

Die regionalen Auswirkungen des Klimawandels im Einzugsgebiet der Oberen Donau wurden in GLOWA-Danube mit einem neu entwickelten Instrumentarium vollständig gekoppelter Klimafolge-Modelle untersucht, deren Eignung zunächst rigoros und erfolgreich an ihren Fähigkeiten, die Vergangenheit richtig wiederzugeben, getestet wurde. Mit einem Ensemble von Szenarien für die zukünftige Entwicklung von Klima und Gesellschaft, das einen plausiblen Erwartungstrichter aufspannt, wurden die vielfältigen Auswirkungen simuliert. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Naturressource Wasser und ihrer Nutzung. Für die Untersuchungen wurde der Zeitraum von 2011 bis 2060 herangezogen. Folgende Kernaussagen lassen sich als Resultate des Forschungsprogramms GLOWA-Danube zusammenfassen:

Kernaussagen von GLOWA-Danube

a) Zur regionalen Entwicklung des Klimas

- Die **Temperatur** ist in der Zeit von 1960 bis heute im Einzugsgebiet der Oberen Donau bereits um ca. 1.6°C angestiegen. Der Niederschlag hat sich im Winter in dieser Zeit geringfügig erhöht, im Sommer ist er leicht zurückgegangen. Klimawandel findet damit eindeutig schon heute statt. Der gemessene Temperaturanstieg an der Oberen Donau ist mehr als doppelt so groß wie im globalen Mittel. Auf der Nordhalbkugel betrug er im vergangenen Jahrhundert 0.75°C.
- Die Klimaentwicklung der Zukunft wird diesen beobachteten Trend fortsetzen. Wir rechnen an der Oberen Donau mit mehr **Niederschlag** im Winter und weniger Niederschlag im Sommer. Insgesamt wird der Niederschlag zukünftig leicht abnehmen.
- Die Erkenntnisse über den Grad der zukünftigen regionalen Klimaentwicklung spannen über diese generellen **Trends** hinaus einen Unsicherheitstrichter auf. Die wahrscheinlichen Temperaturerhöhungen bewegen sich regional auf der Basis des moderaten IPCC-A1B-Emissionsszenarios zwischen 3.3°C und 5.2°C im Zeitraum zwischen 1990 und 2090, die wahrscheinliche Niederschlagserhöhung im Winter beträgt zwischen +8% und +47%, die wahrscheinliche Niederschlagsreduzierung beträgt im Sommer zwischen -14% und -69%. Der Rückgang des jährlichen Niederschlags bewegt sich im betrachteten Zeitraum zwischen -3.5% und -16.4%. Es liegen keine Erkenntnisse vor, die besagen, dass der Niederschlag im betrachteten Zeitraum ansteigen wird.
- Obwohl für die Klimaentwicklung moderate Annahmen getroffen wurden und kein worst-case Szenario der globalen Klimaentwicklung berücksichtigt wurde, liegt die Veränderung des Klimas im Einzugsgebiet der Oberen Donau damit deutlich über dem globalen Mittel.

b) Zur regionalen Entwicklung der Gesellschaft

- Das Einzugsgebiet der Oberen Donau ist eine der wenigen Regionen Mitteleuropas, in der in der absehbaren Zeit bis 2030 mit einem **Bevölkerungswachstum** und einem Wachstum der wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit gerechnet werden kann.
- Für die weitere Entwicklung der gesellschaftlichen Grundausrichtung wurden drei Szenarien angenommen: 1) die aktuelle Entwicklung setzt sich fort, 2) es wird zukünftig größerer Wert auf Allgemeinwohl und nachhaltige Entwicklung gelegt, 3) es wird zukünftig mehr Wert auf die Performance des Einzelnen gelegt.

c) Zur Entwicklung des Wasserhaushalts der Oberen Donau

Die Simulationsergebnisse mit einem Ensemble von regionalen Klimaszenarien lassen für den Zeitraum von 2011 bis 2060 erwarten, dass das Wasser an der Oberen Donau zwar knapper, aber nicht knapp werden wird. 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. Die gleichzeitige starke Reduzierung des Schneespeichers in den Alpen führt zu einer ausgeprägten Vorverlagerung der jahreszeitlichen Verfügbarkeit des Wassers vom Sommer ins Frühjahr und zu einer starken bis sehr starken Abnahme der Niedrigwasserabflüsse an den Hauptflüssen. In der Folge reduziert sich die Wasserkraftproduktion (erneuerbare Energie), in Verbindung mit den steigenden Wassertemperaturen kommt es zu einer Reduzierung des Kühlwasserdargebots für die Wärmekraftwerke im Sommer und zu Einschränkungen für die Schifffahrt in Niedrigwasserzeiten. Die Wasserabgabe an die Unterliegerstaaten, die vom Donauwasser abhängen und es intensiv nutzen, wird sich zukünftig mäßig bis signifikant reduzieren. Die Zusammenschau der Ergebnisse lässt es angezeigt erscheinen, die Rolle der Oberen Donau als „Wasserschloss“ für die Donau-Unterlieger zukünftig neu zu bewerten.

Bewertung der Einzelfaktoren

- Die **Grundwasserneubildung** im gesamten Einzugsgebiet wird sich bis zum Zeitraum 2036-2060 gegenüber dem Zeitraum 1971-2000 um 5% bis 21% verringern. Dies liegt sowohl an der Zunahme der Verdunstung als auch an der leichten Abnahme des Niederschlags. Eine Zunahme der Grundwasserneubildung im Winter (durch höhere Niederschläge) wird durch Zunahme der Verdunstung und Abnahme der Niederschläge im Sommer mehr als kompensiert.
- Der **Abfluss** in den Flüssen der Oberen Donau wird sich zukünftig verringern. Die Abnahme liegt je nach behandeltem Klimaszenario zwischen 5% und 35% bis zum Jahr 2060. Regional wird sie in den Alpen am geringsten und entlang der Donau am ausgeprägtesten sein.
- Die jährliche **Wasserabgabe** der Oberen Donau am Pegel Achleiten (bei Passau) an die Donau-Unterlieger wird sich dadurch bis 2060 um 9% bis 31% verringern.
- 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. Im Sommer wird zukünftig auch in den Gipfellagen der Niederschlag vorwiegend als Regen fallen. Somit wird zukünftig weniger Schneespeicher zur Verfügung stehen. Die Schneeschmelze in den Alpen wird sich vom Frühsommer ins Frühjahr verlagern, was zu ausgeprägten Niedrigwasserperioden im Sommer führen wird.
- Der **Niedrigwasserabfluss** der Oberen Donau bei Passau wird sich bis 2060 um 25% bis 53% verringern. Dies führt während der Niedrigwasserperioden zu einer Beeinträchtigung der Schifffahrt. Einer starken Reduzierung des Niedrigwassers entlang der Donau steht eine Erhöhung der Niedrigwasserabflüsse in den Alpentälern gegenüber. Diese wird durch den zukünftig stärkeren Abfluss aus den alpinen Regenniederschlägen verursacht, welcher durch die Temperaturerhöhungen bedingt ist und zur Folge hat, dass weniger Schnee gespeichert wird.
- 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 (bei Passau) 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. Dies wird vor allem hervorgerufen durch die Veränderung der Niederschlagsart in alpinen Regionen von

Schnee zu Regen und der damit verbundenen Reduzierung der Speicherung des Wassers in Form von Schnee.

- Die **Wasserkraftproduktion** der installierten Wasserkraftanlagen als derzeitiger Hauptträger erneuerbarer Energie im Einzugsgebiet der Oberen Donau wird aufgrund des reduzierten Abflusses in der Zukunft je nach gewähltem Klimaszenario um 10% bis 16% zurück gehen.
- Die **Gletscher** im Einzugsgebiet der Oberen Donau werden zwischen 2035 und 2045 nahezu vollständig verschwunden sein. Die Simulationen zeigen, dass die in den Gletschern heute gespeicherten Wassermengen in Zukunft keinen entscheidenden Beitrag zur Sicherstellung einer ausgeglichenen Wasserführung in der Donau leisten können. Ihr Abtauen wird allerdings in der Periode zwischen 2011 und 2035 zu einer leichten Erhöhung des Abflusses in Passau von etwa 2% führen. In den Kopfeinzugsgebieten leisten sie in dieser Periode einen Beitrag zur Erhöhung des Niedrigwasserabfluss. Nach 2035 trägt das Ausbleiben des Schmelzwassers von den Restgletschern zum allgemeinen Abflussrückgang bei.

f) Zur Entwicklung von 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 um ca. 20% reduzieren wird. In der zweiten Hälfte des Simulationszeitraums tritt dabei eine spürbare Verlangsamung des Rückgangs ein. Der Rückgang ist hauptsächlich auf eine weitere Verbreitung von Wasserspartetechnologien in den Haushalten und eine Veränderung des Verbraucherverhaltens zurückzuführen. 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.

Die Reduzierung der Grundwasserneubildungsrate führt in der zweiten Simulationsperiode (2036-2060) bei rückläufigen Entnahmen nur selten zu vereinzelt lokalen, zeitlich begrenzten Knappheiten bei der **Trinkwasserversorgung** die je nach gewähltem gesellschaftlichem Szenario durch erhöhte Förderung, Importe von benachbarten Unternehmen oder durch Liefereinschränkungen kompensiert werden. Besonders betroffen sind Gebiete mit sehr kleinräumigen Versorgungsstrukturen, die Grundwasser aus flachliegenden, räumlich begrenzten Grundwasserleitern entnehmen (z.B. im Nordosten Bayerns und in Teilen des Voralpenlands). Das Wasserdargebot im Einzugsgebiet insgesamt 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 (stärkere Vernetzung). Nicht abzuschätzen sind derzeit die Auswirkungen eines möglichen Bewässerungsbedarfs in der Landwirtschaft. Auswirkungen von Wasserentnahmen auf tiefere Aquifere sind im Simulationszeitraum nicht signifikant zu ermitteln.

g) Zur Entwicklung des Winter- und Sommertourismus

Die weitere Entwicklung des Wintertourismus wird durch eine regional und nach Höhenlage unterschiedlich starke Verringerung der Schneedeckendauer gekennzeichnet, die je nach gewähltem Klimaverlauf bis 2060 30 bis 60 Tage umfassen kann. Die abnehmende **Schneesicherheit** in niedrigeren Lagen verstärkt die Konzentration des Wintertourismus auf hoch gelegene und gut ausgebaute Skigebiete. In diesen wird sich aufgrund der höheren Niederschläge im

Winterhalbjahr die Schneesituation trotz erhöhter Temperaturen nicht verschlechtern, teilweise sogar verbessern. Durch die hohen Investitionskosten für künstliche Beschneigung und die geringere Schneesicherheit wird in einigen tiefer gelegenen Skigebieten ein wirtschaftlich rentabler Betrieb nicht mehr aufrecht erhalten werden können, zumal durch die gestiegenen 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.

Durch die gestiegenen Temperaturen im Sommer können Orte mit einem 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. Dafür ist der Einfluss der gesellschaftlichen Trends/Entwicklungen auf den Sommertourismus stärker.

h) Zur Entwicklung der Land- und Forstwirtschaft der Oberen Donau

Alle untersuchten Klimaszenarien zeigen, dass der steigende CO₂-Gehalt der Atmosphäre und die erhöhte Temperatur zu einem Anstieg der Ernteerträge führen werden. Die Wassernutzungseffizienz der Vegetation (Verhältnis der Biomasseproduktion zu transpiriertem Wasser) verbessert sich für C₃-Pflanzen deutlich. Die Transpiration nimmt damit nicht proportional zur Biomasseproduktion zu. Vereinzelt wird es in Trockenjahren auf leichten Böden vor allem entlang der Donau zu einer durch Trockenheit bedingten Reduzierung des Ernteertrags kommen. Die Mineralisation der organischen Substanz in den Böden nimmt zu, dadurch verbessert sich, bei ausreichender organischer Substanz im Boden, die Stickstoffverfügbarkeit. Die Effekte wirken sich abhängig von den lokalen Klimafaktoren kleinräumig unterschiedlich stark aus. Keines der untersuchten Gesellschaftsszenarien zeigt eine auf den Klimawandel zurückzuführende Verschlechterung der Einkommenssituation der Landwirte.

i) Zur Entwicklung des industriellen Wasserverbrauchs

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.