

Auswirkungen des Klimawandels auf das Wasserdargebot von Grund- und Oberflächenwasser

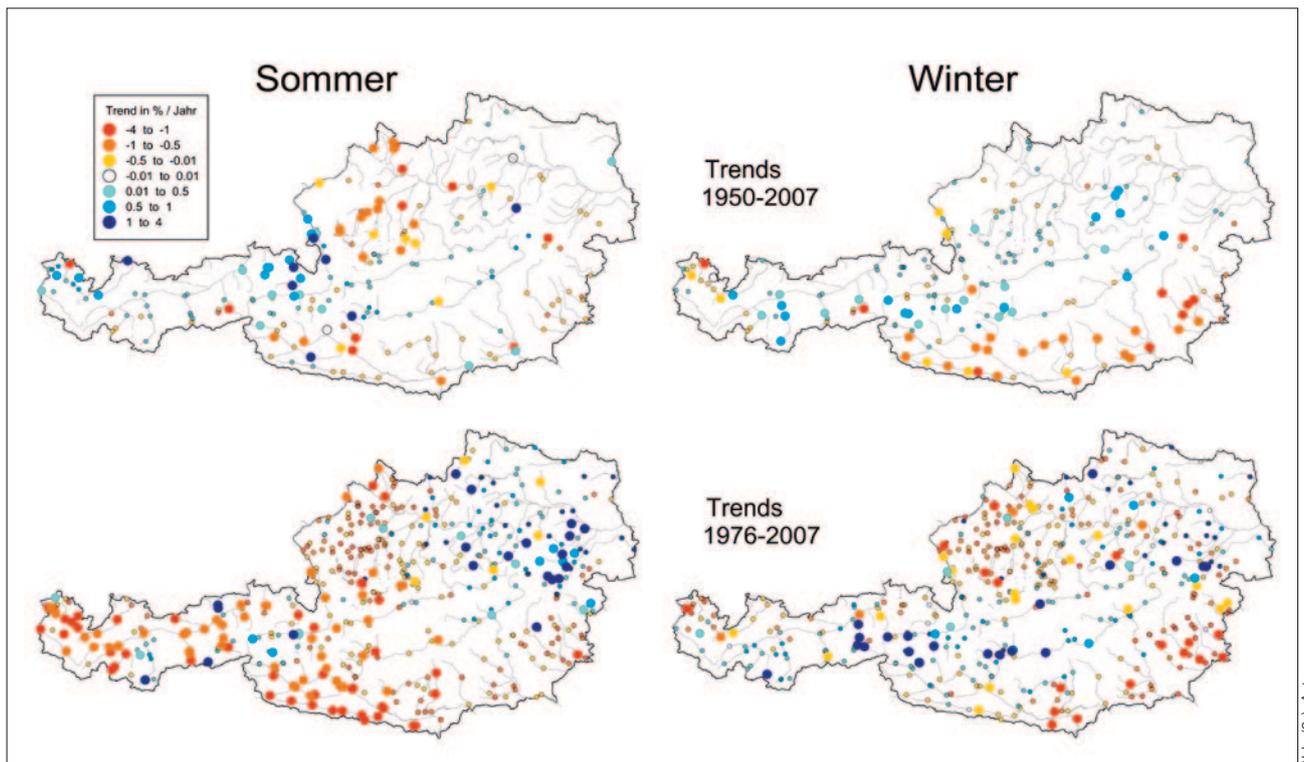


Abb. (9): Autor

Abb. 1: Trends der Sommerabflüsse (Juni–August, links) und Winterabflüsse (Dezember–Februar, rechts) für die Periode 1950–2007 (oben) und 1976–2007 (unten). Große Kreise blau: steigende Trends; große Kreise rot: fallende Trends; kleine Kreise: Trends nicht signifikant.

Zusammenfassung: Der vorliegende Beitrag beschreibt die Methoden und Ergebnisse zur Abschätzung der zukünftigen Entwicklung der Grund- und Oberflächenwasserressourcen in Österreich. Obwohl in den letzten drei Jahrzehnten im Mittel über Österreich die Niederschläge gestiegen sind, hat sich der Abfluss aufgrund der zunehmenden Verdunstung kaum geändert. Für die Zukunft (Mittel 2021–2050) sind für die Sommermonate, mit Ausnahme des Ostens Österreichs, fallende Abflüsse zu erwarten. Im Winter ist, mit Ausnahme des Südens, mit steigenden Abflüssen zu rechnen. Die Analysen der Abflussvariabilität vergangener Jahre zeigen, dass die Änderungen zwischen den Jahren zufolge der natürlichen Variabilität deutlich größer sind als die Änderungen zufolge des Klimawandels bis 2021–2050. Daher erscheinen aus österreichweiter Sicht nicht grundsätzlich andere Bewirt-

schaffungsmaßnahmen notwendig. Regional betrachtet kann es aber durchaus zu Unterschieden kommen und jene Regionen, die schon jetzt geringe Abflussspenden aufweisen (vor allem im Osten und Südosten Österreichs), sind bei den Anpassungsmaßnahmen besonders zu berücksichtigen.

Die Analyse der Grundwasserstandsentwicklungen in den letzten 30 Jahren zeigt ein heterogenes Bild für die österreichischen Porengrundwasservorkommen. Von den insgesamt 2114 untersuchten Messstellen weisen rund 70 % keinen signifikanten, 12 % einen steigenden und 18 % einen fallenden Trend im Jahresmittel des Grundwasserstandes auf. Eindeutiger sind die Trends bei der Grundwassertemperatur. Der schon in der Vergangenheit beobachtete Anstieg wird sich mit der zunehmenden Lufttemperatur fortsetzen. Auf Basis der erwarteten Veränderungen der die Grundwasser-

neubildung beeinflussenden Größen wurden Tendenzen im Grundwasserdargebot abgeleitet. Diese Ergebnisse legen es nahe, dass speziell in den niederschlagsarmen Gebieten Österreichs verstärkt eine Grundwasserbewirtschaftung erforderlich sein wird.

Climate impacts on surface and subsurface water resources

Summary: This paper presents the methods and results of estimating the future evolution of the surface and subsurface water resources in Austria. Although the mean precipitation over Austria has increased in the past three decades, runoff has changed little due to increases in the evapotranspiration. For the future (average 2021–2050) the summer months decreasing runoff is expected in Austria, with the exception of the East. In winter increasing runoff is expected, with the ex-

ception of the South. Analyses of the variability of runoff indicate that the natural variability of mean annual runoff clearly exceeds the projected changes due to climate change for the period 2021–2050. From a global Austrian perspective there is hence no need for different water resources management strategies. However, at the regional scale changes may occur. Regions that already have low specific discharges (in particular the East and the Southeast of Austria), needs particular attention in the adaptation strategies.

An analysis of the groundwater levels in the past 30 years shows heterogeneous patterns in the porous aquifers in Austria. Out of a total of 2114 piezometers analysed, 70% do not show a significant trend of the mean annual groundwater level. 12% and 18% show increasing and decreasing trends, respectively. The trends of the groundwater temperatures show clearer patterns. The observed increasing trends of the groundwater temperatures are likely to continue in a warmer climate. Along with projected changes in the climate variables controlling groundwater recharge, future tendencies in groundwater availability are discussed. In particular in the low precipitation areas in Austria a more detailed management of the groundwater resources may be needed.

1. Einleitung

Während der möglichen Verstärkung hydrologischer Extremereignisse aufgrund von Klimaänderungen, wie z. B. Hochwasser, viel Beachtung in Medien und öffentlicher Diskussion geschenkt wird, finden Veränderungen im Dargebot- von Grund- und Oberflächenwasser wenig Beachtung, obwohl sie große Auswirkungen auf die Österreichische Wasserwirtschaft haben könnten. Der vorliegende Beitrag be-

TABELLE 1

Die vier hier verwendeten Ansätze zur Beurteilung der Änderungen im Wasserdargebot der Oberflächenwasser zufolge Klimawandel

Ansatz	datenbasiert	modellbasiert	prognostisch
Trendanalysen (Niederschlag, Abfluss)	sehr stark	sehr gering	nein
Trading space for time (räumlich)	stark	gering	ja
Elastizität (zeitlich)	stark	mittel	ja
Szenarienanalysen (Delta-Change)	gering	stark	ja

schreibt kurz Methoden und Ergebnisse zur Abschätzung der zukünftigen Entwicklung von Grund- und Oberflächenwasser in Österreich und schlägt mögliche Anpassungsstrategien vor. Details sind im Endbericht der von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik und die Technische Universität Wien durchgeführten Studie (ZAMG/TU-Wien Studie 2011) zu finden.

2. Oberflächenwasser

Abschätzungen des Klimaeinflusses auf die Wasserressourcen beruhen in der Regel auf Trendanalysen oder Szenarienrechnungen. Der Vorteil der Trendanalysen besteht darin, dass sie auf Beobachtungsdaten aufbauen. Allerdings ist die Übertragbarkeit auf die Zukunft fraglich, da nicht angenommen werden kann, dass sich die Abflüsse in der Zukunft in ähnlicher Weise wie die Abflüsse der Vergangenheit entwickeln werden. Wegen der Komplexität und Nichtlinearität der Abflussprozesse ist dies unwahrscheinlich. Klimaimpaktanalysen mittels eines Szenarioansatzes bestehen in der Regel aus drei Schritten:

- a. Simulationen mit einem oder mehreren Globalen Zirkulationsmodellen (GCMs) unter Definition bestimmter Szenarien (meist IPCC Szenarien)
- b. Downscaling der Lufttemperatur, Niederschlag und anderer Rechengrößen des GCM von der Rasterweite des Klimamodells (ca. 200 km) auf eine Ras-

terweite, die für die hydrologische Modellierung geeignet ist (wenige km)
 c. Antrieb eines Niederschlag-Abflussmodells mit Lufttemperatur- und Niederschlagszeitreihen des Downscalings.

Bei jedem dieser Schritte entstehen Unsicherheiten, die die Unsicherheit des Endergebnisses bestimmen. Auf Grund der Komplexität der Modellkette ist es leicht möglich, dass Szenarienstudien Veränderungen angeben, die weder interpretiert noch auf Plausibilität geprüft werden können (Blöschl und Montanari 2010, Montanari et al. 2010).

Aufgrund der oben beschriebenen Unsicherheiten, folgt diese Studie dem Ansatz, die Fragestellung mit mehreren Methoden zu untersuchen, die sich in Hinblick auf Daten und Annahmen unterscheiden (Blöschl et al. 2011a). Dadurch ist zu erwarten, dass die Zuverlässigkeit der Aussage erhöht wird. Neben den zwei üblichen Ansätzen, Trendanalysen und Szenarienanalysen, die sich wesentlich in Hinblick auf Daten und Modellannahmen unterscheiden, werden hier zwei zusätzliche, neue Methoden angewandt: die Elastizitätsmethode, die auf einer Analyse der zeitlichen Variabilität der Daten basiert und die „Trading space for time“ Methode, die auf einer Analyse der räumlichen Variabilität der Daten basiert. *Tabelle 1* zeigt die Unterschiede in Daten und Modellannahmen der vier hier verwendeten Methoden zur Abschätzung der Änderungen

TABELLE 2

Prozent der Pegel mit steigenden und fallenden Trends der Abflüsse in Österreich.

	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	9 (15 7 15 18)	68 (67 53 68 77)	23 (18 40 17 5)	9 (7 10 8 16)	81 (84 81 71 80)	10 (9 9 21 4)
Rhein, Donau und Elbegebiete	11 (17 7 19 22)	79 (77 57 62 76)	10 (6 36 19 2)	9 (7 11 9 15)	85 (85 87 72 82)	6 (8 2 19 3)
Drau, Mur und Raabgebiete	7 (13 7 10 8)	41 (44 44 77 79)	52 (43 49 13 13)	7 (7 7 4 19)	70 (80 64 69 74)	23 (13 29 27 7)

Erster Wert bezieht sich auf die Jahresmittel, Werte in Klammer auf die Vierteljahresabflüsse (DJF, MAM, JJA, SON). Entsprechend dem gewählten Signifikanzniveau von 5% sind Werte von 5% und kleiner als zufällig anzusehen.

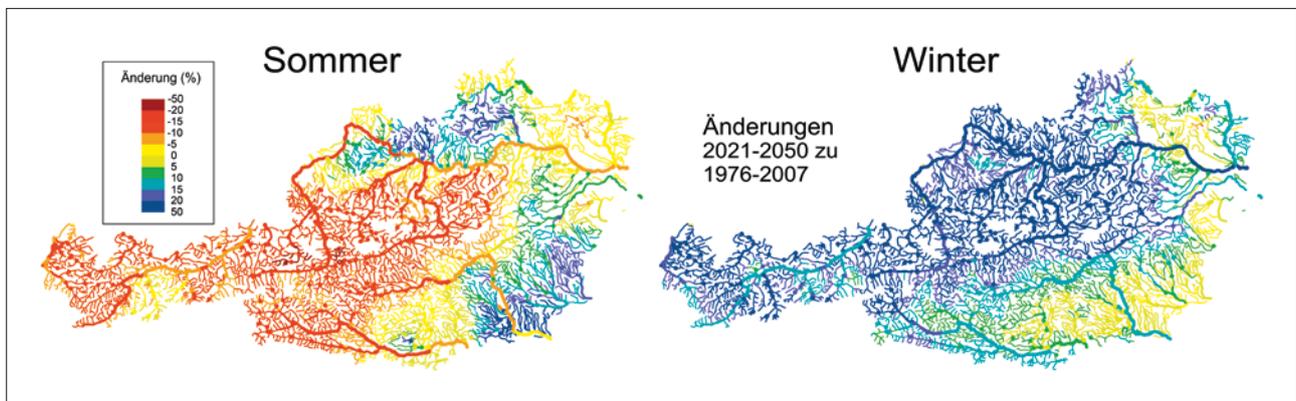


Abb. 2: Änderungen des Sommerabflusses (Juni–August, links) und des Winterabflusses (Dezember–Februar, rechts) in % für den Zeitraum 2021–2050 im Vergleich zu 1976–2006 berechnet mit dem Niederschlag-Abflussmodell. Blau: Zunahme, rot: Abnahme (Klimaszenario CLM-ECHAM5-A1B).

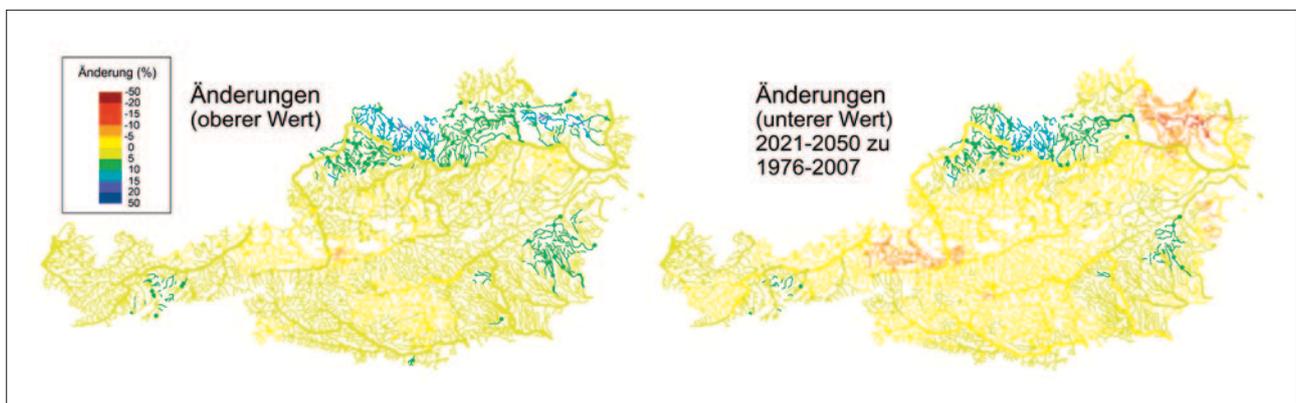


Abb. 3: Änderungen des mittleren jährlichen Abflusses in % für den Zeitraum 2021–50 im Vergleich zu 1976–2006. Blau: Zunahme, rot: Abnahme. Abbildungen links und rechts wurden mit unterschiedlichen, gleich plausiblen Parametern des Niederschlag-Abflussmodells berechnet (Klimaszenario CLM-ECHAM5-A1B).

im Wasserdargebot der Oberflächenwässer. In Hinblick auf Modellannahmen und Datenbasiertheit liegen die beiden neuen Methoden zwischen Trendanalyse und Szenarienansatz. Es ist deshalb eine wertvolle Ergänzung zu erwarten. Aufgrund der vielen Unsicherheiten bei der Beurteilung der Einflüsse des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft werden die Ergebnisse nach harten und weichen Aussagen unterschieden (siehe Blöschl et al. 2011a und Schöner et al. 2011).

2.1. Trendanalysen

Für die Trendanalysen wurden Reihen der Jahresabflüsse und der Vierteljahresabflüsse von etwa 500 österreichischen Pegeln ausgewertet. Im Rahmen einer Qualitätsprüfung wurden Pegel, deren Abflussverhalten stark durch wasserbauliche Eingriffe verändert sind, aus der weiteren Untersuchung ausgeschieden. Die Trendanalysen wurden mittels des Mann-Kendall-Test unter Entfernung der Autokorrelation durchgeführt (Yue et al. 2003, Burn und Hag Elnur 2002). Das Signifikanzni-

veau wurde zu jeweils 5 % an den beiden Enden der Verteilung gewählt. Eine Beschreibung der Methode ist in Blöschl et al. (2011b) zu finden.

Abbildung 1 zeigt die Ergebnisse der Trendanalysen für die Sommerabflüsse (Juni–August) und Winterabflüsse (Dezember–Februar) für Österreich. Da die Trends vom gewählten Zeitfenster abhängen können, wurde zwei verschiedene Perioden untersucht, 1950–2007 bzw. 1976–2007, wobei jeweils nur Pegel mit mindestens 45 bzw. 25 Jahren Abflussbeobachtungen herangezogen wurden.

Die Sommerabflüsse im Zeitraum 1976–2007 (Abb. 1 unten) zeigen überwiegend fallende Trends. Besonders im westlichen Teil Österreichs sind signifikant fallende Sommerabflüsse zu verzeichnen. Im östlichen Teil Österreichs sind aber nur wenige dieser fallende Trends signifikant. Im Südlichen Wiener Becken sind die Trends signifikant steigend. Das ist auf die deutlich steigenden Niederschläge in dieser Periode zurückzuführen (Blöschl et al. 2011a, Abb. 2). Bei den Winterabflüssen halten sich fallende und steigende Trends

dabie Waage (siehe auch Tabelle 1). Für den längeren Zeitraum 1950–2007 (Abb. 1 oben), sind im Süden die Winterabflüsse 1950–2007 deutlich gesunken (43 % der Pegel), im Norden etwas gestiegen. Bei den Sommerabflüssen im Zeitraum 1950–2007 halten sich fallende und steigende Trends die Waage. Sind für den Sommerabfluss der Periode 1976–2007 im Bereich der Salzach eher fallende Trends zu verzeichnen, so ergeben sich für den längeren Zeitraum 1950–2007 in dieser Region steigende Trends. Insgesamt ist daher bei der Beurteilung der Abflusstrends Vorsicht geboten, da es auf die Auswahl des Zeitfensters ankommt, ob im Einzelfall Trends festzustellen sind oder nicht. Diese Einschätzung passt in das europaweite Bild von Abflusstrends in den unterschiedlichen Dekaden (Stahl et al. 2010).

2.2 Szenarienanalysen

Zur Einschätzung möglicher Auswirkungen geänderter klimatischer Bedingungen auf das Abflussregime wurden Niederschlag-Abflussimulationen durchgeführt. In Rah-

men der Datenaufbereitung wurden tägliche Abflüsse der Periode 1976–2007 auf Plausibilität geprüft und Gebietswerte des Niederschlages und der Lufttemperatur (Parajka et al. 2005, 2007a) ermittelt. Diese Daten wurden vom Hydrographischen Zentralbüro zur Verfügung gestellt. Ein konzeptionelles Niederschlag-Abfluss Modell zur kontinuierlichen Simulation der Verdunstung, des Bodenwasserhaushaltes, der Schneeakkumulation und -schmelze sowie der Abflussprozesse auf Gebietsbasis wurde herangezogen. Das Modell untergliedert jedes Gebiet in Höhenzonen und besitzt einen Zeitschritt von einem Tag. Das Modell wurde an Abflussdaten von über 600 Gebieten angepasst und ausführlich in Hinblick auf die Größe und die saisonale Verteilung des Abflusses getestet. Das Modell und die Vorgangsweise bei der Kalibrierung und Modellvalidierung sind im Detail in Parajka et al. (2005a, 2007a) dargestellt.

Weiters wurden Simulationen mit dem regionalen Klimamodell CLM (angetrieben durch die Ergebnisse des globalen Klimamodells ECHAM5, Szenario A1B) (Schöner et al. 2011) für den Zeitraum 2021–2050 mit den Simulationen für die Referenzperiode 1976–2006 verglichen. Die Differenzen der mittleren monatlichen Lufttemperaturen sowie die prozentuellen Veränderungen der mittleren monatlichen Niederschläge zwischen den beiden Zeiträumen wurde ausgewertet. Diese Differenz wurde nun für einzelne Regionen auf die Zeitreihen der beobachteten Niederschläge und Lufttemperaturen der Periode 1976–2006 addiert, um so das projizierte Klima 2021–2050 zu simulieren. Dies wird in der Literatur häufig als Delta Change Ansatz bezeichnet. Auf Grund der CLM Klimaszenarien wurden die beobachteten Lufttemperaturen durchwegs erhöht (um 0,2 bis 2 °C, je nach Monat und Einzugsgebiet), während die beobachteten Niederschläge mit einem Prozentsatz multipliziert wurden, der in den Wintermonaten im Norden Österreichs meist positiv (etwa 5–20 %), in den anderen Monaten bzw. Gebieten Österreichs entweder positiv oder negativ war. Sodann wurden mit dem Niederschlag-Abflussmodell Referenzsimulationen mit den beobachteten Niederschlags- und Lufttemperaturdaten für den Zeitraum 1976–2006, sowie Szenariosimulationen mit den oben beschriebene Niederschlags- und Lufttemperaturdaten für 2021–2050, durchgeführt. Die zukünftigen Änderungen im Abfluss konnten somit durch Vergleich der Szenariosimulationen mit den Referenzsimulationen abge-

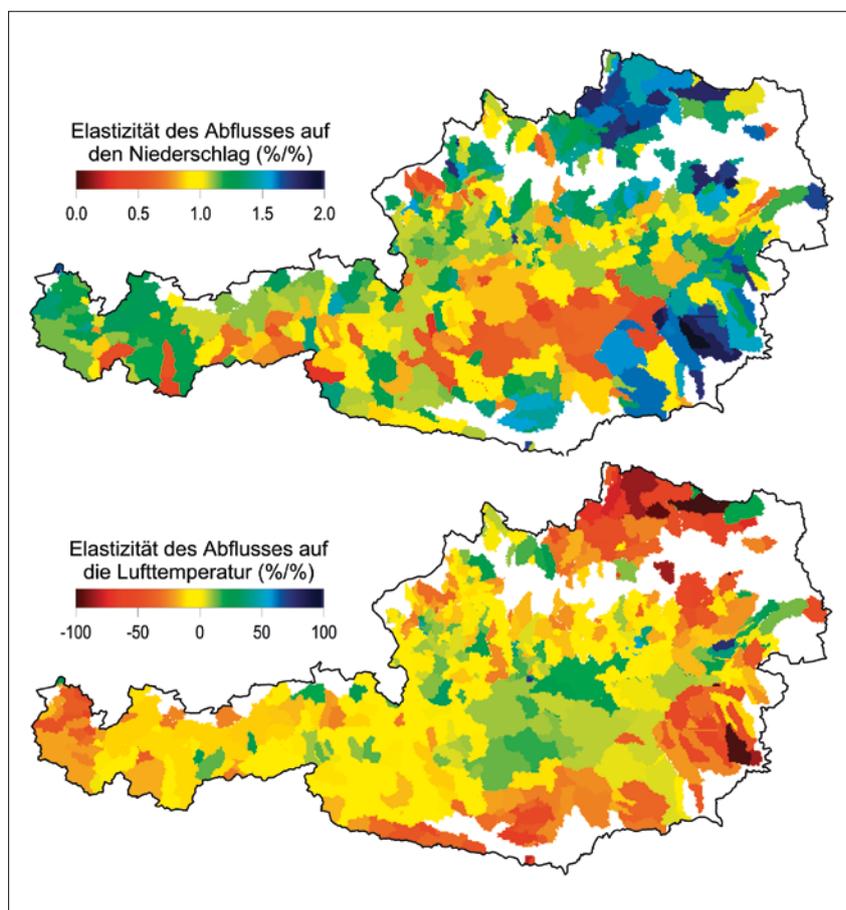


Abb. 4: Elastizität des Abflusses auf eine Änderung des Niederschlages (oben). Eine Elastizität von 2 bedeutet beispielsweise, dass eine Änderung des Jahresniederschlags von 10 % zu einer Änderung des Jahresabflusses um 20 % führt. Elastizität des Abflusses auf eine Änderung der Lufttemperatur (unten). Eine Elastizität von -50 bedeutet beispielsweise, dass eine Erhöhung der Lufttemperatur um 1 % (ca. 2,7 K) zu einer Reduktion des Jahresabflusses um 50 % führt.

schätzt werden. In einem letzten Schritt wurden die Referenzsimulationen und Szenariosimulationen an den Pegeln auf das gesamte Gewässernetz Österreichs übertragen. Dafür wurde die Top-Kriging Methode angewandt (Skøien et al. 2006), die im Vergleich zu anderen Regionalisierungsmethoden (Merz und Blöschl 2004, Parajka et al. 2005b, 2007b) genauere Ergebnisse aufwies.

Für die Sommerabflüsse berechnet das Modell eine Abnahme im Westen (Alpen) um ca. 10–20 % (2021–50 im Vergleich zu 1976–2006, *Abb. 2 links*). Diese Abnahme ist auf eine Abnahme der projizierten Niederschläge zurückzuführen (Blöschl et al. 2011a, *Abb. 2*), die allerdings prozentmäßig kleiner ist. Diese Differenzierung ist durch eine zunehmende Verdunstung erklärbar. Für die Winterabflüsse wird für fast ganz Österreich eine Zunahme um ca. 20 % berechnet. Diese stimmen prozentmäßig etwa mit der projizierten Zunahme der Winterniederschläge überein. Bei der Szenarienanalyse wird angenommen, dass 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. Grund dafür können z. B. Änderungen in der Vegetation (Zunahme des Waldanteils, Zunahme der Transpiration) sein (Merz et al. 2010). Deswegen sind die Modellparameter mit einer gewissen Unsicherheit behaftet (Peel und Blöschl 2011). Um diese abzuschätzen, wurden zusätzliche Simulationen mit geringfügig veränderten Parameterwerten durchgeführt. In zwei Varianten (oberer Wert bzw. unterer Wert) wurde der Parameter für die Abflussbildung gegenüber der Kalibrierung 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 Nieder-

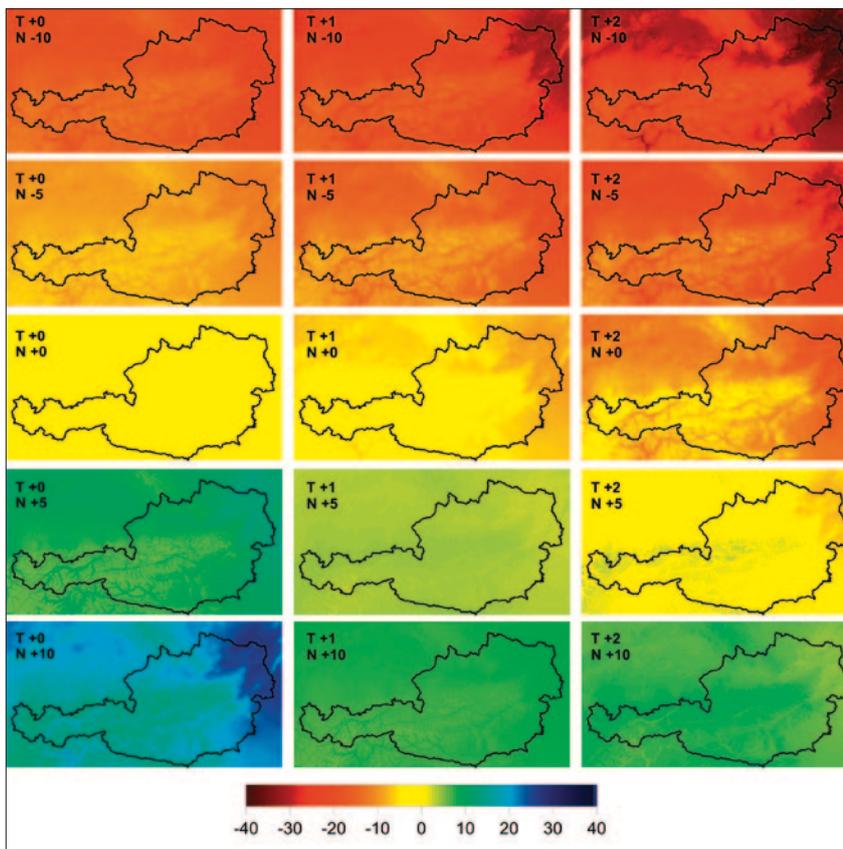


Abb. 5: Sensitivität (%) des langfristigen mittleren jährlichen Abflusses auf Änderungen des mittleren jährlichen Niederschlages (N in %) und der mittleren jährlichen Lufttemperatur (T in °C) auf Basis des Trading space for time Ansatzes unter Verwendung des Turc Modells. Blau: Zunahme des Abflusses, rot: Abnahme des Abflusses.

schlags und der Lufttemperatur vollständig zutreffen (Abb. 3). *Abbildung 3* lässt erkennen, dass sich das Vorzeichen der Änderungen des mittleren jährlichen Abflusses für den Zeitraum 2021–50 im Vergleich zum Zeitraum 1976–2006 in weiten Teilen Österreichs verschiebt. Das heißt, es kann keine Aussage darüber getroffen werden, ob die Abflüsse zunehmen oder abnehmen werden. Allerdings sind für beide Simulationsläufe die Änderungen des Jahresabflusses verhältnismäßig klein. Das bedeutet, dass das Vorzeichen der Änderung zwar nicht klar ist, aber keine großen betragsmäßigen Änderungen des Jahresabflusses zu erwarten sind. Zu beachten ist, dass die beiden Varianten die Variationsbreite der Niederschlag-Abflussmodellierung widerspiegeln. Die Unsicherheit der Klimamodellierung ist zusätzlich zu berücksichtigen.

2.3. Elastizität (zeitlich)

Die Elastizität setzt die prozentuelle Änderung in einer Variablen mit der prozentuellen Änderung einer anderen Variablen in Beziehung. In dieser Studie wurde die

Änderung der jährlichen Mittelwerte des Abflusses in Beziehung mit dem Niederschlag und der Lufttemperatur gesetzt. Der Elastizitätsindex ε^{PQ} des Abflusses auf den Niederschlag wurde nach Sankarabramanian et al. (2001) als Median des Verhältnisses der proportionalen Änderungen des Abflusses und der proportionalen Änderungen des Niederschlages berechnet:

$$\varepsilon^{PQ} = \text{median} \left(\frac{Q_i - \bar{Q}}{P_i - \bar{P}} \cdot \frac{\bar{P}}{\bar{Q}} \right) \quad (5.1)$$

wobei der mittlere jährliche Abfluss im Jahr i , der langfristige Mittelwert des Abflusses und and die entsprechenden Werte für den Niederschlag sind. Zur Erhöhung der Robustheit des Index wurden nur solche Jahre für die Berechnung herangezogen, in denen war. In analoger Weise wurde der Elastizitätsindex ε^{TQ} des Abflusses auf die Lufttemperatur definiert. Für die Berechnung der Elastizität wurden in dieser Studie der mittlerer jährlicher Abfluss, der mittlerer jährlicher Niederschlag und die mittlere jährliche Lufttemperatur

für den Zeitraum 1976–2006 von über 500 Einzugsgebieten mit Flächen $< 10000 \text{ km}^2$ verwendet. Die Jahresmittel wurden für das hydrologische Jahr (Oktober bis September) berechnet.

Abbildung 4 oben zeigt die Elastizität ε^{PQ} des Abflusses auf den Niederschlag. Die Elastizität liegt zwischen 0,5 und 2. Am größten ist der Elastizitätsindex im Norden und im Südosten Österreichs mit Werten von bis zu 2. Das bedeutet, dass z. B. eine Änderung des Jahresniederschlags von 10% eine Änderung des Jahresabflusses von 20% bewirkt. Im Zentrum Österreichs ist der Elastizitätsindex mit Werten um 1 kleiner. Das bedeutet, dass eine Änderung des Jahresniederschlags eine prozentuelle gleiche Änderung des Jahresabflusses bewirkt. In einigen Gebieten ist die Elastizität sogar kleiner als 1. Die räumlichen Unterschiede verdeutlichen die höhere Sensitivität des Abflusses auf Niederschlagsänderungen in den abflussärmeren Teilen Österreichs (Norden und im Südosten) im Vergleich zu den abflussreicheren Teilen Österreichs.

Abbildung 4 unten zeigt die Elastizität ε^{TQ} des Abflusses auf die Lufttemperatur. Die Lufttemperatur ist dabei in der Einheit Kelvin verwendet. Im Norden und im Südosten Österreichs ist der Index negativ mit Werten um -50. Das bedeutet, dass eine Erhöhung der Lufttemperatur um 1% (d. h. ca. 2,7K) zu einer Verringerung des Abflusses um 50% führt. Im Rest Österreichs ist der Elastizitätsindex betragsmäßig wesentlich kleiner: In Vorarlberg ist der Index etwa -20. Im Zentrum Österreichs ist der Index positiv mit Werten von 10 bis 20. Das bedeutet, dass in diesen Gebieten eine Erhöhung der Lufttemperatur um 1% (d. h. 2,7°) zu einer Erhöhung des Abflusses um 10 bis 20% führt. Die Unterschiede im Vorzeichen spiegeln den Einfluss von Verdunstung und Niederschlag auf den Abfluss wider. Im Norden und im Südosten Österreichs ist eine Verringerung des Abflusses bei erhöhter Lufttemperatur auf die Zunahme der Verdunstung zurückzuführen. Im Zentrum Österreichs ist der höhere Abfluss in wärmeren Jahren darauf zurückzuführen, dass diese Jahre im Durchschnitt auch niederschlagsreicher waren. Der Einfluss des Niederschlages ist in diesen Gebieten größer als der der Verdunstung, wodurch sich insgesamt eine Erhöhung des Abflusses ergab.

In einem weiteren Schritt wurde die Elastizität des Abflusses auf Niederschlag und Lufttemperatur gemeinsam ermittelt und der mittlere Wert für Österreich mit

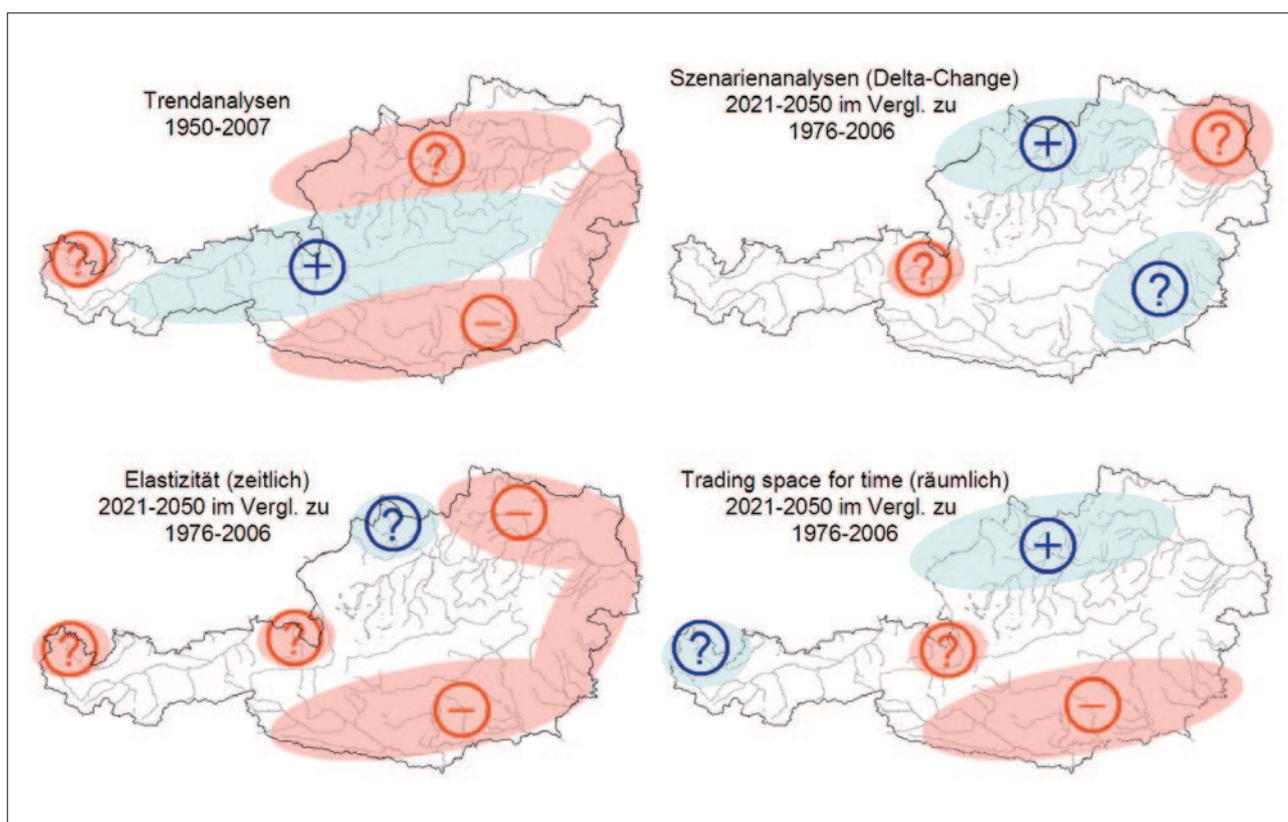


Abb. 6: Zusammenschau der Änderungen des mittleren jährlichen Abflusses 2021–2050 im Vergleich zu 1976–2006 nach den vier Methoden.

den CLM Szenarien kombiniert. Damit ergibt sich generell eine leichte Abnahme des mittleren jährlichen Abflusses für den Zeitraum 2021–2050 im Vergleich zu 1976–2006. Diese Abnahme ist auf die erhöhte Verdunstung bei wärmeren Temperaturen zurückzuführen, ist aber betragsmäßig klein (siehe ZAMG/TU-Wien Studie, 2011).

2.4. Trading space for time (räumlich)

Die grundsätzliche Idee des „Trading space for time“ Ansatzes besteht darin, den räumlichen Zusammenhang zwischen Niederschlag, Lufttemperatur und Abfluss zu analysieren, und diesen für die Abschätzung der zeitlichen Veränderungen des Abflusses heranzuziehen. Erwartet man in Zukunft für ein Gebiet z. B. eine Zunahme von Lufttemperatur und Niederschlag, so vergleicht man dieses Gebiet mit einem anderen Gebiet, das bereits jetzt eine höhere Lufttemperatur und einen höheren Niederschlag besitzt. Die Unterschiede im Abfluss zwischen diesen beiden Gebieten geben einen Hinweis auf mögliche zukünftige Änderungen des Abflusses in dem ursprünglichen Gebiet. Zur Anwendung des „Trading space for time“ wurde in dieser Studie das Modell nach Turc (1961) verwendet, bei

dem der langjährige mittlere Abfluss als Funktion des mittleren jährlichen Niederschlags und einem Index der potentiellen Verdunstung EPI berechnet wird. EPI wird dabei als Funktion der langfristigen mittleren jährlichen Lufttemperatur ermittelt. Die Koeffizienten des Turc Modells wurden an beobachtete Abflüsse, Niederschläge, Lufttemperaturen und Werte potentieller Verdunstung, ermittelt und nach der Blaney-Criddle Methode (Parajka et al. 2003), für 291 österreichische Einzugsgebiete kleiner 10000 km² angepasst. Zwar werden mit dem Modell für die Vergangenheit kleine Abflüsse etwas überschätzt und große Abflüsse unterschätzt, aber insgesamt ist die Genauigkeit dieses sehr einfachen Modells gut. Die Koeffizienten des so angepassten Modells spiegeln die räumlichen Relationen von Abflussänderungen aufgrund von Änderungen in Niederschlag und Lufttemperatur in Österreich wider. Diese Relationen können nun nach dem Prinzip „trading space for time“ verwendet werden, um zukünftige Abflussänderungen aufgrund der Änderungen in Niederschlag und Lufttemperatur aus den Klimaszenarien abzuschätzen. Für das CLM-ECHAM5-A1B Klimaszenario (2021–2050 im Vergleich zum Zeitraum 1976–2006, Schöner et al. 2011) ergibt dieses Verfahren im Nor-

den eine Erhöhung des mittleren jährlichen Abflusses um bis zu 10%. Dies ist auf die größeren Niederschläge zurückzuführen, die sich stärker als die zunehmende Verdunstung auswirken (Blöschl et al. 2011a, Abb. 2). Im Südosten Österreichs berechnet das Verfahren einen kleinen Bereich mit einer Abnahme des mittleren jährlichen Abflusses von bis zu 6% zufolge zunehmender Verdunstung. Im restlichen Bundesgebiet sind die berechneten Änderungen kleiner als 5% (siehe ZAMG/TU-Wien Studie 2011).

Wegen der großen Unsicherheiten der Klimaszenarien wurde als Alternative die Sensitivität des Abflusses auf Änderungen in Niederschlag und Lufttemperatur mit Hilfe dieses Ansatzes berechnet. Der Vorteil ist dabei, dass die Sensitivitätsanalyse auf der Analyse beobachteter Daten beruht und somit unabhängig von den Unsicherheiten der Klimaszenarien ist. Die Ergebnisse sind in *Abbildungen 5* für Änderungen des Niederschlags (Zeilen) und der Lufttemperatur (Spalten) dargestellt. Eine Erhöhung der Lufttemperatur alleine von 1°C ($T=+1, N=0$) bewirkt eine Reduktion des mittleren jährlichen Abflusses um 3% in den Alpen und um 10% im Flachland im Osten Österreich. Tritt gleichzeitig eine Zunahme des Nieder-

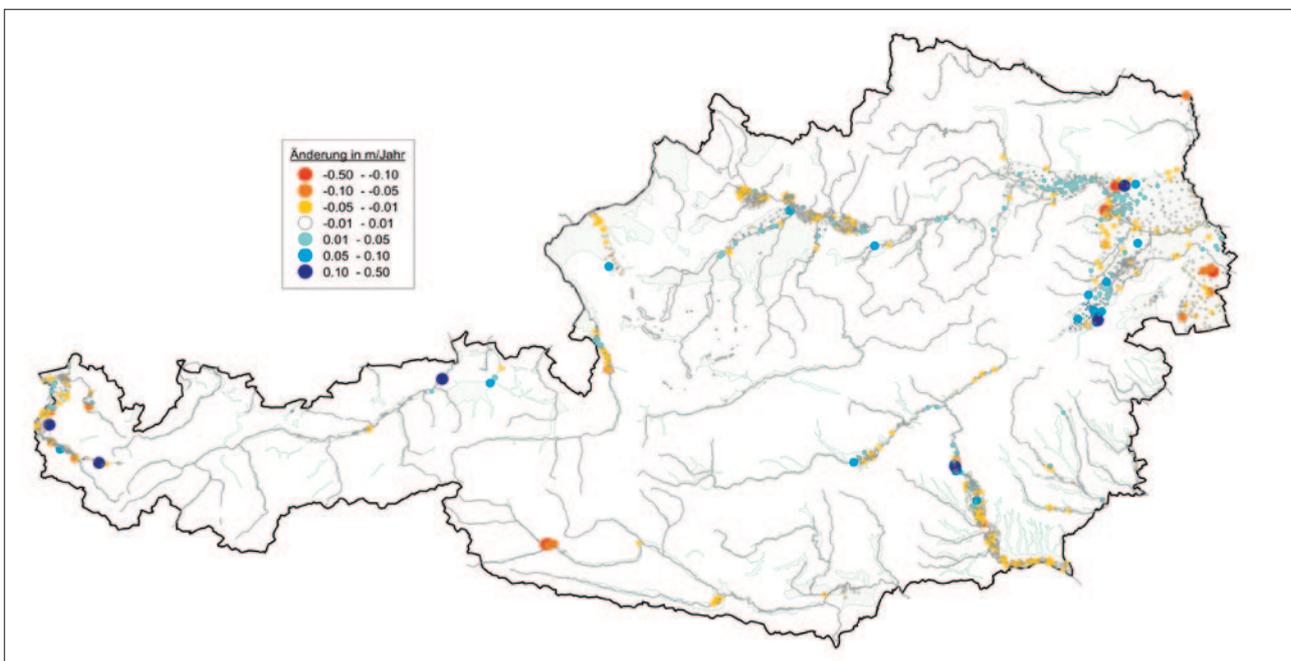


Abb. 7: Trend der Jahresmittelwerte der Grundwasserstände für Österreich, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006. Stationen mit mindestens 20 Jahren Beobachtung des Hydrographischen Dienstes. Blaue Kreise: steigende Trends, Rote/gelbe Kreise: fallende Trends, kleine weiße Kreise: Trends nicht signifikant.

schlags um 5 % auf ($T=+1$, $N=+5$), erhöht sich der Abfluss um 5 % in den Alpen und um ca. 3 % im Flachland. Dieser Fall entspricht den mittleren durch das Klimamodell CLM für 2021–2050 im Vergleich zu 1976–2006 berechneten Werten und entspricht damit den Ergebnissen in *Abbildung 3*. Die Übereinstimmung nach diesen beiden Methoden stützt die Gesamtvorgangweise und das Ergebnis, dass die Änderungen des mittleren jährlichen Abflusses vermutlich klein sein werden. Treten allerdings größere Änderungen in der Lufttemperatur und im Niederschlag auf – nicht auszuschließen ist – könnte sich das wesentlich stärker auf den mittleren Jahresabfluss auswirken. Für den Fall einer Zunahme der Lufttemperatur um 2°C und einer gleichzeitigen Abnahme des Niederschlags um

10 % ($T=+2$, $N=-10$, *rechts oben in Abb. 5*) nimmt der Jahresabfluss in den Alpen um 20 % und im Flachland um bis zu 40 % ab. Für den Fall keiner Änderung der Lufttemperatur und einer Zunahme des Niederschlags um 10 % ($T=0$, $N=+10$, *links unten in Abb. 4*) nimmt der Jahresabfluss in den Alpen um 10 % und im Flachland um mehr als 20 % zu. Das stimmt mit dem Ergebnis des Elastizitätsansatzes (*Abb. 4 oben*) überein. Da die Datenbasis der beiden Methoden unterschiedlich ist (Elastizität: zeitliche Schwankungen, trading-space-for time: räumliche Schwankungen der Daten), stützen sich die konsistenten Größenordnungen der Ergebnisse gegenseitig. Insgesamt lassen die Ergebnisse klar erkennen, dass der Abfluss im Flachland (Osten und Südosten Österreichs) wesentlich sensitiver auf Änderungen des

Niederschlags und der Lufttemperaturen reagiert als der Abfluss in der Alpenregion.

2.5. Zusammenschau der Ansätze

Die vier unterschiedlichen Methoden zur Abschätzung der zukünftigen Abflussentwicklung in Österreich unterscheiden sich stark in den zugrunde liegenden Daten und Modellannahmen. Durch die Zusammenschau der Ergebnisse der einzelnen methodischen Ansätze kann deshalb die Zuverlässigkeit der Aussagen erhöht werden. Eine schematische Gegenüberstellung der Ergebnisse der einzelnen Methoden ist in *Abbildung 6* dargestellt. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich, obwohl in den letzten drei Jahrzehnten im Mittel über Österreich die Niederschläge gestiegen sind, der Abfluss auf-

TABELLE 3

Prozent der Messstellen in Österreich mit steigendem bzw. fallendem Trend des Grundwasserstandes.

	1955–2006 (min. 40 Jahre)			1976–2006 (min. 20 Jahre)		
	Anteil d. Messstellen [%] mit			Anteil d. Messstellen [%] mit		
	steigendem Trend	nicht signif. Trend	fallendem Trend	steigendem Trend	nicht signif. Trend	fallendem Trend
Jahresmittel	11	51	38	12	70	18
Jahresminima	17	55	28	24	65	11
Jahresmaxima	7	61	32	14	74	12

Mann-Kendall Test, Signifikanzniveau 5 %

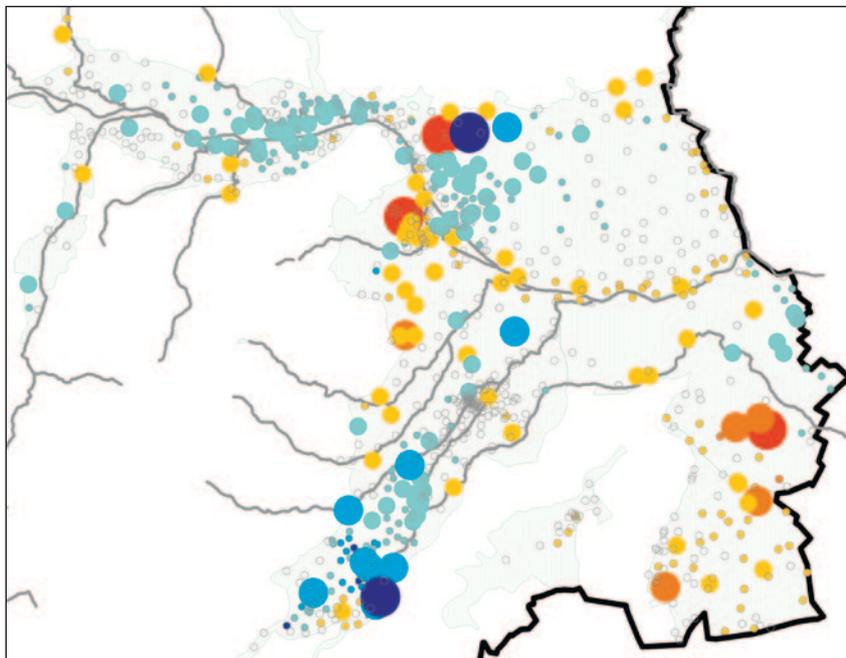


Abb. 8: Trend der Jahresmittelwerte der Grundwasserstände für den Osten Österreichs, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006. Legende siehe Abb. 6.

grund größerer Verdunstung kaum geändert hat. Regional zeigen sich Unterschiede mit fallenden Abflusstrends im Süden und in Vorarlberg und steigenden Jahresabflüssen im östlichen Alpenraum. Für den Zeitraum 2021–2050 im Vergleich zu 1976–2006 sind die Änderungen des mittleren jährlichen Abflusses vermutlich kleiner als 5%. Die Zusammenschau deutet auf eine mögliche Abnahme des mittleren jährlichen Abflusses im Osten und Südosten hin. In diesem Teil Österreichs reagiert der mittlere jährliche Abfluss auch sensitiver auf Änderungen des Niederschlags und der Lufttemperatur als im Alpenraum. Er ist also vulnerabler. Für den Zeitraum 2021–2050 ist eine deutliche Verschiebung des Abflusses innerhalb des Jahres zu erwarten, nämlich eine Erhöhung der Winterabflüsse um ca. 20% in ganz Österreich (mit Ausnahme des Südens), eine Abnahme des Frühjahrsabflusses im Osten und eine Abnahme des Sommerabflusses im Westen. Diese Aussagen basieren auf den CLM

Klimasimulationen und sind mit der dergartigen Simulationen eigenen Unsicherheit behaftet.

Unabhängig von der Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf die Abflüsse muss bei der Entwicklung von Maßnahmen zur Klimaanpassung immer beachtet werden, dass die natürliche Variabilität des mittleren jährlichen Abfluss zwischen den Jahren deutlich größer ist als die zufolge Klimaänderung erwarteten Änderungen.

3. Grundwasser

Aussagen über die Auswirkungen der Klimaänderungen auf die quantitativen Grundwasserverhältnisse können durch die Analyse der Veränderungen bei den Mechanismen der Grundwasserneubildung getroffen werden. Die natürliche Neubildung im Grundwasser erfolgt durch die Tiefensickerung von Niederschlägen und der Infiltration aus Oberflächengewässern und wird durch Entnah-

men (Trinkwasser, landwirtschaftliche Bewässerung, ...) bzw. Veränderungen an Oberflächengewässern beeinflusst. So lässt beispielsweise eine Erhöhung der Niederschlagssummen im Herbst und Winter auf eine erhöhte Grundwasserneubildung im Frühjahr schließen, wodurch meist auch von einem erhöhten quantitativen Grundwasserdargebot ausgegangen werden kann. Da die Grundwasserverhältnisse sehr stark von der lokalen hydrogeologischen Situation abhängen und die vorliegende Studie eine regionale Differenzierung anstrebt, wurde auf Szenarienrechnungen verzichtet, und den Trendanalysen ein größerer Stellenwert gegeben. Mit Trendanalysen der Grundwasserstände und Grundwassertemperatur für die letzten 30 (1976–2006) bzw. 50 (1955–2006) Jahre kann das bisherige Verhalten in den beobachteten Porengrundwasservorkommen beschrieben werden. Ein Vergleich dieses Verhaltens mit der Klimaentwicklung in diesen Zeiträumen sowie dem projizierten zukünftigen Klima erlaubt es, Aussagen über die zukünftige Entwicklung der quantitativen Grundwasserverhältnisse in den österreichischen Porengrundwasservorkommen abzuleiten. Diese Vorgehensweise wurde in ähnlicher Weise bei Studien zum Klimawandel in der BRD (Willems 2008, Simon 2009) und in der Schweiz (Kipfer und Livingstone 2008) angewendet.

3.1. Trendanalysen

Die Vorteile der Trendanalysen bestehen darin, dass sie auf die tatsächlich beobachteten Daten (Vergangenheit) aufbauen. Solche Beobachtungsdaten enthalten alle Veränderungen an einer Messstation summarisch, womit geänderte Grundwassernutzungen, Änderungen in der Landnutzung, wasserbauliche Maßnahmen oder auch die Klimavariabilität (natürlich und/oder anthropogen) in diesen Daten enthalten sind. Eine Trennung der Einflüsse hinsichtlich geänderter Grundwasserentnahmen oder wasserbaulicher Maßnahmen ist

TABELLE 4

Prozent der Messstellen in Österreich mit steigenden bzw. fallenden Trend der Grundwassertemperatur.

Grundwassertemperatur	1955–2006 (min. 20 Jahre)			1976–2006 (min. 10 Jahre)		
	Anteil d. Messstellen [%] mit					
	steigendem Trend	nicht signif. Trend	fallendem Trend	steigendem Trend	nicht signif. Trend	fallendem Trend
Jahresmittel	68	31	1	60	38	2

Mann-Kendall Test, Signifikanzniveau 5%

meist möglich, wohingegen sich die Einflüsse von Landnutzung und Klima nur schwer aus den Grundwasserdaten ableiten lassen. Trendanalysen haben den Nachteil, dass sie den Trend für ein bestimmtes Zeitfenster angeben und dieser zeitlich stark schwanken kann. So kann das Auftreten von Jahrzehnten mit hohen Grundwasserständen, je nach Lage in der Beobachtungsreihe, den Trend entscheidend beeinflussen, wodurch die Aussagekraft solcher Trends eingeschränkt sein kann (Blaschke 2003). Als weitere physikalische Größe wurde das Verhalten der Grundwassertemperatur untersucht, wobei aufgrund der Datenlage mit deutlich weniger Messstellen und kürzeren Zeitreihen gearbeitet werden musste.

Die Methodik der Trendanalyse entspricht dem für den Abfluss (*Kapitel 2.1 dieses Beitrages*) bzw. für Hoch- und Niedrigwasser (Blöschl et al. 2011a) verwendeten Verfahren. Die Trendanalysen wurden mittels des Mann-Kendall-Test unter Entfernung der Autokorrelation durchgeführt (Yue et al. 2003, Burn und Hag Elnur, 2002). Das Signifikanzniveau wurde zu jeweils 5 % an den beiden Enden der Verteilung gewählt. Die jährlichen mittleren, maximalen und minimalen Grundwasserstände wurden für zwei Perioden ausgewertet. Für die Periode 1955–2006 standen Daten von 645 Messstellen zur Verfügung,

für die Periode 1976–2006 Daten von 2114 Messstellen. Zusätzlich wurden die mittleren jährlichen Grundwassertemperaturen ausgewertet. Für die Periode 1955–2006 standen Daten von 112 Messstellen zur Verfügung, für die Periode 1976–2006 Daten von 255 Messstellen. *Abbildung 7* zeigt die Ergebnisse der Trendanalysen der mittleren jährlichen Grundwasserstände. Ein Wert der Änderung von 0,05 bedeutet etwa einen Anstieg des Grundwasserstandes von 5 cm pro Jahr. In *Abbildung 8* ist als Detail das östliche Bundesgebiet dargestellt. In *Tabelle 3* ist die Anzahl der Messstellen mit steigendem bzw. fallendem Trend der mittleren, minimalen und maximalen jährlichen Grundwasserstände zusammengefasst.

Die Auswertungen der Zeitreihen 1976 bis 2006 zeigen, dass bei 18 % der 2114 betrachteten Grundwassermessstellen die Jahresmittelwerte des Grundwasserstandes einen signifikant fallenden Trend aufweisen. Der Trend betrug im Mittel -2 cm/Jahr. 12 % der Messstellen weisen einen signifikant steigenden Trend auf mit einem durchschnittlichen Trend von $+2,5$ cm/Jahr. Betrachtet man die Periode 1955–2006, so weisen deutlich mehr Messstellen (38 %) einen signifikant fallenden Grundwasserstand auf (mittlerer Trend -2 cm/Jahr). Demgegenüber weisen nur 11 % einen signifikant steigenden Trend auf

(mittlerer Trend $+1,5$ cm/Jahr). Bemerkenswert ist weiters, dass sich bei den Jahresminima das Verhältnis zwischen fallendem und steigendem Trend in den letzten 30 Jahren gegenüber einer Betrachtung der letzten 50 Jahre umgedreht hat, also deutlich weniger Messstellen (11 %) einen fallenden Trend aufweisen. Ähnliches gilt für die Jahresmaxima, wenn auch in weniger ausgeprägter Weise. Bei den Minima und Maxima sind die Einflüsse des Klimas und anthropogener Effekte in vielen Regionen kaum zu trennen.

Eine regionale Betrachtung der Trends (*Abb. 7 und 8*) führt zu der folgenden Interpretation: Die Abnahme der Winter und Frühjahrsniederschläge in der Periode 1976–2007 von Vorarlberg über Kärnten, Südsteiermark, Burgenland bis zur Donau (*Abb. 2* in Blöschl et al. 2011a) spiegelt sich auch in einer Abnahme der Jahresmittelwerte der Grundwasserstände in vielen Messstellen dieser Regionen wieder. Der in den Sommer- und Herbstniederschlägen teilweise vorhandene positive Trend kann den fallenden Trend in den Grundwasserständen nicht kompensieren. Die Abnahme der Abflüsse im Süden und Südosten (*Abb. 1*) zeigen sich auch in einer Abnahme des Grundwasserstandes in den gewässernahen Grundwasservorkommen. Inwieweit hier eine Überlagerung der Ursachen durch die er-

LITERATUR

- Blaschke AP (2003)** Langzeitentwicklung der Grundwasserstände. Karte 6.3, Hydrologischer Atlas Österreich. Österreichischer Kunst und Kulturverlag und Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. ISBN: 3-85437-250-7, 6.3–6.3. Wien
- Blöschl G, Montanari A (2010)** Climate change impacts-throwing the dice? *Hydrological Processes*, 24, (3) 374–381
- Blöschl G, Schöner W, Kroiß H, Blaschke AP, Böhm R, Haslinger K, Kreuzinger N, Merz R, Parajka J, Salinas JL, Viglione A (2011a)** Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft - Ziele und Schlussfolgerungen der Studie für Bund und Länder. Österr. Wasser- und Abfallwirtsch. Dieses Heft
- Blöschl G, Viglione A, Merz R, Parajka J, Salinas J, Schöner W (2011b)** Auswirkungen des Klimawandels auf Hochwasser und Niedrigwasser. Österr. Wasser- und Abfallwirtsch. Dieses Heft
- Burn DH, Hag Elnur MA (2002)** Detection of hydrologic trends and variability. *Journal of Hydrology*, 255, 107–122
- Kipfer R, Livingstone DM (2008)** Wasserressourcen und Klimawandel. *EAWAG News* 65d, September 2008
- Merz R, Blöschl G (2004)** Regionalisation of catchment model parameters. *Journal of Hydrology*, 287, pp. 95–123
- Merz R, Parajka J, Blöschl G (2010)** Time stability of catchment model parameters – implications for climate impact analyses. *Water Resources Research*. In press
- Montanari A, Blöschl G, Sivapalan M, Save-nije H (2010)** Getting on target. *Public Service Review: Science and Technology*, Issue 7, pp. 167–169
- Parajka J, Merz R, Blöschl G (2005a)** 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 (2005b)** A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters. *Hydrology and Earth Systems Sciences*, 9, pp. 157–171
- Parajka J, Blöschl G, Merz R (2007b)** Regional calibration of catchment models: Potential for ungauged catchments. *Water Resources Research*, 43, article number W06406
- Parajka J, Merz R, Blöschl G (2003)** Estimation of daily potential evapotranspiration for regional water balance modeling in Austria. In: 11th International Poster Day and Institute of Hydrology Open Day "Transport of Water, Chemicals and Energy in the Soil – Crop Canopy – Atmosphere System", Slovak Academy of Sciences, Bratislava, pp. 299–306
- Parajka J, Merz R, Blöschl G (2007a)** Uncertainty and multiple objective calibration in regional water balance modeling – Case study in 320 Austrian catchments. *Hydrological Processes*, 21, pp. 435–446
- Peel MC, Blöschl G (2011)** Hydrologic modeling in a non-stationary world. *Progress in Physical Geography*, 35, in press
- Sankarasubramanian A, Vogel RM, Limbrunner JF (2001)** Climate elasticity of streamflow in the United States. *Water Resources Res.*, 37(6), DOI:10.1029/2000WR900330
- Schöner W, Böhm R, Haslinger K (2011)** Klimaänderung in Österreich – hydrologisch relevante Klimaelemente. Österr. Wasser- und Abfallw. Dieses Heft
- Simon S (2009)** Wasserwirtschaft und Klimawandel – Fakten, Folgen, Aufgaben, 39. Internat. Wasserbau Symposium Aachen. Aachen
- Skøien, J., R. Merz and G. Blöschl (2006)** Top-kriging – geostatistics on stream networks, *Hydrology and Earth System Sciences* 10, pp. 277–287
- Stahl K, Hisdal H, Hannaford J, Tallaksen LM, van Lanen HAJ, Sauquet E, Demuth S, Fendekova M, Jódar J (2010)** Streamflow trends in Europe: evidence from a dataset of near-natural catchments. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 2367–2382
- Turc L (1961)** Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle: formule climatique simplifiée et mise à jour. *Ann. Agron.* 12, 13–49
- Willems W (2008)** Langzeitverhalten von Grundwasserständen, Quellschüttungen und grundwasserbürtigen Abflüssen in Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz. *Endbericht im Auftrag von KLIWA, Ottobrunn*
- 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

richteten Flusskraftwerke gegeben ist, müsste in Detailuntersuchungen analysiert werden. Im Grundwasservorkommen Parndorfer Platte und Seewinkel können die fallenden Trends im Grundwasserstand (Abb. 7) auch mit dem Einfluss von Grundwasserentnahmen (z. B. für landwirtschaftliche Bewässerung) zusammenhängen. Auffallend ist die starke Zunahme der Grundwasserstände im Süden des Südlichen Wiener Beckens im Zeitraum 1976–2006, welche auf eine Erhöhung der Abflüsse im alpinen Bereich zurückgeführt wird. Erhöhte Abflüsse und Niederschläge in den Zentralalpen im Zeitraum 1976–2006 lassen auch eine Zunahme des Grundwasserdargebotes in den Karst- und Kluf Grundwasservorkommen erwarten (diese wurden hier jedoch aufgrund unzureichender Datenlage nicht untersucht). Auswertungen der Langzeitentwicklung des Grundwasserstandes zeigen, dass das Trendverhalten in aufeinanderfolgenden Dekaden (1961–70, 1971–80, 1981–90, 1991–00, 2001–2006) häufig entgegengesetzt ist (Blaschke 2003). Dies zeigt deutlich den Einfluss des gewählten Zeitfensters auf die Ergebnisse der Trendanalyse.

Das Ergebnis der Trendanalysen hinsichtlich der Jahresmittelwerte der Grundwassertemperatur ist in *Abbildung 9* und *Tabelle 3* zusammengefasst. In 60% der Messstellen ist die Grundwassertemperatur in den letzten 30 Jahren signifikant angestiegen. In nahezu keiner Station ist sie signifikant gesunken. Die Zunahmen in den letzten 30 Jahren waren zum Teil erheblich. In den meisten Messstellen lagen sie zwischen 0,3 und 1,2°C. Die Zunahme der Grundwassertemperaturen ist auf die Zunahme der Lufttemperatur (Erwärmung von oberflächennahem Grundwasser) und die Zunahme der Wassertemperatur in Oberflächengewässern (Infiltration von Wasser ins Grundwasser) zurückzuführen.

3.2. Auswirkungen des Klimawandels auf das Grundwasser

Die konkreten Aussagen über den möglichen Einfluss des Klimawandels auf die quantitativen Grundwasserverhältnisse in Österreichs Porengrundwasservorkommen erfolgen auf Basis der zu erwartenden Veränderungen in den Einflussgrößen der Grundwasserneubildung aus den Berechnungen der Klimamodelle (Lufttemperatur, Niederschlag) und der hydrologischen Modellierungen (mittlerer Abfluss, Niederwasserabfluss) (siehe ZAMG/TU-

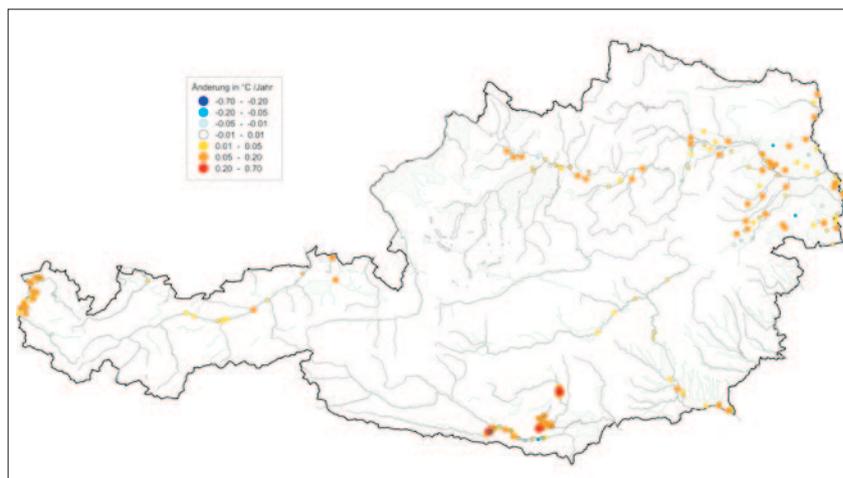


Abb. 9: Trend der Jahresmittelwerte der Grundwassertemperatur für Österreich, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006. Stationen mit mindestens 10 Jahren Beobachtung des Hydrographischen Dienstes. Große Kreise rot: steigende Trends, Große Kreise blau: fallende Trends, kleine Kreise: Trends nicht signifikant.

Wien Studie 2011). Die Szenarienrechnungen mit dem Klimamodell CLM lassen für den Zeitraum 2021–2050 gegenüber 1976–2006 eine Abnahme der Winterniederschläge im Süden erkennen (ZAMG/TU-Wien Studie 2011). Damit ist mit einer Abnahme der Grundwasserneubildung und damit der Grundwasserstände für den Süden Österreichs (Kärnten, Steiermark) zu rechnen. Andererseits zeigen diese Modellrechnungen, dass durch die Zunahme der Winterniederschläge in den Alpen und nördlich der Alpen in diesem Teil Österreichs eher eine Zunahme der Grundwasserneubildung zu erwarten ist. Durch die vermutlich geringe Zunahme der Niederschläge und die erwartete Temperaturerhöhung sind in den niederschlagsarmen Regionen im Osten Österreichs eher sinkende Grundwasserstände wahrscheinlich. Prognosen über eine Änderung in den Grundwasserständen einzelner Messstellen sind jedoch nach dem derzeitigen Kenntnisstand nicht möglich, da diese von den lokalen Verhältnissen inklusive der anthropogenen Eingriffe geprägt werden.

Um eine Auswirkung zukünftig höherer Lufttemperaturen auf die Grundwassertemperaturen abzuschätzen wurde für jede Station eine Regressionsrechnung zwischen der beobachteten mittleren jährlichen Grundwassertemperaturen Zeitreihe 1976 bis 2006 und den mittleren jährlichen Lufttemperaturen durchgeführt. Die Neigung der Regressionsgerade gibt darüber Aufschluss, in welchem Ausmaß eine Zunahme der Grundwassertemperaturen zu erwarten ist. Die Neigung der Regressionsgerade streut stark zwischen den Stationen. Das bedeutet, dass die

Grundwassertemperatur stark durch die lokale hydrogeologische Situation beeinflusst wird. Bei durchlässigen Untergrundverhältnissen kann die Jahresschwankung der Lufttemperatur ca. 8–10 m in den Untergrund eindringen. Dementsprechend unterscheiden sich Grundwasserleiter mit geringem und großem Flurabstand sowie nach den Eigenschaften der Überdeckung. Der Median der Neigung der Regressionsgeraden beträgt 0,5°C, wobei sie bei vielen Stationen zwischen 0,2 und 1,0°C pro 1,0°C Lufttemperaturzunahme liegt. Aus den Klimamodellen wird eine Zunahme der mittleren Lufttemperatur um ca. 1°C bis 2050 erwartet. Dementsprechend dürfte die Grundwassertemperatur um 0,2 bis 1°C für 2021–2050 gegenüber 1976–2006 zunehmen.

4. Zusammenfassung und Konsequenzen

Klimaänderungen finden in der Regel nicht abrupt statt und deshalb ist auch eine langfristig ausgerichtete Strategie der Bewirtschaftung der Wasserressourcen sinnvoll. Dabei sind Einflüsse, die nicht durch das Klima bedingt sind, wie Bevölkerungsentwicklung, Landnutzung, Energieverbrauchsentwicklung, etc. in die Überlegungen mit einzubeziehen, da diese gesellschaftspolitisch verursachten Veränderungen häufig größere Effekte für die Wasserbewirtschaftung nach sich ziehen als Klimaänderungen.

Die für 2021–2050 im Vergleich zu 1976–2006 zu erwartenden Änderungen zufolge Klimawandel im mittleren jährlichen Wasserdargebot der Oberflächenwasser sind vermutlich klein. Aus Sicht

einer österreichweiten Bilanz ist zu erwarten, dass die erhöhte Verdunstung im Wesentlichen durch erhöhten Niederschlag ausgeglichen wird. Es handelt sich dabei um eine mittelharte Aussage. Da die natürliche Variabilität des mittleren jährlichen Abflusses zwischen den Jahren deutlich größer als die zufolge Klimaänderung für 2021–2050 zu erwartenden Änderungen ist, erscheinen aus österreichweiter Sicht nicht grundsätzlich andere Bewirtschaftungsmaßnahmen in Hinblick auf das Wasserdargebot der Oberflächenwasser notwendig. Regional kann es aber durchaus zu Unterschieden kommen, die Handlungsbedarf bewirken. Ebenso kann es jahreszeitlich zu deutlichen Verschiebungen kommen. Im Detail handelt es sich bei diesen Verschiebungen um weiche bis mittelharte Aussagen. Die Sensitivität des mittleren jährlichen Abflusses auf Änderungen des Niederschlags und der Lufttemperatur ist im Flachland (besonders im Osten und Südosten) wesentlich größer als im Alpenraum (harte Aussage). Den Flachlandregionen des Ostens und Südostens ist deshalb aus wasserwirtschaftlicher Perspektive besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Das sind auch die Regionen Österreichs, die schon jetzt relativ geringe Abflusspenden aufweisen und in den letzten Jahren teilweise abnehmende Tendenzen des Abflusses zeigten.

Durch die vermutlich geringe Zunahme der Niederschläge und der erwartenden Temperaturerhöhung sind in den niederschlagsarmen Regionen im Osten Österreichs eher sinkende Grundwasserstände zu erwarten (weiche Aussage). Die Herausforderungen der Grundwasserwirtschaft sind insbesondere in den Porengrundwasservorkommen durch zunehmende Nutzungsansprüche (Spitzenbedarfdeckung beim Trinkwasser, Bewässerungsbedarf der Landwirtschaft) zu erwarten. Dazu wird eine Intensivierung wasserwirtschaftlicher Planung mit unterschiedlichen regionalen Strategien notwendig werden. Die Deckung des Trinkwasserbedarfes im Sinne eines öf-

fentlichen Interesses ist dabei verstärkt einzufordern. Zur Erfüllung dieser Aufgaben ist das Grundwasserstandsmessnetz zumindest beizubehalten und hinsichtlich der Grundwassertemperatur in intensiv genutzten Gebieten auszubauen. Steigende Grundwasserstände könnten in Gebieten mit schon derzeit bestehenden Problemen durch Kellervernässungen diese verstärken (weiche Aussage). Eine Überprüfung der Bebauungsvorschriften und eine Berücksichtigung bei der regionalen Raumplanung könnte in diesen Fällen notwendig werden.

Methodisch haben diese Untersuchungen gezeigt, dass es sinnvoll ist, bei Klimainpaktanalysen verstärkt die Mechanismen von Änderungen zu untersuchen, anstatt nur auf die Größe der Änderungen abzielen. Der weit verbreitete Szenarienansatz ist wegen der großen Unsicherheiten problematisch. Alternative Vorgehensweisen (Elastizität, Trading space for time) können die Aussagekraft erhöhen. Insbesondere ist jedoch die Vulnerabilität der Wasserressourcen in Hinblick auf Änderungen des Klimas eine wichtige Größe zur Entscheidung über Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft. Wenn auch die Änderungen der zukünftigen Wasserressourcen nicht im Detail prognostiziert werden können, so belegt etwa die höhere Sensitivität des mittleren jährlichen Abflusses auf Änderungen des Klimas im Osten und Südosten die höhere Vulnerabilität im Vergleich zum Westen.

Um tragfähige Aussagen über die zeitliche Entwicklung der Wasserressourcen machen zu können, ist eine fundierte Datenbasis essentiell. Die bestehenden hydrologischen Datenreihen (insbesondere Niederschlag, Abfluss, Grundwasserstand, Wannerverdunstung, Wassertemperatur) sollten durch Digitalisierung der derzeit nur auf Papier vorliegenden Daten verlängert werden und die Aussagekraft in Hinblick auf Trends durch Homogenisierung verbessert werden. Da die derzeitige Kenntnis der aktuellen Verdunstung bei

der Bestimmung des Wasserdargebots nicht ausreichend ist, sollten Messstellen eingerichtet werden, die die aktuelle Verdunstung direkt messen (Eddy Correlation). Die vorliegende Studie zeigte auch, dass es schwierig ist, anthropogene Einflüsse und den Klimaeinfluss auf das Wasserdargebot zu trennen. Hier genauere Einblicke – sowohl auf lokaler als auch regionaler Ebene – zu gewinnen wäre eine lohnende Zielrichtung zukünftiger Untersuchungen. Dafür ist sowohl eine solide Datenbasis als auch eine Modellierung mit unterschiedlichen Methoden notwendig. Im Kern der Untersuchungen müssen Aussagen über die Vorhersagbarkeit von zukünftigen Änderungen stehen. Wie in Blöschl et al. (2011a) detailliert dargestellt, unterscheidet die von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik und die Technische Universität Wien durchgeführte Studie (ZAMG/TU-Wien Studie 2011) nach harten/mittelharten/weichen Aussagen. Das ist eine tragfähige Vorgehensweise, da sie erlaubt, wesentlich robustere Handlungsempfehlungen abzuleiten als dies ohne diese Unterscheidung möglich ist.

Danksagung

Diese Studie wurde im Auftrag des BMLFUW Sektion VII und der wasserwirtschaftlichen Abteilungen der Ämter aller Landesregierungen Österreichs durchgeführt. Die Hydrographischen Daten wurden durch das Hydrographische Zentralbüro zur Verfügung gestellt. Diese Publikation zeigt auch Ergebnisse des Projektes Predictability of runoff in a changing environment (ÖAW). ■

Korrespondenz:

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