorarlberg Nord, Lech (links) und der Region Innviertel, Mühlviertel (rechts). Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot). Oben: Alle Jahreshochwasser. Unten: nur die größten 5 % der Jahreshochwasser.

ter, insbesondere der Saisonalität der Hochwässer (siehe ZAMG/TU-Wien Studie 2011).

In Vorarlberg und Tirol treten die Hochwässer im Sommer auf. Im kombinierten Szenario (alle Mechanismen) ist das Auftreten der Hochwässer geringfügig in das Frühjahr und in den Herbst verschoben. Als Beispiel zeigt *Abbildung 4* die Häufigkeiten der simulierten Hochwässer für den Ist-Zustand und die Szenarien, getrennt für alle Jahreshochwasser sowie für die größten 5 % der Hochwässer für die Region Vorarlberg Nord und Lech. Die Saisonalität der Hochwässer in der Traun und Erlaufregion ist ähnlich. Im Innviertel und Mühlviertel treten die Hochwässer vor allem im Frühjahr und Winter auf. Die Häufigkeit der Winterhochwässer wird durch die Szenarien signifikant erhöht (*Abb. 4*). Interessant ist dabei, dass diese Verschiebung in den Winter besonders für die größten 5 % der Hochwässer gilt. Im Osten Österreichs treten die Hochwässer vor allem im Sommer auf, und durch die Szenarien werden sie etwas in den Winter verschoben. An der Mur und Zubringer treten die Hochwässer ebenfalls im Sommer auf, durch die Szenarien wird das Auftreten geringfügig in das Frühjahr und den Herbst verschoben. An der Drau und Zubringer treten Hochwässer sowohl im Frühsom-

mer als auch im Herbst auf. Die Sommerhochwasser werden durch die Szenarien etwas reduziert, die Herbsthochwässer etwas erhöht. Da auch jeder der vier Einzelmechanismen als Szenario simuliert wurde, lässt sich genau bestimmen, welcher Mechanismus in welchem Ausmaß für eine Verschiebung der Saisonalität und für die Änderungen der jährlichen Hochwasserdurchflüsse verantwortlich ist.

Abbildung 5 zeigt die simulierte Änderung des HQ_{100} in einem typischen Gebiet in jeder Region für jeden der Mechanismen getrennt so wie für alle Mechanismen gemeinsam. Für Vorarlberg Süd und die südlichen Innzubringer ergeben sich beispielsweise die folgenden Änderungen: Wenn nur der Mechanismus veränderte Sommer- und Winterniederschläge betrachtet wird, reduziert sich das hundertzehnjährliche Hochwasser um 3 %. Das ist vor allem auf die geringeren Sommerniederschläge in dieser Region zurückzuführen. Wird der Anteil des konvektiven Niederschlags erhöht (unter Beibehaltung aller anderer Annahmen der Ist-Situation) erhöht sich das HQ_{100} um 6 %. Die erhöhte Schneefallgrenze hat einen sehr kleinen Einfluss. Wird der Einfluss früherer Schneeschmelze und damit geringerer Abflussbeiwerte im Sommer betrachtet, vermindert sich das HQ_{100} um 4 %. Bei ge-

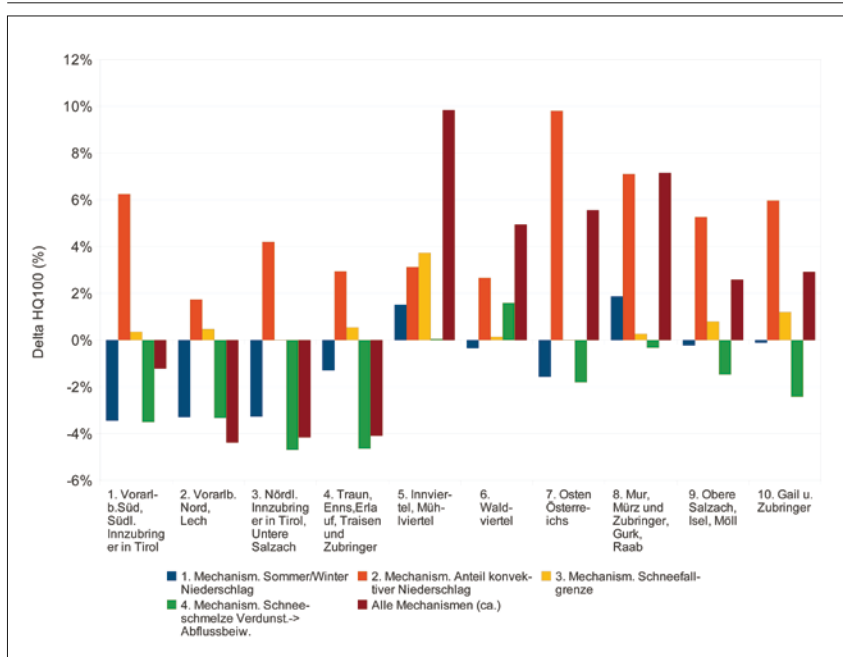


Abb. 5: Wenn-Dann Szenarien für das HQ₁₀₀ bei bestimmten Annahmen der Änderungen der Hochwasser auslösenden Prozesse laut Tabelle 2 (2021–2050 im Vergleich zu 1976–2007).

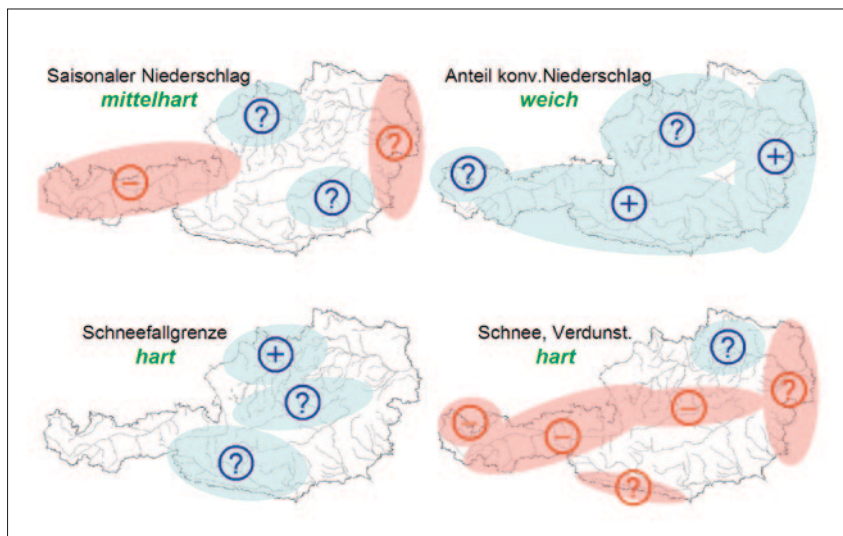


Abb. 6: Generalisierte Änderungen des HQ₁₀₀ aus den Szenarienanalysen (Delta-Change) für die einzelnen Mechanismen laut Tabelle 2. 2021–2050 im Vergleich zu 1976–2007.

meinsamer Betrachtung aller vier Mechanismen ist das kombinierte Ergebnis eine Reduktion des HQ₁₀₀ um 1%. Die einzelnen Komponenten überlagern sich nicht additiv, da sie zu unterschiedlichen Jahreszeiten wirksam sind. Die größten einzelnen Mechanismen für jede Region sind wie folgt: Im Osten Österreich bewirkt die Erhöhung der Konvektivität eine Erhöhung der HQ₁₀₀ um 10% und im Murgebiet um 7%. Für das Inn- und Mühlviertel bewirkt die Erhöhung der Schneefallgrenze eine Erhöhung der HQ₁₀₀ um 4%. Für die nördlichen Innzubringer sowie für die Region von der Traun bis zur Traisen bewirkt

eine frühere Schneeschmelze eine Abnahme des HQ₁₀₀ um 5%. Die größten gesamten Änderungen treten im Inn- und Mühlviertel mit 10% Erhöhung des HQ₁₀₀ auf, gefolgt vom Murgebiet mit 7%. Die verhältnismäßig große Erhöhung im Inn- und Mühlviertel liegt daran, dass in dieser Region alle Mechanismen positiv zu einer Erhöhung des HQ₁₀₀ beitragen, während in den anderen Regionen manche Mechanismen zu einer Reduktion der HQ₁₀₀ führen, wodurch der Gesamteffekt reduziert wird.

Die Zusammenschau der Szenarienanalysen für die verschiedenen Mechanis-

men (Abb. 6) zeigt für den Einfluss der saisonalen Niederschläge ein unklares Bild. Eine Zunahme des konvektiven Anteils der Niederschläge wirkt sich überall in einer Zunahme der Hochwässer aus, allerdings handelt es sich dabei um eine weiche Aussage. Eine Erhöhung der Schneefallgrenze wirkt sich nur gering auf die Hochwässer aus, mit Ausnahme des Inn- und Mühlviertels. Wird der Einfluss früherer Schneeschmelze und damit geringerer Abflussbeiwerte im Sommer betrachtet, vermindern sich die Hochwässer, insbesondere in den Alpen. Eine gemeinsame Analyse aller Mechanismen ergibt im Bereich des nördlichen Alpenrandes geringe Abnahmen des Hochwassers. Allerdings handelt es sich dabei um eine weiche Aussage. Im übrigen Österreich zeigen die Szenarien kleine Zunahmen, die durchwegs als weiche Aussagen anzusehen sind. Im Innviertel und Mühlviertel ergeben sich etwas größere Zunahmen, die als mittelharte Aussagen angesehen werden, da sie durch mehrere Mechanismen gemeinsam produziert werden.

Ein Vergleich der Szenarien mit den Trendanalysen (Abb. 2) ergibt folgendes Bild: Im Innviertel und Mühlviertel ergeben sowohl die Trendanalysen als auch die Szenarien Anstiege. Am nördlichen Alpenrand zeigen die Trendanalysen Anstiege (möglicherweise wegen veränderter atmosphärischer Zirkulationsmuster), die Szenarien zeigen jedoch eine Reduktion der Hochwässer wegen der geringeren projizierten Monatsniederschläge und früherer Schneeschmelze. Im übrigen Österreich hängt die Konsistenz der Trendanalysen und Szenarien von der Wahl des Beobachtungszeitraumes ab. Dies weist darauf hin, dass die natürliche Variabilität der Hochwasser wesentlich größer ist, als die erwartete Änderung zufolge des Klimawandels. Es ist deshalb anzunehmen, dass die in der Vergangenheit eminent große Variabilität der Hochwässer auch in der Zukunft bei der Ermittlung von Bemessungswerten im Vordergrund stehen wird.

3. Niederwasser

3.1. Niederwasserauslösende Prozesse und Saisonalität

Wie für die Hochwässer gilt auch für die Niederwässer, dass das Verständnis der Einflussfaktoren der Schlüssel für belastbare Aussagen über den Klimaeinfluss sind. Die niederwasserauslösenden Prozesse in Österreich unterscheiden sich im

wesentlichen nach der Höhenlage (Laaha und Blöschl 2006 2007a). Im Flachland des Nordens, Ostens sowie Südostens treten die Niederwässer vorwiegend im Sommer auf. Der wesentliche Mechanismus besteht darin, dass die Verdunstung im Sommer eine geringe Bodenfeuchte bewirkt. Längere niederschlagsfreie Perioden führen dann zu Niederwassersituationen. Ein Beispiel ist der Sommer 2003 (Laaha und Blöschl 2007b). In den Alpen treten hingegen die Niederwässer vorwiegend im Winter auf. Die Zone mit ausgeprägter Wintersaisonalität umfasst den alpinen Bereich von Vorarlberg bis zum Wechselgebiet mit einer Nord-Süd Erstreckung von den nördlichen Kalkalpen bis Oberkärnten. Der wesentliche Mechanismus besteht im Schneerückhalt der Gebiete bzw. Gefrierprozesse, die die Abflüsse reduzieren. Im Sommer wirkt in diesen Gebieten hingegen Schneeschmelze und eine kleinere Verdunstung dem Auftreten von Niederwassersituationen entgegen. Die Saisonalität ist ein Indikator für die niederwasserauslösenden Prozesse, die wiederum zentral für den Einfluss der Klimaänderung auf Niederwasser sind.

3.2. Situation in der Vergangenheit

Trenduntersuchungen der Niederwässer in Europa ergeben in der Regel keine klaren Muster (Hisdal et al. 2001). Um einen Einblick in die zeitliche Entwicklung der Niederwasserdurchflüsse in Österreich zu erhalten, wurden Pegeldaten ausgewertet. Abflusszeitreihen die stark durch wasserwirtschaftliche Maßnahmen beeinflusst sind wurden dabei aus dem Datensatz entfernt wonach 463 Pegel für die Analyse zur Verfügung standen. Da Trendanalysen von Niederwässern besonders sensitiv auf wasserwirtschaftliche Beeinflussungen sind, wurden Pegel mit mittleren Beeinflussungen im Niederwasserbereich markiert. Als kennzeichnende Niederwassergröße wurde der Q_{95} Niederwasserdurchfluss ausgewählt. Das Q_{95} ist jener Durchfluss, der an 95 % der Tage eines Jahres überschritten wird. Wie für die Hochwasser wurde der Mann-Kendall-Test unter Entfernung der Autokorrelation (Yue et al. 2003) herangezogen und ein Signifikanzniveau von jeweils 5 % an den beiden Enden der Verteilung gewählt.

Die Trends der Jahresniederwasserdurchflüsse sind in *Abbildung 7* dargestellt. Eine Auszählung der Pegel mit signifikant steigenden und fallenden Trends findet sich in *Tabelle 3*. Die mei-

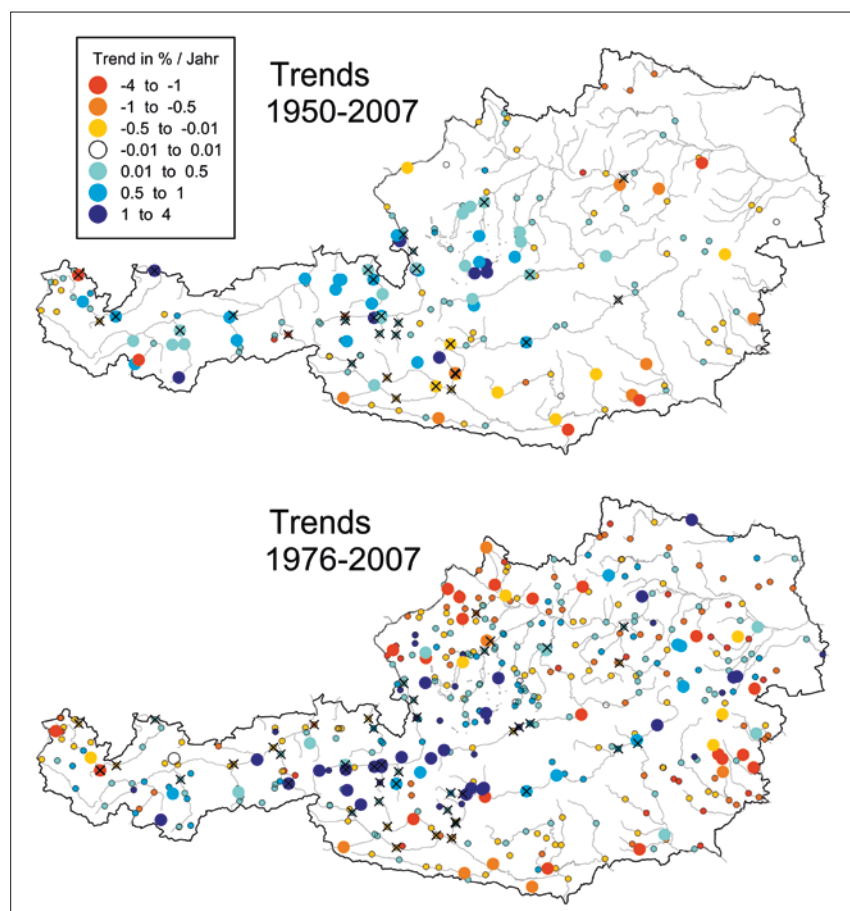


Abb. 7: Trends der Jahresniederwasserdurchflüsse Q_{95} für die Periode 1950–2007 bzw. 1976–2007. Große Kreise blau: steigende Trends, Große Kreise rot: fallende Trends, kleine Kreise: Trends nicht signifikant. Kreuze zeigen Pegel, die durch Überleitung/Speicher beeinflusst sind.

sten Pegel zeigen keine signifikanten Trends für die beiden untersuchten Perioden 1950–2007 bzw. 1976–2007. In den Alpen häufen sich jedoch Pegel mit einem positiven Trend. In Gebieten über 900 m Seehöhe haben in den letzten 30 Jahren in 14 % der Einzugsgebiete in Österreich die

Niederwasserdurchflüsse zugenommen, in den letzten 60 Jahren waren es 34 %. Dem gegenüber haben nur in 3 bzw. 8 % der Gebiete die Niederwasserdurchflüsse abgenommen. Die Zunahme in den alpinen Gebieten Österreichs kann gut mit den gestiegenen Lufttemperaturen in Zu-

TABELLE 3

Prozent der Pegel mit steigenden und fallenden Trends der Niederwasserdurchflüsse Q_{95} in Österreich. h ist die mittlere Einzugsgebiets-höhe. Nur die unbeeinflussten bzw. gering beeinflussten Pegel sind ausgezählt. Entsprechend dem gewählten Signifikanzniveau von 5 % sind Werte von 5 % und kleiner als zufällig anzusehen.

	1950 - 2007 (min. 45 Jahre)			1976 - 2007 (min. 25 Jahre)		
	Anteil d. Pegel [%] mit			Anteil d. Pegel [%] mit		
	steigendem Trend	nicht signif. Trend	fallendem Trend	steigendem Trend	nicht signif. Trend	fallendem Trend
Alle Gebiete in Österreich	19	73	8	8	85	7
Gebiete mit $h < 900$ m	5	82	13	5	84	11
Gebiete mit $h > 900$ m	34	58	8	14	83	3

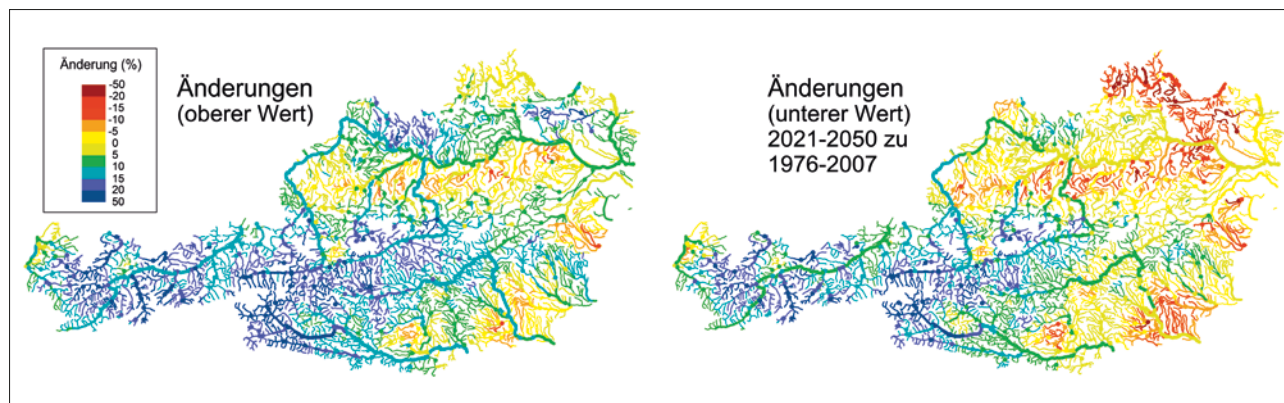


Abb. 8: Änderungen des Q95 Niederwasserdurchflusses für den Zeitraum 2021-50 im Vergleich zu 1976-2007 (%) berechnet mit dem Niederschlag-Abflussmodell. Blau: Zunahme, rot: Abnahme. Abbildungen links und rechts wurden mit unterschiedlichen, gleich plausiblen Parametern des Niederschlag-Abflussmodells berechnet.

sammenhang gebracht werden. Durch die steigende Lufttemperatur fallen der Schneerückhalt und die Gefrierprozesse weniger stark aus als dies noch vor einigen Jahrzehnten der Fall war, deswegen sind die Niederwasserdurchflüsse an mehreren Pegeln gestiegen.

Unter 900 m Seehöhe haben in den letzten 30 Jahren in 11 % der Einzugsgebiete in Österreich die Niederwasserdurchflüsse abgenommen, in den letzten 60 Jahren waren es 13%. Eine Abnahme ist insbesondere im Süden und Südosten Österreichs festzustellen, sowie im Innviertel und zum Teil in Vorarlberg. Dem gegenüber haben nur in 5 % der Gebiete die Niederwasserdurchflüsse zugenommen. Im Flachland des Nordens, Ostens sowie Südostens besteht der wesentlich Niederwassermechanismus in der Verdunstung im Sommer. Durch die steigende Lufttemperatur ist die Verdunstung gestiegen. Obwohl in

den letzten Jahrzehnten auch die Sommerniederschläge gestiegen sind (Abb. 3 in Schöner et al. 2011), führte die stärkere Verdunstung zu fallenden Trends des Niederwasserdurchflusses an mehreren Pegeln. Interessant ist, dass die räumlichen Muster der Niederwassertrends mit denen des Mittelwassertrends korreliert sind (siehe Blaschke et al. 2011).

3.3. Situation in der Zukunft

Szenarienrechnungen für Deutschland ergeben meist keine eindeutigen Trends der Niederwasserdurchflüsse (KLIWAS 2009), da die Ergebnisse stark von den gewählten Modellen und den Modellannahmen abhängen. Für die Schweiz hingegen wird eine Abnahme von Niederwasser im Flachland und ein Zunahme in den Alpen projiziert (OcCC/ProClim 2007). Zur Einschätzung möglicher Auswirkungen geän-

derter klimatischer Bedingungen auf die Niederwässer in Österreich wurden hier Niederschlag-Abflussimulationen mit dem Delta-Change Ansatz durchgeführt. Dabei wurde ein Niederschlag-Abflussmodell an zahlreiche Pegeln in Österreich für die Referenzperiode 1976-2006 geeicht und getestet. Die mit den CLM Klimasimulationen ermittelten Differenzen der mittleren monatlichen Lufttemperaturen 2021-2050 minus 1976-2006 sowie die prozentuelle Änderungen der Niederschläge wurden zu dem beobachteten Lufttemperaturen und Niederschlägen addiert, wodurch sich das Delta-Change Szenario ergab. Die simulierten Abflüsse wurden mittels Top-kriging regionalisiert (Skøien et al. 2006) und die Differenzen 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2006 ausgewertet (siehe Blaschke et al. 2011, Parajka et al. 2005 2007). Bei Szenarienanalysen wird in der Regel angenommen, dass

LITERATUR

- Blaschke AP, Merz R, Parajka J, Salinas JL, Blöschl G (2011) Auswirkungen des Klimawandels auf das Wasserdargebot von Grund- und Oberflächenwasser. Österr. Wasser- und Abfallw. Dieses Heft
- Blöschl G, Montanari A (2009) Climate change impacts – throwing the dice? Hydrol. Process. DOI: 10.1002/hyp.7574
- Blöschl G, Merz R (2008) Bestimmung von Bemessungshochwassern gegebener Jährlichkeit – Aspekte einer zeitgemäßen Strategie. Wasserwirtschaft, 98 (11) 12–18
- Blöschl G, Schöner W, Kroiß H, Blaschke AP, Böhm R, Haslinger K, Kreuzinger N, Merz R, Parajka J, Salinas JL, Viglione A (2011) Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft – Ziele und Schlussfolgerungen der Studie für Bund und Länder. Österr. Wasser- und Abfallw. Dieses Heft
- Blöschl G, Ardoin-Bardin S, Bonell M, Dorninger M, Goodrich D, Gutknecht D, Matamoros D, Merz B, Shand P, Szolgay J (2007) At what scales do climate variability and land cover change impact on flooding and low flows? Hydrological Processes, 21, 1241–1247
- Böhm R (2010) Heiße Luft – nach Kopenhagen.

- Reizwort Klimawandel. Fakten – Ängste – Geschäfte. 2. Aufl. Wien, Klosterneuburg: Edition Va Bene, Wien, 280 pp
- Burn DH, Hag Elnur MA (2002) Detection of hydrologic trends and variability. Journal of Hydrology, 255, 107–122
- Di Baldassarre G, Montanari A, Lins H, Koutsoyiannis D, Brandimarte L, Blöschl G (2010) Flood fatalities in Africa: From diagnosis to mitigation. Geophys. Res. Lett., 37, L22402, DOI:10.1029/2010GL045467
- GCA (2009) Global Change Atlas, Einzugsgebiet Obere Donau. GLOWA-Danube Projekt, Universität München
- Hanel M, Buishand TA (2010) On the value of hourly precipitation extremes in regional climate model simulations. Journal of Hydrology, 393, 265–273
- Hisdal H, Stahl K, Tallaksen LM, Demuth S (2001) Have droughts in Europe become more severe or frequent? International Journal of Climatology 21, 317–333
- IPCC (2007) Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change;

- FAQs [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- KLIWAS (2009) Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland. Tagungsband 1. Statuskonferenz – März 2009 – Bonn
- Kundzewicz Z, Graczyk D, Maurer T, Pinskiwar I, Radziejewski M, Svensson C, Szwed M (2005) Trend detection in river flow series: 1. Annual maximum flow. Hydrological Sciences Journal, 50, 797–810
- Laaha G, Blöschl G (2007a) A national low flow estimation procedure for Austria. Hydrological Sciences Journal, 52 (4), pp. 625–644
- Laaha G, Blöschl G (2006) Seasonality indices for regionalizing low flows. Hydrological Processes 20, pp. 3851–3878
- Laaha G, Blöschl G (2007b) Niederwasser-spende. In: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW), Hydrologischer Atlas Österreichs, 3. Lieferung Karte 5.8; Österreichischer Kunst- und Kulturverlag, Wien; ISBN 3-85437-250-7

die im Referenzzeitraum aufgetretenen Abflussprozesse auch in der Zukunft gelten. Die durch das Niederschlag-Abflussmodell beschriebenen Prozesse (Verdunstung, Schneeprozesse, Abflussbildung und Konzentration) sind aber – wie alle hydrologischen Vorgänge – zeitlich variabel und können sich über die Dekaden verschieben (Merz et al. 2011). Grund dafür können z. B. Änderungen in der Vegetation (Zunahme des Waldanteils, Zunahme der Transpiration) sein. Deswegen sind die Modellparameter mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Um diese abzuschätzen, wurden die Simulationen mit geringfügig veränderten Parameterwerten durchgeführt. In zwei Varianten (oberer Wert bzw. unterer Wert) wurde der Parameter für die Abflussbildung gegenüber der Eichung um ca. 10 % erhöht bzw. erniedrigt. Die unterschiedlichen Abflüsse in den beiden Varianten geben einen Hinweis auf die Zuverlässigkeit des Abflussmodells unter der Annahme, dass die Szenarien des Niederschlags und der Lufttemperatur vollständig zutreffen (Abb. 8).

Die Szenarienrechnungen zeigen für die Alpen Österreichs (hochgelegene Gebiete, Winterniederwasserregime) eine deutliche Zunahme der Niederwasserdurchflüsse für den Zeitraum 2021–2050 im Vergleich zu 1976–2006. Die Zunahme beträgt etwa 10–30 %. In den niedrigen Gebieten Österreichs sowie im Alpenvorland geben die Szenarienrechnungen differenzierte Ergebnisse. Im manchen Einzugsgebieten wird eine leichte Zunahme berechnet (z. B. Mühlviertel). In anderen Gebieten wird eine Abnahme der Nieder-

wasserdurchflüsse von etwa 10–20 % berechnet (z. B. Weinviertel, Nördliches Burgenland, Teile der Südsteiermark, Teile des niederösterreichischen Alpenvorlands). In Ausnahmefällen ist die Abnahme auch etwas größer. Die Abnahme der Niederwasserdurchflüsse im Osten betrifft alle Jahreszeiten, die Zunahme im Westen hingegen den Winter und das Frühjahr. Die beiden in *Abbildung 8* gezeigten Simulationen geben einen Hinweis auf die Unsicherheit der Szenarienrechnungen die alleine aus der Niederschlag Abflussmodellierung folgt. Die Unsicherheit der Klimaszenarien kommt noch hinzu. Die Zunahme der Niederwasserdurchflüsse in den Alpen ist bei beiden Simulationsrechnungen eindeutig. Die Abnahme der Niederwasserdurchflüsse im Osten und Südosten ist weniger klar und je nach Szenario unterschiedlich stark ausgeprägt. Da in diesen Teilen der Abfluss besonders sensitiv auf das Niederschlagsverhalten reagiert (Blaschke et al. 2011) ist auch die Unsicherheit zufolge des Niederschlags groß. Ändern sich die Niederschläge nicht, ist für den Osten und Südosten zufolge der erhöhten Verdunstung mit einer deutlichen Abnahme der Niederwasserdurchflüsse zu rechnen. Um ungünstigsten Fall kann diese Abnahme bis zu 30 % betragen (*Abb. 8, rechts*).

4. Zusammenfassung und Konsequenzen

In den letzten Jahrzehnten sind in Österreich vermehrt Hochwässer aufgetreten, besonders in mittleren und kleinen Gebieten nördlich des Alpenhauptkammes, wo-

bei die Zunahme der Winterhochwässer überproportional war. Diese Häufung liegt im Rahmen der natürlichen Variabilität von Hochwasserdekaden, aber auch ein Einfluss einer Klimaänderung ist nicht auszuschließen. Nach dem derzeitigen Wissensstand ist für die Zukunft vor allem eine jahreszeitliche Verschiebung der Hochwässer zu erwarten, die aber je nach Region unterschiedlich ausgeprägt ist. Für das Innviertel und Mühlviertel ist mit deutlich mehr Winterhochwässern zu rechnen. Dadurch dürften auch die Hochwasserdurchflüsse insgesamt deutlich größer werden. Eine Überprüfung der Bemessungswerte im Innviertel und Mühlviertel erscheint deshalb notwendig. In den anderen Regionen Österreichs fallen die jahreszeitliche Verschiebung und auch die großemäßige Änderungen der Hochwasser bei den Berechnungen weniger stark aus. Es ist anzunehmen dass Änderungen der Hochwässer in dieser Größenordnung durch die bestehenden Abläufe bei der Aktualisierung von Bemessungswerten abgedeckt werden, sofern die Bemessung mit möglichst umfangreicher Information durchgeführt wird. Diese sollte, je nach Datenlage und Gebietsgröße, aus einer Kombination von Hochwasserstatistik, regionaler Information, historischer Information und Niederschlag-Abflussmodellierung bestehen. Dies ist mit dem neuesten Stand der Technik durchaus konform, da das neue Merkblatt DWA-M 552 zur „Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten“ eine Kombination dieser Informationsquellen vorsieht (siehe auch Merz und Blöschl 2008). Die Befunde aus der Literatur sowie die für

Lenderink G, van Meijgaard E (2010) Linking increases in hourly precipitation extremes to atmospheric temperature and moisture changes. *Environ. Res. Lett.* 5, 025208, DOI:10.1088/1748-9326/5/2/025208

Merz R, Blöschl G (2003) A process typology of regional floods. *Water Resources Research*, 39 (12), article number 1340

Merz R, Blöschl G, Humer G (2008) Hochwasserabflüsse in Österreich – das HORA Projekt. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 60, (9–10) 129–138

Merz R, Blöschl G (2008) Informationserweiterung zur Bestimmung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 52, (6) 300–309

Merz R, Blöschl G, Parajka J (2006) Raumzeitliche Variabilität von Ereignisabflussbeiwerten in Österreich. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 50 (1), pp. 2–11

Merz R, Parajka J, Blöschl G (2011) Time stability of catchment model parameters – implications for climate impact analyses. *Water Resources Research*. In press.

OcCC/ProClim (2007) Klimaänderung und die Schweiz 2050, Erwartete Auswirkungen auf Um-

welt, Gesellschaft und Wirtschaft, Bern

Parajka J, Merz R, Blöschl G (2005) Regionale Wasserbilanzkomponenten für Österreich auf Tagesbasis (Regional water balance components in Austria on a daily basis) *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 57 (3/4), pp. 43–56

Parajka J, Merz R, Blöschl G (2007) Uncertainty and multiple objective calibration in regional water balance modeling – Case study in 320 Austrian catchments. *Hydrological Processes*, 21, pp. 435–446

Parajka J, Kohnová S, Merz R, Szolgay J, Hlavcová K, Blöschl G (2009) Comparative analysis of the seasonality of hydrological characteristics in Slovakia and Austria. *Hydrological Sciences Journal*, 54 (3) 456–473

Petrow T, Delgado JMM, Merz B (2008) Trends der Hochwassergefährdung in Deutschland (1951 bis 2002) und Konsequenzen für die Bemessung. *Wasserwirtschaft* 98 (11), 24–28

Rohner K, Berger I, Steiger H, Moser J, Pichler F, Sereinig N (2005) Hochwasserchronik Kärnten 1992–2003, Amt der Kärntner Landesregierung Abteilung 18 – Wasserwirtschaft. http://www.verwaltung.ktn.gv.at/12157_DE-Organisation-Schutzwasserwirtschaft.htm

Schmocker-Fackel P, Naef F (2010) Changes in flood frequencies in Switzerland since 1500. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 1581–1594

Schöner W, Böhm R, Haslinger K (2011) Klimaänderung in Österreich – hydrologisch relevante Klimatelemente. *Österr. Wasser- und Abfallw.* Dieses Heft

Sivapalan M, Blöschl G, Merz R, Gutknecht D (2005) Linking flood frequency to long-term water balance: incorporating effects of seasonality. *Water Resources Research*, 41, W06012, DOI:10.1029/2004WR003439

Sköien J, Merz R, Blöschl G (2006) Top-kriging – geostatistics on stream networks. *Hydrology and Earth System Sciences* 10, pp. 277–287

Yue S, Pilon P, Phinney B (2003) Canadian streamflow trend detection: impacts of serial and cross-correlation. In: *Hydrological Sciences Journal* 48, Heft 1, S. 51–63

ZAMG/TU-Wien Studie (2011) Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft. *Endbericht*. Lebensministerium

Österreich ausgewerteten Daten und Modellszenarien deuten darauf hin, dass die in der Vergangenheit eminent große Variabilität der Hochwasser auch in der Zukunft bei der Ermittlung von Bemessungswerten im Vordergrund stehen wird. Besonders in kleinen Gebieten ist die Unsicherheit von Bemessungswerten im derzeitigen Klima basierend auf traditionellen Bemessungsverfahren wesentlich größer als die hier diskutierten Änderungen zufolge Klimawandel. Bei der Bestimmung von Bemessungswerten des Hochwassers ist deshalb das Auftreten von Hochwasserdekaden zu berücksichtigen, und die Unsicherheit womöglich durch Verwendung einer möglichst weitreichenden Datenbasis zu reduzieren.

Die in den vergangenen Jahrzehnten beobachteten Trends in den Niederwasserdurchflüssen werden sich vermutlich fortsetzen. Die beobachtete Zunahme der Niederwasserdurchflüsse in den alpinen Teilen Österreichs wird auch für die nächsten Jahrzehnte erwartet. Aus wasserwirtschaftlicher Perspektive sind hier eher positive Effekte zu erwarten (z. B. Wasserkraft). Im Flachland im Osten bzw. Südosten Österreichs dürften sich die beobachteten Abnahmen ebenfalls fortsetzen, jedoch in geringem Ausmaß und räumlich differenziert. Diese Änderungen sind sehr stark vom Niederschlagsregime abhängig. Falls die Sommerniederschläge abnehmen, sind durchaus deutliche Abnahmen des Niederwasserdurchflusses zu erwarten. Da die natürliche Variabilität des Abflusses zwischen den Jahren größer ist als die zufolge Klimaänderung für 2021–2050 erwarteten Änderungen, erscheinen aus österreichweiter Sicht nicht grundsätzlich andere Bewirtschaftungsmaßnahmen der Oberflächenwasser not-

wendig. In den Flachlandgebieten im Osten bzw. Südosten Österreich könnten jedoch bereits geplante Maßnahmen betreffend Niederwasser in diesen Gebieten höhere Priorität gegeben und zeitlich vorgezogen werden. Im Einzelfall könnten wasserwirtschaftliche Maßnahmen notwendig ein, wie beispielsweise Speicherbewirtschaftung zur Aufhöhung der Niederwassersituation oder eine Aufbereitung des Uferfiltrats falls es zu Wasserqualitätsproblemen kommt. Die Einrichtung von Niederwasserprognosen (Frühwarnung) wäre anzudenken um besser auf etwaige Niederwassersituationen reagieren zu können.

Obwohl die vorliegende Studie die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf Hochwasser und Niederwasser und daraus folgernde Anpassungsmaßnahmen ausführlich untersucht hat, verbleiben zahlreiche offene Fragen. Die Arbeiten haben die Notwendigkeit aufgezeigt, verstärkt die Mechanismen bestimmter Änderungen bei Klimaimpaktanalysen zu untersuchen, anstatt nur auf die Größe der Änderungen abzielen. Werden Simulationen durchgeführt, die die Mechanismen nicht transparent betrachten, können die Ergebnisse mitunter wenig vertrauenswürdig sein, auch wenn der numerische Rechenaufwand enorm ist (z. B. GCA 2009). Ein derartige Vorgehensweise ist nicht zu empfehlen. Für kleine Einzugsgebiete ist die zentrale Frage, ob Starkniederschläge in der Zukunft zunehmen werden, nach wie vor ungeklärt. Eine deutliche Zunahme ist nach dem derzeitigen Wissensstand nicht auszuschließen. Umfassendere Datenanalysen, besonders von Starkniederschlägen und die zugehörigen Hochwasserereignisse, sind besonders in kleinen Einzugs-

gebieten notwendig damit die Mechanismen auf regionaler Ebene besser verstanden werden. Dafür ist es auch notwendig, den Klimaeinfluss und anthropogenen Einfluss (z. B. durch wasserwirtschaftliche Maßnahmen) besser trennen zu können. Dies gilt sowohl für Hochwasser als auch für Niederwasser. Eine Orientierung über die wasserwirtschaftlichen Konsequenzen von Niederwassersituationen bei Klimaänderung im Sommer kann das Niederwasserjahr 2003 geben. Dafür wäre eine Analyse dieses Sommers aus wasserwirtschaftlicher Perspektive von Interesse. Mit derartigen Auswertungen wäre es möglich, die Zuverlässigkeit und Vorhersagbarkeit von Änderungen hydrologischer Extreme in einem geänderten Klima und ihre wasserwirtschaftlichen Konsequenzen genauer zu bestimmen.

Danksagung

Diese Studie wurde durchgeführt im Auftrag des BMLFUW Sektion VII und der wasserwirtschaftlichen Abteilungen der Ämter aller Landesregierungen Österreichs. Diese Publikation zeigt auch Ergebnisse des Projektes Predictability of runoff in a changing environment (ÖAW). ■

Korrespondenz:

Günter Blöschl
Alberto Viglione
Ralf Merz
Juraj Parajka
José Luis Salinas
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/222
1040 Wien
E-Mail: bloeschl@hydro.tuwien.ac.at

Wolfgang Schöner
Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik
Hohe Warte 38
1190 Wien
E-Mail: wolfgang.schoener@zamg.ac.at