

Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft – Ziele und Schlussfolgerungen der Studie für Bund und Länder

Zusammenfassung: Die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik und die Technische Universität Wien wurden vom Lebensministerium und den wasserwirtschaftlichen Abteilungen der Landesregierungen beauftragt, eine Studie zur Entwicklung von Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft durchzuführen. Zielsetzung war es, den aktuellen Stand des Wissens zusammenzuführen, die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft mit neuesten Daten und Methoden in konsistenter Weise abzuschätzen und Vorschläge für Anpassungsmaßnahmen zu erarbeiten. Die Studie umfasst die folgenden Themenbereiche der Wasserwirtschaft in Österreich: Klimaänderung und Klimavariabilität, Hochwasser, Wasserbilanz, Niederwasser, Wassertemperaturen, Geschiebepotential, Grundwasser, Seen, Gletscher, Wasserkraft, Wasserqualität, Nutzungs- und Bedarfsaspekte. Die traditionelle Szenarienmethode für Klimaimpaktstudien ist problematisch, da sie große Unsicherheiten aufweist, die zudem schwer abschätzbar sind. Deswegen verfolgte die Studie drei Grundprinzipien, die sich von den üblichen Klimaimpaktstudien unterscheiden: (1) Weiche und harte Aussagen wurden unterschieden, um tragfähige Entscheidungsgrundlagen für Anpassungsmaßnahmen zu ermitteln; (2) um die Zuverlässigkeit der Aussagen zu erhöhen und ihre Unsicherheit einzuschätzen wurden ergänzende Informationsquellen herangezogen; Dabei lag (3) der Fokus auf Mechanismen, die differenziertere und transparentere Aussagen über Ursache-Wirkung erlauben als jene aus der Szenarienmethode alleine. Die auf dieser Basis erarbeiteten Anpassungsstrategien münden in einer Reihe robuster und flexibler Empfehlungen für Maßnahmen.

Climate change adaptation strategies for water resources management in Austria

Summary: The Central Institute for Meteorology and Geodynamics and the Vienna University of Technology were commissioned by the Ministry of Life and the Water Resources Divisions of the State Gov-

ernments to carry out a study on developing climate change adaptation strategies for water resources management in Austria. The aim of the study was to summarise the current state of the art, to assess, in a consistent way, climate impacts on water resources and water resources management based on the most recent data and methods, and recommend adaptation measures. The study includes the following themes: Climate variability and change, floods, water balance, low flows and droughts, water temperatures, potential sediment loads, ground water, lakes, glaciers, hydropower, water quality, water use and water demand. The traditional scenario method of climate impact studies is problematic due to the large uncertainties which are difficult to estimate. The study has hence adopted three main principles which differ from the usual practice: (1) Soft and hard facts were distinguished to find robust adaptation measures; (2) Complementary information sources were used to enhance and assess the reliability of the conclusions; (3) The focus was on the mechanism to allow a more nuanced and transparent assessment of cause-effect than is possible by scenarios alone. The adaptation strategies developed on the basis of these principles involve a set of robust and flexible measures.

1. Einleitung

In den letzten Jahrzehnten nahm die mittlere Lufttemperatur der Erde zu und eine weitere Zunahme wird erwartet (IPCC 2007). Im Alpenraum sind die Änderungen deutlich stärker ausgeprägt als im globalen Mittel mit einer Zunahme in den letzten 30 Jahren von etwa 1,5°C gegenüber 0,5°C im globalen Mittel (Böhm 2008). Auch Änderungen im Niederschlagsregime sind zu erwarten. Auswirkungen auf den Wasserhaushalt und damit die Wasserwirtschaft sind demzufolge abzusehen. Zur Entwicklung wasserwirtschaftlicher Handlungsstrategien ist es notwendig, die künftigen Entwicklungen des Wasserhaushaltes zu bewerten und

mögliche Risiken einzuschätzen. Auf europäischer Ebene ist dies durch die Aufnahme von Anpassungsmaßnahmen in der Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie bzw. der Hochwasserrichtlinie vorgesehen (KOM 2009), auf nationaler Ebene gilt ähnliches für die Nationalen Gewässerbewirtschaftungspläne. Bei der Auswirkung des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft besteht allerdings ein großes Wissensdefizit. Aus diesem Grund wurden in vielen Ländern Forschungsprogramme ins Leben gerufen, wie etwa das KLIWA und das KLIWAS Programm in Deutschland (Arbeitskreis KLIWA 2010, BMVBS 2009), das CCHydro und das NFP61 Programm in der Schweiz (BAFU 2010, SNF 2008, Leibundgut 2010), sowie internationale Aktivitäten wie das RheinBlick 2050 Projekt (Görgen et al. 2010). Der finanzielle Umfang dieser Projekte ist beträchtlich, beispielsweise ein jährlicher Etat von ca. 4,5 Millionen Euro über 5 Jahre im Falle von KLIWA.

In Österreich wurden 2009 die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik und die Technische Universität Wien vom Lebensministerium und den wasserwirtschaftlichen Abteilungen der Landesregierungen beauftragt, eine derartige Studie durchzuführen. Zielsetzung dieser Studie war es, den aktuellen Stand des Wissens zusammenzuführen, die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft mit neuesten Daten und Methoden in konsistenter Weise abzuschätzen und Vorschläge für Anpassungsmaßnahmen zu erarbeiten. Die Studie umfasst die folgenden für die Wasserwirtschaft relevanten Bereiche bzw. Prozesse in Österreich: Klimavariabilität, Hochwasser, Wasserbilanz, Niederwasser, Wassertemperaturen, Geschiebepotential, Grundwasser, Seen, Wasserkraft, Wasserqualität, Nutzungs- und Bedarfsaspekte. Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick über die Studie, wobei der Schwerpunkt auf der wissenschaftlichen Vorgangsweise und den Schlussfolgerungen liegt. Die weiteren Beiträge dieses Themenheftes geben ergänzende Informationen. Die Gesamtdarstellung der Ergebnisse ist in ZAMG/TU-Wien Studie (2011) zu finden.

2. Grundprinzipien der Studie

Die Studie widmete sich der Beurteilung der Einflüsse des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft in Österreich. Andere, insbesondere direkte anthropogene, Effekte wurden zur besseren Fokussierung ausgeklammert. Manchmal sind jedoch klimainduzierte und anthropogene Effekte nicht leicht zu trennen. Der Klimawandel wird für die Wasserwirtschaft, und für den „natürlichen Zustand“ der Gewässer nach EU Wasserrahmenrichtlinie, als eine „natürliche“ Veränderung und nicht als anthropogen verursachte Veränderung der Umweltbedingungen betrachtet, da der Einfluss nationaler wasserwirtschaftlicher Maßnahmen auf das Klima vernachlässigbar gering ist (Montanari et al. 2010). Die Auswertungen erfolgten räumlich differenziert für das gesamte Bundesgebiet. Es handelt sich also um regionale Untersuchungen, die Detailstudien nicht ersetzen können. Für Einzelprojekte sind jeweils Detailstudien durchzuführen.

Die Beurteilung der Einflüsse des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft ist mit großen Unsicherheiten verbunden. Deshalb verfolgte die Studie drei Grundprinzipien, die sich von den üblichen Klimaimpaktstudien unterscheiden: (1) Weiche und harte Aussagen wurden unterschieden, um tragfähige Anpassungsmaßnahmen zu finden; (2) Sich ergänzende Informationsquellen wurden herangezogen, um die Zuverlässigkeit der Aussage zu erhöhen und einzuschätzen; (3) Der Fokus lag auf Mechanismen, um differenziertere und transparentere Aussagen über Ursache-Wirkung als durch Szenarien alleine zu erhalten. Durch diese Grundprinzipien sollen die Ergebnisse für die Entscheidung über Anpassungsstrategien förderlicher sein, als es die übliche Vorgangsweise erlaubt.

2.1. Weiche und harte Aussagen unterscheiden

Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft werden üblicherweise mit Hilfe von Szenarien untersucht. Die Vorgangsweise ist einfach (Blöschl und Montanari 2010): (a) Wahl eines oder mehrerer Emissionsszenarien entsprechend IPCC (2007) die sich durch die politisch-ökonomische Situation unterscheiden; (b) Betreiben eines Globalen Zirkulationsmodells (GCM) auf Basis dieser Szenarien; (c) Hinunterskalieren der GCM Ergebnisse mit Hilfe regionaler Klimamodelle oder statistischer Ansätze; (d) Betreiben eines hydrolo-

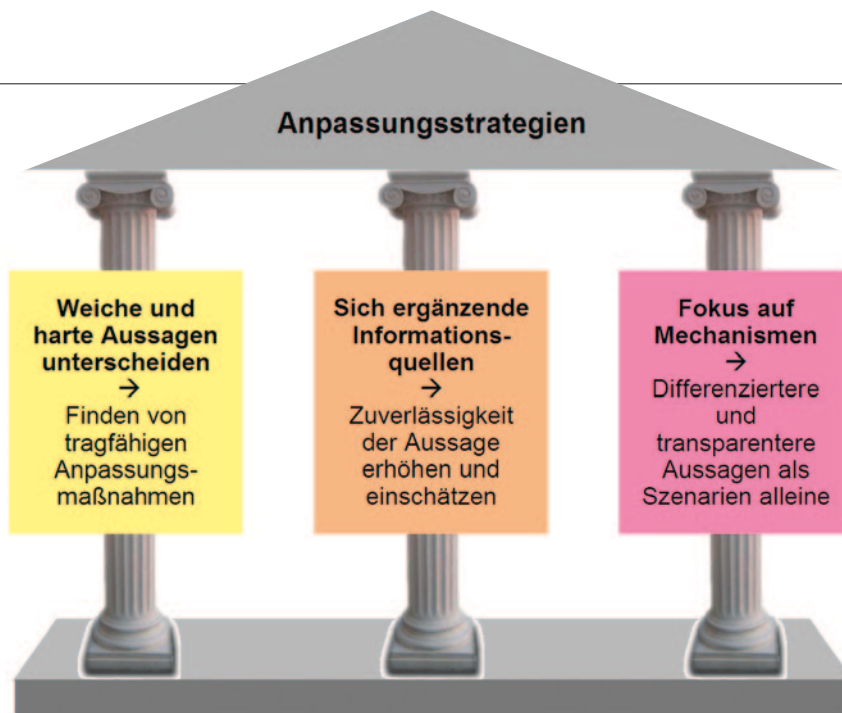


Abb. 1: Grundprinzipien der Studie Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft von Bund und Ländern.

gischen Modells auf Basis dieser Ergebnisse. (e) Vergleich der Modellergebnisse für die derzeitigen Situation mit den Szenarien, wobei alle anderen Faktoren gleich gelassen werden. Der Vorteil dieser Vorgangsweise besteht darin, dass man immer ein Ergebnis erhält. Dem steht allerdings der Nachteil gegenüber, dass die Ergebnisse nicht überprüfbar sind. Die damit verbundenen Unsicherheiten können sehr groß sein, und es ist auch schwer, das Ausmaß dieser Unsicherheiten abzuschätzen. In jedem Schritt der Modellkette werden Unsicherheiten eingebracht, die sich überlagern und nicht nur die Größe, sondern auch das Vorzeichen berechneter Änderungen bestimmen können (Merz et al. 2010). Für die nächsten wenigen Jahrzehnte, die für die wasserwirtschaftlichen Entscheidungen relevant sind, sind die Unterschiede zwischen den Emissionsszenarien klein, die Unsicherheiten aller anderer Schritte jedoch groß.

Generell besteht ein Gefälle bei der Sicherheit der Aussagen von großräumig (gut) zu kleinräumig (schlecht), sowie von langfristig (gut) zu kurzfristig (schlecht) (Tabelle 1). Dies hängt mit den Eigenschaften der Mittelwertbildung von Zufallsprozessen zusammen. Ein analoges Gefälle besteht von Aussagen über die Lufttemperatur (gut) zu Aussagen über den Niederschlag (schlecht). Dies hängt mit der Nichtlinearität des Niederschlagsbildungsprozesses zusammen. Extremwerte sind per Definition kleinräumig und kurzfristig weshalb sie sich nach dem derzeitigen State-of-the-art einer Vorhersage weitestgehend entziehen. Das gilt besonders für Extremwerte des Niederschlags. Diese Einflussfaktoren auf die Unsicherheiten treffen (neben den Szenarienanalysen) auch auf andere Methoden von Impaktstudien zu, wie Auswertungen von langen Beobachtungsreihen und sonstige Überlegungen.

TABELLE 1 Einflussfaktoren auf die Aussageschärfe berechneter Auswirkungen des Klimawandels.

Einflussfaktor / Parameter	Kleine Unsicherheit (mittelharte bis harte Aussagen)	Große Unsicherheit (weiche Aussagen)
Raumskale	Kontinente	Einzelne Einzugsgebiete
Zeitskale	Mittelwerte über Jahrzehnte	Einzeljahre, Monatswerte
Betrachtete Größe	Lufttemperatur (und davon abhängige hydrolog. Größen)	Niederschlag (und davon abhängige hydrolog. Größen)
Statistische Kenngrößen	Mittelwerte	Extremwerte (Starkniederschläge, Hochwasser)

Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wurden in der vorliegenden Studie durchgängig unterschieden, ob es sich bei den Aussagen um tragfähige (harte) Aussagen handelt bzw. weniger Vertrauen in diese Aussagen gelegt werden kann (mittelharte sowie weiche Aussagen). Dies folgt der von Böhm (2008) vorgeschlagenen Vorgangsweise. Während im IPCC Bericht, eine derartige Einschätzung auch durchgeführt wird, war dies bei hydrologisch-wasserwirtschaftlichen Untersuchungen von Klimaauswirkungen bisher kaum der Fall. Wenn nicht zwischen abgesicherter und spekulativer Interpretation von Berechnungsergebnissen unterschieden wird, kann es sehr leicht zur Empfehlung von Maßnahmen kommen, die nur teilweise sinnvoll sind (z. B. LFU 2007). Die Unterscheidung wird deshalb für das Finden tragfähiger Entscheidungen als essentiell erachtet. Beispielsweise (wie im folgenden ausgeführt) ist eine Zunahme der Gewässertemperaturen in den nächsten Jahrzehnten mit großer Wahrscheinlichkeit zu erwarten. Es handelt sich dabei um eine harte Aussage. Anpassungsmaßnahmen können dies voraussetzen. Umgekehrt ist eine Zunahme von Starkniederschlägen nicht durch Messungen oder Modelle belegt, es handelt sich also um eine weiche Aussage. Es ist nicht auszuschließen, dass sie zunehmen werden, aber es gibt keine belastungsfähige Grundlage dafür. Dementsprechend, kann bei Anpassungsmaßnahmen von der Möglichkeit einer Zunahme ausgegangen werden, nicht jedoch von einer Zunahme per se.

2.2. Sich ergänzende Informationsquellen

Wie erwähnt, leiden die Szenarienanalysen daran, dass die Unsicherheiten sehr groß sein können, und es auch schwer ist, das Ausmaß dieser Unsicherheiten abzuschätzen. Eine Möglichkeit, einen Eindruck über den Ausmaß dieser Unsicherheiten zu erhalten, besteht aus sogenannten Ensemblesimulationen. Dabei wird entweder ein Klimamodell mit unterschiedlichen Anfangsbedingungen oder mehrere Klimamodelle parallel betrieben. In analoger Weise können unterschiedliche Annahmen für die hydrologischen Modelle getroffen werden. Die Ergebnisse spannen dann eine Bandbreite der zu erwartenden Änderungen, etwa des Abflusses, auf. Grundsätzlich sind solche Ensemblesimulationen einzelnen Simulation vorzuziehen, da die

Auswahl eines einzelnen Modells immer willkürlich sein muss, und deshalb nur *ein* mögliches Ergebnis liefert. Allerdings unterscheiden sich die Modelle nicht in den grundsätzlichen Annahmen. Es ist deshalb zu erwarten, dass die Ergebnisse statistisch abhängig sind, wodurch die Bandbreite von Ensemblesimulationen die tatsächlichen Unsicherheiten unterschätzt. Außerdem helfen Ensemblesimulationen nicht, etwaige systematische Fehler (Biases) zu beurteilen.

Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wurden in der vorliegenden Studie, die Untersuchungen auf eine möglichst solide methodische Basis gestellt. Dem grundsätzlichen Ansatz der Wissenschaft folgend, wurde – soweit möglich – die Fragestellung mit mehreren Methoden untersucht, die sich in Hinblick auf Daten und Ansatz grundsätzlich unterscheiden. Wichtig ist, dass es sich nicht um unterschiedliche Modelle oder Szenarien handelt, die einem ähnlichen wissenschaftlichen Paradigma folgen, sondern Methoden, die einem vollkommen anderem Ansatz folgen und sich dadurch ergänzen. Dadurch ist zu erwarten, dass die Zuverlässigkeit der Aussage erhöht wird. In diesem Sinne sind die sich ergänzenden Methoden auch sich gegenseitig validierende Methoden (Gutknecht et al. 2006). Es wurden – soweit möglich – für alle untersuchten Größen sowohl Trendanalysen als auch Szenarienanalysen durchgeführt, da sich Trendanalysen und Szenarienanalysen wesentlich in Hinblick auf Daten und Modellannahmen unterscheiden. Während die Trendanalysen vor allem datenbasiert sind, liegt der Schwerpunkt bei Szenarienanalysen auf der Modellierung. Bei letzteren gibt es Unsicherheiten einerseits bei den Klimaszenarien, andererseits bei der Übertragung dieser Szenarien in den Abfluss. Bei den Trendanalysen ist die Übertragbarkeit auf die Zukunft fraglich und das Beobachtungsfenster hat meist einen entscheidenden Einfluss auf die Aussage. Wegen dieser Unsicherheiten wurden in dem Projekt zwei zusätzliche, neue Methoden für die Wasserwirtschaft angewandt: die Elastizitätsmethode, die die beobachteten zeitlichen Schwankungen ausgewertet und die „Trading space for time“ Methode, die auf einer Analyse der räumlichen Variabilität der Daten basiert. In Hinblick auf Modellannahmen und Datenbasiertheit liegen die beiden neuen Methoden zwischen Trendanalyse und Szenarienansatz. Blaschke et al. (2011) geben Details zu dieser Methode.

Außerdem wurden die Ergebnisse eingebettet in einen umfangreichen Literaturüberblick vergleichbarer Regionen (insbesondere Süddeutschland und die Schweiz).

Als weiterer Schritt im Umgang mit den Unsicherheiten der berechneten zukünftigen Werte wurde die Auswahl der vorgeschlagenen Anpassungsstrategien – wo dies möglich war – auf ein zweites Standbein gestellt. Dabei wurde nicht nur auf Basis von Projektionen abgestellt, sondern auch auf Basis der Vulnerabilität der Wasserressourcen in den unterschiedlichen Regionen Österreichs. Die Vulnerabilität (oder Verletzlichkeit) wasserwirtschaftlicher Systemkomponenten ist nicht von den Klimaszenarien abhängig, sondern von der bestehenden hydrologischen Situation und anderen wasserwirtschaftlichen Kenngrößen. Wenn etwa eine kleine Änderung des Niederschlags eine große Änderung des Abflusses bewirkt oder sich Wassergüteparameter bereits jetzt in der Nähe der zulässigen Grenzwerte befinden, handelt es sich um vulnerable Situationen. Diese wurden bei den vorgeschlagenen Anpassungsstrategien prioritär behandelt.

2.3. Fokus auf Mechanismen

Ein zusätzliches Problem bei Szenarienanalysen besteht darin, dass sie oft als „Black box“ verwendet werden. Das bedeutet, dass zahlreiche Modellkomponenten mit den entsprechenden Annahmen kombiniert werden und dann oft sehr rechenintensiv Simulationen durchgeführt werden. Das Ergebnis einer berechneten Änderung lässt sich dann kaum interpretieren. Ein Beispiel sind Hochwasser, die von vielen Prozessen abhängen, wie dem Ausmaß der Konvektivität des Niederschlags (Starkregen), dem saisonalen Niederschlag (Einfluss auf Wasserbilanz), der Höhe der Schneefallgrenze, der Jahreszeit der Schneeschmelze und der Verdunstung. Werden diese Prozesse in Szenariensimulationen verpackt, ist es dann nicht mehr transparent, welcher Prozess zu welcher Änderung des Hochwassers führen könnte. Das ist jedoch entscheidend, da etwa ein Höherwandern der Schneefallgrenze in den nächsten Jahrzehnten viel besser abgesichert ist (harte Aussage), als eine mögliche Zunahme von Starkniederschlägen (weiche Aussage). Die „Black box“ von Szenarienanalysen können das nicht leisten. Ähnliches gilt für die Auswirkung höherer Lufttemperaturen auf die Verdunstung und

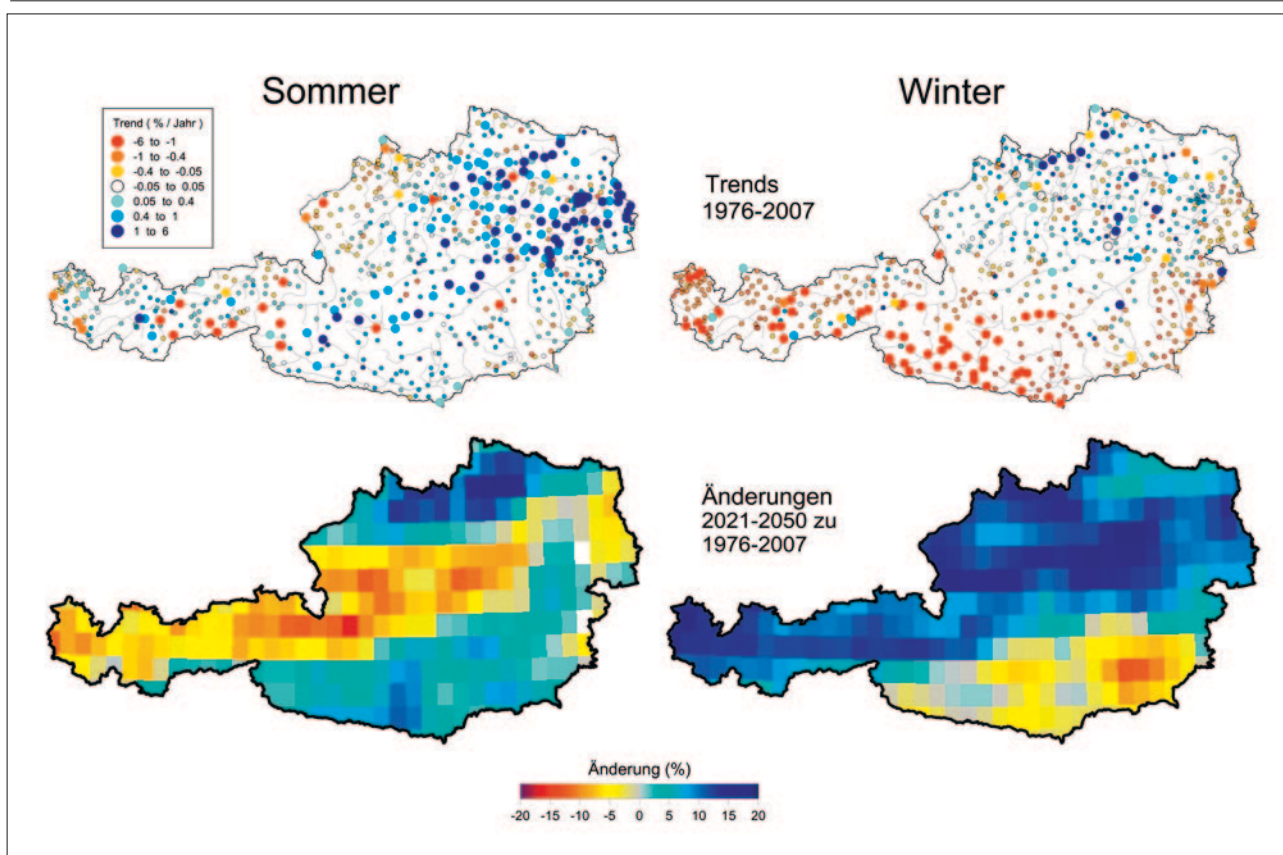


Abb. 2: Oben: Trends der Vierteljahresniederschläge (JJA und DJF) für die Periode 1976–2007. Stationen mit mindestens 25 Jahren Beobachtung des Hydrographischen Dienstes. Große Kreise blau: steigende Trends, Große Kreise rot: fallende Trends, kleine Kreise: Trends nicht signifikant (5% Signifikanzniveau). Unten: Änderungen der Vierteljahresniederschläge 2021–2050 bezogen auf den Kontrolllauf 1976–2007 berechnet mittels CLM (siehe Schöner et al. 2011). Diese Änderungen bilden die Grundlage für den hier verwendeten Delta-Change Ansatz der Szenarienanalyse (Blaschke et al. 2011, Blöschl et al. 2011).

damit die Wasserbilanz und einen möglichen Bewässerungsbedarf. Werden komplexe Modelle im Rahmen von Szenarienanalysen verwendet, ist es schwer zu unterscheiden, ob die Änderungen auf die zu einem Zeitpunkt höhere Verdunstung und Transpiration zurückzuführen ist, oder Änderungen in der Vegetationsdauer und anderen Effekten, die schwerer zu modellieren sind.

Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wurde in der vorliegenden Studie der Fokus auf die Mechanismen gelegt, die zu Änderungen in den hydrologischen, für die Wasserwirtschaft relevanten Parametern führen können. Im Falle von Hochwasser wurden beispielsweise die Mechanismen getrennt modelliert. Im Falle von Niederwasser wurden Sommer und Winterniederwasser unterschieden, die durch unterschiedliche Prozesse ausgelöst werden (Verdunstung bei Sommerniederwasser, Schnee- und Gefrierprozesse bei Winterniederwasser). Generell wurde auf Unterschiede in den Jahreszeiten Werte gelegt. Beispielsweise zeigten sich im Sommer größere Zunahme der Wassertempe-

raturen als im Winter. Die Saisonalität ist für viele hydrologische Größen der Schlüssel, um zu verstehen, wie sich Änderungen im Klima auswirken. Der Fokus auf Mechanismen führt dann zu differenzierteren Aussagen als wenn man die Ergebnisse von Szenarienrechnungen als allein gültig ansieht. Montanari et al. (2010) sagen dazu: "Offering insightful explanations for predicted changes may be more helpful than perfecting the estimates of what are inherently uncertain changes. Such a nuanced assessment will gain wider acceptance in society and will bring more credibility to the research community."

3. Vorgangsweise

Für jeden der betrachteten Themenbereiche der Wasserwirtschaft wurde vorerst eine Sichtung der Literatur durchgeführt. Sodann wurde – soweit vorhanden – die entsprechenden Daten der letzten Jahrzehnte ausgewertet, um daraus Schlüsse über die Trends zu ziehen. Dabei wurde im Rahmen des Möglichen unterschieden, ob die Änderungen anthropogene

bzw. klimatische Ursachen haben. Bei Änderungen des Abflusses war dies etwa durch einen Vergleich mit dem Niederschlag möglich. Bei Änderungen des Niederwasserregimes wurden Beeinflussungen durch wasserwirtschaftliche Maßnahmen getrennt ausgewiesen. In einem dritten Schritt wurde Szenarien ausgewertet. Beim Niederschlag, insbesondere im Nordosten Österreichs, fand in den 1970er Jahren ein markanter Trendwechsel statt. Es wurde daher in der gesamten Studie die Periode 1976–2007 als Bezugsperiode für das gegenwärtige Klima verwendet. Als Zukunftsperiode wurde 2021–2050 gewählt, da sie einem wasserwirtschaftlich relevanten Zeithorizont entspricht. Die Aussagen dieser Studie gelten dementsprechend für mittlere Verhältnisse der Periode 2021–2050 im Vergleich zu 1976–2007. Als Globale Basis wurde das IPCC Multimodel Ensemble (CMIP3) verwendet, für das Herunterskalieren auf die regionale Skala von Österreich wurden die Ergebnisse der Modelle COSMO-CLM (angetrieben mit dem Globalmodell ECHAM5 für das Szenario A1B)

herangezogen und mit dem Modell REMO verglichen. Die Aussagen dieser Studie gelten dementsprechend für regionale Verhältnisse in Österreich, nicht jedoch für einzelne kleine und kleinste Einzugsgebiete. Die Szenarienanalysen wurden – je nach wasserwirtschaftlich relevantem Bereich bzw. Prozess durch weitere Auswertungen ergänzt wie z. B. durch die Elastizitätsmethode oder die Trading Space for Time Methode.

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse der Studie zusammengefasst. Die weiteren Beiträge dieses Themenheftes geben ergänzende Informationen zu den einzelnen Themenbereichen. Schöner et al. (2011) beleuchtet die Frage aus der atmosphärischen Perspektive und geht insbesondere auf die damit verbundenen Unsicherheiten ein. Blöschl et al. (2011) befasst sich mit den Extremwerten, Blaschke et al. (2011) mit dem Wasserhaushalt. Kreuzinger und Kroiß (2011) widmen sich schließlich der Wassergüte und der Wassernutzung.

4. Ergebnisse

4.1. Klimaänderung und -variabilität

Die Histalp Daten zeigen, dass die Lufttemperatur in Österreich seit Mitte der 1970er Jahre deutlich (fast 1.5 °C) zugenommen hat. Es handelt sich dabei um einen für Österreich sehr einheitlichen Trend. Die Zunahme war stärker im Sommer (fast 2 °C) als im Winter (ca. 1 °C) (*harte Aussage*). Die Jahressummen des Niederschlags sind seit der Mitte der 1970er Jahre überall gestiegen, außer im Südosten. Dabei war die Zunahme im Norden und inneralpin monoton ansteigend (mehr als 15 % im Norden, ca. 10 % inneralpin), im Westen und Südosten stark durch dekadische Minima und Maxima geprägt (*harte Aussage*). Die Winterniederschläge sind seit der Mitte der 1970er Jahre nördlich des Alpenhauptkammes etwas gestiegen, südlich des Alpenhauptkammes deutlich gefallen. In den anderen Jahreszeiten gab es tendenziell eine Zunahme des Niederschlags in ganz Österreich mit Ausnahme des Südens wo die Trends sehr gering waren (*harte Aussage*). Die Klimaszenarien ergeben, dass die Lufttemperatur in Österreich gemittelt über den Zeitraum 2021 bis 2050 gegenüber 1976–2007 um ca. 1 °C steigen werden, wobei die Zunahme im Sommer stärker sein wird als im Winter (*harte Aussage*). Gemittelt über den Zeitraum 2021 bis 2050 gegenüber 1976–2007 werden die Winternieder-

schläge insbesondere nördlich des Alpenhauptkammes eher zunehmen, die Sommerniederschläge werden eher abnehmen. Eine stärkere Veränderung des Niederschlags ist erst nach 2050 zu erwarten (*mittelharte Aussage*). Die Verdunstung wird gemittelt über den Zeitraum 2021 bis 2050 gegenüber 1976–2007 zunehmen (*mittelharte Aussage*). Die Größenordnung der Änderung ist jedoch unsicher. Die Aussage, dass Extremwerte des Niederschlags auf Grund der höheren Niederschlags-summen im Winter und des auf Grund physikalischer Zusammenhänge mit dem zu erwartenden Temperaturanstieg einhergehenden höheren Feuchtegehaltes der Atmosphäre im Sommer (konvektive Ereignisse) zunehmen ist derzeit spekulativ, da die bisherigen Niederschlagsdaten in Österreich mit ihrer räumlichen und zeitlichen Auflösung und Genauigkeit keine Hinweise auf eine Zunahme von Extremniederschlägen ergeben.

4.2. Hochwasser

In den letzten 30 Jahren haben in etwa 20 % der Einzugsgebiete in Österreich die Hochwässer zugenommen, besonders in kleinen Gebieten nördlich des Alpenhauptkammes (*harte Aussage*). Die Trends über die letzten 50 Jahre sind weniger deutlich (*mittelharte Aussage*). Österreichweit haben die Winterhochwässer deutlich stärker zugenommen als die Sommerhochwässer (*mittelharte Aussage*). Die Häufung der Hochwässer in den letzten Jahrzehnten liegt im Rahmen der natürlichen Variabilität von Hochwasserdekaden aber auch ein Einfluss einer Klimaänderung ist nicht auszuschließen (*harte Aussage*). Prognosen über Hochwasseränderungen sind nach dem derzeitigen Kenntnisstand nicht möglich, da die zukünftige Entwicklung der Extremwerte des Klimas nicht ausreichend zuverlässig berechnet werden kann (*harte Aussage*). Hier durchgeführte Wenn-dann Szenarien (Zeithorizont 2021–2050 im Vergleich zu 1976–2007), die die unterschiedlichen Mechanismen der Hochwasserentstehung und ihre Saisonalität abbilden zeigen die folgenden mögliche Änderungen des HQ_{100} in % wenn jeder Mechanismus einzeln auftritt): Schneefallgrenze steigt: 0 bis +4 % (*mittelharte Aussage*); Verschiebung des Zeitpunktes der Hochwässer (frühere Frühjahrshochwässer, mehr Winterhochwässer) (*harte Aussage*); frühere Schneeschmelze, höhere Verdunstung: –5 bis +2 % (*weiche Aussage*); Änderung der Winter/Sommerniederschläge:

–3 bis +2 % (*weiche Aussage*); Erhöhung der Konvektion: +2 bis +10 % (*weiche Aussage*). Die natürliche Variabilität der Hochwässer ist wesentlich größer, als die erwartete Änderung zufolge des Klimawandels (*harte Aussage*). Im Innviertel und Mühlviertel kann eine gewisse Verschiebung der Hochwässer vom Sommer in den Winter mit steigenden Lufttemperaturen in Zusammenhang gebracht werden, weshalb eine Überprüfung der Bemessungswerte notwendig sein kann. Besonders in kleinen Gebieten ist die Unsicherheit von Bemessungswerten im derzeitigen Klima wesentlich größer als die hier diskutierten Änderungen zufolge Klimawandel. Bei der Bestimmung von Bemessungswerten des Hochwassers ist deshalb die Unsicherheit durch Verwendung einer möglichst weitreichenden, über das Hochwasserkollektiv hinausgehenden, Datenbasis zu reduzieren.

4.3. Wasserbilanz

Während in den letzten drei Jahrzehnten im Mittel über Österreich die Niederschläge gestiegen sind, hat sich der Abfluss kaum geändert. Das heißt die Verdunstung ist gestiegen (*harte Aussage*). Regionale Unterschiede zeichneten sich jedoch ab: im Süden und in Vorarlberg fallende, im östlichen Alpenraum hingegen steigende Trends der Jahresabflüsse. Generell waren die sinkenden Abflüsse im Sommer zu verzeichnen, mit Ausnahme des Ostens (*harte Aussage*). Für den Zeithorizont 2021–2050 sind im Vergleich zu 1976–2007 nur kleine Änderungen im mittleren Abfluss zu erwarten (*mittelharte Aussage*). In ganz Österreich mit Ausnahme des Südens ist eine Erhöhung der Winterabflüsse um ca. 20 % zu erwarten (*mittelharte Aussage*). Im Osten (Flachland) ist eine Abnahme des Frühjahrsabflusses und im Westen (Alpen) eine Abnahme des Sommerabflusses um jeweils ca. 10–20 % zu erwarten (*weiche Aussage*). Insgesamt ist in Österreich mit einem Rückgang der Gletscher bis ca. 2050 zu rechnen (*harte Aussage*). In unmittelbarer Nähe von Gletschern ist bis 2050 eine deutliche Zunahme der Sommerabflüsse zu erwarten, in größeren Einzugsgebieten ist der Einfluss nur in Trockenjahren relevant (*harte Aussage*). Da die natürliche Variabilität des mittleren jährlichen Abflusses zwischen den Jahren deutlich größer als die zu erwartenden Änderungen zufolge Klimaänderung für 2021–2050 ist, erscheinen aus österreichweiter Sicht nicht grundsätzlich andere Bewirtschaft-

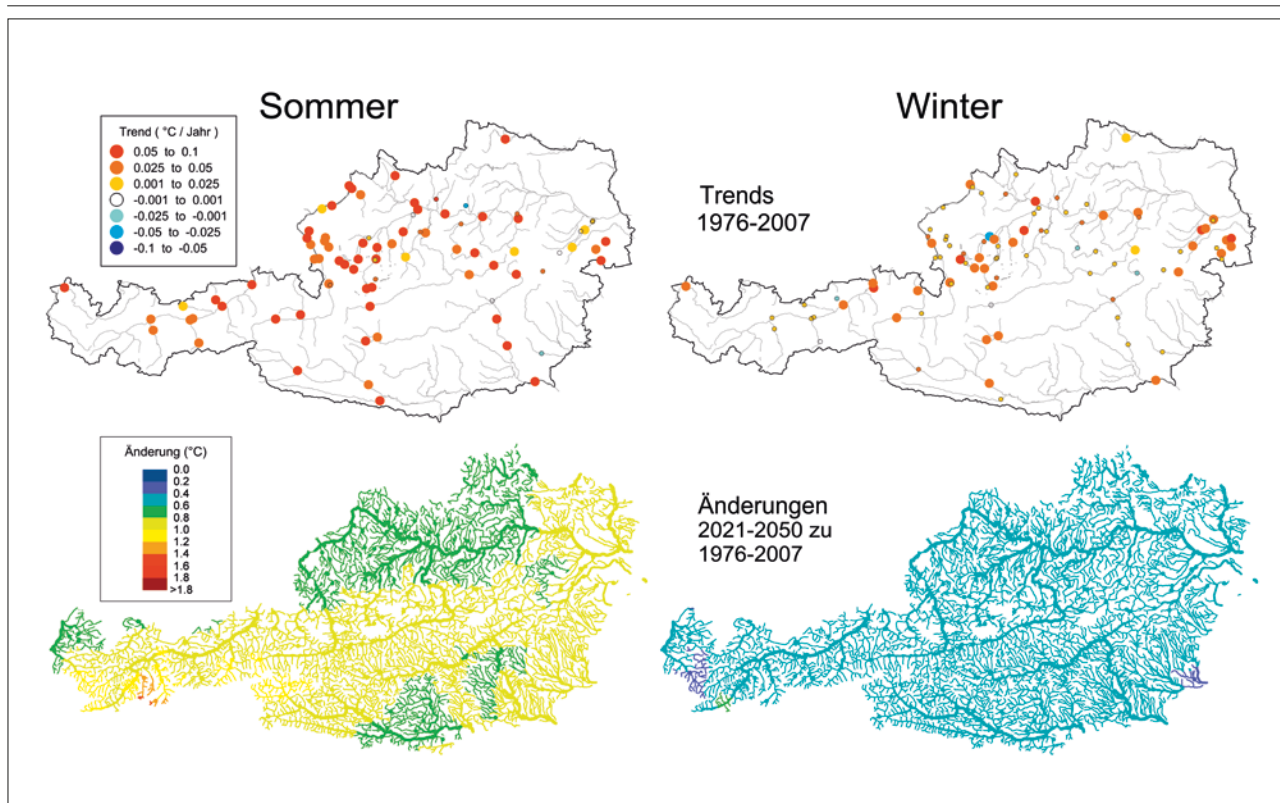


Abb. 3: Oben: Trends der mittleren Gewässertemperaturen (JJA und DJF) für die Periode 1976–2007. Stationen mit mindestens 30 Jahren Beobachtung des Hydrographischen Dienstes. Große Kreise blau: steigende Trends, Große Kreise rot: fallende Trends, kleine Kreise: Trends nicht signifikant (5 % Signifikanzniveau). Unten: Berechnete Zunahme der Vierteljahreswassertemperatur 2021–2050 bezogen auf 1976–2007 unter Verwendung der Ergebnisse des CLM Modells.

tungsmaßnahmen in Hinblick auf das Wasserdargebot der Oberflächenwasser notwendig. Regional betrachtet kann es aber durchaus zu Unterschieden kommen und jene Regionen, die schon jetzt geringe Abflussspenden ($<10 \text{ l/s/km}^2$) aufweisen (vor allem im Osten und Südosten Österreichs), sind bei den Anpassungsmaßnahmen besonders zu berücksichtigen.

4.4. Niederwasser

Im den Alpenin Gebieten Österreichs treten die Niederwässer im Winter zufolge Schnee bzw. Gefrierprozesse auf, im Flachland des Ostens im Sommer zufolge Verdunstung. Über 900 m Seehöhe haben in den letzten 30 Jahren in 14 % der Pegelinzugsgebiete die Niederwasserabflüsse (Q95) zugenommen und in nur 3 % der Gebiete abgenommen. Mit einer weiteren Zunahme ist zu rechnen (*harte Aussage*). Unter 900 m Seehöhe haben in den letzten 30 Jahren in 10 % der Pegelinzugsgebiete die Niederwasserabflüsse (Q95) abgenommen und in nur 5 % der Gebiete zugenommen. Eine Abnahme ist insbesondere im Süden und Südosten Österreichs festzustellen. Dieser Trend dürfte sich in der Zukunft fortsetzen mit Abnahmen von bis

zu 10–15 % für den Zeithorizont 2021–2050 sind im Vergleich zu 1976–2007 (*mittelharte Aussage*). Deswegen ist die Vulnerabilität der Gewässer bei Niedrigwassersituationen in diesen Regionen hoch. Das Niedrigwasserjahr 2003 eignet sich sehr gut für die Beurteilung von Niedrigwassersituationen bei Klimaänderung im Sommer, da dies ein extremes Jahr war, wie es auch in Zukunft auftreten kann (*harte Aussage*).

4.5. Wassertemperaturen

Bereits in der Vergangenheit konnte ein genereller Anstieg der Wassertemperaturen verzeichnet werden. In den letzten 30 Jahren betrug der Anstieg der Wassertemperaturen in Österreichs Flüssen ca. 1,5°C im Sommer bzw. 0,7°C im Winter (Mittelwert über alle Messstellen, Abb. 3) (*mittelharte Aussage*). Für die Zukunft wird eine generelle Zunahme der Wassertemperaturen erwartet (*harte Aussage*). Bei einer Zunahme der Lufttemperatur um 1°C nimmt die Wassertemperatur im Mittel um ca. 0,8°C zu (räumliche Auswertungen) (*mittelharte Aussage*). Für den Zeithorizont 2021–2050 im Vergleich zu 1976–2007 dürfte die Zunahme bei etwa 0,7 bis 1,1°C

im Sommer und 0,4 bis 0,5°C im Winter liegen (Abb. 3). Die mittlere Zunahme ist ca. 0,8°C (*mittelharte Aussage*). Diese erhöhte Temperatur entspricht einer Verschiebung in der Seehöhe um ca. 100 m. Damit ist auch mit Verschiebungen der Bioregionen zu rechnen (*harte Aussage*). Auch die Temperaturen des Porengrundwassers nahmen deutlich zu (zwischen 0,3 bis 1,2°C) (*harte Aussage*). Bei einer zukünftigen Zunahme der Lufttemperatur um 1°C nimmt die Grundwassertemperatur um ca. 0,2 bis 1°C zu, hängt aber stark von der lokalen Situation ab (*mittelharte Aussage*). Bei der Beurteilung von Wärmeinleitungen sind diese Temperaturerhöhungen zu berücksichtigen.

4.6. Geschiebepotential

Für das Geschiebepotential sind vor allem zwei klimarelevante Faktoren zu betrachten: das Auftreten von Starkniederschlägen und die Lage der Permafrostgrenze. Die Niederschlagsdaten in Österreich geben bisher keine Hinweise auf eine Erhöhung von Starkniederschlägen. Deswegen ist keine Auswirkung auf das Geschiebepotential ableitbar (*harte Aussage*). Mit einer Erhöhung der Permafrostgrenze ist zu

rechnen (*harte Aussage*). Lokal betrachtet könnte deshalb das Geschiebepotential im Bereich der Permafrostgrenze deutlich zunehmen (*mittelharte Aussage*). In größeren Einzugsgebieten liegt die erwartbare Zunahme weit unter den natürlichen Schwankungen (*mittelharte Aussage*).

4.7. Grundwasser

Die Neubildung des Porengrundwassers erfolgt vor allem im Frühjahr. Änderungen sind also vor allem von den klimatischen Verhältnissen im Frühjahr bestimmt. Die Auswertung der letzten rund 30 Jahre zeigt, dass bei 18 % der Grundwassermessstellen die Jahresmittelwerte des Grundwasserstandes einen fallenden Trend und bei ca. 12 % einen steigenden Trend aufwiesen (*harte Aussage*). Eine Abnahme der Grundwasserstände wurde für Messstellen in Kärnten, Südsteiermark und Burgenland bis zur Donau verzeichnet, eine starke Zunahme im Süden des südlichen Wiener Beckens. In den nächsten Jahrzehnten ist im Süden Österreichs (Kärnten, Steiermark) eine Abnahme der Grundwasserneubildung zu erwarten (*mittelharte Aussage*) im Norden und Westen könnte die Grundwasserneubildung zunehmen (*weiche Aussage*). Durch die vermutlich geringe Zunahme der Niederschläge und die erwartete Temperaturerhöhung sind in den niederschlagsarmen Regionen im Osten Österreichs eher sinkende Grundwasserstände zu erwarten (*weiche Aussage*). Eine Fortsetzung bzw. Intensivierung der wasserwirtschaftlichen Planung der Grundwasservorkommen erscheint speziell in den niederschlagsarmen Regionen des Ostens und Südens Österreichs sinnvoll. Durch steigende Grundwasserstände könnten in Gebieten mit derzeit schon bestehenden Problemen bei Kellervernässungen diese zunehmen (*weiche Aussage*).

4.8. Seen

Die oberflächennahen Wassertemperaturen in den Seen Österreichs haben in den letzten Jahrzehnten generell zugenommen und werden auch noch weiter steigen (*harte Aussage*). Die sommerlichen Wasserstände des Bodensees könnten sich in Zukunft reduzieren (*weiche Aussage*). Die Wasserstände des Neusiedler Sees bleiben annähernd gleich wenn die Lufttemperatur um ca. 1°C und der Niederschlag um ca. 5 % zunimmt (*weiche Aussage*). Die Durchmischungscharakteristik von geschichteten Seen wird von den Tempera-

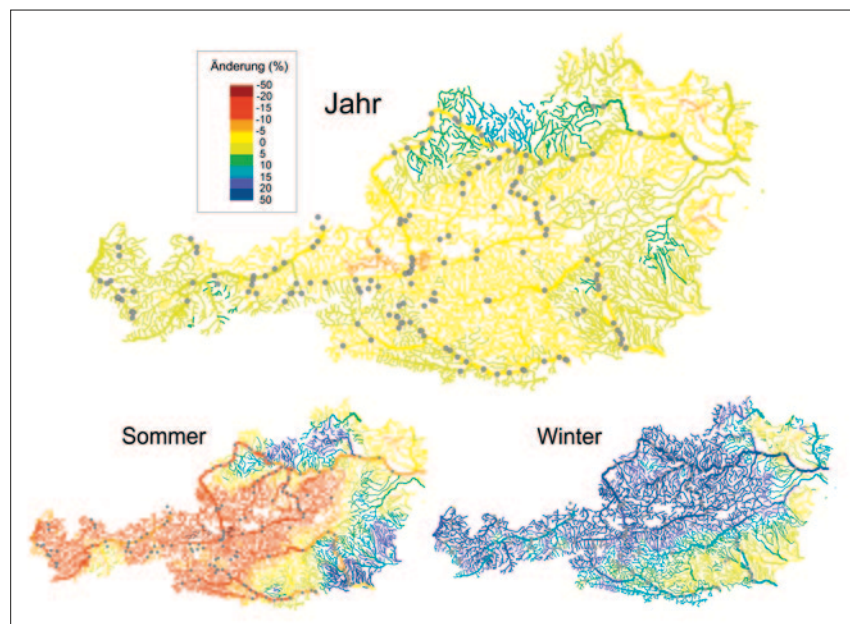


Abb. 4: Änderungen des mittleren jährlichen Wasserkraftpotenzials 2021–2050 bezogen auf 1976–2007 berechnet mit dem Niederschlag-Abflussmodell unter Verwendung der Ergebnisse des CLM Modells. Blau: Zunahme, rot: Abnahme. Graue Punkte zeigen Wasserkraftanlagen. Oben: Jahreswerte; Unten: Vierteljahreswerte (JJA und DJF).

turen des Oberflächenwassers und den Windbedingungen dominiert. Aussagen über die zukünftige Änderung der Mischungscharakteristik der Seen können nicht gesichert gemacht werden.

4.9. Wasserkraft

Abbildung 4 zeigt die Änderungen des theoretischen Wasserkraftpotenzials (Linienpotential, 2021–2050 im Vergleich zu 1976–2006), die mittels hydrologischen Simulationen berechnet wurden. Die Änderungen des mittleren jährlichen Potenzials sind vermutlich kleiner als +/-5% (*mittelharte Aussage*). In ganz Österreich mit Ausnahme des Südens ist eine Erhöhung des Wasserkraftpotenzials im Winter um ca. 20% zu erwarten (*mittelharte Aussage*). Im Osten (Flachland) ist möglicherweise eine Abnahme des Wasserkraftpotenzials im Frühjahr und im Westen (Alpen) eine Abnahme des Wasserkraftpotenzials im Sommer um jeweils ca. 10–20% zu erwarten (*weiche Aussage*). Dadurch ergibt sich eine bessere Anpassung an den Verbrauch (*mittelharte Aussage*).

4.10. Wasserqualität

Grundsätzlich beeinflusst die Klimavariabilität die Wasserqualität durch die Temperatur sowie das Wasserdargebot. In der Vergangenheit erfolgten die anthropogenen Einflüsse auf die Qualität von Wasserkörpern (Verschmutzung und Sanierung)

wesentlich rascher als sich klimatische Rahmenbedingungen verändert haben (*harte Aussage*). Es ist zu erwarten, dass dies auch in Zukunft der Fall sein wird (*harte Aussage*). Für Gewässer, die heute im Grenzbereich zwischen Zielzustand und "mäßigem Zustand" liegen, besteht ein erhöhtes Risiko, infolge der bis 2050 erwarteten Auswirkungen des Klimawandels den "guten Zustand" zu verfehlen, bei gering belasteten Gewässern wird der Einfluss gering sein (*mittelharte Aussage*). Temperaturerhöhungen in den Gewässern werden zu einer Anpassung der aquatischen Biozönosen führen, die Bioregionen werden sich daher verschieben (*harte Aussage*). Die Anpassung der Natur an den Klimawandel (natürlicher Zustand) muss in den Leitbildern der Qualitätszielverordnung abgebildet werden. Wegen der Langsamkeit des Anpassungsprozesses stellt dies eine mittel- bis langfristige Perspektive dar.

4.11. Nutzungs- und Bedarfsaspekte

Die Ansprüche der Gesellschaft an die Wasserversorgung und -nutzung hatten in den letzten Jahrzehnten eine raschere Dynamik als die Veränderung der klimatischen Bedingungen (*harte Aussage*). Aufgrund der hohen Wasserverfügbarkeit in Österreich ist von keinem durch Klimaszenarien abgesicherten großräumigen Mangel an Rohwasser für die Wasserversorgung auszugehen (*harte Aussage*). In den

Regionen, die bezüglich des Wasserdargebotes ungünstige Rahmenbedingungen für die Versorgung und Nutzung aufweisen, könnte allerdings die Vulnerabilität steigen (*mittelharte Aussage*). Es ist mit einem erhöhten Wasserbedarf für die Nutzpflanzen zu rechnen (*harte Aussage*). Dieser könnte durch zunehmenden Niederschlag abgedeckt werden (*weiche Aussage*), ansonsten ist zusätzliche Bewässerung notwendig. Wasserversorgungsanlagen in Regionen die bezüglich des Wasserdargebotes ungünstig sind, sollten sich um ein zweites Standbein oder Vernetzung bemühen. Für den Fall von Nutzungskonflikten in Zeiten von Engpässen sind bereits vorsorglich Priorisierungen der Wassernutzung zu überlegen. Es wird empfohlen, die Erfahrungen aus dem Sommer des Jahres 2003 in Hinblick auf Nutzungs- und Versorgungsengpässe auszuwerten um daraus Schlüsse für Maßnahmen zur Erhöhungen der Redundanz abzuleiten.

5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Wasserwirtschaft hat eine extrem lange Tradition der Anpassung durch technische und organisatorische Maßnahmen an geänderte Klimabedingungen, die meist durch Extremereignisse (Hochwasser, extreme Trockenperioden,

trockene und nasse Dekaden) ausgelöst oder zumindest beschleunigt wurden. Die meisten Anforderungen der NutzerInnen und SchützerInnen von Wasser und Gewässern an die Wasserwirtschaft (Abdeckung des Wasserbedarfes und/oder einer Einhaltung gewisser Gütekriterien in Grund und Oberflächengewässern, Überschreitung von Mindestdurchflüssen) sind dadurch gekennzeichnet, dass sie „zu jeder Zeit“ (also auch bei seltenen außergewöhnlichen Bedingungen mit hoher Sicherheit erfüllt werden sollen. Diese dauernden Anforderungen haben dazu geführt, dass die Wasserwirtschaft sogenannte „robuste“ Systeme anstrebt. Diese weisen einerseits eine geringe Versagenswahrscheinlichkeit auf, andererseits bleiben bei Versagen (Nichteinhaltung aller Anforderungen an Schutz von Mensch und Umwelt) die Schäden zumindest zeitlich begrenzt und die Reparatur oder Kompensationsmaßnahmen abschätzbar.

Kriterien für eine funktionierende Wasserwirtschaft bzw. Wasserinfrastruktur orientieren sich häufig an selten auftretenden Extremereignissen. Das gilt sowohl für anthropogene Wasserbedarfs- und Verbrauchsspitzen als auch für Hoch- und Niedrigwassersituationen. Für die Bewirtschaftung des Grundwassers sind häufig die langfristigen Veränderungen von größerer Bedeutung. Die mittleren Verhält-

nisse über ein Jahr oder eine Dekade (Temperatur, Niederschlag) mit langsamen Veränderungen über längere Zeiträume spielen daher in vielen Bereichen für technische Anpassungsmaßnahmen eine untergeordnete Rolle, bei der Bewirtschaftung des Grundwassers können sie dominant sein.

Die natürlichen Gewässer und ihre Ökosysteme sind auf Extremereignisse eingerichtet. Sie spielen vermutlich eine wichtige Rolle bei der Entwicklung und Erhaltung einer hohen Resilienz. Nachdem der anthropogene Einfluss häufig zu einer deutlichen Einschränkung dieser Fähigkeit zur Selbststabilisierung und zu zusätzlichen Belastungen führt, kommt es auch zu regional unterschiedlicher Verringerung der Resilienz der Ökosysteme gegenüber Klimaänderungen und Extremereignissen. Beide können zu einer Verminderung der Robustheit bestehender wasserwirtschaftlicher Systeme und Strukturen führen, die Maßnahmen erforderlich machen.

Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel müssen sich an einem Vorsorgeprinzip orientieren, das Kosten und Risiken für Mensch und Umwelt in einem akzeptablen Gleichgewicht hält. Die Risiken betreffen zwei unterschiedliche Bereiche:

- Einerseits kann die Nutzung von Wasser für verschiedene Zwecke durch den

LITERATUR

Arbeitskreis KLIWA (2010) Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. 4. KLIWA-Symposium am 3. und 4. Dezember 2009 in Mainz. KLIWA-Berichte. Heft 15. www.kliwa.de

BAFU (2010) CCHydro – Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserressourcen und die Gewässer in der Schweiz – Zusammenfassung. Bundesamt für Umwelt, Bern. www.bafu.admin.ch/wasser/01444/01991/10443/index.html

Blaschke AP, Merz R, Parajka J, Salinas J, Blöschl G (2011) Auswirkungen des Klimawandels auf das Wasserdargebot von Grund- und Oberflächenwasser. Österr. Wasser- und Abfallw. Dieses Heft

Blöschl G, Montanari A (2010) Climate change impacts-throwing the dice? Hydrological Processes, 24, (3) 374–381

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, pp. 1241–1247

Blöschl G, Viglione A, Merz R, Parajka J, Salinas J, Schöner W (2011) Auswirkungen des Klimawandels auf Hochwasser und Niederwasser. Österr. Wasser- und Abfallwirtsch. Dieses Heft

BMVBS (2009) KLIWAS – Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland. 1. Statuskonferenz am 18. und 19. März 2009, BMVBS, Bonn. Tagungsband. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn. www.kliwas.de

Böhm R (2008) Heiße Luft: Reizwort Klimawandel – Fakten, Ängste, Geschäfte. Edition Va Bene, Wien, 262 pp

Borga M, Anagnostou EN, Blöschl G, Creutin JD (2010) Flash floods: Observations and analysis of hydro-meteorological controls, Preface. Journal of Hydrology, 394 (1–2), 1–3

Görgen K, Beersma J, Buiteveld H, Braher G, Carambia M, Keizer O de, Krahe P, Nilson E, Lammersen R, Perrin C, Volken D (2010) Assessment of Climate Change Impacts on Discharge in the River Rhine Basin. Results of the RheinBlick2050 project. Report no 1–23 of the international commission for the hydrology of the Rhine Basin, Lelystad, the Netherlands, 210pp

Gutknecht D, Blöschl G, Reszler Ch, Heindl H (2006) Ein „Mehr-Standbeine“-Ansatz zur Ermittlung von Bemessungshochwassern kleiner Auftretenswahrscheinlichkeit. Österr. Wasser- und Abfallwirtsch., 58, H 3/4, pp. 44–50

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, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

KOM (2009) Climate Change and Water, Coasts and Marine Issues. Sektorenpapier zum Weißbuch zur Anpassung an den Klimawandel der Europäischen Kommission, 1.4.2009, SEC(2009) 386, Brüssel

Kreuzinger N, Kroiß H (2011) Klimawandel, qualitative Aspekte der Wasserwirtschaft und Nutzungsaspekte. Österr. Wasser- und Abfallwirtsch. Dieses Heft

Leibundgut Ch (2010) Nachhaltige Sicherung von Wasserressourcen – das NFP 61 im Spiegel globaler und nationaler Herausforderungen Wasser Energie Luft – 102. Jahrgang, 2010, Heft 3, 222–228

LFU (2007) Klimaanpassung – Bayern 2020. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, 42 pp. bvbm1.bib-bvb.de/dtl_public/26/173475.html

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

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

SNF (2008) Nachhaltige Wassernutzung. Ausführungsplan des Nationalen Forschungsprogramms NFP 61. Schweizerischer Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung, Bern. www.nfp61.ch

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

Klimawandel bedroht sein (Einschränkung von Nutzungen), was auch ökonomische Risiken (z. B. Kühlwasserentnahmen für Kraftwerke oder Industrie) oder die Erfüllung von Verpflichtungen (z. B. Trinkwasserversorgung) einschränkt oder mit zusätzlichen Aufwendungen verknüpft. In beiden Fällen sind Veränderungen im Bereich des Wasserdargebotes und der Umweltbedingungen über die Zeit eng mit den Veränderungen der Beschaffenheit von Wasser und Gewässern gekoppelt.

- Andererseits stellt die Aufgabe des Schutzes aller Gewässer vor Verschlechterung und die Erreichung bzw. Herstellung eines guten Zustandes sowie der Schutz der davon abhängigen Ökosysteme nach WRG 1959 ein öffentliches Interesse dar. Hier besteht das Risiko für die Wasserberechtigten, dass Veränderungen des Klimas und die damit ausgelösten Anpassungen der lebendigen Umwelt einen Eingriff in bestehende Wasserrechte notwendig machen können. Dieser Eingriff ist juristisch schwierig und an die Bedingung der „Kostenminimierung“ (günstestes Mittel) auch in Hinblick auf die Verwendung öffentlicher Gelder gebunden.

Daraus folgt, dass eine langfristige Perspektive von Anpassungsmaßnahmen sinnvoll ist, weil einerseits die Veränderungen des Klimas langsam vor sich gehen und auch Anpassungsmaßnahmen meist nicht kurzfristig umzusetzen sind. Dabei ist immer zu beachten, dass die Vulnerabilität der wasserwirtschaftlichen Aktivitäten, also des Wechselspiels zwischen Wassernutzung und -schutz, wesentlich stärker durch die Variabilität des Wettergeschehens an sich bedroht wird als durch die vergleichsweise langsamen Veränderungen des Klimas. Daraus kann man den Schluss ziehen, dass Maßnahmen, die beide Bedrohungen verringern, eine höhere zeitliche Priorität bekommen können also solche, die nur die negativen Auswirkungen eines zukünftigen Klimawandels betreffen.

Die Erhöhung der Risiken (potentielle Kosten für Schadensbehebung), die von Wasser zufolge Klimawandel für die Menschen ausgehen kann, insbesondere jene durch Veränderung der Hochwasserregime auch in Siedlungsgebieten, aber auch jene durch Dürren in der Landwirtschaft, erfolgt mit großer Sicherheit wesentlich langsamer als die Erhöhung der Schadenspotenziale zufolge der laufen-

den Steigerung des Wertes der betroffenen Infrastruktur oder der betroffenen landwirtschaftlichen/forstwirtschaftlichen Flächen auch durch indirekte Auswirkungen wie Hangrutschungen, Windbruch oder Lawinen. Bei Anpassungsmaßnahmen muss daher immer überprüft werden, ob nicht Maßnahmen zur Verringerung der Auswirkung von Extremereignissen auf die Schadenskosten (z. B. Objektschutz, Freihaltung von Überflutungsflächen) geringere Kosten verursachen als die Aufrechterhaltung eines definierten Schutzniveaus für die bedrohte Infrastruktur durch technische Maßnahmen auf der Basis von für die Zukunft berechnete erhöhten Auftretswahrscheinlichkeiten für Extremereignisse.

Die vorliegende Studie zeigte, dass die traditionelle Szenarienmethode bei Klimaimpaktstudien problematisch ist und große Unsicherheiten aufweist. Die Unsicherheiten unterscheiden sich je nach Raumscale und Zeitscale. Aussagen für kleine Gebiete und kurze Zeitperioden sind unsicherer als solche über Kontinente und Dekaden. Die Unsicherheiten unterscheiden sich auch nach der betrachteten Größe. Hydrologische Größen die vom Niederschlag abhängen (z. B. Abfluss) sind unsicherer als solche, die von der Lufttemperatur abhängen (z. B. Wassertemperatur). Bei Extremwerten nehmen die Unsicherheiten weiter zu. Um diesen Herausforderungen gerecht zu werden verfolgte die Studie drei Grundprinzipien, die sich von den üblichen Klimaimpaktstudien unterscheiden: (1) Weiche und harte Aussagen wurden unterschieden, um tragfähige Anpassungsmaßnahmen zu finden; (2) Sich ergänzende Informationsquellen wurden herangezogen, um die Zuverlässigkeit der Aussage zu erhöhen und einzuschätzen; (3) Der Fokus lag auf Mechanismen, um differenziertere und transparentere Aussagen über Ursache-Wirkung als durch Szenarien alleine zu erhalten. Durch diese Grundprinzipien sollen die Ergebnisse nutzbringender für die Entscheidung über Anpassungsstrategien sein, als es die übliche Vorgangsweise erlaubt.

Obwohl die Studie „Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft“ die Fragestellung in umfassender Weise beleuchtet hat, besteht weiterer Forschungsbedarf. Die in absehbarer Zukunft erwartbaren Ensemblesimulationen von Klimamodellen könnten die Unsicherheiten der Klimamodelle bei Impaktanalysen weitergehender abbilden als dies durch die Auswertung der Ergebnisse einzelner

Modelle möglich ist. Für hydrologische Fragestellungen müssen Untersuchungen mit regionalen Klimamodellen ein vermehrtes Interesse auf hydrologisch relevante Wetterlagen und deren richtige Simulation durch die Modelle legen. Da nicht zu erwarten ist, dass sich die Genauigkeit der Klimamodelle in nächster Zeit sprunghaft verbessert, sind robuste (empirische) Methoden zu entwickeln, die eine Abschätzung von Extremwerten für die Zukunft zulassen. Das gilt besonders für Hochwasser, da die Veränderungen im Extrembereich weiterhin eine offene Forschungsfrage sind. In Hinblick auf die Frühwarnung vor Extremereignissen wäre die Entwicklung von probabilistischen Hochwasserwarnsystemen in kleinen Einzugsgebieten für flash floods (siehe Borga et al. 2010) sowie Niederwasserprognosen anzudenken. Erfahrungen aus dem Sommer des Jahres 2003 in Hinblick auf Nutzungs- und Versorgungsengpässe auszuwerten wäre empfehlenswert, um daraus Schlüsse für Maßnahmen zur Erhöhung der Redundanz abzuleiten.

Bei der Bestimmung der Veränderungen der Verdunstung gibt es derzeit Defizite. Eine Ergänzung der bisherigen Wannenmessungen durch eine direkte Messung der Verdunstung etwa durch die Eddy-Correlation Methode wäre deshalb wünschenswert. Auch der Niederschlagsmessung im alpinen Bereich ist vermehrte Aufmerksamkeit zu schenken, um eine langfristige gute Datenbasis zu erhalten. Gleiches gilt für Messreihen der Wasserbeschaffenheit. Hier sollte verstärkt auf qualitativ hochwertige lange Reihen gesetzt werden. Um aus Messdaten Trendänderungen ablesen zu können ist eine sehr hohe Datenqualität nötig. Deswegen besteht Bedarf zur Homogenisierung hydrologischer Daten in ähnlicher Weise wie dies etwa für den Histalp Datensatz (Auer et al. 2007) bereits durchgeführt wurde. Auch die Digitalisierung derzeit nur auf Papier vorhandener Daten wäre wünschenswert, um klimainduzierte Trends besser beurteilen zu können. Mit einer derartig erweiterten Datenbasis sollten anthropogene und klimatische Einflüsse auf den Wasserhaushalt und die Wasserbeschaffenheit schärfer getrennt werden, als dies derzeit möglich ist (Blöschl et al. 2007).

Da die traditionelle Szenarienmethode wegen der großen Unsicherheiten in den Ergebnissen für Klimaimpaktstudien problematisch ist, sind alternative bzw. ergänzende Vorgangsweisen zu ent-

wickeln und zu verfeinern. Alternative Vorgangsweisen für das Abschätzen zukünftiger Änderungen sind etwa die „Trading space for time Methode“ und die Elastizitätsmethode, die in dieser Studie angewendet wurden. Mit solchen ergänzenden Vorgangsweisen ist ein stärkerer Fokus auf die Mechanismen zu legen, die bestimmte Änderungen bewirken, anstatt nur auf die Ergebnisse der komplexen Klima- und Niederschlags-Abflussmodelle zu vertrauen. Essentiell ist dabei, dass die Unsicherheiten getrennt nach Mechanismus ausgewiesen werden. Ohne eine klare Unterscheidung in harte und weiche Aussagen und daraus abgeleitete Empfehlungen lassen sich keine tragfähigen Handlungsentscheidungen für die Wasserwirtschaft ableiten. In der Zukunft wird eine Vorgangsweise an Bedeutung gewinnen, die neben den Projektionen der Auswirkungen des Klimawandels in die Zukunft die Vulnerabilität des hydrologisch-wasserwirtschaftlichen Systems in den Vordergrund stellt, um robuste und flexible Instrumente für Anpassungsstrategien der Wasserwirtschaft an den Klimawandel zu entwickeln. Damit kann auch die natürliche Variabilität von Extremsituationen, die ausgeprägter ist als der Einfluss des Klimawandels, besser in die Entscheidungen für Maßnahmen eingebracht werden.

Danksagung

Diese Studie wurde durchgeführt im Auftrag des BMLFUW Sektion VII und der wasserwirtschaftlichen Abteilungen der Ämter aller Landesregierungen Österreichs. Die Daten wurden vom Hydrographischen Zentralbüro bzw. den hydrographischen Diensten der Länder zur Verfügung gestellt. ■

Korrespondenz:

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

Wolfgang Schöner
Reinhard Böhm
Klaus Haslinger
Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik
Hohe Warte 38
1190 Wien

Helmut Kroiß
Norbert Kreuzinger
Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und
Abfallwirtschaft
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13
1040 Wien