E6 GLOWA-Danube Ergebnisse und Kernaussagen

1. Einleitung

Für die Untersuchung der regionalen Auswirkungen des Klimawandels im Einzugsgebiet der Oberen Donau wurde in GLOWA-Danube das integrative Entscheidungsunterstützungssystem DANUBIA entwickelt, welches aus unterschiedlichen naturwissenschaftlichen und sozialwissenschaftlichen Teilmodellen besteht (siehe Kapitel E2 bis E4 und 2.1 bis 2.12). Mit einem Ensemble von Szenarien für die zukünftige Entwicklung von Klima und Gesellschaft, welches eine plausible Spannweite möglicher Entwicklungen aufzeigt, wurden vielfältige Auswirkungen simuliert.

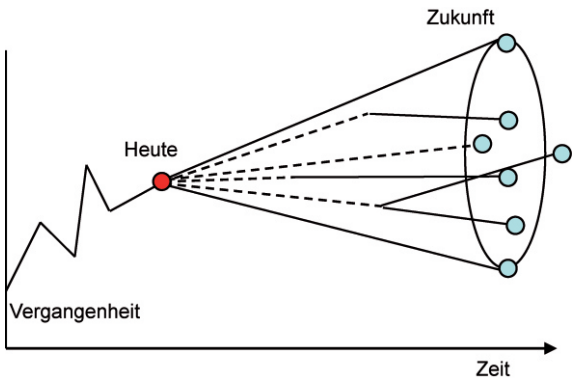

Abbildung E6.1: Schema eines Szenariotrichters.

Der Schwerpunkt lag dabei auf der Naturressource Wasser und ihrer Nutzung. Die entwickelten Klimaszenarien beziehen sich auf den Zeitraum von 2011 bis 2060 und basieren auf dem moderaten A1B-Emissionsszenario des IPCC. Die folgenden Kernaussagen lassen sich als Resultate des Forschungsprojektes GLOWA-Danube zusammenfassen.

2. Der methodische Ansatz von GLOWA-Danube

Sowohl die regionalen Auswirkungen des Klimawandels als auch die möglichen Adaptationsstrategien sind komplex. Dies liegt an den vielfältigen Verflechtungen und Wechselbeziehungen zwischen den klimatischen, geographischen und gesellschaftlichen Faktoren. Sie machen Analysen von einer Ursache und einer eindeutigen Wirkung oft unrealistisch und mitunter unmöglich. Um diesen Anforderungen Rechnung zu tragen und die auftretenden Wechselwirkungen bestmöglich zu berücksichtigen, wurde DANUBIA als Simulationsinstrument von Grund auf neu entwickelt. Hierbei kamen neueste Softwarewerkzeuge wie die Unified Modelling Language (UML) sowie paralleles, verteiltes Rechnen zum Einsatz. Die Entwicklung von DANUBIA wurde erfolgreich abgeschlossen. Es hat sich als flexibles Framework bewährt, um die Teilmodelle der verschiedenen, an GLOWA-Danube beteiligten Disziplinen in ihrer Wechselwirkung miteinander zu koppeln. Das Framework hat inzwischen bei einer Vielzahl unterschiedlichster Anwendungen seine Einsatzfähigkeit bewiesen.

DANUBIA ist erweiterbar, skalenunabhängig und regionalisierbar. Es steht für weitere zukünftige Simulationen von Mensch-Umwelt Beziehungen für eine breite Palette von Fragestellungen zur Verfügung.

3. Die regionale Entwicklung des Klimas

Bereits für die Vergangenheit konnte im EZG der Oberen Donau ein deutlicher Anstieg der Lufttemperatur nachgewiesen werden (siehe Kapitel 1.9). Der gemessene Temperaturanstieg an der Oberen Donau ist mit durchschnittlich 1,6°C mehr als doppelt so hoch wie im globalen Mittel. Die Erkenntnisse über den Grad der zukünftigen regionalen Temperaturentwicklung zeigen über diesen generellen Trend hinaus eine große Bandbreite möglicher Entwicklungen auf. Die wahrscheinlichen Temperaturerhöhungen bewegen sich regional zwischen 3,3°C und 5,2°C im Zeitraum zwischen 1990 und 2100 (siehe Kapitel S1-S5).

Anhand der gemessenen Niederschlagsdaten ist bereits für die Vergangenheit eine Tendenz zu abnehmenden Niederschlägen im Sommer und zunehmenden Niederschlägen im Winter beobachtet worden (siehe Kapitel 1.9). Bei der Entwicklung der Klimaszenarien für das Untersuchungsgebiet wurde dieser Trend mit berücksichtigt. An der Oberen Donau wird mit mehr Niederschlag im Winter (zwischen +8% und +47%) und weniger Niederschlag im Sommer (je nach Klimaszenario zwischen -14% und -69%) zu rechnen sein. Insgesamt wird der Niederschlag zukünftig leicht abnehmen (siehe Kapitel S1-S5). Obwohl für die zukünftige Klimaentwicklung moderate Annahmen getroffen wurden und kein „worst-case"-Szenario der globalen Emissions- und Klimaentwicklung berücksichtigt wurde, liegen die Veränderungen des Klimas im Einzugsgebiet der Oberen Donau unter Berücksichtigung des bereits in der Vergangenheit stattgefundenen stärkeren Wandels deutlich über dem globalen Mittel.

4. Die Entwicklung der Gesellschaft

Die Gesellschaftsszenarien in GLOWA-Danube basieren auf den sogenannten Gesellschaftlichen Megatrends von SinusSociovision, welche sich auf die gesamtgesellschaftliche Situation und ihren Wandel in der Zukunft beziehen und deshalb ein entsprechend hohes Abstraktionsniveau besitzen. Für die Umsetzung in GLOWA-Danube erfolgte eine Spezifizierung dieser Megatrends im Sinne einer konkreten inhaltlichen Ausprägung je nach Teilprojekt. Für die Entwicklung der gesellschaftlichen Grundausrichtung in der Zukunft wurden drei Szenarien entwickelt, welche u.a. neue Technologien, die Globalisierung sowie demographische, wirtschaftliche und politische Entscheidungen berücksichtigen (siehe Kapitel S6). Das Szenario ***Baseline*** bildet je nach Teilmodell den aktuellen Status Quo ab und führt diesen auch in der Zukunft fort. Das Szenario ***Allgemeinwohl*** beschreibt eine Gesellschaft, in der eine Besinnung auf die gesamtgesellschaftliche Verantwortung stattfindet und damit sowohl ein größerer Wert auf das Allgemeinwohl als auch auf eine nachhaltige Entwicklung gelegt wird. Das Szenario ***Performance*** beschreibt einen gegenläufigen Trend zum ***Allgemeinwohl***-Szenario. Hier wird zukünftig mehr Wert auf Wirtschaftlichkeit und die Performance des Einzelnen gelegt.

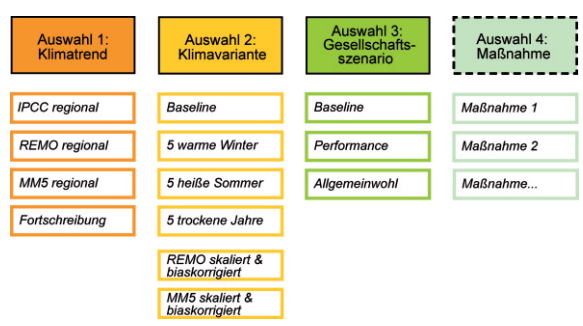

Abbildung E6.2: Klimaszenarien und Gesellschaftsszenarien in GLOWA-Danube.

5. Wasserhaushalt

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass das ***Wasserdargebot*** an der Oberen Donau für den Zeitraum von 2011 bis 2060 abnimmt, aber nicht knapp werden wird (siehe Kapitel 3.1.1). Die Abnahme schwankt je nach verwendetem Klimaszenario zwischen 5% und 25% im Vergleich der Zeiträume 2036-2060 und 1971-2000. Neben einem leichten Rückgang des Niederschlags ist in einem komplexen Netzwerk von Wechselwirkungen dafür in erster Linie die mit dem Temperaturanstieg einhergehende starke Erhöhung der Verdunstung verantwortlich. So wird sich die ***Evapotranspiration*** im Gebietsmittel je nach Klimaszenario um 10% bis 25% erhöhen (siehe Kapitel 3.1.6). Durch den Niederschlagsrückgang sowie den Anstieg von Temperatur und Verdunstung wird sich auch der ***Abfluss*** in den Flüssen des Einzugsgebietes der Oberen Donau zukünftig verringern. Die Abnahme liegt je nach behandeltem Klimaszenario zwischen 5% und 35% bis zum Jahr 2060. Regional wird die Abnahme in den Alpen am geringsten, entlang der Donau hingegen sehr stark ausgeprägt sein. Die jährliche ***Wasserabgabe*** der Oberen Donau am Pegel Achleiten an die Donau-Unterlieger wird sich auf Basis der Szenariorechnungen dadurch bis 2060 um 9% bis 31% verringern (siehe Kapitel 3.1.1).

Die ***Grundwasserneubildung*** im gesamten Einzugsgebiet wird sich aufgrund der Verdunstungszunahme und der leichten Niederschlagsabnahme im Vergleich der Zeiträume 2036-2060 und 1971-2000 um 5% bis 21% verringern (siehe Kapitel 3.1.7).

Die steigenden Temperaturen führen zu einer starken Verringerung der ***Schneedeckenhöhe*** und zu einer Verkürzung der ***Schneedeckendauer*** bis 2060 um 30 bis 60 Tage in allen Höhenlagen (siehe Kapitel 3.1.5). Schneeverhältnisse, die heute auf etwa 1000 m ü. NN herrschen, werden

Abbildung E6.3: Gletscherskigebiet "Schneeferner" an der Zugspitze (Foto M. Weber).

in Zukunft vermutlich in etwa 2000 m Höhe zu finden sein. Im Sommer wird zukünftig auch in den Gipfellagen der Niederschlag vermehrt als Regen fallen. Somit wird zukünftig weniger Schneespeicher zur Verfügung stehen, wodurch ein Rückgang des Anteils von Schneeschmelzwasser am Gesamtabfluss zu erwarten ist (siehe Kapitel 3.1.8). Die starke Reduzierung des Schneespeichers und die frühere Schneeschmelze in den Alpen führen zu einer ausgeprägten Vorverlagerung der jahreszeitlichen Verfügbarkeit des Wassers vom Sommer ins Frühjahr und zu einer starken bis sehr starken Verringerung der Niedrigwasserabflüsse an den Hauptflüssen.

Der ***Niedrigwasserabfluss*** der Oberen Donau bei Passau wird sich bis 2060 um 25% bis 53% verringern. In Verbindung mit steigenden Wassertemperaturen kann es dabei im Sommer zu einer Reduzierung des Kühlwasserdargebots für die Wärmekraftwerke und zu Einschränkungen für die Schifffahrt kommen (siehe Kapitel 3.1.2 und 3.1.9). Einer starken Reduzierung des Niedrigwassers entlang der Donau steht eine Erhöhung der Niedrigwasserabflüsse in den Alpentälern gegenüber. Gründe hierfür liegen in einem komplexen Zusammenspiel zwischen einem höheren Regenanteil am winterlichen Niederschlag und einer stärkeren Evapotranspiration, verbunden mit einem reduzierten Niederschlag im Sommer. Der erhöhte Regenanteil im Winter und Frühjahr sowie die Schneeschmelze tragen zu einer Erhöhung des Niedrigwassers in den Alpentälern bei, während die stärkere Evapotranspiration und weniger Niederschläge im Sommer im Alpenvorland und nördlich der Donau zu einer Verschärfung der Niedrigwassersituationen beitragen.

Die Reduzierung des mittleren Jahresabflusses sowie die Verlagerung der Abflussmaxima in das Frühjahr haben wiederum Einfluss auf die ***Energieproduktion aus Wasserkraft*** (siehe Kapitel 3.2.7). So kommt es in Speicherseen bei gleichbleibender Speichersteuerung sowohl zu einer Veränderung des Jahresgangs der Zu- und Abflüsse als auch zu einem gleichmäßigeren Jahresgang der Speicherfüllstände.

Abbildung E6.4: Finstertalspeicher im Tiroler Kühtai (Foto M. Weber).

Die Stromerzeugung aus den im Einzugsgebiet der Oberen Donau betriebenen Wasserkraftanlagen als ein Hauptträger erneuerbarer Energien wird aufgrund des reduzierten Abflusses in der Zukunft je nach gewähltem Klimaszenario und Teileinzugsgebiet unterschiedlich stark zurück gehen. Die Abnahme tritt besonders stark bei mehreren aufeinanderfolgenden trockenen Jahren auf. Im südlichen Bereich des Einzugsgebietes wird die Abnahme der Energiegewinnung aus Wasserkraft in den ersten Szenariojahren vom Schmelzwasser der Gletscher noch etwas gedämpft. Allerdings werden die ***Gletscher*** im Einzugsgebiet der Oberen Donau zwischen 2035 und 2045 nahezu vollständig verschwunden sein. Die Simulationen zeigen, dass die in den Gletschern heute gespeicherten Wassermengen keinen entscheidenden Beitrag zur Sicherstellung einer ausgeglichenen Wasserführung in der Donau leisten können. Das Abtauen der Gletscher wird allerdings in der Periode zwischen

Abbildung E6.5: Gletschereis im Ötztal (Foto M. Weber).

2011 und 2035 zu einer leichten Erhöhung des Abflusses in Passau von etwa 2% führen. In den Kopfeinzugsgebieten leisten die Gletscher in dieser Periode deshalb einen nicht zu vernachlässigenden Beitrag zur Erhöhung des Niedrigwasserabflusses. Nach 2035 trägt die Verringerung der Schmelzwassermengen von den Restgletschern dort allerdings zum allgemeinen Abflussrückgang bei (siehe Kapitel 3.1.4).

Für die Entwicklung der natürlichen ***Hochwasserabflüsse*** im Einzugsgebiet der Oberen Donau ergibt sich kein einheitliches Bild. Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass am Pegel Achleiten keine gravierenden Änderungen eintreten werden. Sie zeigen allerdings eine eindeutige Zunahme der Hochwasserspitzen in den Alpentälern und Kopfeinzugsgebieten. Dort erhöhen sich die Hochwasserspitzen bis 2060 z.T. um den Faktor 3 (siehe Kapitel 3.1.3). Sowohl die stärkeren Hochwasserspitzen als auch die zuvor genannte Änderung des Niedrigwasserabflusses können zu einem Großteil auf die Veränderung der Niederschlagsart in alpinen Regionen von Schnee zu Regen und der damit verbundenen Reduzierung der Speicherung des Wassers in Form von Schnee zurückgeführt werden.

Abbildung E6.6: Tosender Gebirgsbach im Ötztal bei Hochwasser im August 2005 (Foto L. Braun).

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen die zum Teil gravierenden Folgen des Klimawandels für den Wasserhaushalt der Oberen Donau. Die Wasserabgabe an die Unterliegerstaaten, die vom Donauwasser abhängen und es intensiv nutzen, wird sich zukünftig mäßig bis signifikant reduzieren. Die Zusammenschau der Ergebnisse macht deutlich, dass die Rolle der Oberen Donau als „Wasserschloss“ für die Donau-Unterlieger zukünftig neu bewertet werden sollte.

6. Wasserverbrauch und Wasserversorgung

Die Simulationen des Wasserverbrauchsverhaltens der Haushalte zeigen, dass sich der ***private Pro-Kopf Wasserverbrauch*** im Einzugsgebiet der Oberen Donau im betrachteten Zeitraum von 2011-2060 deutlich reduzieren wird.

Abbildung E6.7: Unterschiedliche Wasserverbrauchsarten (Grafik: Anna v. Lilienfeld-Toal).

In der zweiten Hälfte des Simulationszeitraums tritt dabei eine spürbare Verlangsamung des Rückgangs ein. Der Rückgang ist hauptsächlich auf eine weitere Verbreitung von Wasserspartechnologien in den Haushalten und eine Veränderung des Verbraucherverhaltens zurückzuführen. Die Ausbreitung von Wasserspartechnologien ist je nach Innovation, Milieu und gesellschaftlichem Szenario unterschiedlich, in einigen Fällen wird sogar eine flächendeckende Ausbreitung erreicht. Der Rückgang des Pro-Kopf Verbrauchs wird durch die zunächst steigenden Bevölkerungszahlen teilweise kompensiert. Insgesamt zeigen die Simulationen jedoch einen Rückgang des privaten Trinkwasserverbrauchs von ca. 20% bis 25% bis 2060 (siehe Kapitel 3.2.4 und 3.2.6).

Die in allen Klimaszenarien reduzierte Grundwasserneubildung führt in der zweiten Simulationsperiode (2036-2060) bei rückläufigen Entnahmen vereinzelt zu lokalen und zeitlich begrenzten Knappheiten bei der ***Trinkwasserversorgung***, die naturgemäß umso ausgedehnter ausfallen, je niedriger die Grundwasserneubildung ist. Der Umfang des Rückgangs der Entnahmen spielt dabei eine untergeordnete Rolle. Besonders betroffen sind Gebiete mit sehr kleinräumigen Versorgungsstrukturen, die Grundwasser aus flachliegenden, räumlich begrenzten Grundwasserleitern entnehmen (z.B. im Nordosten Bayerns). Gleichzeitig wirkt sich die Tendenz zu starken Niederschlagsrückgängen am Alpennordrand in Teilen des Voralpenlands aus. Das Wasserdargebot im gesamten Einzugsgebiet wird bei rückläufigem Bedarf auch unter extremen klimatischen Bedingungen für die Belange der öffentlichen Trinkwasserversorgung ausreichen, allerdings nicht ohne entsprechende Anpassungsmaßnahmen, die lokale und zeitlich begrenzte Engpässe abpuffern, z.B. indem alternative Gewinnungsgebiete erschlossen werden oder der Wasserbezug von benachbarten Wasserversorgungsunternehmen oder Fernwasserversorgungen ermöglicht wird. Nicht abzuschätzen sind derzeit die Auswirkungen eines möglichen Bewässerungsbedarfs in der Landwirtschaft. Auswirkungen klimatischer Änderungen auf tiefliegende Aquifere sind im Simulationszeitraum nicht signifikant zu ermitteln, da diese zu langsam reagieren und die Modellunsicherheiten für diese Grundwasserleiter hoch sind.

7. Winter- und Sommertourismus

Die Entwicklung des Wintertourismus ist durch eine regional und nach Höhenlage unterschiedlich starke Verringerung der Schneedeckendauer gekennzeichnet, die je nach gewähltem Klimaszenario 30 bis 60 Tage umfassen kann. Die abnehmende ***Schneesicherheit*** in niedrigeren Lagen verstärkt die Konzentration des Wintertourismus auf hoch gelegene, große Skigebiete mit guter infrastruktureller Ausstattung. In diesen wird sich aufgrund der höheren Niederschläge im Winterhalbjahr die Schneesituation trotz erhöhter Temperaturen nicht verschlechtern, teilweise sogar verbessern. Allerdings ist im gesamten Untersuchungsgebiet mit einer Abnahme der optimalen Skitage zu rechnen, welche sich durch unterschiedliche Faktoren wie fehlendem Niederschlag, einer ausreichenden Schneedecke, Sonnenschein, geringer Windgeschwindigkeit und angenehmen Temperaturen auszeichnen.

Abbildung E6.8: Schneekanone im Stubai (Foto M. Weber).

Durch die hohen Investitionskosten für künstliche Beschneiung und die geringere Schneesicherheit wird in einigen tiefer gelegenen Skigebieten ein wirtschaftlich rentabler Betrieb nicht mehr aufrecht erhalten werden können, zumal durch höhere Temperaturen der Einsatz von Schneekanonen häufig nicht mehr möglich ist. In der zweiten Hälfte des Simulationszeitraums werden somit je nach gewähltem Klimaverlauf zwischen 20% und 50% der heutigen Skigebiete ihre Existenz nicht mehr durch den Skitourismus sichern können (siehe Kapitel 3.2.1).

Durch höhere Temperaturen im Sommer können Orte mit einem bereits hohen Anteil an Urlaubsreisenden mit einem Gästezuwachs rechnen, der bis zu einem gewissen Grad die Verluste in der Wintersaison ausgleichen kann. Der Klimawandel wirkt sich also auch auf den Sommertourismus aus, wenngleich weniger stark als auf den Wintertourismus.

8. Land- und Forstwirtschaft

Alle untersuchten Klimaszenarien zeigen, dass der steigende CO_2-Gehalt der Atmosphäre und die erhöhte Temperatur zu einem Anstieg der ***Ernteerträge*** führen werden (siehe Kapitel 3.3.1). Die Wassernutzungseffizienz der Vegetation (Verhältnis der Biomasseproduktion zu transpiriertem Wasser) verbessert sich für C_3-Pflanzen deutlich. Die Transpiration nimmt damit nicht proportional zur Biomasseproduktion zu. Vereinzelt kann es in Trockenjahren auf leichten Böden vor allem entlang der Donau zu einer Reduzierung des Ernteertrags kommen.

Abbildung E6.9: Reifer Sommerweizen (Foto M. Weber).

Die Mineralisation der organischen Substanz in den Böden nimmt zu. Dadurch verbessert sich, bei ausreichender organischer Substanz im Boden, die Stickstoffverfügbarkeit. Diese Effekte, welche u.a. durch eine Erhöhung der Temperatur der obersten Bodenschicht unterstützt werden (siehe Kapitel 3.3.2), wirken sich abhängig von den lokalen Klimafaktoren kleinräumig unterschiedlich stark aus.

Die ***Erntetermine*** von Getreide verschieben sich um ca. drei Wochen im Jahr nach vorn, außerdem wird ein Zusammenrücken der Ernte von Sommer- und Wintergetreide beobachtet. Die Kulturartenverhältnisse ändern sich im betrachteten Zeitraum aber kaum. Die Anzahl der Regentage um den Erntetermin von Getreide nehmen ab. Da jedoch die Schwankungen zwischen den Jahren zunehmen, kann davon ausgegangen werden, dass die Planungssicherheit für die Landwirte in Zukunft sinken wird (siehe Kapitel 3.3.7).

Die Nitratkonzentration im Sickerwasser steigt im Szenariozeitraum leicht an, allerdings sind die Klimafolgen für die ***Nitratauswaschung*** aus Sicht des Gewässerschutzes durch geeignete Adaptionsmaßnahmen beim Düngungsmanagement kompensierbar (siehe Kapitel 3.3.3). Lediglich lokal begrenzt können in Zukunft Risiken für die Grundwasserqualität durch Nitratauswaschung auftreten, die vor dem Hintergrund der in einigen Regionen bereits zu hohen Belastungen einen andauernden Handlungsbedarf erfordern werden (siehe Kapitel 3.3.4). Keines der untersuchten Gesellschaftsszenarien zeigt eine auf den Klimawandel zurückzuführende Verschlechterung der ***Einkommenssituation*** der Landwirte (siehe Kapitel 3.3.1).

In allen Klimaszenarien ist aufgrund der höheren potentiellen Verdunstung sowie der geringeren Niederschläge in den Frühlings- bzw. Sommermonaten ein Anstieg des ***Waldbrandrisikos*** zu erwarten (siehe Kapitel 3.3.5 und 3.3.6).

9. Industrieller Wasserverbrauch

Die Vulnerabilität der Industrie bezüglich des Klimawandels ist im Einzugsgebiet der Oberen Donau als gering einzuschätzen. Es ergeben sich lediglich regional begrenzte Wachstumsverluste von bis zu 0.4 Promille jährlich. In manchen Regionen profitiert das ***Wirtschaftswachstum*** sogar vom Klimawandel. Die Industrie reagiert auf Wasserverknappung zuerst mit Prozessoptimierung und im Weiteren mit Kreislauf- oder Mehrfachnutzung und kann so einer Produktionseinschränkung durch die Ressourcenverknappung ausweichen (siehe Kapitel 3.2.5).