

Anja SOBOLL, München
Jürgen SCHMUDE, München

Mensch-Umwelt-Systeme unter dem Einfluss des globalen Wandels – Ein Ansatz zur integrierten regionalen Global Change Forschung am Beispiel des Themenkomplexes Tourismus und Klimawandel

Summary

Climate change is one of the most important challenges of the 21st century. Global change is constituted by numerous interactions within the human-environment-system and shows a dynamic and spatially differentiated development. Therefore, climate impact research has to adopt an interdisciplinary approach to consider the ecological, economic and social dimension as well as regional differences in terms of varying framework conditions, vulnerabilities and reasonable adaptation measures to be adopted. This is realised in the integrative research project GLOWA-Danube (GLObal change of the WAter cycle; www.glowa-danube.de), which analyses the influence of climate change on various sectors, such as industry, tourism or households by means of climate and societal scenarios in the Upper Danube catchment (77,000 km²). Thus, GLOWA-Danube offers a decision-support-system for stakeholders in terms of developing and assessing different regional sustainable adaptation strategies.

Der Klimawandel ist seit einigen Jahren in Wissenschaft und Praxis prominentes Thema. Während er zunächst aus rein naturwissenschaftlicher Sicht hinsichtlich des *ob* und *wie* eines Wandels betrachtet wurde, erweiterte sich der Blickwinkel in den letzten Jahren auch auf die sozialwissenschaftliche Perspektive und bezog potenzielle Folgen und Auswirkungen sowie mögliche Anpassungsstrategien im Sinne einer Identifikation von Adaptationsmaßnahmen ein.

Neben dieser inhaltlichen Ausweitung des Themas wird inzwischen auch der Klimawandel selbst nicht mehr als singuläres Phänomen betrachtet, das mit einer bloßen Erhöhung der Durchschnittstemperaturen und veränderten Niederschlagsverhältnissen einhergeht. Vielmehr wird der Klimawandel in den breiteren Kontext eines multidimensionalen Globalen Wandels gestellt, der von einer Vielzahl anthropogener Prozesse beeinflusst wird und seinerseits Auswirkungen auf das menschliche Handeln hat. Das heißt, es müssen Wechselwirkungen und positive sowie negative Rückkopplungen zwischen Natur und Gesellschaft als Teile eines komplexen Systems berücksichtigt und adäquat analysiert werden. In diesem Sinne muss einerseits die Natur als gesellschaftlich transformiert verstanden werden,

andererseits resultieren aus Veränderungen der Umwelt modifizierte soziale Vulnerabilitäten (GÖRG 2008, 96ff.). Diese dialektische Verknüpfung von Natur und Gesellschaft ist Grundlage des Konzepts der gesellschaftlichen Naturverhältnisse, des grundlegenden Ansatzes der Sozialen Ökologie (GÖRG 2003; BECKER u. JAHN 2006). Dabei bestimmt die Interdependenz von Gesellschaft und Umwelt konstitutiv deren Entwicklung. Die beiden strukturell gekoppelten Systembestandteile sind nicht klar abgrenzbar und befinden sich in einer dynamischen Koevolution.

Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass eine isolierte Betrachtung von Klimawandel und globalem Wandel nicht zielführend sein kann. Da Interaktionen zwischen Gesellschaft und Umwelt stattfinden, darf deren Analyse nicht sektoral einzelnen Wissenschaftsdisziplinen vorbehalten bleiben, sondern muss vielmehr inter- und intradisziplinär erfolgen (FUCHS 2010, 46). Darüber hinaus ist eine klare Risikokommunikation gegenüber der Bevölkerung wesentlich, da klimatische Änderungsprozesse der menschlichen Wahrnehmung nicht unmittelbar zugänglich sind. Um die Kenntnissnahme und Umsetzung wissenschaftlicher Ergebnisse in einer möglichst breiten Öffentlichkeit zu gewährleisten, muss sich zudem das politische Engagement von einzelnen Politikfeldern, wie etwa Raumplanung, Verkehr oder Energie auf einen deutlich breiteren Fokus einstellen und eine Vielzahl gesellschaftlicher Bereiche einbeziehen (MICKWITZ et al. 2009). Auf diese Weise lässt sich eine Wissensbasis schaffen, auf deren Grundlage von der Gesellschaft zukünftig existenzielle Entscheidungen getroffen werden können und müssen, um dieser enormen Herausforderung erfolgreich zu begegnen (BEYERL 2010, 260).

1 Vom globalen zum regionalen Wandel

Zur Entwicklung von globalen Klimamodellen (Global Climate Models = GCM) wird der Globus mit einem dreidimensionalen Gitter überzogen und Gleichungen werden ausschließlich für dynamische Prozesse an den Gitterlinien erstellt. Dieses Vorgehen ermöglicht eine modellhafte Nachbildung klimatischer Prozesse, die allgemeine Aussagen zu potenziellen klimatischen Veränderungen erlaubt. Aufgrund der Größe der Gitterzellen sind jedoch regional differenzierte Analysen nicht möglich. Um eine realistischere Abschätzung der Klimaentwicklung zu erreichen, bedarf es einer weiteren räumlichen Aufgliederung.

Hinsichtlich der Auflösung des Gitternetzes sind aufgrund verbesserter Rechnerleistungen in den vergangenen Jahren deutliche Fortschritte zu verzeichnen. Die Maschenweite des GCM betrug im Ersten Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (HOUGHTON et al. 1990) ca. 500 km, während das dem Vierten Sachstandsbericht des IPCC (SOLOMON et al. 2007) zugrunde liegende GCM bereits mit einer Auflösung von rund 110 km arbeitet. Dennoch finden notwendige regionale Differenzierungen in GCM nach wie vor nicht ausreichend Beachtung. Um die Wissenslücke hinsichtlich regionalspezifischer Entwicklungen zu schließen, kommen seit einigen Jahren statische und dynamische Downscaling-Verfahren zum Einsatz, die eine Entwicklung regionaler Klimamodelle (Regional Climate Models = RCM) ermöglichen. Beispiele hierfür sind etwa REMO, das REgionale KlimaMOdell des Max-Planck-Instituts für Meteorologie für Deutsch-

land, Österreich und die Schweiz (JACOB et al. 2008) oder MM5, das fünfte Mesoskalige Meteorologiemodell der Pennsylvania State University (CHEN u. DUDHIA 2001). Allerdings basieren RCM auf GCM, sodass ihre Qualität von den globalen Input-Daten abhängt. Gerade im Kontext von Mensch-Umwelt-Systemen ist die Unsicherheitsdiskussion von großer Bedeutung, da Daten über klimatische Rahmenbedingungen häufig ungenau, unsicher und zum Teil fehlerbehaftet sind. Obwohl die Forschung in diesem Bereich große Fortschritte macht und der Grad der Unsicherheit somit reduziert werden kann, scheint ihre vollständige Eliminierung gänzlich unwahrscheinlich (AULINAS et al. 2009, 6f.).

Dennoch muss sich eine anwendungsorientierte Klimafolgenforschung mit regionalen Entwicklungen auseinandersetzen, denn Ziel dieser interdisziplinären Forschung ist neben einem Beitrag zum wissenschaftlichen Diskurs die Ableitung politischer und handlungspraktischer Schlussfolgerungen. Nur auf diese Weise lässt sich die Lücke zwischen Wissenschaft und öffentlicher Entscheidungsfindung im Bereich der Klimafolgen thematik sukzessive schließen (LIU et al. 2008, 846f.).

Aus diesen Überlegungen lassen sich hinsichtlich einer notwendigen Übertragung von Tendenzen des globalen Wandels auf die regionale Ebene zwei Aufgabenkomplexe ableiten:

- Einerseits stehen die konkreten Auswirkungen globaler Zukunftstrends auf einzelne Regionen im Mittelpunkt des Interesses. Hierbei gilt es zu analysieren, wie sich der Klimawandel und andere Prozesse des globalen Wandels in einzelnen Regionen auf unterschiedliche Bereiche (z.B. verschiedene Wirtschaftszweige, Politik oder Privatpersonen) potenziell auswirken. Konkret muss sich die Klimafolgenforschung mit dem Grad der Betroffenheit auseinandersetzen und plausible Annahmen bezüglich des regionalen Wandels ermöglichen.
- Andererseits ist eine Einordnung der Qualität und Quantität von Adaptationsmöglichkeiten innerhalb von Regionen erforderlich. Es gilt zu überprüfen, wie die jeweiligen regionalen Akteure mit dem Wandel umgehen. Hierbei stellt sich die Frage, wie sich die Gesellschaft anpasst und darüber hinaus sich eventuell ergebende Chancen nutzen kann.

Um beide Aufgaben zu bewältigen, muss zunächst geklärt werden, welche Wissensgrundlagen und Instrumentarien zur Erreichung dieser Ziele benötigt werden. Ferner ist festzustellen, wie Wissenschaft dazu beitragen kann, zukünftig nachhaltige Entscheidungen zu unterstützen.

2 GLOWA-Danube: Pionier der integrierten regionalen Global-Change-Forschung

Die erforderliche regional differenzierte Betrachtungsweise der Themenkomplexe Klimawandel bzw. globaler Wandel, die gleichzeitig wechselseitige Abhängigkeiten im Mensch-Umwelt-System berücksichtigt, wird im integrativen Projekt GLOWA-Danube (GLObaler WANdel des Wasserkreislaufs; www.glowa-danube.de) umgesetzt. GLOWA-Danube ist Teil des Projektverbundes GLOWA, der die regionalen Folgen des globalen Wandels anhand fünf ausgewählter Wassereinzugsgebiete in Mitteleuropa, dem Nahen Osten und Westafrika analysiert (www.glowa.org).

2.1 Zentrale Forschungsziele des Projekts

Im Rahmen von GLOWA-Danube werden regionale Auswirkungen des globalen Wandels mit dem Fokus auf der Ressource Wasser analysiert. Der Wassereinzugsbereich der Oberen Donau (77.000 km², über 11,5 Mio. Einwohner) bietet dabei besondere Herausforderungen, da die hydrologischen und klimatologischen Verhältnisse aufgrund des alpinen Einflusses äußerst komplex sind. Das Gebiet weist in Vorländern und Hochgebirgen Höhen zwischen 280 und 3.600 m über NN auf und ist geprägt von starken topographischen und meteorologischen Gradienten sowie der Schnee- und Eisdynamik der Alpen (WEBER et al. 2010b, 1.8). Daher ist zu erwarten, dass sich Klimaänderungen im Untersuchungsgebiet von GLOWA-Danube besonders stark bemerkbar machen werden, woraus sich unter anderem Veränderungen der natürlichen Vegetation sowie Nutzungsänderungen und Nutzungskonflikte zwischen unterschiedlichen Akteursgruppen (z.B. Privathaushalte, Industriebetriebe, Landwirtschaft und Tourismus) ergeben werden. Derzeit gilt der Untersuchungsraum als Wasserüberschussgebiet, was für die verschiedenen Nutzergruppen von großer Bedeutung ist. Über 2.000 kommunale Wasserversorger stellen die Wasserversorgung sicher, die nahezu ausschließlich auf der Entnahme von Grund- und Quellwasser basiert (BARTHEL et al. 2010, 1.16). Zudem ist der Abfluss aus dem Raum der Oberen Donau Lebens- und Wirtschaftsgrundlage für Unterliegerstaaten wie die Slowakei, Ungarn und Kroatien. Diese Aspekte und die Tatsache, dass in den verschiedenen betrachteten natur- und humanwissenschaftlichen Bereichen (z.B. Klimastationsdaten, hydrologische Daten, Informationen über Wirtschaftssektoren und Haushalte) eine umfassende Datengrundlage existiert, machen die Obere Donau zu einem besonders geeigneten mesoskaligen Untersuchungsgebiet (Abb. 1), das als repräsentativ für Gebirgsvorland-Regionen in den gemäßigten Breiten zu werten ist.

Das inter- und transdisziplinäre Konsortium von GLOWA-Danube untersucht an der Oberen Donau explizit regionale Auswirkungen des globalen Wandels, d.h. nicht nur des Klimawandels, sondern auch des demographischen, ökonomischen und politischen Wandels, um den angesprochenen Interdependenzen Rechnung zu tragen. Zentrale Forschungsziele sind hierbei

- die Entwicklung von Methoden zur Abschätzung von Konsequenzen, die sich aus dem globalen Wandel für das Gebiet der Oberen Donau in den kommenden 50 Jahren ergeben,
- die Entwicklung anwendbarer Werkzeuge zur Simulation regionaler Szenarien sowie
- der Entwurf und die Evaluation geeigneter regionaler Adaptationsmaßnahmen für verschiedene betroffene Akteure.

Diese Zielsetzungen waren zu Beginn des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekts im Jahr 2001 neuartig, denn bis dato existiert keine anwendbare Methode zur prospektiven, szenariogestützten Analyse gekoppelter Mensch-Umwelt-Systeme.

Um zur Schließung dieser Wissenslücken beizutragen, arbeiten im GLOWA-Danube Forschungsnetzwerk rund 40 Wissenschaftler aus acht Universitätsinstituten, zwei außeruniversitären Forschungsinstituten, einer wissenschaftlichen Kom-

mission, einer Landesbehörde sowie zwei Firmen aus den Fachdisziplinen Hydrologie, Fernerkundung, Grundwasserwirtschaft und Wasserversorgung, Wasserwirtschaft, Glaziologie, Informatik, Meteorologie, Regionale Klimamodellierung, Pflanzenökologie, Agrarökonomie, Umweltpsychologie, Tourismusforschung und Umweltökonomie zusammen (MAUSER et al. 2010, E1). Die integrative Kooperation dieser Disziplinen ermöglicht die Einbindung naturwissenschaftlicher und humanwissenschaftlicher Kenntnisse und Methoden. Somit lassen sich im Projekt einerseits die Ursachen des Klimawandels, natürliche Wirkungsketten und Konsequenzen für die Umwelt identifizieren. Andererseits werden die notwendigen Kompetenzen zur Abschätzung der gesellschaftlichen Wirkungsketten, klimawandelbedingter Folgen für die Gesellschaft, potenzieller Verhaltensänderungen, etwa durch Mitigation und Adaptation sowie deren Effekte auf die Umwelt eingebracht.

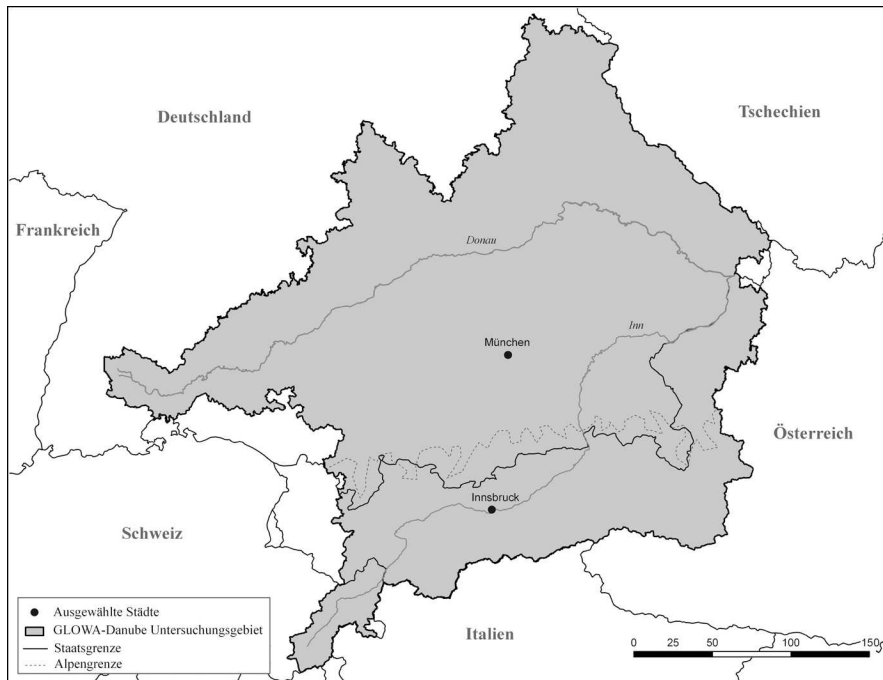


Abb. 1: GLOWA-Danube Untersuchungsgebiet

Aus der Erkenntnis, dass der Umgang mit dem globalen Wandel eine der größten Herausforderungen der Menschheit im 21. Jahrhundert darstellt (BEYERL 2010, 260), ergibt sich unter anderem die Notwendigkeit, die Forschungsergebnisse Stakeholdern zur Verfügung zu stellen bzw. mit ihnen zu diskutieren. Nur durch diesen Brückenschlag zwischen Wissenschaft und Praxis kann theoretisches Wissen praktisch nutzbar gemacht werden. Allerdings gestaltet sich diese Verknüpfung zum Teil äußerst schwierig, da die beiden Bereiche aufgrund unterschiedlicher Perspektiven verschiedene Ziele und Interessen verfolgen. Dies führt häufig zu

einem gegenseitigen Missverständnis der Wissenssysteme (MCNIE 2007, 18). Deswegen steht die Forschung vor der Herausforderung, Informationen bereitzustellen, die den drei Kriterien Plausibilität (credibility; von Nutzern als verlässlich und qualitativ hochwertig wahrgenommene Informationen), Legitimität (legitimacy; transparente und verständliche Informationen) und Salienz (saliency; kontextuell relevante Informationen) gerecht werden (CASH et al. 2003, 8088). Daher empfehlen verschiedene Autoren (u.a. DILLING 2007, 56; SAREWITZ u. PIELKE 2007, 10) die frühzeitige Einbindung von und iterative Abstimmung mit Stakeholdern in klimafolgenorientierten Forschungsprojekten. Dies erfolgt in GLOWA-Danube zum einen in Form des Entscheidungs-Unterstützungs-Systems (Decision Support System = DSS) DANUBIA. Zum anderen wird bereits in der Konzeptionsphase durch die Einbindung von Stakeholdern eine transdisziplinäre Problemanalyse vorgenommen, um die Anwendbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse im Sinne einer Transformation von Orientierungs- in Verfügungswissen zu ermöglichen. Beteiligte Stakeholder aus verschiedenen Wirtschafts- und Politikbereichen erhalten dabei Einblick in das Forschungsdesign und beurteilen den Realitätsbezug der zu entwickelnden Szenarien. Zudem werden im Laufe des Projekts generierte Ergebnisse immer wieder mit Stakeholdern diskutiert und weiterführende Fragestellungen entwickelt. Dieses Vorgehen stellt sicher, dass die generierten Ergebnisse Lösungsmöglichkeiten für konkrete sozio-ökologische und sozio-ökonomische Problemfelder eröffnen.

2.2 Integrative Aufgabenbereiche des Projekts

Aus den oben formulierten Forschungszielen ergeben sich vier zentrale Aufgabenbereiche, die im Folgenden näher betrachtet werden:

1. Zunächst müssen einzelne natur- und humanwissenschaftliche (Teil-)Modelle entwickelt werden. Die natürlichen und gesellschaftlichen Systemkomponenten werden in einzelnen Modellen abgebildet, die zu einem funktionsfähigen Ganzen integriert werden. Daher entwickelt zunächst jedes Teilprojekt ein Simulationsmodell, beispielsweise auf das Untersuchungsgebiet herunter skalierte regionale Klimamodelle oder Gletscher- und Grundwassermodelle seitens der naturwissenschaftlichen Disziplinen. Die Modelle folgen dabei den Vorgaben, dass Naturgesetze und Erhaltungssätze streng gelten. Erhaltungssätze betreffen die Bilanz eingebrachter und ausgebrachter Stoffmengen (z.B. Wasser), die ausgeglichen sein muss (STREBEL 2003, 314). Die humanwissenschaftlichen Modelle sind als sogenannte Akteursmodelle konzipiert. Sie basieren auf Ansätzen der Multiagentenmodellierung, d.h. räumliche Muster ergeben sich in den Modellen aufgrund der Emergenz individuellen Verhaltens (KLÜGL 2001, 13ff.). Auf diese Weise lassen sich Entwicklung und Verhaltensänderungen verschiedener Akteure mittels Simulationsläufen prospektiv analysieren. Ein Akteur kann dabei jede beliebige soziale Entität darstellen, etwa einen Haushalt, einen Industriebetrieb, einen landwirtschaftlichen Betrieb, ein Wasserversorgungsunternehmen oder einen touristischen Anbieter, z.B. ein Skigebiet. Die Akteure sind entscheidungsfähig, d.h. sie wählen aus mehreren ihnen zur Verfügung stehenden Optionen diejenige aus, die aufgrund ihrer jeweiligen Umweltbedingungen aktuell am zielführendsten ist. So kann beispielsweise ein Skigebiets-Akteur aus den Alternativen *öffnen*, *schließen* und *künstlich beschneien*

wählen. Je nach Temperatur, vorhandener Schneehöhe und Datum entscheidet sich jeder einzelne Skigebiets-Akteur täglich für die aus individueller Rationalität sinnvollste Aktion. Dies setzt voraus, dass der Skigebiets-Akteur, der dem Tourismus Modell angehört, zur Simulationslaufzeit Daten anderer Modelle (z.B. Meteorologie) empfängt, auf deren Basis er seine Entscheidung treffen kann.

2. Um diesen Datenaustausch zwischen den (Teil-)Modellen zu ermöglichen, ist als zweite zentrale Aufgabe die Implementierung eines generischen Frameworks erforderlich. Dafür wird in GLOWA-Danube das Framework DANUBIA, ein vollgekoppeltes Simulationssystem entwickelt, das die relevanten Wechselwirkungen zwischen den eingebundenen physikalischen und gesellschaftlichen Modellen abbildet und globale Regeln zum Datenaustausch vorgibt (Abb. 2) (HENNICKER et al. 2010). Herzstück des Frameworks ist der sogenannte Timecontroller, durch den Modelle trotz unterschiedlicher interner Zeitskalen (physikalische Modelle arbeiten auf Stunden- oder Tagesbasis, gesellschaftliche Modelle auf Tages- oder Monatsbasis) zur Laufzeit Daten austauschen können (HENNICKER u. LUDWIG 2006, 88ff.). Dafür strukturiert DANUBIA alle integrierten Modelle auf zwei Ebenen.

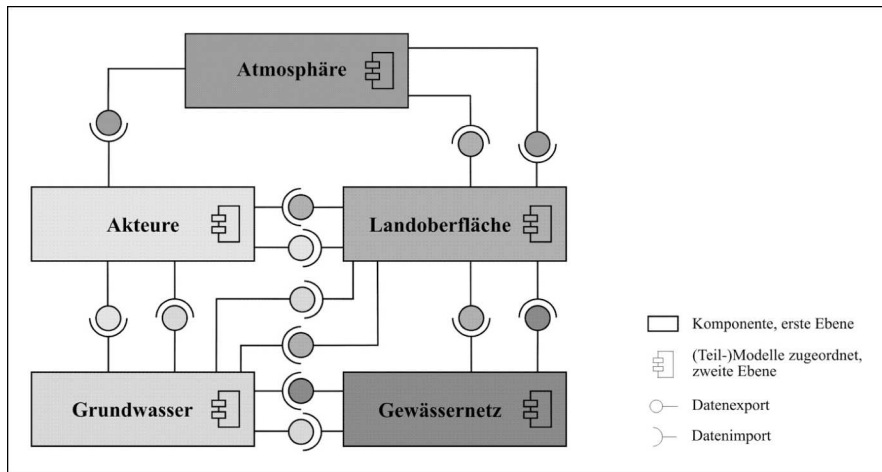


Abb. 2: Struktur des GLOWA-Danube Frameworks DANUBIA

Auf der in Abbildung 2 dargestellten ersten Ebene finden sich die fünf Komponenten Akteure, Atmosphäre, Landoberfläche, Gewässernetz und Grundwasser. Auf der untergeordneten zweiten Ebene sind innerhalb der einzelnen Komponenten die einzelnen Modelle der Teilprojekte verortet, beispielsweise finden sich innerhalb der Komponente Akteure sämtliche Akteursmodelle, die Haushalte, touristische Anbieter, Landwirte, Industriebetriebe sowie Wasserversorgungsunternehmen simulieren. Datenflüsse zwischen Modellen einer Komponente finden auf dieser Ebene statt. Werden Informationen zwischen Modellen verschiedener Komponenten ausgetauscht, erfolgt dies über die erste Ebene.

3. Neben der Festlegung zeitlicher Rahmenbedingungen des Datenaustausches stellt die Erarbeitung eines die Anforderungen aller (Teil-)Modelle erfüllenden Raumkonzepts einen dritten zentralen Aufgabenbereich dar. In DANUBIA wird die Entwicklung natürlicher und gesellschaftlicher Prozesse räumlich in einem dreidimensionalen Gitter simuliert. Diesem liegt eine konforme konische Lambert-Projektion zugrunde. Die Maschenweite beträgt 1 km², was in der regionalen Klimamodellierung eine einzigartig genaue Auflösung darstellt. Somit unterteilt sich das Untersuchungsgebiet in 182.478 eindeutig identifizierbare Zellen, sogenannte Proxel. Der Begriff Proxel ist ein Akronym aus Process und Pixel und betont die Einbeziehung dynamischer Strukturen, kleinskaliger Prozessabläufe im Sinne der objektorientierten Programmierung. Zu diesem Zweck ist jedes Proxel als Quader angelegt. So lassen sich beispielsweise Massentransfers, Wasserabflüsse oder Bevölkerungsbewegungen simulieren (LUDWIG et al. 2003). Jedes Proxel enthält also alle relevanten Informationen der abgebildeten Fläche wie Koordinaten und Höhenlage sowie teilmodellspezifische Angaben wie die Flächennutzung oder die Einwohnerzahl.

4. Der Simulationszeitraum deckt die Periode 2011 bis 2060 ab. Da sämtliche Aussagen für die Zukunft gemacht werden, nimmt der Grad ihrer Unsicherheit zu, je weiter der betrachtete Zeitpunkt von der Gegenwart entfernt ist. Daher ist die Entwicklung verschiedener klimatischer und gesellschaftlicher Szenarien der vierte zentrale Aufgabenbereich von GLOWA-Danube. Szenarien beschreiben hypothetische Zukunftsbilder (GÖTZE 1991, 38), die zwar keinen prognostischen Anspruch haben, jedoch plausibel, schlüssig und relevant sein müssen. Letzteres bedeutet, dass Szenarien Dilemmata und Imponderabilitäten aufzeigen, mit denen sich die Gesellschaft künftig auseinandersetzen muss. Zu diesem Zweck enthalten Szenarien quantitative und/oder qualitative Annahmen über mögliche Zustände der Zukunft und unterstützen die Entscheidungsvorbereitung durch Kombination verschiedener Elemente. Im Rahmen von GLOWA-Danube sind dies die Ausprägungen verschiedener Schlüsselfaktoren in den einzelnen Modellen. Um ein Höchstmaß an Anwendungsorientierung zu bieten, steht in GLOWA-Danube ein Ensemble von Szenarien zur zukünftigen Entwicklung von Klima und Gesellschaft zur Verfügung, das nach dem Baukastenprinzip konzipiert ist (Abb. 3). Demnach besteht ein GLOWA-Danube Szenario aus einem Klimatrend, einer Klimavariante, einem Gesellschaftsszenario sowie optionalen Maßnahmen. Je nach Fragestellung kann ein Simulationslauf durch Auswahl je einer Ausprägung dieser Baukastenbestandteile kombiniert werden. So lassen sich auf transparente Weise aus globalen klimatischen und gesellschaftlichen Trends verschiedene regionale Szenarien ableiten und mit Stakeholdern diskutieren. Die je nach Fragestellung wählbare Kombination eines GLOWA-Danube Szenarios erlaubt dabei eine eindeutige Form der Dokumentation und Kommunikation im Sinne von *Unter den Szenariobedingungen Klimatrend w, Klimavariante x, Gesellschaftsszenario y und Maßnahme/n z liefert die Modellrechnung die Ergebnisse u*. Zum anderen können so die Auswirkungen des globalen Wandels auf ein breites Spektrum von gesellschaftlichen Bereichen analysiert sowie nachhaltige regionale Adaptationsstrategien entwickelt und bewertet werden (KUHN et al. 2010, S1).

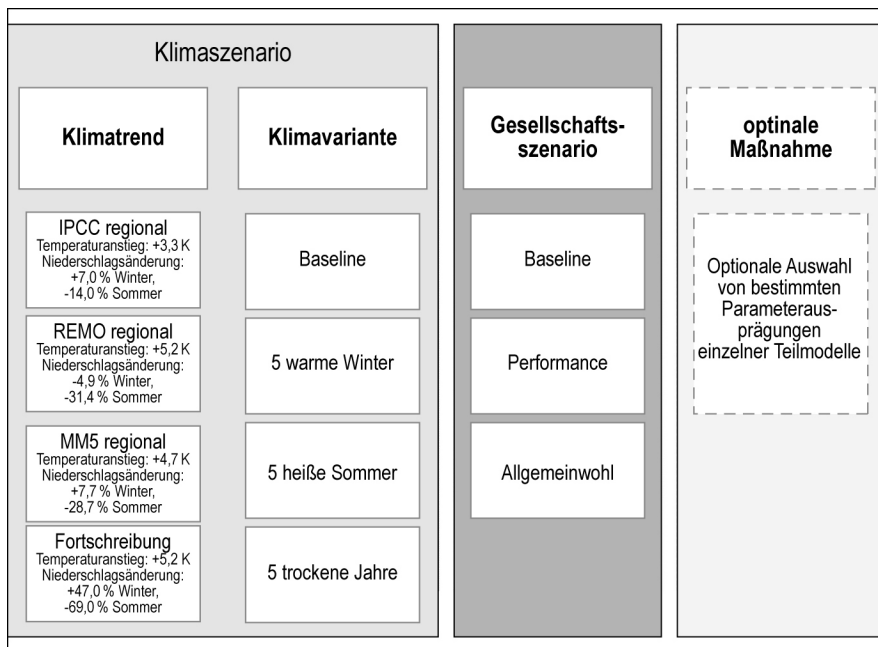


Abb. 3: GLOWA-Danube Szenarienbaukasten

Die erste Auswahl betrifft den Klimatrend. Die vier für das Untersuchungsgebiet angebotenen Trends basieren auf dem gemäßigten globalen IPCC Emissions-szenario A1B, das für Europa hinsichtlich der Qualität und des Unsicherheitsgrades als das bewährteste und am weitesten entwickelte gilt (SOLOMON et al. 2007). Dieses GCM skizziert eine Entwicklung, die von einer bis zur Mitte dieses Jahr-hunderts wachsenden, danach abnehmenden weltweiten Bevölkerung, raschem wirtschaftlichem Wachstum und einer schnellen Ausbreitung neuer effizienter Technologien geprägt ist. Bezüglich der Energieversorgung wird von nahezu gleich hohen Anteilen fossiler und erneuerbarer Energien ausgegangen. Basierend auf diesem GCM wurden für das Untersuchungsgebiet der Oberen Donau vier RCM entwickelt, die sich hinsichtlich des Grades der Temperaturerhöhung sowie des Verteilungsmusters und Ausmaßes der Niederschlagsänderungen unterscheiden. Diese vier Klimatrends – IPCC regional, REMO regional, MM5 regional und Fortschreibung – legen die generelle Klimaentwicklung fest.

Um spezielle klimatische Phänomene, die für einzelne Nutzergruppen von besonderer Relevanz sind, berücksichtigen zu können, steht als zweites Auswahl-modul die Klimavariante in vier Ausprägungen zur Verfügung. Die Klimavarianten spezifizieren den jeweiligen Klimatrend und entstammen einem statistischen Klimaantriebs-Generator (MAUSER 2010a, S3), der nach stochastischen Regeln aus historischen meteorologischen Messreihen synthetische meteorologische Zeitreihen erzeugt. Aus der Vielzahl der realisierten Reihen (jeweils 5.000) werden Klima-

varianten als Extrema ausgewählt, die mit einer Wahrscheinlichkeit von 5 Prozent eintreten. In GLOWA-Danube stehen vier dieser Varianten, die in Abstimmung mit den Stakeholdern als besonders relevant identifiziert wurden, zur Auswahl. Dies sind neben der *Baseline*-Variante, die eine durchschnittliche Temperaturerhöhung vorgibt und somit einen sehr wahrscheinlich auftretenden Witterungsverlauf abbildet, die Varianten *5 warme Winter*, *5 heiße Sommer* und *5 trockene Jahre*. Die drei letztgenannten implizieren das Auftreten des jeweiligen klimatischen Phänomens in fünf aufeinanderfolgenden Jahren, da davon auszugehen ist, dass verschiedene Akteure beispielsweise ein trockenes Jahr relativ problemlos kompensieren können, bei fünf konsekutiven Jahren jedoch mit ernsthaften Schwierigkeiten konfrontiert sind. So erlaubt etwa die Klimavariante *5 warme Winter*, die Auswirkungen fünf überdurchschnittlich warmer Winter in Folge beispielsweise auf Skigebiete als touristische Anbieter oder die Energieversorgung zu untersuchen, während *5 heiße Sommer* unter anderem für die Gletscherentwicklung, die Waldbrandgefahr und die Landwirtschaft von besonderem Interesse sind (MAUSER 2010b, S4).

In Kombination bilden Klimatrend und Klimavariante ein Klimaszenario, das die physikalische Komponente des Mensch-Umwelt-Systems darstellt. Ein komplettes GLOWA-Danube Szenario setzt sich aus einem Klimaszenario und einem Gesellschaftsszenario als drittes Auswahlmodul sowie optionalen Maßnahmen zusammen (Abb. 3). Die Gesellschaftsszenarien gründen auf der Überlegung, dass sich neben der Umwelt auch die Gesellschaft in einem stetigen Wandel befindet, sodass Paradigmen und Mentalitäten zu identifizieren sind, die sich in der Zukunft als Trend durchsetzen könnten. Es wird angenommen, dass sich zukünftig verschiedene gesellschaftliche Strömungen und Entwicklungen in ihrer Gewichtung untereinander verändern (KUHN u. ERNST 2010, S6). Auf Grundlage dieser Überlegungen werden in GLOWA-Danube zwei gegensätzliche Szenarien entwickelt, die um ein gemäßigtes *Baseline-Szenario*, das einen business-as-usual Trend im Sinne einer Fortschreibung des Status quo etablierter Verhaltensmuster beschreibt, ergänzt werden. Das letztgenannte ist vor allem bezüglich der Interpretation der beiden anderen Szenarien als Referenztrend von Bedeutung.

Die beiden dialektischen Szenarien *Performance* und *Allgemeinwohl* sind den Gesellschaftlichen Megatrends *Free is fair* (Vorbild für Gesellschaftsszenario *Performance*) und *Shared Destiny* (Vorbild für Gesellschaftsszenario *Allgemeinwohl*) von SinusSociovision entlehnt (DE VRIES u. PERRY 2007). Auf einem hohen Abstraktionsniveau beschreibt das Szenario *Performance* eine Gesellschaft, in der sich der freie Wettbewerb in fast allen Lebensbereichen durchsetzt. Die vorherrschende Denkweise wird hedonistischer, materialistischer und marktwirtschaftlicher. Ein hohes Maß an individueller Freiheit und Leistungsdenken bringt es mit sich, dass der Sozialstaat auf eine Grundversorgung reduziert wird, staatliche Eingriffe werden als hemmend bewertet. Folglich wächst die Kluft zwischen arm und reich, und auch die Machtverhältnisse werden ungleicher. Demgegenüber dominiert im Szenario *Allgemeinwohl* gesellschaftspolitisch die Ansicht, dass sich ungebremstes wirtschaftliches Wachstum zunehmend nachteilig auswirkt. Gesamtgesellschaftliche Verantwortung erlebt eine Renaissance, die Bedeutung sozialer Gerechtigkeit, nicht-materieller Werte und Chancengleichheit nimmt zu. Von

Politik und Wirtschaft werden Verantwortungsbewusstsein, Nachhaltigkeit und Orientierung am Allgemeinwohl erwartet.

Zur Umsetzung dieser Beschreibungen in Szenarien muss die Eignung der Trends für jedes (Teil-)Modell geprüft werden. Die Prüfung erfolgt (teil-)modell-spezifisch hinsichtlich der Fragestellung, ob jedes (Teil-)Modell mindestens einen Parameter enthält, der je nach Gesellschaftsszenario plausible, divergierende Ausprägungen aufweist. Diese Anforderung wird von jedem (Teil-)Modell erfüllt. Im Anschluss müssen die allgemein formulierten Szenarien in den (Teil-)Modellen konkretisiert werden. Dazu arbeitet jedes Akteurs-Teilprojekt sogenannte Storylines aus, d.h. textuelle Beschreibungen der konkreten modellspezifischen Inhalte der drei Gesellschaftsszenarien. Im Tourismus Modell beinhalten die Storylines u.a. Annahmen zur Entwicklung der Übernachtungszahlen. Diese steigen unter *Performance*-Bedingungen einerseits, da es aufgrund der zunehmenden Globalisierung gelingt, neue Gästegruppen aus Osteuropa bzw. Asien anzusprechen (PETERMANN et al. 2006, 111f.). Andererseits ist auch seitens des Inlandtourismus mit gleich bleibend oder sogar mehr Urlaubsreisen zu rechnen, was u.a. auf das Hedonismus-Streben der Erlebnisgesellschaft zurückzuführen ist. Des Weiteren zeichnen die Storylines ein Bild des zukünftigen Wasserbedarfs der touristischen Infra- und Suprastruktur, im Szenario *Performance* z.B. das eines zunehmenden Bedarfs, der aus der *Qualitätsoffensive* zur Anpassung an erhöhte Verbraucheransprüche (FREHSE 2006, 245ff.) resultiert. Dies betrifft beispielsweise neben dem Ausbau der künstlichen Beschneigung von Skipisten auch die Expansion der Wellness-Infrastruktur und weitere Aufwertungsmaßnahmen der vorhandenen Suprastruktur (für weitere Informationen s. SOBOLL et al. 2011).

Der vorgestellte Ansatz zur Implementierung der Gesellschaftsszenarien erlaubt sowohl eine heterogene Betrachtung möglicher Entwicklungstendenzen als auch eine differenzierte Darstellung gesellschaftspolitischer Prozesse in den einzelnen Akteursmodellen. Um zusätzlich einzelne Akteure gesondert behandeln zu können, stehen in einem GLOWA-Danube Szenario sogenannte *Maßnahmen* als vierte, optionale Auswahl zur Verfügung. Eine Maßnahme ist definiert als ein gezielter, räumlich und/oder zeitlich punktueller Eingriff, um einer Entwicklung im ausgewählten Gesellschaftsszenario entgegenzuwirken oder sie zu verstärken. Maßnahmen gelten als extern vorgegeben, das heißt, über ihren Einsatz können nicht die Akteure in den GLOWA-Danube (Teil-)Modellen selbst entscheiden. Sie umfassen beispielsweise regulatorische Eingriffe territorialer Gebietskörperschaften, um einen wettbewerbspolitischen Sonderstatus zu schaffen. Dies trifft im Falle der Skigebiets-Akteure im Tourismus Modell zu, wenn etwa im Rahmen des Gesellschaftsszenarios *Allgemeinwohl*, in dem der Ausbau künstlicher Beschneigungsinfrastruktur generell untersagt ist, eine bestimmte Anzahl nach räumlicher Lage oder wirtschaftlicher Leistungsfähigkeit ausgewählter Skigebiete dennoch die Genehmigung zum Ausbau erhält. Auf diese Weise lassen sich gezielt regionale/lokale Differenzen und resultierende Allokationen berücksichtigen. Vor allem bei der Implementierung der Maßnahmen spielen Stakeholder aus Politik und Wirtschaft als Impulsgeber eine entscheidende Rolle, um Plausibilität und Relevanz sicherzustellen.

3 Struktur und ausgewählte Ergebnisse zweier GLOWA-Danube (Teil-)Modelle

Im Folgenden werden Struktur und ausgewählte Ergebnisse von zwei der 16 GLOWA-Danube (Teil-)Modelle vorgestellt: Glaziologie als Beispiel für naturwissenschaftliche Modelle und Tourismus als Beispiel für humanwissenschaftliche Modelle.

3.1 Struktur des GLOWA-Danube Glaziologie Modells

Das Wassereinzugsgebiet der Oberen Donau weist im Jahr 2000 556 alpine Gletscher auf, die eine Fläche von rund 360 km² bedecken und deren Eisreserve ein Volumen von 16,4 km³ hat (WEBER et al. 2009, 7). Für den Wasserhaushalt des Gebiets ist die temporäre Speicherung von Niederschlägen, entweder kurzfristig in der Schneedecke oder längerfristig in Form von Gletschereis von Bedeutung. Wenngleich die Gletscherschmelze hauptsächlich in den Kopfeinzugsgebieten während der Sommermonate einen nennenswerten Beitrag zum Abflussregime liefert und für die Unterlieger verhältnismäßig wenig Wasser bringt, wird sich das durch den Klimawandel erwartete, drastische Abschmelzen der Gletscher deutlich auf die Oberflächenbedeckung und somit auf die potenzielle Landnutzung auswirken. Die Speicherung von Niederschlägen in einer geschlossenen Schneedecke spielt dagegen nicht nur für den Wasserhaushalt im Alpenraum, sondern auch für die Flüsse in der Molasse und den Mittelgebirgen mit Gebirgsanschluss eine wesentliche Rolle. Darüber hinaus bedingt die Schneedeckendauer die Abschmelzperiode des Gletschereises während der aperen Phasen im Sommer. Aufgrund dieser Relevanz für das Untersuchungsgebiet werden im Teilprojekt Glaziologie sowohl die Schneeakkumulation und -ablation als auch Veränderungen der Masse und Gestalt der Gletscher modelliert. Diese Daten, stündliche Werte der Schneedicke sowie des gebildeten Schmelzwassers, dienen wiederum anderen GLOWA-Danube (Teil-)Modellen, darunter Agrarwirtschaft, Tourismus und Wasserwirtschaft, als Grundlage für weitere Berechnungen (WEBER u. KUHN 2010, 2.4.1).

Eine detaillierte und realistische Modellierung schneehydrologischer und glazialer Entwicklungen kann sich dabei nicht auf ein simples Massenbilanzmodell beschränken, da zwar die Gesamtmasse innerhalb eines Areals relativ konstant bleibt, sich dahinter jedoch starke lokale Variationen der Schneedistribution und auch der Eisreserve verbergen können. Der unter Klimawandelbedingungen erwartete drastische Gletscherrückgang ist vielmehr ein dynamischer Prozess, der im Wesentlichen durch die drei Vorgänge Akkumulation von Schnee, Ablation von Eis und Schnee sowie Fließen des Eisstroms Richtung Tal geprägt ist (WEBER et al. 2010a, 2.4.2). Während letzterer den gesamten Eiskörper betrifft, lassen sich Akkumulation und Ablation hauptsächlich an der Gletscheroberfläche verorten. Um Veränderungen der Eisreserve und der Schneedeckendauer zu simulieren, müssen Schneefall und Schneeschmelze, aber auch Lawinenabgänge und Schneeverwehungen modelliert werden. Diese Prozesse sind unter anderem abhängig von der bodennahen Lufttemperatur, dem Niederschlag, der Strahlung, der Luftfeuchtigkeit, den Windverhältnissen und dem Relief. Naturgemäß sind diese Parameter als nichtlinear zu betrachten, weshalb eine Modellierung auf Proxel-Ebene zu ungenau wäre. Daher sind die Modellalgorithmen subskalig zu implementieren, d.h., die

Gletscher müssen in einer höheren als der gewöhnlichen DANUBIA Auflösung von 1 km² abgebildet werden. Zu diesem Zweck nähert das glaziologische Submodell SURGES (Subscale Regional Glacier Extension Simulator) den Eiskörper durch ein Stufenmodell an, sodass auf 1 km² zur gleichen Zeit in höheren Stufen Schnee und in niedrigeren Stufen Regen fallen bzw. Schmelzprozesse stattfinden können (WEBER et al. 2010a, 2.4.2). Zudem wird subskalig, also pro Stufe, zwischen Schnee- und Eisoberflächen differenziert, da Ablationsprozesse, die mit einem Energiebilanzmodell simuliert werden, aufgrund unterschiedlicher Albedo in ihrer Effizienz variieren. Weiterhin ist SURGES in der Lage, Massen- und Flächenänderungen zu simulieren, sodass etwa Schnee, der auf einer Stufe ein Jahr überdauert, zum Teil in Eis umgewandelt und dem Eiskörper zugerechnet wird. Meist sind die Massenbilanzen der obersten Stufen positiv, die der untersten negativ, was bis zu einem gewissen Grad durch Eisbewegung ausgeglichen wird.

3.2 Ausgewählte Ergebnisse des GLOWA-Danube Glaziologie Modells

Klimawandelbedingte Veränderungen der Schneedecke haben im Wassereinzugsgebiet der Oberen Donau enormen Einfluss auf das Mensch-Umwelt-System. Als Kenngrößen sind dabei die räumlich sehr heterogen verteilte Schneehöhe und die Schneedeckendauer, die Anzahl der Tage mit einer Schneedecke von mindestens 1 mm Schneewasseräquivalent (SWE) während der Wintersaison, die in den Alpen in der Regel von November bis Juni reicht und 242 Tage umfasst, von Bedeutung (WEBER u. PRASCH 2010, 3.1.5). Alterationen der Schneedecke prägen nicht nur die hydrologischen Verhältnisse, die Gletschermassenbilanz und die Dauer der Vegetationsphase im Untersuchungsgebiet, sondern wirken sich auch in Form von Einschränkungen und Konzentrationsprozessen im Wintertourismus oder von Instandhaltungs- und Betriebskosten für die Verkehrsinfrastruktur aus.

Abbildung 4 zeigt die mittlere Veränderung der Schneedeckendauer in der Simulationsperiode 2031 bis 2060 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971 bis 2000 im Szenario Klimatrend *REMO regional* mit der Klimavariante *Baseline* und dem Gesellschaftsszenario *Baseline*. Im Simulationszeitraum nimmt die Schneedeckendauer mit dem Anstieg des Temperaturniveaus in allen Höhenlagen ab, sodass die Schneeverhältnisse, die sich heute in einer Höhe von 1.000 m über NN zeigen, zukünftig erst in etwa 2.000 m über NN zu finden sein werden (PRASCH u. MAUSER 2010, 298). Während im gesamten Gebiet zwischen 1971 und 1990 an durchschnittlich 101 Tagen Schnee lag, ist dies im Mittel der Periode 2031 bis 2060 nur noch an 59 Tagen der Fall (WEBER u. PRASCH 2010, 3.1.5). Dies wirkt sich vor allem auf die Betriebsfähigkeit von Skigebieten negativ aus und wird vermutlich räumliche Konzentrationsprozesse, die sich heute bereits abzeichnen, weiter verstärken. Unter den gegebenen Simulationsbedingungen tritt im Flachland Schnee zwar noch seltener auf, Schneefreiheit ist aber auch in diesen Gebieten nicht zu erwarten, sodass zukünftig beispielsweise nach wie vor die Bereitstellung eines Straßenwinterdienstes erforderlich ist.

Über alle Höhenlagen nehmen die Niederschläge bis zum Ende der Simulation im Mittel um ca. sechs Prozent ab. Diese Abnahme betrifft vor allem die Sommermonate und führt dazu, dass das *Wasserschloss Alpen* für Molasse und Mittelgebirge an Bedeutung verliert. In Lagen unterhalb 2.000 m über NN taut der

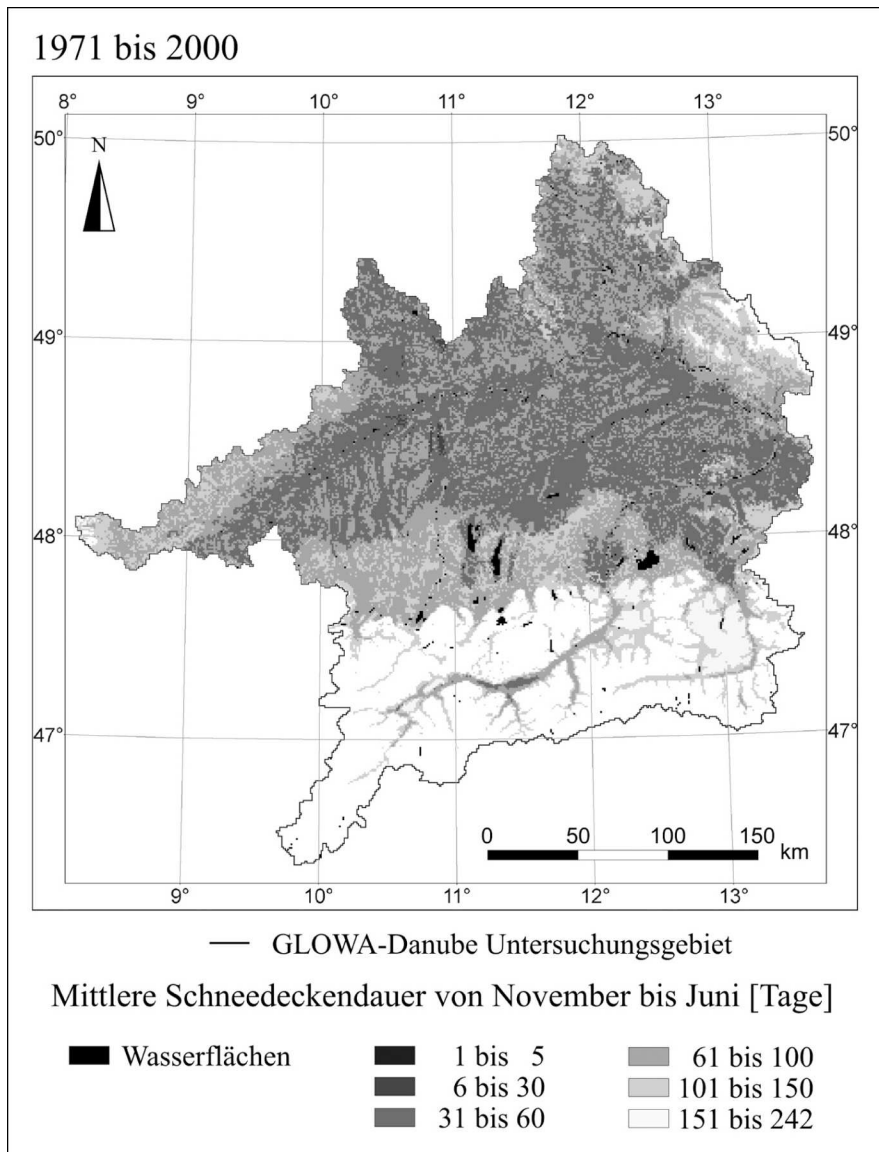
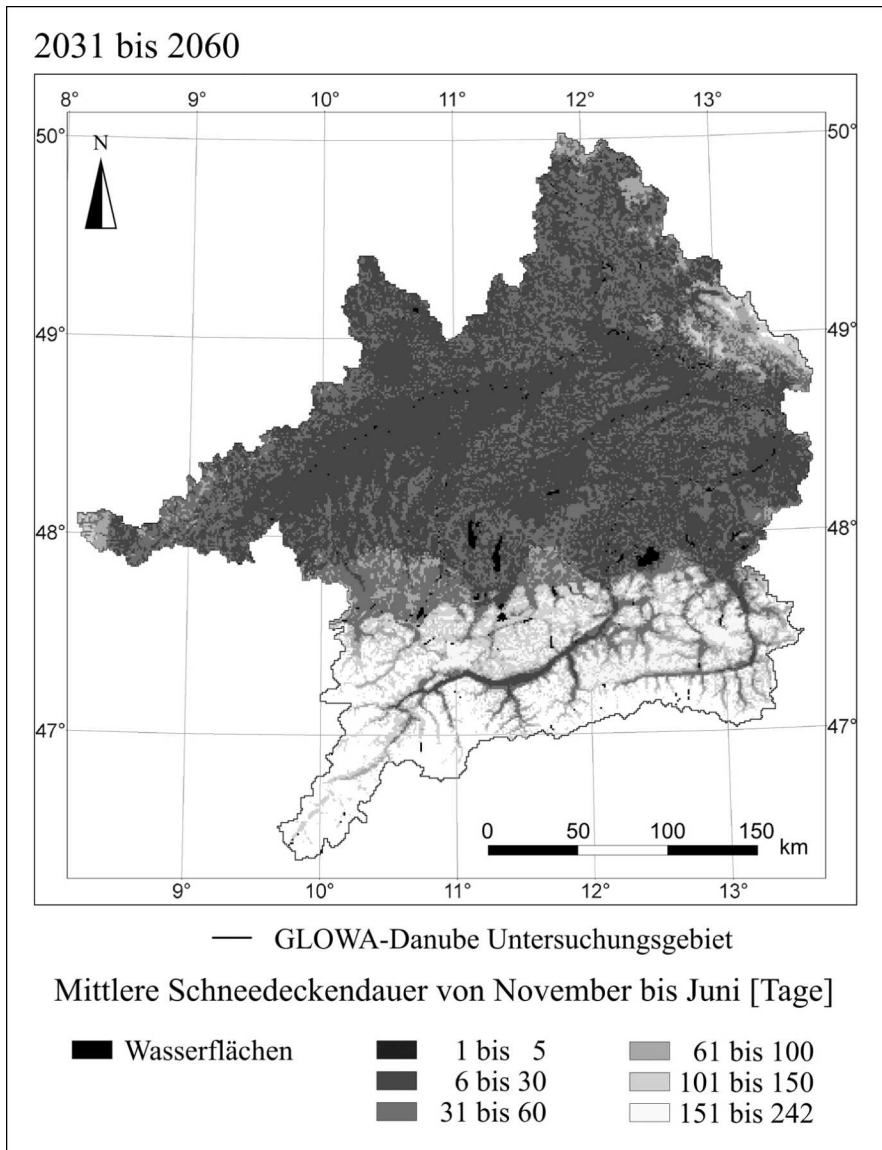


Abb. 4: Simulierte mittlere Schneedeckendauer 1971 bis 2000 ... →
 (Klimatrend *REMO regional* – Klimavariante *Baseline* – Gesellschaftsszenario *Baseline*)
 Quelle: verändert nach WEBER u. PRASCH 2010, 3.1.5



[Abb. 4f.] ... und 2031 bis 2060.

Schnee zunehmend schneller ab, was zu einer deutlich früher einsetzenden Schneeschmelze führt. In Lagen über 3.000 m über NN treten im Referenzzeitraum noch relativ häufig Sommerschneefälle auf, mit denen in Zukunft nicht mehr zu rechnen ist. Dadurch reduziert sich der Anteil des Schnees am Gesamtniederschlag in diesen Höhenlagen im Durchschnitt von rund 80 Prozent auf unter 70 Prozent (WEBER u. PRASCH 2010, 3.1.5). Die jährliche Schneeakkumulation geht dort bis zum Ende des Simulationszeitraums bezogen auf den Referenzzeitraum um rund 250 mm SWE zurück. Schneefreie Areale haben besonders in den Gletschergebieten gravierende Auswirkungen, da sie längere Ablationsperioden verursachen, was zukünftig zu stark negativen Massenbilanzen und einem beschleunigten Gletscherschwund führt. Es ist daher davon auszugehen, dass bereits zur Mitte des 21. Jahrhunderts die Gletscherflächen im Einzugsgebiet der Oberen Donau weitgehend verschwunden sind (PRASCH u. MAUSER 2010, 300).

3.3 Struktur des GLOWA-Danube Tourismus Modells

Stellvertretend für die humanwissenschaftlichen GLOWA-Danube (Teil-)Modelle wird an dieser Stelle die konzeptionelle Struktur des Tourismus Modells vorgestellt. Dieses Modell quantifiziert den touristischen Wasserverbrauch, eine Größe, die weder in der amtlichen noch in nicht-amtlichen Statistiken angegeben wird. Darüber hinaus werden der Betriebszustand verschiedener touristischer Infra- und Suprastruktureinrichtungen (MUNDT 1998, 287) sowie daraus resultierende nachfrageseitige Volumenänderungen und Dislokationen unter Klimawandelbedingungen auf unterschiedlichen räumlichen Ebenen analysiert. So lässt sich vor allem die touristische Angebotsseite detailliert untersuchen, was beispielsweise Entwicklungsstudien für einzelne Kommunen oder Landkreise ermöglicht.

Zu diesem Zweck ist das Tourismus Modell hauptsächlich angebotsorientiert konzipiert und besteht aus den drei Submodellen *Akteure-Modell*, *Attraktivitätsmodell* und *Wasserverbrauchsmodell*. Das *Akteure-Modell* enthält verschiedene Klassen wasserbedarfsintensiver touristischer Infra- und Suprastruktur-Einrichtungen, darunter Skigebiete mit künstlicher Beschneigung, Golfplätze, Schwimmbäder, Hotels und Gastronomiebetriebe. Jede dieser Klassen verfügt über spezielle Attribute, wie die Anzahl an Schneekanonen für die Klasse Skigebiet oder die Flächengröße der Spielbahnen für die Klasse Golfplatz. Zudem kann jeder Akteur aus einer Reihe von Handlungsoptionen diejenige auswählen, die aufgrund der wahrgenommenen Umweltbedingungen im aktuellen Simulationstakt als optimal bewertet wird. Die gewählte Aktion wird durchgeführt und trägt ihrerseits zu Änderungen der Umwelt bei (RAUH u. HESSE 2002, 10ff.).

Jeder im Modell implementierte Akteur hat eine Entsprechung in der Realität, sodass in Vollerhebungen alle relevanten touristischen Einrichtungen mit ihren individuellen Parameterausprägungen sowie der expliziten räumlichen Verortung im Untersuchungsgebiet erhoben wurden (SAX 2008, 52ff.). Das *Akteure-Modell* simuliert dementsprechend 253 Skigebiete, 145 Golfplätze, 662 Schwimmbäder, rund 50.000 Beherbergungs- und 30.000 Gastronomiebetriebe, die über verschiedene, für die Modellierung wesentlichen Attribute verfügen.

Die aufgeführten touristischen Einrichtungen fungieren als touristische Attraktionen eines Gebiets. Wenn zum Beispiel ein Skigebiet aufgrund klimatischer

Bedingungen vorübergehend oder dauerhaft schließen muss, wirkt sich dies negativ auf die touristische Anziehungskraft der Destination aus. Potenzielle Touristen würden dann unter Umständen auf schneesicherere Gebiete in höheren Lagen ausweichen. Derartige nachfrageseitige Reaktionen werden im *Attraktivitätsmodell* berücksichtigt. Dieses berechnet basierend auf den Betriebszuständen der touristischen Anbieter aus dem *Akteure-Modell*, der gemeindespezifischen Saisonalität und der Vorjahreszahl der Übernachtungen die touristische Attraktivität jeder der über 2.100 Gemeinden im Untersuchungsgebiet mittels Regressionsgleichungen (DINGELDEY 2008, 63ff.). Je reizvoller eine Gemeinde von Touristen empfunden wird, desto mehr Übernachtungen werden generiert. Da Tagesbesucher beachtlich zum gesamten Tourismusaufkommen beitragen (MASCHKE 2005), schätzt das Modell zusätzlich deren Anzahl auf Basis der jeweiligen Übernachtungszahl.

Durch jede Übernachtung und jede Tagesreise entsteht nachfrageseitig ein Wasserbedarf, etwa durch den Aufenthalt in einem Hotel (SAX 2008, 84ff.). Ebenso weist jede in Betrieb befindliche touristische Einrichtung einen Wasserbedarf auf, beispielweise für die künstliche Beschneigung von Skigebieten oder die Bewässerung der Greens auf Golfplätzen. Diese Bedarfe werden modellintern simuliert. Um den gesamten touristischen Wasserbedarf im Untersuchungsgebiet zu berechnen, liefern das *Akteure-Modell* und das *Attraktivitätsmodell* angebots- und nachfrageseitige Wasserbedarfswerte an das dritte Submodell, das *Wasserverbrauchsmodell*. Neben der Anzahl der Übernachtungen und Tagesbesuche ist der touristische Wasserverbrauch eine Information, die anderen GLOWA-Danube (Teil-)Modellen, etwa dem Wasserversorgermodell über Schnittstellen für weitere Berechnungen zur Verfügung gestellt wird. Das Tourismus Modell reagiert als Akteursmodell zudem auf die vorgestellten Gesellschaftsszenarien, indem die Ausprägungen ausgewählter Modellparameter variiert werden. Hierdurch werden u.a. die Entwicklung der Übernachtungsnachfrage, der Wasserbedarf im Beherbergungs- und Gastronomiewesen, der Ausbau der Bescheinigungskapazitäten von Skigebieten, die Maximaltemperatur für künstliche Beschneigung sowie die Fairwaybewässerung und das Irrigationsintervall von Golfplätzen beeinflusst. Je nach gewähltem Gesellschaftsszenario nehmen diese Parameter unterschiedliche Werte an. Darüber hinaus besteht für Stakeholder die Möglichkeit, jeden der im Modell implementierten Parameter individuell einzustellen, um etwa Simulationen, die als Entscheidungshilfe für Investitionsüberlegungen dienen, präziser zu gestalten. So lässt sich beispielsweise prospektiv der ökonomische Nutzen eines Ausbaus der Beschneigungsinfrastruktur analysieren, indem ein Simulationslauf mit dem gegenwärtigen Bestand der Schneekanonen einem Lauf mit potenziell anzuschaffenden Schneekanonen gegenübergestellt wird.

3.4 Ausgewählte Ergebnisse des GLOWA-Danube Tourismus Modells

Aus der Vielzahl der Ergebnisse im Bereich Tourismus (SOBOLL et al. 2010a; SOBOLL et al. 2010b; DINGELDEY u. SOBOLL 2010; SOBOLL u. SCHMUDE 2011) wird die Entwicklung der Öffnungstage von Skigebieten herausgegriffen, da diese zum einen besonders stark von Klimawandel beeinflusst werden und der Wintertourismus im Untersuchungsgebiet zum anderen einen bedeutenden Wirtschaftsfaktor darstellt. Um den Einfluss der gesellschaftlichen Entwicklung beurteilen zu

können, werden zwei Simulationsläufe mit identischen Klimaszenarien und den beiden gegenläufigen Gesellschaftsszenarien *Performance* und *Allgemeinwohl* durchgeführt. Als Klimatrend wird *REMO regional* gewählt, als Klimavariante *5 warme Winter*, denn eine Folge von fünf Jahren mit überdurchschnittlich warmen Wintersaisons stellt für den ökonomischen Betrieb von Bergbahnen eine enorme Bedrohung dar. Von besonderem Interesse sind in diesem Kontext die Betriebsfähigkeit und die Gewinnschwelle von Skigebieten. Letztere erhöht sich, wenn beispielsweise klimawandelbedingt Investitionen in Beförderungs- und Beschneigungsinfrastruktur erforderlich werden, um konkurrenzfähig zu bleiben. Dadurch werden zur Deckung der Investitionskosten entweder mehr oder umsatzstärkere Öffnungstage pro Saison benötigt.

Die linke Karte in Abbildung 5 (Gesellschaftsszenario *Performance*) [siehe Ende des Beitrags] weist im Vergleich zur rechten Karte (Gesellschaftsszenario *Allgemeinwohl*) einen geringeren Rückgang der Öffnungstage auf, was auf den Ausbau der Beschneigungskapazitäten zurückzuführen ist. Bei beiden Szenarien verstärken sich bereits heute beginnende räumliche Konzentrationsprozesse, die vor allem die großen und hochgelegenen Skigebiete der österreichischen Teile des Untersuchungsgebiets begünstigen. Dort wird trotz des Klimawandels auch in Zukunft Wintersport noch nahezu uneingeschränkt möglich sein. Dagegen werden in beiden Simulationsläufen besonders die Mittelgebirgsregionen, wie etwa der Bayerische Wald, zum Teil drastische Einbußen im Wintersporttourismus erleben.

Auch im Gesellschaftsszenario *Performance* wird jedoch in einigen Landkreisen die gegenwärtige Gewinnschwelle der Öffnungstage unterschritten. Diese Tendenz stellt sich noch verschärfter bei der Betrachtung der Entwicklung der Zahl optimaler Skitage dar. Dieser Parameter wurde in Kooperation mit Stakeholdern ausgearbeitet. Die Stakeholder zeigten Interesse an der Implementierung dieses Parameters, der Tage identifiziert, die optimale Bedingungen für das Skifahren bieten, da bei der bereits heute beginnenden, klimatisch bedingten Verkürzung der Wintersaison der erforderliche Umsatz an weniger Tagen generiert werden muss. Der optimale Skitag berücksichtigt neun Variablen, darunter die gefühlte Temperatur, die Windgeschwindigkeit, die Sonnenscheindauer, die Niederschlagsmenge und die Information, ob es sich um einen Werktag, Wochenend- oder Ferientag handelt. Es zeigt sich, dass in allen Szenarien zum einen die Anzahl optimaler Skitage abnimmt und zum anderen eine zeitliche Verschiebung in Richtung Frühjahr (Ostern) stattfindet. Daraus ist für Bergbahnbetreiber und Tourismusorganisationen abzuleiten, dass beispielsweise künstliche Beschneigung länger, d.h. bis einschließlich April vorgenommen oder Werbemaßnahmen gezielt später in der Saison durchgeführt werden sollten.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Klimafolgenforschung steht vor der Aufgabe, komplexe Mensch-Umwelt-Systeme adäquat zu analysieren, auch um das Informationsbedürfnis einer breiten Öffentlichkeit zu bedienen (GLAESER 2002, 65). Hierzu sind Methoden und Instrumente zu entwickeln, die eine integrierte Problembetrachtung inklusive der umfassenden Wechselwirkungen zwischen Umwelt und Gesellschaft erlauben, was

gleichzeitig das Erfordernis inter- und intradisziplinärer Ansätze mit sich bringt. Darüber hinaus müssen gegenwärtige und potenzielle zukünftige Prozessabläufe in ihrer spezifischen räumlichen Disposition bewertet werden (BORS DORF 2002, 34), sodass eine regionale Differenzierung für die Generierung relevanter Ergebnisse unumgänglich ist. Schließlich liegt eine weitere wesentliche Aufgabe in der plausiblen *Übersetzung* der Forschungsergebnisse für Stakeholder, die auf diese Weise Entscheidungsunterstützung im Rahmen der Anwendung von Adaptationsstrategien erhalten.

Diese Zielsetzungen verfolgt das Projekt GLOWA-Danube mit einem integrativen Modellierungssystem und der Anwendung verschiedener Klima- und Gesellschaftsszenarien.

Die vorgestellten Ergebnisse des Tourismus Modells verdeutlichen, dass für die Generierung zuverlässiger und qualitativ hochwertiger Aussagen die Kopplung natur- und humanwissenschaftlicher Modelle und somit die Integration verschiedener Wissenschaftsdisziplinen unverzichtbar ist. Ein monodisziplinär angelegtes Projekt könnte diesen Anforderungen schwerlich gerecht werden, da zwar Wissen über den Tourismussektor vorhanden ist, die Expertise hinsichtlich Klimamodellierung, hydrologischer Verhältnisse etc. in einem rein humanwissenschaftlichen Projekt jedoch nicht ausreicht. Der Framework-Ansatz von DANUBIA erlaubt durch die Implementierung systemweit gültiger Regeln die Einbindung zahlreicher (Teil-)Modelle, wodurch auch nachträgliche Erweiterungen problemlos möglich sind.

Darüber hinaus erweist sich die Einbindung der Stakeholder in den Forschungsprozess als äußerst zielführend, da auf diese Weise die Entwicklung und Bewertung realistischer Adaptationsmaßnahmen garantiert wird. Das Entscheidungsunterstützungssystem DANUBIA bietet Stakeholdern aus Politik und Wirtschaft zudem die Möglichkeit, individualisierte Einstellungen vorzunehmen und ermöglicht durch seine Transparenz die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse. Der erfolgreiche Brückenschlag zwischen Wissenschaft und Praxis zeigt sich beispielsweise in der Ausarbeitung des Parameters *optimaler Skitag* (s. Kap. 3.4), dessen Relevanz und Erforderlichkeit durch Stakeholder-Anfragen deutlich wurde.

Nach Abschluss des Projekts GLOWA-Danube wird DANUBIA als Open-Source Software zur Verfügung gestellt, um das gewonnene Wissen einer breiten Öffentlichkeit zur Verfügung zu stellen und Weiterentwicklungen des Systems zu ermöglichen.

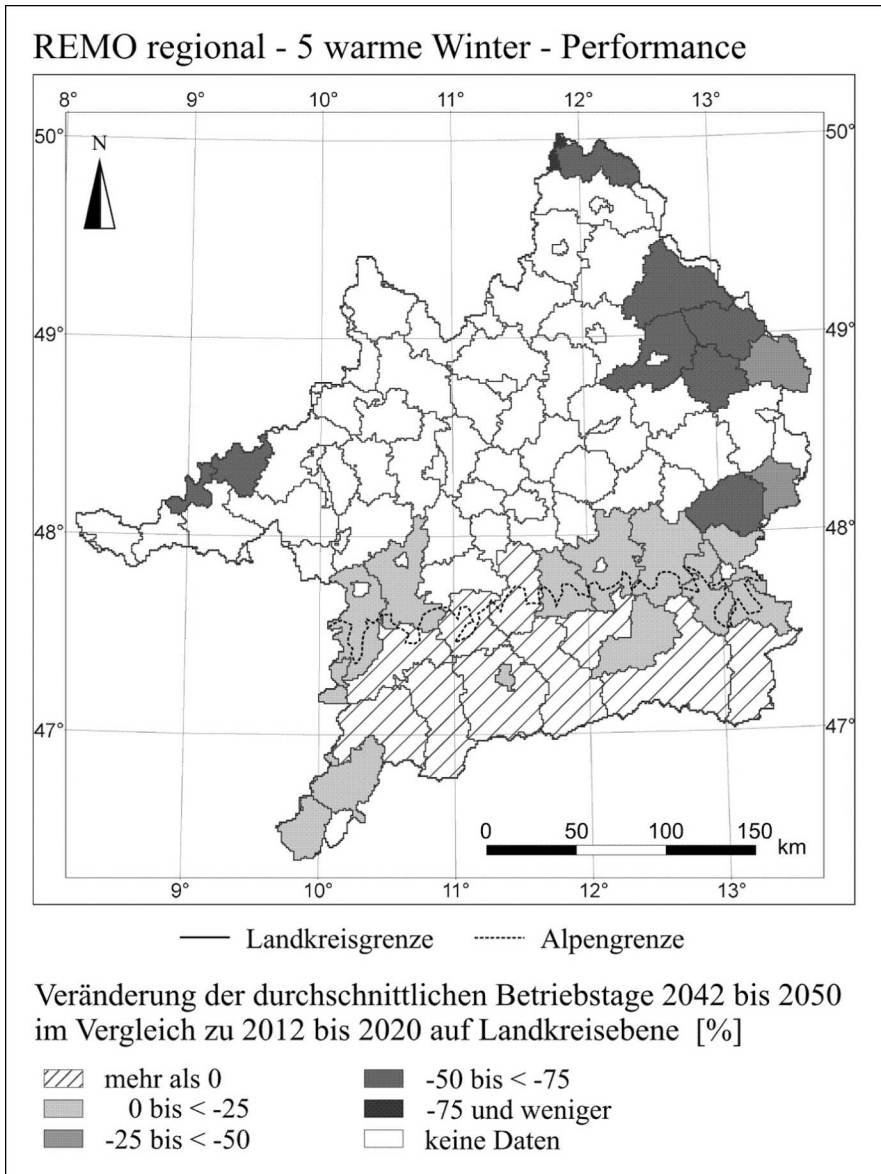
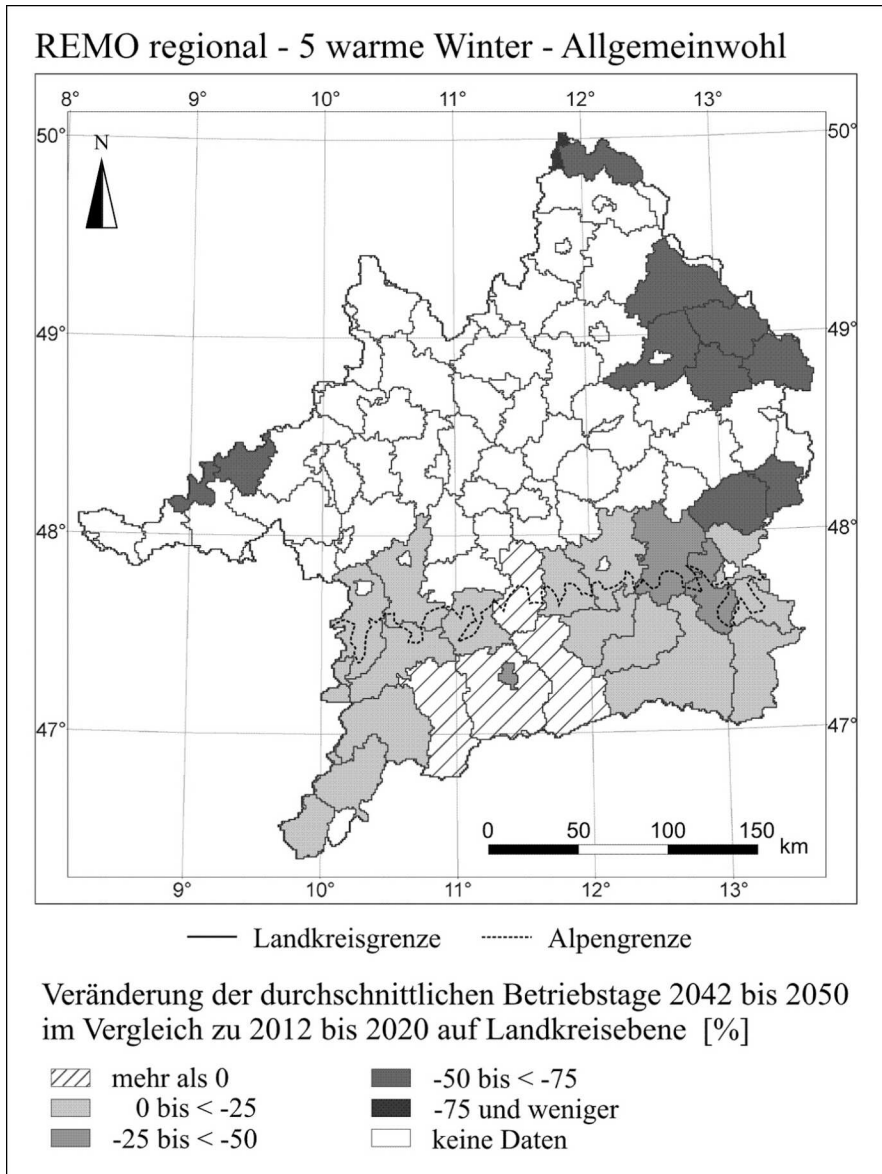


Abb. 5: Simulierte prozentuale Veränderung der möglichen Betriebstage von ... →
 (links: Klimatrend *REMO regional* – Klimavariante *5 warme Winter* – Gesellschaftsszenario *Performance*;
 rechts: Klimatrend *REMO regional* – Klimavariante *5 warme Winter* – Gesellschaftsszenario
Allgemeinwohl)



[Abb. 5f.] ... Skigebieten auf Landkreisebene 2042 bis 2050 im Vergleich zu 2012 bis 2020.

Literatur

- AULINAS, M., C. TURON u. M. SÀNCHEZ-MARRÈ 2009: Agents as a decision support tool in environmental processes. The state of the art. In: CORTÉS, U. u. M. POCH (Hrsg.): *Advanced agent-based environmental management systems*. Basel, Boston, Berlin, S. 5–35.
- BARTHEL, R., A. MELEG, D. NICKEL u. A. TRIFKOVIC 2010: Wasserentnahmen der öffentlichen Trinkwasserversorgung. Teilprojekt Grundwasserhaushalt, Grundwasserbewirtschaftung und Wasserversorgung. In: GLOWA-Danube Projekt (Hrsg.): *Global Change Atlas Einzugsgebiet Obere Donau*. München, 1.16, http://www.glowa-danube.de/atlas/texte/t1_16.pdf (11.12.2010).
- BECKER, E. u. T. JAHN 2006: *Soziale Ökologie: Grundzüge einer Wissenschaft von den gesellschaftlichen Naturverhältnissen*. Frankfurt/Main.
- BEYERL, K. 2010: Der Klimawandel in der psychologischen Forschung. In: VOSS, M. (Hg.): *Der Klimawandel. Sozialwissenschaftliche Perspektiven*. Wiesbaden, S. 247–266.
- BORSODORF, A. 2002: Die Mensch-Umwelt-Beziehung. Ein zentrales Forschungsthema der Geographie. In: V. WINIWARTER u. H. WILFING (Hrsg.): *Historische Humanökologie. Interdisziplinäre Zugänge zu Menschen und ihrer Umwelt*. Wien, S. 27–58.
- CASH, D.W., W.C. CLARK, F. ALCOCK, N.M. DICKSON, N. ECKLEY, D.H. GUSTON, J. JAGER, u. R.B. MITCHELL 2003: Knowledge systems for sustainable development. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100/14, S. 8086–8091.
- CHEN, F. u. J. DUDHIA 2001: Coupling an advanced land-surface/hydrology model with the Penn State/NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. In: *Monthly Weather Review*, 129, S. 569–585.
- DE VRIES, J. u. T. PERRY 2007: Der demografische Wandel und die Zukunft der Gesellschaft. Szenarien für den Umgang mit einer alternden und schrumpfenden Bevölkerung. In: *Den demografischen Wandel gestalten!*, Forum Wohnen und Stadtentwicklung, 3/2007, S. 115–119, <http://www.vhw.de/publikationen/verbandszeitschrift/archiv/2007/heft-3> (11.12.2010).
- DILLING, L. 2007: Towards science in support of decision making. Characterizing the supply of carbon cycle science. In: *Environmental Science & Policy*, 10, S. 48–61.
- DINGELDEY, A. 2008: Modellierung der touristischen Attraktivität zur Bestimmung der Übernachtungsnachfrage im Einzugsbereich der Oberen Donau unter Berücksichtigung von Umwelteinflüssen. München.
- DINGELDEY, A. u. A. SOBOLL 2010: The Impact of Climate Change on Alpine Leisure Tourism in Germany and Austria. In: HERGESELL, A. u. J.J. LIBURD (Hrsg.): *Proceedings of BEST EN Think Tank X. Networking for Sustainable Tourism*, 27–30 June, Vienna, Austria, Sydney, S. 101–115.
- FREHSE, J. 2006: Innovationen in der Markenhôtellerie. Fakt oder Fiktion? In: PIKKEMAAT, B., M. PETERS u. K. WEIERMAIR (Hrsg.): *Innovationen im Tourismus. Wettbewerbsvorteile durch neue Ideen und Angebote*. Berlin, S. 245–254.
- FUCHS, A. 2010: Klima und Gesellschaft. In: VOSS, M. (Hrsg.): *Der Klimawandel. Sozialwissenschaftliche Perspektiven*. Wiesbaden, S. 41–48.
- GLAESER, B. 2002: Der humanökologische Baustein zur interdisziplinären Theoriebildung und zur transdisziplinären Forschung. In: WINIWARTER, V. u. H. WILFING (Hrsg.): *Historische Humanökologie. Interdisziplinäre Zugänge zu Menschen und ihrer Umwelt*. Wien, S. 59–86.
- GÖRG, C. 2003: *Regulation der Naturverhältnisse. Zu einer kritischen Theorie der ökologischen Krise*. Münster.
- GÖRG, C. 2008: *Regulation globaler Naturverhältnisse. Zur Vermittlung von Umwelt und Gesellschaft im globalen Wandel*. In: *Berichte zur deutschen Landeskunde*, 82/2, S. 95–113.
- GÖTZE, U. 1991: *Szenario-Technik in der strategischen Unternehmensplanung*. Wiesbaden.
- HENNICKER, R. u. M. LUDWIG 2006: *Design and Implementation of a Coordination Model for*

- Distributed Simulations. In: MAYR, H.C. u. R. BREU (Hrsg.): MOD'06, Lecture Notes Informatics P-82, S. 83–97, <http://www.pst.ifi.lmu.de/veroeffentlichungen/hennicker-ludwig:modellierung:2006.pdf> (11.12.2010).
- HENNICKER, R., S.S. BAUER, S. JANISCH u. M. LUDWIG 2010: A Generic Framework for Multi-Disciplinary Environmental Modelling. In: SWAYNE, D.A., W. YANG, A.A. VOINOV, A. RIZZOLI u. A. FILATOVA (Hrsg.): Proceedings of the iEMSs Fifth Biennial Meeting: International Congress on Environmental Modelling and Software (iEMSs 2010). Ottawa, 14 Seiten.
- HOUGHTON, J.T., G.J. JENKINS u. J.J. EPHRAUMS (Hrsg.) 1990: Climate Change. The IPCC Scientific Assessment. New York, Port Chester, Melbourne, Sydney.
- JACOB, D., H. GÖTTEL, S. KOTLARSKI, P. LORENZ u. K. SIECK 2008: Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland. Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. In: Umweltbundesamt (Hrsg.): Climate Change 11/08. <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3513.pdf> (11.12.2010).
- KLÜGL, F. 2001: Multiagentensimulation. Konzepte, Werkzeuge, Anwendung. München.
- KUHN, S. u. A. ERNST 2010: Gesellschaftsszenarien in GLOWA-Danube. In: GLOWA-Danube Projekt (Hrsg.): Global Change Atlas Einzugsgebiet Obere Donau. München, S6, <http://www.glowa-danube.de/atlas/s6.php> (11.12.2010).
- KUHN, S., A. ERNST u. W. MAUSER 2010: GLOWA-Danube-Szenarien. In: GLOWA-Danube Projekt (Hrsg.): Global Change Atlas Einzugsgebiet Obere Donau. München, S1, <http://www.glowa-danube.de/atlas/s1.php> (11.12.2010).
- LIU, Y., H. GUPTA, E. SPRINGER u. T. WAGENER 2008: Linking science with environmental decision making. Experiences from an integrated modeling approach to supporting sustainable water resources management. In: Environmental Modelling & Software, 23, S. 846–858.
- LUDWIG, R., W. MAUSER, S. NIEMEYER, A. COLGAN, R. STOLZ, H. ESCHER-VETTER, M. KUHN, M. REICHSTEIN, J. TENHUNEN, A. KRAUS, M. LUDWIG, M. BARTH u. R. HENNICKER 2003: Web-based modeling of energy, water and matter fluxes to support decision making of mesoscale catchments. The integrative perspective of GLOWA-Danube. In: Physics and Chemistry of the Earth 28, S. 621–634.
- MASCHKE, J. 2005: Tagesreisen der Deutschen. München. (= Schriftenreihe des dwif (Deutsches Wirtschaftswissenschaftliches Institut für Fremdenverkehr e.V.), 50.
- MAUSER, W., R. WEIDINGER u. S. STÖBER 2010: Einleitung. In: GLOWA-Danube Projekt (Hrsg.): Global Change Atlas Einzugsgebiet Obere Donau. München, E1, <http://www.glowa-danube.de/atlas/e1.php> (11.12.2010).
- MAUSER, W. 2010a: Der statistische Klimaantriebs-Generator. In: GLOWA-Danube Projekt (Hrsg.): Global Change Atlas Einzugsgebiet Obere Donau. München, S3, <http://www.glowa-danube.de/atlas/s3.php> (11.12.2010).
- MAUSER, W. 2010b: Die GLOWA-Danube Klimavarianten aus dem statistischen Klimaantriebs-Generator. In: GLOWA-Danube Projekt (Hrsg.): Global Change Atlas Einzugsgebiet Obere Donau. München, S4, <http://www.glowa-danube.de/atlas/s4.php> (11.12.2010).
- MCNIE, E. C. 2007: Reconciling the supply of scientific information with use demands. An analysis of the problem and review of the literature. In: Environmental Science & Policy, 10, S. 17–38.
- MICKWITZ, P., F. AIX, S. BECK, D. CARSS, N. FERRAND, C. GÖRG, A. JENSEN, P. KIVIMAA, C. KUHLIKE, W. KUINDERSMA, M. MÁNEZ, M. MELANEN, S. MONNI, A.B. PEDERSEN, H. REINERT u. S. v. BOMMEL 2009: Climate policy integration, coherence and governance. Peer Report 2. http://www.peer.eu/fileadmin/user_upload/publications/PEER_Report2.pdf (11.12.2010).
- MUNDT, J.W. 1998: Einführung in den Tourismus. München, Wien.
- PETERMANN, T., C. REVERMANN u. C. SCHERZ 2006: Zukunftstrends im Tourismus. Berlin.
- PRASCH, M. u. W. MAUSER 2010: Globaler Wandel des Wasserkreislaufs am Beispiel der

- Oberen Donau. In: Arbeitskreis KLIWA (Klimaveränderung und Wasserwirtschaft) (Hrsg.): 4. KLIWA-Symposium Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. Karlsruhe, S. 293–302 (= KLIWA-Berichte, 15).
- RAUH J. u. R. HESSE 2002: Agentenbasiertes geographisches Informations- und Simulationssystem als Werkzeug zur Shopping-Center-Planung. In: Geoinformationssysteme. Zeitschrift für raumbezogene Informationen und Entscheidungen, 12, S. 10–15.
- SAREWITZ, D. u. R.A. PIELKE 2007: The neglected heart of science policy: reconciling supply of and demand for science. In: Environmental Science & Policy, 10, S. 5–16.
- SAX, M. 2008: Entwicklung eines Konzepts zur computergestützten Modellierung der touristischen Wassernutzung im Einzugsgebiet der Oberen Donau unter Berücksichtigung des Klimawandels. Regensburg (= Beiträge zur Wirtschaftsgeographie Regensburg; 11).
- SOBOLL, A., J. SCHMUDE u. A. DINGELDEY 2010a: Teilprojekt Tourismusforschung. Auswirkungen unterschiedlicher Szenarien auf die Öffnungstage von Skigebieten. In: GLOWA-Danube Projekt (Hrsg.): Global Change Atlas Einzugsgebiet Obere Donau. München, 3.2.1, http://www.glowa-danube.de/atlas/texte/t3_2_1.pdf (11.12.2010).
- SOBOLL, A., J. SCHMUDE u. A. DINGELDEY 2010b: Teilprojekt Tourismusforschung. Auswirkungen unterschiedlicher Szenarien auf den Wasserbedarf von Golfplätzen. In: GLOWA-Danube Projekt (Hrsg.): Global Change Atlas Einzugsgebiet Obere Donau. München, 3.2.2, http://www.glowa-danube.de/atlas/texte/t3_2_2.pdf (11.12.2010).
- SOBOLL, A., M. ELBERS, R. BARTHEL, J. SCHMUDE, A. ERNST u. R. ZILLER 2011: Integrated regional modelling and scenario development to evaluate future water demand under global change conditions. In: Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 16/4, S. 477–498.
- SOBOLL, A. u. J. SCHMUDE 2011: Simulating Tourism Water Consumption under Climate Change Conditions Using Agent-Based Modeling. The Example of Ski Areas. In: Annals of the Association of American Geographers, 101/5, S. 1049–1066
- SOLOMON, S., D. QIN, M. MANNING, Z. CHEN, M. MARQUIS, K.B. AVERYT, M. TIGNOR, H.L. MILLER (Hrsg.) 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. New York.
- STREBEL, H. 2003: Umweltorientierung in betrieblichen Querschnittsbereichen. In: KRAMER, M., H. STREBEL u. G. KAYSER (Hrsg.): Internationales Umweltmanagement. Band III. Operatives Umweltmanagement im internationalen und interdisziplinären Kontext. Wiesbaden.
- WEBER, M., L. BRAUN, W. MAUSER u. M. PRASCH 2009: Die Bedeutung der Gletscherschmelze für den Abfluss der Donau gegenwärtig und in der Zukunft. In: Mitteilungsblatt des hydrographischen Dienstes in Österreich, 86, S. 1–30.
- WEBER, M. u. M. KUHN 2010: Teilprojekt Glaziologie. Mittlere Schneedeckendauer. In: GLOWA-Danube Projekt (Hrsg.): Global Change Atlas Einzugsgebiet Obere Donau. München, 2.4.1, http://www.glowa-danube.de/atlas/texte/t2_4_1.pdf (11.12.2010).
- WEBER, M. u. M. PRASCH 2010: Teilprojekt Glaziologie. Mittlere Schneedeckendauer von November bis Juni unter dem Klimatrend REMO regional und der Klimavariante Baseline. In: GLOWA-Danube Projekt (Hrsg.): Global Change Atlas Einzugsgebiet Obere Donau. München, 3.1.5, http://www.glowa-danube.de/atlas/texte/t3_1_5.pdf (11.12.2010).
- WEBER, M., M. PRASCH, M. KUHN u. A. LAMBRECHT 2010a: Teilprojekt Glaziologie. Veränderung der Eisreserve in der Zukunft. In: GLOWA-Danube Projekt (Hrsg.): Global Change Atlas Einzugsgebiet Obere Donau. München, 2.4.2, http://www.glowa-danube.de/atlas/texte/t2_4_2.pdf (11.12.2010).
- WEBER, M., M. PRASCH, M. KUHN, A. LAMBRECHT u. W. HAGG 2010b: Eisreserve. Teilprojekt Glaziologie. In: GLOWA-Danube Projekt (Hrsg.): Global Change Atlas Einzugsgebiet Obere Donau. München, 1.8, <http://www.glowa-danube.de/atlas/texte/eisreserve.pdf> (11.12.2010).