



SwissIrrigationInfo

Modellbasierte Schätzungen des Wasserverbrauchs für Bewässerung in der Schweiz

Autorinnen und Autoren

Tamara Baumgartner, Malve Heinz, Maria Eliza Turek, Gabriel Erismann, Miguel Kohling, Helge Aasen, Annelie Holzkämper

Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU –
August 2025



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'économie,
de la formation et de la recherche DEFR
Agroscope

Impressum

Herausgeber	Agroscope Schwarzenburgstrasse 161 3003 Bern www.agroscope.ch
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)
Auskünfte	Annelie Holzkämper annelie.holzkaemper@agroscope.admin.ch
Begleitung BAFU	P. Schmocker-Fackel, F. Hüsler
Titelbild	A. Holzkämper
Download	www.agroscope.ch/science
Copyright	© Agroscope 2025
ISSN	2296-729X
DOI	https://doi.org/10.34776/as212g
Zitiervorschlag	Baumgartner, T., Heinz, M., Turek, M.E., Erismann, G., Kohling, M., Aasen, H., Holzkämper, A. (2025). SwissIrrigationInfo - Modellbasierte Schätzungen des Wasserverbrauchs für Bewässerung in der Schweiz. Projektbericht im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU), Agroscope Science Nr. 212, Agroscope, Bern. https://doi.org/10.34776/as212g

Haftungsausschluss :

Diese Studie wurde im Auftrag des BAFU verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Die in dieser Publikation enthaltenen Angaben dienen allein zur Information der Leser/innen. Agroscope ist bemüht, korrekte, aktuelle und vollständige Informationen zur Verfügung zu stellen – übernimmt dafür jedoch keine Gewähr. Wir schliessen jede Haftung für eventuelle Schäden im Zusammenhang mit der Umsetzung der darin enthaltenen Informationen aus. Für die Leser/innen gelten die in der Schweiz gültigen Gesetze und Vorschriften, die aktuelle Rechtsprechung ist anwendbar.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
Résumé	5
Summary	6
Riassunto	7
1 Hintergrund	8
2 Ziel	9
3 Datengrundlagen	10
3.1 Bodeninformationen	10
3.2 Klimainformationen	11
3.3 Bewirtschaftungsdaten	11
3.4 Potenziell bewässerte Gebiete	12
3.5 Referenzinformationen Bewässerung	13
4 Methoden	14
4.1 Modell FAO56	14
4.2 Kulturspezifische Modellanpassungen	15
5 Ergebnisse und Diskussion	19
5.1 Flächenhafte Modellschätzungen für die Schweiz	19
5.2 Modellschätzungen für die Schweiz aggregiert	24
5.3 Regionale Validierung Ramsen, Schaffhausen	29
5.4 Regionale Validierung Untersee, Thurgau	32
5.5 Modellanwendung stationäre Klimaprojektionen	34
5.6 Klimaprojektionen regional	39
6 Schlussfolgerungen und Ausblick	41
6.1 Verbesserungen Datengrundlagen	41
6.1.1 Räumlicher Grundlagedaten	41
6.1.2 Referenzinformationen zur Bewässerungspraxis	42
6.2 Modellverbesserungen	43
7 Danksagung	44
8 Literaturverzeichnis	45
9 Appendix	48
9.1 Datengrundlage für Klimamodellierungen	48
9.2 Satellitenbasierte Abschätzung bewässerter Kulturflächen	49
9.2.1 Erfassbarkeit der landwirtschaftlichen Felder in der Schweiz per Satellit	49
9.2.2 Temporale Abdeckung der Schweiz mit Satellitendaten	49
9.2.3 Detektieren von bewässerten Flächen mit Hilfe von Satellitendatenzeitreihen	50
9.2.4 Fazit zur Nutzbarkeit von Satellitendaten im Kontext landwirtschaftliche Wassernutzung	54
9.3 Modellvergleich: SWAP vs. FAO56	56
9.4 Erhobene vs. modellierte saisonale Bewässerungsmengen	59
9.5 Darstellung Schweizweit detailliert	61
9.6 Klimaregionen Schweiz	64
9.7 Bodenstrukturen der bewirtschafteten Flächen vom Jahr 2023 gemäss Klimaregionen	65

Zusammenfassung

Die Schweiz wird bisher kaum mit Wasserknappheit in Verbindung gebracht. Dennoch führte Wasserknappheit während der letzten Jahre immer häufiger zu lokalen und zeitlich beschränkten Entnahmeverboten aus Oberflächengewässern für die landwirtschaftliche Bewässerung. Für die Zukunft ist davon auszugehen, dass solche Engpässe weiter zunehmen. Ob und wo solche Änderungen langfristig zu Problemen führen, ist derzeit schwer abschätzbar, da es nur unzureichende Informationen über den regionalen oder schweizweiten Wasserverbrauch für die landwirtschaftliche Bewässerung gibt. Im Projekt SwissIrrigationInfo war es deshalb Ziel, eine Methode zu entwickeln und zu erproben, die den Wasserverbrauch für Bewässerung modellgestützt abschätzt und es somit ermöglicht, bestehende Informationslücken zu schliessen. Kernstück der Methodik bildete dabei der FAO56-Ansatz zur Schätzung der Bewässerungsbedürfnisse unterschiedlicher Kulturen in Abhängigkeit von Klima- und Bodeneigenschaften. Dieser Modell-Ansatz wurde im Rahmen dieser Arbeit für zehn Kulturen bzw. Kulturgruppen parametrisiert, um aus den geschätzten Pflanzenwasserbedarfsmengen plausible Wasserverbrauchsmengen abzuleiten. Neben Literatur- und Expertenwissen wurden vorhandene Daten zur Praxisbewässerung für unterschiedliche Standorte, Kulturen und Jahre verwendet, um die kulturspezifischen Parametrisierungen bestmöglich abzustützen. Die verwendeten Bewässerungsinformationen stammen aus dem Bewässerungsnetz der HAFL, sowie aus dem Ressourcenprojekt «Effiziente Bewässerung Waadt».

Die parametrisierten Modelle wurden auf Basis schweizweit verfügbarer Daten zu Klima, Boden und Landnutzung angewandt, um den schweizweiten Wasserverbrauch für Bewässerung für die Jahre 2021 bis 2023 abzuschätzen. So wurde für das Jahr 2021 ein Bewässerungsbedarf von rund 9.5 Mio. m³, für das Jahr 2022 von 41 Mio. m³ und für das Jahr 2023 von rund 31 Mio. m³ errechnet. Die Kulturen mit dem grössten Bewässerungsbedarf waren gemäss dieser Schätzung Gemüse, Obst und Grünflächen. Die Ergebnisse der schweizweiten Modellierung decken sich grösstenteils mit den Schätzungen, die das BFS für das Jahr 2023 auf Basis von stichprobenhaften Erhebungen gemacht hat. Vergleiche der Modellschätzungen mit regional erhobenen Wasserentnahmemengen für Bewässerung in Schaffhausen und im Thurgau zeigen, dass die modellgestützte Methode den Wasserverbrauch für das nasse Jahr 2021 erheblich unterschätzt. Für die warm-trockenen Jahre 2022 und 2023 stimmten die modellierten Werte mit den erhobenen Entnahmemengen relativ gut überein, wenn die Annahmen über die Anteile bewässerter Kulturlächen für die jeweilige Region angepasst werden konnten.

Auf Basis der stationären CH2018-Klimaprojektionen wurden für alle hier betrachteten Kulturen/Kulturgruppen Modellrechnungen zur Schätzung zukünftiger Bewässerungsbedürfnisse durchgeführt und unter der Annahme, dass es keine Landnutzungsänderungen gibt, schweizweit hochskaliert. Diesen Schätzungen zufolge würde der Wasserverbrauch ohne Klimaschutz (RCP8.5) bis zum Ende des Jahrhunderts um etwa 21% steigen, mit moderatem Klimaschutz (RCP4.5) um etwa 6%.

Die Modellschätzungen des Wasserverbrauchs unterliegen verschiedenen Unsicherheiten, die die Nutzbarkeit der Ergebnisse wesentlich einschränken können. Insbesondere die Genauigkeit der Informationen über bewässerte Kulturlächen hat einen grossen Einfluss auf die Genauigkeit der geschätzten Wasserverbrauchsmengen auf regionaler Ebene. Dort, wo diese Informationen vorhanden waren, stimmten die Schätzmengen recht gut mit den erhobenen Entnahmemengen überein (Beispiel Ramsen). Die Referenzinformationen zur Praxisbewässerung waren für die Arbeit ausserordentlich wertvoll, um die Modellschätzungen bestmöglich mit der Realität abzugleichen. Allerdings zeigte sich auch, dass die Daten zur Praxisbewässerung eine sehr hohe Varianz aufweisen, die mit dem Modell nicht erklärbar ist. Diese Varianz resultiert daraus, dass die Bewässerungsentscheidungen einzelner Landwirte nicht allein von Bodenfeuchte und Pflanzenwasserbedarf abhängen, sondern verschiedene betriebswirtschaftliche und persönliche Erwägungen mitbestimmend sind.

Résumé

Jusqu'à présent, la Suisse n'était guère associée au manque d'eau. Cependant, les pénuries d'eau de ces dernières années ont conduit de plus en plus souvent à des interdictions locales et temporaires de prélèvement dans les cours d'eau pour l'irrigation agricole. À l'avenir, il faut s'attendre à ce que ces pénuries augmentent encore. Il est actuellement difficile d'évaluer si et où ces changements entraîneront des problèmes à long terme, car les informations sur la consommation d'eau pour l'irrigation agricole sont lacunaires au niveau régional ou national. Le projet SwissIrrigationInfo visait donc à développer et à tester une méthode permettant d'estimer la consommation d'eau utilisée pour l'irrigation agricole à l'aide d'un modèle afin de combler ainsi les lacunes existantes en matière d'information. Cette méthode est basée sur le modèle de la FAO56, qui permet d'estimer les besoins en irrigation de différentes cultures en fonction des caractéristiques climatiques et pédologiques. Dans le cadre de ce travail, cette approche modélisée a été paramétrée pour dix cultures ou groupes de cultures afin de déduire des quantités d'eau consommées plausibles à partir des besoins en eau estimés des plantes. Outre la littérature et les connaissances d'experts, les données disponibles sur l'irrigation dans l'agriculture pour différents sites, cultures et années ont été utilisées pour affiner les paramétrages spécifiques à chaque culture. Les informations utilisées sur l'irrigation proviennent du réseau d'irrigation de la HAFL et du projet ressource «Efficience Irrigation Vaud».

Les modèles ainsi paramétrés ont été appliqués sur la base des données disponibles à l'échelle nationale sur le climat, le sol et l'utilisation des terres afin d'estimer la consommation d'eau pour l'irrigation en Suisse au cours des années 2021 à 2023. Les besoins en irrigation ont ainsi été évalués à environ 9,5 millions de m³ pour 2021, à 41 millions de m³ pour 2022 et à environ 31 millions de m³ pour 2023. Selon ces estimations, les cultures maraîchères et fruitières ainsi que les surfaces herbagères sont les plus gourmandes en eau. Les résultats de la modélisation à l'échelle nationale correspondent en grande partie aux estimations réalisées par l'OFS pour l'année 2023 sur la base de sondages. La comparaison des estimations du modèle avec les quantités d'eau prélevées pour l'irrigation dans les cantons de Schaffhouse et de Thurgovie montre toutefois que la modélisation sous-estime considérablement la consommation d'eau pour l'année pluvieuse de 2021. Pour les années chaudes et sèches de 2022 et 2023, les valeurs modélisées correspondaient relativement bien aux quantités prélevées, dans la mesure où il a été possible d'adapter les hypothèses sur les proportions de surfaces cultivées irriguées pour la région concernée.

Sur la base des scénarios climatiques CH2018, des calculs modélisés ont été effectués pour estimer les besoins futurs en eau d'irrigation pour toutes les cultures/groupes de cultures considérés ici, puis, en supposant qu'il n'y ait pas de changement dans l'utilisation des terres, extrapolés à l'échelle nationale. Selon ces estimations, la consommation d'eau pourrait augmenter d'environ 21 % d'ici à la fin du siècle sans mesures de protection du climat (RCP8.5) et d'environ 6 % avec des mesures modérées de protection du climat (RCP4.5).

Les estimations modélisées de la consommation d'eau sont soumises à diverses incertitudes qui peuvent limiter considérablement l'utilité des résultats. La précision des informations sur les surfaces cultivées irriguées, en particulier, a une grande influence sur la précision des évaluations de la consommation d'eau au niveau régional. Là où ces informations étaient disponibles, les quantités estimées correspondaient assez bien aux quantités prélevées (exemple de Ramsen). Les informations de référence sur l'irrigation dans l'agriculture ont été extrêmement précieuses pour ce travail, car elles ont permis de comparer au mieux les estimations du modèle avec la réalité. Toutefois, il est également apparu que les données relatives à l'irrigation agricole présentaient une très forte variance, qui ne pouvait pas être expliquée par le modèle. Cette variance est due au fait que les décisions des agriculteurs en matière d'irrigation ne dépendent pas uniquement de l'humidité du sol et des besoins en eau des plantes, mais également de diverses considérations économiques et personnelles.

Summary

Until now, Switzerland has seldom been associated with water shortages. In recent years, however, water scarcity has increasingly led to local, temporary bans on surface-water withdrawal for agricultural irrigation. For the future, it can be assumed that such bottlenecks will become more frequent. Whether and where such changes will lead to problems in the long term is currently difficult to gauge, since there is insufficient information on Swiss regional or national water consumption for agricultural irrigation. The aim of the 'SwissIrrigationInfo' project was therefore to develop and test a model-based method for estimating water consumption for irrigation that would bridge existing information gaps. The key component of the methodology here was the FAO56 approach to estimating the irrigation requirements of different crops based on climate and soil characteristics. As part of the project, this model-based approach was parameterised for ten crops or crop groups to determine plausible water-consumption volumes from the estimated crop water requirements. In addition to knowledge from the literature and expert sources, available data on real-world irrigation practices for different sites, crops and years was used to provide optimal support for the crop-specific parameterisations. The irrigation information used stems from the HAFL irrigation network as well as from the 'Efficient Irrigation Vaud' resources project.

The parameterised models were applied based on climate, soil and land-use data available throughout Switzerland to estimate national water consumption for irrigation for the years 2021 to 2023. Accordingly, an irrigation water consumption of around 9.5 million m³ was calculated for 2021, 41 million m³ for 2022 and around 31 million m³ for 2023. According to model estimates, the crops with the highest irrigation requirement were vegetables, fruit and grassland. The results of the nation-wide modelling are largely congruent with the estimates made by the SFSO for 2023 based on random surveys. Comparisons of model-based estimates with regionally recorded volumes of water withdrawn for irrigation in Schaffhausen and Thurgau show that the model-based method substantially underestimates water consumption for 2021, which was a wet year. The modelled values were relatively congruent with the recorded withdrawal volumes for the warm, dry years of 2022 and 2023, provided that the assumptions on the shares of irrigated cropland could be adjusted for the region in question.

Based on stationary CH2018 climate projections, model calculations were performed for all the crops/ crop groups considered here to estimate future irrigation use at national scale, assuming no land-use change. According to these estimates, water consumption without climate protection (RCP8.5) would rise by approx. 21% by the end of the century, whilst with moderate climate protection (RCP4.5) it would rise by approx. 6%.

The model-based water-consumption estimates are subject to various uncertainties that can substantially limit the usefulness of the results. In particular, the accuracy of the information on irrigated cropland significantly influences the accuracy of the estimated water-consumption volumes at regional level. Where this information was available, the estimated volumes were fairly congruent with the recorded withdrawal volumes ('Ramsen' example). The reference information on real-life irrigation practices was invaluable for the project, allowing for optimal comparison of the model-based estimates with reality. However, the data on real-life irrigation was also seen to have a very high variance that cannot be explained by the model. This variance stemmed from the fact that the irrigation decisions of individual farmers do not depend solely on soil moisture and plant water requirement, but that various business and personal considerations are also determining factors.

Riassunto

Finora si è parlato poco di scarsità d'acqua in associazione con la Svizzera. Tuttavia, negli ultimi anni le carenze idriche hanno portato sempre più spesso all'introduzione di divieti locali e temporanei di prelievo dalle acque superficiali per l'irrigazione agricola. Possiamo ipotizzare che in futuro tali situazioni si verifichino con maggiore frequenza. Attualmente è tuttavia difficile valutare se e dove questi cambiamenti porteranno a problemi nel lungo periodo, poiché non disponiamo di informazioni sufficienti sui consumi irrigui per l'agricoltura a livello regionale o svizzero. Per questo motivo è stato lanciato il progetto SwissIrrigationInfo, con l'obiettivo di sviluppare e testare un metodo che stimasse il consumo d'acqua per l'irrigazione sulla base di modelli, per colmare così le lacune informative presenti. L'approccio definito nel FAO56 ha posto le fondamenta della metodologia per la stima del fabbisogno irriguo di diverse colture a seconda delle caratteristiche di clima e suolo. Nell'ambito di questo lavoro, l'approccio modellistico è stato parametrizzato per dieci colture risp. gruppi di colture, al fine di ricavare quantità plausibili di consumo irriguo dalle esigenze idriche stimate delle piante. Oltre alla letteratura e al parere degli esperti, sono stati utilizzati i dati esistenti relativi all'irrigazione effettiva per più località, colture e anni, in modo da fornire la miglior base possibile alle parametrizzazioni specifiche per coltura. Le informazioni sull'irrigazione utilizzate provengono dalla rete di irrigazione HAFL e dal progetto sulle risorse «Efficienza irrigazione Vaud».

I modelli parametrizzati sono stati applicati sulla base dei dati relativi a clima, suolo e uso del suolo disponibili a livello nazionale, al fine di stimare il consumo di acqua per l'irrigazione in tutta la Svizzera per il periodo 2021 – 2023. A partire da essi, è stato calcolato un fabbisogno irriguo di circa 9,5 milioni di m³ per il 2021, 41 milioni di m³ per il 2022 e circa 31 milioni di m³ per il 2023. Secondo questa stima, frutta, verdura e superfici inerbite richiedono quantitativi maggiori d'acqua. I risultati della modellizzazione a livello nazionale sono perlopiù in linea con le stime effettuate dall'UST per il 2023 sulla base di rilievi a campione. Il confronto tra le stime del modello e i volumi dei prelievi d'acqua per l'irrigazione raccolti a livello regionale a Sciaffusa e in Turgovia mostra che il metodo basato sul modello sottovaluta notevolmente il consumo idrico per l'anno umido 2021. Per gli anni caldi-secchi 2022 e 2023, invece, i valori modellati sono abbastanza vicini alle quantità di prelievo rilevate, quando è possibile adattare le ipotesi sulla proporzione di aree coltivate irrigate alla rispettiva regione.

Sulla base delle proiezioni climatiche degli scenari CH2018, ci si è valse di modelli di calcolo per stimare il futuro fabbisogno irriguo per tutte le colture/gruppi di colture considerati, riportato poi in scala per tutta la Svizzera, partendo dal presupposto che l'uso del suolo rimanga invariato. Secondo queste stime, il consumo di acqua aumenterebbe di circa il 21 % entro la fine del secolo senza protezione del clima (RCP8.5) e di circa il 6 % con una protezione moderata del clima (RCP4.5).

Le stime del consumo idrico fornite dai modelli sono soggette a diverse incertezze che possono limitare significativamente la fruibilità dei risultati. In particolare, l'accuratezza delle informazioni sulle superfici di coltura irrigate ha un impatto significativo sull'esattezza dei volumi di consumo idrico stimati a livello regionale. Laddove tali dati erano disponibili, le quantità stimate sono risultate abbastanza in linea con i volumi rilevati (ad es. a Ramsen). Le informazioni di riferimento sull'irrigazione effettiva sono state estremamente preziose per il lavoro, poiché hanno permesso di confrontare al meglio le stime del modello con la realtà. Tuttavia, anche tali dati hanno mostrato una varianza molto elevata che non può essere spiegata dal modello. Ciò è dovuto al fatto che i singoli agricoltori non decidono quando irrigare solo in base all'umidità del suolo e al fabbisogno idrico delle piante, ma sono anche influenzati da diverse considerazioni economiche e personali.

1 Hintergrund

Als Wasserschloss Europas wird die Schweiz bisher kaum mit dem Problem der Wasserknappheit in Verbindung gebracht. Dennoch führt Wasserknappheit lokal und zeitlich begrenzt schon heute immer häufiger zu Entnahmeverboten aus Oberflächengewässern für landwirtschaftliche Bewässerung (EBP, 2019). Gemäss Studien wird erwartet, dass der Wasserbedarf für Bewässerung in Zukunft weiter ansteigt, während Gebietsabflüsse – insbesondere in den Sommermonaten – abnehmen (Holzkämper et al., 2020; Zarrineh et al., 2020; Klein et al., 2014). Das stellt sowohl die LandwirtInnen als auch die kantonalen Ämter, die mit der Vergabe von Nutzungsrechten betraut sind, vor grosse Herausforderungen. LandwirtInnen ergreifen Massnahmen, um sich für die Zukunft besser abzusichern. Sie bilden Bewässerungsgenossenschaften und investieren in Bewässerungsinfrastruktur für Entnahmen aus grösseren, «sichereren» Quellen. Somit steigt potenziell der Druck auf diese Wasserressourcen nicht nur aufgrund des fortschreitenden Klimawandels, der in den Mittellandregionen eine Reduktion der Abflüsse im Sommer bedingt (BAFU (Hrsg.), 2021), sondern auch aufgrund zunehmenden Wasserbedarfs der landwirtschaftlichen Kulturen. Ob und wo solche Änderungen langfristig zu Problemen führen können, ist schwer abschätzbar, da es nur unzureichende Informationen über den Wasserverbrauch für die landwirtschaftliche Bewässerung gibt (HAFL et al. (Hrsg.), 2023; Weber & Schild, 2007). Frühere Beurteilungen des landwirtschaftlichen Wasserbedarfs in der Schweiz gehen auf Expertenschätzungen auf Basis von Kulturanteilen und Umfragen zurück (Weber & Schild, 2007). In dieser Arbeit schätzte das Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) aufgrund der Flächen- und Mengenangaben aus den Kantonen den gesamten Wasserbedarf auf 144 Mio. m³ für ein durchschnittliches Trockenjahr, in welchem die gesamte vermutliche Fläche von 55'000 ha bewässert wird. Es ist dabei nicht bekannt, ob und welche Änderungen es in den vergangenen Jahren in der landwirtschaftlichen Wassernutzung gab. Das BLW registriert Informationen über Art, Gemeinde und Dimension der vom Bund subventionierten Bewässerungsprojekte seit 2003. Dabei werden allerdings nur die subventionierten Bewässerungsprojekte erfasst. Informationen über Infrastrukturverbesserungen, die ohne Subventionierung vorgenommen werden, fehlen. Somit sind Auswertungen bezüglich zeitlicher Veränderungen in der landwirtschaftlichen Wassernutzung auf Basis dieser Informationsquelle nur bedingt aussagekräftig.

Im Rahmen des Agrarmonitorings (www.agrarmonitoring.ch) werden einzelne Informationen zur landwirtschaftlichen Wassernutzung erfasst. Die zentrale Auswertung von Agrarumweltindikatoren (ZA-AUI) enthält einzelne, aber bislang sehr lückenhafte Informationen zu bewässerten Kulturen und Kulturflächen. Im Rahmen der Zentralen Auswertung der Buchhaltungsdaten (ZA-BH) werden darüber hinaus Kosten für Wasser und Kosten für bewegliche Anlagen (häufig Beregnungsanlagen) erfasst. Eine Auswertung dieser Daten ergab, dass in den letzten 30 Jahren ein klarer Trend zu steigenden Wasserkosten ersichtlich ist (Seiler et al., 2022). Wie die Studie zeigt, lagen die durchschnittlichen Ausgaben eines landwirtschaftlichen Betriebs für Wasser 1990 noch bei 505 Franken. 2019 lagen die Wasserkosten, inflationsbereinigt, bereits bei 1'213 Franken. Der höchste Kostenanstieg befindet sich bei Tierhaltungsbetrieben, bei denen die Wasserkosten von 600 auf 1'400 Franken anstiegen. Der Anteil der Betriebe, die Ausgaben für Wasser in ihrer Buchhaltung angaben, stieg im gleichen Zeitraum von 63 auf 73 Prozent. Am höchsten ist er bei den Spezialkultur-Betrieben, bei denen über 90 Prozent Wasserausgaben verbuchten. Ungewiss bleibt hierbei jedoch, inwieweit die belegten Trends auf klimatischen Änderungen bzw. fortschreitenden Agrarstrukturwandels zurückzuführen sind.

Die kantonalen Ämter verfügen über Informationen über die Anzahl vergebener Konzessionen für Wasserentnahmen. Erhobene Informationen darüber variieren zwischen den Kantonen (z.B. Koordinaten der Wasserentnahmen; Dauer der Nutzungsrechte; maximale Nutzungsmenge; maximale Pumpleistung; tatsächlich entnommene Wassermengen pro Jahr; siehe (HAFL et al. (Hrsg.), 2023).

Seit 2010 erhebt das Bundesamt für Statistik (BFS) im Rahmen der landwirtschaftlichen Betriebszählungen in regelmässigen Abständen stichprobenhaft Informationen über die Bewässerung im Freiland (i.e. bewässerte Flächen nach Kulturen, Bewässerungsmethoden, Herkunft des Bewässerungswassers). Bislang erhobene Daten decken die Jahre 2010, 2013, 2016, 2020 und 2023 ab und bilden bislang schweizweit die beste Datengrundlage zur landwirtschaftlichen Bewässerung. Die Daten erlauben eine räumliche Auflösung der Informationen bis auf kantonale Ebene, eine Ermittlung von zeitlichen Trends ist auf Basis der bisher erhobenen Daten allerdings nicht möglich. Die neuste Erhebung für das Jahr 2023 ergab einen Schätzwert von 37.4 Mio. m³ Wasserverbrauch für die landwirtschaftliche Bewässerung in der Schweiz. Die Kantone mit den höchsten Wassermengen waren Wallis (13,9

Mio. m³), Waadt (4,3 Mio. m³) und Bern (3,6 Mio. m³). Es wird geschätzt, dass ca. 3,3% der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche bewässert wurden. Am meisten Wasser wurde gemäss der Schätzung für Grünland (12,8 Mio. m³), Gemüse (9,4 Mio. m³) und Obst (5,3 Mio. m³) verwendet.

2 Ziel

Im Rahmen des Projektes SwissIrrigationInfo war es Ziel, zu prüfen, inwieweit es möglich ist, ausgehend von national verfügbaren Informationsgrundlagen, den Wasserverbrauch für Bewässerung modellbasiert abzuschätzen und damit bestehende Informationslücken zu schliessen. Kernstück der Schätzungen bildet dabei die FAO56-Methode zur Abschätzung potenzieller Bewässerungsbedürfnisse von Nutzpflanzen in Abhängigkeit von Klima und Bodeneigenschaften (Allen et al., 1998). Modellbasierte Abschätzungen des Bewässerungsbedürfnisses wurden bislang zumeist mit dem Ziel der Quantifizierung von Klimawandeleinflüssen auf den potenziellen Bewässerungsbedarf durchgeführt (z.B. Fuhrer & Jasper, 2012; Fuhrer & Smith, 2015; Holzkämper et al., 2020), der vom tatsächlichen Wasserverbrauch für Bewässerung zuweilen stark abweichen kann. Tendenziell liegt der potenzielle Bedarf über den tatsächlich eingesetzten Bewässerungsmengen, da Bewässerung nicht für alle Kulturen gleich gewinnbringend und Bewässerungswasser nicht überall gleich gut verfügbar ist. Bewässerung ist mit direkten Kosten und grossem Aufwand verbunden, was durch einen Mehrertrag der Kultur gedeckt werden muss. Jedoch ist auch ein Wassereinsatz über dem potenziellen Bedarf möglich, zum Beispiel wenn Bewässerungsinfrastruktur nicht jederzeit zur Verfügung steht und absehbar ist, dass der Bewässerungsbedarf in der folgenden Phase, in der nicht bewässert werden kann, hoch sein wird. Das Entscheidungsverhalten der LandwirtInnen beim Einsatz von Bewässerung ist sehr variabel und limitiert die modell-gestützte Vorhersagbarkeit der eingesetzten Bewässerungsmengen. Nichtsdestotrotz war es Ziel, in dieser Projektarbeit die tatsächlichen Verbrauchsmengen abzuschätzen. Zu diesem Zweck wurden die Modelle an verfügbare Daten zu applizierten Bewässerungsmengen angepasst. Schätzungen der Bewässerungsmengen wurden nur für die Agrarflächen durchgeführt, die als potential bewässerte Gebiete anzunehmen sind. Die Modellschätzungen wurden auf lokaler und schweizweiter Ebene anhand von aufgezeichneten Bewässerungsinformationen validiert. Anschliessend wurden die Bewässerungsmengen für die gesamte Schweiz in den Jahren 2021 bis 2023 exemplarisch abgeschätzt. Zusätzlich wurden auf Basis von Klimaprojektionen für die Zukunft Modellrechnungen für ausgewählte Standorte und Kulturen vorgenommen.

3 Datengrundlagen

Als Grundlage für die Modellanwendung wurden Informationen zu Bodeneigenschaften, Klima und Kulturart benötigt. Zusätzlich war es nötig, potenziell bewässerte Gebiete auszuweisen, da nicht alle Landwirtschaftsflächen bewässert werden können. Für die kulturspezifischen Modellanpassungen wurden parzellenspezifische Informationen zu eingesetzten Bewässerungsmengen für unterschiedliche Kulturen und Jahre verwendet. Zur Validierung der Modellschätzungen auf regionaler Ebene wurden sowie kantonale Daten zur aufgezeichneten Wasserentnahmemengen verwendet. Alle eingesetzten Datengrundlagen sind im Folgenden beschrieben.

3.1 Bodeninformationen

Als schweizweit verfügbare Datengrundlage für Bodeninformationen wurden in dieser Studie, die vom Kompetenzzentrum Boden (KOBO) auf Basis der verfügbaren Bodendaten aus dem Bodeninformationssystem NABODAT erstellten Hinweiskarten für Bodeneigenschaften verwendet (Version 2; (Stumpf et al., 2024, 2023)). Diese Bodeneigenschaftskarten wurden mittels Maschinellem Lernen, sowie punktbasierter Bodendaten des Bodeninformationssystem NABODAT und flächendeckend verfügbarer Fernerkundungsdaten erstellt (Stumpf et al., 2024; NABODAT, 2025). Die Bodenhinweiskarten liegen in einer räumlichen Auflösung von 30 x 30 m vor und beinhalten flächendeckende Informationen zu Ton-, Schluff, Sand- und organischem Kohlenstoffgehalt, sowie dem pH-Wert und der potenziellen Kationenaustauschkapazität für drei Tiefenstufen (0-30 cm; 30 - 60 cm; 60 - 120 cm). Die im Rahmen dieser Studie verwendeten Hinweiskarten beschränken sich auf Informationen zu Bodentextur und organischem Kohlenstoff pro Tiefenstufe, um auf Basis einer Pedotransfer-Funktion (eupft2, Szabó et al. (2021)) die Modellparameter zur Charakterisierung der Bodeneigenschaften abzuleiten (d.h. permanenter Welkepunkt und Feldkapazität). Der Wassergehalt bei Feldkapazität wurde bei einer Matrixpotentialhöhe von -100 cm bestimmt und der Wassergehalt beim Welkepunkt bei einer Matrixpotentialhöhe von -15'000 cm (Szabó et al., 2021). Die Information über die Bodentiefen wurde aus den Gründigkeitsklassen der Bodeneignungskarte (Frei et al., 1980) für die Schweiz abgeleitet (KOBO, *unveröffentlichte Daten*). Aufgrund der Rasterung enthielten die digitalen Hinweiskarten kleine Lücken in der Nähe von Seen, bebauten Gebieten oder Gebirge. Diese Lücken wurden für diese Arbeit mit über 20 Pixel interpoliert. In Abbildung 1 sind die verwendeten Bodeneigenschaften sowie Gründigkeitsklassen graphisch dargestellt.

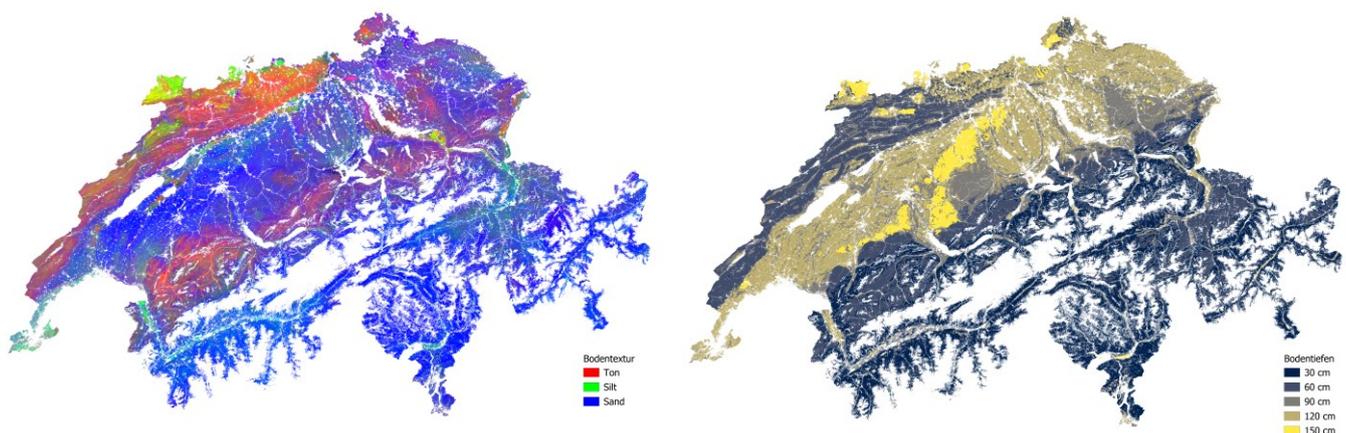


Abbildung 1: Verfügbare Hinweiskarten für Bodeneigenschaften im Oberboden (0 – 30 cm Tiefe) sowie Gründigkeitsklassen in einer schweizweiten Übersicht ((Stumpf et al., 2023) & KOBO (*unveröffentlichte Daten*)).

Um die Varianz landwirtschaftlich genutzter Böden abzudecken, wurden für die Zukunftsprojektionen neun verschiedene Bodenarten betrachtet (Tabelle 1).

Tabelle 1: Wassergehalte bei Feldkapazität und permanentem Welkepunkt für neun verschiedene Bodenarten gemäss Tabelle 19 in Allen et al. (1998).

Bodenart	Feldkapazität [Vol-%]	Permanenter Welkepunkt [Vol-%]
Sand	0.12	0.045
Lehmiger Sand	0.15	0.065
Sandiger Lehm	0.23	0.11
Lehm	0.25	0.12
Schluffiger Lehm	0.29	0.15
Schluff	0.32	0.17
Schluffiger, toniger Lehm	0.335	0.205
Schluffiger Ton	0.36	0.23
Ton	0.36	0.22

3.2 Klimainformationen

Die für die Modellierung notwendigen Klimainformationen wurden aus den Gitterdatenprodukten von MeteoSchweiz extrahiert (minimale und maximale Temperaturen, Niederschläge und Globalstrahlung in täglicher Auflösung) (MeteoSwiss, 2021). Die Daten zu Temperatur und Niederschlag liegen für die Schweiz im Koordinatensystem CH1903+ (LV95) in 1 km Rasterung vor. Die Daten zur Globalstrahlung hingegen liegen im Koordinatensystem EPSG:4326 (Auflösung: 2.3 x 1.6 Kilometer) vor. Zur Umwandlung von EPSG:4326 in LV95 wurde die Python-Bibliothek «pyproj» verwendet. Da die Daten teilweise auf Satellitenbildinformationen basieren, gibt es Datenlücken, die sich teilweise über mehrere Tage erstrecken. Solche Datenlücken wurden durch lineare Interpolation geschlossen.

Für die Berechnungen der Bewässerungsbedürfnisse unter Klimawandel wurden die stationären Klimaprojektionen von CH2018 als Grundlage verwendet (CH2018, 2018). Zur Verfügung standen stationsweise Daten für Niederschlag, Temperatur sowie Strahlung in täglicher Auflösung von 1981 bis 2099. Klimaszenarien werden auf Basis von unterschiedlichen Emissionspfaden (representative concentration pathways = RCPs) berechnet. Für dieses Projekt wurden die RCP 4.5 (begrenzter Klimaschutz) und RCP 8.5 (kein Klimaschutz) genutzt, um Bewässerungsmengen für die Zukunft abzuschätzen. Für jedes RCP werden die Projektionen aus unterschiedlichen Modellketten verwendet (RCP 4.5: 25 Modellketten und RCP 8.5: 30 Modellketten, Anhang 9.1) (CH2018, 2018).

3.3 Bewirtschaftungsdaten

Als schweizweit verfügbare Datengrundlage zur landwirtschaftlichen Bewirtschaftung wurden die parzellenscharf verfügbaren Daten zu den landwirtschaftlichen Nutzflächen der Jahre 2021, 2022 und 2023 verwendet (KGK-CGC, 2023). Diese Landnutzungsdaten beinhalten Informationen zu Hauptkulturen, Wiesen und Biodiversitätsförderflächen und werden von den Kantonen im Rahmen der Direktzahlungsverordnung erhoben. Durch die Kantone wurden die Daten aufbereitet, anschliessend schweizweit gesammelt und stehen durch geodienste.ch nun öffentlich zur Verfügung. Aufgrund der heterogenen Herkunft wurden alle Daten mit «Feature Manipulation Engine» (FME) in eine Datenbank importiert und dabei bereinigt:

- Korrekte Topologie
- Nur Polygone
- Vertex-Koordinaten auf zwei Nachkommastellen gerundet
- Duplikate entfernt

Der Fokus dieses Projektes lag auf bewässerungswürdigen Freilandkulturen. Auf Grundlage der verfügbaren Landnutzungsdaten wurden folgende bewässerungswürdige Kulturen/Kulturgruppen ausgewählt:

- Einjährige Beeren
- Mehrjährige Beeren
- Gemüse (Freiland-Konservengemüse und einjähriges Freilandgemüse, ohne Konservengemüse)

- Kartoffeln
- Mais (Körnermais, Silo- und Grünmais und Saatmais)
- Obst (Äpfel, Birnen, Steinobst, Obstanlagen aggregiert, Obst andere Anlagen)
- Reben (Reben und Rebflächen mit natürlicher Artenvielfalt)
- Tabak
- Wiesen (Übrige Dauerwiesen ohne Weiden und Kunstwiesen ohne Weiden)
- Zuckerrüben

Für diese Kulturen wurden anhand der Polygone die jeweiligen angebauten Flächen bestimmt. Ausserdem wurden die Duplikate entfernt, die dieselbe Geometrie aufweisen. Im ersten Schritt beim Import wurden nur diejenigen Duplikate entfernt, die auch dieselbe «uuid» hatten. Trotz der Geometriebereinigung blieben einige Geometrieprobleme bestehen, die in fehlenden Georeferenzierungen von Parzelleninformationen in den Jahren 2021 und 2022 resultierten. In dieser Arbeit betrafen die Geometrieprobleme die Kategorie «Beeren mehrjährig» für das Jahr 2021 und 2022 sowie «Obst» im Jahr 2022.

3.4 Potenziell bewässerte Gebiete

Um eine regionale oder schweizweite Abschätzung der Bewässerungsmengen durchführen zu können, bildet die Ausweisung potenziell bewässerter Flächen eine wichtige Grundlage. Da eine schweizweite Ausweisung potenziell bewässerter Gebiete bislang nicht besteht, wurde in einer Teilstudie des Projektes untersucht, inwieweit Fernerkundungsdaten als Grundlage für die Ausweisung bewässerter Gebiete in der Schweiz dienen können (siehe detaillierte Dokumentation der Arbeiten im Anhang 9.2). Dabei zeigte sich, dass in einigen Jahren Unterschiede zwischen bewässerten und nicht bewässerten Flächen in den Zeitreihendaten erkennbar waren. Gleichzeitig zeigte sich jedoch auch, dass mit dem vorhandenen Testdatensatz und ausschließlich auf Basis der Satellitendaten kein robuster Klassifizierungsalgorithmus entwickelt werden konnte, der eine zuverlässige Unterscheidung über verschiedene Standorte, Jahre und Sorten hinweg ermöglichen würde. Mit weiteren Geoinformationen (z.B. detaillierte Bodeninformationen) und einem umfangreicheren Trainingsdatensatz könnte in Zukunft eine bessere Unterscheidbarkeit erreicht werden.

Schliesslich musste für diese Studie eine Abgrenzung bewässerter Gebiete auf anderer Grundlage vorgenommen werden. Diese stützte sich auf die im Rahmen des Projektes zusammengetragenen Geodaten zu Standorten konzessionierter Wasserentnahmestellen und von kantonalen Stellen ausgewiesenen Bewässerungsflächen (HAFL et al., 2023). Gemäss Expertenangaben (Auskunft Simon Baumgartner, Smart Farming Engineer) wird angenommen, dass mobile Pumpstationen Wasser über eine durchschnittliche Entfernung von 1'600 Metern transportieren können (unter Berücksichtigung von Gefälle, Schlauchdurchmesser sowie Pumpenkapazität). In dieser Arbeit wurden deshalb Puffer mit einem Radius von 1.6 Kilometern um die Entnahmestandorte gelegt und das resultierende Polygon-Layer mit den von den Kantonen ausgewiesene Bewässerungsflächen verbunden. Das Ergebnis ist in Abbildung 2 dargestellt. Zu beachten ist hier, dass sich die Genauigkeit der kantonalen Angaben zu den Wasserentnahmestellen und den ausgewiesenen Bewässerungsflächen zum Teil stark unterscheidet.

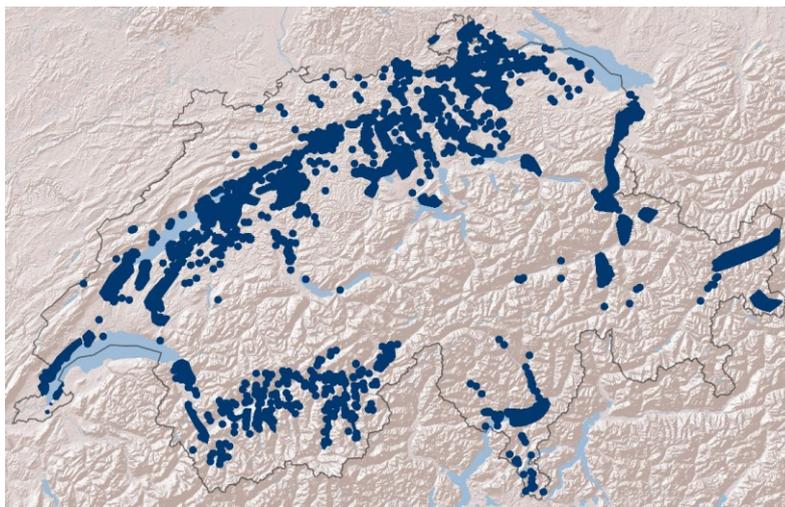


Abbildung 2: Karte potenziell bewässerter Gebiete in der Schweiz (Hintergrundkarte: ESRI, Zugriff: 20.01.2024).

3.5 Referenzinformationen Bewässerung

Als Referenzinformationen für kultur-spezifische Modellanpassungen dienten Daten zur Praxisbewässerung von Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL, 2022) zu Kartoffeln und einzelnen Gemüsesorten sowie Daten, die im Rahmen des Ressourcenprojekts «Effiziente Bewässerung Vaud» (2018-2023) zu verschiedenen Acker- und Gemüsekulturen erhoben wurden (Tabelle 2). Diese Referenzdaten beziehen sich mehrheitlich auf die Südwestschweiz und beinhalteten Informationen über die Bewässerungsmengen pro Einzelgaben für einzelne Kulturen, Parzellen/Gemeinde und Jahre.

Tabelle 2: Zusammenfassung der verfügbaren Referenzinformationen zur Praxisbewässerung verschiedener Kulturen/Kulturgruppen aus Kapitel 3.3 (Quellen: Ressourcenprojekt «Effiziente Bewässerung Vaud», HAFL (2022)).

Kultur	Anzahl Datenpunkte für die Modellanpassungen	Unterschiedliche Standorte	Jahre
Beeren einjährig	27	6	2018-2023
Beeren mehrjährig	10	5	2018-2023
Gemüse ¹	196	59	2018-2023
Kartoffel ²	677	172	2018-2023
Mais ³	142	48	2018-2023
Obst – Äpfel	134	27	2018-2023
Obst – Birnen	17	12	2018-2023
Obst – Anderes	18	5	2018-2023
Obst – Steinobst	21	16	2018-2023
Reben	-	-	-
Tabak	64	12	2018-2023
Grünland	-	-	-
Zuckerrüben	95	41	2018-2023

¹ Berücksichtigt: Leguminosen, Rhabarber, Spargel, Chicorée, Freilandgemüse und Freilandgemüse bedeckt

² Nicht berücksichtigt: Kartoffelsetzlinge

³ Berücksichtigt: Körnermais, Silomais und Maissetzlinge

Wasser kann für die Bewässerung aus Grundwasser, Oberflächengewässer oder allenfalls auch aus Trinkwasserquellen bezogen werden. Diese Entnahmemengen werden unterschiedlich erfasst, so werden in einigen Kantonen nur einzelne Wasserquellen oder teilweise auch nur konzessionierte Mengen zusammengetragen. Eine detaillierte Beschreibung verfügbarer Daten zur landwirtschaftlichen Bewässerung ist in HAFL et al. (2023) zu finden. Gemäss HAFL et al. (2023) verfügen beispielsweise die Kantone Aargau, Schaffhausen, Thurgau und Zürich

mindestens teilweise über Informationen zu entnommenen Wassermengen für die Bewässerung. Für eine Validierung der regionalen Schätzungen der Bewässerungsmengen wurden solche Daten aus den Kantonen Schaffhausen (Biberal) und Thurgau (Untersee und gesamter Kanton) verwendet, da in diesen Gebieten die Zuordnung bewässerter Flächen zu einzelnen Entnahmestandorten mit aufgezeichneten Wasserentnahmemengen vergleichsweise gut möglich war.

4 Methoden

Im Rahmen der Projektarbeiten wurde anknüpfend an Eisenring et al. (2021) und Fuhrer & Smith (2015) die etablierte Methode zur Abschätzung des kulturspezifischen Wasserbedarfs FAO56 (Allen et al., 1998) verwendet. Für die Anwendung der FAO56-Methode auf die gesamte Schweiz wurden für alle als potenziell bewässert angenommenen Landnutzungsklassen Parametrisierungen vorgenommen. Schätzungen der Bewässerungsmengen für die gesamte Schweiz wurden für die Jahre 2021 – 2023 durchgeführt. Basierend auf stationären Klimaprojektionen (CH2018, 2018) wurden anschliessend für die verfügbaren Standorte, Schätzungen für zukünftige Bewässerungsmengen der 10 Nutzungsklassen gemacht und dann schweizweit mithilfe der Landnutzungsdaten aus dem Jahr 2023 hochgerechnet.

Der Einsatz des komplexeren agrohydrologischen Modells SWAP (Kroes et al., 2017) wurde im Rahmen dieser Studie getestet, um festzustellen, ob mit einem genaueren Ansatz auch genauere Schätzungen der Bewässerungsmengen möglich sind als mit der FAO56-Methode. Die beiden Modellansätze wurden in Bezug auf ihre Einsetzbarkeit zur Schätzung zeitlicher und räumlicher Unterschiede im Wasserverbrauch für Bewässerung von Kartoffeln in der Broye-Region getestet (siehe Anhang 9.3).

4.1 Modell FAO56

Das Modell FAO56 basiert auf der Methode der Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), welche 1977 das erste Mal vorgestellt und mit dem veröffentlichten Bericht No.56, dem Stand der Wissenschaft angepasst wurde (Allen et al., 1998). Die Methode ist auch bekannt unter dem « $K_c ET_0$ »-Ansatz, bei dem der Effekt des Klimas auf den Wasserbedarf verschiedener Kulturen in ET_0 und der Effekt der Kultur im Kultur-Koeffizient K_c widerspiegelt wird, was schlussendlich zu angepassten Werten für die Evapotranspiration der jeweiligen Kultur führt (Allen et al., 1998). Zwei verschiedene Ansätze können für die Berechnung der kulturspezifischen Evapotranspiration verwendet werden. Die eine besteht aus einem singulären Kultur-Koeffizienten, der die Evapotranspiration der Pflanze sowie von der Oberfläche in einem Koeffizienten zusammenfasst. Beim zweiten Ansatz, dem dualen Kultur-Koeffizienten Ansatz, werden diese beiden Faktoren getrennt voneinander beschrieben. Welcher Ansatz gewählt wird, hängt von der jeweiligen Anwendung ab. In dieser Studie stützen sich die Berechnungen auf den dualen Kultur-Koeffizienten-Ansatz (Abbildung 3).

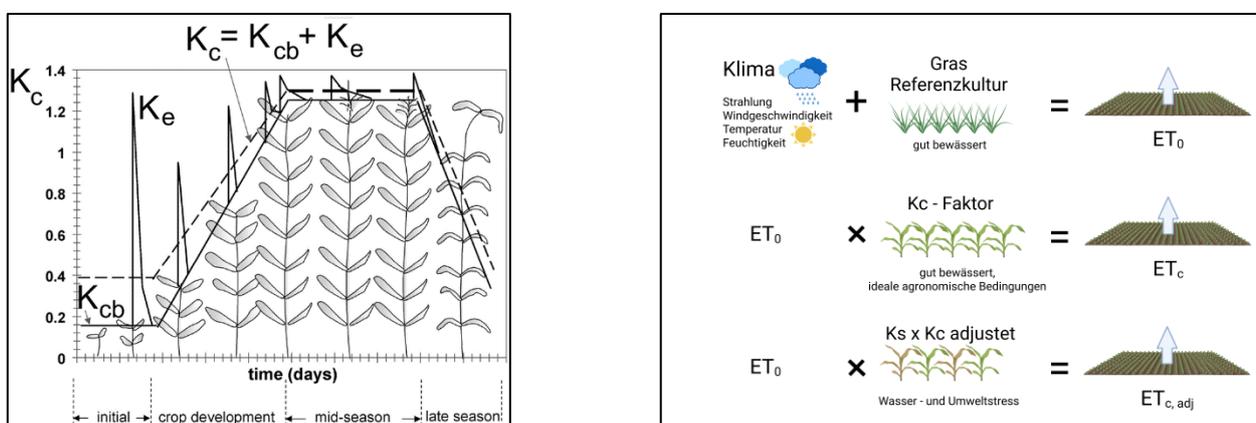


Abbildung 3: Dualer Kultur-Koeffizienten Ansatz von FAO (links) sowie die Anpassung der Referenz-Evapotranspiration an die kultur- und klimaspezifischen Gegebenheiten (rechts). Referenz: links: Abbildung aus (Allen et al., 1998); rechts: Angepasst mit Biorender nach Allen et al. (1998).

Mithilfe der bestimmten kultur- und klimaspezifischen Variablen kann die Evapotranspiration berechnet werden, welche dann in die Bodenwasserbilanz miteinfliesst. Bei der Berechnung der Evapotranspiration fliesst auch die Höhe ü.M. mit ein. Diese Information wurde für diese Arbeit aus dem digitalen Höhenmodell DGM25 von swisstopo extrahiert. Über der Bodenwasserbilanz kann das Defizit an Wasser im Boden berechnet werden (1). Bei der Bodenwasserbilanz handelt es sich um ein «Bucket»-Modell, das täglich berechnet wird und womit der Stress-Koeffizient der Pflanze sowie auch die Bewässerung gesteuert werden kann.

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P - RO)_i - I_i - CR_i + ET_{c,i} + DP_i \quad (1)$$

$D_{r,i}$ Wurzelzonenaustrocknung am Ende des Tages i [mm]

$D_{r,i-1}$ Wassergehalt in der Wurzelzone am Ende des vorherigen Tages ($i-1$) [mm]

P_i Niederschlag am Tag i [mm]

RO_i Abfluss an der Bodenoberfläche am Tag i [mm]

I_i Bewässerungsmenge am Tag i , die in den Boden infiltriert [mm]

CR_i Kappilaraufstieg vom Grundwasserspiegel am Tag i [mm]

$ET_{c,i}$ Kulturspezifische Evapotranspiration am Tag i [mm]

DP_i Wasserverlust durch Tiefenversickerung am Tag i [mm]

Das FAO56-Modell wurde in eine Python-Bibliothek «pyfao56» (Version 1.3.0) mit Anpassungen implementiert, die im Rahmen dieses Projekts verwendet wurde (Thorp, 2022). In der pyfao56-Bibliothek ist eine automatisierte Bewässerungsmethode integriert, die über verschiedene Parameter spezifiziert werden kann. Automatische Bewässerung wird im Rahmen dieser Arbeit ausgelöst, wenn der Bodenwassergehalt in der Wurzelzone unter einen Schwellenwert fällt. Dieser Schwellenwert wird als **mad** (management allowed fraction of root zone depletion [mm/mm]) bezeichnet. Er drückt die Wurzelzonenaustrocknung aus, ab der die automatische Bewässerung einsetzt. Dieser Schwellenwert wird kultur-spezifisch angepasst.

Bei Überschreitung des Schwellenwerts **mad**, simuliert das Modell eine über den Parameter **itfdr** (target fraction of root-zone soil water depletion following autoirrigation [mm/mm]) definierte Bewässerungsgabe. Der Parameter **itfdr** drückt abhängig von der Wurzelzonenaustrocknung aus, wie viel bewässert werden soll. Auch dieser Wert wird kulturspezifisch festgelegt.

Da davon auszugehen ist, dass ein/e Landwirt/-in sich bei der Bewässerungsentscheidung an der Wetterprognose orientiert, wurde das Modell so spezifiziert, dass wenn es in den folgenden drei Tagen zu einer Niederschlagsmenge von mindestens 15 mm kommt, trotz einer Unterschreitung des Grenzwertes nicht bewässert wird. Ausserdem wird die Bewässerungseffizienz in Abhängigkeit von der üblichen Bewässerungsmethode bestimmt: Für Beeren und Obst wurde Tröpfchenbewässerung mit 90% Effizienz und 20% Oberflächenbefeuchtung angenommen; für alle anderen Kulturen wurde Sprinklerberegnung mit 70% Effizienz und 100% Oberflächenbefeuchtung angenommen.

Als Inputparameter für das Modell werden bodenspezifische Wassergehalte bei Feldkapazität und Welkepunkt benötigt. Ausgehend von den verfügbaren Bodeninformationen (Bodentextur und Humusgehalt) wurden diese Parameter hier auf Basis einer Pedotransfer-Funktion hergeleitet (euptf02 nach Szabó et al. (2021)). Für die Meteorodaten wurden die minimale und maximale Temperatur, Niederschlag sowie die Sonneneinstrahlung verwendet, die von MeteoSchweiz als Gitterdaten in täglicher Auflösung zur Verfügung stehen (MeteoSwiss, 2021). Daraus wurde dann mithilfe der Priestley-Taylor Funktion die potenzielle Evapotranspiration berechnet. Alle kulturspezifischen Variablen wurden aus dem FAO-Handbuch entnommen, durch Experten bestimmt oder datenbasiert angepasst und sind im folgenden Kapitel beschrieben.

4.2 Kulturspezifische Modellanpassungen

Für jede der in Kap. 3.3 aufgeführten Kulturen/Kulturgruppen wurden die in Tabelle 3 und Tabelle 4 dargestellten Wachstumsperioden und entsprechenden K_{cb} -Werte festgelegt (Erklärung der Parameter in Tabelle 5). Die Grundlage bildeten dabei die Werte aus (Allen et al., 1998). Anpassungen basieren auf vorangegangenen Arbeiten von Fuhrer & Smith (2015) und Eisenring et al. (2021) sowie auf gesammelten Expertenangaben. Darüber hinaus wurden für diese Arbeit Informationen über die typischen Wachstumsverläufe der Kulturen/Kulturgruppen zusammengetragen.

Tabelle 3: Kulturspezifische Annahmen zur Dauer der Vegetations- und Bewässerungsperioden.

Kultur	Beginn Vegetationsperiode	Ende Vegetationsperiode	Start Bewässerung	Ende Bewässerung
Beeren - einjährig	1. Januar	1. Juli	31. März	1. Juli
Beeren - mehrjährig	31. März	30. September	31. März	30. September
Gemüse ¹	31. März	30. September	31. März	30. September
Kartoffel	15. April	8. September	1. Juni	1. August
Mais	22. April	9. Oktober	1. Juli	1. September
Obst – Äpfel	23. März	26. November	23. März	28. August
Reben	17. April	17. Oktober	3. Juni	2. September
Tabak	15. Mai	1. September	15. Mai	1. September
Grünflächen ²	1. März	31. Oktober	4. Juni	18. August
Zuckerrüben	31. März	6. Oktober	16. April	16. August

¹ Annahme: Gartensalat ohne Zyklusunterbrüche von April bis September

² Annahme: Anfang- und Endperiode sind jedes Jahr gleich

Tabelle 4: Kulturparameter der 10 Kulturen/Kulturgruppen, die für diese Arbeit angenommen wurden (siehe Tabelle 5 zur Erklärung der Akronyme).

Kultur	L _{ini}	L _{mid}	L _{dev}	L _{end}	Kcb _{ini}	Kcb _{mid}	Kcb _{end}	H _{ini}	H _{max}	Zr _{ini}	Zr _{max}	p
Beeren - einjährig	20	30	118	15	0.3	0.8	0.7	0.1	0.2	0.2	0.3	0.2
Beeren - mehrjährig	20	30	118	15	0.2	1.0	0.4	1.5	1.5	1.2	1.2	0.2
Gemüse	20	30	118	15	0.15	0.9	0.9	0.05	0.3	0.05	0.4	0.3
Kartoffel	30	35	50	30	0.15	1.1	0.65	0.1	0.6	0.2	0.5	0.35
Mais	45	50	50	25	0.15	1.15	0.3	0.3	2.0	0.3	1.5	0.55
Obst - Äpfel	16	32	161	39	0.35	0.9	0.65	4.0	4.0	1.5	1.5	0.5
Reben	15	60	60	60	0.15	0.65	0.4	1.8	1.8	1.8	1.8	0.45
Tabak	20	30	30	30	0.15	1.0	0.7	0.3	2.5	0.4	0.8	0.5
Grünflächen	10	30	120	85	0.85	1.0	0.95	0.15	0.3	0.9	0.9	0.6
Zuckerrüben	45	40	70	35	0.15	1.15	0.5	0.1	0.5	0.3	1.0	0.55

Tabelle 5: Beschreibung der Kulturparameter gemäss FAO56.

Kürzel	Definition
L _{ini}	Dauer der anfänglichen Wachstumsphase [d]
L _{dev}	Dauer der Entwicklungsphase der Pflanze [d]
L _{mid}	Dauer der Wachstumsphase in der Zwischensaison [d]
L _{end}	Dauer der Wachstumsphase in der Spätsaison [d]
Kcb _{ini}	Basaler Kulturkoeffizient während der anfänglichen Wachstumsphase [-]
Kcb _{mid}	Basaler Kulturkoeffizient während der Wachstumsphase in der Zwischensaison [-]
Kcb _{end}	Basaler Kulturkoeffizient während der Wachstumsphase in der Spätsaison [-]
H _{ini}	Anfangshöhe der Kultur [m]
H _{max}	Maximale Höhe der Kultur [m]
Z _{r,ini}	Anfängliche Wurzeltiefe [m]
Z _{r,max}	Maximale Wurzeltiefe [m]
p	Depletion-Faktor [-]

Anpassungen der kulturspezifischen Bewässerungsparameter wurden für alle in Kap. 3.3 erwähnten Kulturen durchgeführt. Wo kulturspezifischen Referenzinformationen zur Praxisbewässerung zur Verfügung standen, wurden folgende Performance-Parameter berechnet:

1. Der Willmott-Index (d), der sowohl ein Mass für die Abweichung als auch die Korrelation zwischen Simulation und Beobachtung darstellt (Willmott, 1981). Der Willmott-Index ist weit verbreitet und gilt als «verlässlicher Koeffizient zur Bestimmung der Leistung von Modellen» (Althoff & Rodrigues, 2021). Zu beachten ist aber die hohe Sensitivität gegenüber Fehlern bei hohen Messwerten, während Abweichungen bei niedrigen Werten nur gering ins Gewicht fallen und systematische Fehler das Ergebnis zusätzlich verzerren können (Althoff & Rodrigues, 2021; Krause et al., 2005).
2. Der «Percentage-Bias» (PBIAS), der eine systematische Abweichung der simulierten Werte von den Beobachtungswerten abbildet und so das Ausmass und die Richtung einer Abweichung angibt. Normalisiert wird der Index durch die beobachteten Daten.
3. Der «mittlere absolute Fehler» (MAE) ist ein Mass, das den durchschnittlichen absoluten Fehler zwischen den vorhergesagten und den gemessenen Werten berechnet.
4. Der Nash-Sutcliffe-Koeffizient (NSE) bewertet, wie gut das Modell die Variabilität der beobachteten Daten abbildet (Nash & Sutcliffe, 1970). Grundsätzlich wird der Koeffizient so interpretiert, dass bei einem NSE von 1 eine perfekte Übereinstimmung zwischen Modell und Beobachtung herrscht. Bei 0 ist das Modell so gut wie der Mittelwert, und bei negativen Werten schlechter als der Mittelwert. Ein Nachteil des NSE ist, dass die Fehler quadriert werden, was mit einer Empfindlichkeit gegenüber Ausreissern einhergeht. Ausserdem können konstante Verzerrungen nicht erkannt werden.

Zur datenbasierten Anpassung der FAO56-Methode wurden die Bewässerungsparameter «Bewässerungsschwelle» (mad) und «Bewässerungsmenge» ($itfdr$) für jede Kultur, für die Daten vorhanden waren, schrittweise variiert (in 5% Schritten). Um die beste Parametrisierung zu identifizieren, wurden alle vier oben genannten Performance-Parameter berücksichtigt. Wo keine Referenzdaten zur Verfügung standen sowie im Fall von Gemüse, wurden die Parameter anhand von Literaturangaben und Expertenwissen bestimmt. Die für diese Studie bestimmten Bewässerungsparameter sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Kulturspezifische Bewässerungsparameter.

Kultur/Kulturgruppe	Bewässerungsschwelle mad [%]	Bewässerungsmenge itfdr [%]
Einjährige Beeren	75	65
Mehrjährige Beeren	70	60
Gemüse	70	55
Kartoffel	70	55
Mais	80	70
Obst (Äpfel, Birnen, Steinobst und andere Obstarten)	70	50
Reben	95	90
Tabak	85	85
Grünland	85	80
Zuckerrüben	85	70

Für die Performance-Überprüfung wurden diejenigen Referenzpunkte, die keine Bewässerung in den gemessenen Daten aufweisen, aus der Wertung entfernt. Dies wurde so gewählt, da ungewiss ist, ob die Bewässerung aufgrund des Bedarfs oder technischer Möglichkeiten fehlt oder aber ob einfach vergessen wurde eine Bewässerung einzutragen. Tabelle 7 zeigt die Zusammenfassung der Performance-Masse, die mit den Parametrisierungen aus Tabelle 6 erreicht wurden. Die Metriken deuten hier oft auf beträchtliche Schätzungenauigkeiten hin (siehe auch Scatterplots im Anhang 9.4). Ausschlaggebend für die Abweichungen zwischen Modellschätzungen und Referenzinformationen sind aber nicht allein Modellunsicherheiten. Auch Ungenauigkeiten bei der räumlichen Zuordnung der Referenzinformationen (aus dem Ressourcenprojekt war eine räumliche Zuordnung nur über die Gemeinden möglich), Ungenauigkeiten in den räumlichen Inputdaten (d.h. digitale Bodenkarte, gegitterte Klimadaten), und die Variabilität im Entscheidungsverhalten der LandwirtInnen (Pflanzenwasserbedarf ist nicht das einzige Kriterium, auch Verfügbarkeit von Material und Arbeitskraft sowie persönliche Einschätzung der Mangellage sind entscheidend) spielen eine Rolle.

Tabelle 7: Zusammenfassung der Performance-Masse, die mit den gewählten Parametrisierungen erreicht werden (Erklärung der Metriken Kap. 4.2).

Kultur	Willmott's d	PBIAS [%]	MAE	NSE
Einjährige Beeren	0.26	-45.28	64.67	-0.31
Mehrjährige Beeren	0.73	-27.26	54.89	-0.05
Gemüse	0.53	50.76	117.80	-0.29
Kartoffel	0.78	-5.51	22.47	0.27
Mais	0.78	-16.23	35.88	0.35
Obst – Apfel	0.65	-7.62	90.46	0.29
Reben	-	-	-	-
Tabak	0.44	-44.24	21.72	-3.52
Wiesen	-	-	-	-
Zuckerrüben	0.52	-18.43	31.84	0.02

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Flächenhafte Modellschätzungen für die Schweiz

Basierend auf den Landnutzungsdaten für die Jahre 2021, 2022 und 2023, den räumlichen Bodendaten und den räumlichen Klimadaten wurden für alle Parzellen mit bewässerten Kulturen im Perimeter potenziell bewässerter Gebiete Berechnungen der saisonalen Bewässerungsmengen (in mm) durchgeführt. Die berechneten Bewässerungsmengen sind in Abbildung 4 graphisch dargestellt. Erwartungsgemäss sind die geschätzten Bewässerungsmengen für das nasse Jahr 2021 deutlich niedriger als für die beiden Folgejahre, wobei die Mengen aufgrund der Verteilung der Kulturarten kleinräumig variieren. Die höchsten Bewässerungsmengen in mm werden für Spezialkulturen geschätzt, die flächenmässig im Vergleich zu den Ackerflächen und Wiesen wenig ins Gewicht fallen. Räumliche Unterschiede in den geschätzten Bewässerungsmengen, die auf klimatische Unterschiede zurückzuführen sind, werden in den kulturspezifischen Karten in Abbildung 5 bis Abbildung 14 besser deutlich.

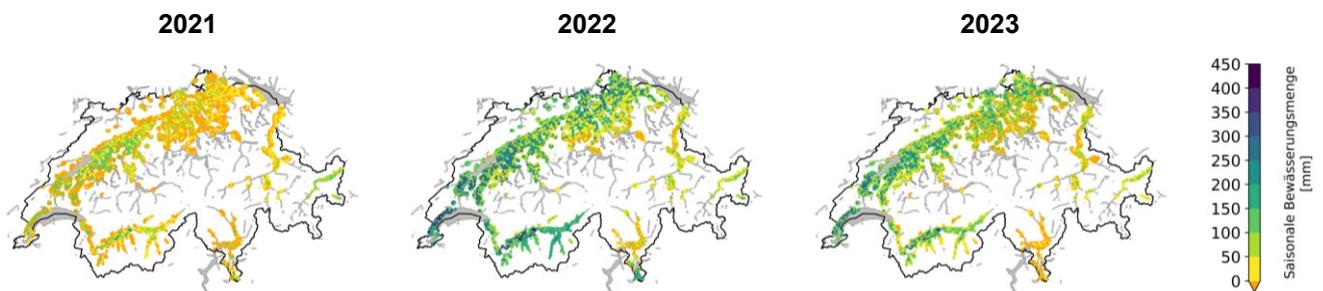


Abbildung 4: Modellerte Bewässerungsmengen auf Parzellenebene in Abhängigkeit von Kultur, Boden und Klima in 2021, 2022 und 2023 (von links nach rechts; Hintergrund: Swisstopo). Für bessere Sichtbarkeit sind die Karten im Anhang 9.5 grösser dargestellt.

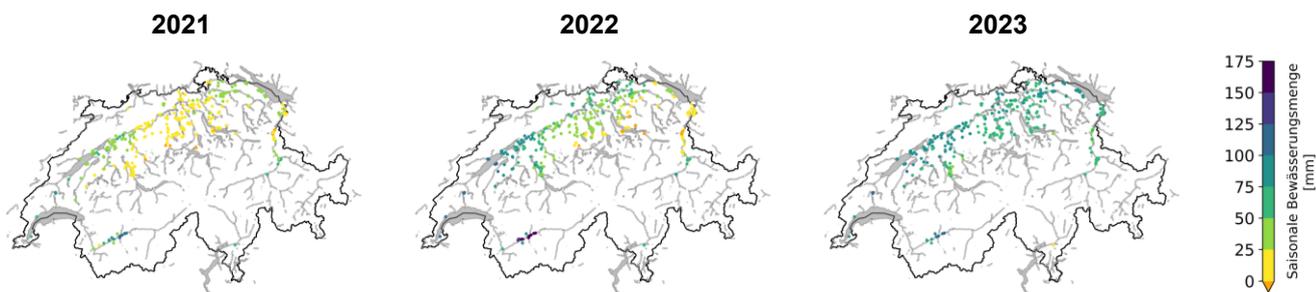


Abbildung 5: Saisonale Bewässerungsmengen der Kultur "Einjährige Beeren" schweizweit im bewässerten Gebiet für die Jahre 2021, 2022 und 2023 (von links nach rechts; Hintergrund: Swisstopo).

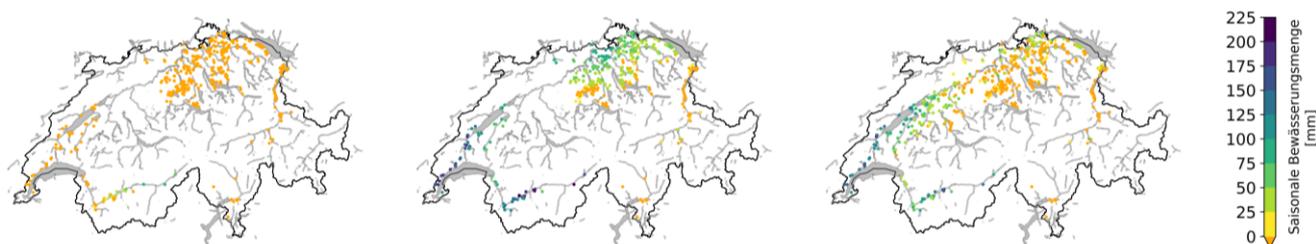


Abbildung 6: Saisonale Bewässerungsmengen der Kultur "Mehrjährige Beeren" schweizweit im bewässerten Gebiet für die Jahre 2021, 2022 und 2023 (von links nach rechts; Hintergrund: Swisstopo).

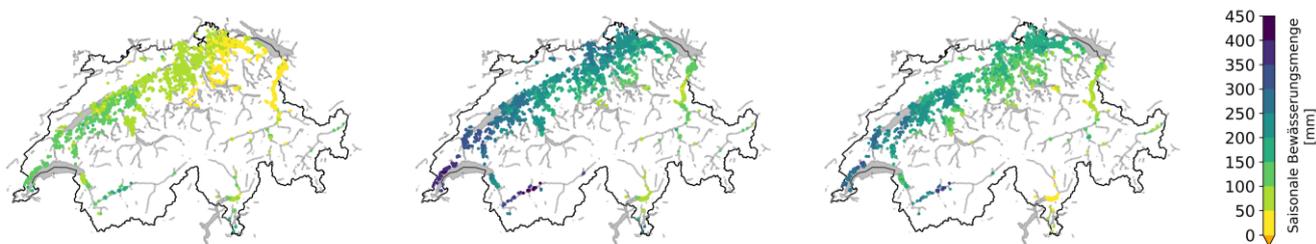


Abbildung 7: Saisonale Bewässerungsmengen der Kultur "Gemüse" schweizweit im bewässerten Gebiet für die Jahre 2021, 2022 und 2023 (von links nach rechts; Hintergrund: Swisstopo).

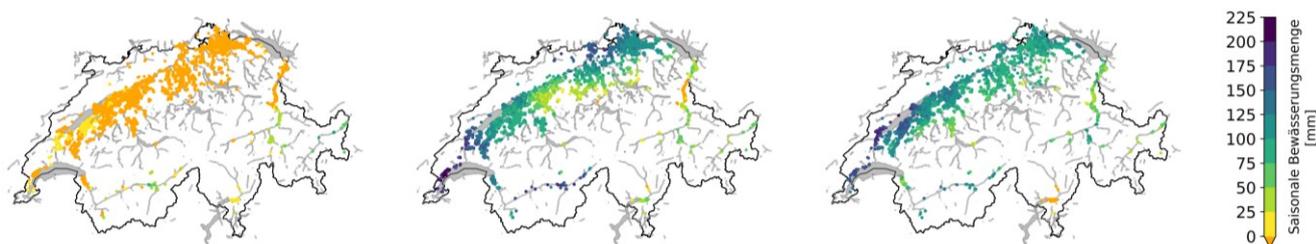


Abbildung 8: Saisonale Bewässerungsmengen der Kultur "Kartoffel" schweizweit im bewässerten Gebiet für die Jahre 2021, 2022 und 2023 (von links nach rechts; Hintergrund: Swisstopo).

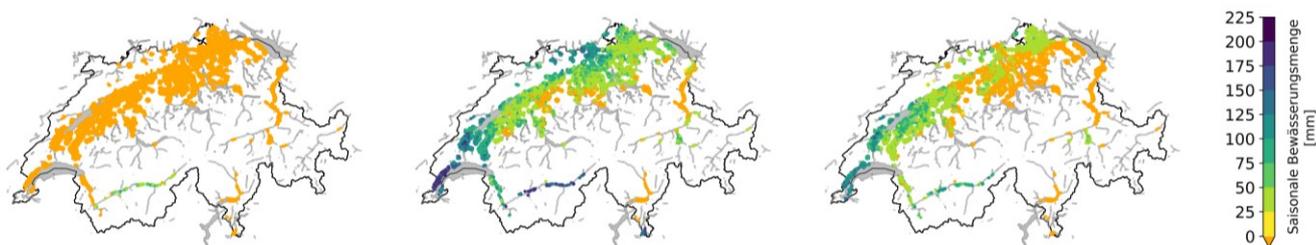


Abbildung 9: Saisonale Bewässerungsmengen der Kultur "Mais" schweizweit im bewässerten Gebiet für die Jahre 2021, 2022 und 2023 (von links nach rechts; Hintergrund: Swisstopo).

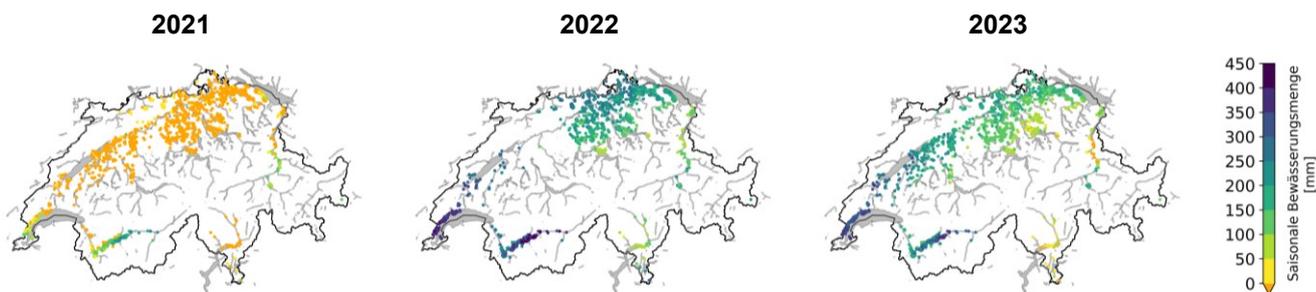


Abbildung 10: Saisonale Bewässerungsmengen der Kultur "Obst" schweizweit im bewässerten Gebiet für die Jahre 2021, 2022 und 2023 (von links nach rechts; Hintergrund: Swisstopo).

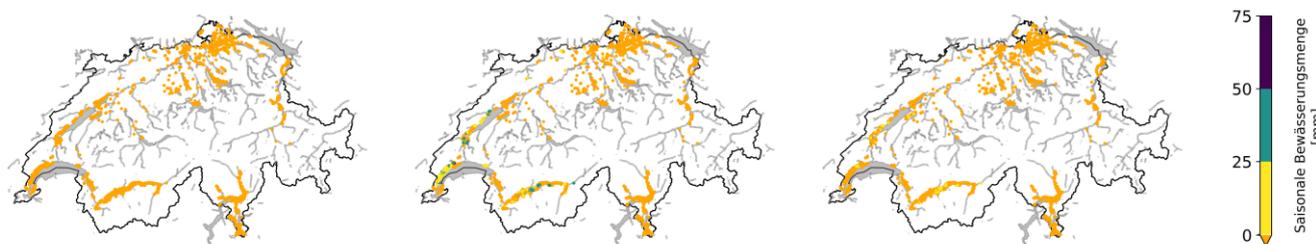


Abbildung 11: Saisonale Bewässerungsmengen der Kultur "Reben" schweizweit im bewässerten Gebiet für die Jahre 2021, 2022 und 2023 (von links nach rechts; Hintergrund: Swisstopo).

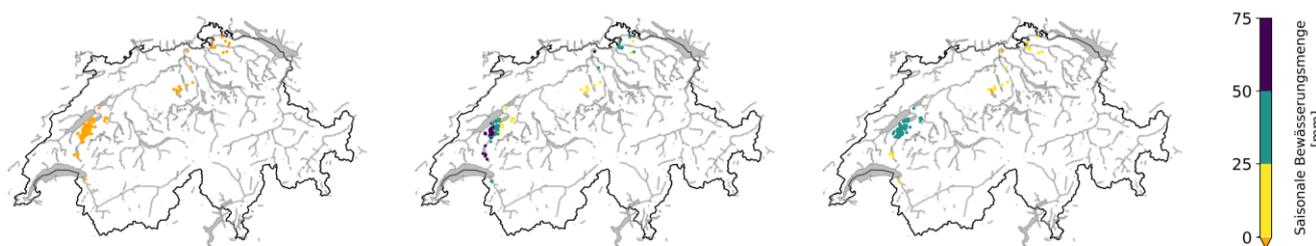


Abbildung 12: Saisonale Bewässerungsmengen der Kultur "Tabak" schweizweit im bewässerten Gebiet für die Jahre 2021, 2022 und 2023 (von links nach rechts; Hintergrund: Swisstopo).

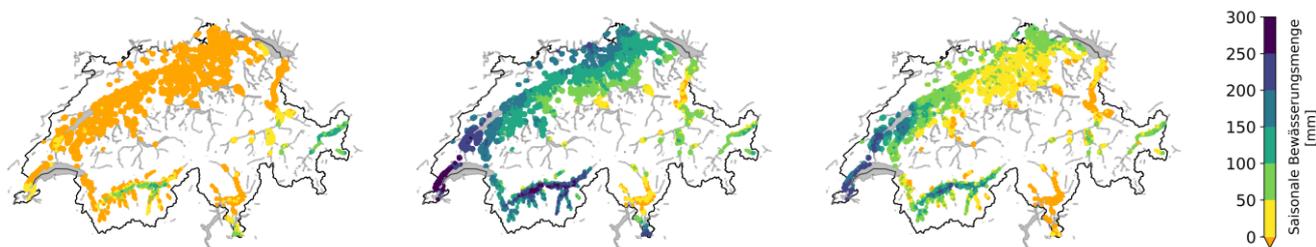


Abbildung 13: Saisonale Bewässerungsmengen der Kultur "Grünflächen" schweizweit im bewässerten Gebiet für die Jahre 2021, 2022 und 2023 (von links nach rechts; Hintergrund: Swisstopo).

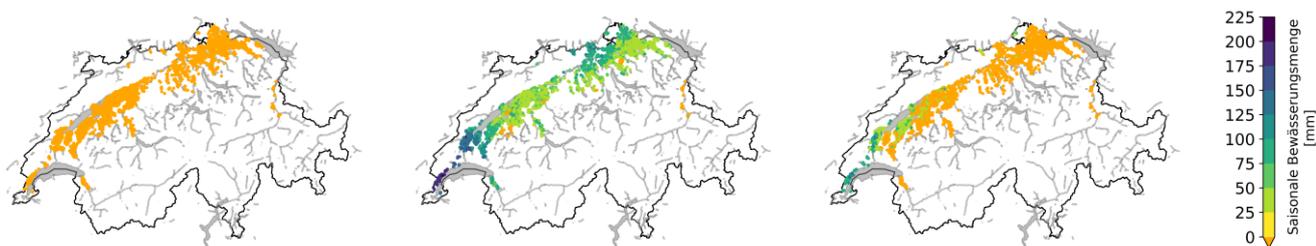


Abbildung 14: Saisonale Bewässerungsmengen der Kultur "Zuckerrüben" schweizweit im bewässerten Gebiet für die Jahre 2021, 2022 und 2023 (von links nach rechts; Hintergrund: Swisstopo).

Die Spanne der Schätzwerte für **ein- und mehrjährige Beeren** in Abbildung 5 und Abbildung 6 deckt sich mit der Spanne der angegebenen Bewässerungsmengen aus dem Ressourcen-Projekt «Effiziente Bewässerung». Hierbei ist allerdings zu beachten, dass die Bewässerungsmengen in der Realität je nach Sorte und Anbauform sehr stark variieren können. Beeren werden in der Schweiz zu ca. 50% im geschützten Anbau produziert, was im Modell nicht beachtet wird. Die Produktion von Beeren wie Erdbeeren oder Himbeeren erfolgt meist gestaffelt; damit einher geht eine Verschiebung des Anbauzyklus, wobei die Anbauphasen, die sich über die Sommermonate erstrecken naturgemäss die bewässerungsintensivsten sind. Dies geht auch aus Daten von Agroscope Conthey für Beerenanbau im Wallis hervor (Informationen Louis Sutter, Agroscope). Je nach Sorte und Anbauform (z.B. Plastiktunnel) variierten die Bewässerungsmengen für Himbeeren im Wallis im Jahr 2023 zwischen 116 und 181 Litern pro Pflanze. Geht man von etwa einer bis zwei Pflanze pro Quadratmeter aus, liegen die Werte in der vorliegenden Arbeit für das Wallis geschätzten Werte etwas tiefer (im Mittel 80 l/m²). Für Erdbeeren liegen die erhobenen Bewässerungsmengen aus dem Wallis im Jahr 2023 zwischen 8 und 17 Litern pro Pflanze. Geht man hier von vier Pflanzen pro Quadratmeter aus, läge die Bewässerungsmenge zwischen 30 und 70 l/m². Die Schätzungen für einjährige Beeren in Abbildung 5 liegen zwischen 50 und 100 l/m², also leicht darüber. Die Schätzungen für einjährige Beeren (Abbildung 5) sind aber grundsätzlich niedriger, als die für mehrjährige Beeren (Abbildung 6), was gemäss den Expertenangaben als realistisch zu erachten ist.

Für intensiven Gemüsebau (z.B. 3-4 Sätze Salat pro Saison) sind die Modellschätzungen für **Gemüse** in Abbildung 7 realistisch. Allerdings sind nicht alle Gemüseflächen gleich intensiv bewirtschaftet und bewässert. Auch wenn die meisten Gemüseflächen grundsätzlich bewässert werden, können sich die Bewässerungsmengen in Abhängigkeit von den angebauten Gemüsekulturen stark unterscheiden, da nicht alle Kulturen dieselben Wasserbedürfnisse haben. Die schweizweit verfügbaren Landnutzungsdaten lassen eine Unterscheidung einzelner Kulturen allerdings nicht zu (es wird nur Freiland-Konservengemüse und einjähriges Freilandgemüse, ohne Konservengemüse unterschieden). Da nur die Hauptkulturen angegeben werden, kann es ausserdem sein, dass nach einer Ackerkultur Gemüse angebaut wurde, ohne dass diese Angabe gemacht wurde. Dies gilt auch für andere Kulturen, ist aber im Falle von Gemüse, das meistens bewässert wird, sehr relevant. Aufgrund der Tatsache, dass bei der Modellschätzung intensiver Gemüsebau angenommen wurde, werden die Bewässerungsmengen tendenziell überschätzt. Wenn man davon ausgeht, dass ein Teil der Gemüseflächen in den Landnutzungsdaten nicht verzeichnet ist, wird diese Überschätzung vermutlich teilweise ausgeglichen. Detailliertere Landnutzungsinformationen zu angebauten Gemüsekulturen würden helfen, die Schätzgenauigkeit zu verbessern.

Für **Kartoffeln** und **Mais** (Abbildung 8 und Abbildung 9) können die Modellschätzungen grundsätzlich als plausibel erachtet werden. Dies zeigen auch die Vergleiche der Modellschätzwerte mit erhobenen Bewässerungsmengen (siehe Anhang 9.4).

Für **Obst** wurden in diesem Projekt verschiedene Kategorien wie Äpfel, Birnen, Steinobst sowie andere Obstarten zusammengefasst und gemäss den Kulturparametern von Äpfeln berechnet (Abbildung 10). Der Vergleich der Modellschätzwerte mit erhobenen Daten zur Praxisbewässerung hat gezeigt, dass die Spannweite der Messwerte mit dem Modell abgedeckt wird (Anhang Kap. 9.4). Trotzdem sind unter anderem durch die Zusammenfassung von unterschiedlichen Obstsorten Unsicherheiten in den Ergebnissen vorhanden. Verschiedene Obstarten wären grundsätzlich im Datensatz der Landnutzung vorhanden. Eine Unterscheidung in verschiedene Obstkulturen wäre hilfreich, um die Schätzgenauigkeit zu erhöhen, da sich sowohl Wachstums- als auch Bewässerungsperioden und -strategien unterscheiden können (Information Thomas Kuster, Agroscope). Dies war in dieser Arbeit allerdings leider nicht möglich, weil die schweizweit verfügbaren Landnutzungsdaten für einige der betrachteten Jahre nur eine unzureichende Unterteilung zulassen: So wurden die Anbauflächen den verschiedenen Kategorien (Äpfel, Birnen, Steinobst, Obstanlagen aggregiert, Obst andere Anlagen) nicht einheitlich zugeordnet (in einzelnen Kantonen und Jahren wurden Äpfel, Birnen und Steinobst nicht unterschieden, sondern der allgemeinen Kategorie «Obstanlagen aggregiert» zugeordnet). Eine Unterteilung für die verschiedenen Obstsorten auch innerhalb der Kategorien würde die Berechnung weiter stützen. Beispielsweise werden Kirschen meist im gedeckten Anbau produziert und deshalb grundsätzlich bewässert. Obstkulturen wie Zwetschgen werden hingegen kaum bewässert. Eine Unterscheidung der Obstkulturen würde deshalb helfen, um die Bewässerungsmenge modellgestützt genauer abschätzen zu können (einerseits, weil sich der Wasserbedarf zwischen den Kulturen unterscheidet, andererseits weil sich die gängige Bewässerungspraxis unterscheidet). Auch der Effekt von abgedeckten Obstsorten konnte nicht genauer ins Modell hineinbezogen werden.

Detailliertere Informationen könnten auch die Modellschätzungen für **Reben** in Abbildung 11 noch erheblich verbessern, da für Reben keine Referenzwerte vorhanden waren, anhand derer das Modell hätte angepasst werden können. Neben der Rebsorte spielen auch Produktionsmethode, Unterlage sowie das Rebenalter eine entscheidende Rolle für die Bewässerung (Kanton Wallis, 2025). Neupflanzungen brauchen mehr Wasser und werden deshalb in trockenen Jahren manchmal bewässert. Ältere Weinberge werden hingegen weniger oder gar nicht bewässert. Diese Unterschiede machen eine Bewässerungsberechnung auf dieser Skala sehr schwierig. Bewilligungen für die Bewässerung sind beim Rebbau kantonal geregelt. So ist im Kanton Wallis beispielsweise eine Bewässerung der Reben ohne Genehmigung erlaubt, während im Kanton Waadt eine Genehmigung mit Begründung der Notwendigkeit der Bewässerung im Büro für Weinbau eingeholt werden muss. Reben werden auch nicht in allen Regionen/Kantonen gleich bewässert. Während eine Bewässerung auch in trockenen Jahren beispielsweise im Kanton Zürich eher eine Ausnahme ist (abgesehen von Neupflanzungen) und viele Weinberge auch gar nicht mit Bewässerungssystemen ausgestattet sind, ist dies in anderen Kantonen wie dem Kanton Wallis üblicher, vor allem in trockenen Jahren die Reben zu bewässern. Trotzdem sind auch im Kanton Wallis nicht alle Flächen mit Bewässerungssystemen ausgestattet. (Informationen Vivian Zufferey, Agroscope)

Für **Tabak** (Abbildung 12) können die Modellschätzungen grundsätzlich als plausibel erachtet werden; der Vergleich der Modellschätzwerte mit den erhobenen Bewässerungsmengen aus dem Ressourcen-Projekt zeigt auf, dass die Werte-Spanne gut abgebildet wird, das Modell aber dazu tendiert, die tatsächlichen Berechnungsmengen zu unterschätzen (siehe Anhang 9.4).

In der Schweiz gibt es viele Grünlandflächen, die durch die Landnutzungsdaten verschiedenen Kategorien zugeteilt werden. In diesem Projekt wurden die Kategorien «Übrige Dauerwiesen (ohne Weiden) und Kunstwiesen (ohne Weiden)» mit einbezogen. Dies geschah unter der Annahme, dass diese Kategorien den überwiegenden Teil bewässerten Grünlands einschliessen. In einigen Gebieten können aber beispielsweise auch Dauerweiden bewässert werden. Die Kategorie **Grünland**, für die die Modellergebnisse in Abbildung 13 dargestellt sind, schliesst also nicht alle Grünflächen ein, die allenfalls bewässert werden könnten. Andererseits schliesst sie auch Flächen ein, die nicht bewässert werden oder bewässert werden können. Für Grünflächen sind die gewählten Vegetations- und Bewässerungsperioden höhenabhängig und können sich so je nachdem verschieben. Nach Erfahrungen aus dem Engadin wird (z.B. in der Region Sent) gemäss eines Bewässerungsreglements bewässert (Auskunft Manuel Schneider, Agroscope). Dabei nutzen die LandwirtInnen meist die Menge Wasser, die ihnen zugeteilt ist mehr oder weniger unabhängig von den jeweiligen Witterungsbedingungen. Es ist also davon auszugehen, dass sich bei solchen Bewässerungsstrategien die Verbrauchsmengen zwischen den Jahren weniger unterscheiden als vom Modell abgebildet wird. Ausserdem wird angenommen, dass vor allem im Bereich rund ums Mittelland nur ein Bruchteil der Flächen bewässert werden. Dies ist im Allgemeinen für viele der Kulturen der Fall. Mithilfe der Korrekturfaktoren wird die bewässerte Fläche deshalb im nächsten Kapitel noch berichtigt. Es ist aber davon auszugehen, dass sich die Flächenanteile bewässerter Grünflächen und auch anderer Kulturen teilweise regional unterscheiden können. Ein Vergleich der Modellschätzwerte mit erhobenen Bewässerungsmengen war in dieser Arbeit nicht möglich, da keine entsprechenden Referenzinformationen zur Verfügung standen.

Für **Zuckerrüben** können die geschätzten Bewässerungsmengen (Abbildung 14) grundsätzlich als plausibel erachtet werden. Der Vergleich der Modellschätzungen mit erhobenen Bewässerungsmengen zeigt eine relativ gute Übereinstimmung mit einer Tendenz zu einer Unterschätzung der erhobenen Bewässerungsmengen durch das Modell. Gemäss Expertenangaben werden Zuckerrüben in der Schweiz im Allgemeinen nur wenig bewässert. Sofern Bewässerungssysteme nicht sowieso vorhanden sind, ist die Bewässerung von Zuckerrüben in der Regel nicht wirtschaftlich. Im Frühsommer, wenn die Wachstumsrate am höchsten ist, kann eine Bewässerung je nach Wasserspeicher im Boden die Erträge positiv beeinflussen, wohingegen Bewässerungen im Hochsommer meist weniger lohnenswert sind (Ebmeyer & Hoffmann, 2022). In den letzten Jahren kämpften Zuckerrüben ausserdem mit den heisseren Temperaturen und der auch dadurch erhöhten Anfälligkeit auf Krankheiten (Auskunft Samuel Jenni, Schweizerische Fachstelle für Zuckerrübenbau).

5.2 Modellschätzungen für die Schweiz aggregiert

Aus den geschätzten Bewässerungsmengen in mm wurden in Bezugnahme auf die Parzellengrößen die Bewässerungsbedürfnisse in m³ abgeleitet. Im potenziell bewässerbaren Gebiet wird angenommen, dass jede Kultur zu 100% bewässert werden könnte, sofern der Bedarf gegeben ist. Allerdings ist nicht anzunehmen, dass alle gewässerten Kulturen/Kulturgruppen in diesem Perimeter gleichermassen bewässert werden, da sie sich hinsichtlich ihrer Bewässerungswürdigkeit stark unterscheiden und technisch nicht überall eine Bewässerung möglich ist. Um die Modellschätzwerte dafür zu korrigieren, wurden die kulturspezifischen Schätzungen auf kantonaler Ebene mit Korrekturfaktoren multipliziert, deren Herleitung im Folgenden im Detail beschrieben ist:

Die kürzlich veröffentlichte Hochrechnung des BFS für das Jahr 2023 liefert derzeit schweizweit die beste Datengrundlage bezüglich der bewässerten Flächenanteile einzelner Kulturen (BFS, 2023). Demnach werden auf schweizweiter Ebene Beeren zu 67% bewässert, Gemüse zu 64%, Obstanlagen zu 56%, Kartoffeln zu 44%, Rebanlagen zu 19%, Zuckerrüben zu 4%, Kunstwiesen/Dauergrünland zu 1% und Mais zu 1%. Diese Zahlen wurden in dieser Arbeit als Proxies zur Korrektur hinsichtlich Bewässerungswürdigkeit zugrunde gelegt. Da jedoch durch den Perimeter potenziell bewässerter Gebiete bestimmte Kulturfleichen von der Bewässerung grundsätzlich ausgeschlossen sind, werden pro Kanton und Kultur Korrekturfaktoren aus den BFS-Zahlen abgeleitet, die berücksichtigen, dass sich der Anteil bewässerter Kulturfleiche zu unterschiedlichen Teilen im Bewässerungsperimeter befindet (Formel 2). Zum Beispiel beträgt die Kulturfleiche für Kartoffeln im Kanton Aargau gerundet 620 ha (kantonale Kulturfleiche). Im Bewässerungsperimeter sind 500 ha (kantonale, bewässerte Perimeter) Kartoffelfleichen eingeschlossen, entsprechend 81 % der Kartoffelfleichen in diesem Kanton. Gemäss BFS-Schätzung werden Kartoffeln aber nur zu 44% (BFS-Korrekturwert) bewässert. Der kultur- und kantonspezifische Korrekturfaktor kantonaler Korrekturfaktor wird deshalb per Dreisatz hergeleitet als $(620 * 0.44) / 500 = 0.55$.

$$\text{kantonaler Korrekturfaktor} = \frac{\text{kantonale Kulturfleiche [ha]} * \text{BFSKorrekturwert}}{\text{kantonale bewässerte Perimeter [ha]}} \quad (2)$$

Die Angaben des BFS bezüglich bewässerter Flächenanteile gelten für die gesamte Schweiz und werden in dieser Arbeit auf alle Kantone mit Ausnahme des Wallis übertragen. Für das Wallis ist bekannt, dass die Bewässerung im Rebbau und vor allem bei den Grünlandflächen einer anderen Praxis unterliegt. Für diese beiden Kulturgruppen sind die Anteile bewässerter Flächen im Wallis aus den bisherigen BFS-Erhebungen konstant höher und werden auf 40% (Reben) und 55% (Grünlandflächen) geschätzt. Auf dieser Grundlage wurden allein für diese beiden Kulturen und allein für das Wallis Anpassungen von BFS-Korrekturwert vorgenommen. Damit am Ende aber wieder die nationalen Werte des BFS erreicht werden, wurden sie für die restlichen Kantone entsprechend angepasst. Für andere Kantone und Kulturen wären kantonspezifische Anpassungen nicht sinnvoll gewesen, weil der Stichprobenplan der BFS-Erhebungen nicht für diese Auswertung ausgelegt war. Sollten in Zukunft verlässlichere Informationen zu bewässerten Kulturfleichen verfügbar werden, wäre es sinnvoll, diese in die Abschätzung einzubeziehen, da Unsicherheiten auf dieser Ebene sich erheblich auf das Ergebnis der Gesamtschätzung auswirken.

Um für die nicht georeferenzierte Landnutzungsflächen in der Region Bern vom Jahr 2022 für Obst sowie 2021 und 2022 für mehrjährige Beeren zu korrigieren, wurden Schätzwerte anhand der Flächenanteile vom Jahr 2023 hochgerechnet.

In Tabelle 8 sind die korrigierten Modellschätzwerte der Bewässerungsmengen pro Kanton, Kultur/Kulturgruppe und Jahr für die gesamte Schweiz angegeben. Für die gesamte Schweiz beläuft sich der geschätzte Wasserverbrauch für Bewässerung 2021 auf 9.5 Mio. m³, für 2022 auf 41 Mio. m³, und 2023 auf 31 Mio. m³. Die Hochrechnung des BFS ergab für 2023 eine Schätzung von 37,4 Mio. m³ (+/- 7%). Die Modellschätzung liegt unter der Schätzung aus der BFS-Erhebung, befinden sich jedoch in der gleichen Größenordnung. Auch die regionalen Unterschiede und Unterschiede zwischen den Kulturen decken sich in grossen Teilen in beiden Schätzungen. Das BFS schätzte in 2023 den höchsten Wasserverbrauch für das Wallis (13.9 Mio. m³), Waadt (4,3 Mio. m³) und Bern (3,6 Mio. m³). Auch in der modell-basierten Schätzung für 2023 sind die Bewässerungsmengen für diese drei Kantone am höchsten: 8.8 Mio. m³ (Wallis), 4.5 Mio. m³ (Waadt), 4.7 Mio. m³ (Bern).

Am meisten Wasser wurde gemäss BFS für Grünland (12,8 Mio. m³), Gemüse (9,4 Mio. m³) und Obst (5,3 Mio. m³) verwendet. In den Modellschätzungen wird der Gesamtbewässerungsbedarf in der Schweiz für Grünland auf 5.8

Mio. m³, für Gemüse auf 13,3 Mio. m³ und für Obst auf 7 Mio. m³ geschätzt. Das Modell schätzt die Grünlandbewässerung also geringer ein als die BFS-Erhebung. Hierbei ist es denkbar, dass das Modell die Grünlandbewässerung vor allem im Wallis unterschätzt. Der Wasserverbrauch für Gemüse wird dagegen vom Modell höher eingeschätzt, als durch die Erhebung, was darauf zurückzuführen ist, dass das Modell pauschal von einer sehr intensiven Art des Gemüsebaues ausgeht.

Vergleicht man die Modellschätzwerte für die verschiedenen Jahre, sieht man, dass die geringsten Bewässerungsmengen für das Jahr 2021 geschätzt werden. Angesichts der häufigen und starken Niederschläge in der Vegetationsperiode dieses Jahres scheinen die Werte plausibel, lassen sich aber auf nationaler Ebene nicht mit anderen Schätzungen vergleichen, da die letzte Schätzung des BFS für das Jahr 2020 gemacht wurde, welches in dieser Analyse nicht genauer betrachtet wurde. Auf der Ebene einzelner Teilregionen lassen sich die Modellschätzungen für das Jahr 2021 jedoch mit erhobenen Wasserentnahmemengen aus diesem Jahr vergleichen. Diese Vergleiche werden in den folgenden Abschnitten beschrieben. In der Modellschätzung ergibt sich für das Jahr 2022 ein höherer Wasserverbrauch für Bewässerung als für 2023. Da keine Zusatzbefragung für das Jahr 2022 durchgeführt wurde, kann dies leider nicht verglichen werden.

Die Kantone Jura, Glarus, Schwyz, Uri, Nid- und Obwalden sowie Basel-Stadt und Appenzell Inner- und Ausserorden wurden in der Modellschätzung nicht berücksichtigt, weil für diese Kantone keine potenziell bewässerten Gebiete ausgewiesen wurden (Abbildung 2). Dennoch kann Bewässerung in Teilen dieser Gebiete nicht vollständig ausgeschlossen werden. Die geschätzten Wasserverbrauchsmengen könnten unter Berücksichtigung dieser Gebiete also höher liegen. Auch die Tatsache, dass Kulturen wie Getreide zur Schätzung der Bewässerungsmengen nicht berücksichtigt wurden, kann zu leichten Unterschätzungen durch die Modellmethode beitragen, wenn man bedenkt, dass auch solche Kulturen in Einzelfällen bewässert werden. Insgesamt ist aber nicht davon auszugehen, dass dies für die Schätzung der Bewässerungsmengen stark ins Gewicht fällt.

Die Frostschutzberechnung ist hingegen ein Faktor, der vom Modellansatz nicht abgedeckt wird, aber der hinsichtlich des Wasserressourcenmanagements stark ins Gewicht fallen kann. Hierbei können zu Beginn des Frühlings markante Wasserbedarfsspitzen auftauchen, die jedoch in der Regel nicht mit Niedrigwasserständen in den Fließgewässern einher gehen.

Die bewässerte Fläche ist der Faktor, der die aggregierte Schätzung der Bewässerungsmengen stark beeinflusst. Nimmt man beispielsweise das Jahr 2022 mit dem im Kap. 3.4 ausgewiesenen bewässerten Gebiet, so ergibt sich ein Bewässerungsvolumen von 155 Mio. m³. Dabei wird aber angenommen, dass alle Kulturen, die im potenziell bewässerten Perimeter (Abbildung 2) liegen auch tatsächlich bewässert werden, falls es gemäss den kulturspezifischen Schwellwerten nötig ist (d.h. ohne Einschränkungen gemäss der Bewässerungswürdigkeit). Es ist jedoch unwahrscheinlich, dass das so der Fall ist. Zum Beispiel werden Grünflächen im Mittelland nur selten bewässert. Für die Zukunft liegt ein grosses Potential zur Verbesserung der Schätzgenauigkeit dieser Methode darin, bewässerte Kulturflächen mit höherer Genauigkeit auszuweisen.

Tabelle 8: Aggregierte Schätzungen der Wasserverbrauchsmengen nach kultur- und kantonsspezifischer Korrektur (gerundet auf 25 mm) gemäss der obigen Beschreibung.

Kanton	Kultur	Bewässerung 2021 [m ³]	Bewässerung 2022 [m ³]	Bewässerung 2023 [m ³]
Aargau	Beeren-einjährig	6'825	14'525	23'875
	Beeren-mehrjährig	-	15'500	2'150
	Gemüse	752'525	2'816'975	1'901'825
	Grünland	-	21'525	6'725
	Kartoffel	-	282'050	247'650
	Mais	-	60'275	18'425
	Obst	15'750	439'300	306'200
	Reben	-	650	-
	Tabak	-	775	50
		Zuckerrübe	-	34'000
Basel-Land	Beeren-einjährig	625	1'675	2'875
	Beeren-mehrjährig	-	14'050	3'025
	Gemüse	56'925	166'225	95'925
	Grünland	-	13'625	4'475
	Kartoffel	-	28'025	25'500
	Mais	-	19'875	2'725
	Obst	53'725	465'325	262'300
	Reben	-	1'050	-
		Zuckerrübe	-	1'000
Bern	Beeren-einjährig	19'050	38'250	39'375
	Beeren-mehrjährig	-	13'300	8'125
	Gemüse	1'299'850	3'292'575	2'846'775
	Grünland	25	87'050	40'300
	Kartoffel	17'400	941'300	1'399'025
	Mais	25	55'400	56'275
	Obst	175	311'700	298'025
	Reben	-	-	-
	Tabak	-	600	2'025
		Zuckerrübe	-	59'900
Fribourg	Beeren-einjährig	4'025	9'350	6'625
	Beeren-mehrjährig	-	4'150	3'850
	Gemüse	647'650	1'516'500	1'329'775
	Grünland	100	45'900	26'800
	Kartoffel	36'325	433'300	532'225
	Mais	-	31'275	34'375
	Obst	-	42'975	41'075
	Reben	-	-	1'200
	Tabak	-	74'450	54'950
	Zuckerrübe	-	22'675	12'800
Genève	Beeren-einjährig	2'075	4'000	3'175
	Beeren-mehrjährig	-	7'525	6'600
	Gemüse	84'875	272'725	259'150
	Grünland	175	2'350	1'950
	Kartoffel	2'525	25'000	28'525
	Mais	-	6'350	5'025

	Obst	21'000	92'050	94'400
	Reben	-	1'250	-
	Zuckerrübe	-	23'600	3'725
Graubünden	Beeren-einjährig	10'225	6'950	12'150
	Beeren-mehrjährig	-	150	100
	Gemüse	53'575	88'600	91'075
	Grünland	13'325	18'150	11'275
	Kartoffel	10'525	14'325	22'625
	Mais	-	2'600	1'025
	Obst	23'675	37'275	16'550
	Reben	-	-	-
	Zuckerrübe	-	75	-
Luzern	Beeren-einjährig	2'425	3'950	9'325
	Beeren-mehrjährig	-	4'350	1'100
	Gemüse	72'175	208'875	184'200
	Grünland	-	27'250	9'675
	Kartoffel	-	23'600	38'450
	Mais	-	17'750	11'150
	Obst	-	211'925	150'450
	Reben	-	-	-
	Tabak	-	1'275	550
	Zuckerrübe	-	1'425	-
Neuchâtel	Beeren-einjährig	2'850	10'825	9'650
	Beeren-mehrjährig	-	3'175	5'425
	Gemüse	23'200	68'750	63'775
	Grünland	-	24'875	18'525
	Kartoffel	-	40'550	61'750
	Mais	-	10'150	10'325
	Obst	-	5'800	9'075
	Reben	-	3'250	175
	Zuckerrübe	-	4'375	2'325
Schaffhausen	Beeren-mehrjährig	-	2'175	1'400
	Gemüse	65'250	269'525	223'225
	Grünland	-	2'575	1'325
	Kartoffel	-	92'225	71'900
	Mais	-	8'675	5'800
	Obst	25	26'300	17'550
	Reben	-	25	2'250
	Zuckerrübe	-	22'850	700
Solothurn	Beeren-einjährig	4'350	7'475	9'600
	Beeren-mehrjährig	-	4'200	1'950
	Gemüse	149'375	406'125	285'075
	Grünland	-	13'200	6'150
	Kartoffel	1'675	80'925	147'600
	Mais	25	17'950	9'925
	Obst	4'300	111'875	96'975
	Reben	-	-	-
	Zuckerrübe	-	10'175	1'550

St. Gallen	Beeren-einjährig	4'100	3'800	13'675
	Beeren-mehrjährig	-	2'325	250
	Gemüse	147'550	604'875	494'925
	Grünland	175	18'850	4'425
	Kartoffel	3'300	23'650	66'075
	Mais	-	2'625	-
	Obst	23'025	180'450	69'925
	Reben	-	-	-
	Zuckerrübe	-	125	-
Thurgau	Beeren-einjährig	11'500	12'375	28'750
	Beeren-mehrjährig	-	23'400	12'125
	Gemüse	414'775	1'924'900	1'594'575
	Grünland	450	22'125	10'550
	Kartoffel	325	288'425	309'325
	Mais	-	27'250	7'575
	Obst	108'500	1'760'175	1'236'525
	Reben	-	-	-
	Tabak	-	925	450
	Zuckerrübe	-	35'950	125
Ticino	Beeren-einjährig	725	975	150
	Beeren-mehrjährig	-	-	-
	Gemüse	97'550	93'525	46'025
	Grünland	525	2'325	175
	Kartoffel	5'425	11'600	-
	Mais	-	1'025	25
	Obst	75	2'500	900
	Reben	-	225	-
Valais	Beeren-einjährig	18'675	33'025	17'750
	Beeren-mehrjährig	4'575	35'925	19'400
	Gemüse	88'825	259'875	162'075
	Grünland	1'939'300	9'639'325	5'605'325
	Kartoffel	2'400	61'600	29'275
	Mais	1'075	6'650	4'450
	Obst	1'405'175	3'195'550	2'886'650
	Reben	-	106'325	33'775
	Zuckerrübe	-	1'300	-
Vaud	Beeren-einjährig	8'125	7'850	11'125
	Beeren-mehrjährig	25	31'975	22'900
	Gemüse	939'300	2'640'200	2'027'050
	Grünland	350	45'600	30'475
	Kartoffel	65'100	883'500	875'850
	Mais	25	105'600	76'400
	Obst	109'900	1'461'800	1'337'500
	Reben	-	29'325	11'100
	Tabak	-	40'850	45'225
	Zuckerrübe	-	161'725	71'600
Zug	Beeren-einjährig	150	1'875	4'800
	Beeren-mehrjährig	-	1'425	-

	Gemüse	650	19'100	25'375
	Grünland	-	5'075	1'000
	Kartoffel	-	3'750	5'975
	Mais	-	4'525	100
	Obst	-	49'600	27'550
	Reben	-	-	-
Zürich	Beeren-einjährig	7'950	14'200	21'600
	Beeren-mehrfjährig	-	27'875	7'625
	Gemüse	578'875	2'422'000	1'650'900
	Grünland	-	23'350	6'875
	Kartoffel	-	423'925	337'750
	Mais	-	41'275	11'825
	Obst	2'750	331'900	184'800
	Reben	-	25	-
	Tabak	-	3'975	1'450
	Zuckerrübe	-	48'750	300
		9'449'850	40'943'500	31'127'200

5.3 Regionale Validierung Ramsen, Schaffhausen

Da sich für die Region Ramsen in Schaffhausen eine relativ gute Zuordnung bewässerter Flächen zur Entnahmestelle der Biber machen lässt und die Entnahmemengen aus der Biber vom Kanton aufgezeichnet werden, eignet sich dieses Gebiet gut als Validierungsgebiet für regionale Modellschätzungen. Das Gebiet wird mehrheitlich ackerbaulich genutzt (Mais, Zuckerrüben und Kartoffeln), aber auch der Gemüsebau ist relativ stark vertreten. Hinzu kommen einzelne Flächen mit Spezialkulturen wie Beeren (siehe Abbildung 15 und Abbildung 16).

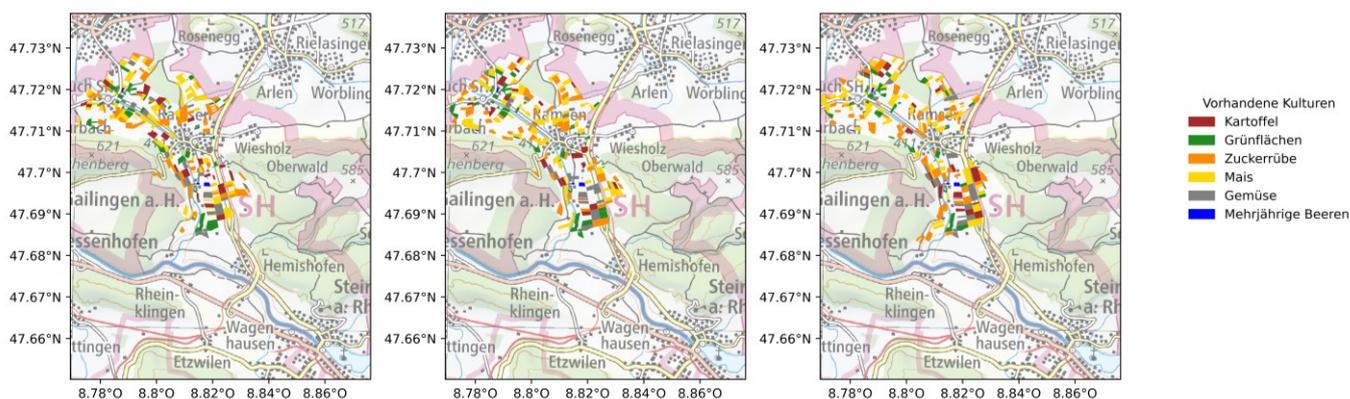


Abbildung 15: Karten der Verteilungen bewässerter Kulturen in 2021, 2022 und 2023 im Gebiet Ramsen, das aus der Biber bewässert wird.

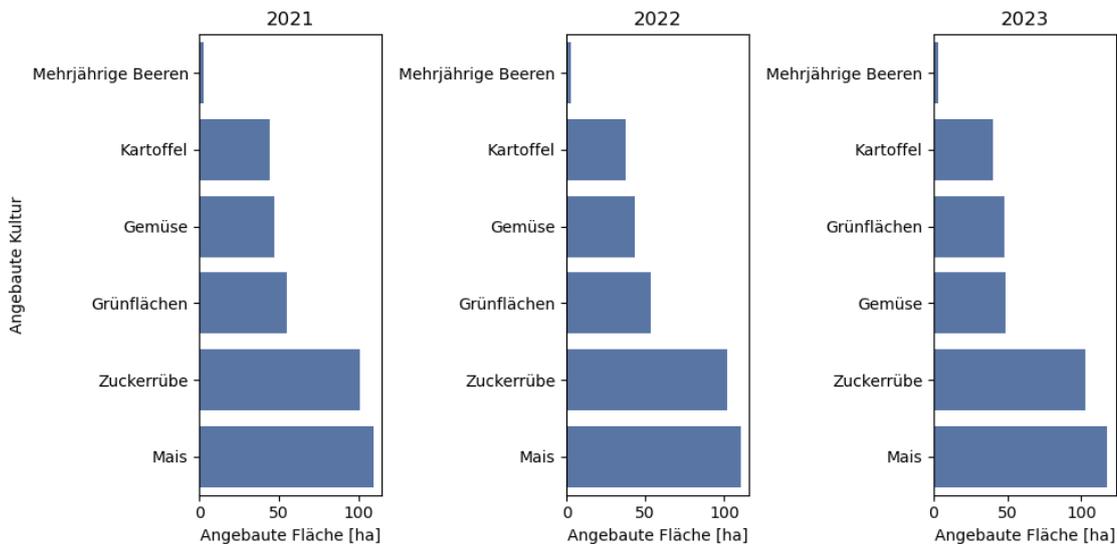


Abbildung 16: Flächenangaben pro Kultur und Jahr im Gebiet der Biber.

Gemäss Einschätzung eines lokalen Experten stimmen die vom Modell geschätzten, saisonalen Bewässerungsmengen in mm insgesamt mit Erfahrungswerten überein (Abbildung 17). Es wurde jedoch angemerkt, dass die Bewässerungsmengen in mm für Gemüse für diese Teilregion überschätzt sind, während die Modellschätzungen für Kartoffel und auch für Wiesen eher unterschätzt sind.

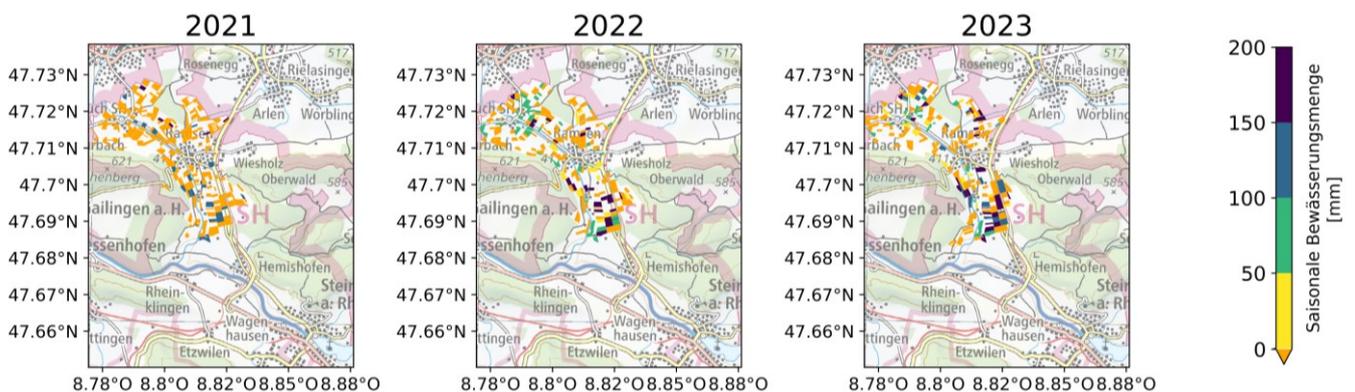


Abbildung 17: Bewässerungsmengen im Gebiet Ramsen unter Berücksichtigung von den Bewässerungs- resp. Entnahme-einschränkungen.

Die zu Beginn von Kapitel 5.2 erwähnten Korrekturfaktoren wurden für das Teilgebiet Ramsen auf Basis der lokalen Expertenaussagen angepasst. Folgende angepasste Korrekturfaktoren wurden für die Region vorgeschlagen: Mais zu 50% bewässert, Kartoffeln und Gemüse zu 100% bewässert, Zuckerrüben zu 5% bewässert, mehrjährige Beeren zu 100% bewässert, Wiesen zu 30% bewässert. Reben sowie Obst wurden von der Berechnung ausgeschlossen, da sie mehrheitlich durch Quell- resp. Trinkwasser bewässert werden. Unter Berücksichtigung der lokalen Korrekturfaktoren wird für die Region Ramsen in **2021** eine Bewässerungsmenge von **25'138 m³** geschätzt (Tabelle 9). Damit wird die Entnahmemenge von **39'194 m³** für diese Jahr um 36% unterschätzt. Für das Jahr **2022** liegt die flächenkorrigierte Modellschätzung unter Berücksichtigung der Entnahmeverbote für Bewässerung (in den Perioden 15.07.2022 - 18.08.2022 und 22.08.22 - 26.08.22) **bei 87'682 m³**. Die aufgezeichnete Entnahmemenge für 2022, die nicht für Frostberegnung eingesetzt wurde, liegt bei **78'005 m³**. Somit wird die Entnahmemenge für dieses Jahr in der Modellschätzung um 12% überschätzt. Im Jahr **2023** liegt die Bewässerungsmenge **zwischen 124'474 und 162'938 m³**. In diesem Jahr waren Einschränkungen für die Bewässerung ausgesprochen worden, aber es galt nie ein striktes Entnahmeverbot. Die beiden Werte entsprechen demnach dem strikten Entnahmeverbot resp. der

Entnahme ohne Einschränkungen. Insgesamt wurden im Jahr 2023 136'150 m³ Wasser aus der Biber entnommen, wobei 16'660 m³ für Frostbewässerung entnommen wurden. Das resultiert in **119'490 m³** die für die Bewässerung entnommen wurden. Somit wird die Bewässerung auch im Jahr 2023 durch das Modell leicht überschätzt.

Der Vergleich zeigt, dass das Modell die Unterschiede in den Entnahmemengen für Bewässerung zwischen den Jahren relativ gut abbildet, auch wenn die Modellschätzungen die trockenen Jahre 2022 und 2023 überschätzt und das Jahr 2021 unterschätzt hat. Dies kann auf Unsicherheiten in den Eingabedaten, Modellunsicherheiten sowie auch auf regionspezifische Unsicherheiten zurückzuführen sein.

Es zeigt aber auch, dass die Bewässerungsmengen mit den ursprünglichen Korrekturfaktoren unterschätzt würden (Tabelle 9). Dies deutet darauf hin, dass Korrekturfaktoren regional deutlich variieren können und somit auf nationaler Ebene einen grossen Unsicherheitsfaktor darstellen.

Tabelle 9: Modellerte Bewässerungsmengen in 2021, 2022 und 2023 für das Gebiet, das aus der Biber bewässert wird.

	Wasserentnahmemengen aus der Biber [m ³]	Modellschätzung der Bewässerungsmengen [m ³] ohne Flächenkorrektur	Modellschätzung der Bewässerungsmengen [m ³] mit Flächenkorrektur BFS	Modellschätzung der Bewässerungsmengen [m ³] mit Flächenkorrektur auf Gebiet angepasst
2021	39'194 (zusätzlich 13'143 m ³ für Frostberegnung)	25'138	16'113	25'138
2022 ohne Berücksichtigung von Entnahmestopps		322'114	83'322	192'054
2022 mit Entnahmestopps (15.07.2022 - 18.08.2022; 22.08.22 - 26.08.22)	78'005 (zusätzlich 25'540 m ³ für Frostberegnung)	111'431	46'735	87'682
2023 ohne Berücksichtigung von Entnahmestopps		205'173	77'248	162'938
2023 mit Bewässerungsstopps (15.08. - 25.08.2023; 07.09 - 25.09.2023; 28.09. - 30.09.2023)	119'490 (zusätzlich 16'660 m ³ für Frostberegnung) -> mit Entnahmebeschränkungen aber keinem Entnahmestopp	142'012	65'808	124'474

Entnahmestopps haben einen grossen Einfluss, da diese meist zu einer Zeit sind, bei dem die Pflanzen viel Wasser brauchen. Dies ist insbesondere in den Monaten Juli und August zu beobachten (Abbildung 18).

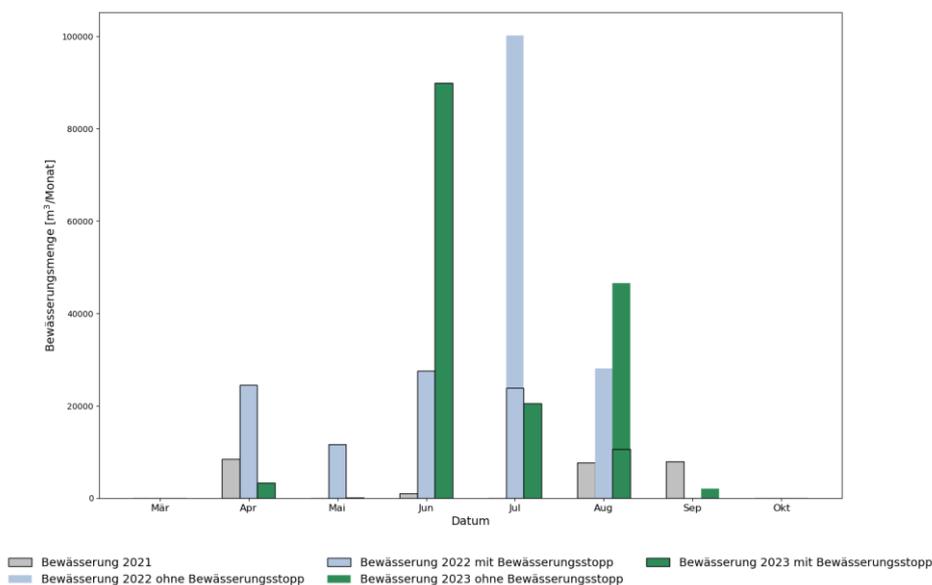


Abbildung 18: Monatliche Bewässerung unter Berücksichtigung der Korrekturfaktoren.

5.4 Regionale Validierung Untersee, Thurgau

Als zweite Validierungsregion wurde die Region Untersee ausgewählt (Abbildung 19). Im Kanton Thurgau werden Bezugsmengen aus Oberflächengewässern erfasst und da es im Bereich um den Untersee keine Grundwasserleiter gibt, können so Gebiete, die mit Wasser aus dem Untersee bewässert werden, relativ einfach abgegrenzt werden. Die Entnahmestellen des Untersees werden in zwei Teilbereiche unterteilt:

- Gebiet am Untersee auf der Seite von Stein am Rhein
- Gebiet am Untersee auf der Seite von Konstanz

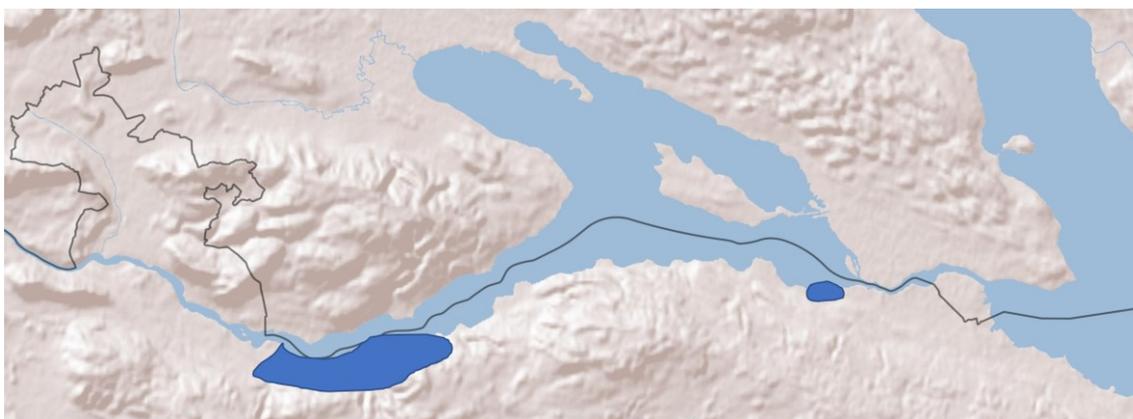


Abbildung 19: Schematische Darstellung des der beiden Bereiche bei Stein am Rhein (links) und bei Konstanz (rechts). (Karte: ESRI, Zugriff: 20.01.2024).

Die betrachteten Perimeter umfassen mehrheitlich Obst und Grünflächen, wobei aber auch andere Kulturen wie Mais, Gemüse, Kartoffel und Zuckerrübe in kleineren Flächenanteilen vorhanden sind (Abbildung 20).

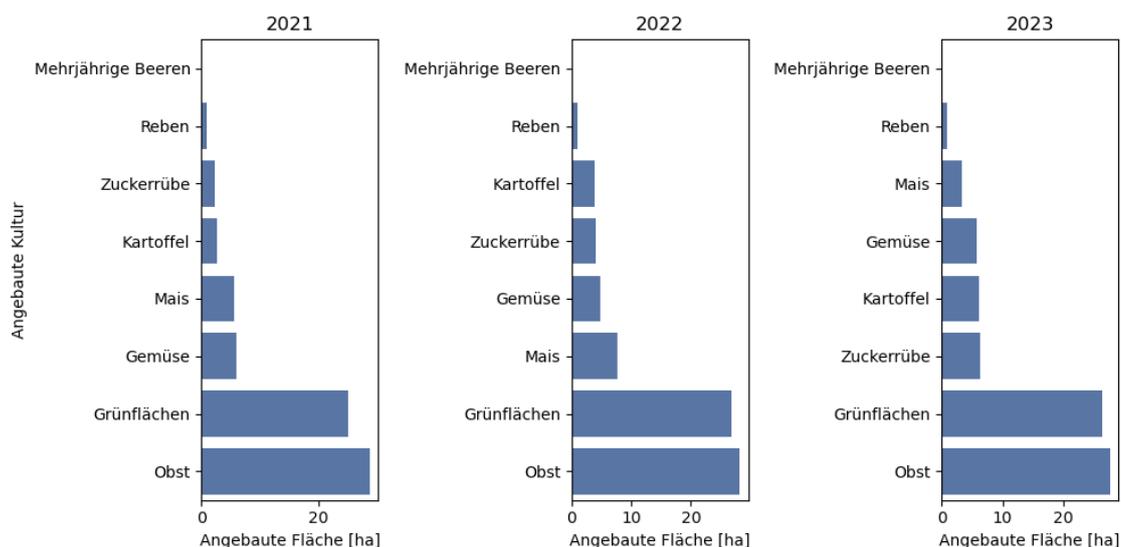


Abbildung 20: Flächenanteil der verschiedenen Kategorien im betrachteten Perimeter beim Untersee.

Zwischen den in Abbildung 19 dunkelblau markierten Bereichen sind gemäss Angaben des Kanton Thurgaus keine Entnahmestellen für Bewässerung vorhanden und es gibt gemäss den Landnutzungsdaten auch keine landwirtschaftliche Kulturlächen der betrachteten Kategorien. Als Grenze der bewässerten Felder wurde die Hauptstrasse in beiden Bereichen gewählt. Beim Rhein gibt es noch weitere Entnahmestellen, die aber in diesem Projekt nicht weiter berücksichtigt wurden.

In Tabelle 10 sind die Resultate vom Modell für die Perimeter beim Untersee mit den kantonalen Angaben der Wasserentnahmemengen in diesen Perimetern gegenübergestellt. Dieser Werte sind nicht alle mit Wasserzählern erhoben worden und können deshalb gewisse Unsicherheiten aufweisen. Als Korrekturfaktoren wurden die lokalen Werte für das Gebiet von Ramsen von Kap. 5.3 sowie ergänzend diejenigen Werte basierend auf der BFS Umfrage von 2023 von Kap. 5.2 verwendet, da beide Teilregionen strukturell vergleichbar sind.

In allen Jahren werden die aufgezeichneten Wasserentnahmemengen vom Modell mit Korrekturfaktoren (sowohl mit Korrekturwerten nach der BFS Statistik als auch gemäss Ramsen) unterschätzt (Tabelle 10 und Abbildung 21). Ausserdem wurde gemäss Entnahmemengen im Jahr 2023 mehr bewässert als im Jahr 2022. Das Modell schätzt jedoch einen höheren Wasserverbrauch für das Jahr 2022 als für 2023. Da Obst und Grünflächen in diesem Teilgebiet stark vertreten sind (Abbildung 20), kann vermutet werden, dass die Modellschätzwerte für diese Kulturen zu niedrig liegen und/oder dass die Flächenkorrekturen für die Teilregion zu restriktiv sind. Wasserverbrauch für Kühlung oder Frostberegnung wurde im Modell nicht berücksichtigt, was allenfalls ein weiterer Grund für eine Unterschätzung durch das Modell sein könnte.

Tabelle 10: Gegenüberstellung erhobener Entnahmemengen durch den Kanton mit den modell-geschätzten Bewässerungsmengen des Modells für die Teilregion «Untersee» unter Berücksichtigung der kulturspezifischen Korrekturen gerundet.

Jahr	Entnahmemenge durch Kanton [m ³]	Bewässerungsmenge mit Korrekturfaktoren von Ramsen[m ³]	Bewässerungsmenge mit kantonalen Korrekturfaktoren [m ³]	Bewässerungsmenge ohne Korrekturfaktoren [m ³]
2021	20'610	3'415	2'534	4'181
2022	78'650	56'526	40'555	105'672
2023	80'760	51'751	37'025	87'609

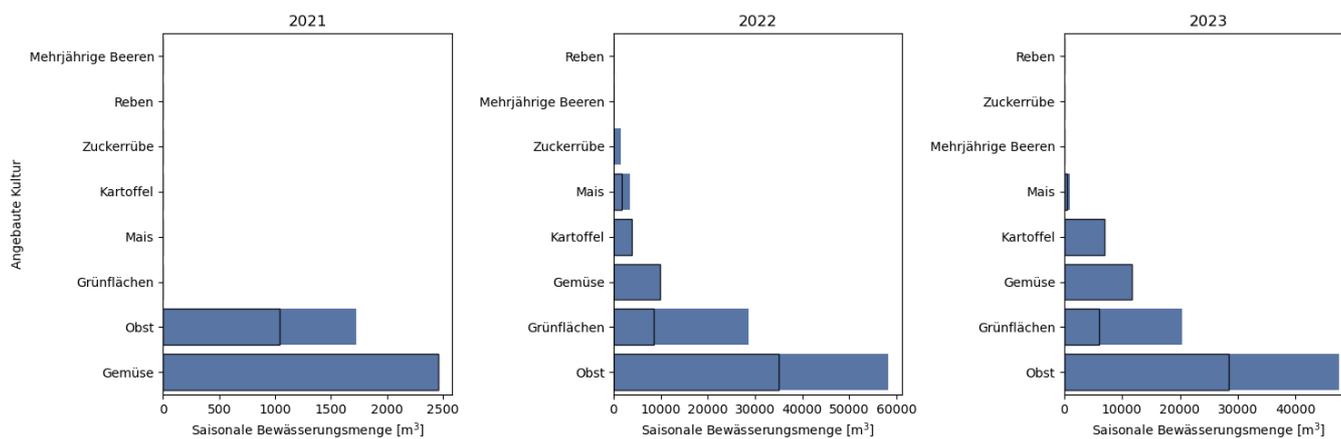


Abbildung 21: Die Abbildung zeigt die berechneten Bewässerungsvolumen für die Region «Untersee» gemäss dem Modell (blau). An der schwarzen Umrandung kann die korrigierte Wasserentnahmemenge mit den Korrekturfaktoren des Gebiet Ramsen entnommen werden.

Sollte die Modellschätzung in Zukunft auf dieser Ebene zum Einsatz kommen, ist es zu empfehlen, die Perimeter für bewässerte Flächen und/oder die jeweiligen kulturspezifische Korrekturfaktoren für die entsprechende Region anzupassen. Darüber hinaus können in Teilregionen auch regionsspezifische Anpassungen der Vegetations- und Bewässerungszeiträume sinnvoll sein.

Für den gesamten Kanton Thurgau sind die vom Modell geschätzten Wasserverbrauchsmengen in den drei Jahren 2021-2023 den kantonalen Angaben zu Wasserentnahmemengen für Bewässerung in Tabelle 11 gegenübergestellt. Die Werte zeigen für die verschiedenen Jahre teils grosse Unterschiede zwischen den Berechnungen des Modells und den Werten des Kantons. Im Jahr 2021 wird die erhobene Entnahmemenge vom Modell stark unterschätzt, in den Jahren 2022 und 2023 werden die erhobenen Entnahmemengen dagegen ähnlich wie im Gebiet Ramsen überschätzt. Gründe für die Abweichungen können sowohl in den zuvor genannten Ungenauigkeiten der Schätzmethode als auch in Ungenauigkeiten der aufgezeichneten Entnahmemengen liegen. Ausserdem scheint es gemäss den Entnahmemengen so, als würden die Bewässerungsmengen weniger stark von klimatischen Faktoren abhängen, als vom Modell geschätzt.

Tabelle 11: Vergleich der Wasserverbrauchsmengen für Bewässerung im Kanton Thurgau (kantonale Angaben vs. Modellschätzungen).

Jahr	2021	2022	2023
Gemäss Kanton TG	1'777'700	2'796'200	2'537'300
Gemäss Modell unter Berücksichtigung von Korrekturwerten aus Kap. 5.2	522'400	4'089'100	3'193'700

5.5 Modellanwendung stationäre Klimaprojektionen

Zur Abschätzung des Einflusses klimatischer Änderungen auf den Bewässerungsbedarf unterschiedlicher Kulturen in Abhängigkeit von pedoklimatischen Standortbedingungen wurden im Rahmen des Projekts Modellrechnungen auf Basis stationsweise herunterskalierter Klimaprojektionen (CH2018, 2018) durchgeführt. Die Rechnungen wurden für alle in dieser Arbeit betrachteten Kulturen/Kulturgruppen und für neun verschiedene Bodenarten (mit Bodentiefe 90 und 120 cm) durchgeführt.

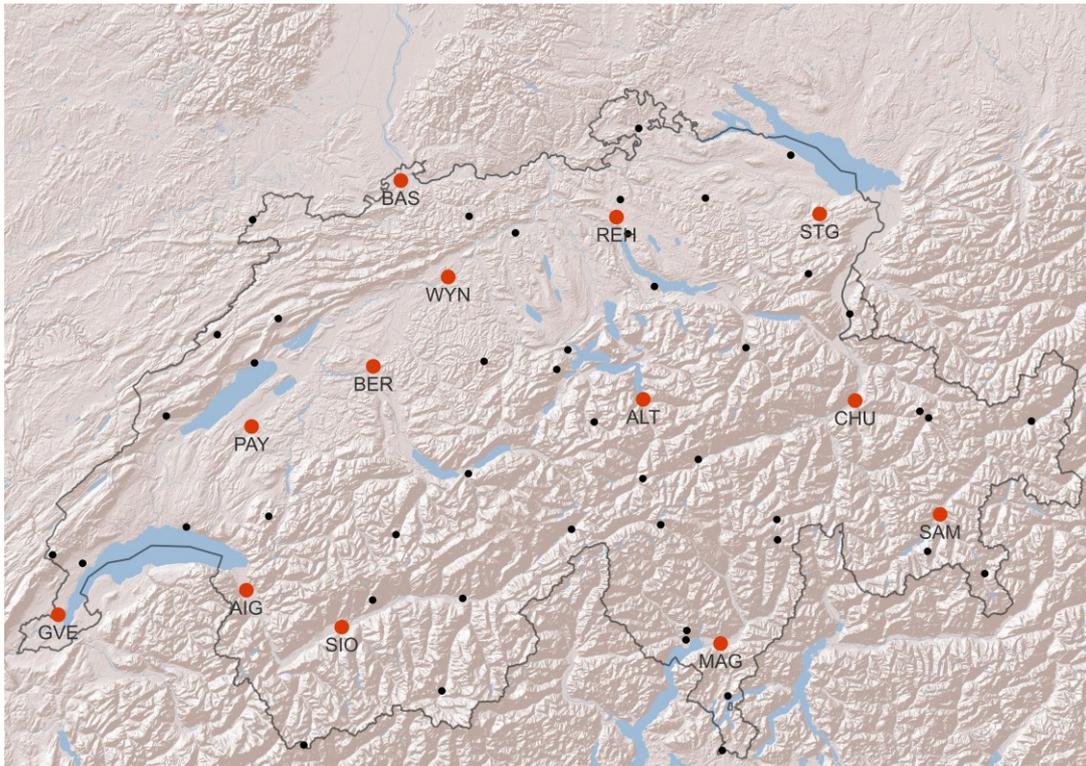


Abbildung 22: Standorte der Stationen, für die Klimaprojektionen für alle Kulturen und neun Bodenarten gerechnet wurden (rote Punkte: Stationen für die die Ergebnisse im Bericht Abbildungen 23 und 24 dargestellt sind; Ergebnisse aller Modellrechnungen stehen unter <https://doi.org/10.5281/zenodo.15703745> zur Verfügung) (Karte: ESRI, Zugriff: 20.01.2024).

Abbildung 23 und Abbildung 24 zeigen die auf Basis der stationären Klimaprojektionen (rote Stationen in Abbildung 22) modellierten Bewässerungsmengen für die zehn Kulturen/Kulturgruppen für vier verschiedene Zeithorizonte und zwei Emissionsszenarien (RCP4.5 = begrenzter Klimaschutz, RCP8.5 = kein Klimaschutz) bei einem lehmigen Sand mit einer Mächtigkeit von 120 cm. Dargestellt wird hier somit nur ein repräsentativer Teil der Modellrechnungen, die insgesamt durchgeführt wurden. Sämtliche Modellergebnisse für alle Stationen, Bodenarten und Bodentiefen sind online verfügbar (<https://doi.org/10.5281/zenodo.15703745>).

Die berechneten Bewässerungsmengen variieren stark nach geographischer Lage der Stationen und nach Kultur/Kulturgruppe. Die höchsten Bewässerungsmengen werden für Gemüse und Obst geschätzt, insbesondere an Standorten wie Sion, Payerne oder Genf. Beim Emissionsszenario ohne Klimaschutz (RCP 8.5) nehmen die geschätzten Bewässerungsmengen an fast allen Stationen mit fortschreitendem Projektionshorizont zu. Beim Emissionsszenario RCP4.5 (Ausstoss von Treibhausgasen wird eingedämmt, steigt aber noch 50 Jahre) kann sich wie beispielsweise bei Sion ein Gleichgewicht einstellen das sich durch gleichbleibende oder gar sinkenden mittleren Bewässerungsmengen im letzten Abschnitt des Jahrhunderts in den meisten Kulturen bemerkbar macht.

Die Länge der Balken in Abbildung 23 und 24 stellt die Klimaprojektionsunsicherheit dar (Varianz der Schätzwerte in Abhängigkeit von der Klimamodellkette). Diese nimmt vor allem ohne Klimaschutz (RCP8.5) mit fortschreitendem Projektionshorizont zu.

Ähnliche Analysen wurden in Eisenring et al. (2021) sowie Fuhrer & Smith (2015) durchgeführt, deren Modellaufbau sich aber von diesem unterscheidet, was einen Vergleich schwierig macht. Während bei beiden anderen Arbeiten die Bewässerungsschwelle anhand des Stresskoeffizienten der Pflanze bestimmt wurde, wurde die Bewässerungsschwelle in diesem Projekt anhand von Referenzdaten zur Praxisbewässerung angepasst. Dies führt beispielsweise zu viel tieferen Modellschätzwerten bei Kartoffel in dieser Arbeit. Während die Zunahme der Bewässerungsmenge in Eisenring et al. (2021) für Kartoffel bei 48% liegt, sind dies im Rahmen dieser Arbeit im Durchschnitt über alle Böden der Stationen im Mittelland 60%. Dieser spricht zwar von einer grösseren Zunahme in Prozenten, absolut ist die Zunahme durch die kleineren modellierten Bewässerungsmengen in dieser Arbeit aber kleiner (Zunahme von durchschnittlich 30 mm im Vergleich zu 75 mm in Eisenring et al. (2021)).

Bei Gemüse oder Obst sind die modellierten Bewässerungsmengen in dieser Arbeit im Vergleich zu den anderen Arbeiten gleich oder grösser. Fuhrer und Smith (2015) zeigen, dass sich die Bewässerungsmengen schon in der Referenzperiode je nach Pflanzensorten beträchtlich unterscheiden können (Randen max. 65 mm Bewässerung, Zwiebeln bis zu 155 mm). Wie in Kap. 5.1 erwähnt, wurde in diesem Projekt ein intensiver Gemüseanbau angenommen, was auch für die tendenziell hohen Werte bei Gemüse verantwortlich ist. In Eisenring et al. (2021) wurde für Eisbergsalat eine Zunahme von etwa 49% (absolute Zunahme: 45 mm) bis Ende des Jahrhunderts berechnet. In dieser Analyse waren es für Gemüse eine Zunahme von 41% (absolute Zunahme: 50 mm). Die Schätzungen liegen hier in einem sehr ähnlichen Rahmen.

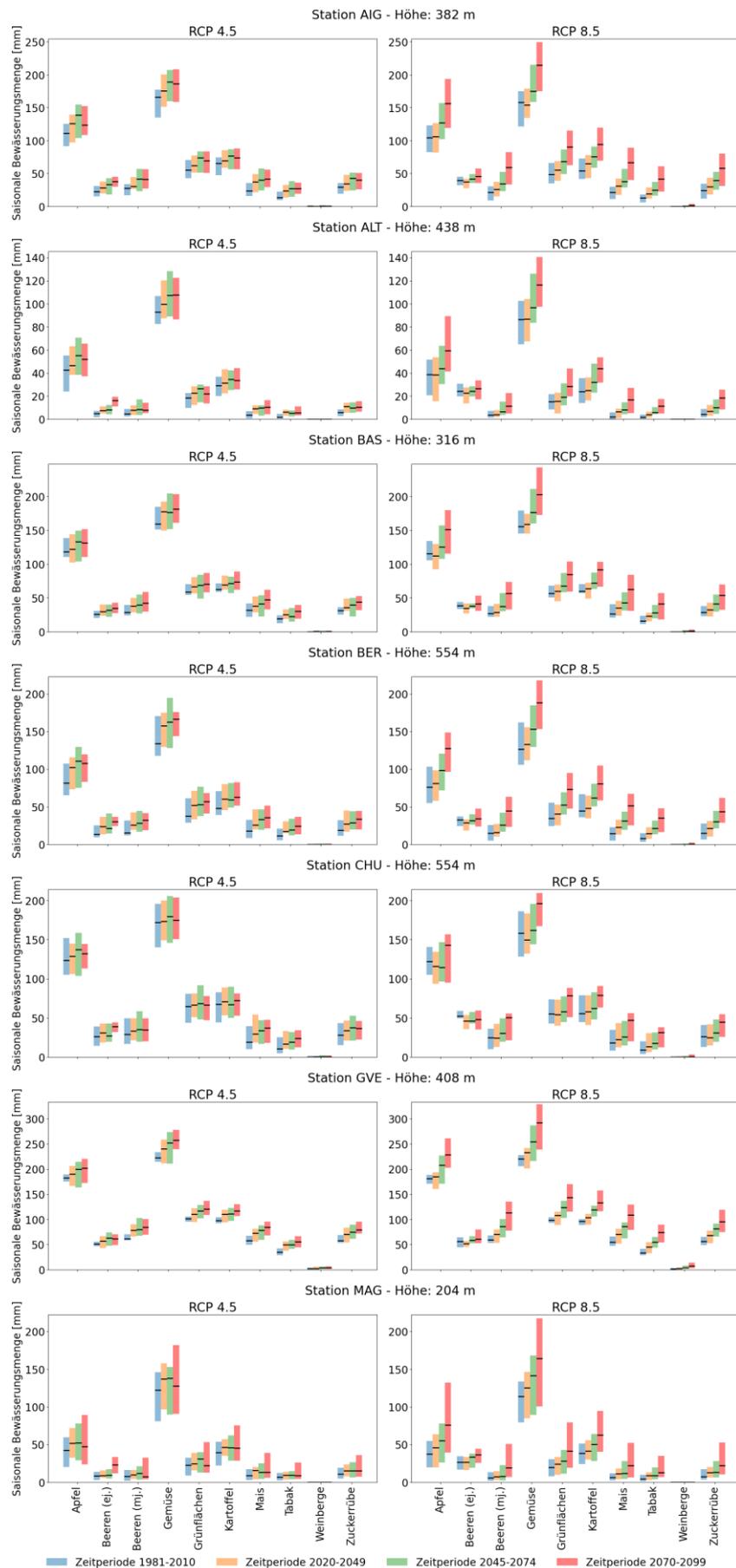


Abbildung 23: Saisonale Bewässerungsmenge in unterschiedlichen Zeithorizonten gemäss RCP 4.5 (links) sowie RCP 8.5 (rechts) bei unterschiedlichen Stationen für den Bodentyp lehmiger Sand (Schwarzer Strich = Mediane, Balken = 25-75 Perzentilspanne; AIG = Aigle, ALT = Altdorf, BAS = Basel, BER = Bern, CHU = Chur, GVE = Genf, MAG = Magadino).

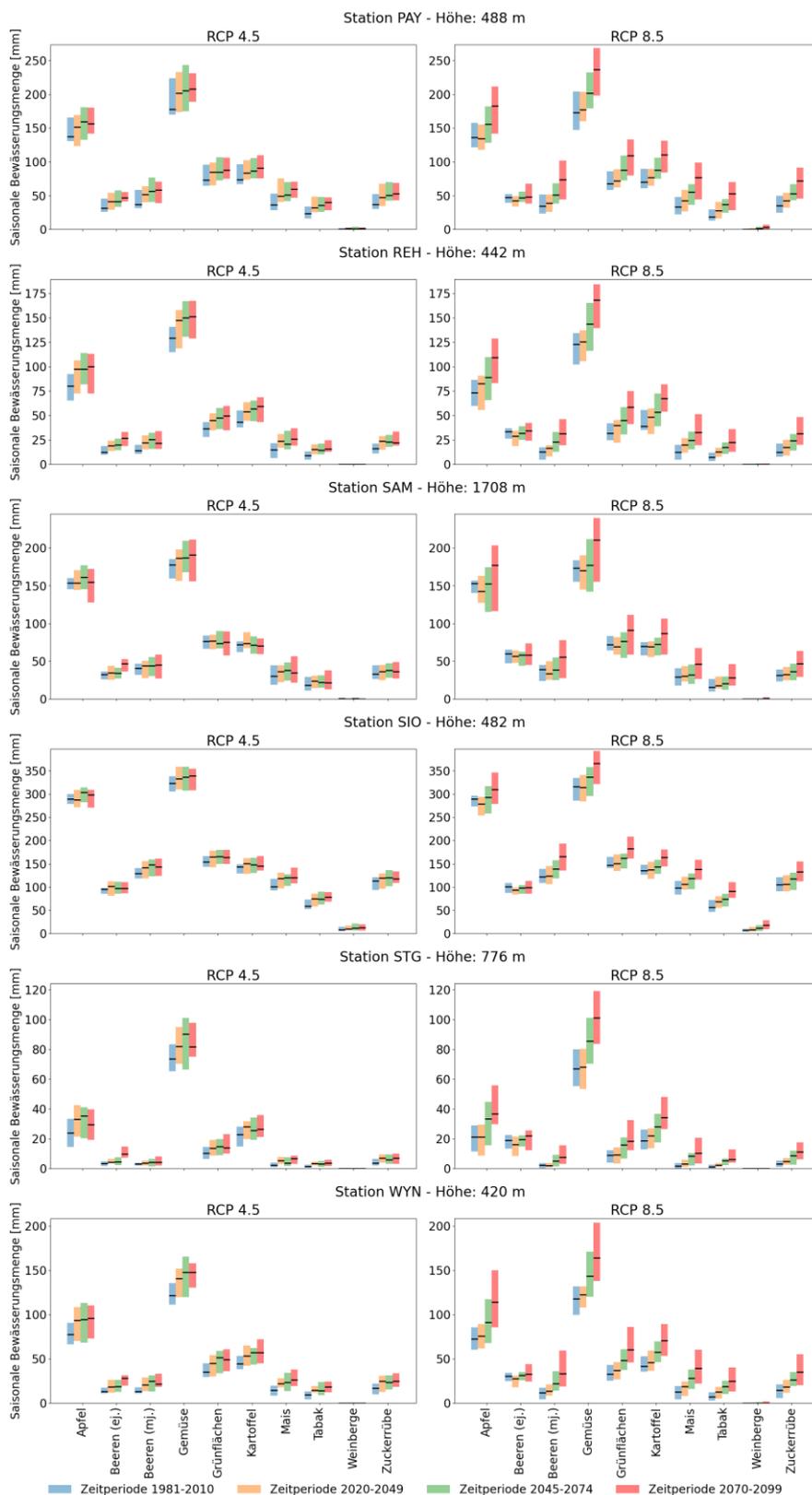


Abbildung 24: Saisonale Bewässerungsmenge in unterschiedlichen Zeithorizonten gemäss RCP 4.5 (links) sowie RCP 8.5 (rechts) bei unterschiedlichen Stationen für den Bodentyp lehmiger Sand (Schwarzer Strich = Mediane, Balken = 25-75 Perzentilspanne, PAY = Payerne, REH = Reckenholz, SAM = Samedan, SIO = Sion, STG = St. Gallen, WYN = Wynau).

5.6 Klimaprojektionen regional

Regionale Modellprojektionen für die gesamte Schweiz konnten auf Grundlage der CH2018-Daten nicht durchgeführt werden, da keine gegitterten Projektionsdaten zur Globalstrahlung zur Verfügung standen. Damit analog zu Kap. 5.2 die zukünftigen Bewässerungsvolumen für die ganze Schweiz geschätzt werden konnten, mussten die stationsbezogenen Projektionen hochskaliert werden. Als Grundlage für die Hochskalierung diente die Karte der Klimaregionen in der Schweiz (Abbildung 55 im Anhang). Pro Klimazone wird für jede Kultur/Kulturgruppe ein homogenes Klimaänderungssignal im Wasserbedarf für Bewässerung (2077-2099 gegenüber 1991-2020) angenommen. Die Klimaänderungssignale werden aus den in Kapitel 5.5 vorgestellten stationären Projektionen für die in der jeweiligen Klimaregion dominierende Bodenart (gemäss Anhang 9.7) hergeleitet und pro Klimaregion und Kulturgruppe über alle Modellketten und Stationen gemittelt. Die resultierenden Änderungssignale werden dann auf die schweizweit (auf Parzellenebene) errechneten mittleren Bewässerungsmengen für die Referenzzeitspanne 1991-2020 angewandt, um eine Karte zu erzeugen, in der die geschätzten Bewässerungsmengen für den Zeithorizont 2077-2099 dargestellt sind (siehe Modellaufbau in Abbildung 25). Dabei wurden folgende Annahmen getroffen:

- Die Verteilung der Kulturflächen wird über den Referenzzeitraum als konstant angenommen. Als Datengrundlage dient der Landnutzungsdatensatz von 2023.
- Pro Klimaregion wurde eine Bodenart bestimmt, die die Kulturflächen im bewässerten Perimeter am besten repräsentiert (siehe Anhang 9.6). Die Resultate aller Stationen wurden dann für den entsprechenden Bodentyp gemittelt. Einige Stationen wurden von der Analyse ausgeschlossen, da sie in weiter Entfernung zu Kulturflächen oder in hoher Höhenlage liegen:
 - o Adelboden
 - o Altdorf
 - o Cimetta
 - o Col du Grand St-Bernard
 - o Davos
 - o Engelberg
 - o Gütsch, Andermatt
 - o Hinterrhein
 - o Le Moléson
 - o Napf
 - o Piotta
 - o Piz Corvatsch
 - o Poschiavo / Robbia
 - o S.Bernardino
 - o Säntis
 - o Weissfluhjoch

Für die Klimaregion «Zentraler Alpennordhang» wurden die Klimadaten von der Station Luzern verwendet, da sich alle betrachteten Anbaugebiete in unmittelbarer Nähe dazu befanden.

- Anbau- sowie Bewässerungsperioden werden hier als konstant angenommen auch wenn mit fortschreitendem Klimawandel die Möglichkeit besteht, dass sich diese Perioden verlängern (aufgrund der verlängerten Vegetationsperiode mit wärmeren Temperaturen).
- Die Korrekturfaktoren aus Kapitel 5.2 wurden auch bei der Hochskalierung der Klimaprojektionen angewandt. Das heisst, es wird davon ausgegangen, dass sich die Bewässerungswürdigkeit der einzelnen Kulturen und die übliche Bewässerungstechnik in Zukunft nicht verändert.

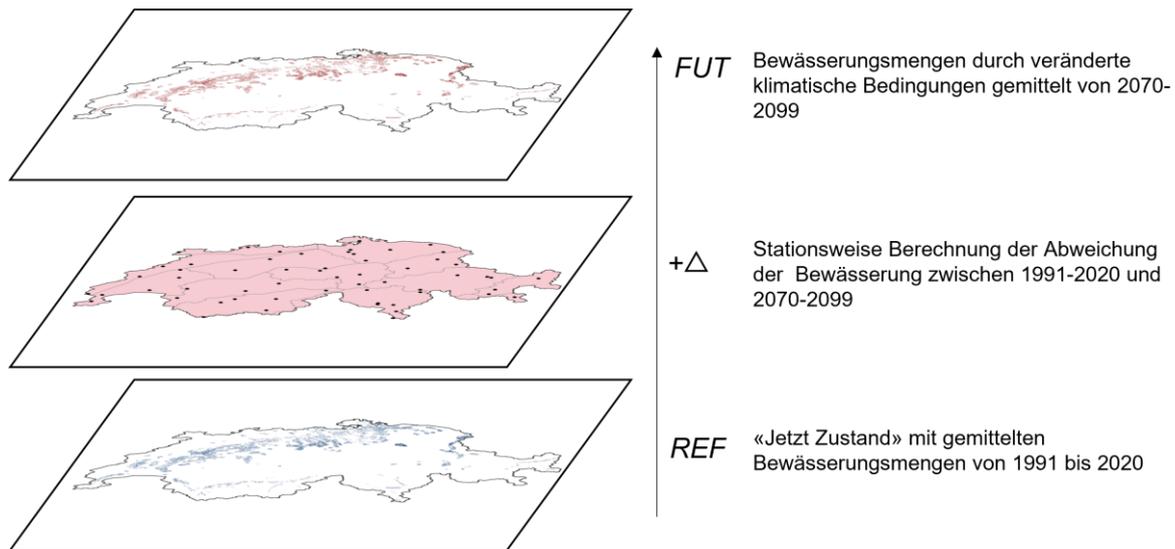


Abbildung 25: Schematische Darstellung der Vorgehensweise zur Hochskalierung der Klimaprojektionen für die gesamte Schweiz.

In Abbildung 26 sind die mittleren Bewässerungsmengen für die Zeitabschnitte 1990-2020 und 2077-2099 mit RCP-Szenario 4.5 resp. 8.5 in der Schweiz dargestellt.

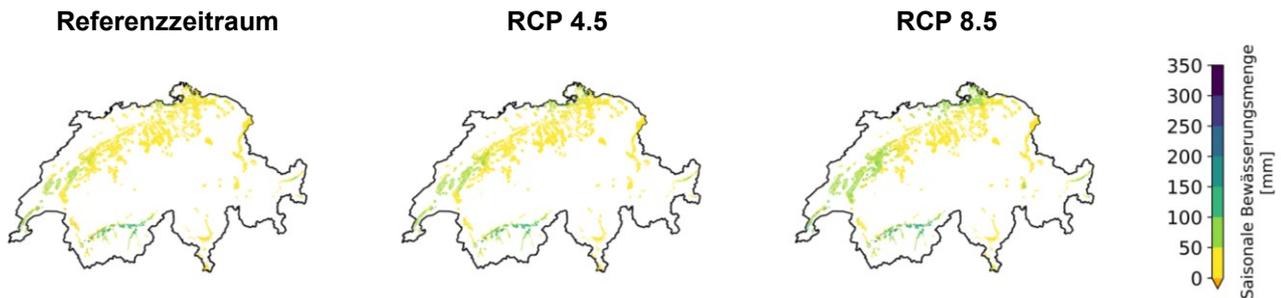


Abbildung 26: Durchschnittliche saisonale Bewässerungsmengen (mm) für den Referenzzustand (links) im Vergleich mit Durchschnittswerten in Zukunft mit RCP4.5 (Mitte) sowie RCP8.5 (rechts); Hintergrund: Swisstopo.

Gemäss den Hochrechnungen wurden über die Jahre 1991-2020 im Mittel 19.3 Mio. m³ pro Jahr für die Bewässerung der ausgewählten Freilandkulturen gebraucht. Durch sich veränderndes Klima werden in den Jahren 2077-2099 unter Annahme von RCP 4.5 im Mittel 20.4 Mio. m³ pro Jahr und unter Annahme von RCP 8.5 im Mittel 23.3 Mio. m³ pro Jahr an Bewässerungswasser gebraucht. Es zeigt sich also eine Zunahme von 6 respektive 21 Prozent bezogen auf den mittleren jährlichen Wasserverbrauch für Bewässerung. Schon jetzt kommt es in Trockenjahren in einigen Regionen zu Engpässen, insbesondere bei der Bewässerung aus Oberflächengewässern, was Entnahmestopps zur Folge hat. Diese Analyse zeigt auf, dass derartige Probleme in Zukunft wahrscheinlich häufiger werden – insbesondere dann, wenn keine ausreichend wirksamen Klimaschutzmassnahmen ergriffen werden.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die im Rahmen des Projektes erarbeitete Methode zur modell-gestützten Abschätzung der Bewässerungsmengen in der Schweiz erzielte trotz vorhandener Daten- und Modellunsicherheiten grössenordnungsmässig ähnliche Ergebnisse wie die zur Korrektur der bewässerten Fläche verwendete und kürzlich veröffentlichte Hochrechnung des BFS für das Jahr 2023. Auch die Vergleiche regionaler Modellschätzungen mit aufgezeichneten Wasserentnahmemengen in den Teilregionen Ramsen (SH) und Untersee (TG) zeigen das Potential der modell-gestützten Methode auf. Gemäss Hochrechnungen werden die Bewässerungsmengen ohne Klimaschutzmassnahmen durch klimatologische Veränderungen um gut 20% bis zum Ende Jahrhundert zunehmen. Diese Zunahmen zeigen, dass weitere Anpassungen insbesondere auch beim Wassermanagement notwendig sein werden.

Insgesamt scheint die modell-gestützte Methode eine vielversprechende Methode für die Abschätzung von Bewässerungsverbrauchsmengen in der Schweiz zu sein, jedoch können die Modellergebnisse derzeit die Informationslücken aufgrund der grossen Unsicherheiten nicht ausreichend gut schliessen. Um die Unsicherheiten der Modellergebnisse zu reduzieren, werden Verbesserungen in folgenden Bereichen vorgeschlagen: (1) räumliche Grundlagedaten, (2) Referenzinformationen und (3) Modellparametrisierungen und Prozessabbildung.

6.1 Verbesserungen Datengrundlagen

6.1.1 Räumlicher Grundlagedaten

Die schweizweit verfügbaren Grundlagedaten zu Klima, Boden, Landnutzung und potenziell bewässerten Flächen weisen Unsicherheiten auf, die die Genauigkeit der Modellschätzungen beeinflussen. So wurden Klimadaten wie Temperatur oder Niederschlag auf 1 km Auflösung interpoliert; für die Strahlung ist diese Auflösung noch geringer. Dadurch können kleinräumliche, klimatische Unterschiede, die für die Landwirtschaft eine wichtige Rolle spielen können, nicht berücksichtigt werden. Zusätzliche Informationen zu Windgeschwindigkeiten und relativer Feuchte könnten helfen, die Schätzungen der potenziellen Evapotranspiration, die in der Modellmethode eine entscheidende Grösse darstellt, zu verbessern.

Für die Bodenbeschaffenheiten wurden die Hinweiskarten für Bodeneigenschaften modelliert für drei Tiefenstufen verwendet. Regional können diese Karten hohe Unsicherheiten aufweisen, die zu Fehleinschätzungen des Bewässerungsbedarfs führen. Weiterentwicklungen des verwendeten Bodendatensätze sind deshalb wünschenswert.

Wie in Kap. 3.3 schon erwähnt, sind die Landnutzungsdaten nicht als Forschungsdatensatz erhoben worden, sondern wurden im Zusammenhang mit Direktzahlungen zusammengestellt. Die Daten wurden von den Kantonen separat erhoben und dann anschliessend zusammengetragen. Das Zusammentragen und Aufbereiten der Informationen führte in der Folge zu fehlenden Georeferenzierungen (z.B. bei Obst und mehrjährigen Beeren in der Region Bern in 2021 und 2022, siehe Kap. 3.3), die in Zukunft bei der Aufbereitung noch berücksichtigt werden sollten. Eine wichtige Einschränkung besteht darin, dass jeweils nur eine Hauptkultur erfasst wird. Das heisst Folgekulturen mit Bewässerungsbedarf werden nicht aufgeführt (z.B. Gemüse nach Wintergetreide). Insbesondere bei den Kulturgruppen «Gemüse» und «Obst» sowie «Beeren» wäre es hilfreich, differenzierte Informationen zur Art der Kultur zu haben, weil sich beispielsweise Gemüsekulturen hinsichtlich der relevanten Kulturparameter (d.h. Kulturperiode, Wasserbedarf, Wurzeltiefe) stark unterscheiden können und deshalb auch bezüglich Wasserbedarf für Bewässerung stark variieren. Ähnliches gilt auch für Obst und Beeren. Wo der geschützte Anbau (z.B. unter Tunnel) einen wesentlichen Einfluss hat, wäre es wichtig, diese Kulturflächen separat auszuweisen. Als Alternative zum Landnutzungsdatensatz der Geodienste, könnten in Zukunft satelliten-gestützte Datenprodukte zur Identifikation der Kulturen dienen (siehe Turkoglu et al. (2021)). Darüber hinaus hat die Blattfläche einer Kultur einen maßgeblichen Einfluss auf die potenzielle Verdunstungsleistung und damit auf die Wassernutzung. Auch diese kann zuverlässig aus Fernerkundungsdaten abgeschätzt (Graf et al., 2023; Tschurr et al., 2025) und als Information in mechanistische Modelle zur Berechnung des Wasserbedarfs integriert werden. In dieser Arbeit wurde der Fokus auf 10 Hauptkulturen gelegt. Eine Bewässerung auch anderer Kulturen/Kulturgruppen ist aber sehr wahrscheinlich und würde die Bewässerungsmengen erhöhen.

Neben den Modellgenauigkeiten haben die Annahmen über potenziell bewässerte Kulturlächen einen entscheidenden Einfluss auf die Schätzgenauigkeit regional aggregierter Bewässerungsmengen. Die Karte potenziell bewässerter Gebiete, die den Schätzungen in dieser Arbeit zugrunde liegt, basiert auf kantonalen Informationen, wobei sich der Detaillierungsgrad von Kanton zu Kanton stark unterschied (siehe Kapitel 3.4). Ausserdem wurde bei Entnahmestellen eine durchschnittliche Transportdistanz von Bewässerungswasser von 1.6 km angenommen. Diese kann aber je nach Pumpstation auch kleiner oder grösser sein. Beim definierten Bewässerungsperimeter ist zu beachten, dass gewisse Kulturen im Perimeter nicht bewässerungswürdig sind oder eine Bewässerung in Teilen des Perimeters technisch nicht möglich ist. Aus diesem Grund wurde ausgehend von dieser Karte ein Mittelwert für die saisonale Bewässerungsmenge für jede Kultur ermittelt, welche dann über die Anteile an bewässerter Fläche pro Kanton auf die ganze Schweiz hochgerechnet wurde. Für die Hochrechnung auf die ganze Schweiz, wurde die BFS-Erhebung zur bewässerten Fläche vom Jahr 2023 verwendet (BFS, 2023). Aktuell bilden die Erhebungen des BFS dazu die zuverlässigste verfügbare Grundlage auf schweizweiter Ebene. Es handelt sich dabei um eine Zusatzerhebung des BFS, die verschiedenen Variablen aus verschiedenen Themengebieten umfasst und in der Regel alle 3 Jahre stattfindet. Der Stichprobenplan dieser Erhebung wird jeweils mit dem Ziel entwickelt, bestimmte Zielgrössen mit einer hinreichenden Präzision schätzen zu können. Im Methodenbericht «Zusatzerhebung für die landwirtschaftliche Betriebszählung 2010» (Assoulin, 2013) wird dies im Detail für die Erhebung 2010 beschrieben. So wurde der Plan für die Zusatzerhebung 2010 mit dem Ziel entwickelt, dass die landwirtschaftliche Nutzfläche sowie der Rindvieh- und Schweinebestand auf kantonaler Ebene mit einem Variationskoeffizienten von 5% geschätzt werden können. Die Variable «bewässerbare Fläche» zeigte teilweise grössere Variationskoeffizienten. Es könnte also sein, dass in gewissen Kantonen die bewässerte Fläche nur wenig mit der landwirtschaftlichen Fläche zu tun hat, nach welcher der Plan optimiert wurde. Die Situation für die anderen Erhebungen, wie jene von 2023, ist analog. In diesem Bereich gibt es also noch Unsicherheiten, die die Resultate massgeblich beeinflussen. Durch zielgerichtete Erhebungen oder auch genauere Erfassungsmöglichkeiten bewässerter Flächen auf kantonaler Ebene oder sogar darunter (vielleicht auch mithilfe von Satelliten wie im Anhang 9.2 beschrieben) könnte eine genauere Abschätzung der Bewässerungsmengen erreicht werden.

Eine Zuordnung der potenziell bewässerten Gebiete zu einzelnen Wasserquellen besteht bisher nicht. Eine solche wäre aber nötig, um auf regionaler Ebene einen Abgleich zwischen Ressourcenverfügbarkeit und Bedarf vornehmen zu können. Für ein integriertes Wasserressourcenmanagement wäre eine solche Verknüpfung von entscheidender Bedeutung.

6.1.2 Referenzinformationen zur Bewässerungspraxis

Für dieses Projekt standen zwei Datensätze zur Praxisbewässerung zur Verfügung: Daten von HAFL wie in Kap. 3.5 beschrieben sowie Daten aus dem Ressourcenprojekt-Projekt «Effiziente Bewässerung Vaud». Aus Datenschutzgründen konnten die Informationen aus dem Ressourcen-Projekt räumlich nicht eindeutig zugeordnet werden, was Unsicherheiten mit sich brachte. Des Weiteren beziehen sich beide Referenzdatensätze mehrheitlich auf den südwestlichen Teil des Schweizer Mittellands. Eine Erweiterung der Referenzdatenbasis zur Praxisbewässerung in anderen Regionen der Schweiz wäre wünschenswert, um sicherzustellen, dass die Modellanpassungen für die gesamte Schweiz repräsentativ sind. Gegebenenfalls könnten auf Basis eines gesamtschweizerischen Referenzdatensatzes regionale Parameteranpassungen gemacht werden. Für Verbesserungen der kulturspezifischen Modellparametrisierungen wären Erweiterungen der Referenzinformationen zu applizierten Bewässerungsmengen für möglichst viele Standorte und Jahre grundsätzlich hilfreich. Referenzdaten sollten idealerweise möglichst genaue Angaben zu Ort und Zeit beinhalten sowie auch Zusatzinformationen zur Bewässerungsmethode oder zu Einschränkungen der Wasserverfügbarkeit (z.B. aufgrund von Entnahmeverboten). Wo präzise Zeitangaben fehlen, ist es wichtig zwischen Frostberegnung und regulärer Bewässerung zu unterscheiden.

In dieser Arbeit war es Ziel, den wahrscheinlichen Wasserverbrauch für Bewässerung zu schätzen und nicht den theoretischen Bewässerungsbedarf der Kulturen. Deshalb war die Verfügbarkeit von Referenzinformationen zur Bewässerung für unterschiedliche Kulturen, Jahre und Standorte von entscheidender Bedeutung für die kulturspezifischen Modellanpassungen. Der Abgleich der modellierten Bewässerungsmengen mit Referenzinformationen aus der Praxis hat gezeigt, dass ein Grossteil der Varianz in der Praxisbewässerung durch

das Modell nicht erklärt werden kann. Unsicherheiten in den räumlichen Datengrundlagen und in den Referenzdaten, die oben beschrieben sind, können dabei eine Rolle spielen. Darüber hinaus scheint aber auch die Varianz in der Umsetzung der Bewässerungspraxis gross zu sein. Die Entscheidung ob und wieviel bewässert wird hängt von vielen Faktoren ab, die nicht durch naturräumliche Gegebenheiten bestimmt sind (z.B. subjektive Wahrnehmung der Notwendigkeit zu bewässern, Verfügbarkeit von Arbeitskraft und Material zum Bewässerungseinsatz, Einschränkungen durch Wasserentnahmeverbote). Da solche Faktoren mit dem Modellansatz konzeptionell nicht repräsentiert werden können, wird diese «Management-Unsicherheit» nicht zu reduzieren sein. Allein durch die Einbeziehung eines möglichst grossen Referenzdatensatzes kann erreicht werden, dass die Modellschätzungen im Mittel als repräsentativ angenommen werden können.

Am Beispiel Ramsen in Kap. 5.3 konnte gezeigt werden, dass Entnahmestopps aus Oberflächengewässern sowie die Schätzung der Bewässerungsmengen wesentlich beeinflussen können. Solche Informationen stehen jedoch schweizweit nicht einheitlich zur Verfügung, weil Wasserentnahmeeinschränkungen auf Ebene der Kantone und Gemeinden gehandhabt werden, wo Informationen in nicht einheitlicher Form aufgezeichnet werden (siehe auch (HAFL et al. (Hrsg.), 2023).

6.2 Modellverbesserungen

Die FAO56-Methode ist eine einfache aber gut etablierte Methode zur Schätzung des Pflanzenwasser- und Bewässerungsbedarfs. Im Vergleich zu dieser Methode könnte ein komplexerer biophysikalischer Modellansatz Prozesse wie Bodenwasserhaushalt, dynamisches Pflanzenwachstum und Wurzelwasseraufnahme grundsätzlich präziser abbilden. Um zu untersuchen, ob ein komplexerer Ansatz für die Abschätzung des Wasserverbrauchs für Bewässerung Vorteile mit sich bringen könnte, wurde im Rahmen des Projekts ein Modellvergleich zwischen FAO56 und SWAP (Kroes et al., 2017) durchgeführt (siehe Anhang 9.3). Dieser hat gezeigt, dass auch mit dem komplexeren Modell SWAP keine bessere Übereinstimmung der Modellschätzwerte mit den erhobenen Bewässerungsmengen für Kartoffeln erzielt werden konnte als mit der einfacheren Methode FAO56. Es ist zu vermuten, dass die theoretischen Vorteile, die der komplexere Modellansatz mit sich bringt auf Grundlage der vorhandenen räumlichen Daten nicht zum Tragen kommen. Boden- und Klimainformationen sind für parzellengenaue Vorhersagen nicht optimal aufgelöst und mit Fehlern behaftet, und auch die Referenzdatengrundlage war für diese Arbeit noch beschränkt (siehe Kapitel 6.1.2). Zukünftige Arbeiten auf Grundlage genauerer Daten zu Boden, Klima und Kultur müssen zeigen, unter welchen Bedingungen die Vorteile eines komplexeren Modellansatzes schliesslich zum Tragen kommen. Auch die Möglichkeiten zur Verbesserung der Modellschätzungen mit FAO56 können mit einem erweiterten Referenzdatensatz untersucht werden. Mit spezifischeren Informationen zu angebauten Gemüse-, Obst- oder Beerensorten könnten die Kulturparameter innerhalb dieser Gruppen besser angepasst werden und auch Unterscheidungen verschiedener Anbaumethoden (z.B. Bedeckt vs. nicht bedeckt) könnten die Ergebnisse verbessern. Das Python-Modell pyFAO56 bietet alternative Möglichkeiten, die Bewässerung zu spezifizieren und wird laufend weiterentwickelt. In dieser Arbeit wurde die Bewässerung im Modell auf Basis einer Bewässerungsschwelle für den Bodenwassergehalt ausgelöst. Alternative Implementierungen könnten Verbesserungen mit sich bringen, sofern die Referenzdatengrundlage ausreichend gross ist. Weitere Parameter die den verschiedenen Bedürfnissen der Pflanzen sowie den technischen Möglichkeiten angepasst werden können, sind minimale/maximale Bewässerungsmenge, akzeptierbare Trockenperioden, Möglichkeiten der Bewässerung nach einem Regenereignis, und Bewässerungseffizienz. Ausserdem könnten Bewässerungsschwellen in Abhängigkeit von Wachstumsstadien der Pflanze bestimmt werden.

7 Danksagung

Wir danken dem BAFU für die Finanzierung dieses Projektes. Unser besonderer Dank gilt Petra Schmocker-Fackel und Fabia Hüsler vom BAFU für die enge Begleitung des Projektes, für viele bereichernde Diskussionen und für ihr stets konstruktives Feedback. Allen Mitgliedern der Begleitgruppe danken wir für die Unterstützung und Beratung während der gesamten Projektlaufzeit. Für die Bereitstellung von Informationen zur Praxisbewässerung danken wir Andreas Keiser und seinem Team an der HAFL, sowie der Projektleitung des Ressourcenprojektes «Effiziente Bewässerung Waadt». Des Weiteren wollen wir dem Team von Andreas Keiser für die interessante, konstruktive und erfolgreiche Zusammenarbeit im Rahmen dieses Projekt danken. Den Kantonen Schaffhausen und Thurgau danken wir für die Bereitstellung der erhobenen Wasserentnahmemengen für Bewässerung. Felix Stumpf vom Kompetenzzentrum Boden danke wir für die frühzeitige Bereitstellung neu entwickelter räumlicher Bodendatenprodukte. Ein grosser Dank geht auch an alle ExpertInnen, die mit regions- und kultur-spezifischen Fachwissen zu diesem Projekt beigetragen haben.

8 Literaturverzeichnis

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements—FAO Irrigation and drainage paper 56*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Althoff, D., & Rodrigues, L. N. (2021). Goodness-of-fit criteria for hydrological models: Model calibration and performance assessment. *Journal of Hydrology*, Nr. 600, Art. 126674. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126674>
- Assoulin, D. (2013). *Methodenbericht—Zusatzerhebung für die landwirtschaftliche Betriebszählung 2010*. Bundesamt für Statistik (BFS). <http://www.statistik.admin.ch>
- BAFU (Hrsg.). (2021). *Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer. Hydrologie, Gewässerökologie und Wasserwirtschaft*. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 2101 : 134 S.
- Begert, M., Seiz, G., Foppa, N., Schlegel, T., Appenzeller, C., & Müller, G. (2017). Die Überführung der klimatologischen Referenzstationen der Schweiz in das Swiss National Basic Climatological Network (Swiss NBCN). *Arbeitsberichte der MeteoSchweiz*, 215, 43 p.
- BFS. (2023). *Landwirtschaftliche Betriebszählung – Zusatzerhebung Herbst 2023*. Bundesamt für Statistik, Neuenburg.
- CH2018. (2018). *CH2018-Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report*. National Centre for Climate Services, Zurich, 271 pp. ISBN: 978-3-9525031-4-0.
- Ebmeyer, H., & Hoffmann, C. M. (2022). Water use efficiency of sugar beet genotypes: A relationship between growth rates and water consumption. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 208(1), S. 28-39. <https://doi.org/10.1111/jac.12569>
- EBP. (2019). *Trockenheit im Sommer und Herbst 2018—Auswirkungen und deren Bewältigung in der Schweizer Wasserwirtschaft*. Im Auftrag des Bundesamt für Umwelt (BAFU).
- Eisenring, S., Holzkämper, A., & Calanca, P. (2021). *Berechnung der Bewässerungsbedürfnisse unter aktuellen und zukünftigen Bedingungen in der Schweiz*. Agroscope Science, Nr. 107. <https://doi.org/10.34776/AS107G>
- Frei, E., Vökt, U., Flückiger, R., Brunner, H., & Schai, F. (1980). *Bodeneignungskarte der Schweiz (Masstab 1:200'000)* [Grundlagen für die Raumplanung, Bundesämter für Raumplanung, Landwirtschaft und Forstwesen, EMDZ, Bern].
- Fuhrer, J., & Jasper, K. (2012). Demand and Supply of Water for Agriculture: Influence of Topography and Climate in Pre-Alpine, Mesoscale Catchments. *Natural Resources*, 03, 145–155. <https://doi.org/10.4236/nr.2012.33019>
- Fuhrer, J., & Smith, P. (2015). *Grundlagen für die Abschätzung des Bewässerungsbedarfs im Kanton Basel-Landschaft*. Agroscope im Auftrag vom Amt für Umweltschutz und Energie, Kanton Basel-Landschaft.
- Gao, B. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), S. 257-266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- Graf, L. V., Merz, Q. N., Walter, A., & Aasen, H. (2023). Insights from field phenotyping improve satellite remote sensing based in-season estimation of winter wheat growth and phenology. *Remote Sensing of Environment*, 299, 113860. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113860>
- Haboudane, D., Miller, J. R., Tremblay, N., Zarco-Tejada, P. J., & Dextraze, L. (2002). Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 81(2), S. 416-426. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00018-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00018-4)

- HAFL. (2022). *Feldbeobachtungen auf bewässerten Kartoffelfeldern im Einzugsgebiet der Broye 2018–2021 sowie schweizweit 2018-2020 (nicht veröffentlicht)* [Dataset]. Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL, Zollikofen
- HAFL et al. (Hrsg.). (2023). *Datengrundlage und künftige Datenerfassung zur landwirtschaftlichen Bewässerung in der Schweiz—Projekt „SwissIrrigationInfo“: Schlussbericht Modul 1*. Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL, Zollikofen.
- Heinz, M., Turek, M. E., Schaefli, B., Keiser, A., & Holzkämper, A. (2025). Can adaptations of crop and soil management prevent yield losses during water scarcity? A modelling study. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 29, S. 1807-1827. <https://doi.org/10.5194/hess-29-1807-2025>
- Holzkämper, A., Cochand, F., Rössler, O., Brunner, P., & 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. <https://doi.org/10.34776/NCCS21AA>
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1), S. 195-213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- Kanton Wallis. (2025). *DLW, Rebbaud und Wein, Technische Informationen, Bewässerung*. <https://www.vs.ch/de/web/sca/irrigation2>, Zugriff: 29. Januar 2025
- KGK-CGC. (2023). *Landwirtschaftliche Nutzflächen 2021, 2022 und 2023* [Dataset]. <https://geodienste.ch/>
- Klein, R. J. T., Midgley, G. F., Preston, B. L., Alam, M., Berkhout, F. G. H., Dow, K., & Shaw, M. R. (2014). Adaptation opportunities, constraints, and limits. In *In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, S. 899-943.
- Krause, P., Boyle, D. P., & Bäse, F. (2005). Comparison of Different Efficiency Criteria for Hydrologic Models. *Advances in Geosciences*, 5, S. 89-97. <https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005>
- Kroes, J. G., J.C. Van Dam, Bartholomeus, R. P., Groenendijk, P., Heinen, M., Hendriks, R.F.A., Mulder, H.M., Supit, I., & Van Walsum, P. E. V. (2017). *Swap version 4; Theory description and user manual*. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Report 2780. 244 pp.; 57 fig.; 17 tab.; 312 ref.
- MeteoSwiss. (2021). *MeteoSwiss Spatial Climate Analyses: Documentation of Datasets for Users*. https://www.meteoswiss.admin.ch/dam/jcr:215c313a-dc13-4b67-bca0-dbd966597f9a/2024-ProdDoc_Cover-dfie.pdf, Zugriff: 04. April 2025
- NABODAT (2025). Nationales Bodeninformationssystem. <https://ccsols.ch/de/datenmanagement/nationales-bodeninformationssystem-nabodat/>
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), S. 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A. R., Kerr, Y. H., & Sorooshian, S. (1994). A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 48(2), S. 119-126. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90134-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90134-1)
- Schüepp, M., G. Gensler, 1980. Klimaregionen der Schweiz. In: Müller G., 1980. Die Beobachtungsnetze der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt. Konzept 1980. Arbeitsberichte der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt, Nr. 93, Anhang Ib. Zürich.
- Seiler, F. L., Mann, S., & Holzkämper, A. (2022). Steigende Ausgaben: Landwirtschaftliche Wassernutzung im Wandel. *Agrarforschung Schweiz*, 13, S. 96-102. <https://doi.org/10.34776/afs13-96>

- Sjulgård, H., Graf, L. V., Colombi, T., Hirte, J., Keller, T., & Aasen, H. (2025). Earth observation reveals reduced winter wheat growth and the importance of plant available water during drought. *Biogeosciences*, 22(5), S. 1341-1354. <https://doi.org/10.5194/bg-22-1341-2025>
- Stumpf, F., Behrens, T., Schmidt, K., & Keller, A. (2024). Exploiting Soil and Remote Sensing Data Archives for 3D Mapping of Multiple Soil Properties at the Swiss National Scale. *Remote Sensing*, 16(15), 2712. <https://doi.org/10.3390/rs16152712>
- Stumpf, Felix., Behrens, T., Schmidt, K., & Keller, A. (2023). *Hinweiskarten für Bodeneigenschaften—Landesweit modellierte Karten für Bodeneigenschaften für drei Tiefenstufen. KOBO-Bericht Nr. 6.* BFH-HAFL, CH-3052 Zollikofen-Bern, verfügbar unter www.ccsols.ch.
- Szabó, B., Weynants, M., & Weber, T. K. D. (2021). Updated European hydraulic pedotransfer functions with communicated uncertainties in the predicted variables (euptfv2). *Geoscientific Model Development*, 14(1), S. 151-175. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-151-2021>
- Thorp, K. R. (2022). pyfao56: FAO-56 evapotranspiration in Python. *SoftwareX*, 19, 101208. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2022.101208>
- Tschurr, F., Graf, L. V., Walter, A., & Aasen, H. (2025). Enhanced gap-filling for satellite-derived crop monitoring using temperature-driven reconstruction techniques. *Smart Agricultural Technology*, 10, 100816. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100816>
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), S. 127-150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
- Turkoglu, M. O., D'Aronco, S., Perich, G., Liebisch, F., Streit, C., Schindler, K., & Wegner, J. D. (2021). Crop mapping from image time series: Deep learning with multi-scale label hierarchies. *Remote Sensing of Environment*, 264, 112603. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112603>
- Weber, M., & Schild, A. (2007). *Stand der Bewässerung in der Schweiz—Bericht zur Umfrage 2006.* Bundesamt für Landwirtschaft BLW, Bern.
- Willmott, C. J. (1981). *On the Validation of Models*. 2(2), S. 184-194. <https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>
- Zarrineh, N., Abbaspour, K. C., & Holzkämper, A. (2020). Integrated assessment of climate change impacts on multiple ecosystem services in Western Switzerland. *Science of The Total Environment*, 708, 135212. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135212>

9 Appendix

9.1 Datengrundlage für Klimamodellierungen

Für die Klimamodellierungen standen verschiedene Modellketten zur Verfügung. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Modellketten in Tabelle 12 verwendet.

Tabelle 12: Modellketten, die für die Klimamodellierungen für das RCP 4.5 und RCP 8.5 betrachtet wurden.

Modellketten RCP 4.5	Modellketten RCP 8.5
CLMCOM-CCLM4 ECEARTH EUR11	CLMCOM CCLM4 ECEARTH EUR11
CLMCOM-CCLM4 HADGEM EUR11	CLMCOM CCLM4 HADGEM EUR11
CLMCOM-CCLM4 MPIESM EUR11	CLMCOM CCLM4 HADGEM EUR44
CLMCOM-CCLM4 MPIESM EUR44	CLMCOM CCLM4 MPIESM EUR11
DMI-HIRHAM ECEARTH EUR11	CLMCOM CCLM4 MPIESM EUR44
DMI-HIRHAM ECEARTH EUR44	CLMCOM-CCLM5 ECEARTH EUR44
KNMI-RACMO ECEARTH EUR44	CLMCOM-CCLM5 HADGEM EUR44
KNMI-RACMO HADGEM EUR44	CLMCOM-CCLM5 MIROC EUR44
MPICSC-REMO1 MPIESM EUR11	CLMCOM-CCLM5 MPIESM EUR44
MPICSC-REMO1 MPIESM EUR44	DMI-HIRHAM ECEARTH EUR11
MPICSC-REMO2 MPIESM EUR11	DMI-HIRHAM ECEARTH EUR44
MPICSC-REMO2 MPIESM EUR44	KNMI-RACMO ECEARTH EUR44
SMHI-RCA CCCMA EUR44	KNMI-RACMO HADGEM EUR44
SMHI-RCA CSIRO EUR44	MPICSC-REMO1 MPIESM EUR11
SMHI-RCA ECEARTH EUR11	MPICSC-REMO1 MPIESM EUR44
SMHI-RCA ECEARTH EUR44	MPICSC-REMO2 MPIESM EUR11
SMHI-RCA GFDL EUR44	MPICSC-REMO2 MPIESM EUR44
SMHI-RCA HADGEM EUR11	SMHI-RCA CCCMA EUR44
SMHI-RCA HADGEM EUR44	SMHI-RCA CSIRO EUR44
SMHI-RCA IPSL EUR11	SMHI-RCA ECEARTH EUR11
SMHI-RCA IPSL EUR44	SMHI-RCA ECEARTH EUR44
SMHI-RCA MIROC EUR44	SMHI-RCA GFDL EUR44
SMHI-RCA MPIESM EUR11	SMHI-RCA HADGEM EUR11
SMHI-RCA MPIESM EUR44	SMHI-RCA HADGEM EUR44
SMHI-RCA NORESM EUR44	SMHI-RCA IPSL EUR11
	SMHI-RCA IPSL EUR44
	SMHI-RCA MIROC EUR44
	SMHI-RCA MPIESM EUR11
	SMHI-RCA MPIESM EUR44
	SMHI-RCA NORESM EUR44

9.2 Satellitenbasierte Abschätzung bewässerter Kulturlächen

Zur Identifikation bewässerter Kulturlächen wurde im Rahmen des Projekts geprüft, ob auf Grundlage optischer Satellitenbildinformationen eine Unterscheidung zwischen bewässerten und nicht bewässerten Flächen möglich ist. Dabei wurden die folgenden Aspekte betrachtet:

- Inwieweit können die relativ kleinen Felder in der Schweiz per Satellit erfasst werden?
- Wie hoch ist die zeitliche Abdeckung von Satellitendaten über die Schweiz?
- Wie gut lassen sich bewässerte von nicht bewässerten Kartoffelfeldern mithilfe von Zeitreihenanalysen differenzieren?

Als Referenzinformationen für die Differenzierung zwischen bewässerten und nicht bewässerten Feldern standen parzellenspezifische Daten zu Kartoffeln in der Broye-Region aus den Jahren 2018 bis 2021, bereitgestellt von der HAFL, zur Verfügung.

9.2.1 Erfassbarkeit der landwirtschaftlichen Felder in der Schweiz per Satellit

Als Referenz für die räumliche Abgrenzung landwirtschaftlicher Nutzflächen diente der Vektordatensatz der Geodienste für die Jahre 2020 und 2021 (KGG-CGC, 2023). Die darin enthaltenen Felder wurden für jede Kultur mit dem 10-m- und 20-m-Beobachtungsgrid von Sentinel-2 verschnitten, um die Anzahl der vollständig innerhalb eines Feldes liegenden Pixel zu analysieren.

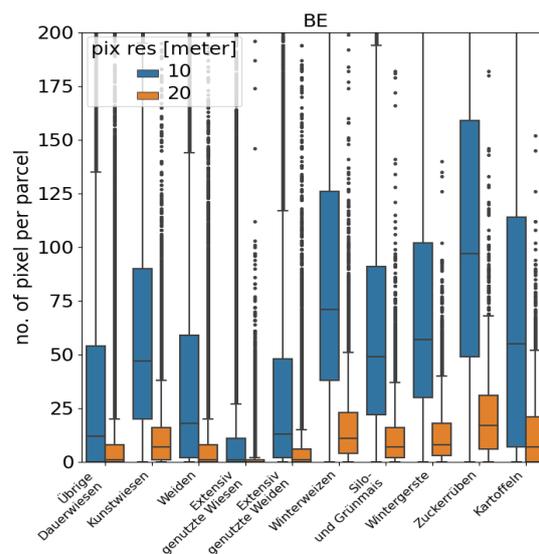


Abbildung 27: Die zehn flächenanteilig größten Kulturen im Kanton Bern mit der Anzahl Pixel pro Feld in 10m und 20m Auflösung, welche vollständig innerhalb eines Feldes liegen.

Abbildung 27 zeigt die Ergebnisse exemplarisch für den Kanton Bern. Deutlich erkennbar ist, dass für nahezu alle Kulturen mehrere 10-m-Pixel innerhalb eines Feldes liegen. Auch bei der 20-m-Auflösung befinden sich in nahezu allen Kulturen noch mehrere Pixel pro Feld. Ein ähnliches Muster zeigte sich für die Hauptkulturen auch in anderen Kantonen.

9.2.2 Temporale Abdeckung der Schweiz mit Satellitendaten

Als Grundlage für die Analyse werden Sentinel-2-Daten mit einer kanalabhängigen Bodenauflösung von 10 m und 20 m verwendet¹. Durch die Kombination der beiden Sentinel-2-Satelliten ergibt sich für die Schweiz eine potenzielle Aufnahmezeit von zwei bis fünf Tagen, abhängig vom Standort. Diese theoretische Aufnahmezeit wird jedoch durch Wolken oder Nebel weiter reduziert.

¹ <https://sentinewiki.copernicus.eu/web/s2-mission>

Abbildung 28 zeigt die mittlere Aufnahme­rate über die gesamte Schweiz. Deutlich erkennbar sind zwei Streifen, die aufgrund der Satellitenorbits weniger abgedeckt werden als der restliche Teil der Schweiz.

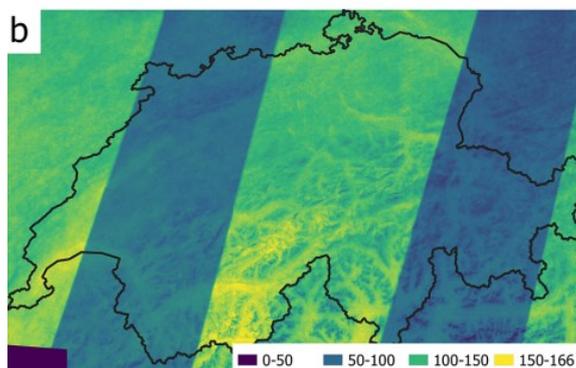


Abbildung 28: Summer der nutzbaren Sentinel-2 Szenen nach dem Ausschliessen von Wolken­szenen während der Wachstumsperiode (April – November) in den Jahren 2017, 2018 und 2019 (Pazúr et al., 2022).

Für die Klassifikation von Kartoffeln ist insbesondere die Verfügbarkeit geeigneter Aufnahmen während der relevanten Vegetationsperiode vom 1. April bis 15. September entscheidend. Durch die Einschränkung auf Szenen mit einer Gesamtbewölkung von weniger als 15 % sowie durch lokale Wolkenbedeckung und Nebel reduziert sich die Anzahl der nutzbaren Aufnahmen pro landwirtschaftliche Parzelle. In den Jahren 2018 bis 2020 standen durchschnittlich etwa 13 Szenen pro Parzelle zur Verfügung, während im Jahr 2021 lediglich 9 Szenen verfügbar waren (Tabelle 13).

Tabelle 13 Anzahl der verfügbaren Sentinel-2 Satellitenbildakquisitionen für die Jahre 2018-2021 zwischen dem 01. April und 15. September unter Berücksichtigung einer Szenenauswahl mit weniger als 15% Gesamtwolkenbedeckung

Jahr	Min. Aufnahmen pro Parzelle	Max. Aufnahmen pro Parzelle	Durchschnittl. Anzahl
2018	11	14	12.6
2019	7	16	13.5
2020	8	15	13.5
2021	7	9	8.7

9.2.3 Detektieren von bewässerten Flächen mit Hilfe von Satellitendatenzeitreihen

Eine Unterscheidung zwischen bewässerten und nicht bewässerten Flächen mithilfe von Satellitendaten kann auf verschiedene Weise erfolgen. Diese Ansätze lassen sich grob in drei Kategorien unterteilen:

- **Observationsbasierte Ansätze:** Hierbei werden direkte Beobachtungen verschiedener Felder miteinander verglichen, um potenzielle Abweichungen zwischen bewässerten und nicht bewässerten Flächen zu identifizieren.
- **Observations-statistisch-modellbasierte Ansätze:** In diesem Fall wird ein Modell aus einer großen Menge an Referenzdaten und möglicherweise zusätzlichen Informationen wie Wetter- oder Bodendaten trainiert, um eine Klassifikation der Felder zu ermöglichen.
- **Observations-mechanistisch-modellbasierte Ansätze:** Diese Methode kombiniert Beobachtungen mit weiteren Informationsquellen wie Boden- oder Wetterdaten in einem Modell, das den aktuellen Zustand („Ist“) mit einem Vergleichszustand („Soll“) abgleicht.

Aufgrund des begrenzten Referenzdatensatzes und des limitierten Projektumfangs, der für Modul 2 zur Verfügung stand, wurde entschieden, dem observationsbasierten Ansatz (i) zu folgen.

Erstellen der Satellitendatenzeitreihen

Es wurde untersucht, ob sich Vegetationsindizes aus multispektralen Daten über Kartoffelfeldern in Abhängigkeit von der Bewässerung unterscheiden. Die zugrunde liegende Hypothese war, dass Bewässerung das Pflanzenwachstum fördert und sich dies in den Wachstumskurven widerspiegelt. Zur Analyse wurden Zeitreihen verschiedener Vegetationsindizes (VIs) aus den Satellitendaten berechnet. Basierend auf Ergebnissen aus der Literatur wurden für diese Studie die häufig verwendeten Indizes NDVI, NDWI, EVI, MSAVI und TCARI herangezogen.

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

Der Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) ist einer der am häufigsten verwendeten Vegetationsindizes zur Überwachung der Pflanzengesundheit, Biomasse und des Chlorophyllgehalts (Formel 7). Er wurde in den 1970er Jahren entwickelt, um die «Grünheit» bzw. die Biomasse von Steppenvegetation zu bestimmen (Tucker, 1979). Heutzutage wird er hauptsächlich zur Differenzierung zwischen vegetationsbewachsenen und nicht vegetationsbewachsenen Flächen genutzt, sowie als Proxy für Biomasse.

$$NDVI = \frac{(NIR-Red)}{(NIR+Red)} \quad (2)$$

NDWI (Normalized Difference Water Index)

Der Normalized Difference Water Index (NDWI) eignet sich durch die Verwendung nahen und kurzwelligigen Infrarot dazu, Veränderungen im Wasserhaushalt der Pflanze zu beobachten (Gao, 1996)(Formel 8).

$$NDWI = \frac{(X_{nir} - X_{swir})}{(X_{nir} + X_{swir})} \quad (3)$$

EVI (Enhanced Vegetation Index)

Der Enhanced Vegetation Index (EVI) ist ein "optimierter" Vegetationsindex, der das Vegetationssignal mit einer verbesserten Empfindlichkeit (z.B. im Vergleich zum NDVI) in Regionen mit hoher Biomasse verbessern soll (Formel 9). Dies wird durch eine Entkopplung des anteiligen Bodensignals von der Vegetationsschicht und eine Verringerung der atmosphärischen Einflüsse erreicht (Huete et al., 2002).

$$EVI = G \times \frac{(NIR - Red)}{(NIR + C_1 \times Red - C_2 \times Blue + L)} \quad (4)$$

mit $L=1$, $C_1 = 6$, $C_2 = 7.5$, and $G = 2.5$

MSAVI (Modified Soil Adjusted Enhanced Vegetation Index)

Der Modified Soil-Adjusted Vegetation Index (MSAVI) ist eine Weiterentwicklung des Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI) (Formel 10). Er wurde entwickelt, um den Einfluss des Bodens auf die Vegetationsbewertung weiter zu reduzieren, insbesondere in Gebieten mit geringer Vegetationsbedeckung (Qi et al., 1994).

$$MSAVI = \frac{2 \times NIR + 1 - \sqrt{(2 \times NIR + 1)^2 - 8 \times (NIR - rot)}}{2} \quad (5)$$

TCARI (Transformed Chlorophyll Absorption Reflectance Index)

Der Transformed Chlorophyll Absorption Reflectance Index (TCARI) ist ein spektraler Vegetationsindex, der entwickelt wurde, um den Einfluss von Blattstruktur und Bodenhintergrund auf die Schätzung des Chlorophyllgehalts zu minimieren (Haboudane et al., 2002) (6)(6). Chlorophyll und andere Pigmente lassen auf den stresszustand eines Pflanzenbestandes schließen.

$$TCARI = \left[VNIR_{705} - rot - 0.2 \times (VNIR_{705} - grün) \times \left(\frac{VNIR_{705}}{rot} \right) \right] \quad (6)$$

Unterscheidung zwischen bewässerten und nicht-bewässerten Flächen

Abbildung 29 zeigt die resultierenden Zeitreihen für den NDVI der im Datensatz der HAFL enthaltenen bewässerten und nicht bewässerten Felder für die Jahre 2018 bis 2021. Da das Jahr 2018 das trockenste Jahr in dieser Zeitreihe war, hätte man erwarten können, dass in diesem Jahr signifikante Unterschiede in den Wachstumskurven zwischen bewässerten und unbewässerten Feldern auszumachen sind. Dies konnte jedoch nicht festgestellt werden. Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass Management- und Standortunterschiede (insbesondere Bodeneigenschaften) zwischen den betrachteten Parzellen einen grösseren Einfluss auf den Verlauf der Wachstumskurve genommen haben als die Bewässerung. Allein im Jahr 2020 ist in der zweiten Hälfte der Kulturperiode eine Tendenz zu höheren NDVI-Werten mit Bewässerung zu erkennen.

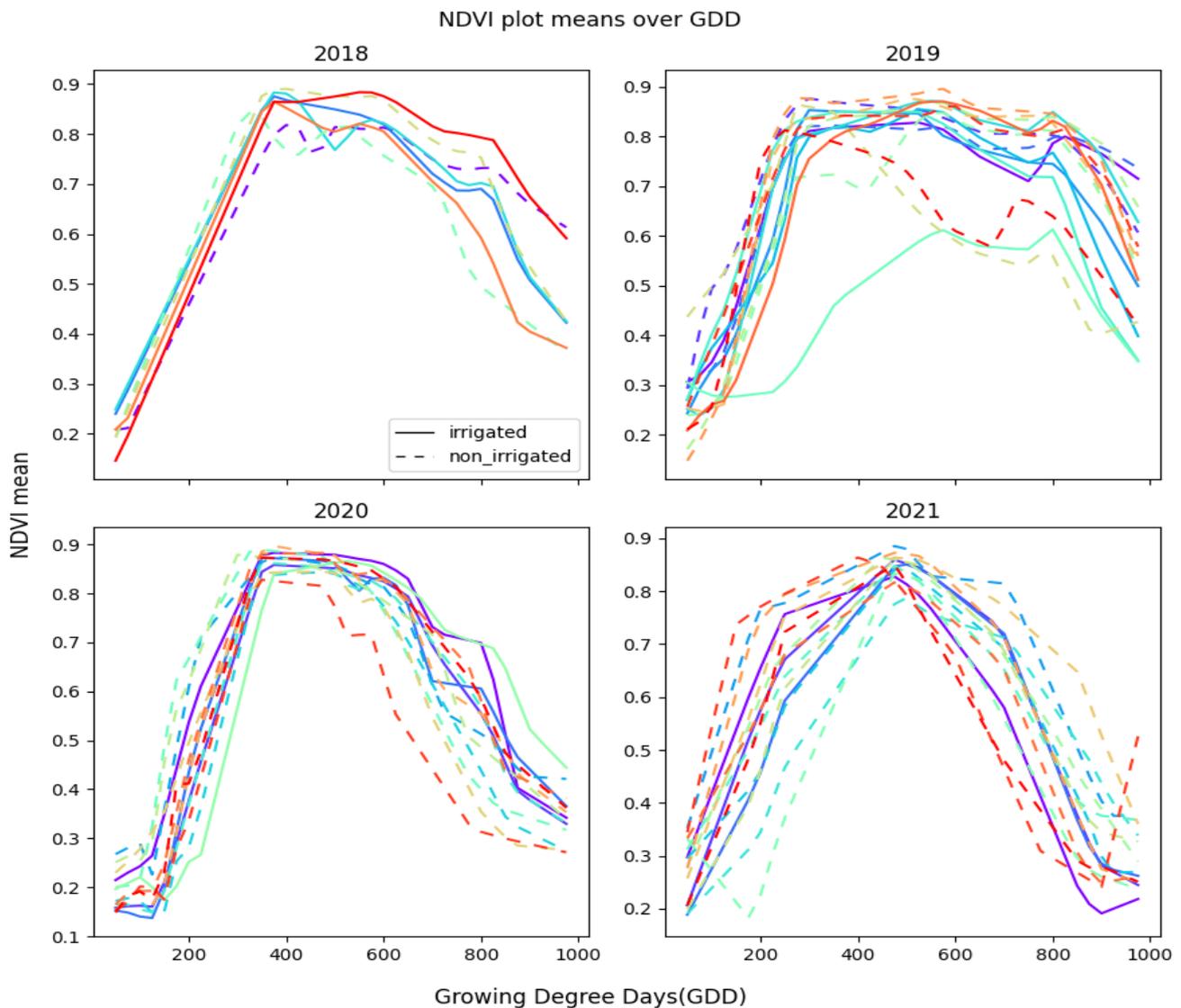


Abbildung 29: Wachstumskurven, dargestellt anhand des NDVI, aller im Datensatz der HAFL enthaltenen Felder für die Jahre 2018 bis 2021 in Abhängigkeit der wachstumsrelevanten Temperatursumme (growing degree days). Die gestrichelten Linien zeigen nicht bewässerte Felder.

Basierend auf deskriptiver Statistik und dem statistischen Trennbarkeitsmaß „Jeffries-Matusita-Distanz“ zur Beurteilung Distanz in der Verteilung zweier Klassen (bewässert vs. unbewässert) wurde dann untersucht, ob sich die bewässerten von nicht bewässerten Feldern statistisch unterscheiden ließen. Wie schon durch das Betrachten von Abbildung 29 zu vermuten, war dies bis auf das Jahr 2020 nicht möglich.

Direkter Vergleich zwischen „ähnlichen“ Feldern

In einem letzten Ansatz wurde dann untersucht, welche Ergebnisse eine Unterscheidung zwischen ähnlichen Feldern liefert. Um ähnliche Felder zu identifizieren, wurden im Datensatz der HAFL-Felder identifiziert, welche vor der ersten Bewässerung eine ähnliche Bodenfeuchteentwicklung zeigten. Durch diesen Vergleich konnten jeweils Tupels von Feldern identifiziert werden, welche sich im Hinblick auf ihre Standortbedingungen ähnlich waren.

Für die daraus entstehenden Tupel wurden dann die Vegetationsentwicklung anhand des NDVIs zwischen dem 1. April und dem Kalendertag 215 verglichen. Insbesondere wurde untersucht, ob die Vegetationsentwicklung sich nach der ersten Bewässerung des bewässerten Feldes von den anderen Feldern unterscheidet. Verglichen wurden auch nur Zeitpunkte, an denen für die Parzellen innerhalb eines Vergleiches ein gemeinsames Aufnahmedatum vorliegt.

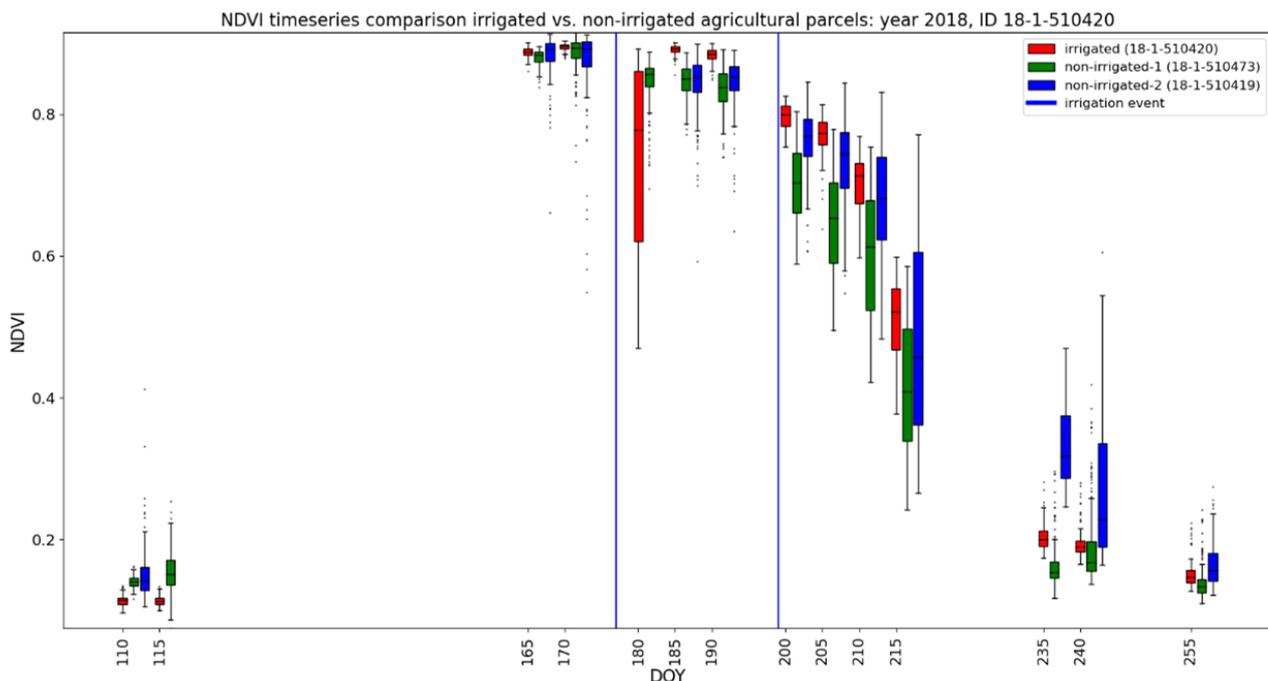


Abbildung 30: Zeitreihen-Boxplot Parzelle ,18-1-510420' (rot) und Vergleichsparzelle (grün und blau). Vertikale blaue Linien zeigen Bewässerungsereignisse.

Abbildung 30, Abbildung 32 und Abbildung 31 zeigen beispielhaft die Boxplots für die Zeitreihenverläufe der bewässerten Parzellen 18-1-510420', 18-1-510447' und 18-1-510465' (jeweils in rot) und der beiden als Vergleichsparzellen identifizierten Pendanten (jeweils grün und blau) für das Jahr 2018. Bewässerungsereignisse sind durch senkrechte blaue Linien indiziert.

Man erkennt für die Parzellen ,18-1-510420' und ,18-1-510465', dass nach dem ersten Bewässerungsereignis um den Tag 177 bzw. 148 das bewässerte Feld jeweils einen höheren Vegetationsindex verzeichnet als die Vergleichsfelder, während sich die Parzellen vor der Bewässerung nicht auffällig positiv verhält (jeweils keine positiven Ereignisse vor der ersten Bewässerung). Alle Beobachtungen nach der ersten Bewässerung zeigen für ,18-1-510420' eine 100% positive Bilanz, während es bei Parzelle ,18-1-510465' 70% sind. Hier kann die Bewässerte Parzelle im direkten Vergleich also zu den nicht bewässerten Parzellen unterschieden werden.

Abbildung 32 zeigt mit Parzelle ,18-1-510420' ein Beispiel für den Fall, in dem sich sowohl vor als auch nach dem Bewässerungsereignis der Bestand auf dem bewässerten Feld besser entwickelt hatte als auf den nicht-bewässerten Feldern. Somit ist keine Aussage zu einer positiven Beeinflussung durch Bewässerung zu treffen.

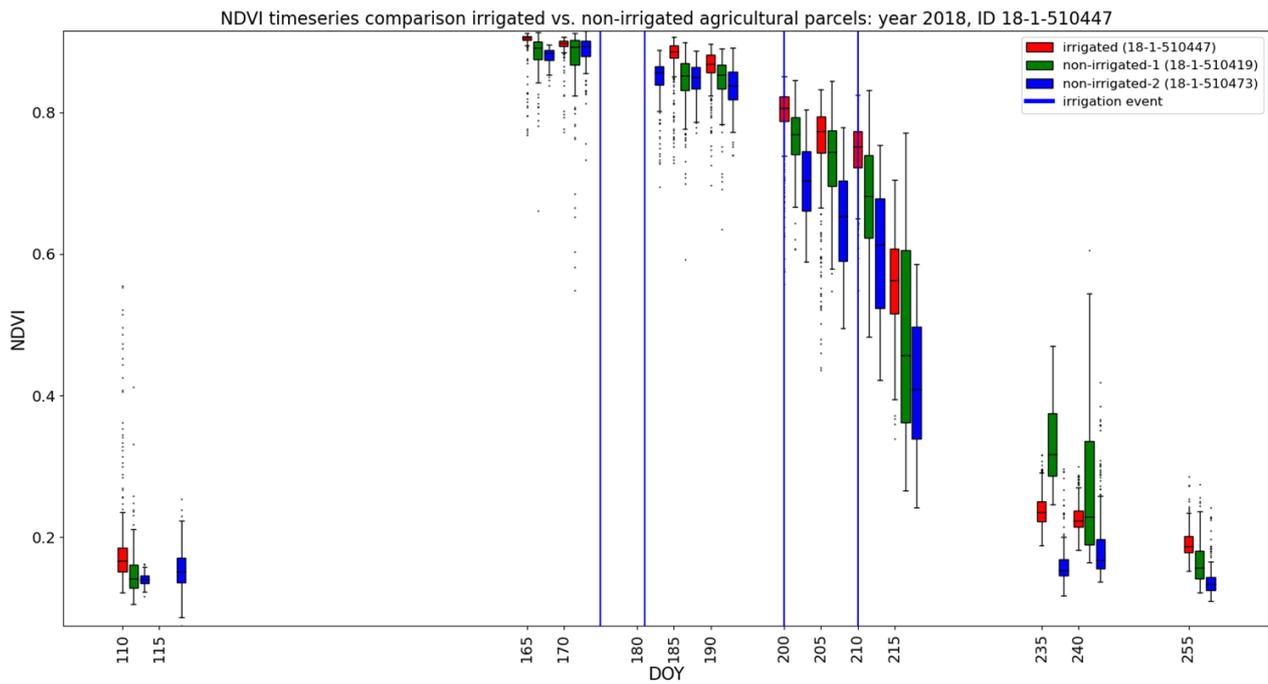


Abbildung 32: Zeitreihen-Boxplot Parzelle ,18-1-510447' (rot) und Vergleichsparzelle (grün und blau). Vertikale blaue Linien zeigen Bewässerungsereignisse

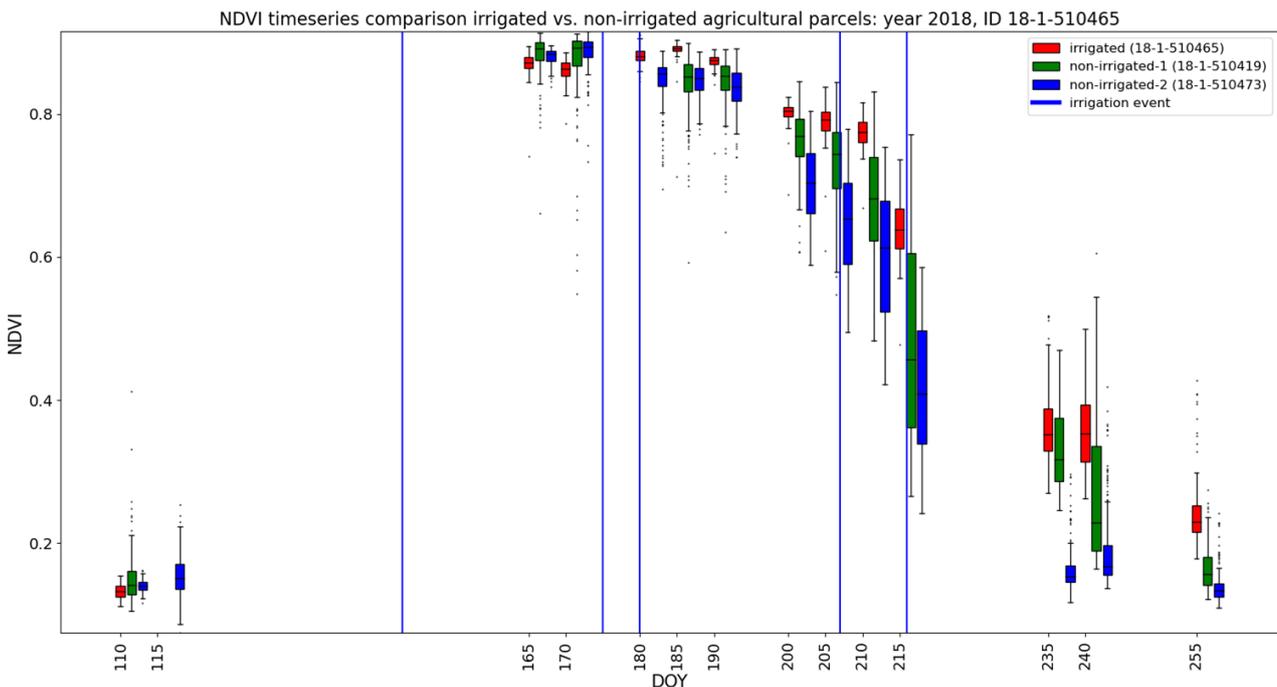


Abbildung 31: Zeitreihen-Boxplot Parzelle ,18-1-510465' (rot) und Vergleichsparzelle (grün und blau). Vertikale blaue Linien zeigen Bewässerungsereignisse

9.2.4 Fazit zur Nutzbarkeit von Satellitendaten im Kontext landwirtschaftliche Wassernutzung

Aus den Ergebnissen dieser Studien lassen sich verschiedene Schlussfolgerungen ziehen. Zum einen kann ein Großteil der landwirtschaftlichen Flächen in der Schweiz mit frei verfügbaren Satellitendaten des Sentinel-Programms erfasst werden. Obwohl Teile der Schweiz im Herbst, Winter und Frühjahr oft von Wolken und Nebel bedeckt sind, können insbesondere in heißen und trockenen Sommerperioden ausreichend Satellitendaten gesammelt werden, um die Entwicklung von Pflanzenbeständen nachzuvollziehen.

Hinsichtlich der Unterscheidbarkeit zwischen bewässerten und nicht bewässerten Flächen lässt sich sagen, dass der in dieser Studie aufgrund der Rahmenbedingungen durchgeführte einfache, observationsbasierte Ansatz zwar

Potenzial aufzeigt, jedoch nicht ausreicht, um verlässlich zwischen bewässerten und nicht bewässerten Feldern zu unterscheiden. So zeigte sich, dass im Hitzesommer nicht bewässerte Kartoffelfelder im Durchschnitt in der zweiten Hälfte der Wachstumsperiode eine frühere Abreife oder ein früheres Welken als bewässerte Felder aufwiesen. Die Unterscheidbarkeit nahm zu, wenn bewässerte und nicht bewässerte Felder unter vergleichbaren Umweltbedingungen verglichen wurden. Jedoch musste dieser Vergleich manuell durchgeführt werden und konnte nicht auf jede Situation übertragen werden. Neben den in diesem Projekt erarbeiteten Ergebnissen soll hier zusätzlich erwähnt werden, dass in den Projekten Deepfield und CropmAlpper eine Kulturpflanzenklassifikation für die Hauptkulturen entwickelt wurde, welche aktuell für die Schweiz in den operativen Status überführt wird. Diese kann in Zukunft für weitere Arbeiten dienen. Daneben ist noch der wissenschaftliche Aufsatz von Sjulgård et al. (2025) hingewiesen werden, in dem gezeigt wurde, dass die Fernerkundung dabei helfen kann, eingeschränktes Wachstum aufgrund von Einschränkungen des pflanzenverfügbaren Wassers zu identifizieren.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass Fernerkundung zur Detektion physiologischer Stresssymptome genutzt werden kann. Sie ermöglicht jedoch keine Unterscheidung zwischen bewässerten und unbewässerten Feldern, wenn auf den unbewässerten Feldern keine Stresssymptome sichtbar sind. Darüber hinaus ist anzunehmen, dass die Betrachtung von Fernerkundungsdaten allein nicht ausreicht, um eine verlässliche Unterscheidung durchzuführen, da auch andere Einflussfaktoren das Pflanzenwachstum beeinflussen.

Basierend auf diesen Erkenntnissen lassen sich für die Zukunft einige Schlüsse ziehen: Um die Genauigkeit solcher Vorhersagen zu verbessern, sollten künftige Ansätze Fernerkundungsdaten mit Wetter- und Bodendaten kombinieren. Ein vielversprechender Ansatz ist die Kopplung solcher Modelle mit statistischen (auf maschinellem Lernen basierende) oder mechanistischen Wachstumsmodellen. Dies würde ermöglichen, nicht nur aktuelle Abweichungen im Wachstum zu identifizieren, sondern auch deren potenzielle Auswirkungen auf die Ertragsbildung abzuschätzen.

Neben dem vorliegenden Projekt könnten als Grundlage für zukünftige Entwicklungen unter anderem Erkenntnisse aus dem vom Schweizer Nationalfond geförderten Projekt WHEAT.AI dienen. In diesem Projekt werden Wetter-, Boden- und Fernerkundungsdaten mit Methoden des maschinellen Lernens kombiniert, um den tatsächlichen Zustand eines Feldes mit dem erwarteten „Soll“-Zustand zu vergleichen. Im Gegensatz zu den reinen Beobachtungen kann ein solcher feldspezifisch bestimmen, ob das beobachtete Pflanzenwachstum durch Trocken- oder andere Stresstypen beeinflusst ist.

Durch den Nutzen von statistischen oder mechanistischen Modellen könnte nicht nur die Erkennung von Trockenstress verbessert werden, sondern auch weitere relevante Parameter wie die Transpiration des Pflanzenbestandes geschätzt werden. Dies würde dazu beitragen, den Wasserbedarf landwirtschaftlicher Flächen präziser abzuschätzen und Bewässerungsstrategien gezielter zu optimieren.

9.3 Modellvergleich: SWAP vs. FAO56

Im Rahmen dieser Studie wurde neben der etablierten FAO56-Methode auch die Anwendung eines komplexeren agrohydrologischen Modells (SWAP; (Kroes et al., 2017)) zur Abschätzung kulturspezifischer Bewässerungsbedürfnisse getestet, um festzustellen, ob mit einem komplexeren Modell auch eine höhere Schätzgenauigkeit der Bewässerungsmengen erreicht werden kann. Vorgehen und Ergebnisse des Modellvergleichs sind im Folgenden beschrieben.

In Heinz et al. (2025) wurden Kartoffelfelder in der Region Broye genauer untersucht. Nachdem das Modell auf Daten von der Broye kalibriert wurde, wurden die Bewässerungsmengen für rund 10'000 Punkte im Gebiet der Broye mit dem kalibrierten Parameterset berechnet. Die Kalibrierungsergebnisse aus Heinz et al. (2025) von dem etwas komplexeren Modell SWAP werden jenen von dem Modell FAO56 gegenübergestellt und sind in Abbildung 33 dargestellt. Alle Werte mit einer aufgezeichneten Bewässerungsmenge von 0 mm wurden für die Kalibrierung entfernt. Die Metriken beider Modelle weisen gewisse Unterschiede auf, sind aber insgesamt sehr ähnlich. Die treppenartige Struktur der Resultate von SWAP ergibt sich dadurch, dass eine maximale Bewässerungsgabe von 30 mm im Modell festgelegt wird (Minimum=10 mm) und das Modell dann auch meist das Maximum bewässert. Die beiden Plots in Abbildung 33 setzen sich aus zwei Datensätzen zusammen, die beide von HAFL erhoben wurden (HAFL, 2022). Ein Datensatz setzt sich aus Messwerten Broye Region zusammen, wo die Punkte einen total gemessenen, saisonalen Wert von 2'132 mm sowie 2'209 mm in SWAP (Abweichung 4 %) und 2'391 mm in FAO (Abweichung 12 %) haben. Im anderen Datensatz sind gemessenen Punkte schweizweit verteilt, die saisonale Bewässerung erreicht dort gemessene Werte 4'743 mm sowie 3'714 mm in SWAP (Abweichung 28 %) und 4'744 mm in FAO (Abweichung 0 %). Zu beachten ist, dass das Model SWAP nur auf den Datensatz der Region Broye kalibriert und der schweizweite Datensatz lediglich zur Validierung verwendet wurde. Im Falle von FAO wurden beiden Datensätze zur Kalibrierung verwendet. Die kalibrierten Parameter waren im Falle von FAO aber auch bei einer Kalibrierung nur auf das Gebiet der Broye nicht anders.

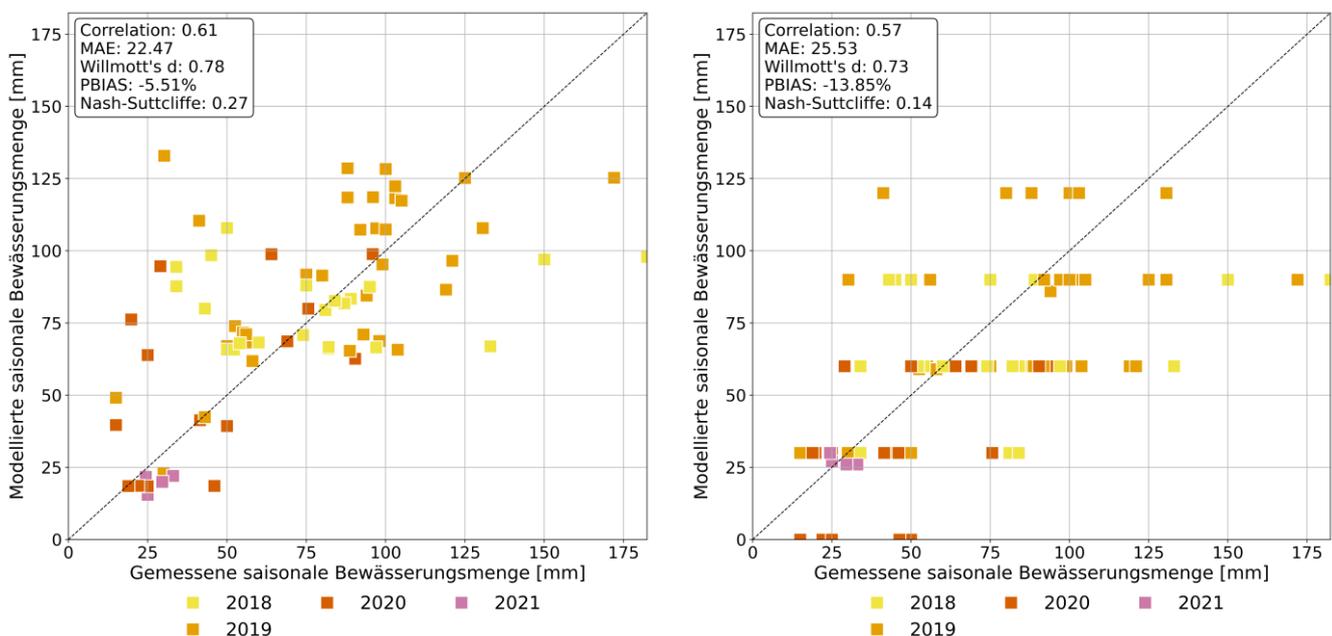


Abbildung 33: Ergebnisse der summierten Bewässerungsmenge anhand der Modelle im Vergleich zu gemessenen Referenzdaten aus dem Bewässerungsnetz der HAFL für das Modell Fao56 (links) und für das Modell SWAP (rechts).

In einer genaueren Analyse wird der Fokus auf die Broye Region gelegt. Diese Region wurde ausgewählt, da SWAP im Paper Heinz et al. (2025) auf diese regional kalibriert wurde und deshalb auch die Analysen dort durchgeführt wurden. Insgesamt wurden rund 10'000 Koordinatenpunkte mithilfe der Modelle für das Jahr 2022 berechnet. In Abbildung 34 sind die saisonalen Bewässerungsmengen der beiden Modelle gegenübergestellt. Auffällig ist, dass SWAP insgesamt höhere Bewässerungsmengen schätzt als pyFAO56. Mit SWAP ergibt sich für die Region so eine jährliche Bewässerungsmenge von gerundet 285'840 m³ während die Bewässerungsmenge mit pyFAO56 auf 160'900 m³ geschätzt wird bei beiden Modellen unter Berücksichtigung von Bewässerungsstopps. Die Abweichung

beträgt gut 78 %. Auch die Verteilung der saisonalen Bewässerungsmenge zeigt, dass SWAP in vielen Fällen eine höhere Bewässerungsmengen schätzt (Abbildung 35).

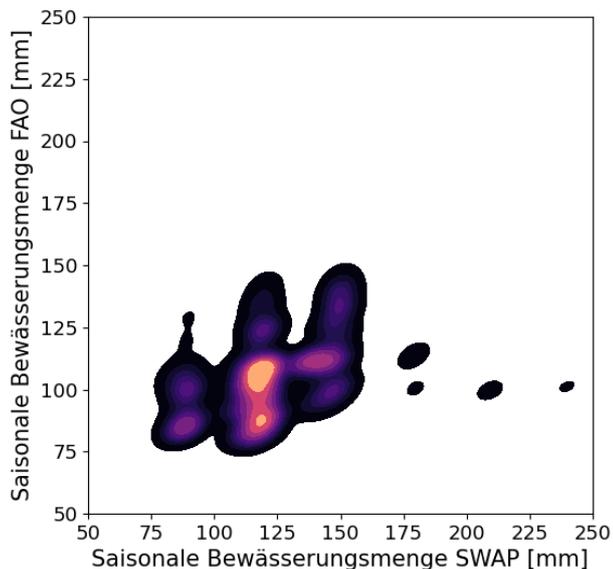


Abbildung 34: Gegenüberstellung von saisonalen Bewässerungsmengen für Kartoffelfelder in der Broye aus dem Jahr 2022 berechnet durch SWAP und FAO.

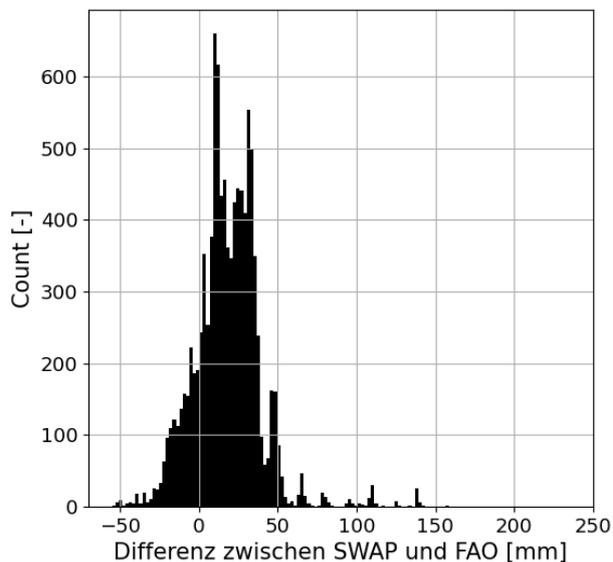


Abbildung 35: Histogramm der Differenz der saisonalen Bewässerungsmenge von SWAP und FAO.

Um genauer zu analysieren, wo die Unterschiede zwischen dem SWAP und dem FAO56 Modell liegen, wurden zunächst Unterschiede in der Parametrisierung der Bodeneigenschaften genauer untersucht. Hierbei zeigte sich, dass Unterschiede insbesondere in der Spezifikation der Welkepunkte zu finden sind (Abbildung 36). Ausserdem zeigt Abbildung 37, dass die Differenzen zwischen den Modellvorhersagen stark mit dem Sandgehalt im Boden korrelieren. Referenzdaten von möglichst unterschiedlichen Bodenstandorten wären hilfreich, um feststellen zu können, welche Modellschätzungen unter sehr sandigen Bedingungen der Realität am nächsten kommen.

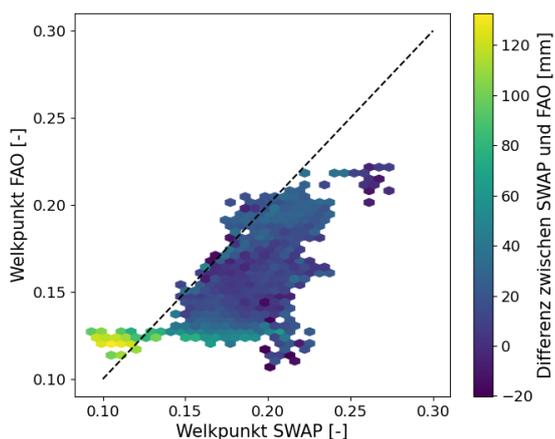


Abbildung 36: Gegenüberstellung der für das Modell verwendeten Welkepunkte mit farblicher Hervorhebung der Unterschiede in der saisonalen Bewässerung für SWAP und FAO.

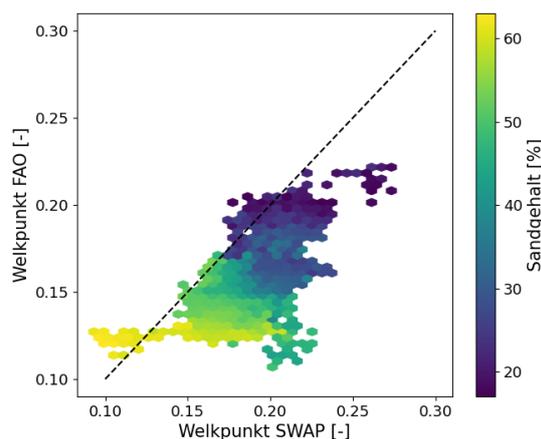


Abbildung 37: Gegenüberstellung der für das Modell verwendeten Welkepunkte mit farblicher Hervorhebung der Unterschiede im Sandgehalt.

Die Wichtigkeit von verschiedenen Parametern kann durch die «Principal Component Analysis (PCA)» definiert werden. Das folgende Beispiel zeigt, dass bei beiden mit den ersten beiden Dimensionen etwa 70 % der gesamten Varianz erklärt werden können (Abbildung 38-Abbildung 39). Bei beiden PCA-Analysen wurden für die Input-Parameter die Werte von FAO56 verwendet. Bei SWAP gibt unter anderem die Textur die Dynamik vor, während die

Verteilung bei FAO56 stärker durch meteorologischen Variablen geprägt ist. Die Wichtigkeit von der Textur erklärt unter anderem auch, warum dort grosse Unterschiede zwischen den Modellschätzungen auftreten.

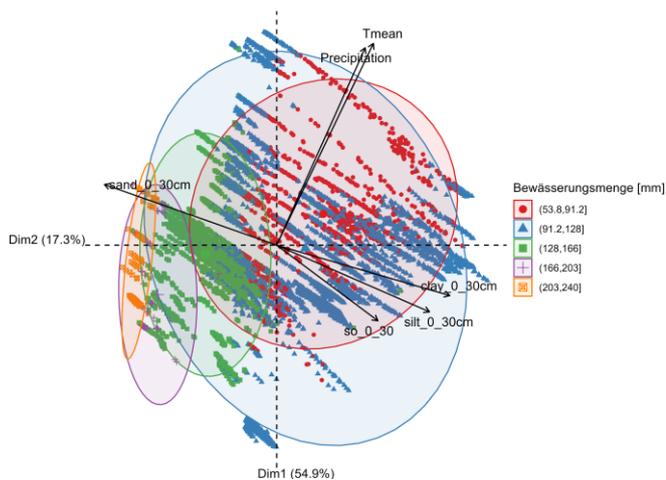


Abbildung 38: PCA für SWAP ohne diejenigen Punkte die eine geringere Bodentiefe haben. Insgesamt werden 6 Komponenten berücksichtigt.

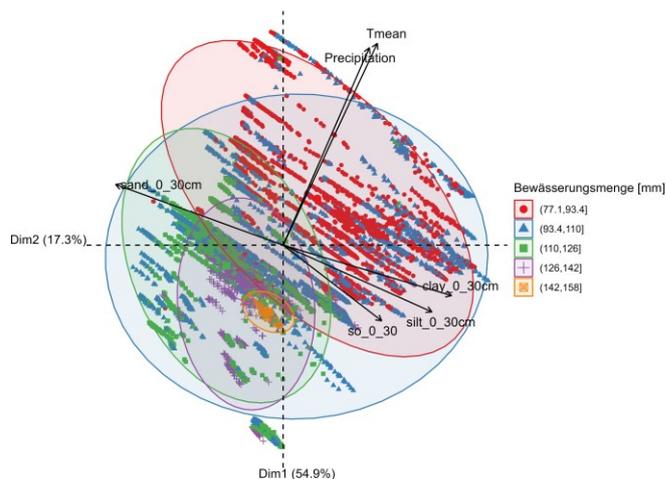


Abbildung 39: PCA für FAO ohne diejenigen Punkte die eine geringere Bodentiefe haben. Insgesamt werden 6 Komponenten berücksichtigt.

Da SWAP in dieser Modellvergleichsstudie keine klar bessere Performance gezeigt hat als pyFAO56 wurde für dieses Projekt pyFAO56 verwendet.

9.4 Erhobene vs. modellierte saisonale Bewässerungsmengen

In Abbildung 40 bis Abbildung 51 sind die graphischen Ergebnisse der erhobenen und der modellierten saisonalen Bewässerungsmengen gegenübergestellt.

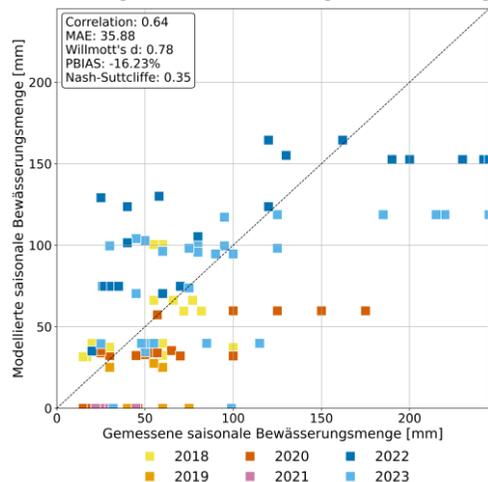


Abbildung 40: Erhobene vs. modellierte Bewässerungsmengen für Mais.

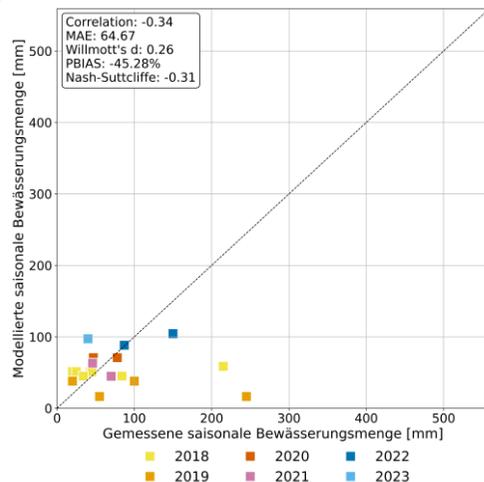


Abbildung 41: Erhobene vs. modellierte Bewässerungsmengen für Beeren einjährig.

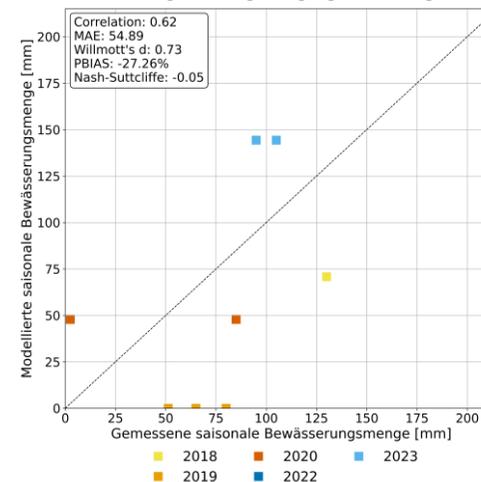


Abbildung 42: Erhobene vs. modellierte Bewässerungsmengen für Beeren mehrjährig.

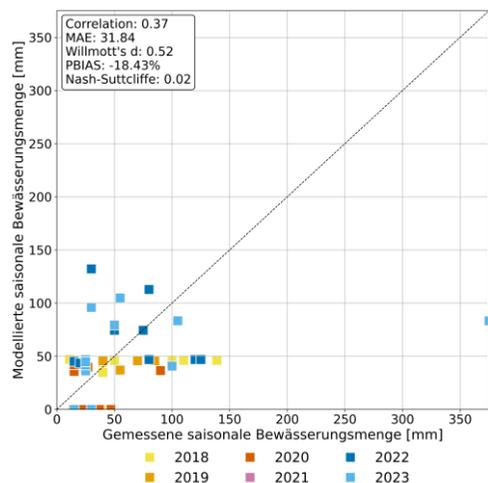


Abbildung 43: Erhobene vs. modellierte Bewässerungsmengen für Zuckerrüben.

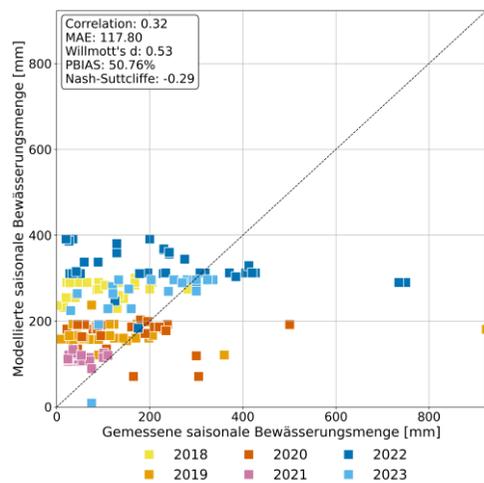


Abbildung 44: Erhobene vs. modellierte Bewässerungsmengen für Gemüse (Modellannahme: intensiver Gemüsebau, Parametrisierung nicht an Daten angepasst).

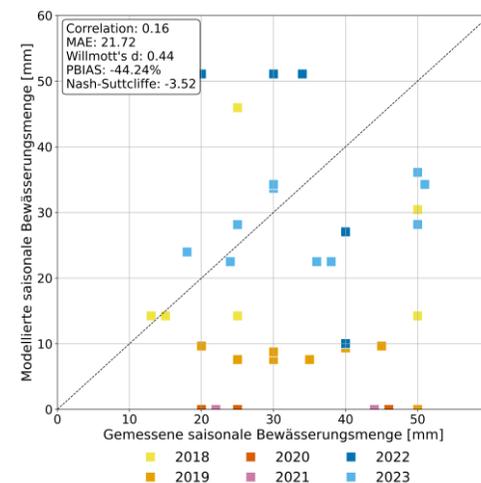


Abbildung 45: Erhobene vs. modellierte Bewässerungsmengen für Tabak.

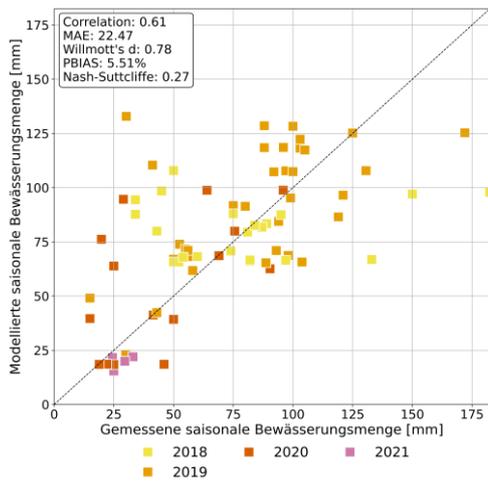


Abbildung 46: Erhobene vs. modellierte Bewässerungsmengen für Kartoffeln (Datenquelle: Bewässerungsnetz der HAFL)

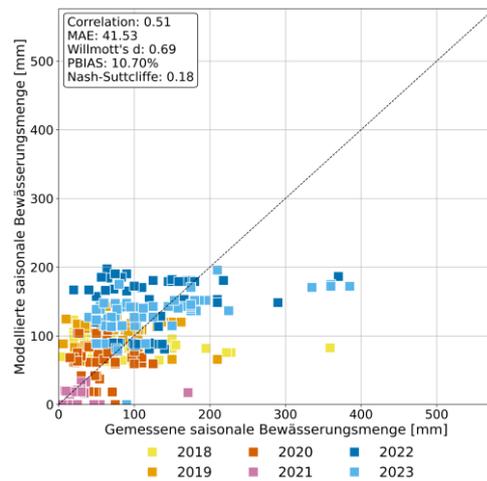


Abbildung 47: Erhobene Bewässerungsmengen aus dem Ressourcenprojekt «Effiziente Bewässerung Vaud» vs. modellierte Bewässerungsmengen für Kartoffeln (Modellanpassung basierend auf Daten der HAFL).

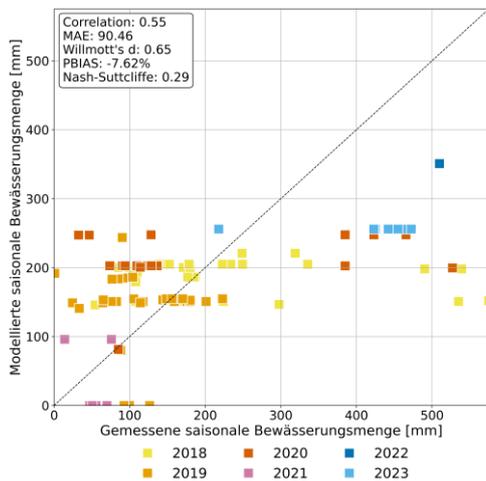


Abbildung 48: Erhobene vs. modellierte Bewässerungsmengen für Apfel.

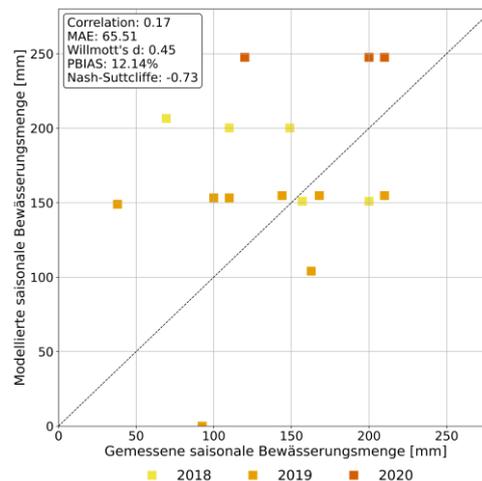


Abbildung 49: Erhobene Werte für Birnen vs. modellierte Bewässerungsmengen für Apfel.

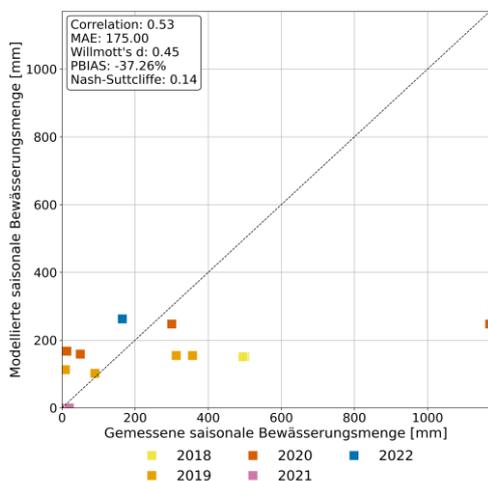


Abbildung 50: Erhobene Werte für «andere Früchte» vs. modellierte Bewässerungsmengen für Apfel.

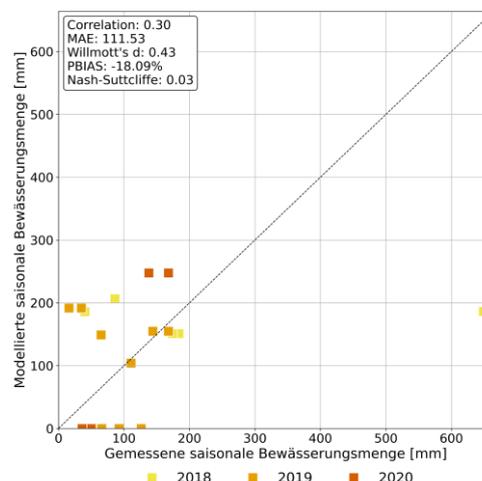


Abbildung 51: Erhobene Werte für Steinobst vs. modellierte Bewässerungsmengen für Apfel.

9.5 Darstellung Schweizweit detailliert

In den Abbildung 52 bis Abbildung 54 sind die detaillierteren Darstellungen der schweizweiten saisonalen Bewässerungsmengen über alle Kulturen abgebildet.

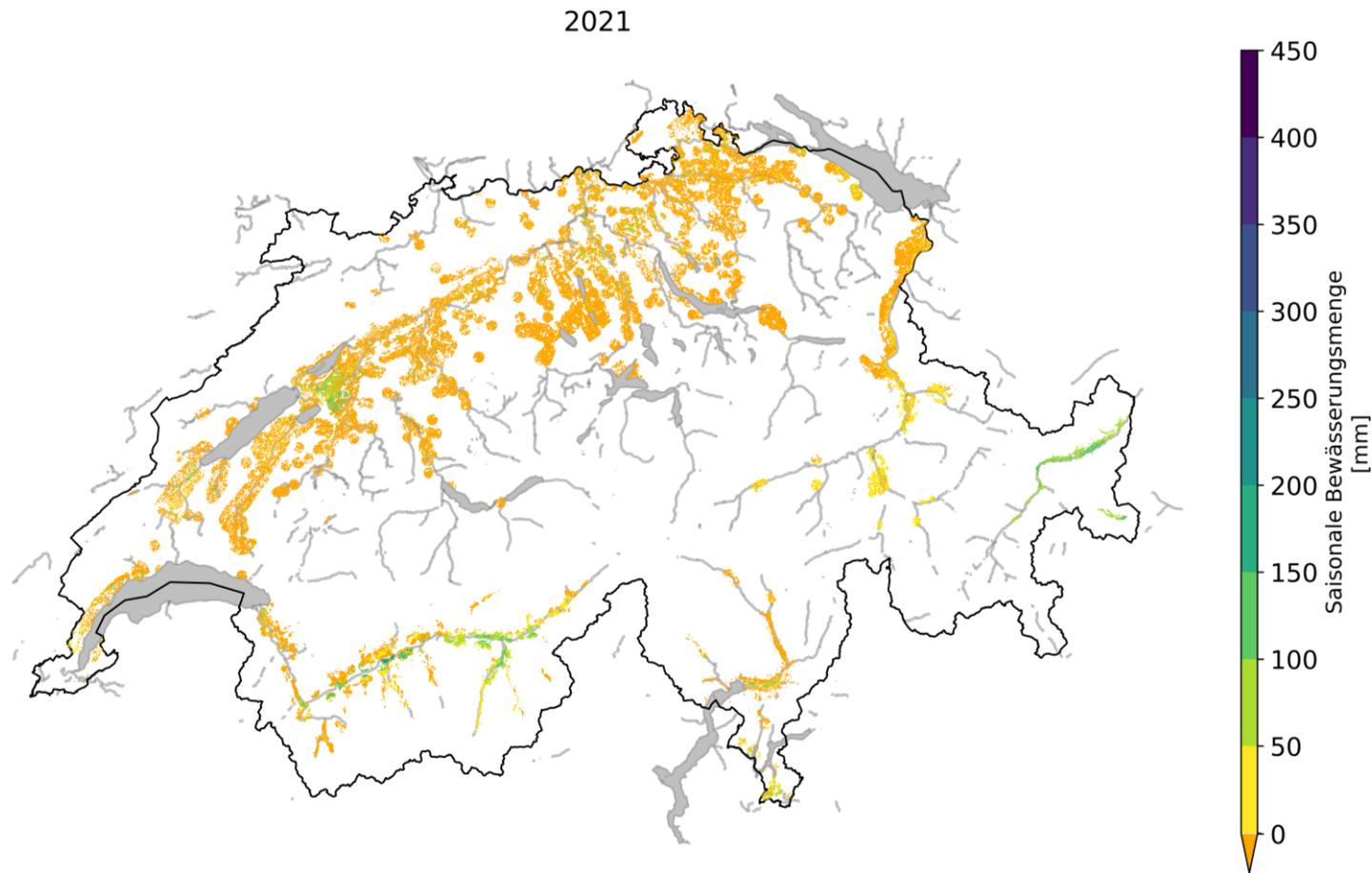


Abbildung 52: Detaillierte Darstellung der schweizweiten saisonalen Bewässerungsmengen für das Jahr 2021 (Hintergrund: Swisstopo).

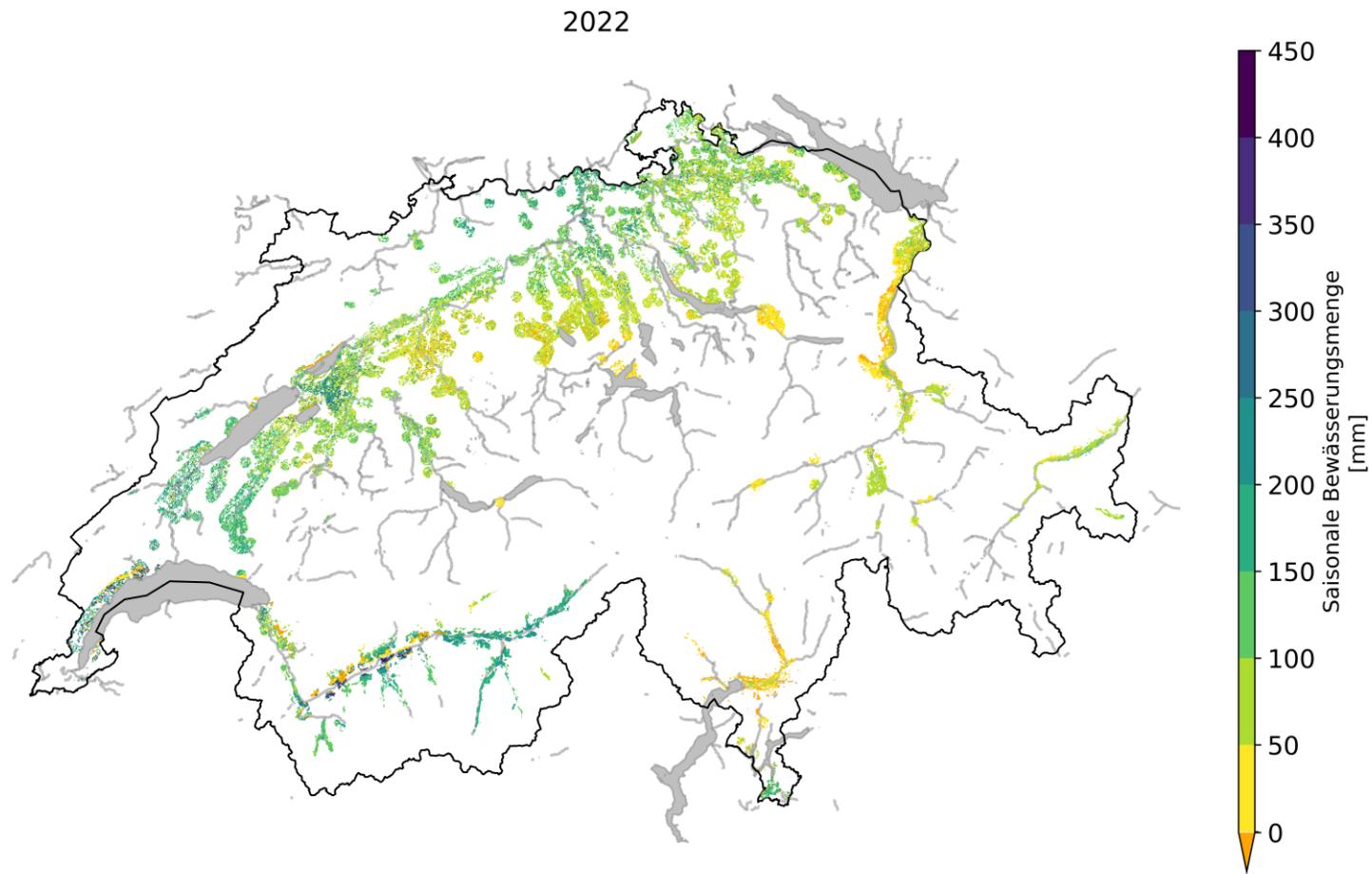


Abbildung 53: Detaillierte Darstellung der schweizweiten saisonalen Bewässerungsmengen für das Jahr 2022 (Hintergrund: Swisstopo).

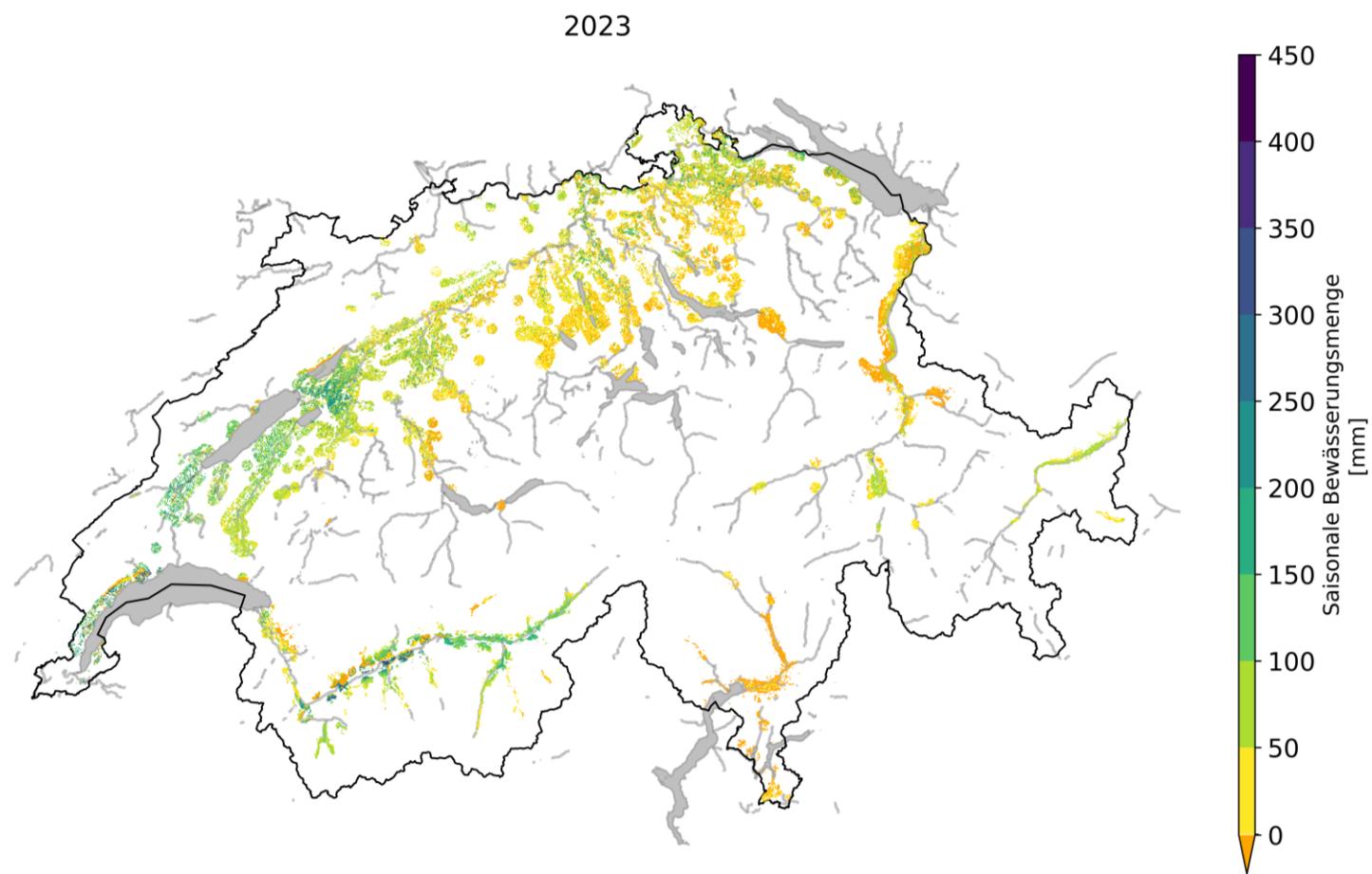


Abbildung 54: Detaillierte Darstellung der schweizweiten saisonalen Bewässerungsmengen für das Jahr 2023 (Hintergrund: Swisstopo).

9.6 Klimaregionen Schweiz

In Abbildung 55 sind die Klimaregionen nach Schüepp & Gensler (1980) gemäss Begert et al. (2017) dargestellt.

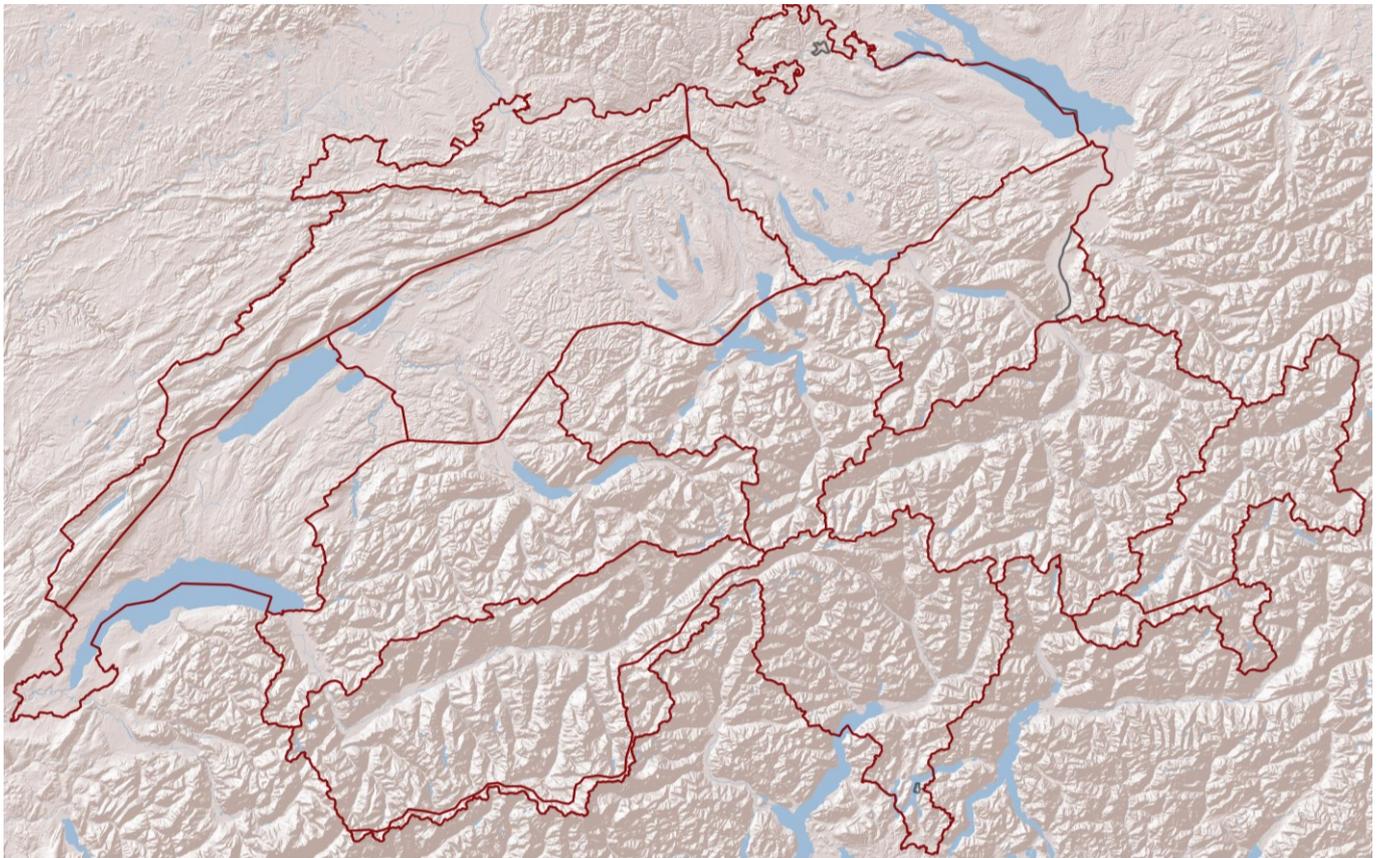


Abbildung 55: Klimaregionen in der Schweiz (Karte: MeteoSchweiz; Hintergrund: ESRI, Zugriff: 12.02.2025).

9.7 Bodenstrukturen der bewirtschafteten Flächen vom Jahr 2023 gemäss Klimaregionen

In Abbildung 56 bis Abbildung 67 sind die Bodendiagramme mit den Böden aller Kulturfleichen pro Klimaregion im bewässerten Perimeter, welcher in Kap. 3.4 beschrieben wurde, dargestellt (Darstellung mit der R-Bibliothek «soilttexture»). Anhand dieser Abbildungen wurde graphisch die dominanteste Bodenart gemäss den 9 Bodenklassen für die Hochrechnung der Klimaszenarien bestimmt, es wurden also einige abgebildete Kategorien zusammengefasst.

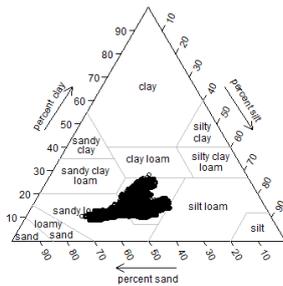


Abbildung 56: Böden Alpensüdseite mit dem Boden «Lehm».

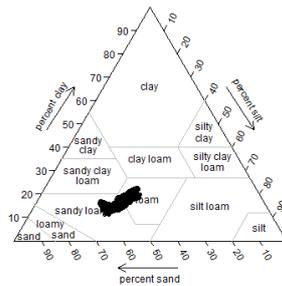


Abbildung 57: Böden Engadin mit dem Boden «sandiger Lehm».

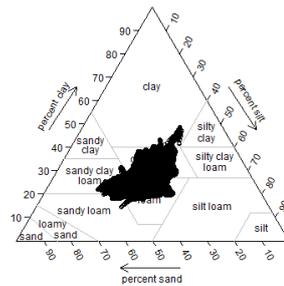


Abbildung 58: Böden Nordöstliches Mittelland mit dem Boden «schluffig, toniger Lehm».

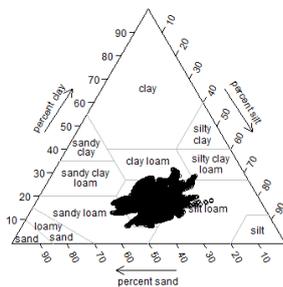


Abbildung 59: Böden Nord- und Mittelbünden mit dem Boden «Lehm».

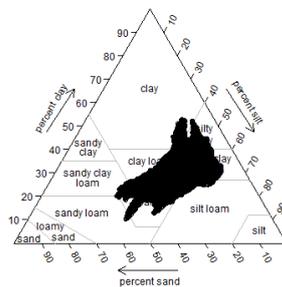


Abbildung 60: Böden Östlicher Alpennordhang mit dem Boden «schluffig, toniger Lehm».

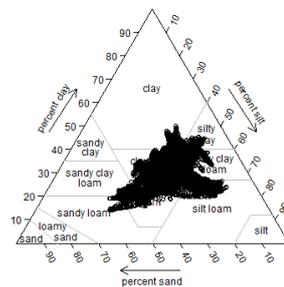


Abbildung 61: Böden Östlicher Jura mit dem Boden «schluffig, toniger Lehm».

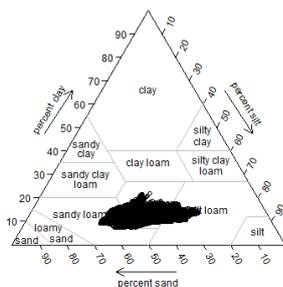


Abbildung 62: Böden Wallis mit dem Boden «Lehm»..

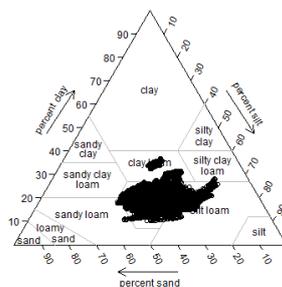


Abbildung 63: Böden Westlicher Alpennordhang mit dem Boden «Lehm».

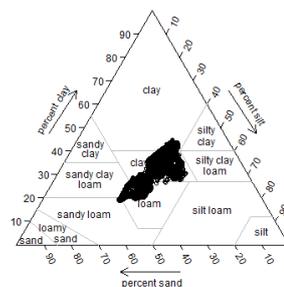


Abbildung 64: Böden Westlicher Jura mit dem Boden «schluffig, toniger Lehm».

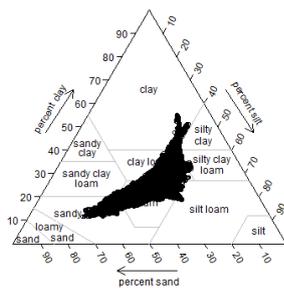


Abbildung 65: Böden Westliches Mittelland mit dem Boden «Lehm».

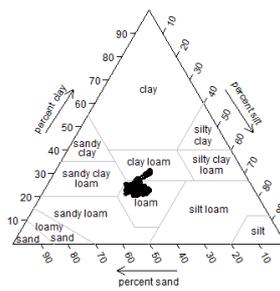


Abbildung 66: Böden Zentraler Alpennordhang mit dem Boden «Lehm».

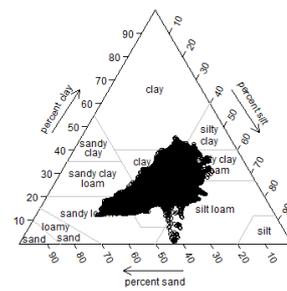


Abbildung 67: Böden Zentrales Mittelland mit dem Boden «schluffig, toniger Lehm».