



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Wirtschaft, Bildung und Forschung WBF
Agroscope

u^b

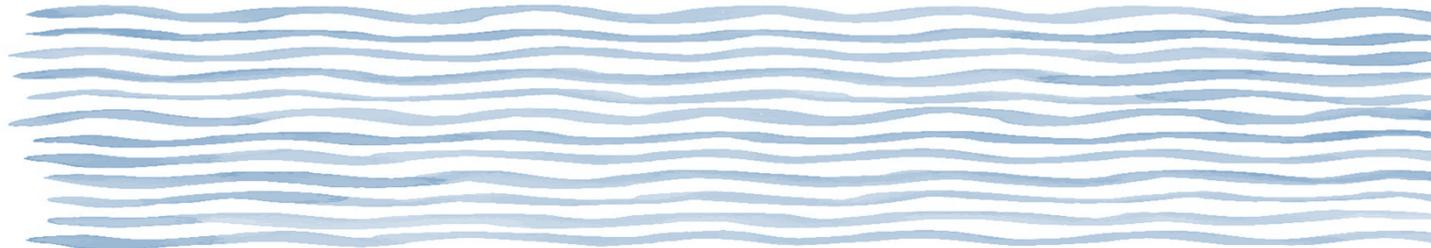
b
**UNIVERSITÄT
BERN**

unine

UNIVERSITÉ DE
NEUCHÂTEL

AgriAdapt – Modellgestützte Untersuchung der Einflüsse von Klima- und Landnutzungsänderungen auf Grundwasserressourcen im Berner Seeland

ANNELIE HOLZKÄMPER, FABIEN COCHAND, OLE RÖSSLER, PHILIP BRUNNER,
DANIEL HUNKELER



IM AUFTRAG DES BUNDESAMTES FÜR UMWELT BAFU – Oktober 2020

EIN FORSCHUNGSPROJEKT IM RAHMEN DES NCCS THEMENSCHWERPUNKTES
“HYDROLOGISCHE GRUNDLAGEN ZUM KLIMAWANDEL” DES NATIONAL CENTRE
FOR CLIMATE SERVICES

Impressum

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Hydrologie, CH-3003 Bern
Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmer: Agroscope, Fachbereich Agrarökologie und Umwelt, CH-8046 Zürich

Autor/Autorin: A. Holzkämper, F. Cochand, O. Rössler, P. Brunner, D. Hunkeler

Begleitung BAFU: P. Schmocker-Fackel, F. Hüsler, M. Sinreich

Hinweis: Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) im Rahmen des Themenschwerpunkts Hydro-CH2018 verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Zitiervorschlag: Holzkämper A., Cochand F., Rössler O., Brunner P. und Hunkeler D. 2020. AgriAdapt – Modellgestützte Untersuchung der Einflüsse von Klima- und Landnutzungsänderungen auf Grundwasserressourcen im Berner Seeland. Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU), Bern, Schweiz, 39 S.

DOI: <https://doi.org/10.34776/nccs21aa>

Inhalt

1	Zusammenfassung	3
2	Executive summary	4
3	Einleitung	5
4	Untersuchungsgebiet.....	6
5	Der Modellansatz.....	8
6	Klimaszenarien	11
7	Landnutzungsszenarien	13
8	Modellbeschreibung, -kalibrierung und -validierung	14
8.1	Pflanzenwachstumsmodell.....	14
8.2	Hydrologisches Modell	15
8.3	Grundwassermodell	17
8.4	Qualitätsabschätzung.....	19
9	Ergebnisse.....	19
9.1	Klimawandeleinflüsse auf Erträge	19
9.2	Klimawandeleinflüsse auf Wasserbedarf für Bewässerung	21
9.3	Klimawandeleinflüsse auf das Sickerwasser.....	23
9.4	Klimawandeleinflüsse auf die Hydrologie.....	24
9.5	Klima- und Landnutzungseinflüsse auf die Grundwasserdynamik.....	26
10	Potentiale und Limitierungen	31
11	Kernbotschaften.....	33
12	Forschungslücken und offene Fragen	34
13	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	35
14	Referenzen	36

1 Zusammenfassung

Klimawandel beeinflusst sowohl die Wasserressourcen, als auch die landwirtschaftliche Produktion. Mit steigenden Temperaturen und abnehmenden Sommerniederschlägen ist zu erwarten, dass die landwirtschaftliche Produktion in Zukunft vermehrt durch Trockenheit limitiert sein wird. Wo Wasserressourcen für Bewässerung zur Verfügung stehen, ist mit einer Zunahme der Wasserentnahmen für Bewässerung zu rechnen. Somit werden Wasserressourcen unter Klimawandel in zweifacher Hinsicht beeinträchtigt. Erstens direkt durch Änderungen in der saisonalen Niederschlagsverteilung, die die Grundwasserneubildung beeinflussen und zweitens durch Änderungen in der Wassernutzung. Es stellt sich somit die Frage ob Konflikte um die Ressource Wasser in Zukunft zunehmen. Vor diesem Hintergrund war es Ziel dieses Projektes, zu untersuchen, (1) wie Agrarproduktion, Wasserbedarf für Bewässerung, Abflüsse und Grundwasserdynamik durch zukünftige Klimaänderungen beeinflusst werden und (2) wie Klimawandelauswirkungen sich in Kombination mit Änderungen in der landwirtschaftlichen Wassernutzung auf die Grundwasserdynamik auswirken. Das Projekt leistet damit im Rahmen des BAFU-Programms Hydro-CH2018 einen wichtigen Beitrag zum besseren Verständnis der kombinierten Klima- und Landnutzungseinflüsse auf die Wasserressourcen. Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurde ein gekoppelter Modellansatz entwickelt, der Modelle aus drei Fachrichtungen miteinander verbindet: ein landwirtschaftliches Pflanzenwachstumsmodell, ein hydrologisch-hydraulisches Modell und ein hydrogeologisches Modell. Die Koppellung wurde für das Gebiet des Grundwasserleiters «Berner Seeland» implementiert und getestet. Das Gebiet wird überwiegend landwirtschaftlich genutzt, wobei die Möglichkeit zur Grundwassernutzung für Bewässerung eine wichtige Rolle für die Ertragssicherung spielt. Gleichzeitig versorgt der Grundwasserleiter die Gemeinden der Umgebung mit Trinkwasser. Eine potentielle Verschärfung eines Nutzungskonfliktes zwischen Trinkwassernutzung und landwirtschaftlicher Wassernutzung ist hier deshalb von zentraler Bedeutung.

Bewertet wurden im Rahmen dieser Studie die Auswirkungen von erwarteten Klimaänderungen bis zum Ende des Jahrhunderts ausgehend von drei verschiedenen Emissionsszenarien (RCP2.6 = mit Klimaschutz, RCP4.5, RCP8.5 = ohne Klimaschutz). Landnutzungsänderungsszenarien verbunden mit Zu- oder Abnahme von Bewässerung wurden erstellt und bewertet, um die kombinierten Auswirkungen von Klima- und möglichen Nutzungsänderungen auf die Grundwasserdynamik des Untersuchungsgebietes abschätzen zu können.

Die Modellergebnisse zeigen, dass Ertragsänderungen nicht nur durch Trockenheitslimitierungen, sondern auch durch steigende Temperaturen getrieben sind. Am Beispiel von Mais konnte gezeigt werden, dass die Wahl von spätreiferen Sorten zur Anpassung an steigende Temperaturen sinnvoll sein kann, um das Ertragsniveau zu halten bzw. noch zu steigern. Allerdings kann ein potentieller Ertragszuwachs nur mit Bewässerung realisiert werden. Simulationsergebnisse zeigen, dass der Wasserbedarf für Bewässerung ohne Klimaschutz (RCP8.5) bis zum Ende des Jahrhunderts bei unveränderter Wachstumsperiode um 40% und mit Sortenanpassung um bis zu 80% zunehmen könnte. Mit Klimaschutz (RCP2.6) bliebe die Zunahme an Wasserbedarf für Bewässerung auf 7% beschränkt. Die Zunahme an Bewässerung und saisonale Abnahme der Neubildungsraten mit abnehmenden Sommerniederschlägen bewirkt im Gebiet eine Absenkung der Grundwasserstände in den Spätsommer- und Herbstmonaten. Diese würde durch eine Intensivierung der Bewässerungspraxis akzentuiert und durch eine Extensivierung reduziert. Implikationen der errechneten Änderungen der Grundwasserdynamik auf den Abbau organischer Böden, den Schadstofftransport, die Biodiversität und Bewässerungskosten sind in weiterführenden Studien abzuschätzen.

2 Résumé

Le changement climatique affecte non seulement les ressources en eau mais aussi la production agricole. Avec la hausse des températures et la diminution des précipitations estivales, on s'attend à ce qu'à la production agricole soit à l'avenir de plus en plus limitée par la sécheresse. Là où des ressources en eau sont disponibles pour l'irrigation, il faut escompter une augmentation des prélèvements d'eau pour l'irrigation. Le changement climatique porte donc atteinte aux ressources en eau de deux manières. Premièrement, directement par des changements dans la distribution saisonnière des précipitations, qui influencent la recharge de la nappe phréatique et, deuxièmement, par des changements dans l'utilisation de l'eau. La question se pose donc de savoir si les conflits liés aux ressources en eau vont s'intensifier à l'avenir. Dans ce contexte, l'objectif de ce projet était d'étudier (1) comment la production agricole, les besoins en eau pour l'irrigation, le ruissellement et la dynamique des eaux souterraines sont affectés par le changement climatique futur et (2) comment les impacts du changement climatique combinés aux changements dans l'utilisation de l'eau d'irrigation pour l'agriculture vont influencer la dynamique des eaux souterraines. Ce projet apporte ainsi une contribution importante à une meilleure compréhension des effets combinés du climat et de l'utilisation des sols sur les ressources en eau dans le cadre du programme Hydro-CH2018 de l'OFEV. Pour répondre aux questions de recherche, une approche de modèles couplés a été développée qui combine des modèles de trois disciplines: un modèle agricole de croissance des plantes, un modèle hydrologique et hydraulique et un modèle hydrogéologique. Cette couplage a été mise en place et testée pour la zone de la nappe aquifère du Seeland bernois. Cette zone est principalement utilisée à des fins agricoles, la possibilité d'utiliser les eaux souterraines pour l'irrigation jouant un rôle important dans la garantie des rendements. En même temps, la nappe aquifère alimente en eau potable les communes environnantes. L'aggravation potentielle d'un conflit entre l'utilisation de l'eau comme eau potable et à des fins agricoles est donc d'une importance capitale ici.

Dans le cadre de cette étude, les impacts des changements climatiques attendus d'ici à la fin du siècle ont été évalués sur la base de trois scénarios d'émissions différents (RCP2.6 = avec protection du climat, RCP4.5, RCP8.5 = sans protection du climat). Des scénarios de changement d'utilisation des terres associés à une augmentation ou à une diminution de l'irrigation ont été élaborés et évalués pour estimer les effets combinés du changement climatique et des éventuels changements d'utilisation des terres sur la dynamique des eaux souterraines de la zone étudiée.

Les résultats du modèle montrent que des modifications au niveau du rendement ne sont pas seulement dues aux limitations provoquées par la sécheresse, mais aussi à la hausse des températures. A l'exemple du maïs, on a pu montrer qu'utiliser des variétés à maturation plus tardive pour s'adapter à la hausse des températures peut être un choix judicieux pour maintenir, voire augmenter le niveau de rendement. Cependant, une augmentation potentielle du rendement ne peut être réalisée qu'avec l'irrigation. Les résultats de la simulation montrent que les besoins en eau pour l'irrigation sans protection du climat (RCP8.5) pourraient augmenter de 40 % d'ici à la fin du siècle avec une saison de croissance inchangée et jusqu'à 80 % avec l'adaptation des variétés. Avec une protection du climat (RCP2.6), l'augmentation des besoins en eau pour l'irrigation serait limitée à 7 %. L'augmentation de l'irrigation et la diminution saisonnière des taux de recharge de la nappe phréatique due à la diminution des précipitations estivales entraînent une baisse du niveau des eaux souterraines dans la région à la fin de l'été et en automne. Cette situation serait accentuée par une intensification de la pratique de l'irrigation et réduite par une extensification. Les implications des changements calculés dans la dynamique des eaux souterraines sur la dégradation des sols organiques, le transport des polluants, la biodiversité et les coûts d'irrigation doivent être estimés dans des études ultérieures.

3 Executive summary

Climate change affects both water resources and agricultural production. With rising temperatures and decreasing summer precipitation, it is expected that agricultural production will be increasingly limited by drought in the future. Where water resources are available for irrigation, an increase in water withdrawals for irrigation can be expected. Thus, water resources are affected by climate change in two ways. Firstly, directly through changes in the seasonal distribution of precipitation, which influence groundwater recharge, and secondly through changes in water use. This raises the question whether conflicts over water resources will increase in the future. Against this background, the aim of this project was to investigate (1) how agricultural production, water demand for irrigation, runoff and groundwater dynamics are affected by future climate change and (2) how climate change impacts combined with changes in agricultural water use affect groundwater dynamics. The project thus contributes to a better understanding of the joined impacts of climate and land use on water resources as part of the FOEN Hydro-CH2018 program. To answer these research questions, a loosely coupled model approach was developed, combining models from three disciplines: an agricultural plant growth model, a hydrological-hydraulic model and a hydrogeological model. The model coupling was implemented and tested for the area of the aquifer "Berner Seeland". The area is mainly used for agricultural purposes, whereby the possibility of using groundwater for irrigation plays an important role in securing yields. At the same time, the aquifer supplies the communities in the surrounding area with drinking water. The possibility of an intensifying conflict of use between drinking water use and agricultural water use is therefore of central importance here.

Within the scope of this study, the effects of expected climate change until the end of the century were evaluated based on three different emission scenarios (RCP2.6 = with climate protection, RCP4.5, RCP8.5 = without climate protection). Land use change scenarios associated with an increase or decrease of irrigation were evaluated to estimate the combined effects of climate and land use change on the groundwater dynamics of the study area.

The model results show that yield changes are not only driven by drought limitations but also by rising temperatures. Using the example of grain maize, it could be shown that the choice of later maturing varieties can be useful to maintain or even increase the yield level under warming conditions. However, an increase in yield potential can only be realized with irrigation. Simulation results show that the water requirement for irrigation without climate protection (RCP8.5) could increase by 40% by the end of the century with an unchanged growing season and by up to 80% with varietal adaptations. With climate change mitigation (RCP2.6) the increase in water demand for irrigation would be limited to 7%. The increase in irrigation and the seasonal decrease in recharge rates with decreasing summer precipitation causes a lowering of groundwater levels in the area in the late summer and autumn months. This is accentuated by an intensification of irrigation practice and reduced by extensification. Implications of the calculated changes in groundwater dynamics on the degradation of organic soils, pollutant transport, biodiversity and irrigation costs are to be estimated in further studies.

Keywords: *agriculture; irrigation; water resources; groundwater; water use conflict; integrated modelling*

4 Einleitung

Der Klimawandel verändert die Produktionsbedingungen für die Landwirtschaft in der Schweiz tiefgreifend und macht Anpassungen in der Bewirtschaftung unumgänglich. In einigen Regionen der Schweiz ist damit zu rechnen, dass Trockenheitslimitierungen deutlich zunehmen werden (Fuhrer, 2012). Möglichkeiten zur landwirtschaftlichen Anpassung bestehen durch Bewässerung und/oder Änderungen in der Wahl unterschiedlicher Kulturen und auch Sorten (Klein *et al.*, 2013; Holzkämper, 2020). Bewässerung trägt zur Minimierung von Produktionsrisiken bei. Dies gilt insbesondere im Anbau von Sommerkulturen wie Kartoffel, Mais und Zuckerrüben, sowie für Spezialkulturen mit hoher Wertschöpfung (z.B. Fuhrer *et al.*, 2016).

Allerdings birgt eine Strategie der Anpassung mit einem singulären Fokus auf den Erhalt oder sogar die Steigerung des landwirtschaftlichen Produktionsniveaus das Risiko von Fehlentwicklungen im Gesamtsystem. Zu möglichen negativen Auswirkungen landwirtschaftlicher Nutzungsänderung zählen zum Beispiel Bodenverlust, Absenkung der Grundwasserspiegel, Nährstoffauswaschung und Abnahme aquatischer Biodiversität (z.B. Klein *et al.*, 2013; Tendall and Gaillard, 2015). Um mögliche negative Folgen von Klimaanpassung auf andere Ökosystemleistungen abschätzen zu können, bedarf es einer integrierten Betrachtung der Systemzusammenhänge, wie sie zum Beispiel in den Arbeiten von Klein *et al.* (2013) und Tendall und Gaillard (2015) vorgenommen wurden.

Mögliche Auswirkungen landwirtschaftlicher Bewirtschaftung auf die hydrologischen Systeme der Schweiz unter aktuellen und zukünftigen Klimabedingungen sind bislang wenig erforscht. Insbesondere wurde den möglichen Auswirkungen der steigender Wasserentnahmen durch die Landwirtschaft auf die Grundwasserleiter wenig Beachtung geschenkt.

In landwirtschaftlichen Regionen in unmittelbarer Nähe zu oberflächennahen Grundwasservorkommen oder Lockergesteinsgrundwasservorkommen ist die Grundwasserentnahme für die Bewässerung gängige Praxis. Es ist jedoch nicht bekannt, inwieweit sich landwirtschaftliche Strategien der Dürreanpassung unter Klimawandel auf die Grundwasserressourcen auswirken. Besonders in heißen und trockenen Jahren können die Grundwasserressourcen so weit erschöpft sein, dass eine ausgedehnte landwirtschaftliche Grundwasserentnahme Probleme verursacht. Neben ökonomischen Folgen wie den steigenden Pumpkosten bei sinkendem Grundwasserspiegel, kann eine umfangreiche Grundwasserentnahme zudem weitere negative soziale und ökologischen Folgen bewirken, z.B. für die Trinkwassergewinnung (sowohl in Bezug auf Qualität als auch Quantität) oder für grundwasserabhängige Ökosysteme. Schließlich kann ein niedriger Grundwasserspiegel die Degradation organischer Böden beschleunigen.

Vor diesem Hintergrund war es Ziel dieses Forschungsprojektes, die Auswirkungen klimatische Änderungen im Zusammenspiel mit Änderungen landwirtschaftlicher Nutzung zu untersuchen. Als Untersuchungsgebiet wurde das Berner Seeland gewählt. Hier spielt Grundwasser eine wichtige Rolle für die Trinkwasserversorgung der Region und ist gleichzeitig eine häufig genutzte Quelle von Bewässerungswasser.

Die spezifischen Forschungsfragen waren folgende:

- Was sind die Auswirkungen von Klimaänderungen auf landwirtschaftliche Produktion, Bewässerungsbedarf, Hydrologie und Grundwasserdynamik?
- Was sind die Auswirkungen von Änderungen in Klima und landwirtschaftlicher Wassernutzung auf die Grundwasserdynamik?

Zur Bearbeitung dieser Forschungsfragen kommt ein integriertes Modellsystem zum Einsatz, welches ein mechanistisches Pflanzenwachstumsmodell und ein hydrologisch-hydraulisches Modell mit einem hydrogeologischen Modell verknüpft. Somit sind Auswirkungen von Klimawandel auf Erträge, Wasserbedarf für Bewässerung, Versickerung, Wasserstände und daraus folgend für die Grundwasserdynamik abschätzbar.

5 Untersuchungsgebiet

Das gewählte Untersuchungsgebiet liegt im nördlichen Bereich der Region Seeland im Schweizer Mittelland (Abbildung 1). In seinem ursprünglichen Zustand war das Seeland häufig überschwemmt und umfasste grossflächige Feuchtgebiete. Um das Gebiet landwirtschaftlich nutzbar zu machen und die Infrastruktur vor Überschwemmungen zu schützen, wurden in den letzten 150 Jahren mehrere grosse hydrologische Projekte durchgeführt, die unter dem Namen "Juragewässerkorrekturen" (erstmalig 1868 bis 1891, dann 1962 bis 1973) zusammengefasst sind. Diese Projekte umfassten die Regulierung des Seespiegels und die großflächige Entwässerung der Feuchtgebiete im Seeland. Die Aare wurde von ihrem natürlichen Lauf abgelenkt und durch den Bau des Hagneck-Kanals in den Bielersee geleitet, mit dem Ziel Hochwasserspitzen zu dämpfen. Das Seeland verfügt über bedeutende Grundwasservorkommen, die sich in körnigen Lockergesteins-Grundwasserleitern befinden. Die Grundwasserleiter bestehen hauptsächlich aus hochdurchlässigen Kiesen und Sanden und werden intensiv zur Trinkwasserversorgung der Gemeinden genutzt. Der Hagneck-Kanal beeinflusst die Dynamik des Aquifers durch die Infiltration von Flusswasser massgeblich.

Die Böden des Seelandes sind reich an organischer Substanz, was dieses Gebiet für die Landwirtschaft sehr geeignet macht. Im südlichen Teil des Untersuchungsgebietes werden zu einem grossen Teil Frischgemüse produziert und im nördlichen Teil grösstenteils Getreide (Mais, Weizen) und Zuckerrüben angebaut. Für den Anbau von Feldfrüchten, die bewässert werden müssen, wird das Wasser zu einem grossen Teil aus dem Grundwasserleiter gepumpt. Grundwasserbrunnen für Wasserentnahmen für Bewässerung sind im Gebiet weit verbreitet (Abbildung 2). Im südlichen Teil des Gebietes spielt zudem auch die Bewässerung aus den Kanälen (JGK-Kanäle, Hagneckkanal und Unterwasserkanal) eine wichtige Rolle. Auch im nördlichen Teil des Gebietes wird teilweise aus Oberflächengewässern der alten Aare und des Sagibachs bewässert (Abb. 2)

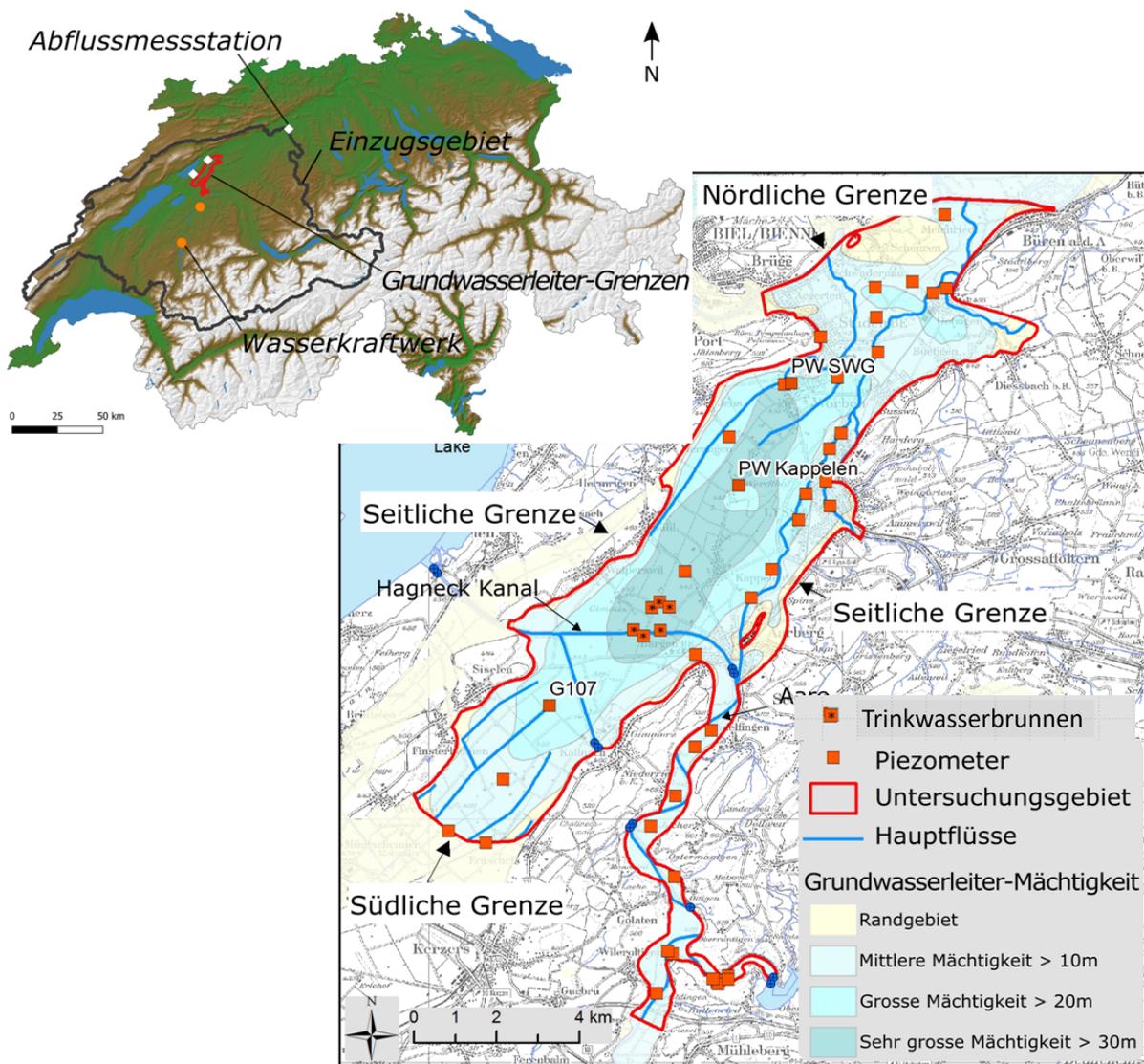


Abbildung 1: Untersuchungsgebiet des Aquifers im Berner Seeland (Datenquellen: AWA Bern, BAFU; Hintergrund: swisstopo).

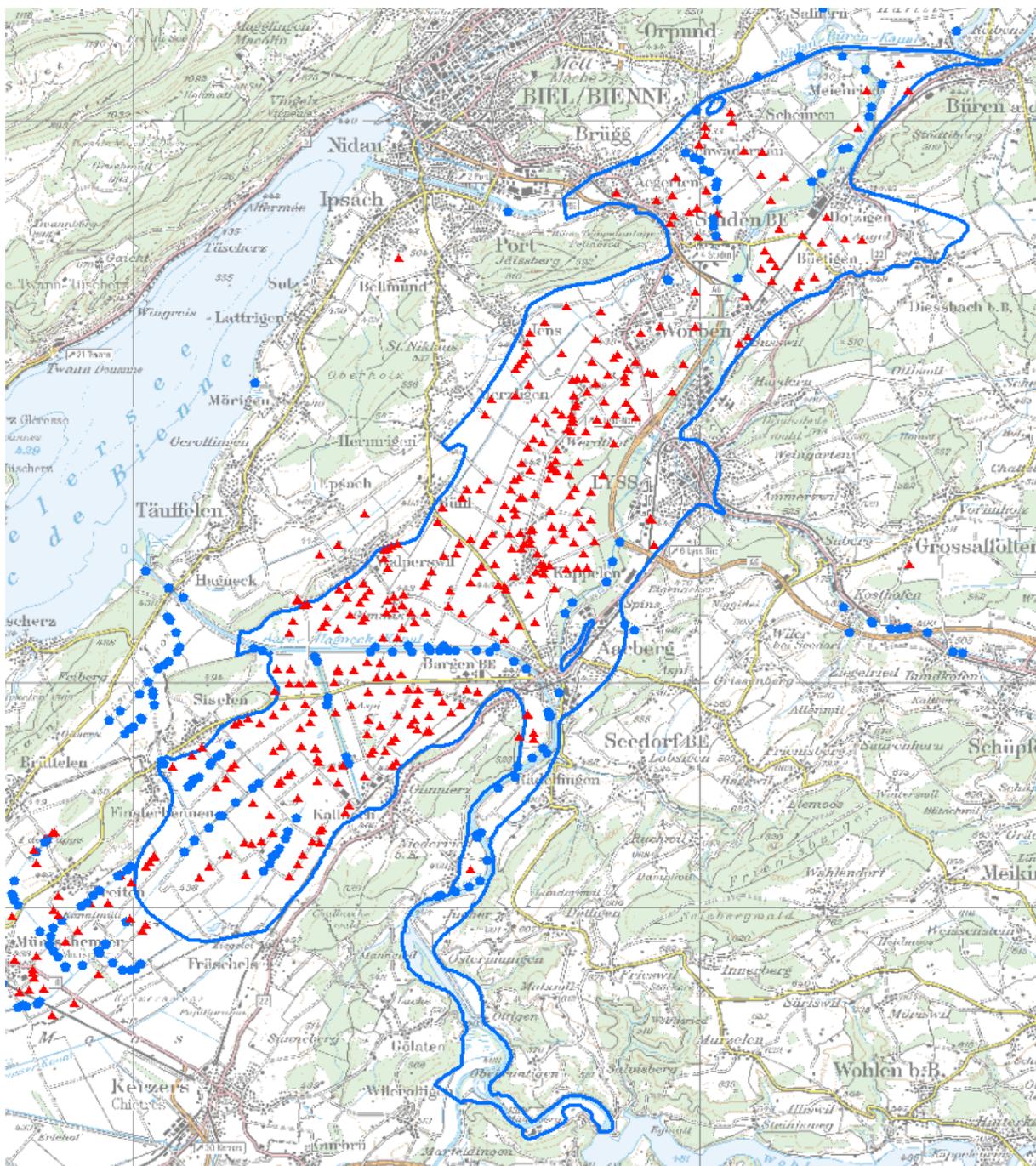


Abbildung 2: Wasserentnahmepunkte aus Oberflächenwasser (blaue Punkte) und Grundwasser (rote Dreiecke) im Untersuchungsgebiet (Datenquelle: AWA Bern; Hintergrund: swisstopo).

6 Der Modellansatz

Für diese Studie wurde ein lose gekoppelter Modellansatz entwickelt, um die Auswirkungen des Klimawandels und der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung auf das Wasserdargebot von Oberflächengewässern und Grundwasser zu untersuchen. Durch die Koppelung werden vier

Modelle integriert: (1) ein prozessbasiertes Pflanzenwachstumsmodell auf Feldskala (CropSyst), (2) ein rasterbasiertes hydrologischen Modell (WaSiM-ETH) in Verbindung mit (3) einem hydraulischen Modell (RS-MINERVE) und (4) ein Grundwassermodell (FEFLOW) (Abbildung 3).

Das hydrologische Modell wird in Verbindung mit dem hydraulischen Modell verwendet, um den anthropogenen Einfluss auf den Abfluss abzubilden. Durch das gekoppelte Modell können die Auswirkungen auf das großräumige hydrologische System (d.h. Flussabflüsse und Wasserstände) für verschiedene Klimaszenarien simuliert und somit die hydrologischen Rahmenbedingungen der Region projiziert werden. Das Pflanzenwachstumsmodell wird angewandt, um die Auswirkungen von Klimaänderungen für unterschiedliche Bewirtschaftungsvarianten auf die Pflanzenproduktion, den Bewässerungsbedarf und den oberflächennahen Bodenwasserhaushalt abzuschätzen. Beide Modellsysteme definieren über die Grundwasserneubildung die wesentlichen Rahmenbedingungen des Grundwassermodells: Die Ergebnisse des Pflanzenwachstumsmodells werden zur Abschätzung der Grundwasserneubildung durch Niederschlag und Wasseraufnahme der Pflanzen sowie des Bewässerungswasserbedarfs verwendet; der hydrologische Abfluss und die Dynamik des Seespiegels werden mit einem hydrologisch/hydraulischen Modell simuliert.

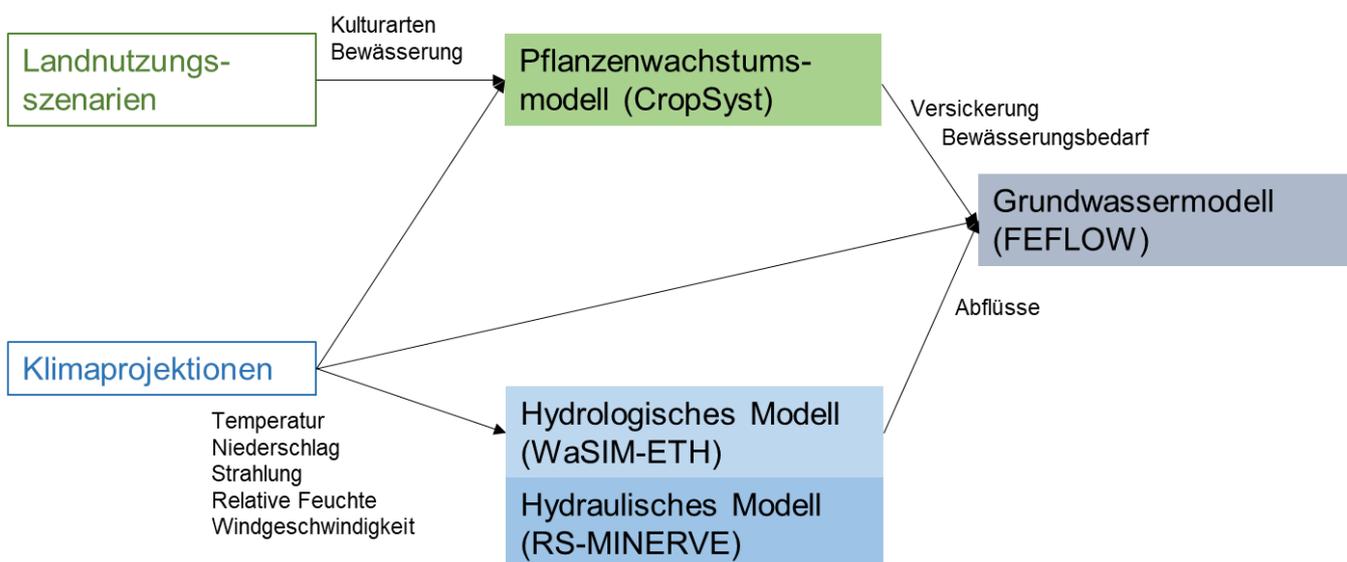


Abbildung 3: Überblick über den methodischen Ansatz: Auf der Grundlage von Klimaszenarien und alternativen zukünftigen Landmanagement-Szenarien werden der aktuelle und zukünftige Bewässerungswasserbedarf und die Grundwasserneubildung mit dem landwirtschaftlichen Nutzpflanzenmodell berechnet. Das hydrologische/hydraulische Modell simuliert den hydrologischen Abfluss und die Dynamik des Seespiegels. Die berechnete Versickerung, Oberflächenwasserstände und Entnahmeraten bestimmen die Randbedingungen für das räumlich verteilte FEFLOW-Modell.

Um die Ergebnisse des Pflanzenwachstumsmodells auf Feldskala mit den für das regionale Grundwassermodell erforderlichen Eingangsdaten zu verknüpfen, müssen die in der Region vorkommenden Bodentypen definiert werden. Dazu wurde das Untersuchungsgebiet basierend auf der Bodeneignungskarte für die landwirtschaftliche Produktion (BFS, 2012) in drei verschiedenen Bodenzonen aufgeteilt (Abbildung 4). Die detaillierte Parameterabschätzung für jede dieser drei Zonen erfolgte mittels Bodenprofilen, die für verschiedene Standorte innerhalb des Gebietes verfügbar sind (NABODAT, 2018). Dabei wurden für Humus-, Ton- und Sandgehalte in für verschiedene Bodenschichten Medianwerte abgeleitet. Eine Zusammenfassung der Bodentexturprofile ist in Tabelle 1 gezeigt.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Bodentexturprofile für die drei in Abbildung 4 dargestellten Bodenzonen.

BODENZONE 1

Mächtigkeit der Bodenschicht

[cm]	Sand [%]	Ton [%]	Schluff [%]	Humusanteil [%]
1	50	15	35	18
3	50	15	35	18
5	50	15	35	18
7	50	15	35	18
10	42.5	25	32.5	16
14	12.5	25	62.5	15
20	12.5	25	62.5	8
20	32.5	15	52.5	4
20	42.5	15	42.5	1
20	50	12.5	37.5	1
20	90	2.5	7.5	1
20				

BODENZONE 2

Mächtigkeit der Bodenschicht

[cm]	Sand [%]	Ton [%]	Schluff [%]	Humusanteil [%]
1	46	25	29	4.5
3	46	25	29	4.5
5	46	25	29	4.5
7	46	25	29	4.5
10	44	26	30	3
14	42	26	32	0.5
20	42	28	30	0.5
20	42	28	30	0.5
20	39	28	33	0.5
20	74	6	20	5.5
20	74	6	20	
20	74	6	20	

BODENZONE 3

Mächtigkeit der Bodenschicht

[cm]	Sand [%]	Ton [%]	Schluff [%]	Humusanteil [%]
1	60	15	25	4
3	60	15	25	4
5	60	15	25	4
7	60	15	25	4
10	62	15	23	3
14	62	15	23	1
20	62	14	24	0.5
20	62	12.5	25.5	0.5
20	60	14	26	0.5
20	59	15	26	0.5
20	50	15	35	
20	50	25	25	

Innerhalb jeder der drei Bodenzonen sind Informationen zu den Kulturpflanzenanteilen aus (BLW, 2015) verfügbar und in Abbildung 4 dargestellt. Der südliche Teil (Boden 1) weist aufgrund seiner günstigen Bodeneigenschaften einen größeren Anteil an Gemüseanbau auf. Im nördlichen Teil des Gebietes (Boden 2 und Boden 3) sind die Flächenanteile für Weizenanbau und Weiden relativ grösser.

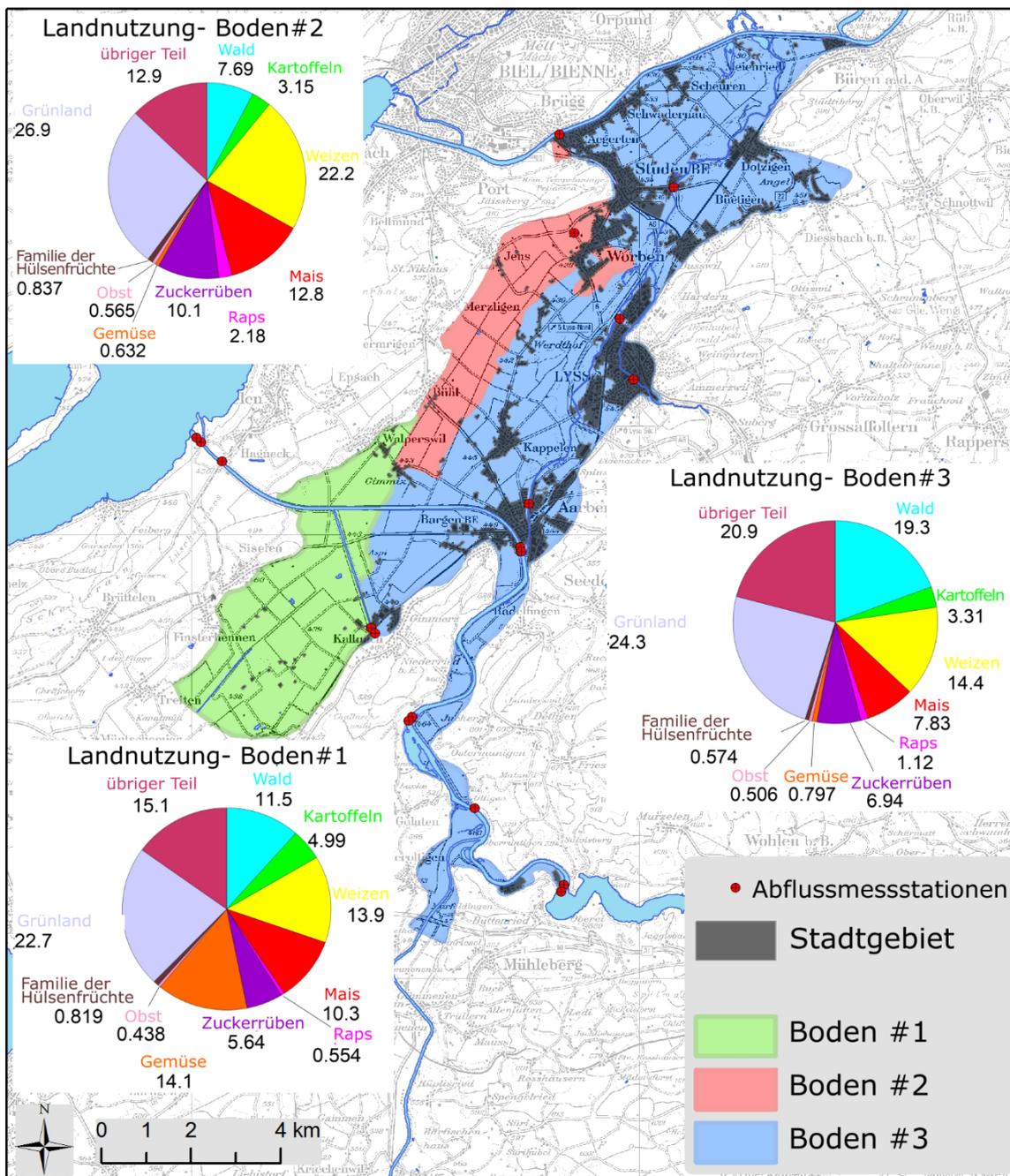


Abbildung 4: Bodenzonen und Landnutzungsanteile innerhalb des Untersuchungsgebietes (Datenquellen: BLW 2015; Hintergrund: swisstopo)

7 Klimaszenarien

Die Klimaprojektionsdaten basieren auf CH2018 (NCCS, 2018), wobei die EURO-CORDEX-Projektionsdaten mit Hilfe des Quantil-Mapping-Ansatzes statistisch herunterskaliert worden waren, um die tägliche Granularität und den transienten Charakter der nativen RCM-Simulationen während des gesamten gemeinsamen Simulationszeitraums 1981 - 2100 zu erhalten. Aus dem Gesamt-Ensemble CH2018 wurde eine Untergruppe von sechs GCM-RCM-Modellketten ausgewählt (Tabelle 2). Ausschlaggebend für diese Auswahl war die Verfügbarkeit aller erforderlichen meteorologischen Parameter (Temperatur, Niederschlag, relative Feuchte, Windgeschwindigkeit und Strahlung) und die Abdeckung aller drei Emissionsszenarien RCP8.5, RCP4.5 und RCP 2.6. CropSyst und Wasim-ETH wurden mit allen gewählten Modellketten betrieben. Aufgrund des höheren Rechenaufwands konnte jedoch nur zwei der Modellketten für FEFLOW-Simulationen ausgewählt werden. Die Auswahl wurde auf der Grundlage der extremsten Änderungen im Bewässerungswasserbedarf und der Abflussmengen getroffen, wie sie mit CropSyst und Wasim geschätzt wurden, wobei auch die Extreme der Emissionsszenarien abgedeckt werden. Die für das hydrogeologische Modell ausgewählten Modellketten sind in Tabelle 2 unten fett markiert. In Abbildung 5 sind die saisonalen Änderungssignale aller verwendeten Modellketten dargestellt.

Da sich keine automatisierte Wetterstation der MeteoSchweiz in der Untersuchungsregion befindet, wurden die Klima-Input-Daten für das Pflanzenwachstumsmodell von der Station Payerne abgeleitet, die sich in unmittelbarer Nähe der Untersuchungsregion befindet und eine sehr ähnliche Klimatologie aufweist. Das hydrologische Modell WASIM-ETH benötigte meteorologische Informationen auf regionaler Ebene. Hier verwendeten wir die Beobachtungen und die Klimamodelldaten aller meteorologischen Stationen im und um das hydrologische Einzugsgebiet der Aare. Dabei wurde ein Höhengradienten von ca. 500 m bis 3000 m ü.M. abgedeckt. Da für das hydrologische Modell zudem räumlich explizite Informationen (500 x 500m) benötigt wurden, kam für Niederschläge eine Interpolation mittels höhenbasierter Regression und inverser Distanzgewichtung zur Anwendung; für die Temperatur wurde eine regressionsbasierte Interpolation auf Basis der topographischen Höhe gewählt. Aufgrund der begrenzten räumlichen Datenqualität von Windgeschwindigkeit und Strahlung, insbesondere in den Gebirgsketten, wurden die Modellalgorithmen so gewählt, dass sie nicht benötigt wurden.

Tabelle 2: Ausgewählte CH2018-Modellketten (fettgedruckte X kennzeichnen Modellketten, die für die Simulationen des Grundwassermodells ausgewählt wurden; der Farbcode bezieht sich auf die Symbolfarben in Abb. 5).

Farb-Code	Globale Klimamodelle	Regionale Klimamodelle	Auflösung	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
	MOHC-HadGEM2-ES	CLMcom-CCLM4	EUR44			x
	ICHEC-EC-EARTH	DMI-HIRAM5	EUR11	X	x	x
	MOHC-HadGEM2-ES	KNMI-RACMO22E	EUR44	x	x	x
	CSIRO-QCCCE-CSIRO-Mk3-6-0	SMHI-RCA4	EUR44		x	X
	MIROC-MIROC5	SMHI-RCA4	EUR44	x	x	x
	MPI-M-MPI-ESM-LR	SMHI-RCA4	EUR44	x	x	x

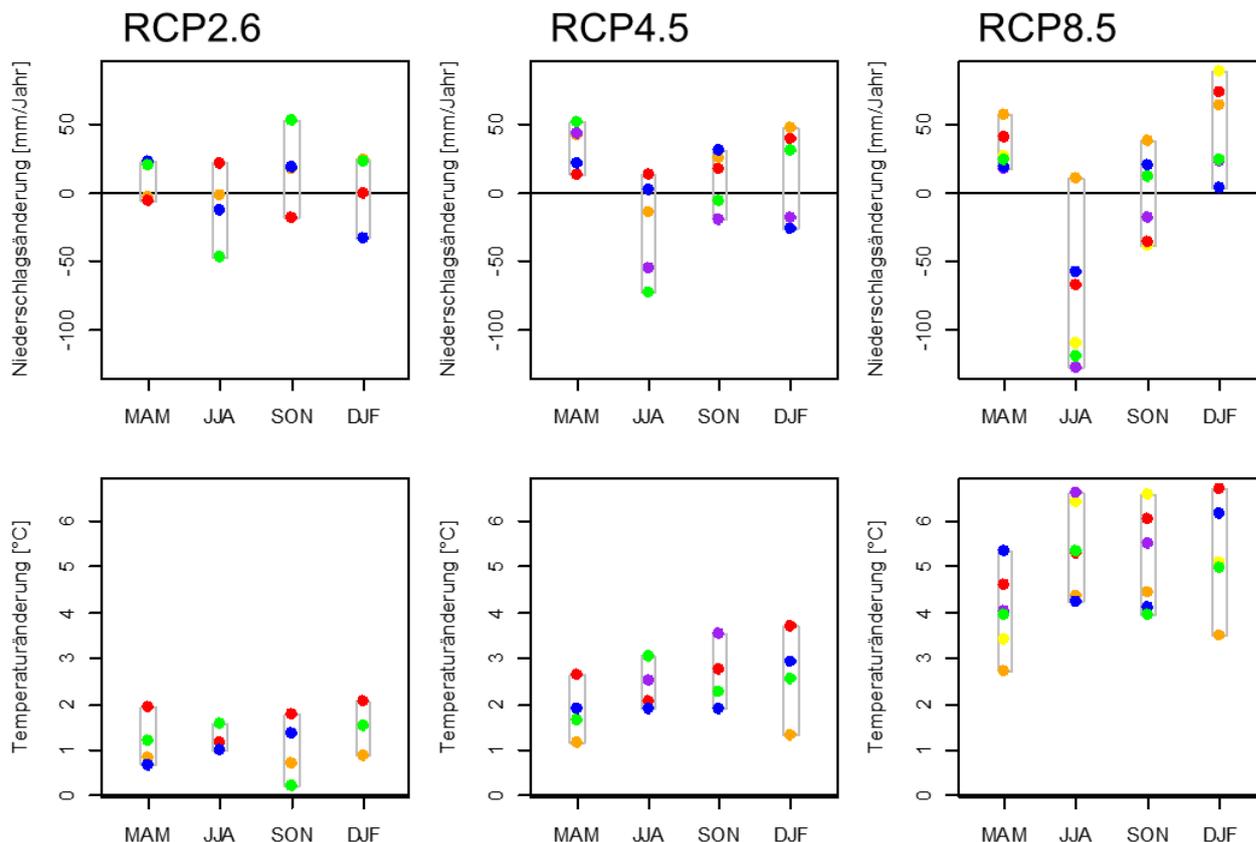


Abbildung 5: Projizierte Änderungen der saisonalen Niederschlagssummen und Temperaturen gemäß den sechs in Tabelle 2 aufgeführten Modellketten für die drei RCPs (Symbolfarben sind in Tabelle 2 beschrieben).

8 Landnutzungsszenarien

Zwei Landnutzungsszenarien wurden gemeinsam mit regionalen Landwirtschaftsvertretern entworfen. Die Interessenvertreter wurden gebeten, sich vorzustellen, wie sich die Ernteanteile und Bewässerungsintensitäten ändern würden, wenn die landwirtschaftliche Bodenbewirtschaftung extensiviert bzw. intensiviert würde. Nach den Vorschlägen dieser Interessenvertreter wurden zwei Landnutzungsszenarien definiert - weitgehend auf der Grundlage der Annahme einer 20%igen Zunahme bzw. Abnahme der bewässerten Kulturen. Zusätzlich zu diesen von den Interessengruppen definierten Szenarien wurden auch extremere Intensivierungs- und Extensivierungsszenarien bewertet, um die Empfindlichkeit des Grundwassersystems gegenüber Veränderungen in der Bewirtschaftung zu testen. In einem starken Intensivierungsszenario wurde für Bodenzone 1 ein 100% bewässerter Gemüseanbau angenommen. In einem extremen Extensivierungsszenario wurde für die Bodenzone 1 eine 100%ige Bewässerung des Grünlands angenommen. Die Bewirtschaftung in Bodenzonen 2 und 3 wurden dabei nicht verändert.

Die angenommenen Kulturpflanzenanteile für die Aquifer-Region für alle vier Landbewirtschaftungsszenarien sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Die darauf basierenden Neubildungsabschätzungen wurden in FEFLOW als Randbedingung implementiert.

Tabelle 3: Zusammenfassung der Annahmen zu den Landnutzungsszenarien.

Landnutzungsszenarien	Beschreibung
#1 mässig intensiviert	Kartoffeln, Mais, Zuckerrüben, Gemüse (bewässerte Kulturen): +20% Weizen, Raps, Hülsenfrüchte, Grünland (nicht bewässert): -13,5%
#2 mässig extensiviert	Kartoffeln, Mais, Zuckerrüben, Gemüse (bewässerte Kulturen): -20% Weizen, Raps, Hülsenfrüchte, Grünland (nicht bewässert): +13.5%
#3 extrem intensiviert	100% bewässertes Gemüse in Bodenzone 1
#4 extrem extensiviert	100% nicht bewässertes Grasland in Bodenzone 1

9 Modellbeschreibung, -kalibrierung und -validierung

9.1 Pflanzenwachstumsmodell

Das generische Kulturpflanzenmodell CropSyst (Version 4.13.09; Stöckle *et al.*, 2003) wurde in dieser Studie angewandt. CropSyst ist ein mehrjähriges, mehrkultiviertes, tägliches Zeitschrittmodell zur Simulation von Anbausystemen. Es kann als Werkzeug zur Untersuchung der Auswirkungen von Klima, Böden und Bewirtschaftung auf die Produktivität von Anbausystemen und die Umwelt verwendet werden. Die für CropSyst erforderlichen Eingabedaten sind tägliche Wetterdaten, Bodeneigenschaften sowie Angaben zu Kulturart und Bewirtschaftung. CropSyst simuliert einen täglichen Biomassezuwachs auf Grundlage verschiedener Boden-, Klima- und Bewirtschaftungsfaktoren. Das tägliche Wachstum der Biomasse wird als das Minimum zwischen strahlungsabhängigem Wachstum (Monteith, 1977) und transpirationsabhängigem Wachstum (Tanner and Sinclair, 1983) berechnet. Das transpirationsabhängige Wachstum kann durch die Verfügbarkeit von Bodenwasser begrenzt werden. Um die Wasseraufnahme der Pflanzen abzuschätzen, wird das Bodenprofil in mehrere Schichten unterteilt (siehe Tabelle 1). Die Aufnahme aus jeder Teilschicht wird auf der Grundlage der Wasserpotenzialdifferenz zwischen dem Boden und dem Pflanzen-Xylem geschätzt. Die Bodenwasserdynamik wurde in dieser Studie auf Basis des in CropSyst implementierten Tageskaskadenansatzes simuliert (Stöckle and Nelson, 2000).

Für die Sommerkulturen Mais, Kartoffel und Zuckerrübe wurde die Möglichkeit zur Bewässerung angenommen. Um den potentiellen Wasserbedarf für die Bewässerung abzuschätzen, wurde im Modell automatisch bewässert, sobald der Bodenfeuchtegehalt unter 50% der Feldkapazität sank. Der Zeitraum der potenziellen Bewässerung wurde in Bezug zur phänologische Entwicklung definiert: vom Beginn des aktiven Wachstums bis zum Beginn der Ertragsbildung. Wenn die Bewässerung ausgelöst wurde, wurden bis zur Bodenwassersättigung zwischen 15 und 25 mm bewässert.

Folgende Aussaattermine wurden für die verschiedenen Kulturen angenommen: 9. Mai für Körnermais, 11. April für Zuckerrübe und Kartoffel, 10. Oktober für Winterweizen, 25. September für Wintergerste, 15. August für Winterraps.

Für alle drei Bodentypen und 15 Klimamodellketten wurden Simulationen für die Hauptkulturen durchgeführt, die in der Region angebaut werden: Körnermais, Kartoffeln, Zuckerrüben, Winterweizen, Wintergerste, Winterraps, Grünland und Salat als eine repräsentative Gemüsekultur. Für alle Kulturen mit Ausnahme von Salat wurden Parametrisierungen aus früheren Anwendungen verwendet (Klein *et al.*, 2012; Holzkämper *et al.*, 2015). Da keine Ertragsdaten zur Kalibrierung des Modells für Gemüse zur Verfügung standen, basierte die Parametrisierung von Salat auf Studien von Suarez-Rey *et al.* (2016) und Tei *et al.* (1996a, 1996b). Dabei wurde eine feste Wachstumsperiode zwischen dem 1. April und dem 31. Oktober angenommen (entspricht der aktuellen Anbauperiode für Gemüse in der Untersuchungsregion).

Um den Möglichkeiten von Sortenanpassungen abzubilden, wurden die Anforderungen an den Wachstumsgradtag (growing degree days = GDD) bis zum Erreichen der Blüte entsprechend den Erkenntnissen von Parent *et al.* (2018) über die Variationen der Zyklusdauer in Europa angepasst. Parent *et al.* (2018) stellten fest, dass die Wachstumsgradtage bis zur Blüte aufgrund der genetischen Variation zwischen 121 Maissorten zwischen 700 und 1200 variierte. Für diese Studie wurden daher die GDD's bis zum Erreichen des Blühbeginns (900 in der Parametrisierung von Holzkämper *et al.* (2015)) um ± 200 GDD variiert, um früh bzw. spät reifende Sorten zu repräsentieren. Die GDD-Anforderungen zum Erreichen des Blühbeginns betragen somit 700 für die frühe Sorte, 900 für die mittelspäte Sorte und 1100 für die späte Sorte. Um die Reife zu erreichen, waren 1650 GDDs für die frühe Sorte, 1850 für die mittelspäte Sorte und 2050 für die späte Sorte erforderlich. Damit wird angenommen, dass in dieser Studie ein realistischer Bereich von Sortenunterschieden in der Länge der vegetativen Phasen innerhalb Europas repräsentiert ist.

9.2 Hydrologisches Modell

Für die Beurteilung der heutigen und zukünftigen Oberflächenwasserverfügbarkeit des Seelandes ist es notwendig, das gesamte hydrologische System des Aareinzugsgebietes von den Oberlauf Einzugsgebieten bis zum Unterlauf bei Murgenthal zu simulieren (Abbildung 6). Die externe Wasserzufuhr ist im kombinierten Modellierungsansatz erforderlich, da sie die Randbedingung des Grundwassermodells definiert. Abbildung 6 lokalisiert die Stellen, an denen die Zuflussrandbedingungen für das Grundwassermodell bestimmt wurden. Als Randbedingungen dienen beobachtete und simulierte Abflüsse der Aare an verschiedenen Standorten, die in Wasserstände übersetzt wurden. Für die beiden bedeutendsten Zuflüsse, Aare bei Hagneck und Aare bei Brügg/Aegerten, werden Kalibrier- und Validierungsergebnisse dargestellt.

Die Repräsentation der Abflüsse entlang der Aare im Abschnitt des Untersuchungsgebietes ist anspruchsvoll, da die Aare im Rahmen der «Juragewässerkorrekturen» über den Hagneck-Kanal in den Bielersee umgeleitet wurde, bevor sie den See bei Brügg/Aegerten wieder verlässt. Die «Juragewässerkorrekturen» bestanden aus dieser Umleitung und der Regulierung nicht nur des Bielersees allein, sondern auch des angrenzenden Neuenburger- und Murtensees. Zusammen bieten sie ein enormes Rückhaltevermögen, welches bei Hochwasserereignissen für eine mehrtägige Dämpfung der Hochwasserwelle im Unterlauf führen kann. Das untersuchte hydrologische Einzugsgebiet umfasst neben den «Juragewässerkorrekturen» mehrere regulierte Abflüsse aus Seen (z.B. Thuner- und Bielersee) und wird durch die Wasserkraftproduktion in zwei Oberwassereinzugsgebieten (z.B. Aare-Brienzwiler, Saane (gelbe Dreiecke in Abb. 6)) beeinflusst.

Um diese Herausforderungen anzugehen, wurde eine Kombination aus einem hydrologischen und einem hydraulischen Modell angewendet: Mit dem hydrologischen Modell WaSiM-ETH (Schulla, 2017) werden die natürlichen Abflussverhältnisse und die weniger komplexen Seespiegel-Abflussveränderungen der regulierten Seen im Oberlauf (z.B. Thunersee) simuliert. Diese Version des hydrologischen Modells beinhaltet Schnee- und Gletscherschmelzroutinen, die ein Abschmelzen der Gletschergebiete simulieren können und somit in der Lage sind, die erwartete Abnahme der Gletschergebiete unter Klimawandel zu berücksichtigen (Huss *et al.*, 2008).

Zur Repräsentation der komplexen Seespiegel-Abflussregulationen der drei verbundenen Seen der «Juragewässerkorrektur» (Bielersee, Murtensee, Neuenburgersee) haben wir das hydraulische Modell RS-MINERVE (Garcia Hernandez *et al.*, 2017) verwendet, welches im Zuge des [EXAR-Projektes](#) von M. Kauzlaric leitend erarbeitet wurde. Die Kombination der beiden Modelle erfolgt auf folgende Weise: Simulierte Abflüsse für Flüsse, die in die Juragewässerkorrektur einfließen, wie die Aare bei Hagneck, die Broye, Seyon, Areuse, Arnon, Mentue, Talent, Chandon, Petit Glane, Arbogne, Orb und Suze werden mit dem hydrologischen Modell simuliert, während das System RS-MINERVE die Seespiegel der drei Seen und den Abfluss der Aare bei Brügg/Aegerten simuliert.

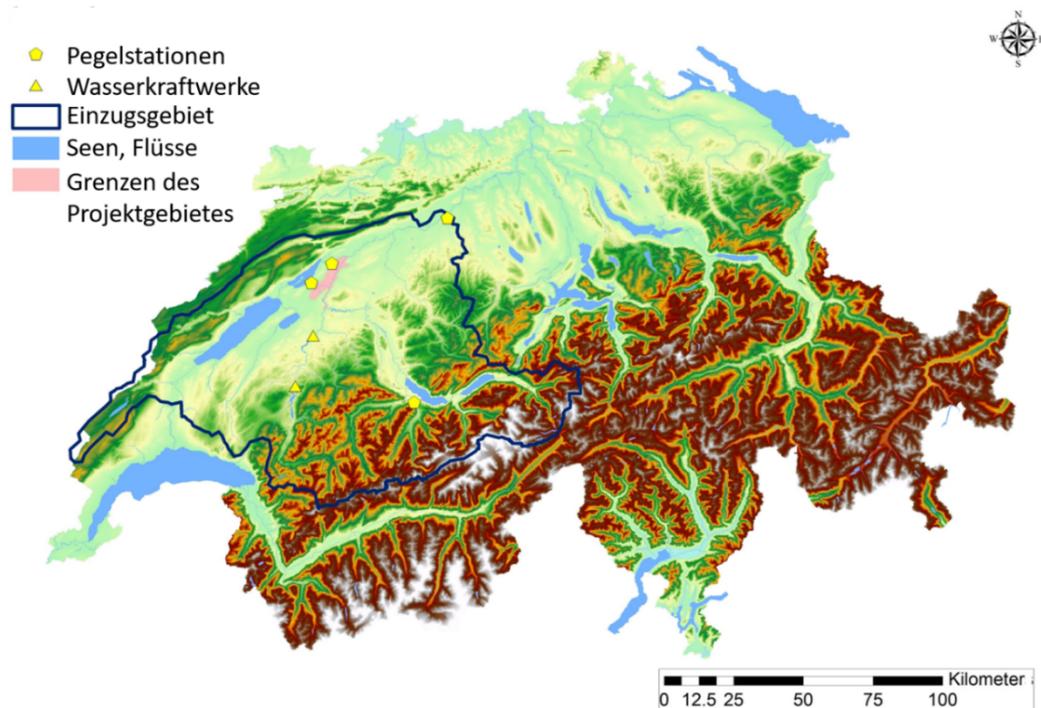


Abbildung 6: Lage des Aquifers Berner Seeland im hydrologischen Einzugsgebiets der Aare mit den Abflussmessstationen und Standorten der Wasserkraftwerke.

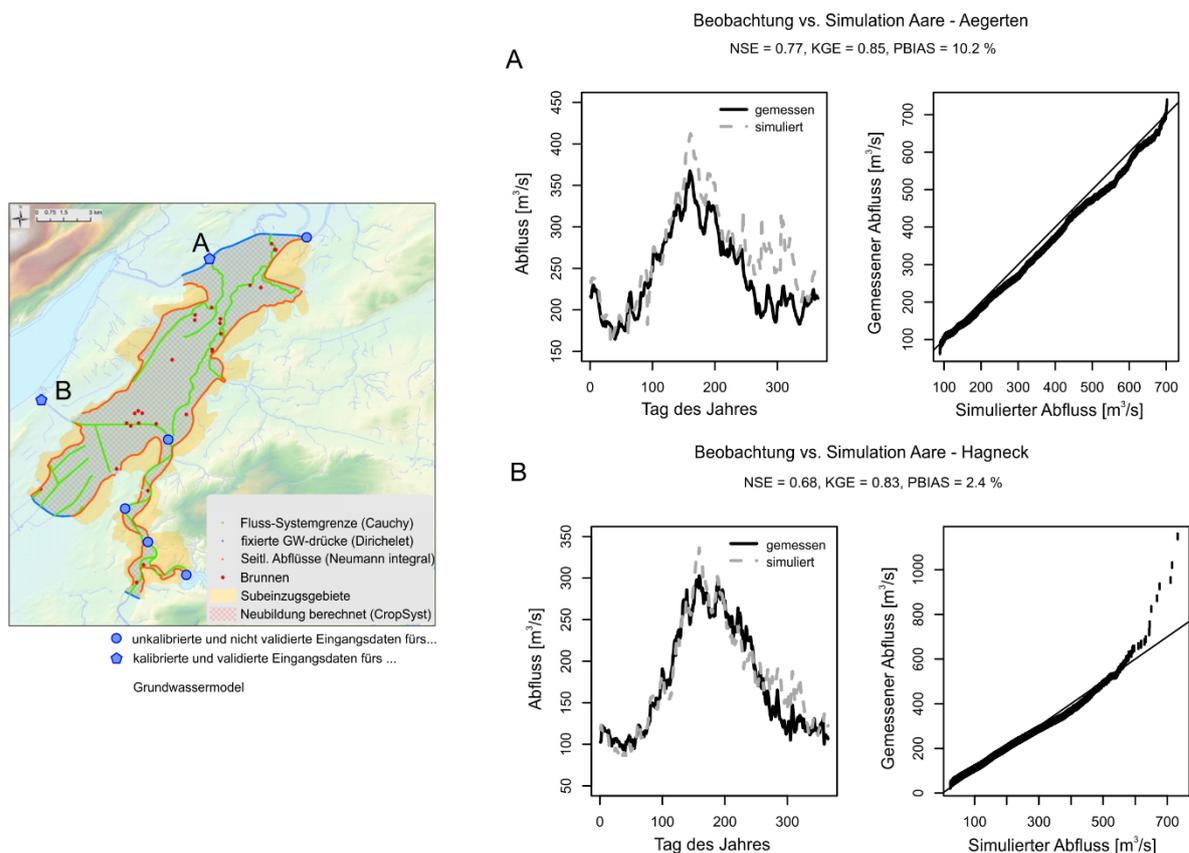


Abbildung 7: Performance des hydrologischen Modells dargestellt anhand der langfristigen Mittelwerte (1987 - 2014). Die Modelleffizienz (ME) wurde mit dem Nash-Sutcliffe-Kriterium (NSE), der Kling-Gupta- Efficiency (KGE) und der prozentualen Abweichung (PBIAS) berechnet.

Das hydrologische Modell wurde für den Zeitraum 2006-2016 kalibriert und für den Zeitraum 1987-2014 validiert. Abbildung 7 zeigt die Güte des hydrologisch-hydraulischen Modells durch den Vergleich der beobachteten mit den simulierten Abflüssen an den beiden für diese Studie relevantesten Flussabschnitten: Aare bis Hagneck im Zulauf und Pegel Brügg/Aergerten am Ausfluss des Bieler Sees. Für beide Abflusszeitreihen wird neben einer Quantil-Quantil-Grafik der langjährige Mittelwert der Abflussganglinie dargestellt. Die Abbildungen zeigen, dass das Modellsystem für beide Pegel meist gut funktioniert. Allerdings sind einige Einschränkungen für den Spätsommer und den Herbst zu erkennen: Die simulierten Abflüsse liegen hier deutlich über den beobachteten Werte. Die Gründe für diese Überschätzung sind die Spätsommerhochwasser von 2005, 2007, die in der Kalibrierungsphase nicht berücksichtigt wurden, was zu einer Überschätzung der Niederschläge in den Jahren 2005 und 2007 aufgrund der Niederschlagskorrektur in beiden Jahren führte. Da das Grundwassermodell FEFLOW jedoch nur Monatsmittelwerte verwendet, hat diese Überschätzung nur einen geringen Einfluss auf das Gesamtergebnis.

9.3 Grundwassermodell

Die Grundwasserdynamik wurde in diesem Projekt auf Basis des Modells FEFLOW 7 (Diersch, 2014) simuliert. Dieses Modell verwendet einen Finite-Elemente-Ansatz. Der numerische Simulator wurde so konfiguriert, dass er die Gleichung einer horizontalen, gesättigten, unbegrenzten 2D-Grundwasserströmung löst. Fluxe wie Wasserentnahmen oder Neubildung variieren täglich für die Eiche. Die Szenarien wurden mit monatlichen Mittelwerten berechnet. Die numerische Lösung der Gleichungen wird durch sogenanntes adaptives Time-stepping gemacht. Mit dieser Methode wird die zeitliche Auflösung kontinuierlich angepasst um eine hohe numerische Effizienz unter Einhaltung der Konvergenzkriterien sicherzustellen. Die Oberseite des Modells wird durch die Bodenoberfläche abgegrenzt, und die Unterseite wird durch das Grundgestein unterhalb des Lockergesteins- Grundwasserleiters definiert. Die Grundwasserneubildung und der Bewässerungsbedarf werden aus dem Pflanzenwachstumsmodell CropSyst übernommen und über die Anbauflächenanteile in den drei Bodenzonen auf die Fläche des Aquifers übertragen. Bezüglich der Wasserentnahmen für Bewässerung wurden ausschliesslich Entnahmen aus dem Grundwasser angenommen. Trinkwasserentnahmen wurden als konstant angenommen (auf Basis des langjährigen Mittelwertes über die Periode 2010-2017; Datenquelle: AWA Bern) und aus fünf verschiedenen Brunnen entnommen (siehe rote Quadrate mit schwarzen Sternen in Abbildung 1). Die seitlichen Zuflüsse aus dem verfestigten Sedimentgestein der Molasse wurden berechnet, indem monatliche mittlere Wasserbilanzen (Niederschlag-Verdunstung) für die Einzugsgebiete entlang der Modellgrenzen berechnet wurden. Falls diese Einzugsgebiete durch einen Fluss drainiert werden, wurde die Abflussrate des Flusses als Randbedingung (Influx-Randbedingungen) implementiert. Dadurch wird sichergestellt, dass der Eintrag aus den Flüssen ausserhalb des Modelgebiets berücksichtigt wird. Die nördliche und die südliche Grenze wurden anhand der Wasserstände der Flüsse und beobachteter Grundwasserdaten definiert. Um die Fluss-Grundwasser-Interaktionen realistisch zu reproduzieren, wurde die Transmissivität des Flussbetts so angepasst, so dass die Dynamik der Grundwasserstände mit den beobachteter Flusswasserständen an verschiedenen Pegeln, die in Abbildung 2 dargestellt sind, übereinstimmt (Cauchy-Randbedingungen). Schlussendlich wurden die Wasserentnahmen der Pumpen durch Brunnenrandbedingungen implementiert. Eine Brunnenrandbedingung repräsentiert die Entnahme von Grundwasser aus einem Pumpbrunnen. Es wird dadurch explizit berücksichtigt dass sich der Wasserstand im Entnahmeschacht ändern kann und dadurch die Fliessgeschwindigkeit zum Brunnen entsprechend ändert. Dadurch kann die Wasserentnahme an kommunalen Pumpbrunnen reproduziert werden.

Das Modell wurde für den Zeitraum 2010 - 2018 kalibriert. Dabei wurden die Transmissivität des Flussbetts, die hydraulische Leitfähigkeit und die Porosität des Grundwasserleiters angepasst, um beobachtete Grundwasserstände an 40 Beobachtungspiezometern, die in Abbildung 2 dargestellt sind, zu reproduzieren. Zusätzlich wurden auch gemessene

Grundwasserflüsse durch Aquiferquerschnitte und die Infiltrationsraten entlang der Flüsse verwendet, um die Kalibrierung des Modells zu validieren.

Abbildung 8 zeigt die simulierten und beobachteten Grundwasserstände an drei Beobachtungspiezometern, die sich in jedem Bodenbereich befinden. Wie man sieht, ist das Modell in der Lage, die Grundwasserdynamik im Tagesmittel und auch die jahreszeitliche Dynamik gut abzubilden. Die mittlere quadratische Abweichung (RMSE = root-mean-square error) der Simulationen aller 40 Beobachtungspiezometer beträgt 15 cm.

Das kalibrierte Modell wurde auf Basis der Projektionsdaten aus CropSyst und WaSIM der zwei ausgewählten Modellketten angewandt (DMI-HIRAM5 RCP2.6 und SMHI-RCA4 RCP8.5; siehe Tabelle 2). Die simulierten Abflussraten aus dem hydrologischen Modell wurden dazu unter Verwendung der beobachteten Bathymetrie in Wasserstände umgerechnet und als neue Flussrandbedingungen implementiert. Die Grundwasserneubildung wurde aus CropSyst-Ergebnissen zur Versickerung abgeleitet. Ebenso wurden die Entnahmemengen für Bewässerungswasser aus CropSyst-Simulationen abgeleitet. Schliesslich wurden auch die lateralen Flüsse aus der Molasse mit derselben Methodik, aber mit Klimamodellketten-Outputs anstelle von beobachteten meteorologischen Daten modifiziert. Damit kann sichergestellt werden dass der Einfluss des Klimawandels auf die lateralen Zuflüsse berücksichtigt wird.

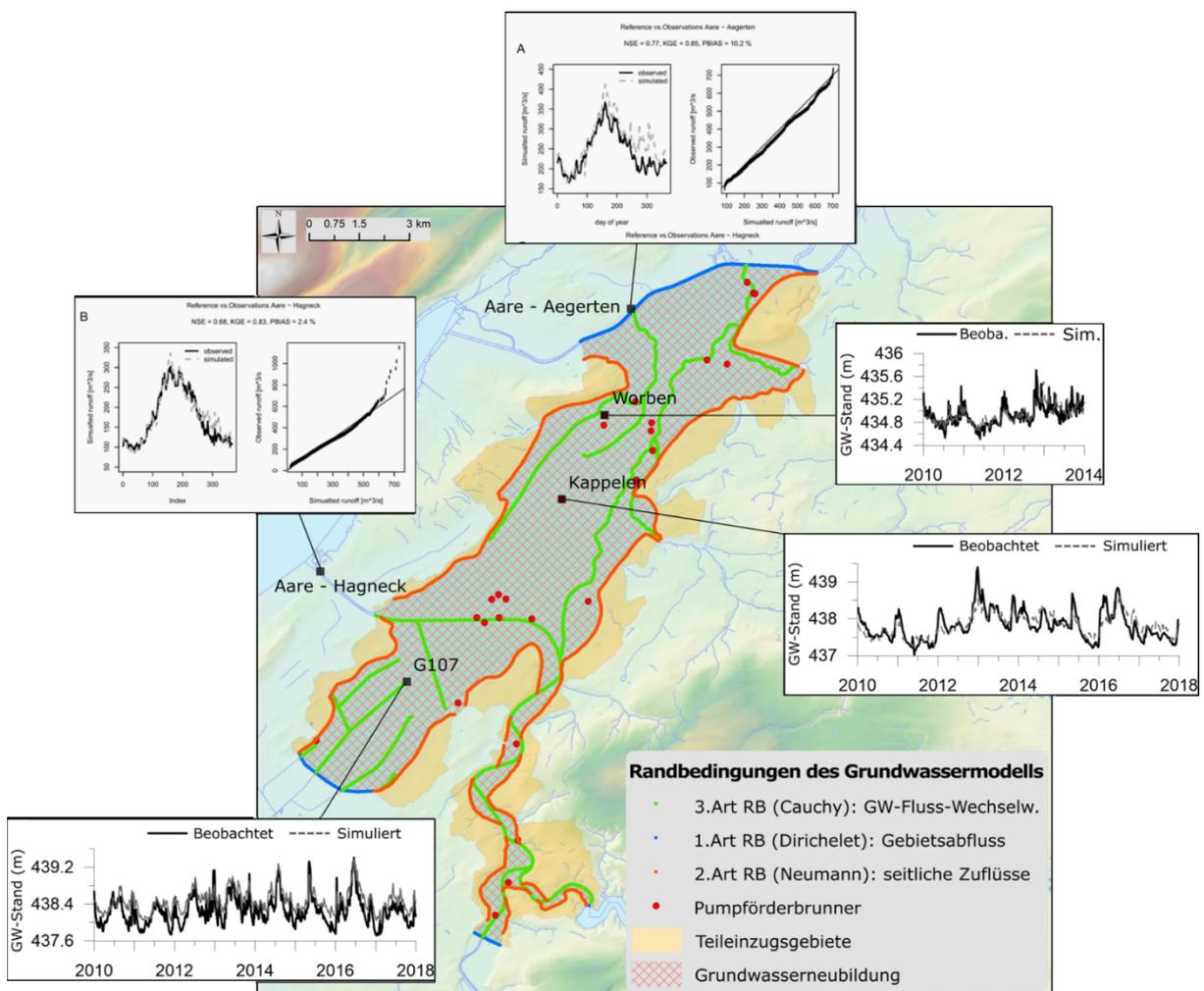


Abbildung 8: Konzeptionelles Grundwasserströmungsmodell und implementierte Randbedingungen (Karte), sowie Modellperformance des Grundwasserströmungsmodells: beobachtete (durchgezogen) vs. simulierte (gestrichelt) mittlere tägliche Grundwasserstände für die Kalibrierungsperiode (Datenquellen: AWA Bern; Modell: Cochand et al. 2020).

9.4 Mögliche Auswirkungen auf die Wasserqualität

Die explizitere Quantifizierung der Veränderungen bezüglich Wasserqualität unter dem Einfluss des Klimawandels als auch der Landnutzung ist anspruchsvoll und bedarf eines hochauflösenden numerischen Modells, um die Transportprozesse adäquat abzubilden. Das Modell und die Methodik, die in diesem Projekt verwendet wurden, erlauben keine explizite Simulation der Wasserqualität. Die Implementierung des Transports im aktuellen Modell könnte in Betracht gezogen werden, würde aber die Komplexität der Modellierung stark erhöhen.

Eine einfache qualitative Bewertung von Wasserqualitätsänderungen kann jedoch unter Verwendung der aktuellen Modellergebnisse mithilfe von Particle-tracking durchgeführt werden. Dabei werden virtuelle Partikel an einem Punkt (z. B. der Entnahmehöhle) eingegeben. Das Fließfeld des Grundwasser gibt Aufschluss darüber entlang welchen Fließpfaden die Partikel transportiert wurden um in die Brunnen zu gelangen. Damit kann ihre Herkunft rekonstruiert werden. Eine Analyse der Wasserherkunft im Einzugsgebiet eines Brunnens mithilfe von Particle Tracking erlaubt, mögliche Veränderungen bezüglich Herkunft und Fließpfade des Wassers unter aktuellen und zukünftigen Klima zu identifizieren. Die Herkunft lässt Rückschlüsse über Beiträge unterschiedlicher Verschmutzungsquellen zu (d.h. Flusswasserinfiltration bringt potentiell bakterielle Verunreinigungen mit sich, über der Versickerungswasser werden z.B. Pestizide und Düngemittel eingetragen). Particle-tracking Methoden werden häufig verwendet, falls eine explizite Modellierung des Stofftransports nicht möglich oder zu aufwendig ist (Anderson *et al.*, 2015). Particle-tracking repräsentiert den advektiven Stofftransport, d.h. es wird angenommen dass das sich der Schadstoff entlang den Fließpfaden und mit der gleichen Fließgeschwindigkeit wie das Wasser verbreitet. Diffusions- und Dispersionsprozesse werden nicht berücksichtigt.

10 Ergebnisse

10.1 Klimawandeleinflüsse auf Erträge

Ertragsänderungsschätzungen für die Hauptsommerkulturen und alle betrachteten Klimamodellketten sind in Abbildung 9 dargestellt. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Erträge aller Kulturen mit Ausnahme von Körnermais durch den Klimawandel negativ beeinflusst werden. Dies gilt unter der Annahme unveränderter Sortenwahl. Den grössten Einfluss auf die Abnahme der Erträge hat der Temperaturanstieg, der die phänologische Entwicklung beschleunigt und zu einer Verkürzung der Wachstums- und insbesondere der Kornfüllzeiten führt. Über die kürzere Zeit kann weniger Biomasse akkumuliert werden und das Ertragsniveau sinkt. Nur für Körnermais, der im Vergleich zu anderen in dieser Studie betrachteten Kulturpflanzen relativ spät reift und bei dem wir in der Grundeinstellung von einer mittelspät reifenden Sorte ausgegangen sind (GDD-Anforderung für die Reifung 1850 bei einer Basistemperatur von 6°C), wurden leicht Ertragssteigerungen prognostiziert (am stärksten ausgeprägt mit Bewässerung). Ertragsverluste sind im Allgemeinen bei RCP 8.5 am stärksten, während RCP 2.6 die geringsten Verluste verursacht.

Diese Ergebnisse implizieren, dass bei RCP8.5 aufgrund verkürzter Wachstumszyklen mit beschleunigter phänologischer Entwicklung eine Abnahme der landwirtschaftlichen Produktivität zu erwarten wäre, wenn keine angemessenen Anpassungsmaßnahmen (z.B. Auswahl später reifender Sorten) getroffen würden.

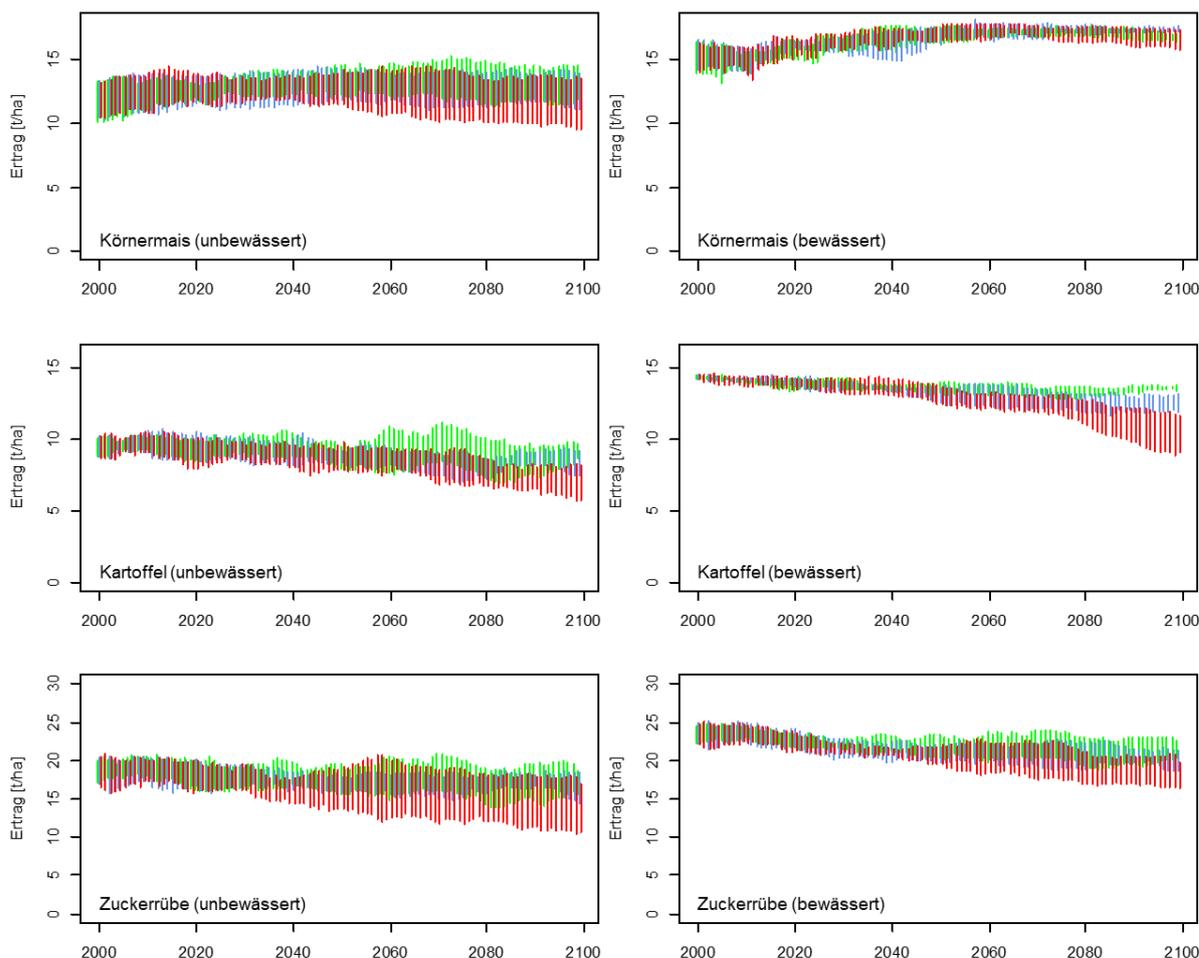


Abbildung 9: 20-jährige gleitende Mittelwerte der Erträge der wichtigsten Sommerkulturen unter unbewässerten und bewässerten Bedingungen auf der Grundlage der Klimamodellprojektionen aus RCP 2.6 (grüne Balken), 4.5 (blaue Balken) und 8.5 (rote Balken); Balken zeigen die Unsicherheit der Klimaprojektionen auf der Grundlage des in Tabelle 2 beschriebenen Ensembles an (hier werden nur Ergebnisse des Bodentyps 1 gezeigt, da die Variation zwischen den Bodentypen kaum Auswirkungen auf die gezeigten Schätzwerte hatte).

Simulationsergebnisse für früh-, mittel- und spätreifende Sorten von Körnermais mit drei angenommenen Aussaatterminen zeigen, dass es einen grossen Spielraum für die Erhaltung der Körnermaisproduktivität durch die Wahl später reifender Sorten unter RCP8.5-Bedingungen gibt (Abbildung 10). In Anbetracht dessen könnte es möglich sein, dass Landwirte sich zukünftig für den Anbau solcher spätreifenden Sorten entscheiden, um die verlängerte Vegetationsperiode unter RCP8.5 besser auszunutzen. Es bestehen jedoch beträchtliche Unsicherheiten in der Frage der Anpassungsentscheidungen als Reaktion auf das Klima und auch auf sozioökonomische Faktoren. Es ist davon auszugehen, dass Unsicherheiten über zukünftige sozioökonomische Randbedingungen eine wichtigere Rolle bei der Antizipation bäuerlicher Entscheidungen spielen werden als Unsicherheiten bei der Klimaprojektion (vgl. Lehmann *et al.*, 2013).

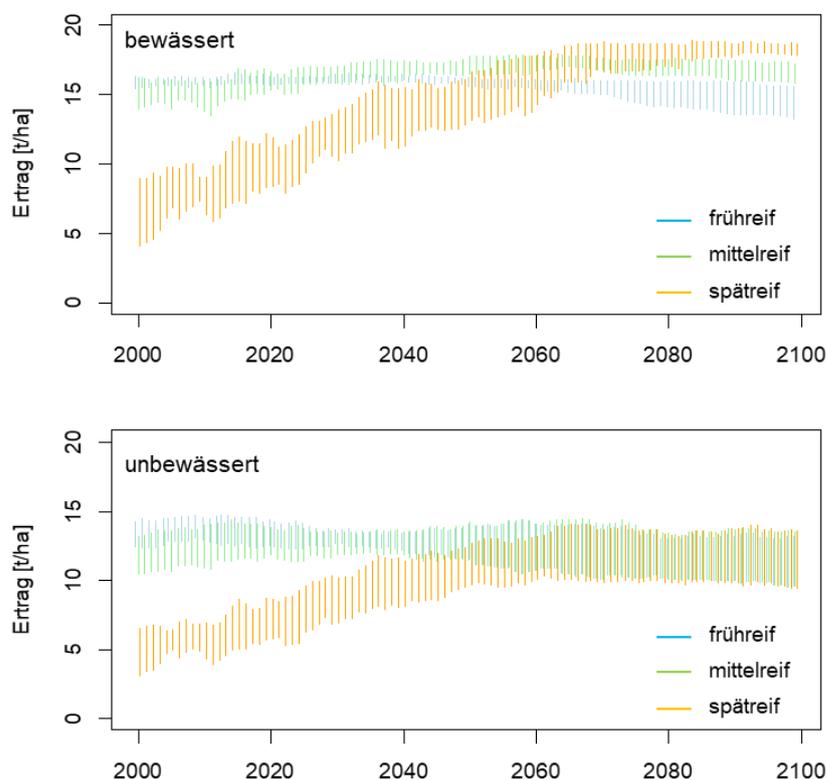


Abbildung 10: 20-jährige gleitende Mittelwerte der Erträge von früh- (hellblau), mittel- (grün) und spät reifenden (orange) Sorten von Körnermais unter (a) bewässerten und (b) unbewässerten Bedingungen auf der Grundlage der Klimamodellprojektionen von RCP8.5; Balken zeigen die Unsicherheit der Klimaprojektion auf der Grundlage des in Tabelle 2 beschriebenen Ensembles an (hier werden nur Ergebnisse des Bodentyps 1 gezeigt).

10.2 Klimawandeleinflüsse auf Wasserbedarf für Bewässerung

Abbildung 11 zeigt die prognostizierten Veränderungen des saisonalen Bewässerungswasserbedarfs für die in dieser Studie betrachteten Frühjahrskulturen (Körnermais, Kartoffeln und Zuckerrüben) sowie für Salat (mit literaturbasierter Parametrisierung und einer angenommenen festen Vegetationsperiode vom 1. April, 1. und 31. Oktober, die der aktuellen Anbauperiode für Freilandgemüse in der Untersuchungsregion entspricht).

Die Auswirkungen der Unsicherheit der Klimaprojektionen auf die Schätzungen des Bewässerungswasserbedarfs sind im Allgemeinen gross. Allerdings deuten die Vorhersagen der Pflanzenmodelle auf einen deutlichen Anstieg des Bewässerungswasserbedarfs für Körnermais unter RCP8.5 hin. Bei der Kartoffel ist der projizierte Anstieg weniger ausgeprägt aufgrund verkürzter Wachstumszyklen mit beschleunigter phänologischer Entwicklung bei höheren Temperaturen. Dies führt zu einer Verschiebung des Wachstumszyklus hin zu einer Periode, in der Trockenheitslimitierungen weniger häufig auftreten ("Dürrevermeidung"). Im Falle von Zuckerrüben führte dieser Effekt in der Simulation teilweise sogar zu abnehmenden Trends des saisonalen Bewässerungswasserbedarfs. Der grösste Anstieg des Bewässerungsbedarfs wurde für Salat mit der festen Vegetationsperiode geschätzt - was wiederum die Relevanz der Dauer der Vegetationsperiode für die Schätzungen der Veränderungen des Bewässerungswasserbedarfs verdeutlicht.

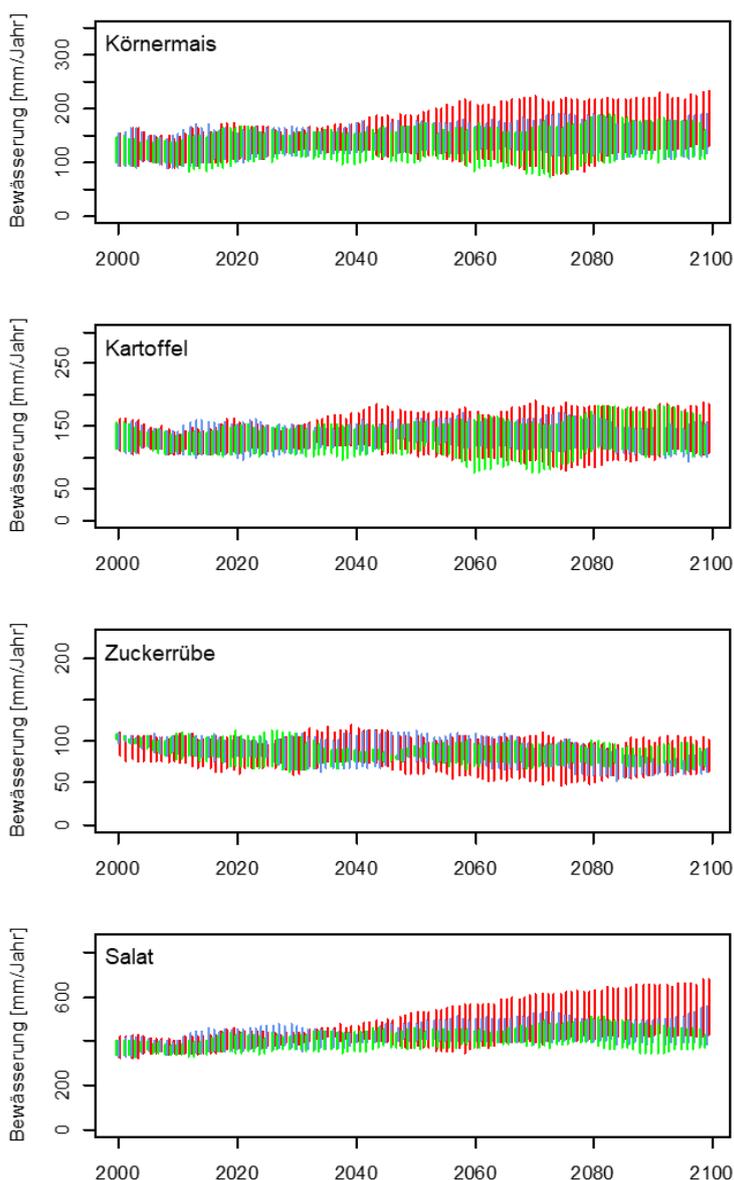


Abbildung 11: 20-jährige gleitende Mittelwerte des saisonalen Bewässerungswasserbedarfs für Körnermais, Kartoffeln, Zuckerrüben und Salat auf der Grundlage der Klimamodellprojektionen von RCP 2.6 (grüne Balken), 4.5 (blaue Balken) und 8.5 (rote Balken); Balken zeigen die Unsicherheit der Klimaprojektion auf der Grundlage des in Tabelle 2 beschriebenen Ensembles (hier werden nur Ergebnisse des Bodentyps 1 gezeigt, da die Variation zwischen den in dieser Studie betrachteten Bodentypen kaum Auswirkungen auf die gezeigte Schätzgrössen hatte).

Die Simulationsergebnisse für die drei verschiedenen Körnermaissorten (früh-, mittel- und spätreifend) zeigen für die spätreifenden Sorte den grössten saisonalen Bewässerungswasserbedarf und die grösste Zunahme unter Klimawandel (Abbildung 12). Dies impliziert, dass der Bewässerungswasserbedarf überproportional zunehmen könnte, wenn Landwirte zur besseren Ausnutzung der verlängerten Vegetationsperiode später reifende Sorten wählen würden. Im Vergleich zur mittlereifenden Referenz-Sorte steigt der Bewässerungsbedarf für die spätreifende Sorten bis zum Ende des Jahrhunderts um 80% an (bezogen auf den Ensemble-Median der RCP8.5-Projektionen).

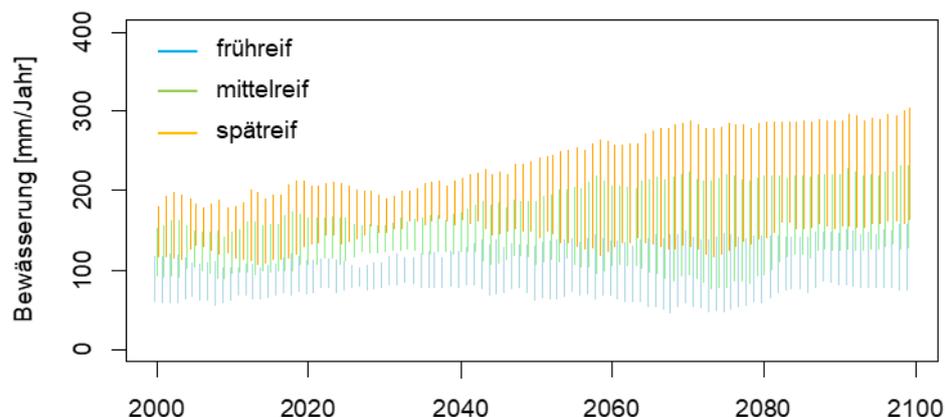


Abbildung 12: 20-jährige gleitende Mittelwerte des saisonalen Bewässerungswasserbedarfs von früh- (hellblau), mittel- (grün) und spät reifenden (orange) Sorten von Körnermais auf der Grundlage der Klimamodellprojektionen von RCP8.5; Balken zeigen die Unsicherheit der Klimaprojektion auf der Grundlage des in Tabelle 2 beschriebenen Ensembles an (hier werden nur Ergebnisse des Bodentyps 1 gezeigt).

10.3 Klimawandeleinflüsse auf das Sickerwasser

Die jährlichen Summen des Bodensickerwassers sind vom Klimawandel weitgehend unbeeinflusst (Abbildung 13). Mithilfe einer ANOVA-basierten Varianzaufteilung aller Simulationsläufe wurde festgestellt, dass die Klimaprojektionsunsicherheit bei weitem die grösste Unsicherheitsquelle darstellt: 73% der Variabilität der Schätzungen über Veränderungen des Bodenwasserabflusses ist auf Klimaprojektionsunsicherheit zurückzuführen; Unterschiede in der Pflanzenart erklären 10% der Variabilität, und Unterschiede in der Bodenart erklären 5%. Die den Pflanzentypen zugeschriebene Variabilität kann durch Unterschiede im Wasserverbrauch der Pflanzen und deren saisonale Schwankungen erklärt werden (die Pflanzen unterscheiden sich in der Effizienz der Transpirationsnutzung und der Länge der Wachstumszyklen). Die Variabilität, die den Bodentypen zugeschrieben wird, kann durch Unterschiede in der Bodendurchlässigkeit erklärt werden.

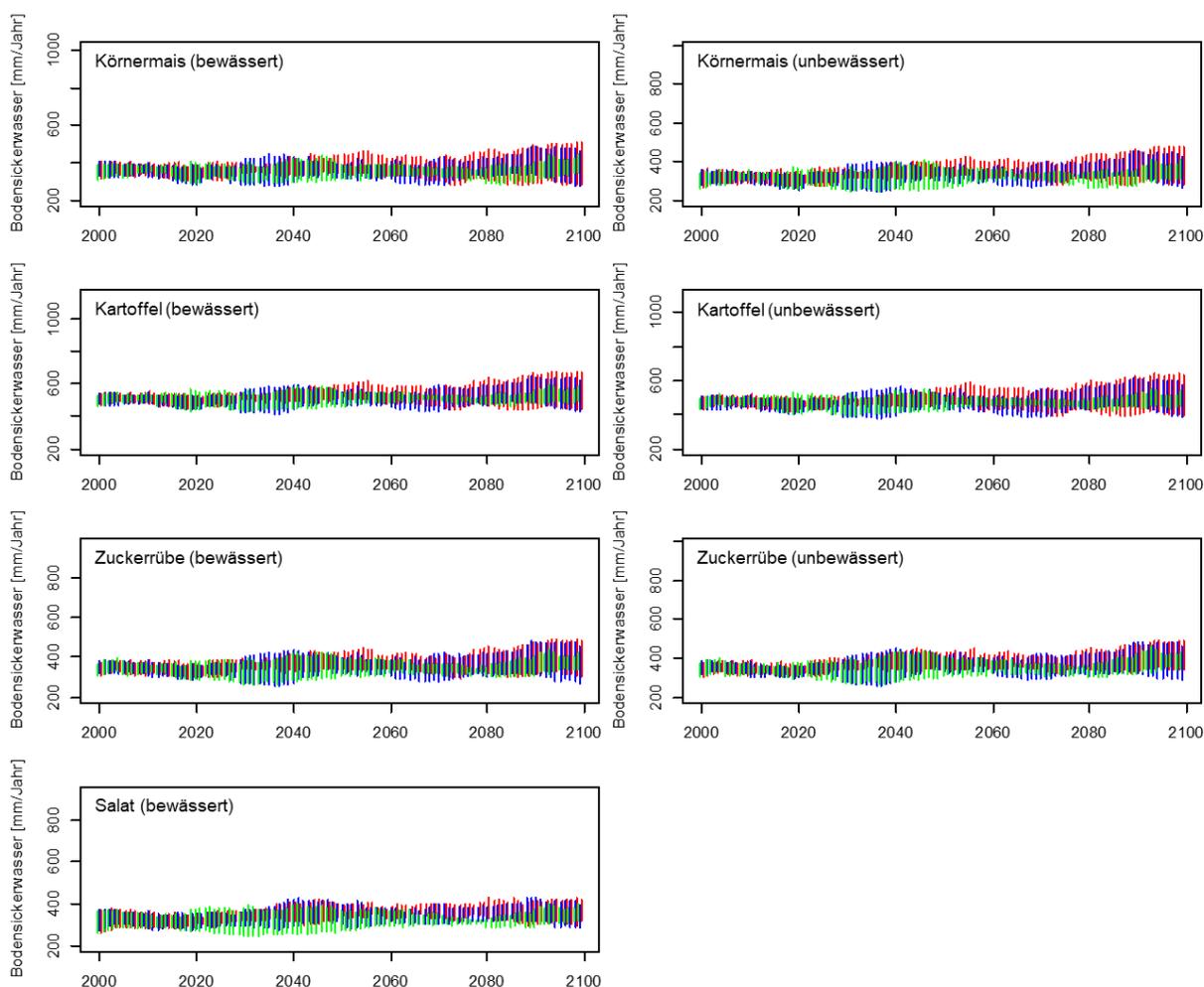


Abbildung 13: 20-jährige gleitende Mittwerte des Bodensickerwassers unter unbewässertem und bewässertem Körnermais, Kartoffeln und Zuckerrüben sowie bewässertem Salat mit allen Klimamodellprojektionen (RCP8.5 in rot, RCP4.5 in blau, RCP2.6 in grün; Balken zeigen die Unsicherheit der Klimaprojektion auf der Grundlage des in Tabelle 2 beschriebenen Ensembles an (hier werden nur die Ergebnisse von Bodentyp 1 gezeigt, da die Variation zwischen den in dieser Studie betrachteten Bodentypen kaum Auswirkungen auf gezeigte Schätzgrösse hatte).

10.4 Klimawandeleinflüsse auf die Hydrologie

Gemäss den Ergebnissen des kombinierten hydrologischen-hydraulischen Modells werden sich die Abflussmengen, die für das Gebiet relevant sind, bis zum Ende des Jahrhunderts vor allem saisonal verschieben: im Winter ist mit einem Anstieg des Abflusses, im Frühjahr mit nahezu unveränderten Abflüssen, und im Sommer und im Frühherbst mit einem Rückgang zu rechnen (Abbildung 14). Das Ausmass dieser Veränderungen ist eine Funktion des angenommenen Emissionsszenarios, wobei das Szenario RCP8.5 typischerweise zum höchsten Veränderungssignal führt und RCP2.6 zum geringsten.

Auffällig ist, dass sich das Änderungssignal im Sommer bereits von RCP2.6 auf RCP4.5 stark verschärft, während es im Winterhalbjahr erst unter dem RCP 8.5 Szenario zu einer deutlich ausgeprägten Änderung kommt. Die jahreszeitlichen Änderungssignale summieren sich auf etwa 5% für RCP 2.6, 10 - 15% für RCP 4.5 und auf 30% für RCP8.5 (detaillierte Zahlen siehe Prozentwerte „Sommer“ und „Winter“, Tabelle 2). Der stärkste Rückgang des Wasserdargebotes tritt in den Monaten Juli, August und September auf, der hauptsächlich durch Anstiege im Januar und Februar ausgeglichen wird (siehe auch Abbildung 10). Während der Periode des frühen Wachstums und der Reifung der Winterkulturen (Apr-Juni) sind die Einflüsse auf das Wasserdargebot eher gering und für die Emissionsszenarien RCP 2.6 und RCP4.5 sogar überwiegend positiv (zwischen -6,1% am Pegel Aare-Brügg im Mai und +12,6%

am Pegel Aare-Hageneck im Mai), während beim RCP8.5-Szenario ein Rückgang in den Monaten Mai und Juni von bis zu 20% zu erwarten ist. Trotz dieser deutlichen saisonalen Veränderung ändert sich die jährliche Wassermenge bis zum Ende des Jahrhunderts im Vergleich zu den Bedingungen von 1981-2010 nicht gravierend, mit nur geringen jährlichen Abnahmen unter den Szenarien RCP2.6 und RCP4.5 (- 1% - 2,6%, Tabelle 4). Unter der Annahme des RCP8.5 verschärft sich der jährliche Rückgang des Wasserdargebotes jedoch auf -10%.

Diese Werte spiegeln jedoch nur die Veränderungssignale des Ensemble-Medians wider. Die Variabilität der simulierten Veränderungen über die verschiedenen verwendeten Modellketten hinweg ist durch die Verteilung der Boxplots in Abbildung 14 dargestellt. Für die Aare sind vor allem von Juni bis November breite Streuungen (d.h. Klimamodellunsicherheiten) zu erkennen, insbesondere unter dem Szenario RCP8.5. Diese Streuungen stehen im Einklang mit den stärkeren Abweichungen, die für die Referenzperioden festgestellt wurden (Abbildung 5), und beziehen sich zum Teil auf den gleichen Grund einer höheren Sensitivität des Modells für Abflussspitzen am Pegel Aare, Brügg. Dieser Einfluss von Hochwasserspitzen auf die Variabilität ist jedoch auch am Pegel Aare, Hageneck, zu erkennen: Die Boxplots der Szenarien RCP2.6 und RCP4.5, zeigen eine größere Streuung im oberen Teil des Interquantilbereichs, was auf hohe Flüsse hinweist, die nur von einem Teil des Modellensembles projiziert werden. Die großen Variabilitäten werden daher als ein Ergebnis der natürlichen Klimavariabilität interpretiert, die durch verschiedene Modellketten widergespiegelt wird.

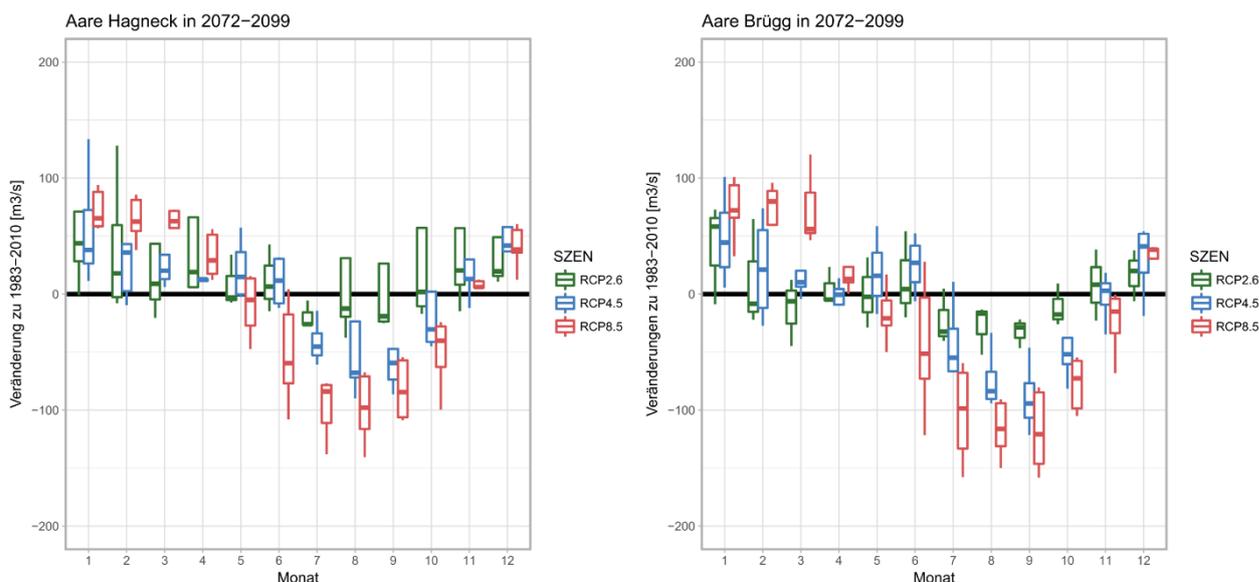


Abbildung 14: Veränderungen der mittleren monatlichen Abflüsse bis 2070-2099 im Vergleich zur Referenzperiode 1981-2010 für die drei Emissionsszenarien an zwei Pegeln: Aare-Hageneck und Aare Brügg. Die Boxplots basieren auf 6 (RCP8.5), 5 (RCP4.5) und 4 (RCP2.6) Klimamodellketten (siehe Tabelle 2).

Tabelle 4: Geschätzte monatliche Abweichungen im Zeitraum 2070-2099 von der Referenzperiode 1981-2010 für die drei Emissionsszenarien (RCP2.6, RCP4.5, RCP 8.5); obere Tabelle bezieht sich auf den Zufluss des Bielersees, Pegel Aare-Hagneck, untere Tabelle auf den Seebfluss, Pegel Aare-Brügg.

Aare - Hagneck [m3/s]																
		Jahr	Sommer	Winter	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
	Referenz	177.9	227.9	127.9	102.5	92.3	130	165	254	293	259	214	180	167	154	122
RCP 2.6	1983-2010	178.9	217.6	140.2	116	119.8	136	170.7	241.7	266.4	239.3	202.8	187.4	168.1	159.7	138.7
	2072-2099	177.1	205.5	148.8	144.3	126.5	131.4	173	231.6	270.2	221.4	171.2	164.4	174.5	164.6	152.7
	%	-1	-5.6	6.1	24.4	5.6	-3.4	1.4	-4.2	1.4	-7.5	-15.6	-12.3	3.8	3.1	10.1
RCP 4.5	1983-2010	179	216.9	141.1	119.4	123.2	130.1	181.4	232.2	257.2	240.7	201.4	195.2	174.9	153	139.7
	2072-2099	174.4	187.4	161.5	143.9	144.3	159.9	187.5	261.5	261.9	180.1	133.5	138.2	149.3	164.9	168.4
	%	-2.6	-13.6	14.4	20.5	17.1	22.9	3.4	12.6	1.8	-25.2	-33.7	-29.2	-14.7	7.8	20.5
RCP 8.5	1983-2010	176.5	214.3	138.8	116.2	123.4	127	175	244.2	260.1	228.2	198.5	188.5	166.5	157.6	133.4
	2072-2099	159.7	138.9	180.5	177.7	178.5	188.4	201.8	219.2	208.9	120.7	91.7	87.6	105.1	164.8	171.6
	%	-9.6	-35.2	30.1	53	44.7	48.3	15.3	-10.2	-19.7	-47.1	-53.8	-53.5	-36.8	4.6	28.6
Aare - Brügg [m3/s]																
		Jahr	Sommer	Winter	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
	Referenz	264.7	304.7	224.8	210.2	181	216	249	324	372	330	279	261	263	267	225
RCP 2.6	1983-2010	268.1	295.7	240.5	218.8	218	229.3	259.1	326.2	339.8	305.9	270.4	269	262.9	265	252.6
	2072-2099	262.8	275.9	249.6	259.8	234.5	217.2	257.6	306.4	344.4	290.6	222.2	231.4	260.8	268.2	260.6
	%	-2	-6.7	3.8	18.8	7.6	-5.3	-0.6	-6.1	1.3	-5	-17.8	-14	-0.8	1.2	3.2
RCP 4.5	1983-2010	265.8	291.5	240	226.1	224.6	222.2	263.8	315.6	335.5	303.8	259.8	273.5	261.1	258.8	244.8
	2072-2099	260.4	257.1	263.7	263.5	257.6	240.6	267.6	343.1	360.9	237.5	186.6	186.6	228.2	260.8	292.3
	%	-2	-11.8	9.9	16.5	14.7	8.3	1.4	8.7	7.6	-21.8	-28.2	-31.8	-12.6	0.8	19.4
RCP 8.5	1983-2010	264.3	291.7	236.9	218.4	223.5	212	265.6	329.7	339.8	299.1	255.5	268.8	257.5	263.2	239
	2072-2099	237.1	198.9	275.3	287.4	297.8	284.7	279.2	299.8	291.8	176.1	136.8	123.5	165.1	235.1	267.5
	%	-10.3	-31.8	16.2	31.6	33.3	34.3	5.1	-9.1	-14.1	-41.1	-46.4	-54	-35.9	-10.7	11.9

10.5 Klima- und Landnutzungseinflüsse auf die Grundwasserdynamik

Um die kombinierten Auswirkungen des Klimawandels und der landwirtschaftlichen Wassernutzung auf die Grundwasserdynamik zu bewerten, wurden monatliche Grundwasserbilanzen erstellt, die sich aus der Neubildung, dem Bewässerungsbedarf, der lateralen Strömung, der Fluss-Aquifer-Interaktionen, der Änderungen der Grundwasserspeicher und der Änderungen der Grundwasserhöhe zusammensetzt. Abbildung 8 zeigt die Wasserbilanzen des gesamten Untersuchungsgebiets für die beiden simulierten Klimaszenarien (DMI-HIRAM5 RCP2.6 und SMHI-RCA4 RCP8.5) und die beiden moderaten Landnutzungsszenarien (#1 und #2).

Die Ergebnisse der Simulationen mit dem Emissionsszenario **RCP2.6** (DMI-HIRAM5 RCP2.6, linke Spalte in Abb. 15) zeigen geringe Auswirkungen sowohl von Klima- als auch von Landnutzungsänderungen auf die verschiedenen Komponenten der Wasserbilanz. Mit Klimawandel wäre gemäss dieser Projektion mit einer leichten Zunahme des seitlichen Zuflusses in den Monaten Januar bis Juli zu rechnen. Diese spiegelt sich in einem leichten Anstieg der Grundwasserstände in diesen Monaten wider. Allein in Bezug auf den Bewässerungsbedarf zeigen sich Unterschiede zwischen den Landnutzungsszenarien. Diese haben allerdings keine nennenswerte Auswirkung auf weitere betrachtete Grössen. So sind Grundwasserspeicher und Grundwasserneubildungsrate mit dem intensiveren Szenario #1 nur unwesentlich geringer als mit dem extensiveren Szenario #2. Die Grundwasserstände selbst bleiben fast unverändert.

Die Veränderungen der Wasserhaushaltskomponenten sind beim **RCP8.5**-Emissionsszenario (SMHI-RCA4 RCP8.5, mittlere Spalte in Abbildung 8) wesentlich ausgeprägter. Bis zum Ende des Jahrhunderts müsste gemäss dieser Projektion mit einem Anstieg der Grundwasserneubildung um etwa 50% im März und April und einer Neubildung nahe

0 mm/Monat statt 20 mm/Monat im August und September gerechnet werden. Der Wasserbedarf für Bewässerung würde im Gebiet je nach Landnutzungsszenario um 30% (Szenario #2; mässig extensive Nutzung) bis 65% (Szenario #1; mässig intensive Nutzung) steigen. Dabei würde der Bewässerungsbedarf den Wasserbedarf für Trinkwasser (orange Linie) zum Teil deutlich übersteigen. Es ist in dem Zusammenhang allerdings zu beachten, dass es sich bei dem geschätzten Trinkwasserbedarf um den mittleren aktuellen Bedarf handelt; es wurden keine Schätzungen des zukünftigen Trinkwasserbedarfs berücksichtigt. Änderungen der seitlichen Zuflüsse folgen demselben Muster wie die Neubildungsraten. Bedingt durch klimatische Änderungen steigt die Menge seitlicher Zuflüsse am Ende des Winters und zu Beginn des Frühlings und nimmt dafür im September und Oktober ab. Die Aare puffert dabei die künftige Dynamik des Grundwasserleiters, indem sie im März und April mehr Wasser abführt und umgekehrt von September bis Dezember mehr Wasser zurückführt. Insgesamt ist die Speicherung von Grundwasser mit der RCP8.5-Projektion bis zum Ende des Jahrhunderts in der warmen Jahreszeit geringer und in der kalten Jahreszeit höher. Die Grundwasserstände (gezeigt hier für die Piezometer-Station PW Kappelen) folgen dem gleichen Trend mit höheren oder unveränderten Grundwasserständen von Januar bis Juni und niedrigeren Grundwasserständen von Juli bis Dezember. Allerdings sind die mittleren Veränderungen auf einer maximalen Abnahme der Grundwasserstände um 30 cm begrenzt. Die Tendenz zur Abnahme der Grundwasserstände im Spätsommer und Herbst wird durch eine moderate Intensivierung, wie in Landnutzungsszenario #1 angenommen, leicht verstärkt und durch die Extensivierung in Landnutzungsszenario #2 leicht gedämpft.

Während die ersten beiden Spalten in Abbildung 8 die mittleren Änderungen für die beiden Klimaprojektionen bis zum Ende des Jahrhunderts (2070-2099) aufzeigen, sind in der rechten Spalte der Abbildung die Änderungen für ein **extremes Trockenjahr aus der RCP8.5-Projektion** dargestellt. Im Allgemeinen sind hier die Veränderungen aller Komponenten stärker akzentuiert; die Periode ohne Grundwasserneubildung ist länger und reicht von Juni bis September. Der Wasserbedarf für Bewässerung liegt in diesem Jahr um bis zu 200% über dem Mittel der Referenzperiode. Die Änderungen der lateralen Flüsse sind ausgeprägter. Je nach Jahreszeit speisen oder drainieren die Flüsse den Aquifer. Flüsse können im Winter dreimal mehr Wasser aus dem Aquifer drainieren und von September bis Dezember 50% mehr infiltrieren. In der warmen Jahreszeit ist eine Abnahme der Grundwasserleiterspeicherung um bis zu 25 mm/Monat zu beobachten. Die Grundwasserstände können am Piezometer G107 im Extremjahr um bis 1 m niedriger sein als heute.

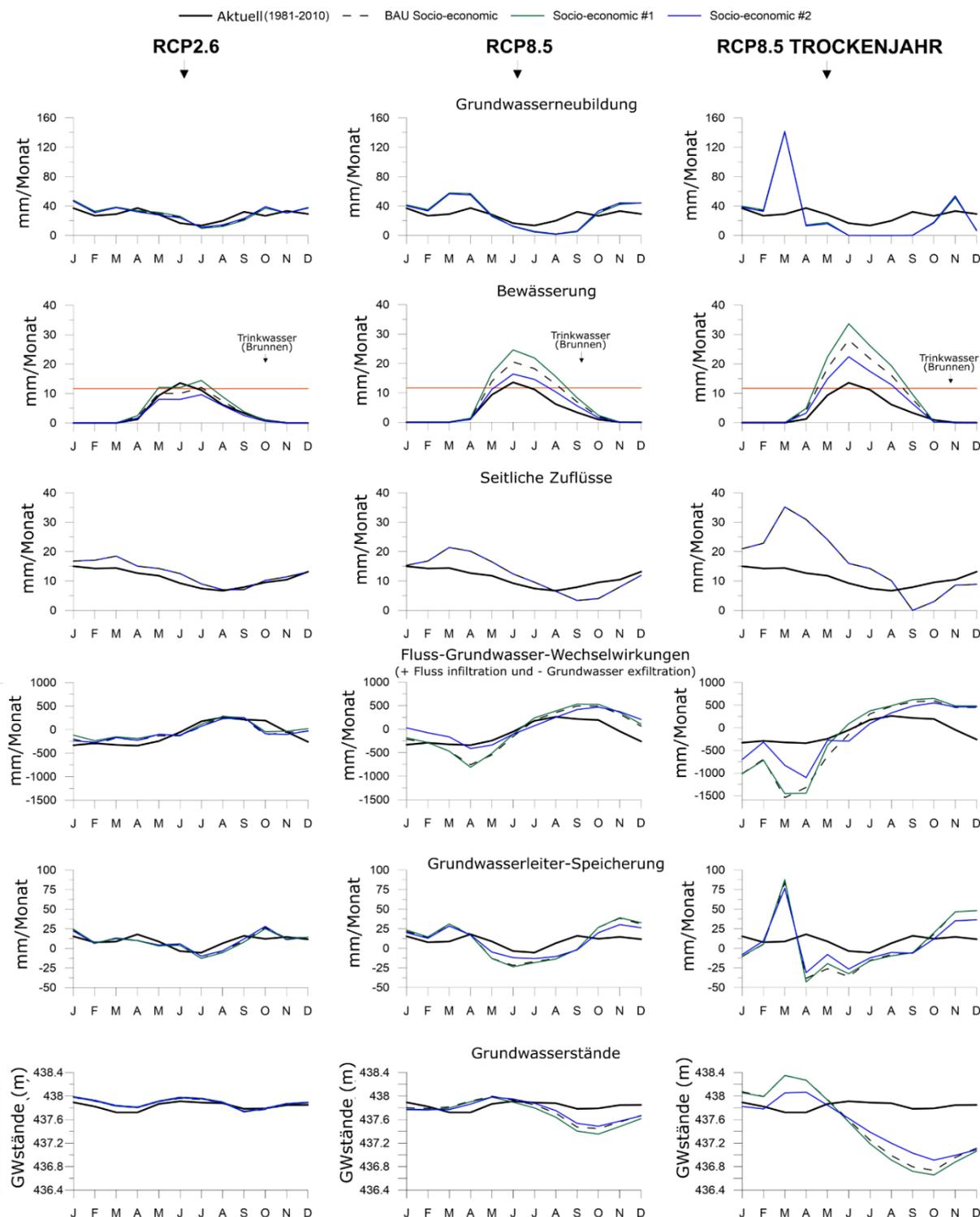


Abbildung 15: Simulierte mittlere monatliche Wasserbilanz im Aquifer für die beiden Klimaprojektionen und ein extremes Trockenjahr aus der RCP8.5-Projektion mit aktueller Landnutzungsverteilung, mässiger Intensivierung (Szenario #1, grüne Linie) und mässiger Extensivierung (Szenario #2, blaue Linie) zum Ende des Jahrhunderts (2070-2099) im Vergleich zum Referenzzustand (aktuelle Landnutzung, Klimareferenzzeitraum 1981-2010). Im unteren Panel sind die Grundwasserstände für die Piezometer Station G107 dargestellt, der sich im südlichen Teil des Gebietes befindet.

Um die Sensitivität des Grundwassersystems gegenüber extremen Landnutzungsänderungen abzuschätzen, wurden zwei extremere Landnutzungsszenarien #3 und #4 getestet wie in Abschnitt 7 beschrieben. Die Ergebnisse sind in Abbildung 16 dargestellt.

Mit Klimaschutz (**RCP2.6**) und extremer Intensivierung (Szenario#3 = 100% Gemüsebau in Bodenzone 1) würde der Wasserbedarf für Bewässerung im Vergleich zum Referenzszenario (aktuelle Landnutzung und aktuelles Klima) um bis zu 400% ansteigen. Der Einfluss dieser stark erhöhten Wasserentnahmen für Bewässerung wird jedoch teilweise durch die Infiltration des Flusses und den Seitenzufluss kompensiert, die im gleichen Zeitraum zunehmen. Daher ist in den Monaten Juni, Juli und August ein Rückgang der Grundwasserleiterspeicherung zu beobachten, und am Piezometer G107 in der Nähe des Hageneckkanals bleiben die Grundwasserstände unverändert.

Ohne Klimaschutz (**RCP8.5**, Spalte 2) steigt der Wasserbedarf für Bewässerung im Szenario der extremen Intensivierung (Szenario #3 = 100% Gemüsebau in Bodenzone 1) um bis zu 700% an. Die Neubildung nimmt durch die Intensivierung der Wasserentnahmen für Bewässerung zwischen Mai und September leicht ab. Zwischen November und April steigt sie dagegen leicht an. Auch hier werden die erhöhten Wasserentnahmen für Bewässerung teilweise durch den Anstieg des Seitenzuflusses und die Infiltration des Flusses kompensiert. Die Kompensation reicht jedoch nicht aus, um eine Abnahme der Grundwasserleiterspeicherung (-300% im Vergleich zum aktuellen Klima und aktueller Landnutzung) und des mittleren Grundwassers 1 m im Vergleich zum Referenzzustand zu vermeiden. Mit der Annahme über eine extreme Extensivierung (Szenario #4 = unbewässertes Grünland) fällt die Absenkung des Grundwasserspiegels im Spätsommer/Herbst sehr viel geringer aus.

Für das Extremjahr sind alle Veränderungen der Wasserhaushaltskomponenten akzentuiert. Der Spitzenbedarf an Bewässerung steigt um 900%, und die Wiederauffüllung ist von April bis Oktober fast null. Es ist jedoch zu erkennen, dass die Infiltration der Flüsse nicht zunimmt, was wahrscheinlich darauf hindeutet, dass eine Obergrenze der Fluss-Infiltration erreicht ist. Daher ist ein dramatischer Rückgang der Grundwasserspiegel um etwa 3,5 m zu beobachten.

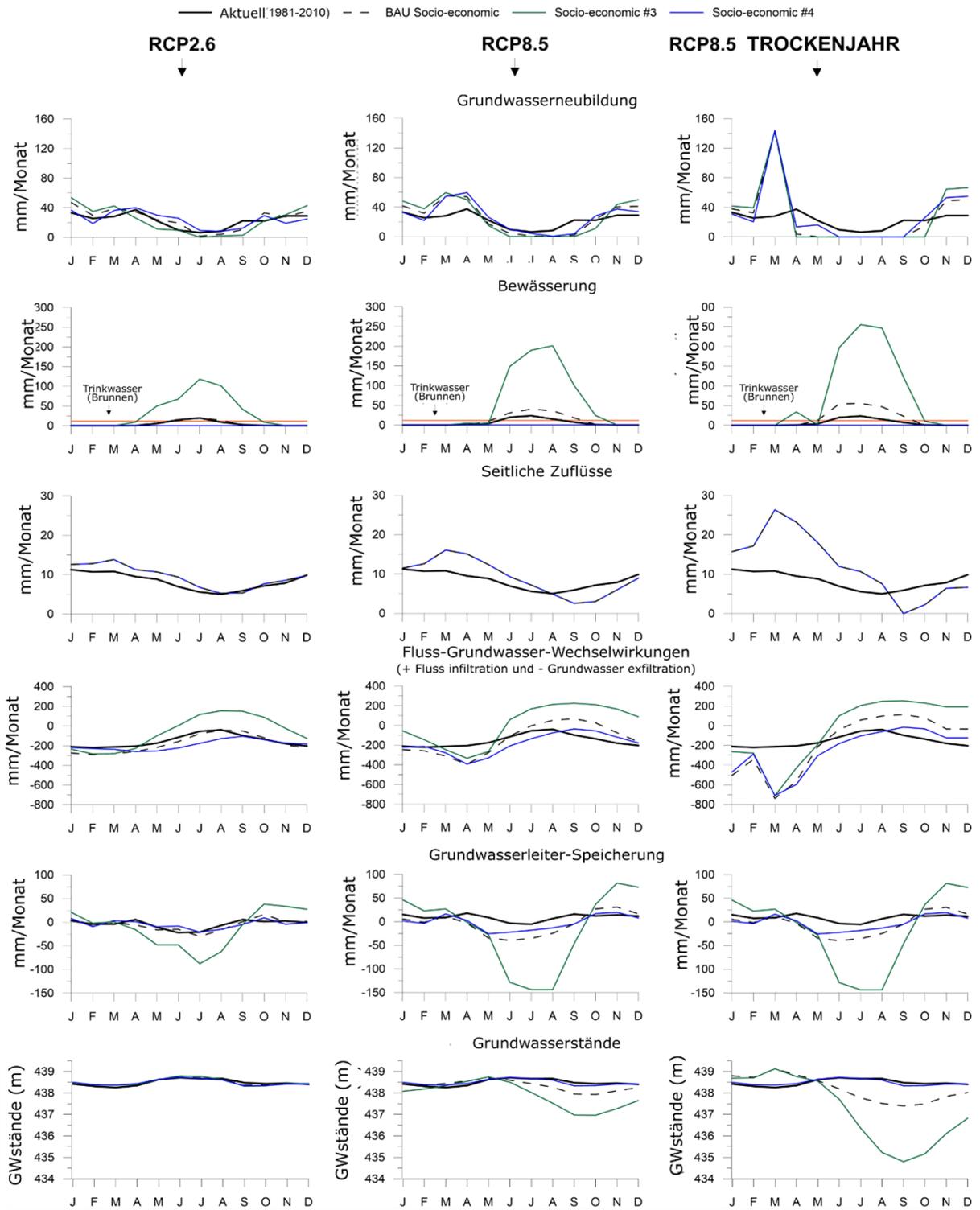


Abbildung 16: Simulierte mittlere monatliche Wasserbilanz im Bereich der Bodenzone 1 für die beiden Klimaprojektionen und ein extremes Trockenjahr aus der RCP8.5-Projektion mit aktueller Landnutzungsverteilung, extremer Intensivierung (Szenario #3, grüne Linie) und extremer Extensivierung (Szenario #4, blaue Linie) zum Ende des Jahrhunderts (2070-2099) im Vergleich zum Referenzzustand (aktuelle Landnutzung, Klimareferenzzeitraum 1981-2010). Im unteren Panel sind die Grundwasserstände für die Piezometer Station G107 dargestellt, der sich im südlichen Teil des Gebietes befindet.

Bezüglich Herkunft des Wassers als ein Proxy für Wasserqualität zeigen die Diagramme der Abbildung 17 die mittleren prozentualen Anteile des Fluss- bzw. Nachfüllwassers im Einzugsbereich des Gimmiz-Brunnens nördlich des Hageneck-Kanals, der mit einer Pumprate von etwa 15'000m³/d das grösste Brunnenfeld im Seeland ist. Es zeigt sich, dass bei einem

Szenario RCP8.5 (2070-2099) und ohne Landnutzungsänderungen die Wasserherkunft recht ähnlich ist. Dies bedeutet, dass sich die Wasserqualität bezüglich des Verhältnisses zwischen bakteriellen Einträgen aus den Flüssen und Schadstoffen aus der Landwirtschaft (Pestizide, Nitrat) in Zukunft nicht wesentlich ändern sollte. Wir erwarten, dass andere Einflüsse (z.B. Gesetzesänderung bezüglich Pestizide oder Landnutzungänderung) einen stärkeren Einfluss haben.

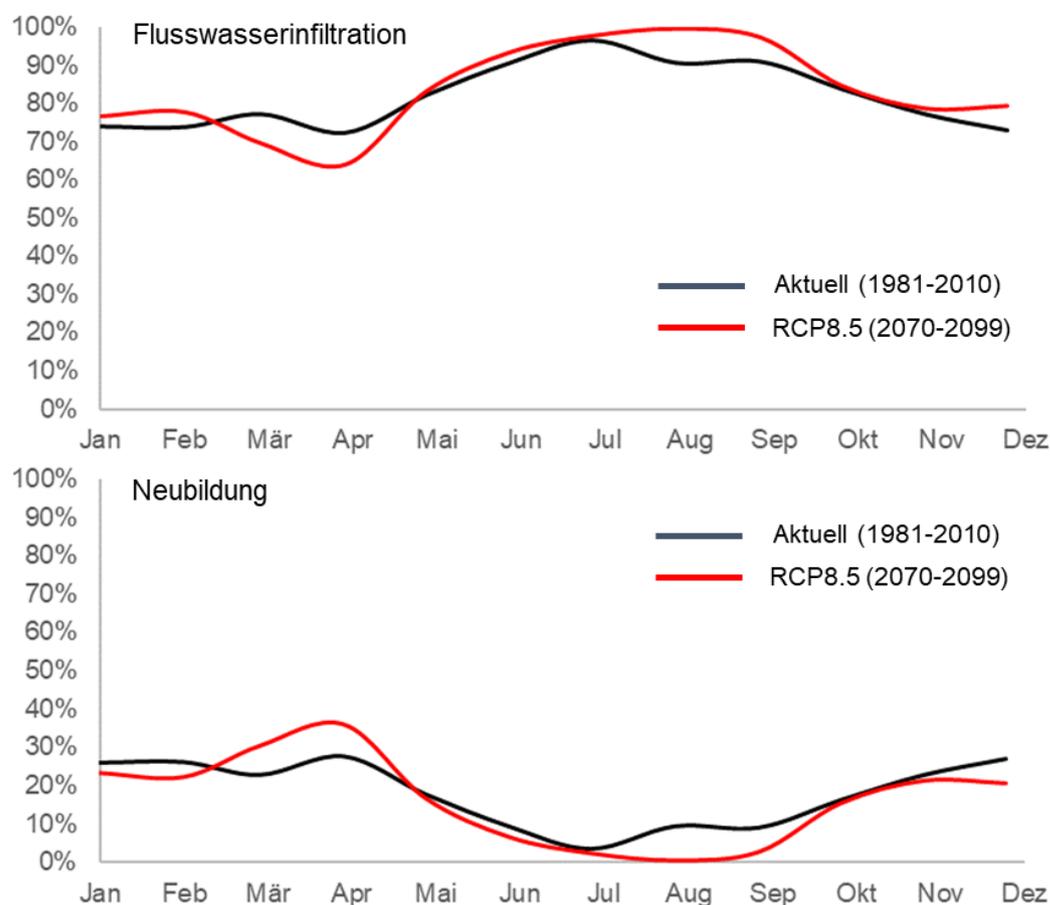


Abbildung 17: Mittlere monatliche Anteile der Zuflüsse aus Flusswasserinfiltration (oben) und Neubildung (unten) unter aktuellen Klimabedingungen (1981-2010) und zukünftigen Klimabedingungen (2070-2099 mit der RCP8.5-Projektion und unveränderter Landnutzung).

11 Potentiale und Limitierungen

Die lose Modellkopplung weist eine hohe Flexibilität bezüglich der Annahmen über Randbedingungen auf (z.B. kann der Bewässerungswasserbedarf aus verschiedenen Kulturanteilen und Bewirtschaftungsformen resultieren, möglicherweise auch unter Berücksichtigung eines «Exports» von Bewässerungswasser in Bereiche außerhalb der Aquiferregion). Dies eröffnet einen grossen Spielraum für die Untersuchung unterschiedlicher Landnutzungsvarianten. Eine schrittweise Analyse der Modelloutputs an den jeweiligen Schnittstellen erlaubt es zudem, die wichtigsten Treiber für projizierte Veränderungen detailliert zu analysieren.

Der integrierte Modellierungsansatz kann auf andere Regionen übertragen werden, um zu beurteilen, wie sich die Einflüsse von Klima- und Nutzungsänderungen auf die Grundwasserressourcen anderer Regionen unterscheiden. Dazu bedarf es allerdings gebietsspezifischer Modellanpassungen in den einzelnen Teilmodellen.

In dieser integrierten Modellierungsstudie wurden Klimaprojektionsunsicherheiten durch die Verwendung von Ensemble-Projektionen berücksichtigt, die alle RCP's aus CH2018 abdecken. Sowohl mit dem Pflanzenwachstumsmodell, als auch mit dem hydrologischen Modell wurden Ensemble-Simulationen durchgeführt. Da das Grundwassermodell einen erhöhten Rechenaufwand aufweist, wurde hier nur mit zwei ausgewählten Modellketten gearbeitet. Die Auswahl wurde dabei auf Basis der mit dem Pflanzenwachstumsmodell und hydrologischen Modell geschätzten Änderungssignale in Bezug auf relevante Inputs für das Grundwassermodell getroffen. Man kann deshalb davon ausgehen, dass die beiden für das Grundwassermodell ausgewählten Projektionen die Extreme der Bandbreite des Ensembles widerspiegeln.

Weitere Unsicherheitsquellen, die in dieser Studie nicht systematisch berücksichtigt wurden, sind Parameterisierungsunsicherheiten und strukturelle Modellunsicherheiten.

Im Bereich der Pflanzenwachstumsmodellierung ist bekannt, dass strukturelle Modellunsicherheiten in der Abschätzung von Klimawandelauswirkungen auf Ertragsänderungen eine grosse Rolle spielen (z.B. Asseng *et al.*, 2013). Diese Unsicherheitsquelle müsste in weiterführenden Arbeiten noch genauer betrachtet werden. Bezüglich Klimawandelauswirkungen auf Wasserbedarf für Bewässerung zeigten Webber *et al.* (2016), dass Schätzungen der relativen Änderungen im Bewässerungsbedarf robust gegenüber strukturellen Modellunsicherheiten sind, während absolute Schätzwert je nach Modellansatz stark variieren können. Dasselbe kann auch für die Ergebnisse dieser Studie angenommen werden.

Die hydrologisch-hydraulisch Modellierung war in dem Untersuchungsraum vor einige Herausforderungen gestellt, insbesondere durch das große Einzugsgebiet und die stark anthropogene Überprägung der Hydrologie. Die Modellgüte weist daher auch Verbesserungspotential auf. Vor allem im Hinblick auf die monatliche Schrittweise des Grundwassermodells, könnte hier eine Neukalibrierung auf Monatswerte zu Verbesserungen führen. Ein größere Unsicherheitsquelle stellen die Gletschersimulationen dar, die in dieser Studie nicht explizit kalibriert, sondern nur im Kalibrationszeitraum auf Plausibilität geprüft wurden. Die Verwendung von Gletscherszenarien aus CH2018-Hydro wäre hier ein sehr sinnvoller nächster Schritt. Das hydrologische Modell WASIM-ETH in Kombination mit RS-MINVERE wurde in dieser Studie ausschliesslich für die Simulation von Abflüssen und Wasserständen als Randbedingung für das Grundwassermodell verwendet. Für zukünftige Studien bieten sich hier Möglichkeiten für Modellvergleiche und -verknüpfungen mit dem Pflanzenwachstumsmodell hinsichtlich weiterer Parameter (z.B. Bodenfeuchte, Verdunstung). Auch eine Grundwassersimulation in höherer zeitlicher Auflösung (täglich) ist im Rahmen der hier entwickelten Modellkopplung möglich und könnte Aufschluss über die Effekte extremerer Wasserstände (Hochwasser und Niedrigwasser) geben.

Auch das Grundwassermodell basiert auf einigen Annahmen welche gewisse Modellunsicherheiten mit sich bringen. Ein wichtiger Punkt ist, dass die abgeschätzten Neubildungsraten unabhängig vom Grundwasserstand sind. Falls die Grundwasserstände jedoch sehr hoch sind, wird die Verdunstung in CropSyst unterschätzt und die Neubildungsraten folglich überschätzt. Um diese Rückkopplungsmechanismen explizit zu berücksichtigen müsste ein physikalisches Modell (z.Bsp. HydroGeoSphere) aufgesetzt werden, was numerisch sehr schwierig zu handhaben ist. Dies war im Rahmen dieses Forschungsprojektes nicht möglich. Auch wurde das Drainagenetz nicht explizit simuliert was ebenfalls eine Überschätzung der Neubildungsraten zur Folge haben kann. Eine explizite Simulation von Drainagen ist im verwendeten Grundwassermodell nicht möglich. Da der Zustand der Drainagen unzureichend dokumentiert ist wäre eine explizite Berücksichtigung im Moment wenig sinnvoll.

Diese strukturellen Einschränkungen im Modell können zu einem gewissen Grad durch die Eichung der Modellparameter kompensiert werden, d. h. die beobachteten Wasserstände können mit dem bestehenden Modellansatz sehr gut reproduziert werden weil Modellparameter die strukturellen Einschränkungen zum Teil kompensieren können. Die

Unsicherheiten der Wasserbilanz (z.B. die fehlende Rückkopplung zwischen Grundwasserstand und Neubildung) können jedoch nicht durch die Eichung kompensiert werden. Der Einfluss dieser strukturellen Limitationen ist jedoch klein im Vergleich zu Unsicherheiten bezüglich Verdunstungs- und Niederschlagsmessungen, da die Verdunstungsraten durch Kapillarhub aus dem Grundwasser klein sind.

Die qualitative Abschätzung der Wasserqualität berücksichtigt nur advective Flüsse. Für eine erste qualitative Abschätzung der Wasserherkunft ist das völlig ausreichend. Für eine explizite Simulation bestimmter Schadstoffe (e.g. Nitrate oder Pestizide) müsste das Grundwassermodell überarbeitet und insbesondere die räumliche Diskretisation erhöht werden um Dispersions-Diffusion und Retentions-Prozesse adäquat abbilden zu können. Das war im Rahmen dieses Forschungsprojekts nicht möglich.

Zusammenfassend zu den Modellunsicherheiten ist es wichtig zu betonen, dass die strukturellen Vereinfachungen und Modellannahmen bei allen Simulationen und Szenarien identisch sind. Wir gehen daher davon aus, dass die relativen Änderungen zwischen den verschiedenen Szenarien zuverlässig interpretiert werden können.

12 Kernbotschaften

Landwirtschaft

- Im Rahmen einer Anpassung an den Klimawandel werden Änderungen in der Sortenwahl notwendig sein
- Spätreifende Sorten mit höheren Temperaturansprüchen können von Klimaerwärmung profitieren; der längere Wachstumszyklus ist dabei allerdings mit einem höheren Wasserbedarf verknüpft
- Durch den Anbau von frühreifenden Sorten kann Dürre- und Hitzestressperioden im Sommer ausgewichen werden. Der Pflanzenwasserbedarf lässt sich so reduzieren, allerdings in der Regel auf Kosten reduzierter Ertragsniveaus.
- Je nachdem, wie die Wachstumssaison in Zukunft genutzt wird (Auswahl der Kulturen, Sorten, Aussaatdaten), können die Auswirkungen der Bewirtschaftung die Auswirkungen des Klimawandels auf die Grundwasserressourcen verstärken oder ausgleichen (die Abhängigkeit der landwirtschaftlichen Produktion von der Bewässerung kann größer oder kleiner sein)
- Ohne Änderungen in der Länge des Wachstumszyklus würde der Wasserbedarf für Bewässerung bis zum Ende des Jahrhunderts mit RCP2.6 um 7% und mit RCP8.5 um 40% zunehmen (bezogen auf den Ensemble-Mittelwert)
- Mit Sortenanpassung hin zu spätreiferen Sorten (z.B. von Körnermais) könnte der Wasserbedarf für Bewässerung bis zum Ende des Jahrhunderts um bis zu 80% ansteigen (bezogen auf den Ensemble-Median der RCP8.5-Projektionen)

Hydrologie

- Klimawandel führt zu einer Verschiebung des hydrologischen Regimes: erhöhter Abfluss im Winter, verminderter Abfluss im Sommer
- Hinsichtlich der saisonalen, monatlichen Veränderungen des Abflusses zeigen sich starke Verschiebungen innerhalb des Jahres: Sommerdefizite (bis zu 53.8% mit RCP8.5, bis 15.6% mit RCP2.6) können dabei meist durch Winterüberschüsse kompensiert werden
- Der Grundwasserkörper und die Seen sind für die ausgleichende Zwischenspeicherung von elementarer Bedeutung
- Die simulierte hydrologische Änderung ändert sich nicht linear mit steigenden Treibhausgasemissionen, sondern das Änderungssignal verschärft sich stark von

RCP4.5 zu den Emissionsszenarien RCP 8.5 für die Wintersaison und bereits von RCP2.6 zu RCP4.5 für das Änderungssignal im Sommer.

Hydrogeologie:

- Ohne Klimaschutz (RCP8.5) ist ohne Landnutzungsänderung für den Seeland-Aquifer bis zum Ende des Jahrhunderts mit einer Absenkung der Grundwasserstände im Spätsommer und Herbst um bis zu 40 cm im Mittel (am Piezometer G107 im südlichen Teil des Gebiets) zu rechnen; in einem extremen Trockenjahr kann die Absenkung bis zu 100 cm betragen.
- Durch eine Intensivierung der landwirtschaftlichen Nutzung auf Basis von verstärkter Bewässerung würde die Absenkung akzentuiert
- Durch eine Reduktion der landwirtschaftlichen Wassernutzung wird auch die saisonale Absenkung der Grundwasserstände reduziert
- Bei starker Zunahme von Wasserentnahmen für Bewässerung (um Faktor 3) würde die Absenkung der Grundwasserstände deutlich stärker ausfallen (im Herbst bis 150 cm im Mittel und 350 cm im Extremjahr am Piezometer G107). Da der Grundwasserleiter im Mittel 30 m mächtig ist, sind auch in diesem extremen Szenario ausreichende Mengen von Grundwasser vorhanden, um den Trinkwasserbedarf und den Wasserbedarf für Bewässerung zu decken.
- Bei Verzicht auf Wasserentnahmen für Bewässerung aus dem Grundwasserleiter hingegen kann die saisonale Absenkung am Piezometer G107 auf 20 cm reduziert werden

13 Forschungslücken und offene Fragen

Auswirkungen zukünftiger Klima- und Nutzungsänderungen auf die Grundwasserqualität konnten im Rahmen dieser Studie nicht mit betrachtet werden. Dazu wären weiterführende Studien auf Basis von detaillierten Stofftransportmodellen nötig, die Einflüsse von Düngemittel- und PestizidAuswaschung, Grundwassertemperatur und Aufenthaltszeiten auf die Qualität des Grundwassers explizit berücksichtigen. Um das zu gewährleisten, müsste die räumliche Auflösung des bestehenden Modells verfeinert und die Numerik entsprechend angepasst werden. Eine explizite numerische Modellierung der Wasserqualität ist sehr aufwendig und wird in jedem Fall mit grossen und relativ schwer zu quantifizierenden Unsicherheiten verbunden sein. Gezielte Monitoring-Kampagnen und Tracerversuche können zu einem gewissen Grad die Parameterunsicherheiten eines Transportmodells reduzieren. Das Qualitätsmonitoring sollte deshalb auf jeden Fall beibehalten und eventuell ausgedehnt werden um z.B. den Pestizideintrag aus der ungesättigten Zone besser quantifizieren zu können.

Auch die genaueren Implikationen der in dieser Studie quantifizierten Änderungen der Grundwasserdynamik auf den Abbau organischer Böden im südlichen Teil des Gebietes, die Biodiversität verbundenen Feuchtgebiete oder die Pumpkosten für Wasserentnahmen für Bewässerung bedürfen weiterführender Studien. Insbesondere ökonomische Betrachtungen unterschiedlicher Bewässerungsoptionen unter Einbezug projizierter klimatischer Änderungen können hilfreich sein, um Fehlentwicklungen zu vermeiden. Eine vorläufige Studie zur wirtschaftlichen Optimierung ergab, dass trotz der Tatsache, dass die Erträge von Körnermais unter dem Klimawandel von der Bewässerung profitieren, der optimale Anteil von bewässertem Körnermais aufgrund der hohen Bewässerungskosten im Verhältnis zu den Ertragsvorteilen immer noch niedriger ist als der Anteil von regengespeistem Körnermais (Susana López Rodríguez). Die Anteile aller anderen Ackerkulturen werden bei den ökonomisch optimalen Lösungen unter dem Klimawandel aufgrund der Verringerung des Ertragsniveaus mit steigenden Temperaturen reduziert. Dies unterstreicht erneut die Notwendigkeit von Anpassungen an steigende Temperaturen (z.B. durch Verschiebungen in

der Sorten- und Pflanzenwahl) als Voraussetzung für die Erzielung von Vorteilen aus der Bewässerung.

In Zukunft sollten detailliertere bio-ökonomische Analysen neben der Bewässerung explizit auch andere Anpassungsmöglichkeiten berücksichtigen (z.B. Umstellung auf andere Sorten, andere Kulturpflanzen - auch Gemüse). Darüber hinaus sind Sensitivitäten der Rentabilität der Bewässerung gegenüber zukünftigen Veränderungen der Kosten und Preise zu untersuchen.

Genauere Informationen über den landwirtschaftlichen Wasserverbrauch (d.h. Entnahmemengen aus jeweiligen Quellen, Bewässerungsmengen) wären von grossem Wert, um die Abschätzungen kulturspezifischer Bewässerungsbedürfnisse zu verifizieren. Eine systematische Erfassung solcher Informationen kann darüberhinaus auch Aufschluss bieten über Trends in der landwirtschaftlichen Wassernutzung (d.h. autonome Anpassungen der Landwirte and klimatische Änderungen). Auf Grundlage solcher Informationen liesse sich das zukünftige Anpassungsverhalten von Landwirten besser antizipieren, was für die Entwicklung plausibler Landnutzungsszenarien für die Zukunft hilfreich wäre.

14 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Aus den Ergebnissen dieser integrierten Modellstudie kann für das Berner Seeland gefolgert werden, dass die Gefahr einer mengenmässigen Übernutzung der Grundwasserressourcen bezüglich der Quantität ohne drastische Erhöhung der Wasserentnahmen für Bewässerung als gering einzustufen ist. Zwar würde es durch die Zunahme von Wasserbedarf für Bewässerung auch ohne Nutzungsänderungen (Business-as-usual Szenario) zu einer Absenkung der Grundwasserstände im Spätsommer und Herbst kommen, aber diese temporäre Absenkung würde im Winter und Frühling wieder kompensiert. Mit einer deutlichen Ausweitung der Bewässerungsgebiete (eventuell auch über die Grenzen des Untersuchungsgebietes hinaus) könnte dieser Absenkungseffekt auf die Grundwasserstände aber deutlich verstärkt werden.

Die Implikationen solcher Absenkungen für verbleibenden organische Böden im Seeland sowie für Ökosysteme, die von (stabil) hohen Wasserständen abhängig sind, bleiben ungewiss (z.B. Naturschutzgebiet "Meienriedloch"). Auch könnten Nutzungs- und Klimaänderungen negative Auswirkungen auf die Grundwasserqualität haben, was die lokale Biodiversität aber auch die Trinkwasserversorgung der Region negativ beeinflussen könnte.

Die uneingeschränkte Nutzung der Wasserressourcen im Berner Seeland für Bewässerungszwecke ist daher nicht grundsätzlich zu empfehlen. Weitere Studien müssen folgen, um weiter reichende Auswirkungen genauer abzuschätzen.

Der entwickelte Modellansatz ist auch für andere Gebiete anwendbar. Eine Verallgemeinerung der Resultate auf andere Systeme ist aber nur beschränkt möglich, da die Situation im Seeland äusserst vorteilhaft ist (die Wasserbilanz ist im Seeland stark durch die Flüsse beeinflusst). Auch ist ein mächtiger Grundwasserleiter auf der gesamten Fläche vorhanden, was den Zugang zu der Grundwasserressource erheblich vereinfacht. In anderen Gebieten ist diese Situation häufig nicht gegeben. Geht zum Beispiel die bewässerte Fläche über den Grundwasserleiter hinaus oder wird in Gebieten ohne Flussinfiltration Grundwasser zu Bewässerung entnommen, ist mit einer höheren Absenkung der Grundwasserspiegel als im Seeland zu rechnen. In diesem Zusammenhang ist es wichtig zu erwähnen, dass eine vergleichbare Grundwasserabsenkung je nach Region und Wassernutzern (inklusive Ökosysteme) sehr unterschiedliche Konsequenzen haben kann.

15 Referenzen

- Anderson, M.P., Woessner, W.W., Hunt, R.J., 2015. Applied Groundwater Modeling (Second Edition). Academic Press, San Diego.
- Asseng, S., Ewert, F., Rosenzweig, C., Jones, J.W., Hatfield, J.L., Ruane, A.C., Boote, K.J., Thorburn, P.J., Rötter, R.P., Cammarano, D., Brisson, N., Basso, B., Martre, P., al., e., 2013. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. *Nature Climate Change*.
- BFS, 2012. Bodeneignungskarte der Schweiz. In: GEOSTAT (Ed.), CH-2010 Neuenburg, Schweiz.
- BLW, 2015. Agrarpolitisches Informationssystem (AGIS). In: (BLW), Bundesamt für Landwirtschaft (Ed.), Bern.
- Cochand, F. Tschumper, R., Brunner, P., Hunkeler, D. 2020: Numerisches Modell des Seeland-Grundwasserleiters. Projektbericht. AWA Bern, Universität Neuenburg, 64 S. https://www.bve.be.ch/bve/de/index/direktion/organisation/awa/formulare_bewilligungen/Grundwasser.assetref/dam/documents/BVE/AWA/de/WASSER/Grundwasser/Grundwassererkundung/Dokumentation_Grundwassermodell_Seeland_D.pdf
- Diersch, H.-J.G., 2014. FEFLOW - Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media.
- Fuhrer, J., 2012. Bewässerungsbedarf und Wasserdargebot unter heutigen und künftigen Klimabedingungen. In: ART, Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon (Ed.). Agroscope, Zürich, p. 48.
- Fuhrer, J., Thomet, M., Smith, P., Jordan, F., Thomet, P., 2016. Online-Prognosen für Wasserknappheit. *AgrarForschung* 7, 232-239.
- Garcia Hernandez, J., Paredes Arquiola, J., Foehn, A., Roquier, B., 2017. RS Minerve– Technical manual v2. 8. In: Switzerland, RS MINERVE Group. Switzerland (Ed.).
- Holzkämper, A., 2020. Varietal adaptations matter for agricultural water use – a simulation study on grain maize in Western Switzerland. *Agric. Water Manage.* 237, 106202.
- Holzkämper, A., Klein, T., Seppelt, R., Fuhrer, J., 2015. Assessing the propagation of uncertainties in multi-objective optimization for agro-ecosystem adaptation to climate change. *Environ. Model. Softw.* 66, 27-35.
- Huss, M., Farinotti, D., Bauder, A., Funk, M., 2008. Modelling runoff from highly glacierized alpine drainage basins in a changing climate. *Hydrol. Process.* 22, 3888-3902.
- Klein, T., Calanca, P., Holzkämper, A., Lehmann, N., Roesch, A., Fuhrer, J., 2012. Using farm accountancy data to calibrate a crop model for climate impact studies. *Agricultural Systems* 111, 23-33.
- Klein, T., Holzkämper, A., Calanca, P., Seppelt, R., Fuhrer, J., 2013. Adapting agricultural land management to climate change: A regional multi-objective optimization approach. *Landscape Ecology* 28, 2029-2047.
- Lehmann, N., Briner, S., Finger, R., 2013. The impact of climate and price risks on agricultural land use and crop management decisions. *Land Use Policy* 35, 119–130.
- Monteith, J.L., 1977. Climate and Efficiency of Crop Production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences* 281, 277-294.
- NABODAT, 2018. Bodendatensatz Schweiz (Soil profile data of Switzerland) – Version 3 (November 2018). Agroscope, Zurich, Switzerland.
- NCCS, 2018. CH2018 - Climate Scenarios for Switzerland. In: Services, National Centre for Climate Services (Ed.), Technical Report. National Centre for Climate Services, Zurich

- Parent, B., Leclere, M., Lacube, S., Semenov, M.A., Welcker, C., Martre, P., Tardieu, F., 2018. Maize yields over Europe may increase in spite of climate change, with an appropriate use of the genetic variability of flowering time. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115, 10642-10647.
- Schulla, J., 2017. Model Description WaSiM. In: Schulla, Hydrology Software Consulting J. Schulla (Ed.).
- Stöckle, C., Nelson, R., 2000. Cropping Systems Simulation Model - User's Manual. Washington State University - Biological Systems Engineering Department, p. 235.
- Stöckle, C.O., Donatelli, M., Nelson, R., 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy* 18, 289-307.
- Suarez-Rey, E.M., Romero-Gamez, M., Gimenez, C., Thompson, R.B., Gallardo, M., 2016. Use of EU-Rotate_N and CropSyst models to predict yield, growth and water and N dynamics of fertigated leafy vegetables in a Mediterranean climate and to determine N fertilizer requirements. *Agricultural Systems* 149, 150-164.
- Tanner, C.B., Sinclair, T.R., 1983. Efficient water use in crop production: Research or Research? . In: Taylor, H.M., Jordan, W.R., Sinclair, T.R. (Eds.), *Limitations to Efficient Water Use in Crop Production*. Amer. Soc. Agron, Madison, WI, USA.
- Tei, F., Aikman, D.P., Scaife, A., 1996a. Growth of lettuce, onion and red beet: 2. Growth modelling. *Annals of Botany (London)* 78, 645-652.
- Tei, F., Scaife, A., Aikman, D.P., 1996b. Growth of lettuce, onion, and red beet. 1. Growth analysis, light interception, and radiation use efficiency. *Annals of Botany (London)* 78, 633-643.
- Tendall, D.M., Gaillard, G., 2015. Environmental consequences of adaptation to climate change in Swiss agriculture: An analysis at farm level. *Agricultural Systems* 132, 40-51.
- Webber, H., Gaiser, T., Oomen, R., Teixeira, E., Zhao, G., Wallach, D., Zimmermann, A., Ewert, F., 2016. Uncertainty in future irrigation water demand and risk of crop failure for maize in Europe. *Environmental Research Letters* 11, 074007.