

RechAUT – Variability of Groundwater Recharge and its Implication for Sustainable Land Use in Austria

Ergänzungen zum Abschlussbericht – WP5

Auswirkungen von Klimawandel und sozioökonomischen Veränderungen auf Wasserverfügbarkeit, Landnutzung und pflanzliche Produktion

1. Motivation

Die begrenzten, natürlichen Ressourcen Land und Wasser sind mit zahlreichen Nutzungsansprüche unterschiedlicher Sektoren verbunden. Da die unterschiedlichen Nutzungsansprüche sowohl mit vorteilhaften (Synergien) als auch nachteiligen (Zielkonflikten) Wechselwirkungen verbunden sind, ist eine sektorübergreifende Planung und Umsetzung von Maßnahmen erforderlich.

Basis für die Umsetzung sektorübergreifender, langfristig effizienter Maßnahmen bildet die Kenntnis der Verflechtungen zwischen natürlichen Ressourcen, Nutzungsansprüchen und deren Veränderungen sowie potenzielle Maßnahmen und die damit verbundenen Folgen für die Ressourcen Land und Wasser sowie die betroffenen Sektoren. Diese Verflechtungen und Implikationen sind einerseits von Unsicherheiten begleitet, beispielsweise hinsichtlich zukünftiger klimatischer Veränderungen, und können sich andererseits regional deutlich unterscheiden.

2. Ziele des Arbeitspakets

Ziel von Arbeitspaket 5 (WP5) des Projektes „RechAUT – Variability of Groundwater Recharge and its Implications for Sustainable Land Use in Austria“ war es, Wechselwirkungen zwischen klimatischen, agronomischen, hydrologischen und sozio-ökonomischen Prozessen und Entwicklungen zu modellieren. Dazu wurden agrar- und wasserpolitische Ziele sowie Klimaszenarien für Österreich und ausgewählte Regionen entwickelt und berücksichtigt. Insbesondere sollten im Rahmen von WP5

- (i) die Auswirkungen von Klimaszenarien auf die landwirtschaftliche Produktion, die landwirtschaftliche Flächennutzung und die regionalen Wasserbilanzen in Fallstudienregionen Österreichs untersucht werden;
- (ii) eine effiziente Flächennutzung und -bewirtschaftung zur Anpassung an den Klimawandel identifiziert werden; und
- (iii) Kompromisse zwischen land- und wasserpolitischen Zielen bewertet werden.

3. Methoden, Fallstudienregionen und partizipativer Prozess

Methoden

Im Rahmen von WP5 kamen unterschiedliche Methoden – nämlich ein partizipativer Prozess zur Szenariendefinition und integrative Modellierung– zur Anwendung. Basierend auf den Ergebnissen des partizipativen Prozesses wurden ein integrierter Modellverbund adaptiert und auf regionaler Ebene angewendet, um

- effiziente landwirtschaftliche Bewirtschaftungsmaßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel zu identifizieren,
- den zukünftigen landwirtschaftlichen Bewässerungsbedarf abzuschätzen sowie
- damit verbundene veränderte (Grund-)Wasserverfügbarkeiten zu quantifizieren.

Der integrative Modellverbund kombiniert das Klimamodell ACLiReM (Strauss et al., 2013a, 2013b), das Fruchtfolgemodell CropRota (Schönhart et al., 2011), das bio-physikalische Prozessmodell EPIC (Williams, 1995) und das ökonomische Optimierungsmodell BiomAT (Feusthuber et al., 2017; Karner et al., 2021; Stürmer et al., 2013). Eine detaillierte Beschreibung des integrierten Modellverbundes ist im Hauptteil des Endberichts zur vorliegenden Studie verfügbar. Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Land- und Wassernutzung wurden in zwei Fallstudienregionen untersucht: (i) Oberösterreich und ausgewählte Teilregionen und (ii) Seewinkel. Die gewählten Regionen unterscheiden sich insbesondere in den klimatischen Bedingungen.

Neben der Möglichkeit der uneingeschränkten landwirtschaftlichen Bewässerung, wurden in der Fallstudienregion Oberösterreich alternative Grundwasserbewirtschaftungsszenarien, mit einer Beschränkung der gesamten bewässerbaren Fläche auf 7.000 ha bzw. 3.500 ha analysiert. Die Einschränkungen gelten für die gesamte Landwirtschaft in Oberösterreich und basieren auf aktuellen Erhebungen zur gesamten bewässerbaren Fläche in Oberösterreich (3.300 ha; Statistik Austria, 2022).

In der Fallstudienregion Seewinkel wurde die Einschränkung der Grundwasserentnahme über einen steigenden Grenzwert der Grundwasserentnahme (λ) von 0,0 €/m³ bis 0,7 €/m³ abgebildet. λ drückt damit den Preis für die Entnahme einer weiteren Einheit (m³) aus dem Grundwasserkörper aus, welcher zum Beispiel über marktbasierende Instrumente, wie eine Mengensteuer, realisiert werden kann. Auch in der Region Seewinkel wurde die Analyse für drei Klimaszenarien durchgeführt.

Fallstudienregionen

In Oberösterreich sind die klimatischen Bedingungen für die landwirtschaftliche Produktion aktuell vergleichsweise günstig, z.B. aufgrund fruchtbarer Böden mit großer Wasserspeicherkapazität und Jahresniederschlagssummen von durchschnittlich 1.119 mm im Beobachtungszeitraum 1971-2000 (Chimani et al., 2016a). Die bewirtschaftete Ackerfläche in Oberösterreich beträgt etwa 287.700 ha. Die landwirtschaftliche Bewässerung hat vor allem im Obst- (v. a. bei Erdbeeren) und Feldgemüsebau eine lange Tradition, der Anteil an der gesamten bewässerten Fläche in Österreich ist mit knapp 2% aktuell relativ gering (Statistik Austria, 2022). Die Trockenperioden in den Jahren 2017 bis 2019 haben die allgemein zunehmende Notwendigkeit landwirtschaftlicher Bewässerung, insbesondere in intensiven Produktionsgebieten wie dem Eferdinger Becken, verdeutlicht. Zudem zeigen aktuelle Klimaszenarien für Oberösterreich einen Anstieg der Jahresdurchschnittstemperaturen bis 2050, gepaart mit häufigeren und intensiveren Trocken- und Dürreperioden und Hitzetagen (Ahrens et al.,

2014; Chimani et al., 2016a; Formayer et al., 2021). Die verändernden klimatischen Bedingungen lassen erwarten, dass die Anpassung der Landwirtschaft, einschließlich der Bewässerung, in den kommenden Jahrzehnten an Bedeutung gewinnen wird. Gleichzeitig zeigen aktuelle Studien, dass die Grundwasserressourcen, welche die Hauptquelle für die landwirtschaftliche Bewässerung in Österreich darstellen, in Zukunft stärker in Anspruch genommen werden könnten (vgl. Lindinger et al., 2021). Für Oberösterreich wurden zudem elf Teilregionen entlang der Grundwasserkörper definiert und analysiert.

Die Region Seewinkel (das Gebiet östliche des Neusiedlersees im Burgenland) gehört zu einem einzigen Grundwasserkörper mit einem typischen Jahresgang, d.h. Grundwasserhöchstständen im Frühling und niedrigen Grundwasserständen im (Spät-) Sommer (vgl. Blaschke and Gschöpf, 2011). Mit einem Jahresniederschlag von ca. 600 mm und einer Jahresdurchschnittstemperatur von 8-10°C gilt die Region als wärmste und trockenste Region in Österreich (Blaschke et al., 2015). Von der gesamten Fläche des Seewinkels (45.100 ha) wird mehr als die Hälfte für die landwirtschaftliche Produktion genutzt. Insbesondere entfallen ca. 50% der regionalen Fläche auf Ackerland, 10% auf Weingärten und 6% auf Grünland. Die landwirtschaftliche Bewässerung ist bereits jetzt von Bedeutung, um die landwirtschaftliche Produktion unter den gegebenen klimatischen Bedingungen zu sichern. Die Landwirtschaft gilt als Hauptnutzer von Grundwasser. Neben der Landwirtschaft stellen die Wasserwirtschaft zur Sicherung der Trinkwasserversorgung, der Naturschutz zur Erhaltung der charakteristischen Salzlacken im Nationalpark Neusiedler See-Seewinkel und die Energieversorgung ebenfalls Nutzungsansprüche an das Grundwasser. Diese sektoralen Ansprüche an das Grundwasser im semiariden Seewinkel konkurrieren und es wird erwartet, dass die Konkurrenz in Zukunft zunehmen wird. Verschiedene Klimaszenarien zeigen einen weiteren Anstieg der Jahresdurchschnittstemperaturen, kombiniert mit abnehmenden Jahresniederschlagssummen und häufigeren, intensiveren Trocken- und Dürreperioden und Hitzetagen (Chimani et al., 2016b).

Partizipativer Prozess

Die integrative Modellierung für Oberösterreich wurde von Stakeholdern in einem partizipativen Prozess begleitet. Insgesamt wurden drei Workshops mit Stakeholdern aus den Bereichen regionale Verwaltung, Wasserwirtschaft, Landwirtschaft und Meteorologie durchgeführt. Dabei wurden insbesondere ein gemeinsames Verständnis der Ist-Situation erarbeitet, Szenarien definiert sowie Handlungsempfehlungen formuliert. Weiters wurden die modellierten Klimaszenarien ausgewählt.

Workshop 1 fand im Herbst 2021 statt und widmete sich fünf Zielen. Erstens wurde die Ist-Situation zur landwirtschaftlichen Produktion und zu Bewirtschaftungsmaßnahmen inklusive Bewässerung für Oberösterreich beschrieben und die Datengrundlagen für die Modellierung um regionale Datensätze ergänzt. Zweitens wurden von den Stakeholdern Teilregionen definiert, die für die integrative Modellierung und die Aufbereitung der Ergebnisse genutzt werden sollten. Drittens wurden zwei verfügbare Klimaszenarien-Datensätze vorgestellt und deren Gemeinsamkeiten und Unterschiede diskutiert (Tabelle 1). Die Stakeholder waren aufgefordert, eine gemeinsame Entscheidung für einen der beiden Datensätze zu treffen. Zur Auswahl standen vier Klimaszenarien aus dem ÖKS15-Klimadatensatz (Chimani et al., 2016c basierend auf EURO-CORDEX; Jacob et al., 2014) und drei statistische Klimaszenarien aus dem ACLiReM-Datensatz (Strauss et al., 2013b, 2013a). Viertens wurden im Rahmen des Workshops die sektoralen und sektorübergreifenden Einschätzungen zu den zentralen, beobachteten und erwarteten klimatischen Herausforderungen für die Land- und Wasserwirtschaft in Oberösterreich sowie die regional unterschiedliche Betroffenheit diskutiert und

festgehalten. Fünftens waren die Stakeholder aufgefordert eine Einschätzung abzugeben, welche landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsmaßnahmen als Klimawandel-Anpassungsmaßnahmen zukünftig an Bedeutung gewinnen könnten.

Tabelle 1: Gegenüberstellung der verfügbaren Klimaszenarien-Datensätze als Diskussionsgrundlage im Workshop.

	ÖKS 15 Klimaszenarien	statistische Klimaszenarien (ACLiReM)
verfügbarer Zeitraum	bis 2100 tagesbasierte Daten	bis 2040 tagesbasierte Daten
räumliche Auflösung	1 km Raster	1 km Raster
Basis	europäische Klimaprojektionen (EURO-CORDEX; Chimani et al., 2016c; Jacob et al., 2014)	30-jährige Zeitreihen von österreichischen Wetterstationen (Strauss et al., 2013b, 2013a)
verfügbare Szenarien	<ul style="list-style-type: none"> ▪ RCP 4.5 (Situation mit wirksamen Klimaschutzmaßnahmen) Klimamodelle ICHEC-RCP45, MOHC-HADGEM2_RCP45 ▪ RCP 8.5 (Situation mit ungebremsten THG-Emissionen) Klimamodelle ICHEC-RCP85, IPSL-CM5A-MR_RCP85 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Niederschlagsszenarien Referenzszenario (keine Änderung in den Tagesniederschlägen); Änderung der Tagesniederschläge um $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 20\%$; saisonale Verschiebungen Temperaturanstieg: $+0.05^\circ\text{C}/\text{Jahr}$ ▪ Extremwetterszenarien (mehrjährige Trocken- und Feuchtperioden) – Ermittlung mittels (i) Dry Day Index, (ii) Block bootstrap, (iii) gewichtetem resampling
verfügbare Wetterparameter	maximale/minimale Temperatur, Niederschlag, Windgeschwindigkeit, solare Strahlung, relative Luftfeuchtigkeit	maximale/minimale Temperatur, Niederschlag, Windgeschwindigkeit, solare Strahlung, relative Luftfeuchtigkeit
Relevante Argumente für die Entscheidungsfindung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ keine Abbildung von Extremwettersituationen möglich Trends für OÖ (Ensemble-Median; Chimani et al., 2016a): ▪ für RCP 4.5 und RCP 8.5: signifikante Zunahme der mittleren Lufttemperatur in naher (bis 2050) und ferner (2071-2100) Zukunft → erst in ferner Zukunft für RCP 8.5 deutlich stärker ausgeprägt ▪ für RCP 4.5 und RCP 8.5: leichte Zunahme im mittleren Jahresniederschlag in naher (bis 2050) und ferner (2071-2100) Zukunft → erst in ferner Zukunft signifikant ▪ saisonale und regionale Unterschiede nur in RCP 8.5 signifikant 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Möglichkeit, Extremwettersituationen explizit abzubilden ▪ Verfügbare Szenarien decken eine Bandbreite an Niederschlagsszenarien ab ▪ Analysen zu Auswirkungen von Trockenperioden möglich

Auf Grund des besonderen Interesses für mögliche Auswirkungen von Trocken- und Dürreperioden auf die landwirtschaftliche Produktion und Bewässerung wählten die Stakeholder die statistischen Klimaszenarien (ACLiReM) als Grundlage für die integrative Modellierung.

Ein weiteres Ergebnis des ersten Workshops war ein Set landwirtschaftlicher Bewirtschaftungsmaßnahmen als mögliche Klimawandel-Anpassungsmaßnahmen. Neben der

landwirtschaftlichen Bewässerung erachteten die Stakeholder alternative Bodenbearbeitungsverfahren sowie angepasste Kulturartenzusammensetzungen als relevant. In der ersten Modellierungsphase wurde das gewählte Set an Bewirtschaftungsmaßnahmen für jedes der drei Klimaszenarien simuliert.

Workshop 2 fand im Winter 2021 statt und verfolgte drei Hauptziele: (i) die gewählten Klimaszenarien detailliert vorzustellen; (ii) die ersten Modellergebnisse zu diskutieren und das modellierte Set an Bewirtschaftungsmaßnahmen weiter zu spezifizieren; (iii) zu analysierende Grundwassermanagementszenarien zu definieren. Der Fokus bei (i) lag auf den regionalen Unterschieden im Jahresniederschlag und der Jahresdurchschnittstemperatur für die definierten Teilregionen (siehe Workshop 1). In (ii) wurden die Modellergebnisse der einzelnen Modelle im integrativen Modellverbund vorgestellt, wesentliche Treiber hinter diesen Ergebnissen sowie die Ergebnisse entlang der Erfahrungen der Stakeholder diskutiert. Dadurch konnten einerseits das gemeinsame Verständnis für die Modelle und den Modellverbund gefestigt werden und andererseits das Set an Bewirtschaftungsmaßnahmen um Bewirtschaftungsmaßnahmen von (regionalem) Interesse erweitert werden, zum Beispiel die Berücksichtigung weiterer Verfahren im Bereich der Bodenbearbeitung in der Modellierung. Der Fokus bei (iii) lag auf den Auswirkungen der Klimaszenarien und der damit verbundenen zunehmenden Notwendigkeit der landwirtschaftlichen Bewässerung auf die Grundwasserressourcen und Wasserverfügbarkeit. Gemeinsam mit den Workshopteilnehmer:innen wurden mögliche Regulierungsmaßnahmen der Grundwasserentnahme diskutiert, zum Beispiel, die Einführung eines Preises für Wasser für die landwirtschaftliche Bewässerung, regionale Einschränkungen der Bewässerungsmenge und regionale Einschränkungen der bewässerten Fläche. Während die Teilnehmer:innen die Einführung eines Wasserpreises für landwirtschaftliche Bewässerung für unwahrscheinlich halten, werden regional abnehmende Grundwasserverfügbarkeiten und eingeschränkte Möglichkeiten der landwirtschaftlichen Bewässerung – sowohl flächen- als auch mengenmäßig – für als realistisch angesehen. Da aktuell weder Informationen zur Bewässerungsmenge noch zur regional bewässerten Fläche verfügbar sind, wurden die Grundwasserbewirtschaftungsszenarien als flächenmäßige Beschränkung der gesamten bewässerten Fläche in Oberösterreich definiert.

Basierend auf den Ergebnissen des zweiten Workshops wurde der integrierte Modellverbund weiter adaptiert und für die zusätzlich definierten Bewirtschaftungsmaßnahmen (Zwischenfruchtanbau) und Grundwasserbewirtschaftungsszenarien angewendet.

Workshop 3 fand nach Abschluss der Modellierungsarbeiten Anfang 2023 in Wien statt. Wesentliches Ziel des dritten Workshops war basierend auf den finalen Modellergebnissen zentrale Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen für (politische) Entscheidungsträger:innen abzuleiten. Diese können der land- und wasserwirtschaftlichen Planung als Grundlage für die frühzeitige Abwägung und Umsetzung von Anpassungsstrategien dienen.

4. Modellergebnisse

Die Modellergebnisse für Oberösterreich zeigen Auswirkungen der Klimaszenarien auf die pflanzliche Produktion und den landwirtschaftlichen Bewässerungsbedarf. Unter den modellierten Klimaszenarien mit trockener werdenden Bedingungen stellt landwirtschaftliche Bewässerung in vielen Regionen eine effiziente Anpassungsmaßnahme dar, wodurch der Wasserbedarf für die landwirtschaftliche Bewässerung in Oberösterreich deutlich zunimmt, mit großer Variabilität zwischen

den Regionen. Zum Beispiel werden im Referenz-Klimaszenario mit unveränderten Jahresniederschlagssummen ca. 890 ha Ackerland bewässert. In den Klimaszenarien mit einer moderaten und starken Abnahme der Jahresniederschlagssummen steigt die bewässerte Fläche auf ca. 7.890 bzw. 13.680 ha Ackerland. Die dafür aufgewendete Bewässerungsmenge steigt von 1,2 Mio. m³ auf bis zu 22,6 Mio. m³. Zudem wirken sich die Grundwasserbewirtschaftungsszenarien nicht nur senkend auf den Wasserbedarf für die landwirtschaftliche Bewässerung aus, sondern auch auf die erzielbaren Nettoerlöse aus der landwirtschaftlichen Produktion. Eine detaillierte Beschreibung der Modellergebnisse ist im Hauptteil des Endberichts zur vorliegenden Studie verfügbar.

Auch in der zweiten Fallstudienregion, dem Seewinkel, wurden optimale Anpassungsmaßnahmen an Klimaszenarien und (politische) Grundwassermanagementsszenarien, umgesetzt als Einschränkung der Grundwasserentnahmemengen, modelliert. Die Modellergebnisse zeigen, dass die durchschnittliche jährliche Bewässerungsmenge, ohne Einschränkung der Grundwasserentnahme ($\lambda = 0,0 \text{ €/m}^3$), die Grundwasserneubildung aus Niederschlag über Versickern (Perkolation) in allen Klimaszenarien übersteigt. Weingärten sind die dominierende landwirtschaftliche Landnutzungsform. Mit steigendem λ nimmt die Grundwasserentnahme in allen Klimaszenarien stetig ab. Im Vergleich zur uneingeschränkten Grundwassernutzung sinken bei diesen Szenarien sowohl die regionale landwirtschaftliche Produktion als auch die Nettoerlöse. Hinsichtlich der Landnutzung nehmen Weingärten in diesen Szenarien ab und Ackerland und Brachflächen nehmen zu.

5. Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

Informationen über potenzielle Veränderungen des landwirtschaftlichen Bewässerungsbedarfs sowie über effiziente Land- und Wassermanagementstrategien sind zentral für die nachhaltige Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen. Einerseits können dadurch negativen Auswirkungen des Klimawandels auf die landwirtschaftliche Produktion verringert werden. Andererseits können potenzielle Nutzungskonflikten zwischen Trinkwasserversorgung, Industrie und landwirtschaftlicher Produktion rechtzeitig erkannt und ihnen entgegengewirkt werden.

Die Modellergebnisse zeigen, dass sich häufigerer Trocken- und Dürreperioden regional sehr unterschiedlich auf den landwirtschaftlichen Bewässerungsbedarf auswirken. Dies verdeutlicht die Relevanz regionaler Analysen sowie der Umsetzung von Maßnahmen, die auf regionale Gegebenheiten abgestimmt sind.

Ein modellierter Bewässerungsbedarf bedeutet jedoch nicht zwangsläufig, dass die landwirtschaftliche Bewässerung auch eine effiziente Anpassungsmaßnahme an die veränderten klimatischen Bedingungen darstellt oder ausreichend Grundwasserressourcen zur Verfügung stehen. Dies haben auch die Diskussionen im Rahmen der Stakeholder Workshops gezeigt. Es wurde betont, dass neben dem Bewässerungsbedarf auch im Hinblick auf die aktuelle sowie erwartete regionale Wasserverfügbarkeit große regionale Unterschiede bestehen. Analysen zur (regionalen) Entwicklung verfügbarer Grundwasserressourcen für die landwirtschaftliche Bewässerung wären eine wichtige Ergänzung zur Abschätzung des landwirtschaftlichen Bewässerungsbedarfs, sind aber gerade in Bezug auf die Vorhersagen zur diffusen Grundwasserneubildung mit großen Unsicherheiten behaftet und schwierig für die Region vorherzusagen (siehe WP3). Dadurch könnten in Regionen mit eingeschränkter Grundwasserverfügbarkeit rechtzeitig alternative Anpassungsmaßnahmen umgesetzt werden oder alternative Wasserspeicher- oder Wasserzuleitungssysteme installiert werden. Zudem

könnten Informationen über mögliche Entwicklungen der Grundwasserverfügbarkeit auch in der Modellierung effizienter Anpassungsmöglichkeiten Berücksichtigung finden.

Die Modellergebnisse für die Grundwasserbewirtschaftungsszenarien (Beschränkung der bewässerten Fläche, Wasserpreis) zeigen, dass dadurch die landwirtschaftliche Bewässerung und die Nutzung der Grundwasserressourcen verringert werden können. Diese Einschränkungen können zur Stabilisierung des Grundwasserspiegels beitragen. Gleichzeitig wirken sich die Grundwasserbewirtschaftungsszenarien negativ (senkend) auf die landwirtschaftliche Produktion und die landwirtschaftlichen Erlöse aus. Entscheidungsträger:innen sollten bei der Planung und Umsetzung von Maßnahmen neben den direkten Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Produktion auch die Auswirkungen auf vor- und nachgelagerte Sektoren berücksichtigen. Regional differenzierte Maßnahmen bieten größere Handlungsspielräume die ökonomischen Auswirkungen von Einschränkungen der Grundwassernutzung möglichst gering zu halten.

Eine wesentliche Einschränkung für die Definition und Modellierung regionaler Grundwasserbewirtschaftungsszenarien stellt die Datenverfügbarkeit dar. Derzeit verfügbare Daten enthalten weder detaillierte Informationen zu landwirtschaftlicher Bewässerung auf Feldebene noch zu aufgewendeten Bewässerungsmengen. Die Schließung dieser Datenlücken würde eine regionale Ausgestaltung und Modellierung von Szenarien ermöglichen und Unsicherheiten hinsichtlich zukünftiger Entwicklungen reduzieren.