



Berechnung der Bewässerungsbedürfnisse unter aktuellen und zukünftigen Bedingungen in der Schweiz

Autoren

Sebastián Eisenring, Annelie Holzkämper, Pierluigi Calanca



Impressum

Herausgeber	Agroscope Reckenholzstrasse 191 8046 Zürich www.agroscope.ch
Auskünfte	Annelie Holzkämper annelie.holzkaemper@agroscope.admin.ch
Gestaltung	Petra Asare
Titelbild	Annelie Holzkämper
Download	www.agroscope.ch/science
Copyright	© Agroscope 2021
ISSN	2296-729X
DOI	https://doi.org/10.34776/as107g

Haftungsausschluss :

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.

Korrigendum

In der Zusammenfassung wurden die Angaben zu den Bewässerungsbedürfnissen von Kartoffel, Eisbergsalat und Raigras korrigiert (Juni 2023)

Inhalt

Zusammenfassung	4
Résumé	5
Summary	6
1 Einleitung	7
2 Daten und Methoden	8
2.1 Klimaprojektionen	8
2.2 Klimaänderungssignale nach Standorten	9
2.3 Bewässerungsmodell	12
2.4 Modellanwendung und Varianzanalyse	16
3 Ergebnisse	17
3.1 Kulturen mit einmaliger Ernte	17
3.2 Kulturen mit mehrmaliger Ernte	20
3.3 Grasland	24
4 Diskussion und Ausblick	29
5 Literaturverzeichnis	30
Anhang	32
1 Klimaszenarien	32
2 Kulturparameter Wachstumsperiode	33
3 Weitere Resultate	36
3.1 Karotte	36
3.2 Zuckermais	39
3.3 Apfelbäume	42
3.4 Erdbeeren	45
3.5 Klee	49
3.6 Weideland	53

Zusammenfassung

Mit steigenden Temperaturen und abnehmenden Sommerniederschlägen ist in Zukunft generell davon auszugehen, dass der Wasserbedarf für Bewässerung in der Landwirtschaft zunimmt. Obwohl die Schweiz insgesamt ein sehr wasserreiches Land ist, kommt es schon unter aktuellen klimatischen Bedingungen regional und zeitlich begrenzt zu Wasserknappheit. Hydrologische Projektionen legen nahe, dass die Verfügbarkeit von Wasser aus Flüssen für die Bewässerung mit fortschreitendem Klimawandel noch weiter abnimmt. Für die langfristige Planung von Bewässerungsinfrastrukturprojekten sind Informationen über zu erwartende Änderungen der Bewässerungsbedürfnisse von grosser Bedeutung.

Vor dem Hintergrund wurde in dieser Arbeit die FAO-Methode zur Schätzung kultur-spezifischer Bewässerungsbedürfnisse operationalisiert und auf Basis von Klimaprojektionsdaten bis zum Ende des Jahrhunderts für die Kulturen Kartoffel, Karotten Zuckermais, Apfelbäume, Eisbergsalat, Erdbeeren, Klee, Raigras und Weide an ausgewählten Standorten im Schweizer Mittelland (Aigle, Basel, Bern, Changins, Güttingen, Payerne, Reckenholz) und für unterschiedliche Bodenarten (Sand, sandiger Lehm, Lehm, Schluff, schluffig-toniger Lehm, schluffiger Lehm, lehmiger Sand, schluffiger Ton, Ton) angewandt.

Die projizierten Veränderungen werden nach Emissionsszenario, Standort und Projektionshorizont analysiert. Exemplarisch werden die Änderungen für eine Ackerkultur (Kartoffel), eine Gemüsekultur mit mehrmaliger Ernte (Eisbergsalat) und für Raigras diskutiert. Die Ergebnisse für alle anderen Kulturen sind im Anhang aufgeführt.

In Abhängigkeit von den Annahmen über den zukünftigen globalen Ausstoss von Treibhausgasen (Emissionspfad RCP2.6: Wirksame Klimaschutzmassnahmen greifen und führen zu einer Reduktion der CO₂-Konzentration der Atmosphäre bis zum Ende des Jahrhunderts auf etwa 400 ppm; Emissionspfad RCP8.5: Ohne Klimaschutzmassnahmen steigt der CO₂-Gehalt der Atmosphäre bis zum Ende des Jahrhunderts kontinuierlich bis 2100 auf beinahe 1000 ppm an) unterscheiden sich die Schätzungen der Änderungen im Wasserbedarf für Bewässerung wesentlich: Mit RCP2.6 wird für alle Kulturen gleichermaßen eine leichte Zunahme der Bewässerung bis Mitte des Jahrhunderts projiziert und dann eine leichte Abnahme; mit RCP8.5 steigt der Bewässerungsbedarf für alle Kulturen bis zum Ende des Jahrhunderts stetig an.

Die prozentualen Änderungen der Bewässerungsbedürfnisse unterscheiden sich zwischen den Standorten im Mittelland und je nach Bodenarten nur wenig. Auch zwischen den untersuchten Kulturarten wurden keine sehr grossen Unterschiede in Bezug auf die Änderungssignale bezogen auf den Referenzzeitraum 1981–2010 festgestellt: Bis zum Zeithorizont 2045–2074 wird mit RCP8.5-Projektionen (ohne Klimaschutz) für Kartoffel und Eisbergsalat eine Zunahme des Bewässerungsbedarfs von im Mittel 26% projiziert, für Raigras im Mittel 28%. Bis zum Ende des Jahrhunderts (2070–2099) wären gemäss den Projektionen Zunahmen von 48% (Kartoffel), 49% (Eisbergsalat) bzw. 55% (Raigras) zu erwarten.

Durch die unterschiedliche saisonale Veränderung der Temperatur und der Niederschlagsmenge verändert sich auch der zusätzliche Bewässerungsbedarf je nach Anbausaison unterschiedlich. Grosse Veränderung in der Bewässerungsmenge über das Jahrhundert sind in den Jahreszeiten Sommer und Herbst zu erwarten, unabhängig von Standort und Kultur. Im Frühling ist mit einer minimalen Änderung der Bewässerung zu rechnen. Bei all diesen Schätzungen sind jedoch auch die mit fortschreitendem Zeithorizont immer grösser werdenden Klimaprojektionsunsicherheiten zu berücksichtigen.

Die hier operationalisierte Methode schafft eine entscheidende Grundlage zur Abschätzung der Bewässerungsbedürfnisse für unterschiedliche Kulturen im Schweizer Mittelland unter aktuellen und zukünftigen klimatischen Bedingungen in Abhängigkeit von wichtigen Bodenparametern. Für die Zukunft sind Überprüfungen der Modellparameter und Validierungen von Schätzwerten für unterschiedliche Klimaregionen, Böden, Kulturen von grosser Wichtigkeit, um bestehende Modellunsicherheiten so weit wie möglich zu reduzieren.

Résumé

Les températures moyennes étant en hausse et les précipitations estivales en baisse, on peut généralement s'attendre à ce que les besoins en eau pour l'irrigation dans l'agriculture augmentent à l'avenir. Bien que la Suisse soit dans l'ensemble un pays qui comporte d'importantes réserves en eau, des pénuries en eau se produisent déjà à l'échelle régionale et pour de courtes périodes, dans les conditions climatiques actuelles. Les projections hydrologiques suggèrent que l'eau des rivières sera de moins en moins disponible pour l'irrigation à mesure que le changement climatique se fera sentir. Pour la planification à long terme des infrastructures d'irrigation, il est très important d'avoir des informations sur les changements auxquels il faut s'attendre en matière de besoins en irrigation.

Dans ce contexte, la méthode de la FAO pour l'estimation des besoins en irrigation spécifiques aux cultures a été mise en pratique pour les cultures de pommes de terre, carottes, maïs doux, pommiers, laitue iceberg, fraises, trèfle, ray-grass et pour les pâturages sur un éventail de sites du Plateau suisse (Aigle, Bâle, Berne, Changins, Güttingen, Payerne, Reckenholz) et pour différents types de sol (sable, limon sableux, limon, silt, limon silto-argileux, limon silteux, sable limoneux, argile silteux, argile), en utilisant des projections climatiques allant jusqu'à la fin du siècle.

Les changements projetés sont analysés par scénario d'émission, par site et par horizon de projection. Les altérations sont illustrées par l'exemple d'une grande culture (pomme de terre), d'une culture maraîchère à récoltes multiples (laitue iceberg) et du ray-grass. Les résultats de toutes les autres cultures figurent en annexe.

Selon les hypothèses relatives aux futures émissions mondiales de gaz à effet de serre (voie d'émission RCP2.6: des mesures efficaces de protection du climat entrent en vigueur et conduisent à une réduction de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère à environ 400 ppm d'ici la fin du siècle; voie d'émission RCP8.5: sans mesures de protection du climat, la teneur en CO₂ dans l'atmosphère augmente en continu d'ici la fin du siècle pour atteindre près de 1000 ppm en 2100), les estimations de l'évolution des besoins en eau pour l'irrigation diffèrent sensiblement. Avec RCP2.6, la simulation indique une légère augmentation de l'irrigation jusqu'à la moitié du siècle, suivie d'une légère diminution, quelle que soit la culture. Avec RCP8.5, les besoins en irrigation augmenteront en continu jusqu'à la fin du siècle pour toute les cultures.

Les variations en pourcentage des besoins en irrigation ne diffèrent que légèrement selon les sites du Plateau et le type de sol. De même, aucune différence importante n'a été constatée entre les types de cultures étudiés en ce qui concerne les signes de changement relatifs à la période de référence 1981-2010: jusqu'en 2045-2074, les projections RCP8.5 (sans protection du climat) prévoient une augmentation des besoins en irrigation de 26 % en moyenne pour les pommes de terre et la laitue iceberg et de 28 % en moyenne pour le ray-grass. D'ici la fin du siècle (2070-2099), d'après les projections, il faudrait s'attendre à des augmentations de 48 % (pomme de terre), de 49 % (laitue iceberg) et de 55% (ray-grass).

Comme les changements de températures et de volumes de précipitations varient suivant les saisons, les besoins supplémentaires en irrigation évoluent eux aussi en fonction de la saison culturale. Il faut s'attendre à des changements importants du volume d'irrigation au cours du siècle pendant les saisons d'été et d'automne, quels que soient le site et la culture. En revanche, on peut s'attendre à un changement minime de l'irrigation au printemps. Cependant, pour toutes ces estimations il faut également tenir compte du fait que les projections climatiques deviennent, avec le temps, de plus en plus incertaines.

La méthode mise en pratique ici fournit une base décisive pour estimer, en fonction d'importants paramètres du sol, les besoins en irrigation de différentes cultures sur le Plateau suisse dans les conditions climatiques actuelles et futures. A l'avenir, il sera essentiel de vérifier les paramètres du modèle et de valider les valeurs estimées pour différentes régions climatiques, sols et cultures afin de réduire autant que possible les incertitudes du modèle.

Summary

With climate change, rising temperatures and decreasing summer precipitation are likely to induce increasing water demands for irrigation in the future. Although Switzerland as a whole is a country with abundant water supplies, temporary regional water shortages are already occurring under current climatic conditions. Hydrological projections suggest that the availability of water from rivers for irrigation will decrease even further as climate change progresses. Information on expected changes in irrigation needs is of great importance for the long-term planning of irrigation infrastructure projects.

Against this background, this paper utilizes the FAO method for estimating crop-specific irrigation needs and applies it on the basis of climate projection data until the end of the century for potato, carrot, sweetcorn, apple, lettuce, strawberry, clover, ryegrass and grazing crops at selected sites on the Swiss Central Plateau (Aigle, Basel, Bern, Changins, Güttingen, Payerne, Reckenholz) and for different soil types (sand, sandy loam, loam, silt, silty clay loam, silty loam, loamy sand, silty clay, clay).

The projected changes are analysed by emission scenario, site, and projection horizon. The changes for a field crop (potatoes), a vegetable crop with multiple harvests (lettuce) and ryegrass are discussed as examples. The results for all other crops are given in the Appendix.

Estimates of the changes in irrigation-water needs differ substantially, depending on the assumptions regarding future global emissions of greenhouse gases (Emission path RCP2.6: Effective climate-change mitigation measures gain traction and lead to a reduction in CO₂ concentration in the atmosphere to around 400 ppm by the end of the century; Emission path RCP8.5: Without climate-protection measures, the CO₂ content in the atmosphere rises continuously to almost 1000 ppm by the year 2100): with RCP2.6, a slight increase in irrigation for all crops is projected up to the middle of the century, followed by a slight decrease; with RCP8.5, irrigation needs for all crops rise steadily up to the end of the century.

The percentage changes in irrigation needs differ only slightly between the sites on the Central Plateau and according to soil type. In addition, only minor differences in terms of the change signals were noted between the crop types studied with regard to the reference timeframe of 1981–2010: by the time horizon of 2045–2074, RCP8.5 projections (i.e. without climate-change mitigation) suggest an average increase in irrigation needs of 26% for potatoes and lettuce and 28% for ryegrass. According to this emission pathway, increases of 48% (potatoes), 49% (lettuce) and 55% (ryegrass) would be expected by the end of the century (2070–2099).

The different seasonal changes in temperature and precipitation levels also have a varying impact on the additional irrigation needs according to growing season. Major changes in irrigation levels over the century are to be expected in summer and autumn, regardless of site and crop. Minimal changes in irrigation are to be expected in spring. With all these estimates, however, the climate-projection uncertainties that continue to increase along with the advancing time horizon must be taken into account.

The method operationalised here provides a basis for estimating the irrigation needs of different crops on the Swiss Central Plateau under current and future climatic conditions, depending on important soil parameters. Reviews of the model parameters and validations of estimated values for different climate regions, soils and crops are of crucial importance for the future, in order to reduce existing model insecurities to the greatest extent possible.

1 Einleitung

Mit steigenden Temperaturen nimmt der Pflanzenwasserbedarf zu. Wenn gleichzeitig im Sommer weniger Niederschläge fallen, ist mit einer Zunahme an Wasserdefiziten zu rechnen, die Wachstum und Produktivität der Pflanzen einschränken können. Durch Bewässerung können solche Ertragsreduktionen abgefedert werden. Allerdings stellt sich in dem Zusammenhang die Frage, ob Ressourcen und bestehende Infrastruktur eine entsprechende Zunahme an Wasserentnahmen für Bewässerung zulassen. Aktuell spielt die Bewässerung für die landwirtschaftliche Produktion in der Schweiz flächenmässig eine relativ kleine Rolle. Laut Informationen vom BFS (Bundesamt für Statistik, 2010) werden etwa 4% der Schweizer Ackerlands bewässert, der Anteil bewässerter Flächen im Gemüsebau allerdings bei ca. 77% liegt. Schweizer Wiesen und Weiden werden etwa zu 2-3% bewässert. Etwas höher liegt der Anteil bewässerter Flächen im Obst- und Rebbau. Hier werden etwa 14% der Flächen bewässert. Der Wasserverbrauch für Bewässerung ist in der Schweiz allerdings dennoch beträchtlich. Mit einem geschätzten jährlichen Wasserverbrauch von ca. 144 Millionen m³ entspricht der Wasserverbrauch für Bewässerung gut einem Viertel des Trinkwasserbedarfs aller Schweizer Haushalte (Weber & Schild, 2007; Freiburghaus, 2009).

Obwohl die Schweiz als «Wasserschloss Europas» insgesamt über sehr grosse Wasserressourcen verfügt, treten regional und zeitlich begrenzt immer wieder Einschränkungen für Wasserentnahmen für Bewässerung auf. Dies war nicht nur im extremen Hitzesommer 2003, sondern zum Beispiel auch im Jahr 2015 in den Kantonen Baselland, Aargau, Solothurn, Neuenburg, Waadt, Freiburg und Jura der Fall. Während der Trockenheit 2018 wurden in 13 Kantonen Nutzungseinschränkungen erlassen (Tratschin, Dübendorfer, & Ritscher, 2019). Als Reaktion auf häufigere Trockenheitslimitierung und Wasserentnahmeeinschränkungen schliessen sich Landwirte zu Bewässerungsgenossenschaften zusammen, um grössere Infrastrukturprojekte realisieren zu können (z.B. Ried-Moos, Kerzers-Fräschels oder Furttal (BLW 2019)). Für die langfristige Planung von solchen Projekten wie auch für die vorausschauende Wasserressourcenplanung auf kantonaler und auf Bundesebene sind Abschätzungen zu erwartender Änderungen im Wasserbedarf für Bewässerung von grossem Wert.

Vor diesem Hintergrund wurde in der vorliegenden Studie die FAO-Methode zur Abschätzung kultur-spezifischer Bewässerungsbedürfnisse nach Allen et al. (1998) operationalisiert und für eine Reihe von Standorten Schweizer Mittelland auf Klimaprojektionen bis zum Ende des Jahrhunderts angewandt.

2 Daten und Methoden

2.1 Klimaprojektionen

Die Klimadaten für die Simulation der Bewässerung unter Klimawandel in dieser Arbeit entstammen den Schweizer Klimaszenarien CH2018 (NCCS 2018). Bei den Basisdaten handelt es sich um EURO-CORDEX Projektionen, die für die Schweiz stationsweise herunterskaliert und korrigiert wurden (National Centre for Climate Services, 2018). Für das Downscaling wurde der sogenannte «Quantile Mapping» Ansatz angewandt, wobei eine Korrektur systematischer Abweichungen in den Projektionsdaten vorgenommen wurde (Bias-Korrektur; Details dazu finden sich im Technischen Bericht der CH2018 Szenarien) (National Centre for Climate Services, 2018). «Quantile Mapping» wird immer häufiger in der Bias-Korrektur von simulierten Daten verwendet und dies mit hoher Genauigkeit (Rayczak, Kotlarski, & Schär, 2016). Diese Bias-Korrektur garantiert jedoch nicht, dass es keine Abweichungen bezüglich der Outputs des vorliegenden Bewässerungsmodells gibt. Smith et al. haben den Einfluss der Bias-Korrektur auf die Genauigkeit der Bewässerungsmenge für Gras und Mais im Rhonetal untersucht (Smith, et al., 2014). Sie haben rausgefunden, dass es eine gewisse Diskrepanz gibt zwischen der Bewässerungsmenge modelliert mit den korrigierten Wettermodellketten und derer modelliert mit den beobachteten Wetterdaten. Dieser Unterschied ist jedoch sehr klein im Vergleich zu den nicht-korrigierten Wettermodellketten.

Für die vorliegende Arbeit wurden die Treibhausgasemissionspfade (Representative Concentration Pathways, kurz RCP's) RCP2.6 und RCP8.5 betrachtet, die Zukunftsszenarien mit konsequentem Klimaschutz (RCP2.6) bzw. ohne Klimaschutz (RCP8.5) entsprechen (National Centre for Climate Services, 2018; Abb. 1). Verwendet wurden die täglichen Modellketten der Mittellandstandorte Changins (CGI), Reckenholz (REH), Basel (BAS), Payerne (PAY), Aigle (AIG), Bern (BER) und Güttingen (GUT) (Abb. 2). Die Standorte befinden sich unter 600 m.ü.M. Diese Modellketten beinhalten die projizierten Werte für mittlere Tagestemperatur, tiefste Tagestemperatur, höchste Tagestemperatur, Niederschlagssumme, mittlere Bodenwindgeschwindigkeit und mittlere globale Sonneneinstrahlung. In Anhang 1 sind die verwendeten Klimaszenarien aufgelistet. Für RCP2.6 wurden 12 Modellketten und RCP8.5 30 Modellketten betrachtet. Die untersuchten Zeithorizonte entsprechen denen aus (National Centre for Climate Services, 2018): Der Referenzzeitraum reicht von 1981 bis 2010. Das 21. Jahrhundert wird in drei Zeithorizonte unterteilt, nahe Zukunft (2020 bis 2049), mittlere Zukunft (2045 bis 2074) und ferne Zukunft (2070 bis 2099).

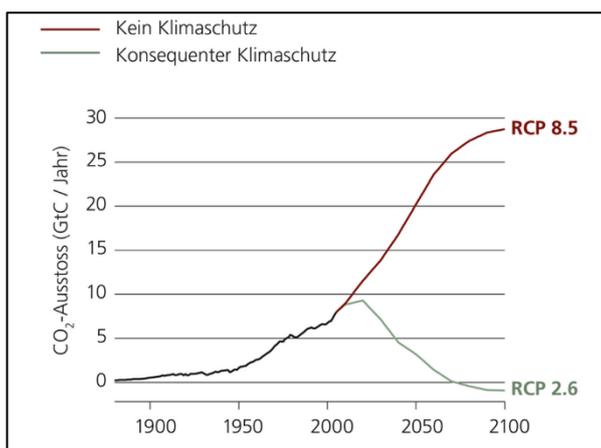


Abbildung 1: Weltweiter netto CO₂-Ausstoss nach Emissionspfaden (National Centre for Climate Services, 2018)

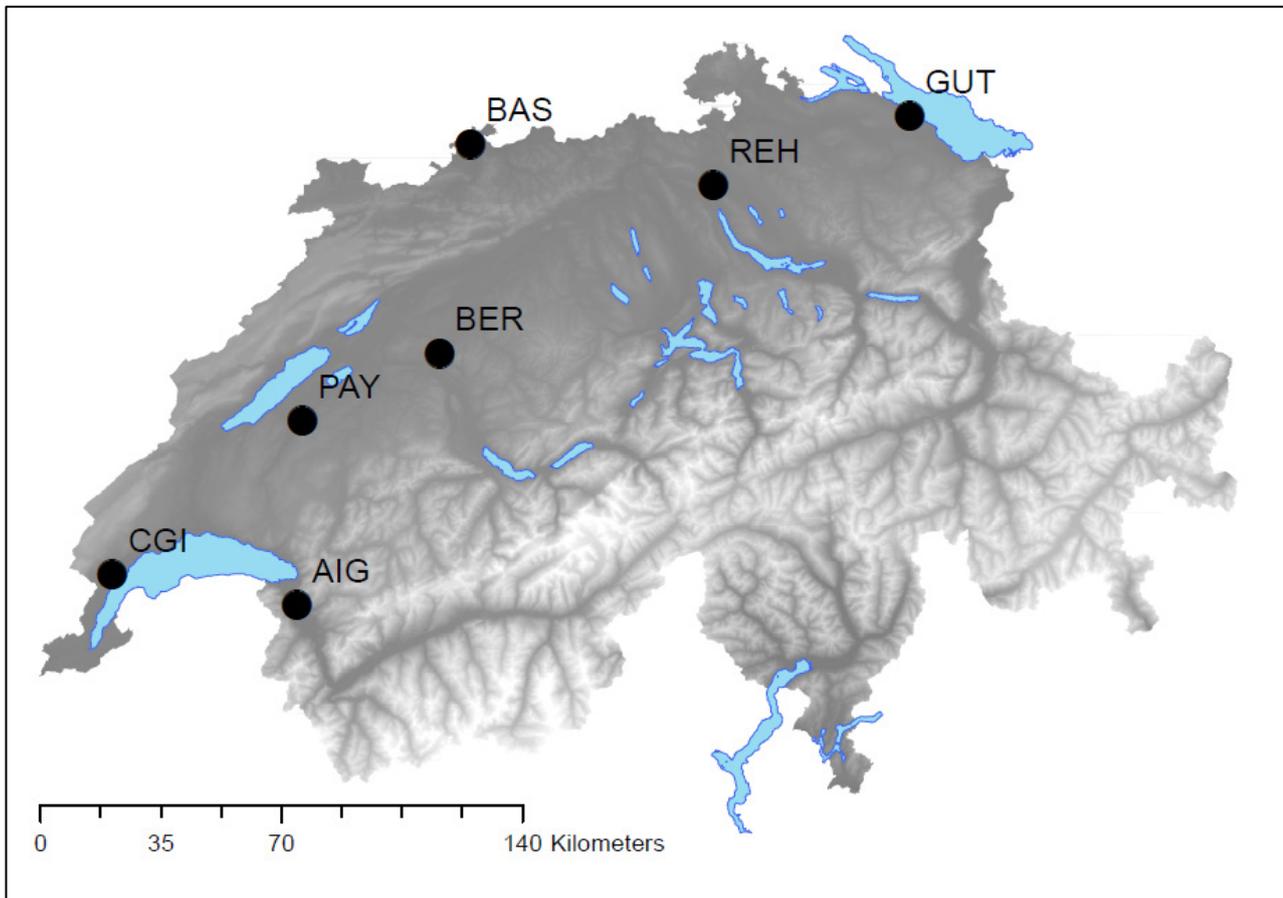


Abbildung 2: Standorte der MeteoSchweiz-Messstationen für die Modellrechnungen durchgeführt wurden: Changins (CGI), Reckenholz (REH), Basel (BAS), Payerne (PAY), Aigle (AIG), Bern (BER) und Güttingen (GUT); Hintergrund © swisstopo

2.2 Klimaänderungssignale nach Standorten

Die Klimaänderungssignale unterscheiden sich je nach Emissionsszenario, es zeigen sich aber auch leichte Unterschiede je nach Standort, die im Folgenden erläutert werden. Gemäss den Klimaprojektionen steigt die durchschnittliche Temperatur mit RCP8.5 am stärksten im Sommer an (dargestellt in Abb. 3, Tabelle 1), wobei die Temperaturen im Herbst und im Frühling ebenfalls ansteigen (National Centre for Climate Services, 2018). Tabelle 1 zeigt die absoluten durchschnittlichen Sommertagestemperaturen für beide Emissionsszenarien. Während bei RCP2.6 eine Temperatursteigerung im Sommer um ca. 1 °C bis Ende Jahrhundert zu erwarten ist, liegt diese Erhöhung mit RCP8.5 bei ca. 4 °C. Die Temperaturänderungen nach Standorten unterscheiden sich mit dem Emissionspfad RCP2.6 nicht wesentlich. Die Sommertemperaturen steigen bis zur mittleren Zukunft leicht an und fallen dann bis zur fernen Zukunft auf die durchschnittlichen Sommertemperaturen der nahen Zukunft. Der Emissionspfad RCP8.5 zeigt auch keine wesentlichen Unterschiede in den projizierten Temperaturzunahmen nach Standort. Aigle, Bern und Changins scheinen tendenziell eine etwas grössere Änderung der Sommertemperatur zu erfahren. Dieser Unterschied zu den restlichen Standorten vergrössert sich bis zur fernen Zukunft.

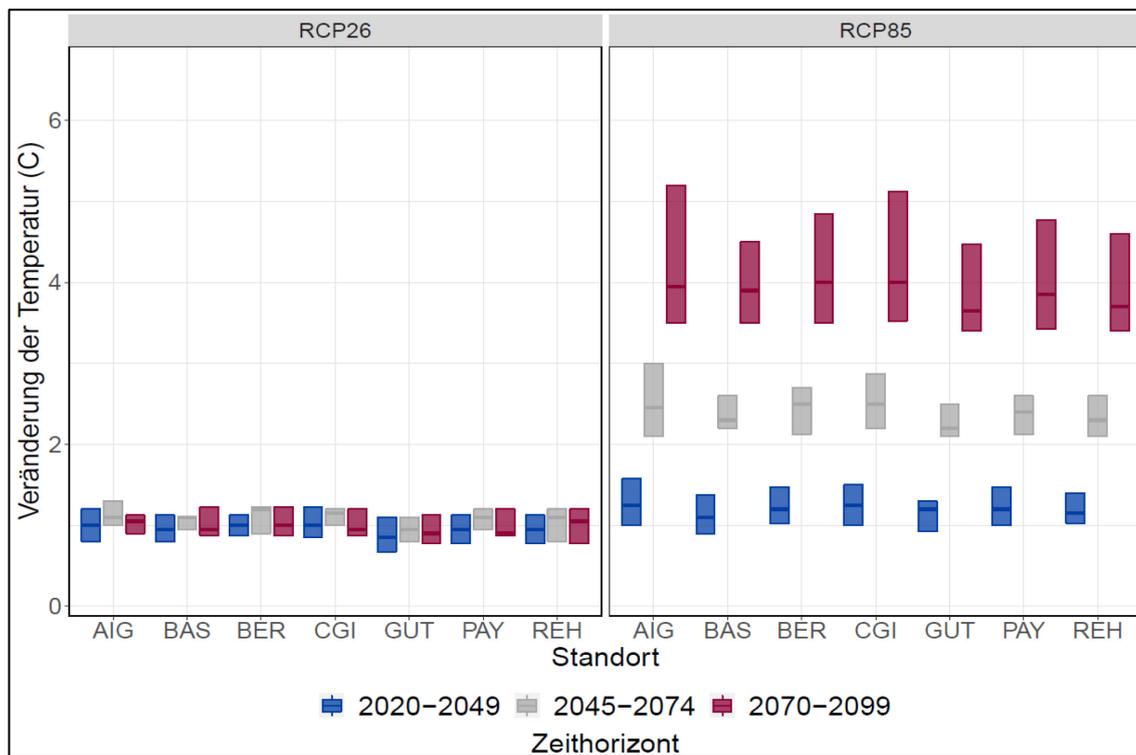


Abbildung 3: Absolute Änderung der durchschnittlichen Tagestemperatur im Sommer (Juni-August), im Vergleich zum Referenzzeitraum (1981-2010), nach Standort, Emissionspfad und Zeithorizont. Die Boxen sind durch das erste bzw. dritte Quartil der Simulationen verschiedener Modellketten und Böden begrenzt. Die dicke Linie gibt den Median an.

Tabelle 1: Durchschnittliche Sommertagestemperatur in Celsius gemittelt über die entsprechenden Zeithorizonte und über die Modellketten der jeweiligen Emissionspfade. Die Zahl in Klammern bezeichnet die Standardabweichung. Der Sommer ist definiert als die Monate Juni, Juli und August.

Emissionspfad	Standort	1981-2010	2020-2049	2045-2074	2070-2099
RCP2.6	Aigle (AIG)	18.3 (0.1)	19.4 (0.4)	19.5 (0.3)	19.4 (0.3)
	Basel (BAS)	18.8 (0.1)	19.8 (0.4)	19.8 (0.2)	19.8 (0.2)
	Bern (BER)	17.6 (0.1)	18.6 (0.4)	18.7 (0.2)	18.7 (0.3)
	Changins (CGI)	18.8 (0.1)	19.8 (0.4)	19.9 (0.2)	19.9 (0.2)
	Güttingen (GUT)	17.8 (0.1)	18.6 (0.4)	18.7 (0.3)	18.7 (0.2)
	Payerne (PAY)	17.9 (0.1)	18.9 (0.4)	19 (0.2)	18.9 (0.2)
	Reckenholz (REH)	17.9 (0.1)	18.9 (0.4)	19 (0.2)	18.9 (0.2)
RCP8.5	Aigle (AIG)	18.3 (0.1)	19.6 (0.4)	20.9 (0.6)	22.6 (1)
	Basel (BAS)	18.8 (0.1)	20 (0.4)	21.3 (0.6)	23 (1)
	Bern (BER)	17.6 (0.1)	18.9 (0.4)	20.2 (0.5)	21.9 (0.9)
	Changins (CGI)	18.8 (0.1)	20.1 (0.4)	21.4 (0.6)	23.2 (1)
	Güttingen (GUT)	17.8 (0.1)	18.9 (0.4)	20.1 (0.5)	21.7 (0.9)
	Payerne (PAY)	17.9 (0.1)	19.2 (0.4)	20.4 (0.5)	22.1 (1)
	Reckenholz (REH)	17.9 (0.1)	19.2 (0.4)	20.4 (0.5)	22 (0.9)

Die Niederschläge nehmen im Mittelland im Winter und Frühling im Laufe des Jahrhunderts je nach Emissionspfad mehr oder weniger stark zu (nicht dargestellt), während die Sommerniederschläge tendenziell abnehmen (Abb. 4, Tabelle 2). Mit RCP2.6 nähern sich die Sommerniederschlagssummen gegen Ende des Jahrhunderts wieder den Werten des Referenzzeitraums an. Mit RCP8.5 nimmt der Niederschlag in Sommer stark ab, insbesondere bis zum fernen Zeithorizont 2070-2099. Die Veränderung des Niederschlags scheint bei Changins besonders gross zu sein, jedoch liegt das daran,

dass die Referenzniederschlagssumme in Changins bereits gering ist, die relative Änderung ist deshalb grösser als bei anderen Standorten.

Detailinformation über saisonale Veränderungen von Niederschlag und Temperatur in verschiedenen Regionen der Schweiz sind im Technischen Bericht der CH2018 Klimaszenarien und im Web-Atlas zu finden (NCCS 2018).

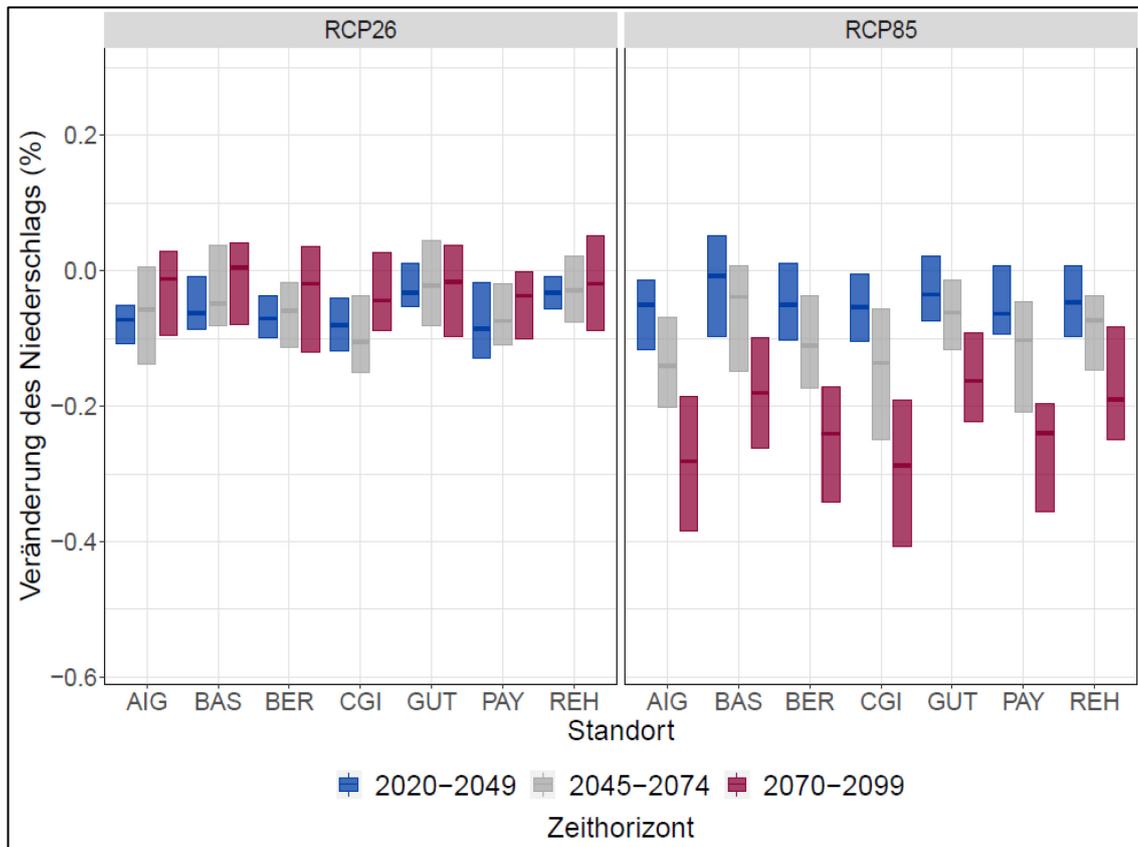


Abbildung 4: Relative Änderung der durchschnittlichen Sommerniederschlagssumme, im Vergleich zum Referenzzeitraum 1981-2010 nach Standort, Emissionspfad und Zeithorizont. Die Boxen sind durch das erste bzw. dritte Quartil der Simulationen verschiedener Modellketten und Böden begrenzt. Die dicke Linie gibt den Median an. Der Sommer ist definiert als die Monate Juni, Juli und August

Tabelle 2: Durchschnittliche Sommerniederschlagssumme in Millimeter gemittelt über die entsprechenden Zeithorizonte und über die Modellketten der jeweiligen Emissionspfade. Die Zahl in Klammern bezeichnet die Standardabweichung. Der Sommer ist definiert als die Monate Juni, Juli und August

Emissionspfad	Standort	1981-2010	2020-2049	2045-2074	2070-2099
RCP2.6	Aigle (AIG)	291 (19)	269 (22)	274 (25)	283 (22)
	Basel (BAS)	252 (9)	240 (20)	243 (20)	246 (23)
	Bern (BER)	316 (18)	293 (26)	301 (29)	306 (30)
	Changins (CGI)	221 (14)	200 (27)	203 (24)	213 (29)
	Güttingen (GUT)	307 (20)	300 (24)	302 (36)	300 (48)
	Payerne (PAY)	245 (13)	226 (28)	231 (26)	234 (28)
	Reckenholz (REH)	328 (24)	317 (18)	320 (33)	321 (44)
RCP8.5	Aigle (AIG)	293 (18)	275 (31)	250 (41)	210 (44)
	Basel (BAS)	254 (14)	247 (28)	235 (31)	209 (39)
	Bern (BER)	320 (17)	303 (35)	281 (46)	238 (48)
	Changins (CGI)	222 (18)	208 (32)	187 (37)	158 (41)
	Güttingen (GUT)	312 (24)	303 (32)	291 (41)	259 (36)
	Payerne (PAY)	248 (16)	235 (32)	217 (38)	184 (43)
	Reckenholz (REH)	328 (19)	315 (30)	302 (37)	267 (38)

2.3 Bewässerungsmodell

Das implementierte Modell berechnet die vertikale Wasserbilanz nach (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998) über den maximalen Wurzelraum der Kultur folgendermassen:

$$\frac{d}{dt}(D_r) = -P - RO - DP - IWR + ET_a \quad (1)$$

wobei D_r den Bodenwasserverlust kennzeichnet, P den Niederschlag, RO den Wasserabfluss an der Bodenoberfläche, DP die Tiefenversickerung und IWR die Bewässerung. RO wird bestimmt aus der Differenz zwischen Niederschlag und Infiltrationskapazität. Sobald die Infiltrationskapazität den Wert null erreicht, das heisst der Boden mit Wasser gesättigt ist, wird der Rest des Niederschlags als RO abgeführt. Die Infiltrationskapazität berechnet sich aus der Differenz der Porosität des Bodens und des aktuellen Wassergehalts im Wurzelraum. Wenn der aktuelle Wassergehalt die Feldkapazität übersteigt, wird der Überschuss in Form von DP abgeführt. Schneefall und Gefrierung des Wassers auf und im Boden wird vernachlässigt. Der Wassergehalt am ersten Tag entspricht der Feldkapazität (Smith, Calanca, & Fuhrer, 2012). Die aktuelle Evapotranspirationsrate ET_a wird anhand des Trockenstresskoeffizienten K_s , des Kulturkoeffizienten K_c und der Referenz-Evapotranspiration ET_0 wie folgt berechnet:

$$ET_a = K_s * K_c * ET_0 \quad (2)$$

K_c variiert dabei im Verlauf des Jahres wie in Abb. 5 gezeigt.

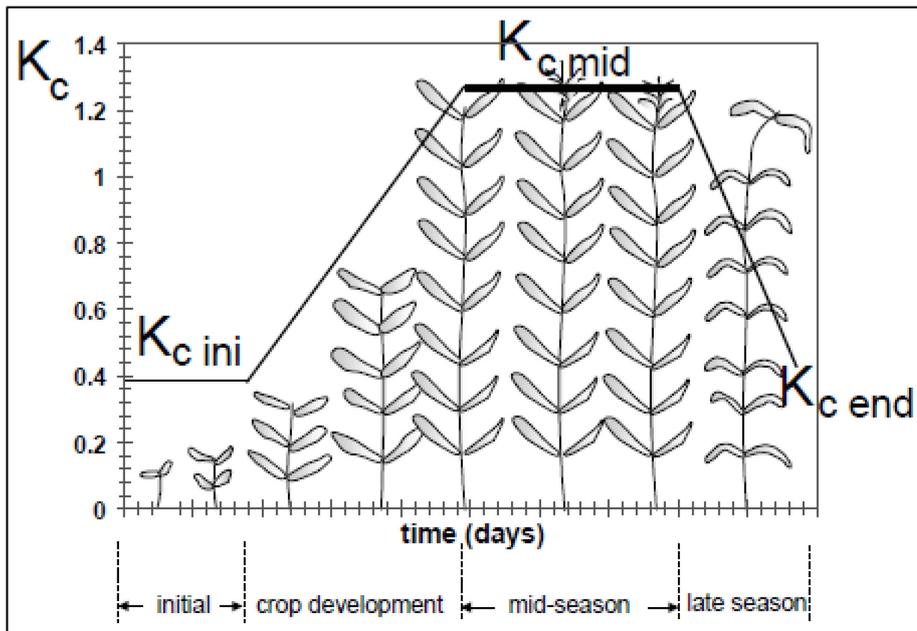


Abbildung 5: K_c -Kurve unterteilt in die vier vegetativen Wachstumsphasen (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998).

ET_0 wurde mit Hilfe der Priestley-Taylor Gleichung aus den projizierten Daten der Modellketten berechnet. Die FAO empfiehlt die genauere Penman-Monteith Gleichung als Standard-Methode zur Berechnung der Referenz-Evapotranspiration. Die in der vorliegenden Arbeit benutzten Modellketten beinhalten jedoch keine Daten zum Wasserdampfdruck, was für die Penman-Monteith Gleichung nötig ist. Die Ermittlung von K_c wird in Abschnitt 2.3.1 näher erklärt.

Die Bewässerung der Kultur wird ausgelöst, wenn D_r den Schwellenwert $D_{r, trig}$ überschreitet. Dieser Schwellenwert ist wie folgt definiert:

$$D_{r, trig} = (0.2 + 0.8 * p) * TAW \quad (3)$$

wobei TAW die nutzbare Feldkapazität kennzeichnet. Der Faktor p (siehe (8)) beschreibt den Anteil der nutzbaren Feldkapazität, welches schwinden kann bis die Pflanze Trockenstress ausgesetzt ist. Je grösser p , desto resistenter ist die Pflanze gegenüber Trockenstress. $D_{r, trig}$ entspricht einem K_s -Wert von 0.8. K_s ist gleich 1, wenn $(TAW - D_r) \geq (1 - p) * TAW$ und wird sonst folgendermassen berechnet:

$$K_s = \frac{TAW - D_r}{(1 - p) * TAW} \quad (4)$$

IWR entspricht der Menge an Wasser, um K_s von 0.8 zurück auf 1 zu bringen:

$$IWR = p * TAW - D_r \quad (5)$$

Das Bewässerungsmodell benötigt zwei Arten von Parametern: Kultur- und Bodenparameter, die in den folgenden Unterabschnitten erläutert werden. Die verwendeten Werte der Kulturparameter und deren Quellen sind im Anhang 2 aufgelistet.

2.3.1 Kulturparameter für Acker, Gemüse, Obst, Reben und Beeren

Die in dieser Arbeit betrachteten Gemüse-, Obst- und Beerenkulturen sind in der Schweiz häufig angebaute Kulturen. Dabei wurde zwischen einmaliger und mehrmaliger Ernte pro Jahr unterschieden. In die erste Kategorie fallen folgende Kulturen: Weinrebe, Apfelbaum (Gala), Aprikosenbaum (Goldrich-Jumbo Cot), Kürbis, Zucchini, Knollensellerie, Randen, Zuckerrübe, Lagerkarotten, Speisezwiebel, Körnermais, Zuckermais, Lagerkabis und Kartoffel. In der zweiten Kategorie befinden sich Brokkoli, Blumenkohl, Rosenkohl, Eisbergsalat, Spinat, Rettich und Erdbeeren. Für jede Kultur wurden folgende Parameter gemäss Allen et al. (1998) bestimmt: maximale Wurzeltiefe Z_r , Kulturkoeffizienten der vier vegetativen Wachstumsphasen $K_{c,in}$, $K_{c,dev}$, $K_{c,mid}$, $K_{c,end}$, Kulturkoeffizient ausserhalb der Kulturzeit $K_{c,ng}$, Faktor p_5 , maximale Pflanzenhöhe h , Länge der vier vegetativen Wachstumsphasen L_{in} , L_{dev} , L_{mid} , L_{end} , Saattermin DP und Erntetermin DH . DP und DH sind Schaltjahre sensitiv, wobei die Ernte immer am gleichen Tag im Monat erfolgt. Die Termine wurden durch Experten und Literatur in Erfahrung gebracht (siehe Anhang 2).

Die Längen der Wachstumsphasen wurden von den entsprechenden Werten aus (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998) abgeleitet, so dass die totale Kulturzeit zwischen Saat und Ernte eingehalten wird. Die restlichen Parameter wurden auch aus (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998) entnommen. $K_{c,mid}$ wird nach (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998) bezüglich der lokalen Wetterbedingungen wie folgt korrigiert:

$$K_{c,mid} = K_{c,mid(FAO)} + [0.04 * (u_2 - 2) - 0.004 * (RH_{min} - 45)] * \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (6)$$

Ebenso $K_{c,end(DH)}$, falls $K_{c,end(FAO)} \geq 0.45$:

$$K_{c,end(DH)} = K_{c,end(FAO)} + [0.04 * (u_2 - 2) - 0.004 * (RH_{min} - 45)] * \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (7)$$

RH_{min} und u_2 beschreiben die minimale relative Feuchtigkeit und die Windgeschwindigkeit gemittelt über L_{mid} bzw. L_{end} . $K_{c,dev}$ und $K_{c,end}$ werden für jeden Tag während L_{dev} bzw. L_{end} zwischen $K_{c,in}$ und $K_{c,mid}$ bzw. zwischen $K_{c,mid}$ und $K_{c,end(DH)}$ linear interpoliert. $K_{c,ng}$ wurde als 0.2 angenommen, dies entspricht dem tabellierten Wert für Obstbäume. Dieser Wert wurde für alle Kulturen verwendet.

Der aktuelle Faktor p ist täglich zu berechnen:

$$p = p_5 + 0.04 * (5 - K_c ET_0) \quad (8)$$

2.3.2 Kulturparameter für Grünland

Drei Graskulturen wurden implementiert: Raigras, Klee und Weideland. Für die Simulation der Bewässerung sind dieselben Parameter nötig, die im vorangegangenen Abschnitt beschrieben sind. Die Wachstumsparameter (Ende der Schnitzyklen und Anfang der Schnitzyklen, sowie die Längen der Wachstumsphasen) werden dabei allerdings folgendermassen definiert: Der Anfang der Kulturzeit wurde für das Mittelland als Tag 75 im Jahr und der letzte Tag der Kulturzeit als 315 angenommen (Vuffray, et al., Typologie der Produktion von Weiden, 2017). Die Wachstumsparameter wurden über die Jahre der Zeithorizonte für jede Modellkette und jeden Standort gemittelt. Der Anfang und das Ende der Kulturzeit wurden als fix betrachtet.

Gras wird unter dem Jahr mehrmals geschnitten und Weideland kontinuierlich abgegrast. Das kontinuierliche Grasland durch das Vieh wird hier als mehrere Schnitte über das Jahr definiert. Die Längen der Wachstumsphasen beziehen sich auf jeden Schnittzyklus (siehe Abbildung 6). Die Schnitte und Längen der Wachstumsphasen werden nach den oben aufgeführten Methoden für Raigras und Klee mit LAI nach Gleichung (9) nach (Bassin, Calanca, Weidinger, Gerosa, & Fuhrer, 2004) berechnet. Für das Weideland wird die LAI-Gleichung nach Gleichung (10) nach (Smith, Calanca, & Fuhrer, 2012) benutzt.

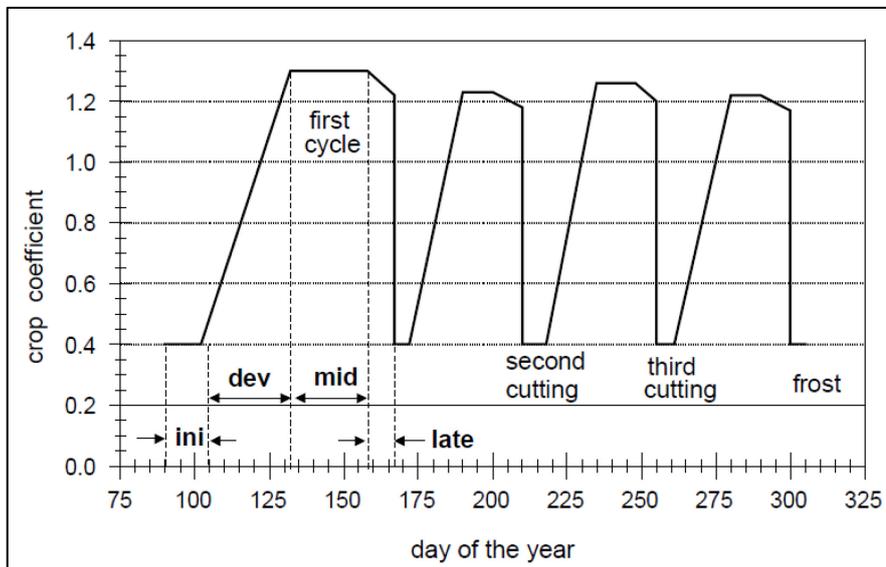


Abbildung 6: K_c -Kurve für Gras mit mehreren Schnitten über das Jahr (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998).

$$LAI_{Bassin} = LAI_{min} + \frac{LAI_{min} * (LAI_{max} - LAI_{min})}{LAI_{min} + (LAI_{max} - LAI_{min}) * \exp[-\beta * GDD]} \quad (9)$$

$$LAI_{Smith} = 0.008 * GDD \quad (10)$$

GDD bezeichnet die «Growing Degree Days» und wird wie folgt für jeden Tag berechnet:

$$GDD_i = GDD_{i-1} + (T_a - T_{ref}) \quad (11)$$

Wobei T_a die mittlere Tagestemperatur ist und T_{ref} die Basistemperatur. GDD wird nur berechnet solange $T_a > T_{ref}$ gilt. Sobald LAI den Schrittschwellenwert LAI_{cut} erreicht, wird das Gras geschnitten und das Wachstum fängt von neuem an. Schnittzyklen die bis zum Ende der Kulturzeit nicht LAI_{cut} überschreiten, werden nicht berücksichtigt. Die entsprechenden Werte sind in Anhang 2 hinterlegt. Die jeweiligen Längen der Wachstumsphasen wurden wie folgt definiert: L_{in} entspricht der Anzahl Tage zwischen LAI_{min} und einem LAI -Wert von 0.8. Dieser Grenzwert wurde so angepasst, damit das Ende der ersten initialen Wachstumsphase (für den Fall des fixen Kulturzeitanfangs an Tag 75) zwischen Tag 80 und 90 im Jahr für den Referenzzeitraum (1981-2010) und dem Standort Basel-Binningen liegt. Diese Zeitspanne entspricht den Beobachtungen in (Vuffray, et al., Typologie der Produktion von Weiden, 2017) für Standorte unter 600 m.ü.M.

L_{dev} entspricht der Anzahl Tage zwischen $LAI = 0.8$ und $LAI = 2$. Dieser Grenzwert wurde anhand der Messungen aus Oensingen, Solothurn bestimmt (siehe Abbildung 7; Ammann et al. 2007). $LAI = 2$ entspricht in etwa einer Pflanzhöhe von 15 cm, dies wiederum entspricht einer kompletten Bodenbedeckung, was als Beginn von L_{mid} definiert ist (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998). L_{mid} entspricht der Anzahl Tage zwischen $LAI = 2$ und LAI_{cut} . Die Seneszenz wurde vernachlässigt, so dass $L_{end} = 1$ ist.

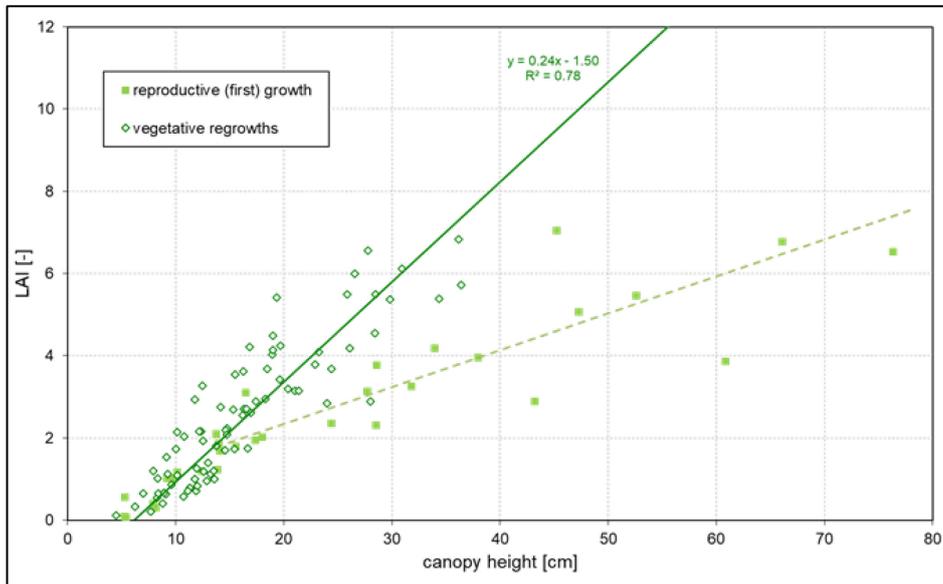


Abbildung 7: Gemessene Beziehung zwischen Pflanzhöhe und LAI für intensives Grasland am Standort Oensingen (Ammann, Flechard, Leifeld, Neftel, & Fuhrer, 2007).

2.3.3 Bodenparameter

Die modellierten Böden sind Sand, sandiger Lehm, Lehm, Schluff, schluffig-toniger Lehm, schluffiger Lehm, lehmiger Sand, schluffiger Ton und Ton (Tabelle 3). Die Bodenparameter sind Feldkapazität Q_{FC} , permanenter Welkepunkt Q_{WP} , Porosität Q_{sat} und nutzbare Feldkapazität TAW . Für Q_{FC} und Q_{WP} wurden die mittleren Werte aus (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998) übernommen. Q_{sat} wurde aus (Clapp & Hornberger, 1978) bestimmt. Die verwendeten Werte sind in Tabelle 3 aufgelistet. TAW berechnet sich wie folgt:

$$TAW = Z_r * (Q_{FC} - Q_{WP}) \quad (12)$$

Böden wurden als homogen angenommen, d.h. mehrlagige Böden wurden nicht berücksichtigt.

Tabelle 3: Bodenparameter Q_{FC} und Q_{WP} gemittelt aus (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998). Q_{sat} aus (Clapp & Hornberger, 1978).

Boden	Q_{FC} [-]	Q_{WP} [-]	Q_{sat} [-]
Sand	0.12	0.045	0.395
Sandiger Lehm	0.23	0.11	0.435
Lehm	0.25	0.12	0.451
Schluff	0.32	0.17	0.5
Schluffig-toniger Lehm	0.335	0.205	0.477
Schluffiger Lehm	0.29	0.15	0.485
Lehmiger Sand	0.15	0.065	0.41
Schluffiger Ton	0.36	0.23	0.492
Ton	0.36	0.22	0.482

2.4 Modellanwendung und Varianzanalyse

Das beschriebene Bewässerungsmodell wurde in dieser Studie für 9 Kulturen (Kartoffeln, Karotten, Zuckermais, Apfelbäume, Eisbergsalat, Erdbeeren, Raigras, Klee und Weide), 9 Bodenarten (Sand, sandiger Lehm, Lehm, Schluff, schluffig-toniger Lehm, schluffiger Lehm, lehmiger Sand, schluffiger Ton und Ton), 7 Standorte (Changins, Reckenholz, Basel, Payerne, Aigle, Bern und Güttingen), und 12 Modellketten basierend auf RCP2.6 (Emissionspfad mit konsequentem Klimaschutz) und 30 Modellketten basierend auf RCP8.5 (Emissionspfad ohne Klimaschutz) angewandt.

Um zu untersuchen, welche Rolle die verschiedenen Faktoren (Emissionspfad, Klimamodellkette, Bodenart und Standort für die Varianz der geschätzten Bewässerungsmengen einer Kultur spielt, wurde eine ANOVA-basierte Varianzanalyse durchgeführt analog zu der in Yip et al. (2011) oder kürzlich in Holzkämper (2020) angewandten Methode. Bei diesem Verfahren werden die aus der ANOVA abgeleiteten Quadratsummen durch die Gesamtquadratsumme geteilt, um die Anteile der erklärten Varianzen in den Simulationsergebnissen für jeden einzelnen Faktor zu erhalten. Dabei wurden hier nur Haupteffekte und keine interaktiven Effekte berücksichtigt; alle interaktiven Effekte werden daher als "Residuen" zusammengefasst.

3 Ergebnisse

In Folgenden werden die Modellergebnisse exemplarisch für 1) eine Kultur mit einmaliger Ernte (Kartoffel), 2) eine Kultur mit mehrmaliger Ernte (Eisbergsalat) und 3) ein Grünlandtyp (Raigras) dargestellt und diskutiert. Die Ergebnisse für alle anderen untersuchten Kulturen sind im Anhang 3 zusammengefasst.

3.1 Kulturen mit einmaliger Ernte

Aus Abbildung 8 und Tabelle 4 ist zu erkennen, dass der Bewässerungsbedarf für Kartoffel in Payerne und Changins bereits für den Referenzzeitraum höher ist, als an den restlichen Standorten. Güttingen und Reckenholz hingegen liegen im unteren Bereich bezüglich der Bewässerungsbedürfnisse, aufgrund der höheren Niederschlagssummen (siehe dazu Abschnitt 2.2). Beide Emissionspfade schätzen für die nahe Zukunft nur einen leicht erhöhten Bewässerungsbedarf für alle Standorte. Generell sind die projizierten Änderungen in den Bewässerungsbedürfnissen aller Kulturen mit RCP2.6 relativ gering. Dagegen steigt der Bewässerungsbedarf mit RCP8.5 im Laufe des Jahrhunderts deutlich an. Insbesondere an den warmen und trockenen Standorten (Aigle = AIG, Changins = CGI und PAY = Payerne) erreicht der Wasserbedarf für Bewässerung bis zum Ende des Jahrhunderts ein sehr hohes Niveau von deutlich über 200 mm und bis über 300 mm.

Die Bewässerung erreicht gemäss Abbildung 9 ihr Maximum jeweils im Hochsommermonat Juli, dementsprechend ist die absolute Veränderung der Bewässerungsmenge im Juli am grössten. Dies variiert je nach Länge und Terminierung des Wachstumszyklus für die verschiedenen Kulturen.

Für die nahe Zukunft unterscheiden sich beide Emissionspfade bezüglich Bewässerungsbedarf kaum voneinander. Für die mittlere Zukunft stimmt die Bewässerung bis und mit Juni zwischen den RCP's und dem Referenzzeitraum überein. Erst ab Juli ist der Unterschied zwischen den Emissionspfaden zu erkennen. In der fernen Zukunft tritt dieser Unterschied bereits im Juni auf. Da die Niederschlagssumme mit RCP8.5 nur im Sommer stark sinkt, die durchschnittliche Tagestemperatur im Sommer stärker zu nimmt als in den anderen Jahreszeiten und die mittlere Wachstumsphase der Pflanze sich ganz im Sommer befindet ist auch die Bewässerungsänderung vor allem in den Sommermonaten stark zu spüren. Das bedeutet, dass die Bewässerungszunahme mit einem ausgewählten Emissionspfad primär von der Länge der Kulturzeit und vom Zeitpunkt der Pflanzung abhängt.

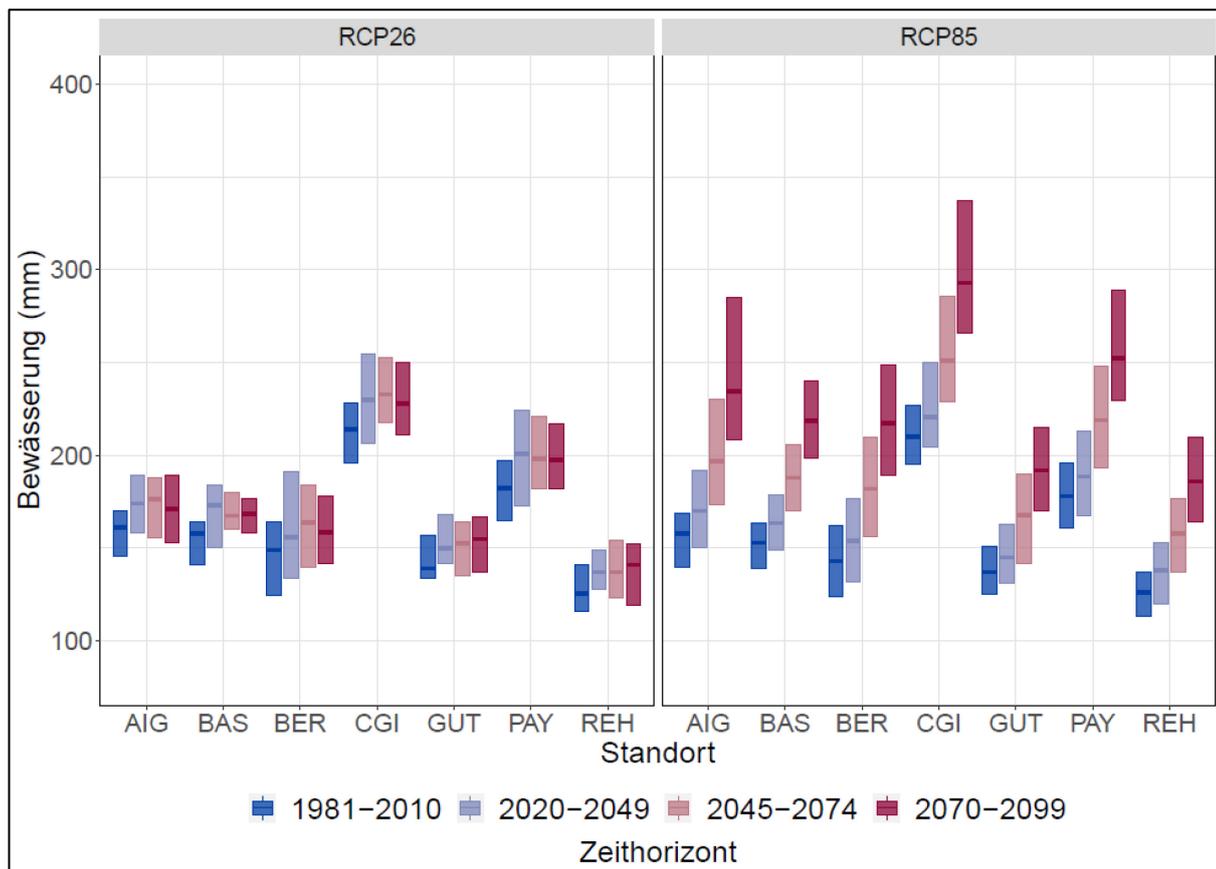


Abbildung 8: Boxplot der jährlichen Bewässerungsmengen für Kartoffeln über allen Modellketten und Böden. Die Boxen sind durch das erste bzw. dritte Quartil begrenzt. Die fette Linie gibt den Median an.

Tabelle 4: Jährliche Bewässerungsmengen in Millimeter für Kartoffeln gemittelt über die entsprechenden Zeithorizonte, über die Modellketten der jeweiligen Emissionspfade und über alle Böden. Die Zahl in Klammern bezeichnet die Standardabweichung.

Emissionspfad	Standort	1981-2010	2020-2049	2045-2074	2070-2099
RCP2.6	Aigle (AIG)	159 (20)	176 (27)	174 (22)	170 (22)
	Basel (BAS)	155 (14)	170 (22)	169 (16)	168 (15)
	Bern (BER)	146 (25)	164 (34)	162 (26)	159 (25)
	Changins (CGI)	215 (19)	235 (34)	234 (25)	231 (24)
	Güttingen (GUT)	145 (14)	153 (20)	152 (21)	153 (22)
	Payerne (PAY)	183 (21)	201 (34)	200 (24)	199 (23)
	Reckenholz (REH)	129 (16)	140 (19)	139 (19)	139 (21)
RCP8.5	Aigle (AIG)	155 (21)	172 (28)	202 (37)	243 (45)
	Basel (BAS)	153 (15)	165 (23)	191 (29)	223 (37)
	Bern (BER)	142 (24)	157 (31)	186 (38)	223 (45)
	Changins (CGI)	210 (21)	228 (31)	259 (36)	298 (44)
	Güttingen (GUT)	137 (19)	146 (24)	168 (30)	194 (34)
	Payerne (PAY)	178 (22)	193 (31)	222 (37)	259 (44)
	Reckenholz (REH)	125 (17)	137 (22)	159 (27)	188 (34)

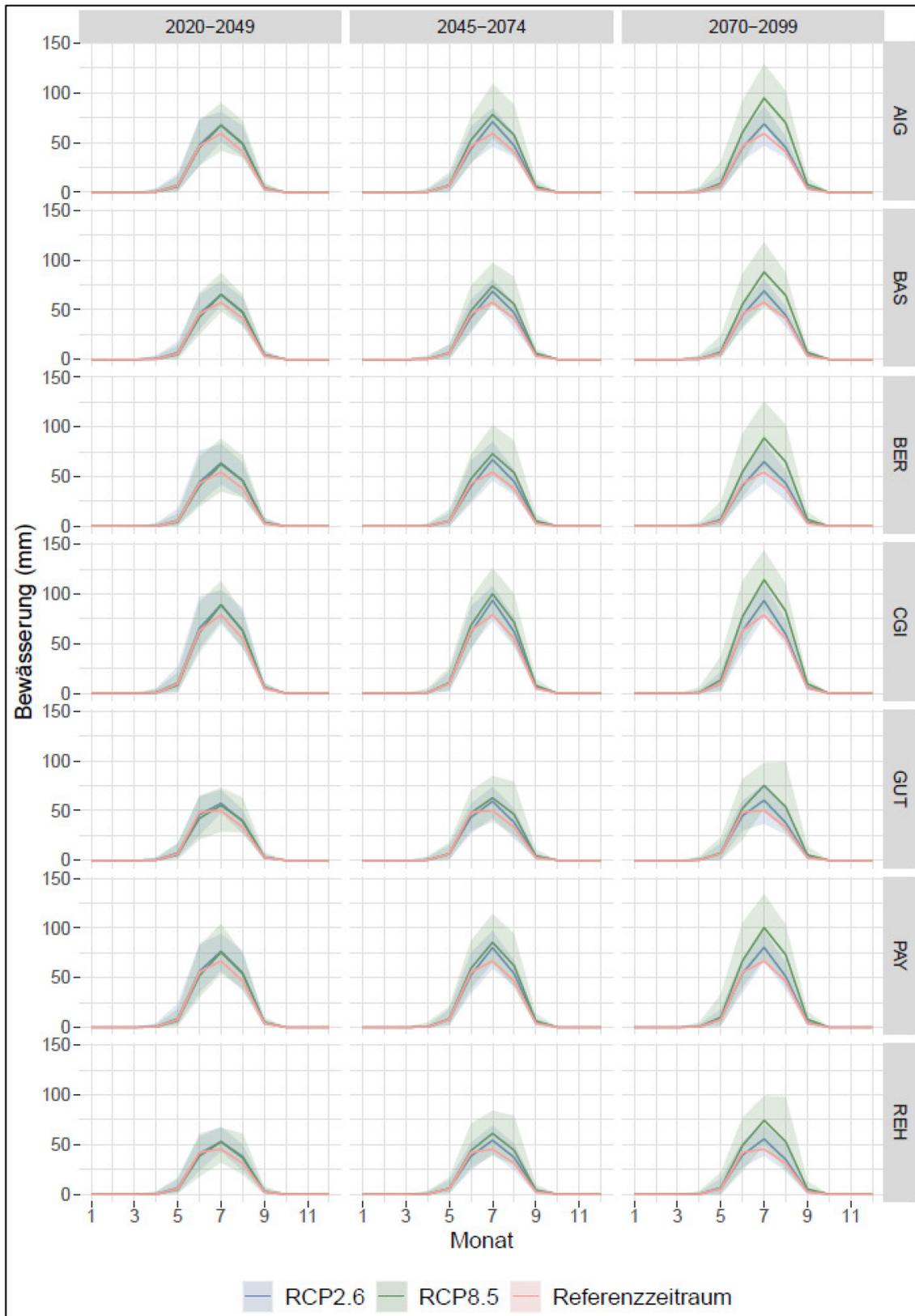


Abbildung 9: Die Linie bezeichnet die monatliche Bewässerungsmenge für Kartoffeln gemittelt über alle Modellketten und Böden. Die Fläche zeigt das maximale Intervall der modellierten Bewässerungsmenge.

Abbildung 10 zeigt klar, dass die Variabilität der prozentualen Veränderung der Bewässerung kaum durch die Böden und Standorte erklärt werden kann. Den grössten Einfluss auf die Veränderung der Bewässerungsmenge haben die Modellketten. Die Varianz der Resultate der nahen Zukunft sind vollkommen unabhängig vom Emissionspfad. Dies ist auch aus Abbildung 9 erkennbar, die Fläche um der mittleren monatlichen Bewässerung ist für beide Emissionspfade in der nahen Zukunft fast deckungsgleich. Die Variabilität der Resultate mit RCP8.5 nimmt im Laufe des Jahrhunderts zu. In Abbildung 11 ist das durch den erhöhten Varianzanteil des Emissionspfades in der fernen Zukunft zu sehen; in Tabelle 4 ist dies an der erhöhten Standardabweichung für die absoluten Bewässerungsmengen mit RCP8.5 zu erkennen.

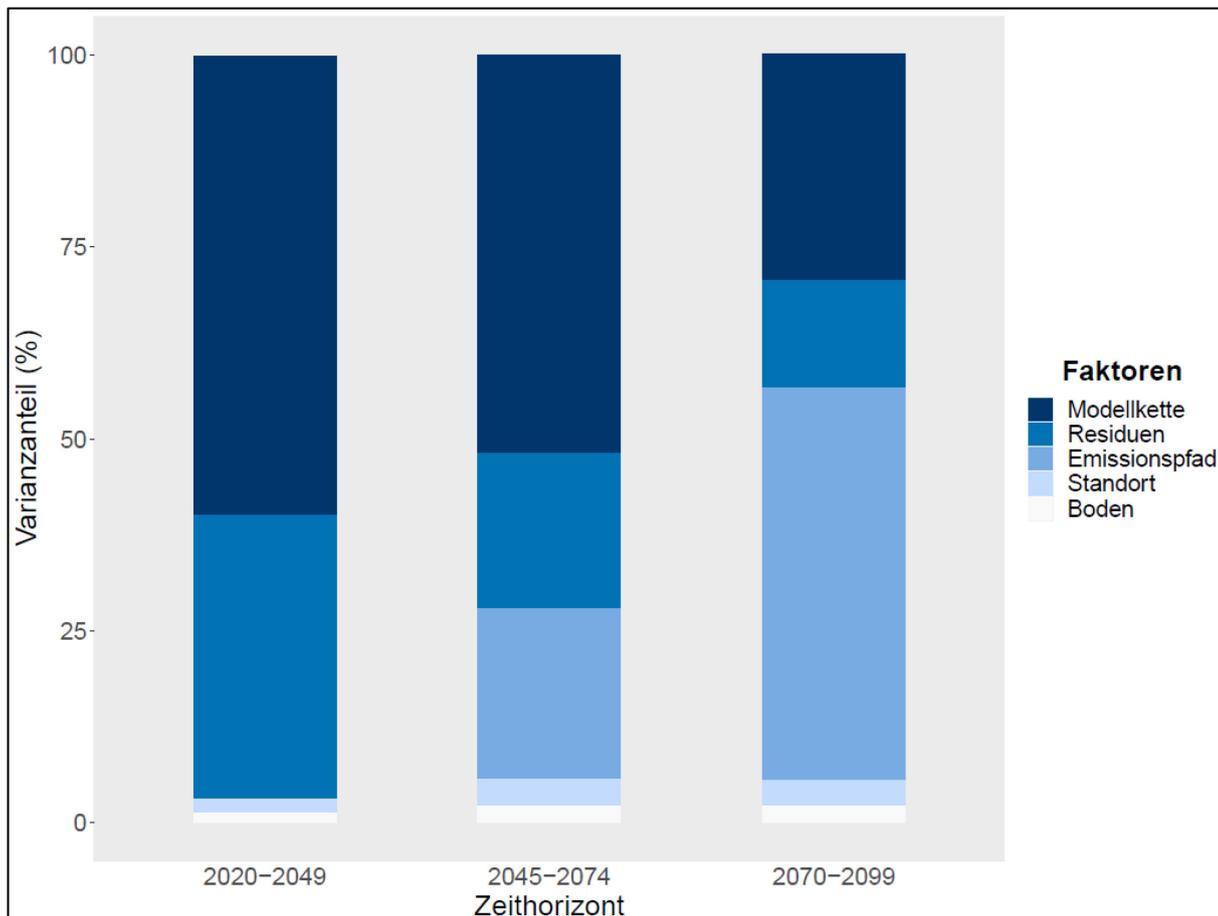


Abbildung 10: Balkendiagramm mit den Resultaten der Anova-Varianzanalyse der prozentualen Veränderung der Bewässerung für Kartoffeln bezüglich dem Referenzzeitraum.

3.2 Kulturen mit mehrmaliger Ernte

Eisbergsalat wurde in dieser Arbeit mit drei Anbauzyklen pro Jahr modelliert (siehe Tabelle 6), dies nähert sich gemäss Expertenangaben der Schweizer Anbaupraxis an. Es wurde darauf geachtet, dass der Anbau während den drei fruchtbaren Jahreszeiten stattfindet. Abbildungen 11 und 12 zeigen die unterschiedlichen Bewässerungsmengen für die drei Anbauperioden und die Zunahme je nach Emissionspfad. Mit Emissionspfad RCP2.6 wird, wie bereits für Kartoffeln, eine geringe Zunahme der Bewässerungsmenge über das Jahrhundert geschätzt (Abb. 11). Jedoch unterscheidet sich die Zunahme nach Anbausaison. Für die erste, frühe Saison steigt der Bewässerungsbedarf kaum. Etwas deutlichere Zunahmen zeigen sich für die späteren Anbauphasen im Sommer und Herbst. Am höchsten sind die Bewässerungsbedürfnisse an den Westschweizer Standorten Changins und Payerne – insbesondere im Sommer. Insgesamt bleiben die projizierten Bewässerungsbedürfnisse mit RCP2.6 aber gering (um 75 mm in Changins im Sommer) im Vergleich zu den Bewässerungsbedürfnissen, die mit RCP8.5 vorhergesagt werden (bis über 100 mm in Changins im Sommer; Abbildung 12). Abbildung 12 zeigt eine ähnliche Entwicklung mit dem Emissionspfad RCP8.5 für den Frühling wie mit RCP2.6.

Für alle Standorte steigt der Bewässerungsbedarf für die ferne Zukunft an, da die Niederschlagssumme in der Nordostschweiz gleichbleibt und in der Westschweiz leicht abnimmt, während die Temperatur im ganzen Mittelland weiter zunimmt. Die Bewässerungsmenge für die Anbauperioden Sommer und Herbst verändern sich stärker. Es zeigt sich ein starker Anstieg des Bewässerungsbedarfs im Sommer bis Ende Jahrhundert für alle Standorte und ein etwas leichter Anstieg im Herbst. Im Sommer steigt die Temperatur mit RCP8.5 besonders an, während die Niederschlagssumme drastisch abnimmt. Im Herbst bleibt die Niederschlagssumme um das Niveau des Referenzzeitraums, die Temperatur steigt jedoch markant, wenn auch etwas weniger als im Sommer. Diese Entwicklungen gelten für alle Standorte gleichermassen.

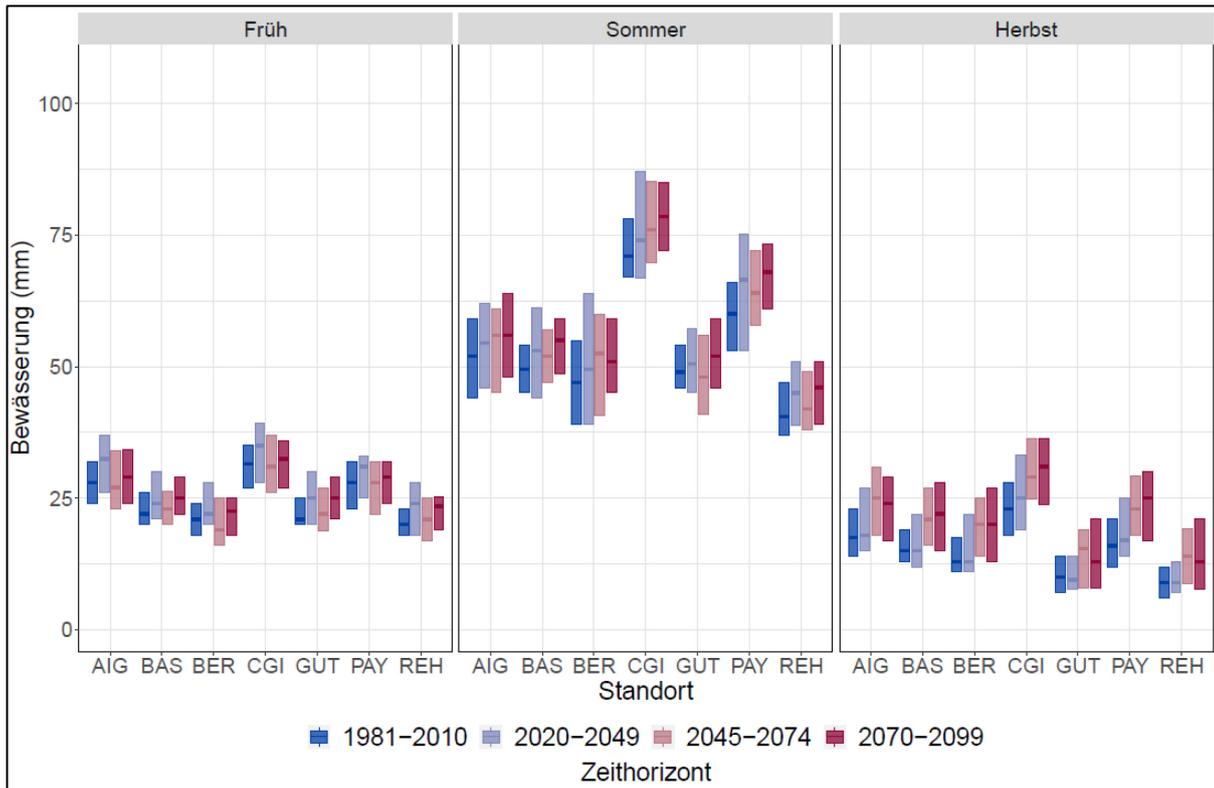


Abbildung 11: Boxplot der jährlichen Bewässerungsmengen für Eisbergsalat über allen Modellketten des Emissionspfades RCP2.6 und Böden. Die Boxen sind durch das erste bzw. dritte Quartil begrenzt. Die fette Linie gibt den Median an.

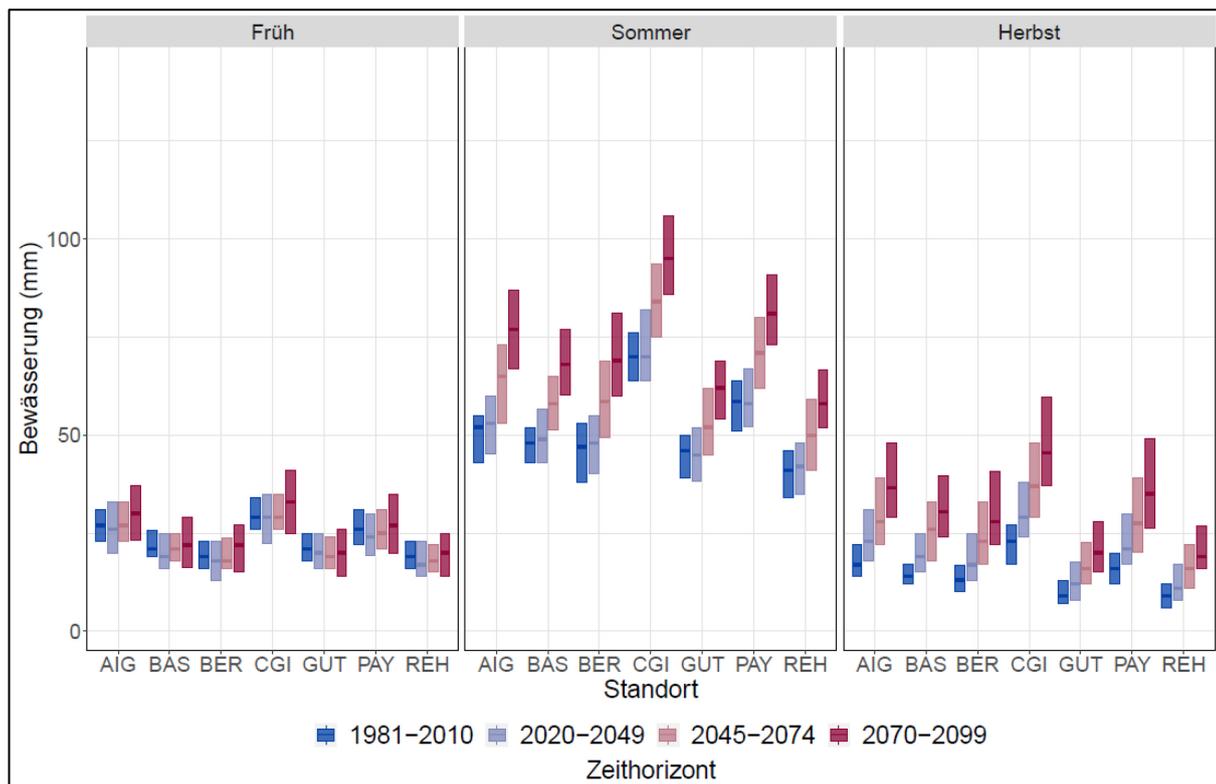


Abbildung 12: Boxplot der jährlichen Bewässerungsmengen für Eisbergsalat über allen Modellketten des Emissionspfades RCP8.5 und Böden. Die Boxen sind durch das erste bzw. dritte Quartil begrenzt. Die fette Linie gibt den Median an

Tabelle 5: Jährliche Bewässerungsmengen in Millimeter für Eisbergsalat gemittelt über die entsprechenden Zeithorizonte, über die Modellketten der jeweiligen Emissionspfade und über alle Böden. Die Zahl in Klammern bezeichnet die Standardabweichung.

Emissionspfad	Standort	1981-2010	2020-2049	2045-2074	2070-2099
RCP2.6	Aigle (AIG)	100 (18)	108 (21)	108 (19)	110 (18)
	Basel (BAS)	89 (14)	95 (16)	97 (15)	102 (17)
	Bern (BER)	83 (18)	92 (21)	92 (18)	95 (17)
	Changins (CGI)	127 (18)	138 (25)	140 (20)	143 (21)
	Güttingen (GUT)	83 (13)	87 (15)	87 (17)	93 (20)
	Payerne (PAY)	106 (18)	115 (23)	116 (19)	120 (19)
	Reckenholz (REH)	72 (14)	79 (15)	79 (16)	84 (18)
RCP8.5	Aigle (AIG)	96 (18)	104 (20)	125 (25)	150 (33)
	Basel (BAS)	86 (14)	91 (18)	107 (19)	126 (27)
	Bern (BER)	80 (17)	87 (20)	105 (24)	127 (32)
	Changins (CGI)	123 (19)	133 (22)	155 (26)	181 (35)
	Güttingen (GUT)	78 (14)	80 (18)	92 (19)	106 (25)
	Payerne (PAY)	102 (18)	109 (21)	129 (25)	151 (34)
	Reckenholz (REH)	70 (15)	73 (16)	87 (18)	103 (23)

Abbildung 13 zeigt die bereits besprochenen Tendenzen für die jeweiligen Monate. Die bewässerungsintensivsten Monate der jeweiligen Anbauperioden sind April, Juli und September. Die frühe Anbauperiode erfährt praktisch keine Änderung bezüglich der Bewässerungsmenge für beide Emissionspfade und folgt auch bezüglich der monatlichen Verteilung der Bewässerung des Referenzzeitraums. Die grösste Änderung ist wieder in den bewässerungsintensivsten Monaten der zweiten und dritten Anbauperiode zu beobachten. Die Anbauperiode im Herbst mit RCP8.5 scheint bereits in der nahen Zukunft eine Änderung der Bewässerungsmenge zu spüren, während die Anbauperiode

im Sommer noch keine Änderung erfährt. In Tabelle 5 ist wieder zu sehen, dass in absoluten Zahlen die Änderung in der Bewässerungsmenge vom Referenzzeitraum bis zum Ende des Jahrhunderts mit RCP8.5 für Aigle, Changins und Payerne am grössten ist.

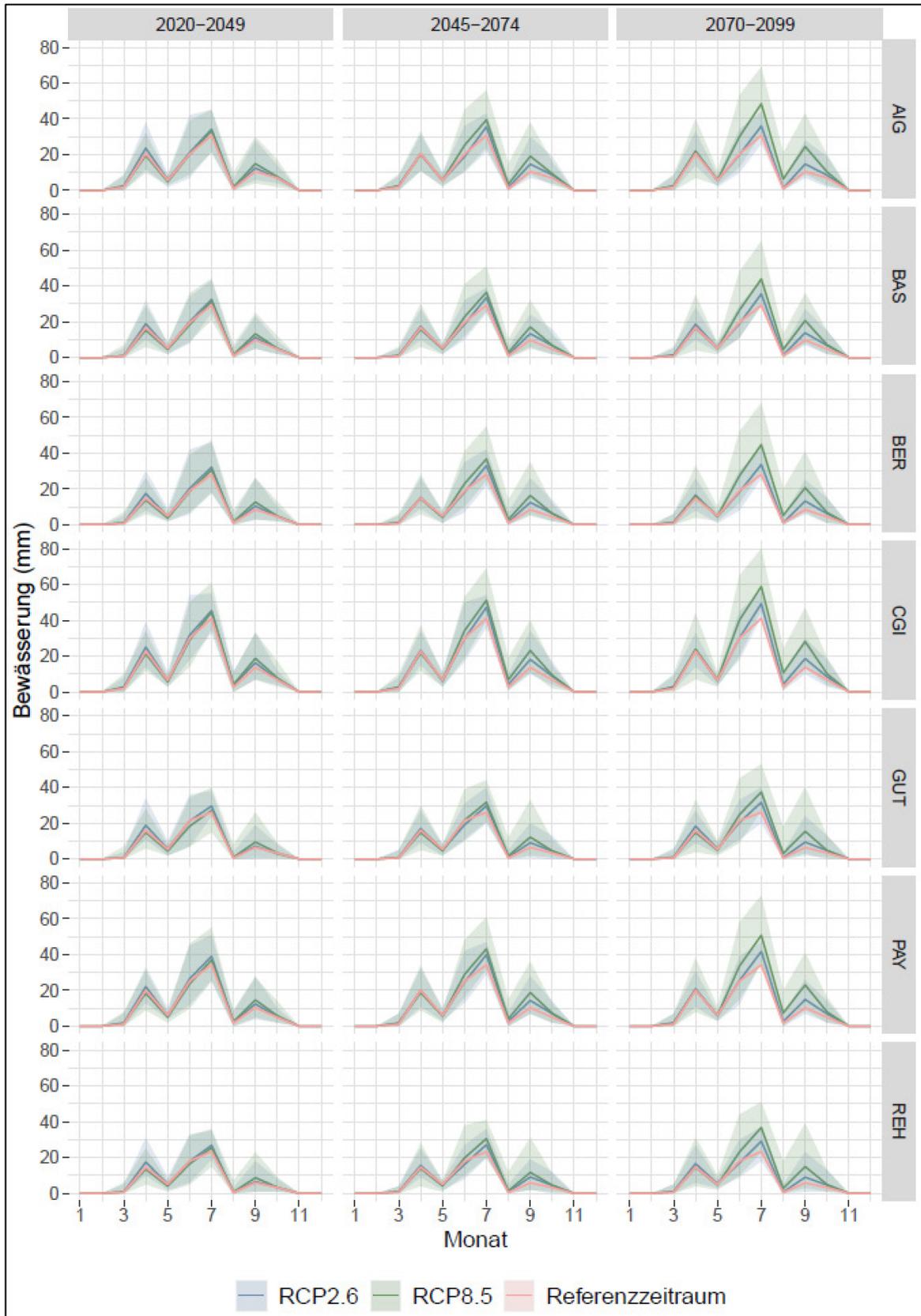


Abbildung 13: Die Linie bezeichnet die monatliche Bewässerungsmenge für Eisbergsalat gemittelt über alle Modellketten und Böden. Die Fläche zeigt das maximale Intervall der modellierten Bewässerungsmenge.

Abbildung 14 zeigt die Resultate der Varianzanalyse. Bei der frühen Anbauperiode spielt der Emissionspfad erst am Ende des Jahrhunderts eine kleine Rolle, dies deckt sich mit oben beschriebenen Beobachtungen. Im Sommer spielt der Standort eine etwas grössere Rolle zur Erklärung der Varianz in den vorhergesagten Änderungen der Bewässerungsbedürfnisse; insgesamt spielen sowohl Standort (Klima) also auch Bodenunterschiede eine untergeordnete Rolle in der Erklärung der Unterschiede zwischen den projizierten Änderungen. Der Emissionspfad spielt ab der mittleren Zukunft eine immer bedeutendere Rolle (in der letzten Anbauperiode bereits in der nahen Zukunft).

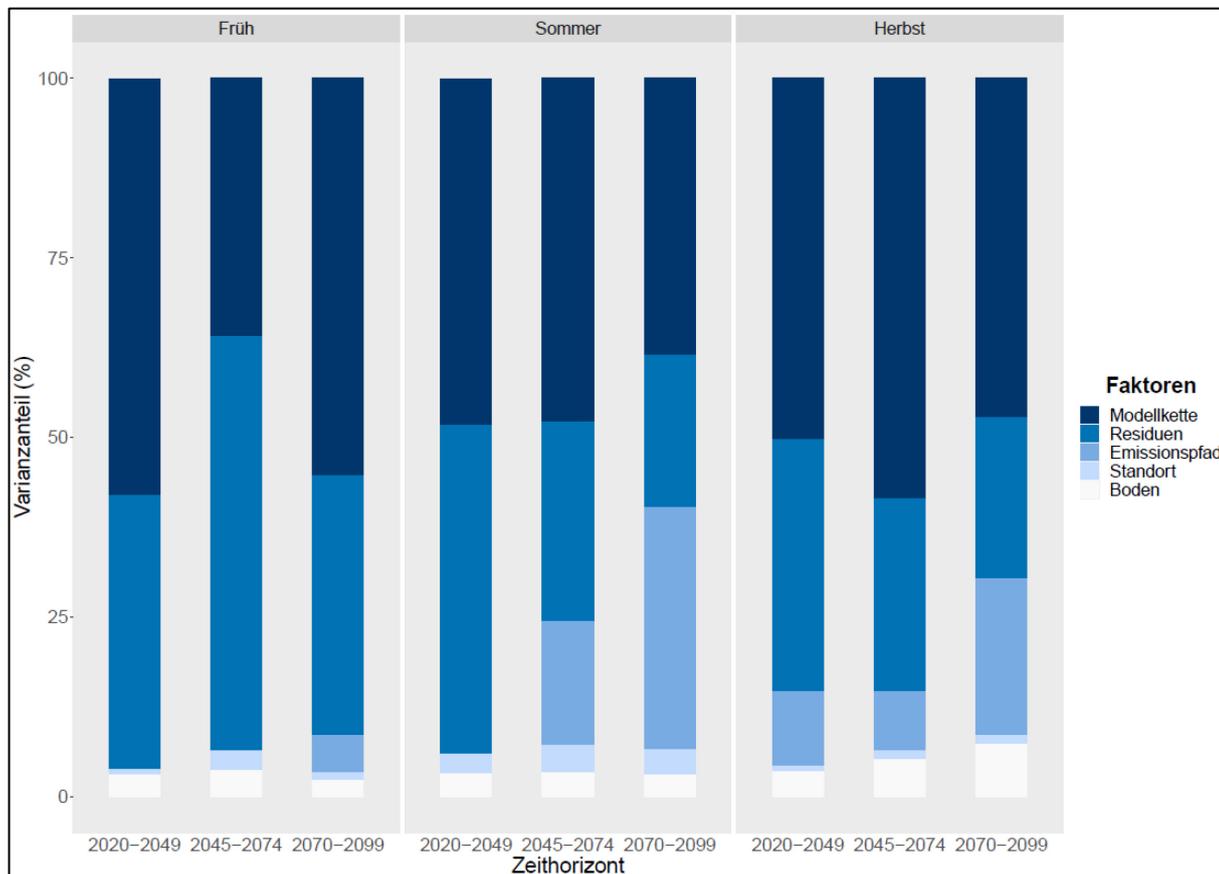


Abbildung 14: Balkendiagramm mit den Resultaten der Anova-Analyse der prozentualen Veränderung der Bewässerung für Eisbergsalat bezüglich dem Referenzzeitraum

3.3 Grasland

Abbildung 15 und Tabelle 6 zeigen den projizierten Bewässerungsbedarf von Raigras für beide Emissionspfade. Auch hier ändert sich der Bewässerungsbedarf mit RCP2.6 kaum, steigt aber mit RCP8.5 bis zum Ende des Jahrhunderts deutlich an. Raigras folgt in Güttingen und Reckenholz der Entwicklung, welche für Kartoffeln schon beobachtet wurde. Tabelle 6 zeigt, dass auch für Raigras an den Standorten Aigle, Changins und Payerne die grösste absolute Änderung in der Bewässerungsmenge über das Jahrhundert mit RCP8.5 vorhergesagt wird. Die Unsicherheiten der projizierten Bewässerungsbedürfnisse für Raigras sind aber grösser, als die für Eisbergsalat oder Kartoffeln. In Abbildung 16 sieht man, dass sich der Bewässerungsverlauf für Raigras während des Referenzzeitraums von den vorherigen Kulturen unterscheidet. Der «Knick» im Juni lässt sich dabei auf die verlängerte Dauer der ersten Wachstumsphase nach dem ersten Schnitt zurückführen. GDD und LAI steigen noch nicht so schnell wie im Hochsommer und dies verlängert die erste Wachstumsphase. Der Bewässerungsbedarf ist in der Phase tiefer wegen des niedrigen $K_{c,in}$. Der monatliche Verlauf des Bewässerungsbedarfs mit RCP2.6 ändert sich im Verlauf des Jahrhunderts nur leicht. Der Emissionspfad RCP8.5 beginnt ab Mitte des Jahrhunderts stark vom Referenzzeitraum abzuweichen. Wie bei Eisbergsalat beobachtet, nimmt vor allem der Bewässerungsbedarf im Sommer zu, dieser Unterschied wird gegen das Ende des Jahrhunderts grösser.

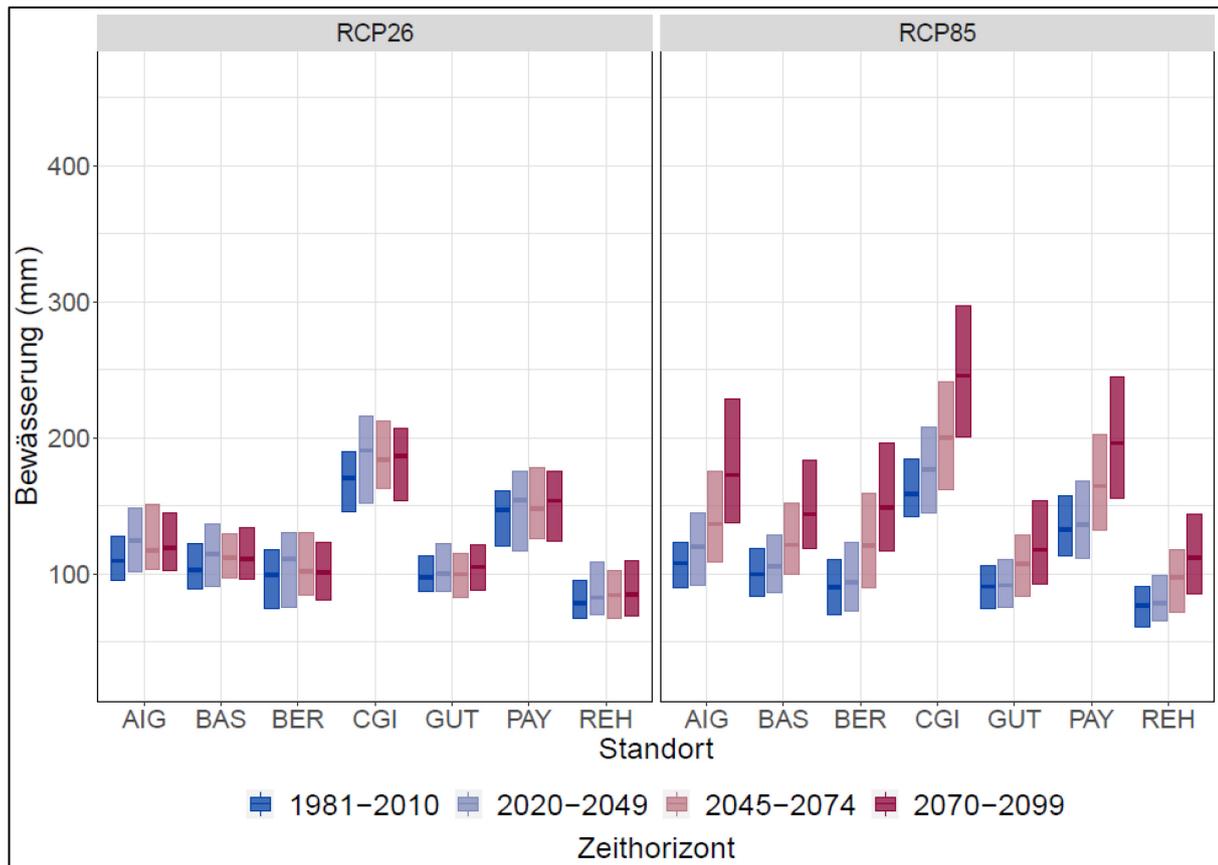


Abbildung 15: Boxplot der jährlichen Bewässerungsmengen für Raigras über allen Modellketten und Böden. Die Boxen sind durch das erste bzw. dritte Quartil begrenzt. Die fette Linie gibt den Median an.

Tabelle 6: Jährliche Bewässerungsmengen in Millimeter für Raigras gemittelt über die entsprechenden Zeithorizonte, über die Modellketten der jeweiligen Emissionspfade und über alle Böden. Die Zahl in Klammern bezeichnet die Standardabweichung.

Emissionspfad	Standort	1981-2010	2020-2049	2045-2074	2070-2099
RCP2.6	Aigle (AIG)	114 (26)	129 (37)	127 (34)	125 (32)
	Basel (BAS)	108 (28)	117 (32)	116 (30)	117 (30)
	Bern (BER)	99 (29)	109 (38)	108 (32)	105 (31)
	Changins (CGI)	173 (33)	191 (48)	190 (40)	187 (39)
	Güttingen (GUT)	102 (23)	108 (27)	101 (29)	107 (28)
	Payerne (PAY)	144 (30)	155 (44)	154 (36)	156 (37)
	Reckenholz (REH)	84 (23)	91 (27)	89 (28)	91 (29)
RCP8.5	Aigle (AIG)	108 (29)	122 (37)	146 (47)	185 (62)
	Basel (BAS)	105 (27)	111 (33)	128 (38)	153 (49)
	Bern (BER)	92 (30)	100 (36)	128 (45)	159 (58)
	Changins (CGI)	163 (32)	180 (43)	208 (54)	252 (69)
	Güttingen (GUT)	93 (27)	95 (30)	112 (35)	128 (45)
	Payerne (PAY)	136 (31)	143 (40)	169 (48)	205 (63)
	Reckenholz (REH)	79 (24)	84 (28)	100 (33)	120 (43)

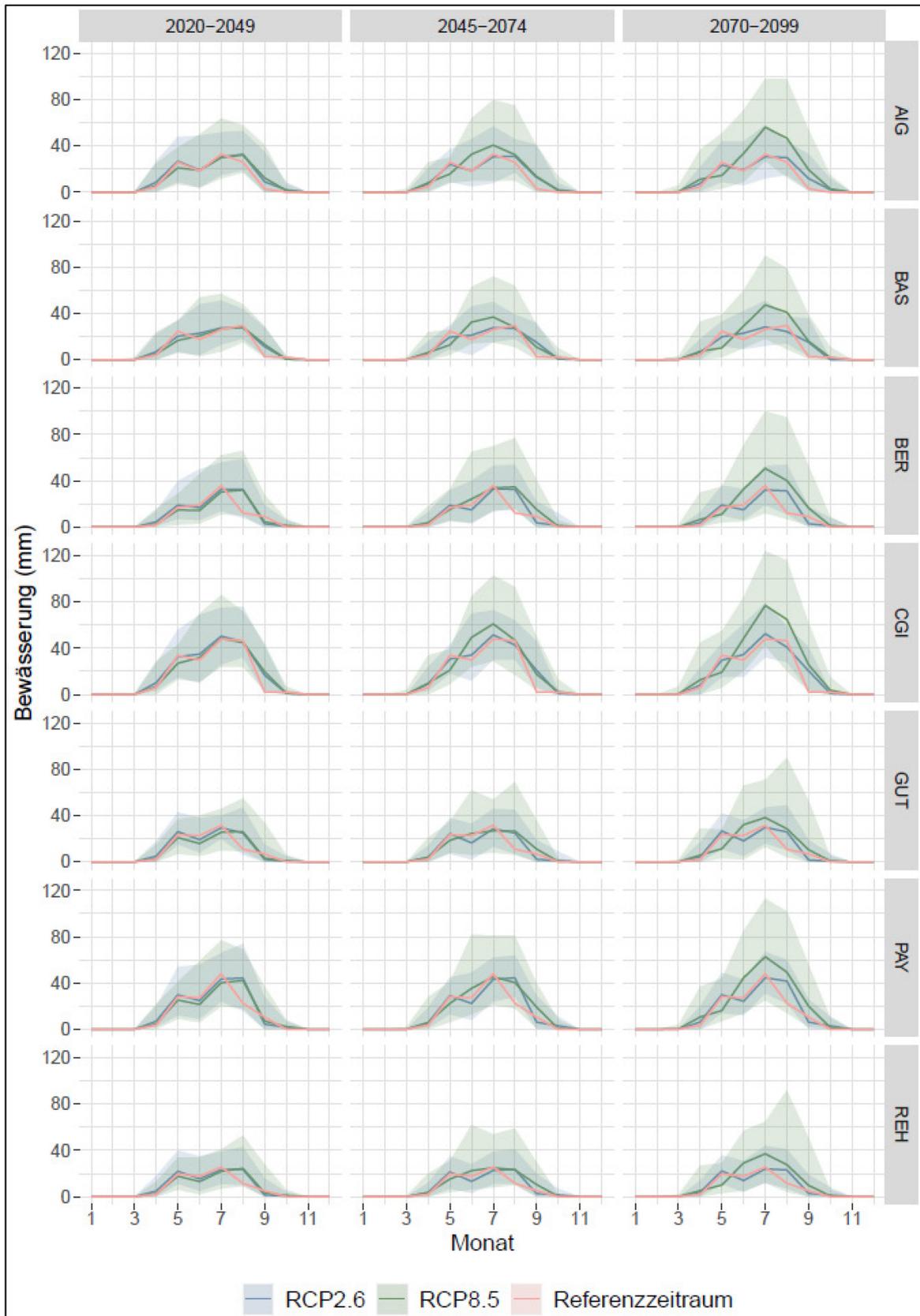


Abbildung 16: Die Linie bezeichnet die monatliche Bewässerungsmenge für Raigras gemittelt über alle Modellketten und Böden. Die Fläche zeigt das maximale Intervall der modellierten Bewässerungsmenge.

Abbildung 17 zeigt eine ähnliche Verteilung der Varianzquellen, wie in Abbildung 10 für Kartoffel. Der Anteil der Variabilität in vorhergesagten Änderungen erklärt durch die Emissionspfade steigt im Verlauf des Jahrhunderts. Standort und Boden spielen eine vergleichsweise kleine Rolle bei der Erklärung der Varianz in den vorhergesagten Änderungen der Bewässerungsbedürfnisse für Raigras.

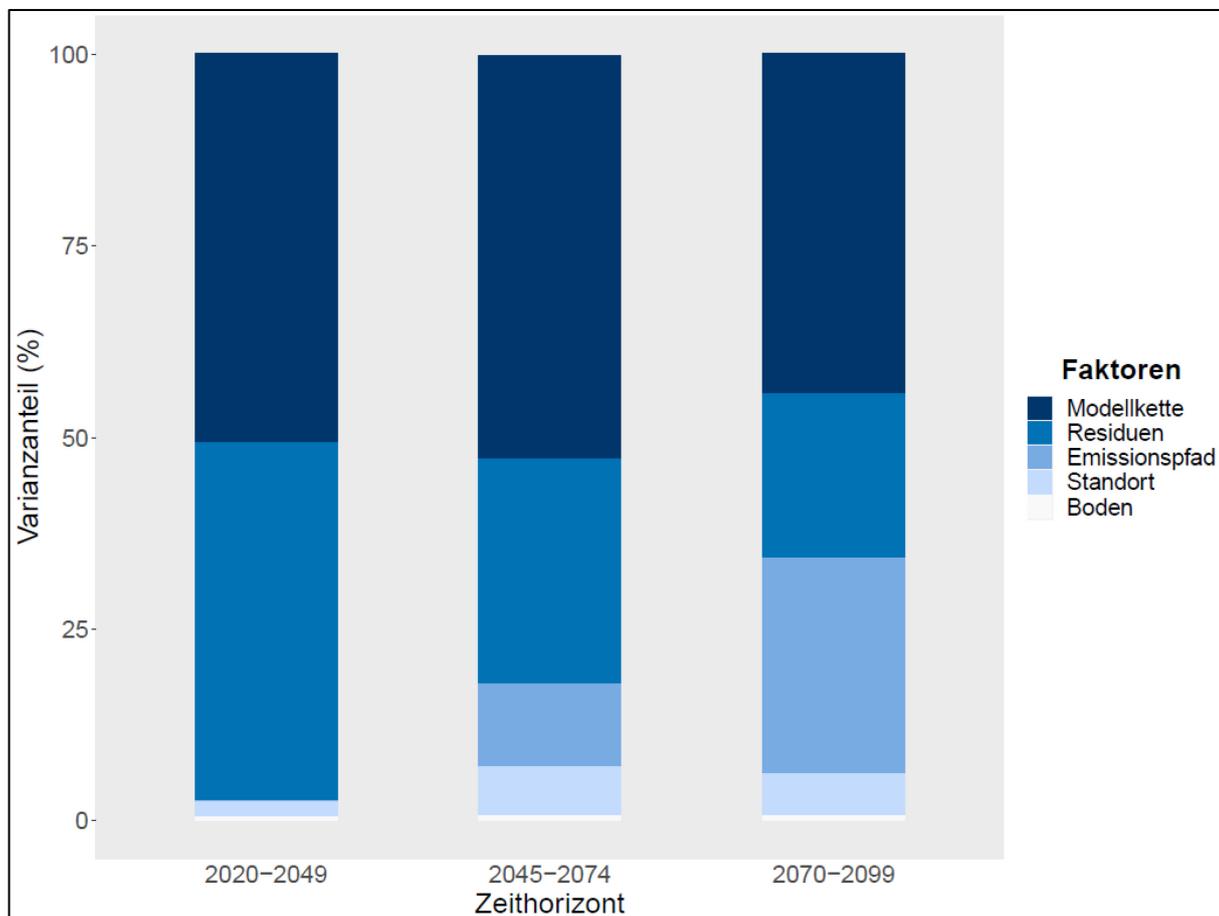


Abbildung 17: Balkendiagramm mit den Resultaten der ANOVA-Analyse der prozentualen Veränderung der Bewässerung für Raigras im Vergleich zum Referenzzeitraum

Abbildung 18 zeigt, wie sich die Anzahl Schnitzzyklen je nach Emissionspfad und Standort über das Jahrhundert verändert. Mit RCP2.6 gewinnen die Standorte Aigle, Payerne und Reckenholz bis zum Ende des Jahrhunderts einen zusätzlichen Schnitzzyklus, also eine zusätzliche Ernte dazu. Mit RCP8.5 kann zum Ende des Jahrhunderts an jedem Standort mit fünf Ernten gerechnet werden, statt mit drei bzw. vier im Referenzzeitraum. Die höheren Temperaturen ermöglichen potentiell höhere Graslanderträge, was wiederum mehr Wasser verbraucht. Nicht mitberücksichtigt ist der Effekt von zu heissen Temperaturen, bei denen das Graswachstum stoppt.

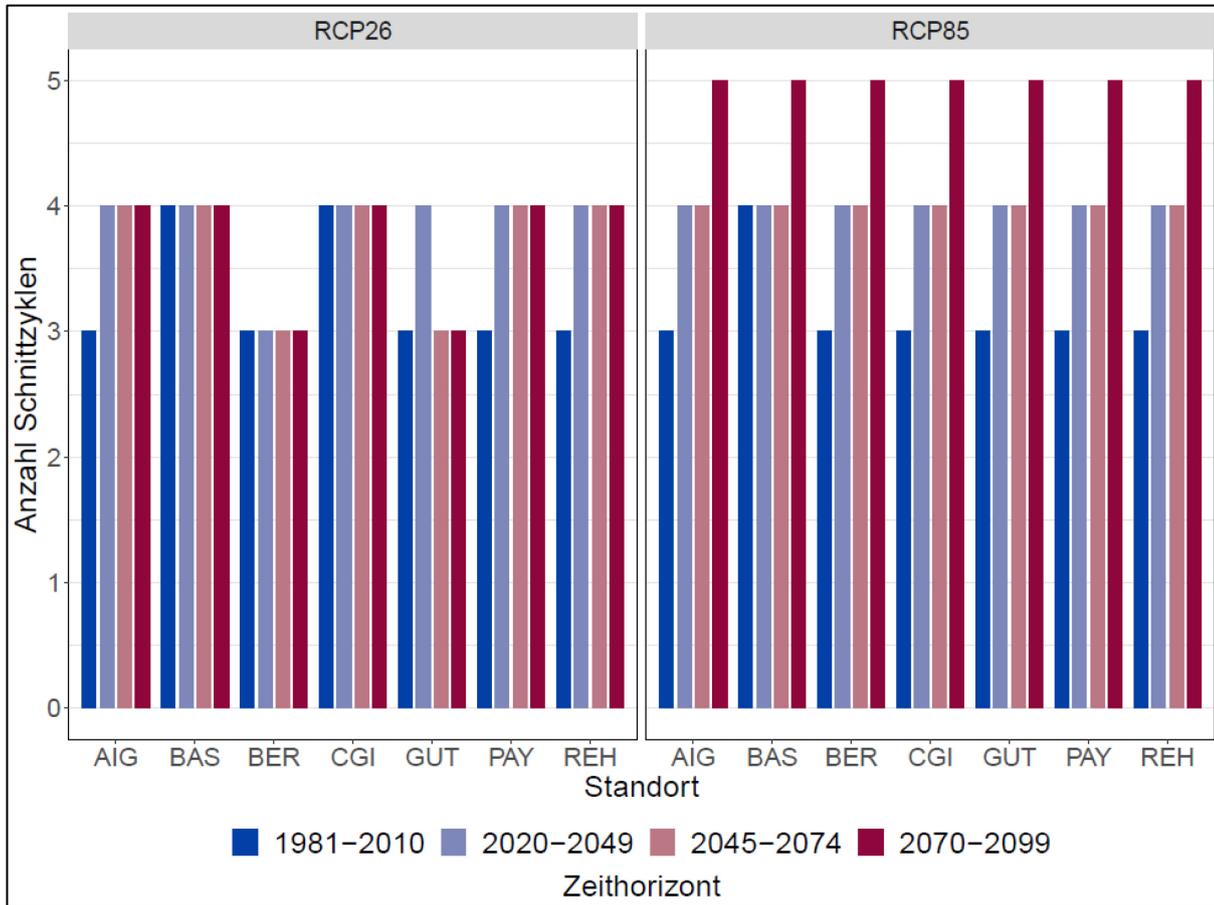


Abbildung 18: Balkendiagramm mit der Entwicklung der Anzahl Schnitzzyklen für Raigras für alle Standorte.

4 Diskussion und Ausblick

Die Ergebnisse dieser Studie legen nahe, dass der Bewässerungsbedarf mit fortschreitendem Klimawandel weiter zunimmt. In absoluten Zahlen steigt der geschätzte Bewässerungsbedarf für Payerne, Changins und Aigle am stärksten an. Für Güttingen und Reckenholz wird eine weniger starke Zunahme des Bewässerungsbedarfs geschätzt. Die prozentualen Änderungen der Bewässerungsbedürfnisse unterscheiden sich zwischen den Standorten im Mittelland und je nach Bodenarten nur wenig. Auch zwischen den untersuchten Kulturarten wurden keine sehr grossen Unterschiede in Bezug auf die Änderungssignale festgestellt: bis zum Zeithorizont 2045-2074 wird mit RCP8.5-Projektionen (ohne Klimaschutz) für Kartoffel eine Zunahme des Bewässerungsbedarfs von im Mittel 21% projiziert, für Eisbergsalat im Mittel 20% und Raigras im Mittel 22%. Bis zum Ende des Jahrhunderts (2070-2099) wären gemäss den Projektionen Zunahmen von 33% (Kartoffel und Eisbergsalat) bzw. 35% (Raigras) zu erwarten. Diese Schätzwerte decken sich in etwa mit den Schätzwerten aus vorangegangenen Studien (Holzkämper et al. 2020, Cochand et al. 2021). Wie in Holzkämper (2020) gezeigt, kann der absolute Bewässerungsbedarf einer Kultur und auch die prozentuale Änderung je nach gewählter Sorte stark variieren. Solche Unterschiede wurden in der hier vorliegenden Studie nicht berücksichtigt. In der Modellannahme ist der Anbauzyklus jeder Kultur in Kalendertage fix festgelegt. Damit bleiben Variationen zwischen den Jahren aufgrund unterschiedlicher Wetterbedingungen (z.B. Aussaattermine und phänologische Entwicklung der Kulturen) unberücksichtigt, ebenso wie mögliche Änderungen in der Bewirtschaftung wie sie mit fortschreitendem Klimawandel zu erwarten wären. Insbesondere für die Projektionen ohne Klimaschutz (RCP8.5) wäre es mit den erhöhten Temperaturen möglich, die Pflanz- und Erntetermine vorzuschieben. Bei früherer Aussaat und Ernte könnte die Zunahme des Bewässerungsbedarfs für Kulturen mit einmaliger Ernte wie Kartoffeln, Zuckermais, etc. stark reduziert werden. Allerdings zeigen sich zum Beispiel im Maisanbau aktuell Tendenzen hin zur Wahl immer später-reifender Sorten, mit denen unter wärmeren Bedingungen höhere Ertragspotentiale erzielt werden können. Wird eine solche Strategie langfristig beibehalten, könnten die Bewässerungsbedürfnisse noch deutlich mehr ansteigen, als in dieser Studie geschätzt (vgl. Holzkämper 2020).

Für Kulturen mit mehrmaliger Ernte wie Eisbergsalat könnten mit verlängerter Vegetationsperiode tendenziell mehr Anbauzyklen realisiert werden, wenn ausreichend Wasser für zusätzliche Bewässerung zur Verfügung steht. Die Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit einer möglichen Ausdehnung des Produktionszeitraums und damit einhergehender Intensivierung wäre noch zu prüfen. Für mehrjährige Kulturen wie Gräser und Obstbäume ist eine Zunahme im Bewässerungsbedarf nahezu unausweichlich. Gleichzeitig bietet die verlängerte Vegetationsperiode im Grünlandbau aber auch die Möglichkeit für eine Steigerung der Produktivität – ebenso wie im Ackerbau. Der Nutzen der eine möglichen Ertragssteigerung muss mit den ökonomischen und ökologischen Kosten der zusätzlichen Bewässerung abgeglichen werden.

Die hier operationalisierte Methode schafft eine wichtige Grundlage zur Abschätzung der Bewässerungsbedürfnisse für unterschiedliche Kulturen im Schweizer Mittelland unter aktuellen und zukünftigen klimatischen Bedingungen in Abhängigkeit von wichtigen Bodenparametern. Sie kann als Grundlage für die Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungs-Tools für Landwirte, Bewässerungsgenossenschaften und Behörden dienen. Ein solches Werkzeug könnte in Zukunft zum Beispiel in der Planung von Bewässerungsinfrastrukturprojekten Einsatz finden, wo es eine weitsichtigere Planung ermöglichen würde. Damit würden Risiken möglicher Fehlinvestitionen und Risiken entstehender oder sich verschärfender Wassernutzungskonflikte reduziert.

Für die Weiterentwicklung der hier operationalisierten Methode empfehlen wir genauere Validierungen und nötigenfalls Anpassungen der kulturspezifischen Parameter, sowie Abgleiche der geschätzten Bewässerungsmengen mit realen Bewässerungsinformationen in Abhängigkeit von unterschiedlichen Klima- und Bodenbedingungen. Zur Modellverbesserung kann in Zukunft geprüft werden, ob und in wieweit eine dynamische Betrachtung der phänologischen Entwicklung zu einer Erhöhung der Modellgenauigkeit beitragen kann.

5 Literaturverzeichnis

- Agrometeo. (kein Datum). (Agroscope) Abgerufen am 13. Juli 2020 von <http://www.agrometeo.ch/de/arboriculture/phenology/years/37/1/8#arbo-pheno-varieties-links>
- Agrometeo. (kein Datum). (Agroscope) Abgerufen am 13. Juli 2020 von <http://www.agrometeo.ch/de/arboriculture/phenology/years/6/6/25#arbo-pheno-varieties-links>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rom.
- Ammann, C., Flechard, C., Leifeld, J., Neftel, A., & Fuhrer, J. (2007). The carbon budget of newly established temperate grassland depends on management intensity. *Agriculture, Ecosystems & Environment* (121), S. 5-20.
- Bassin, S., Calanca, P., Weidinger, T., Gerosa, G., & Fuhrer, J. (2004). Modeling seasonal ozone fluxes to grassland and wheat: model improvement, testing, and application. *Atmospheric Environment* (38), S. 2349-2359. doi:10.1016/j.atmosenv.2003.11.044
- BBZ Arenenberg. (kein Datum). Kulturblatt Kopfkohlarten Weisskabis, Rotkabis und Wirz. Kulturblatt, Salenstein.
- BBZ Arenenberg. (kein Datum). Kulturblatt Sellerie. Kulturblatt, Salenstein.
- BLW 2019: Agrarbericht 2019. Abgerufen am 3. August 2020 von <https://www.agrarbericht.ch/de/politik/strukturverbesserungen-und-soziale-begleitmassnahmen/bewaesserungsprojekt-furttal>
- Bregy, G., Baroffino, C., Ançay, A., Rebeaud, S. G., Häseli, A., Carlen, C., & Kopp, M. (2017). Handbuch Beeren. (S. Obstverband, & Agroscope, Hrsg.) Zug.
- Bundesamt für Statistik. (2010). Landwirtschaftliche Betriebszählung.
- Clapp, R. B., & Hornberger, G. M. (1978). Empirical Equations for Some Soil Hydraulic Properties. Department of Environmental Sciences, University of Virginia. Charlottesville: WATER RESOURCES RESEARCH.
- Cochand, F., P. Brunner, D. Hunkeler, O. Rössler and A. Holzkämper (2021). "Cross-sphere modelling to evaluate impacts of climate and land management changes on groundwater resources." *Science of The Total Environment* 798: 148759.
- Freiburghaus, M. (Dezember 2009). Wasserbedarf der Schweizer Wirtschaft. (S. V.-u. Wasserfaches, Hrsg.) *Aqua & Gas*, S. 1001-1009.
- Geyer, M., Jaksch, T., Katroschan, K.-U., Koch, I., Kreiselmaier, J., Laber, H., . . . Ziegler, J. (2020). *Gemüsebau* (3. Ausg.). Stuttgart: Eugen Ulmer.
- Holzkämper, A. (2020). "Varietal adaptations matter for agricultural water use – a simulation study on grain maize in Western Switzerland." *Agricultural Water Management* 237: 106202.
- Holzkämper, A., F. Cochand, O. Rössler, P. Brunner and D. Hunkeler (2020). *AgriAdapt – Modellgestützte Untersuchung der Einflüsse von Klima- und Landnutzungsänderungen auf Grundwasserressourcen im Berner Seeland*. BAFU. Bern, BAFU: 39.
- Lanz, K. (2015). *Das Wasser im Engadin – Ökologie, Nutzung, Konflikte*. International Water Affairs, Evillard.
- National Centre for Climate Services. (2018). *CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland*, Technical Report. Zürich.
- National Centre for Climate Services. (2018). <https://www.nccs.admin.ch/>. Abgerufen am 9. Juli 2020 von <https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/klimawandel-und-auswirkungen/grundlagen-zum-klima/was-sind-emissionsszenarien-.html>; <https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/klimawandel-und-auswirkungen/schweizer-klimaszenarien/klimaszenarien-verstehen.html>; <https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/materialien-und-daten/daten/ch2018-webatlas.html>.
- Rayczak, J., Kotlarski, S., & Schär, C. (2016). Does Quantile Mapping of Simulated Precipitation Correct for Biases in Transition Probabilities and Spell Lengths? *Journal of Climate* (29), S. 1605-1615. doi:10.1175/JCLI-D-15-0162.1

- Schweizer Zucker AG. (kein Datum). Zucker. (Schweizer Zucker AG) Abgerufen am 13. Juli 2020 von <https://www.zucker.ch/natuerlich-nachhaltig/ruebenanbau/>
- Smith, P. C., Calanca, P., & Fuhrer, J. (2012). A Simple Scheme for Modeling Irrigation Water Requirements at the Regional Scale Applied to an Alpine River Catchment. *Water* (4), S. 869-886. doi:10.3390/w4040869
- Smith, P., Heinrich, G., Suklitsch, M., Gobiet, A., Stoffel, M., & Fuhrer, J. (2014). Station-scale bias correction and uncertainty analysis for the estimation of irrigation water requirements in the Swiss Rhone catchment under climate change. *Climatic Change* (127), S. 521-534. doi:10.1007/s10584-014-1263-4
- Theiler, R., Buser, H., & Vidalli, O. (2004). Zwiebeln (*Allium cepa* L.) Sorten, Anbau, Lagerung. *Agrarforschung* (11), S. 504-509.
- Tratschin, R., Dübendorfer, C., & Ritscher, A. (2019). Trockenheit im Sommer und Herbst 2018. EBP.
- Vuffray, Z., Deléglise, C., Schori, F., Glauser, W., Calanca, P., Meisser, M., . . . Mosimann, E. (2017). Typologie der Produktion von Weiden. *Agrarforschung Schweiz* (8), S. 428-437.
- Weber, M., & Schild, A. (2007). Stand der Bewässerung in der Schweiz. Bundesamt für Landwirtschaft, Bern.
- Yip, S., Ferro, C.A.T., Stephenson, D.B., Hawkins, E., 2011. A simple, coherent framework for partitioning uncertainty in climate predictions. *Journal of Climate* 24, 4634–4643.

Anhang

1 Klimaszenarien

Tabelle A1: Bezeichnung der verwendeten Modellketten nach Emissionspfad geordnet (National Centre for Climate Services, 2018).

RCP2.6	RCP8.5
DMI-HIRHAM_ECEARTH_EUR11_RCP26	CLMCOM-CCLM4_ECEARTH_EUR11_RCP85
KNMI-RACMO_HADGEM_EUR44_RCP26	CLMCOM-CCLM4_HADGEM_EUR11_RCP85
MPICSC-REMO1_MPIESM_EUR11_RCP26	CLMCOM-CCLM4_HADGEM_EUR44_RCP85
MPICSC-REMO1_MPIESM_EUR44_RCP26	CLMCOM-CCLM4_MPIESM_EUR11_RCP85
MPICSC-REMO2_MPIESM_EUR11_RCP26	CLMCOM-CCLM4_MPIESM_EUR44_RCP85
MPICSC-REMO2_MPIESM_EUR44_RCP26	CLMCOM-CCLM5_ECEARTH_EUR44_RCP85
SMHI-RCA_ECEARTH_EUR11_RCP26	CLMCOM-CCLM5_HADGEM_EUR44_RCP85
SMHI-RCA_ECEARTH_EUR44_RCP26	CLMCOM-CCLM5_MIROC_EUR44_RCP85
SMHI-RCA_HADGEM_EUR44_RCP26	CLMCOM-CCLM5_MPIESM_EUR44_RCP85
SMHI-RCA_MIROC_EUR44_RCP26	DMI-HIRHAM_ECEARTH_EUR11_RCP85
SMHI-RCA_MPIESM_EUR44_RCP26	DMI-HIRHAM_ECEARTH_EUR44_RCP85
SMHI-RCA_NORESM_EUR44_RCP26	KNMI-RACMO_ECEARTH_EUR44_RCP85
	KNMI-RACMO_HADGEM_EUR44_RCP85
	MPICSC-REMO1_MPIESM_EUR11_RCP85
	MPICSC-REMO1_MPIESM_EUR44_RCP85
	MPICSC-REMO2_MPIESM_EUR11_RCP85
	MPICSC-REMO2_MPIESM_EUR44_RCP85
	SMHI-RCA_NORESM_EUR44_RCP85
	SMHI-RCA_CCCMA_EUR44_RCP85
	SMHI-RCA_CSIRO_EUR44_RCP85
	SMHI-RCA_ECEARTH_EUR11_RCP85
	SMHI-RCA_ECEARTH_EUR44_RCP85
	SMHI-RCA_GFDL_EUR44_RCP85
	SMHI-RCA_HADGEM_EUR11_RCP85
	SMHI-RCA_HADGEM_EUR44_RCP85
	SMHI-RCA_IPSL_EUR11_RCP85
	SMHI-RCA_IPSL_EUR44_RCP85
	SMHI-RCA_MIROC_EUR44_RCP85
	SMHI-RCA_MPIESM_EUR11_RCP85
	SMHI-RCA_MPIESM_EUR44_RCP85

2 Kulturparameter Wachstumsperiode

Tabelle A2: Wachstumsparameter erklärt in Abschnitt 2.3.1. L-Werte approximiert basierend auf den in (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998) gegebenen Werten mit den Kulturzeiten aus den folgenden Quellen.

Kultur	Anbautyp	DP [Tag im Jahr]	DH [Tag im Jahr]	Lin [d]	Ldev [d]	Lmid [d]	Lend [d]	Quelle
Brokkoli	Früh	72/73	147/148	20	25	22	8	(Geyer, et al., 2020) & Reto Neuweiler, Agroscope, Gemüse Extension
	Sommer	125/126	186/187	15	20	18	7	
	Herbst	226/227	286/287	18	23	21	8	
Blumenkohl	Früh	72/73	147/148	19	28	22	6	
	Sommer	125/126	185/186	15	21	17	7	
	Herbst	226/227	291/292	19	27	21	8	
Rosenkohl	Sommer	110/111	245/246	28	31	48	28	
	Herbst	140/141	290/291	23	27	69	31	
	Winter	150/151	330/331	28	32	80	40	
Eisbergsalat	Früh	61/62	126/127	16	23	21	5	
	Sommer	155/156	200/201	12	18	9	6	
	Herbst	236/237	301/302	16	23	20	6	
Spinat	Sommer	77/78	192/193	23	35	46	11	
	Herbst	229/230	274/275	15	15	11	4	
	Überwintertend	290/291	115/116 (folgendes Jahr)	33	50	80	27	
Rettich	Früh	60/61	130/131	10	20	30	10	(Geyer, et al., 2020)
	Sommer	153/154	193/194	6	11	17	6	
	Herbst	226/227	301/302	11	21	32	11	
Erdbeeren	Frigo	157/158	137/138 (folgendes Jahr)	273	38	20	14	(Bregy, et al., 2017) & André Ançay, Agroscope, Gruppe Beeren und Medizinalpflanzen
	Topfpflanze	227/228	170/171 (folgendes Jahr)	203	55	30	20	
Weinreben	-	74/75	284/285	30	60	40	80	(Smith, Calanca, & Fuhrer, 2012)
Apfel (Gala)	-	64/65	249/250	18	62	79	26	(Agrometeo, kein Datum)
Aprikosen (Goldrich-Jumbo Cot)	-	77/78	197/198	11	40	51	18	(Agrometeo, kein Datum)

Tabelle A2 (fortgesetzt)

Kürbis	-	150/151	255/256	22	31	31	21	(Geyer, et al., 2020)
Zucchini	-	105/106	150/151	10	15	12	8	(Geyer, et al., 2020)
Knollensellerie	-	135/136	285/286	21	40	75	14	(BBZ Arenenberg)
Randen	-	125/126	255/256	28	46	37	19	(Geyer, et al., 2020)
Zuckerrübe	-	91/92	271/272	50	40	50	40	(Schweizer Zucker AG, kein Datum)
Lagerkarotten	-	166/167	286/287	24	32	48	16	(Geyer, et al., 2020)
Speisezwiebel	-	95/96	245/246	15	25	70	40	(Theiler, Buser, & Vidalli, 2004)
Körnermais	-	121/122	291/292	30	40	50	50	Pierluigi Calanca, Agroscope, Gruppe Klima und Landwirtschaft
Zuckermais	-	105/106	215/216	30	30	30	20	(Geyer, et al., 2020)
Lagerkabis	-	165/166	290/291	30	45	38	12	(BBZ Arenenberg)
Kartoffel	-	100/101	250/251	31	36	52	31	Theodor Ballmer Agroscope, Gruppe Sorten und Anbautechnik

 Tabelle A3: Kulturparameter erklärt in Abschnitt 2p.3.1. Gemittelte Werte aus (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998). K_c -Werte für Erdbeeren von André Ançay (Agroscope, Gruppe Beeren und Medizinalpflanzen).

Kultur	$K_{c,in}$	$K_{c,mid}(FAO)$	$K_{c,end}(FAO)$	$K_{c,ng}$	p_5	Zr [mm]	h_{max} [m]
Brokkoli	0.7	1.05	0.95	0.2	0.45	500	0.3
Blumenkohl	0.7	1.05	0.95	0.2	0.45	550	0.4
Rosenkohl	0.7	1.05	0.95	0.2	0.45	500	0.4
Eisbergsalat	0.7	1	0.95	0.2	0.3	400	0.3
Spinat	0.7	1	0.95	0.2	0.2	400	0.3
Rettich	0.7	0.9	0.85	0.2	0.3	400	0.3
Erdbeeren	0.5	0.7	0.6	0.2	0.2	250	0.2
Weinreben	0.3	0.7	0.45	0.2	0.45	1500	2
Apfel (Gala)	0.5	1.2	0.95	0.2	0.5	1500	4
Aprikosen (Goldrich-Jumbo Cot)	0.5	1.15	0.9	0.2	0.5	1500	3
Kürbis	0.5	1	0.8	0.2	0.35	1250	0.4
Zucchini	0.5	0.95	0.75	0.2	0.5	800	0.3
Knollensellerie	0.7	1.05	1	0.2	0.2	450	0.6
Randen	0.5	1.05	0.95	0.2	0.5	800	0.4
Zuckerrübe	0.35	1.2	0.7	0.2	0.55	950	0.5

Tabelle A3 (fortgesetzt)

Lagerkarotten	0.7	1.05	0.95	0.2	0.35	750	0.3
Speisezwiebel	0.7	1.05	0.75	0.2	0.3	450	0.4
Körnermais	0.3	1.2	0.35	0.2	0.55	1350	2
Zuckermais	0.3	1.15	1.05	0.2	0.5	1000	1.5
Lagerkabis	0.7	1.05	0.95	0.2	0.45	650	0.4
Kartoffel	0.5	1.15	0.75	0.2	0.35	500	0.6
Raigras	0.95	1.2	1.2	0.2	0.6	800	0.3
Klee	0.4	1.15	1.1	0.2	0.5	750	0.3
Weideland	0.95	0.95	0.85	0.2	0.6	1000	0.225

Tabelle A4: Wachstumsparameter für das Graslandmodell erklärt in Abschnitt 2.3.2. Die Werte für Raigras und Klee entstammen, ausser anders referenziert, aus (Bassin, Calanca, Weidinger, Gerosa, & Fuhrer, 2004) und die Werte für Weideland aus (Smith, Calanca, & Fuhrer, 2012).

Kultur	ED [Tag im Jahr]	DD [Tag im Jahr]	Tref [°C]	GDD0	LAImin	LAImax	LAIcut	β
Raigras (1. Wachstum)	75	318	5	116	0.5	4	3.987	0.017
Raigras (nach 1. Schnitt)	75	318	5	100	0.5	3	2.9	0.01
Klee (1. Wachstum)	75	318	5	116	0.5	4	3.987	0.017
Klee (nach 1. Schnitt)	75	318	5	100	0.5	3	2.9	0.01
Weideland	75	318	2.5	-	0.5	-	2.5	-

3 Weitere Resultate

3.1 Karotte

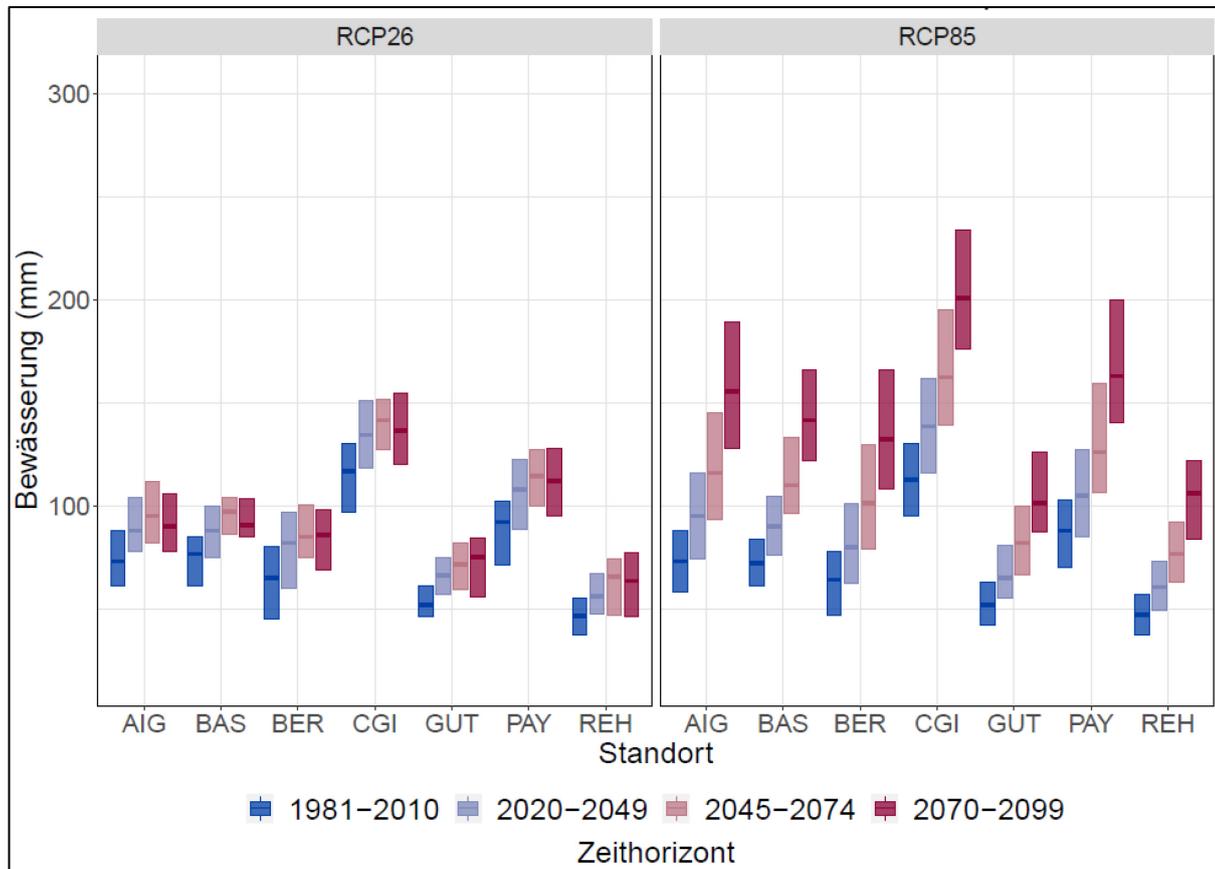


Abbildung A1: Boxplot der jährlichen Bewässerungsmengen für Karotten über allen Modellketten und Böden. Die Boxen sind durch das erste bzw. dritte Quartil begrenzt. Die fette Linie gibt den Median an.

Tabelle A5: Jährliche Bewässerungsmengen in Millimeter für Karotten gemittelt über die entsprechenden Zeithorizonte, über die Modellketten der jeweiligen Emissionspfade und über alle Böden. Die Zahl in Klammern bezeichnet die Standardabweichungen.

Emissionspfad	Standort	1981-2010	2020-2049	2045-2074	2070-2099
RCP2.6	Aigle (AIG)	75 (18)	92 (22)	97 (19)	93 (17)
	Basel (BAS)	75 (15)	89 (17)	96 (15)	93 (15)
	Bern (BER)	65 (20)	82 (24)	87 (19)	84 (20)
	Changins (CGI)	116 (20)	137 (28)	142 (21)	138 (23)
	Güttingen (GUT)	55 (13)	66 (16)	70 (19)	72 (21)
	Payerne (PAY)	90 (19)	108 (27)	115 (20)	112 (22)
	Reckenholz (REH)	47 (14)	58 (14)	63 (18)	62 (20)
RCP8.5	Aigle (AIG)	74 (19)	97 (26)	124 (37)	162 (43)
	Basel (BAS)	74 (15)	92 (21)	116 (27)	143 (34)
	Bern (BER)	64 (20)	84 (27)	109 (37)	142 (43)
	Changins (CGI)	114 (21)	140 (28)	168 (36)	204 (41)
	Güttingen (GUT)	53 (15)	69 (21)	86 (28)	110 (35)
	Payerne (PAY)	88 (20)	109 (27)	136 (36)	170 (42)
	Reckenholz (REH)	48 (14)	63 (19)	81 (26)	107 (35)

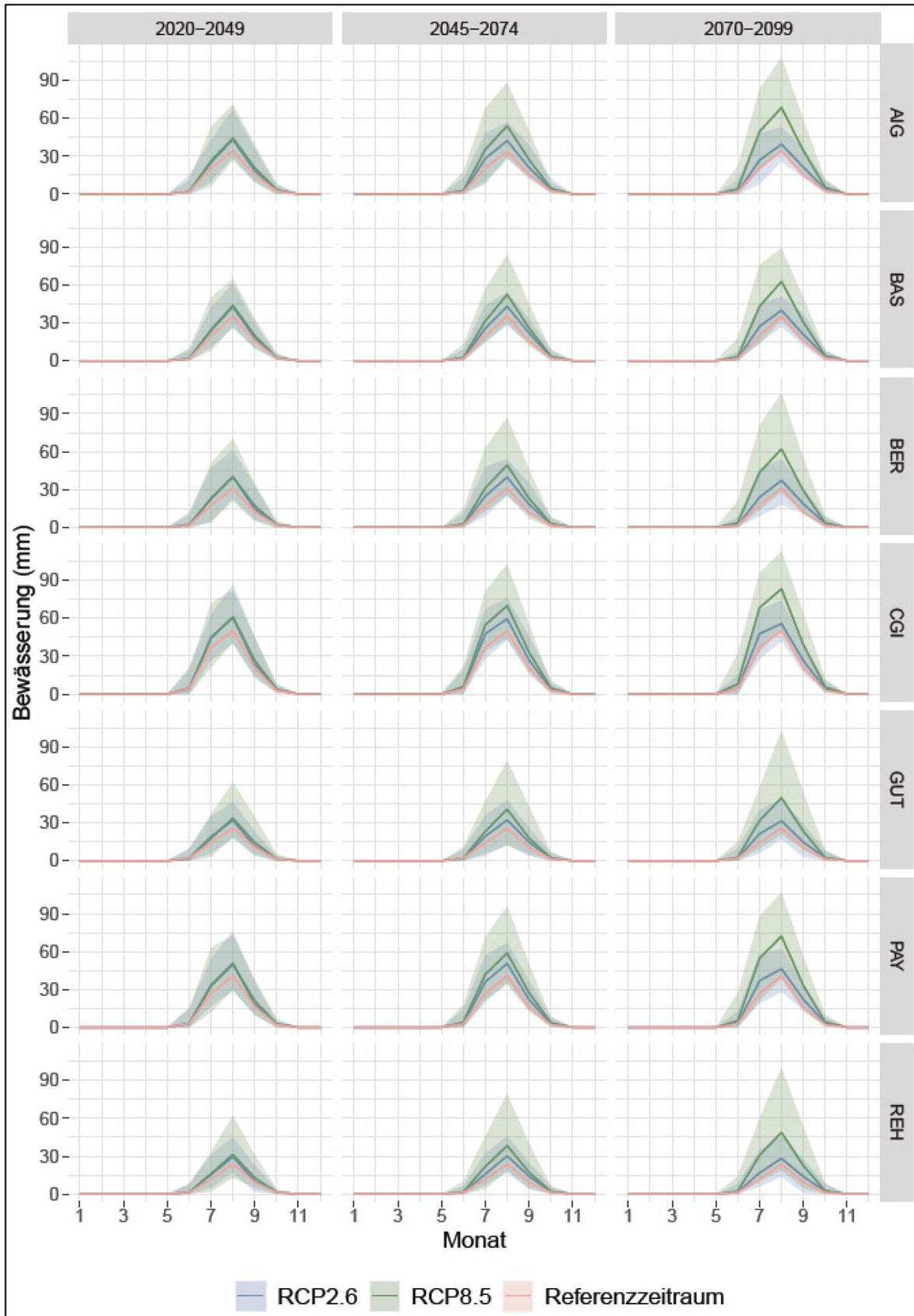


Abbildung A2: Die Linien bezeichnen die monatlichen Bewässerungsmengen für Karotten gemittelt über alle Modellketten und Böden. Die Fläche zeigt das maximale Intervall der modellierten Bewässerungsmenge.

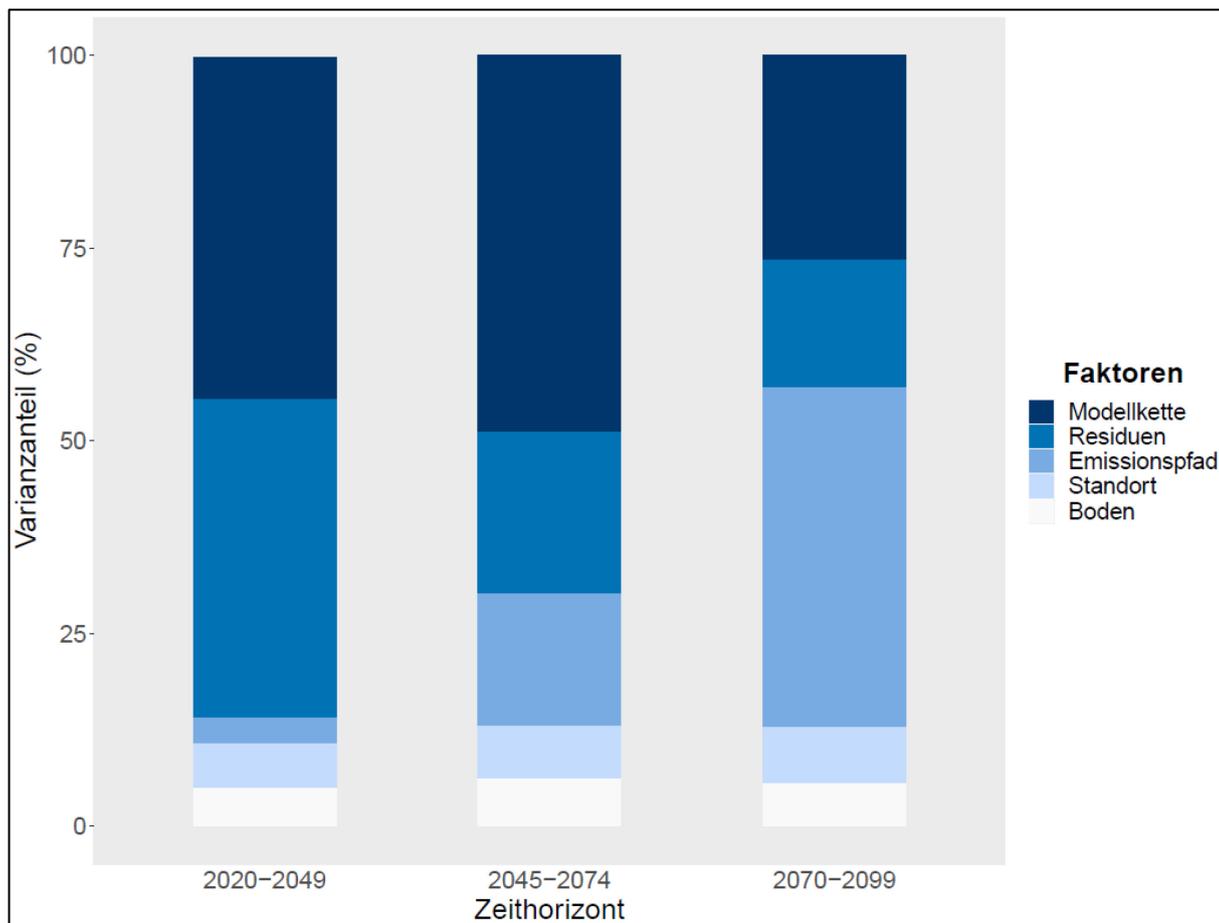


Abbildung A3: Balkendiagramm mit den Resultaten der Anova-Analyse der prozentualen Veränderung der Bewässerung für Karotten bezüglich dem Referenzzeitraum.

3.2 Zuckermais

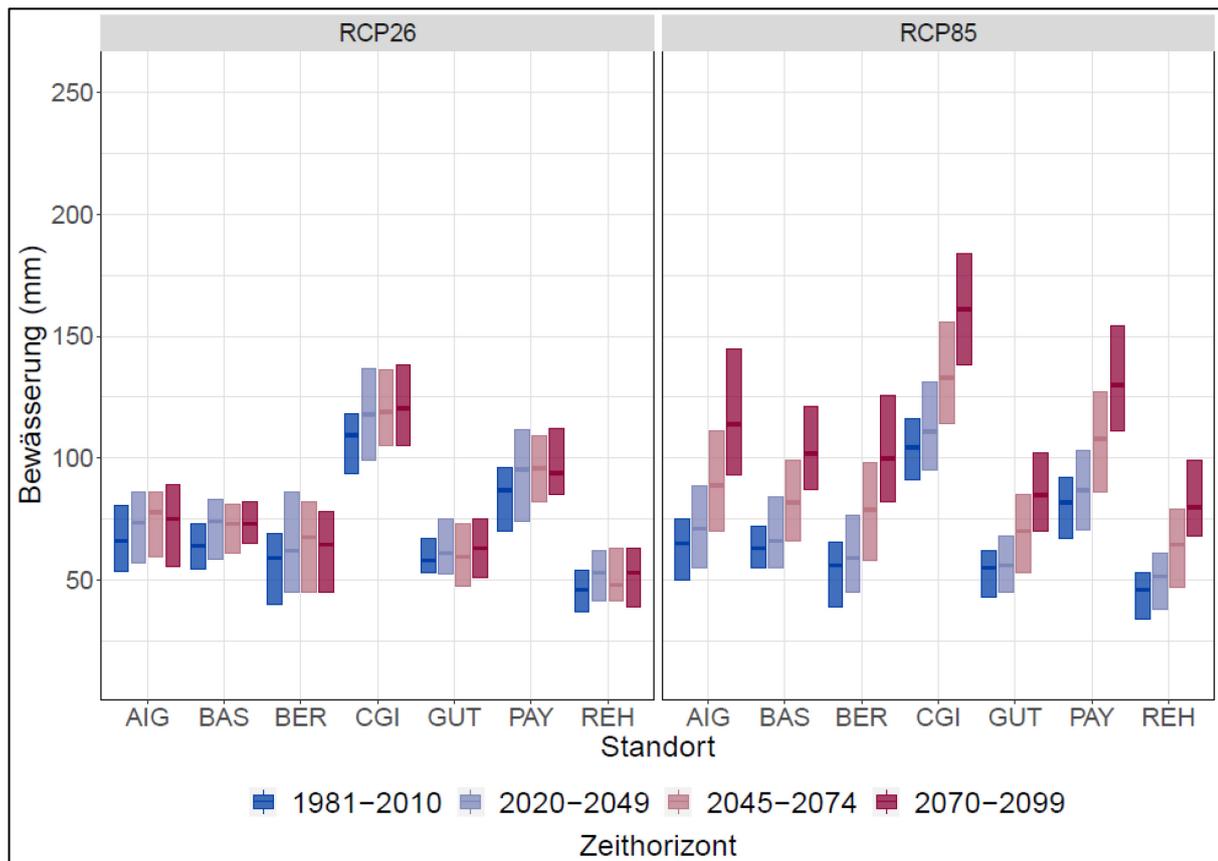


Abbildung A4: Boxplot der jährlichen Bewässerungsmengen für Zuckermais über allen Modellketten und Böden. Die Boxen sind durch das erste bzw. dritte Quartil begrenzt. Die fette Linie gibt den Median an.

Tabelle A6: Jährliche Bewässerungsmengen in Millimeter für Zuckermais gemittelt über die entsprechenden Zeithorizonte, über die Modellketten der jeweiligen Emissionspfade und über alle Böden. Die Zahl in Klammern bezeichnet die Standardabweichung.

Emissionspfad	Standort	1981-2010	2020-2049	2045-2074	2070-2099
RCP2.6	Aigle (AIG)	67 (18)	74 (20)	74 (19)	73 (21)
	Basel (BAS)	65 (13)	72 (17)	72 (14)	74 (15)
	Bern (BER)	57 (20)	66 (24)	66 (21)	64 (20)
	Changins (CGI)	108 (17)	121 (25)	121 (21)	121 (21)
	Güttingen (GUT)	61 (12)	63 (15)	61 (16)	64 (17)
	Payerne (PAY)	86 (18)	96 (23)	96 (20)	97 (20)
	Reckenholz (REH)	47 (12)	53 (15)	52 (14)	53 (16)
RCP8.5	Aigle (AIG)	64 (18)	72 (23)	92 (26)	120 (33)
	Basel (BAS)	64 (13)	68 (20)	84 (21)	106 (29)
	Bern (BER)	55 (18)	62 (23)	81 (27)	106 (33)
	Changins (CGI)	105 (18)	115 (26)	137 (29)	164 (34)
	Güttingen (GUT)	54 (15)	57 (18)	71 (21)	88 (24)
	Payerne (PAY)	82 (18)	90 (25)	109 (28)	135 (34)
	Reckenholz (REH)	45 (13)	51 (17)	64 (20)	84 (22)

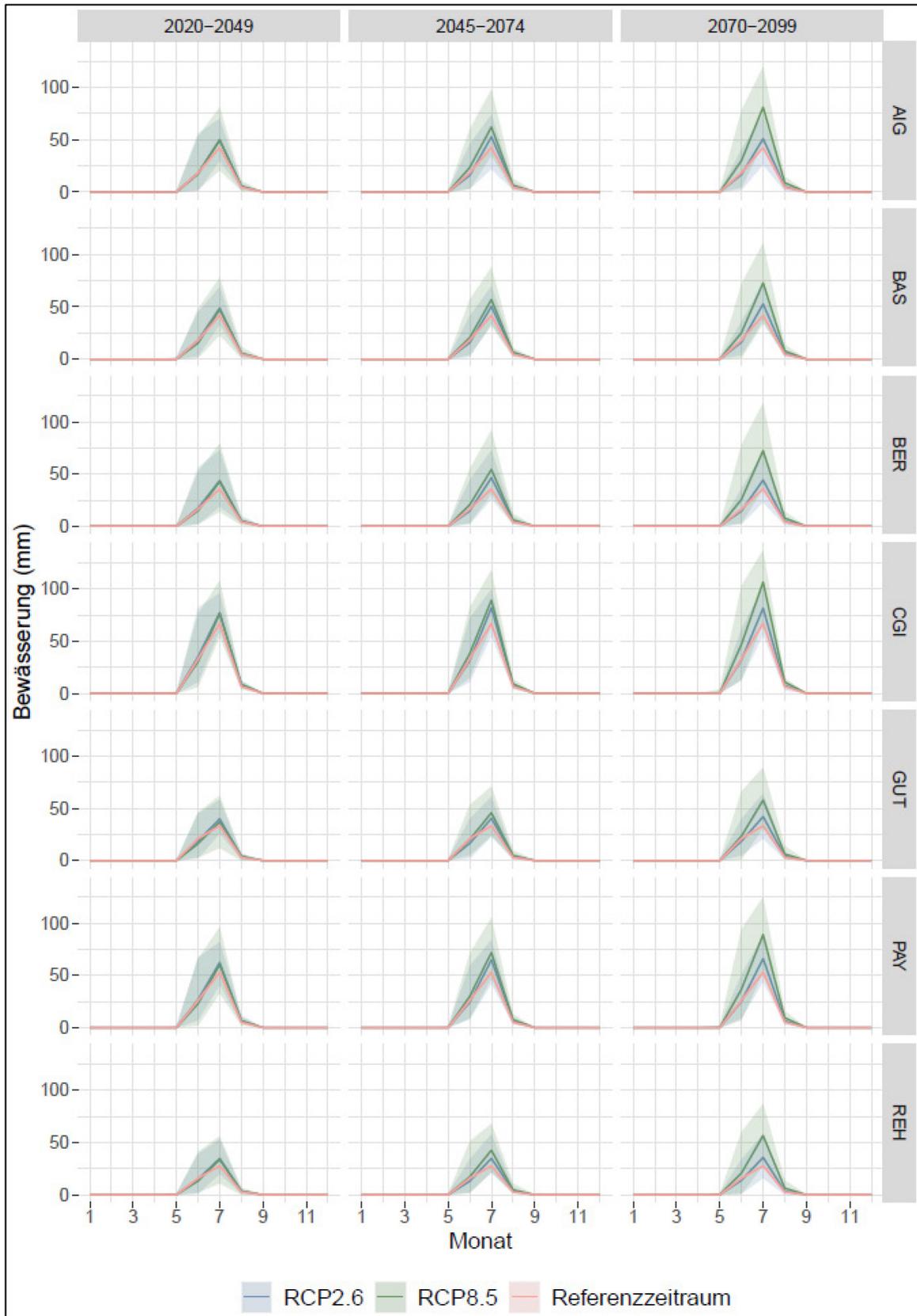


Abbildung A5: Die Linie bezeichnet die monatliche Bewässerungsmenge für Zuckermais gemittelt über alle Modellketten und Böden. Die Fläche zeigt das maximale Intervall der modellierten Bewässerungsmenge.

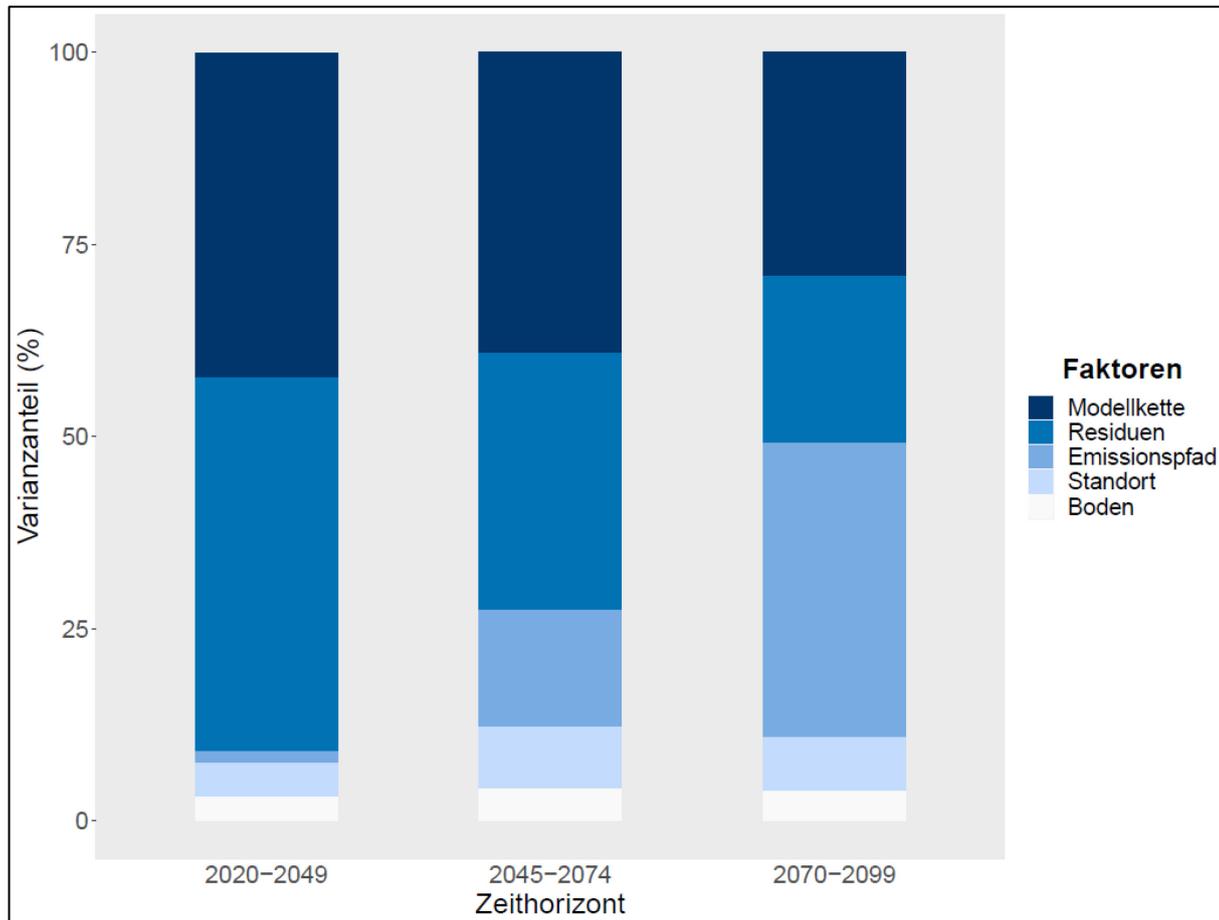


Abbildung A6: Balkendiagramm mit den Resultaten der Anova-Analyse der prozentualen Veränderung der Bewässerung für Zuckermais bezüglich dem Referenzzeitraum.

3.3 Apfelbäume

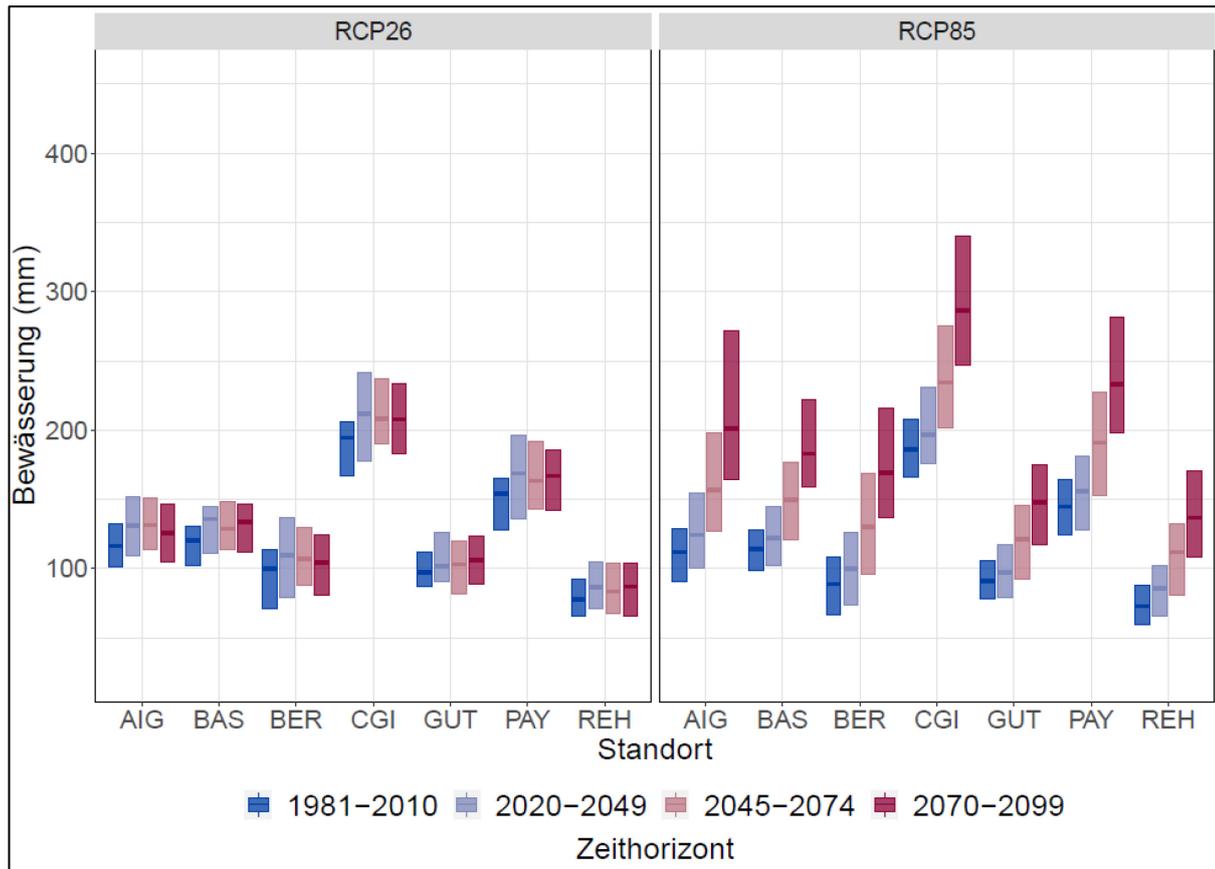


Abbildung A7: Boxplot der jährlichen Bewässerungsmengen für Apfelbäume über allen Modellketten und Böden; die Boxen sind durch das erste bzw. dritte Quartil begrenzt. Die fette Linie gibt den Median an.

Tabelle A7: Jährliche Bewässerungsmengen in Millimeter für Apfelbäume gemittelt über die entsprechenden Zeithorizonte, über die Modellketten der jeweiligen Emissionspfade und über alle Böden. Die Zahl in Klammern bezeichnet die Standardabweichung.

Emissionspfad	Standort	1981-2010	2020-2049	2045-2074	2070-2099
RCP2.6	Aigle (AIG)	118 (25)	136 (35)	132 (30)	127 (28)
	Basel (BAS)	120 (21)	135 (29)	131 (24)	133 (23)
	Bern (BER)	96 (29)	112 (39)	109 (31)	105 (31)
	Changins (CGI)	192 (26)	217 (44)	214 (34)	210 (32)
	Güttingen (GUT)	102 (20)	108 (25)	103 (28)	107 (29)
	Payerne (PAY)	152 (27)	173 (42)	167 (33)	166 (31)
	Reckenholz (REH)	81 (21)	90 (24)	88 (25)	88 (26)
RCP8.5	Aigle (AIG)	112 (28)	129 (37)	163 (49)	216 (63)
	Basel (BAS)	116 (22)	125 (33)	153 (40)	192 (52)
	Bern (BER)	89 (29)	104 (37)	135 (49)	182 (61)
	Changins (CGI)	187 (28)	204 (41)	243 (50)	294 (62)
	Güttingen (GUT)	92 (24)	99 (29)	123 (38)	152 (46)
	Payerne (PAY)	146 (28)	159 (40)	193 (49)	241 (61)
	Reckenholz (REH)	76 (22)	86 (27)	110 (34)	143 (43)

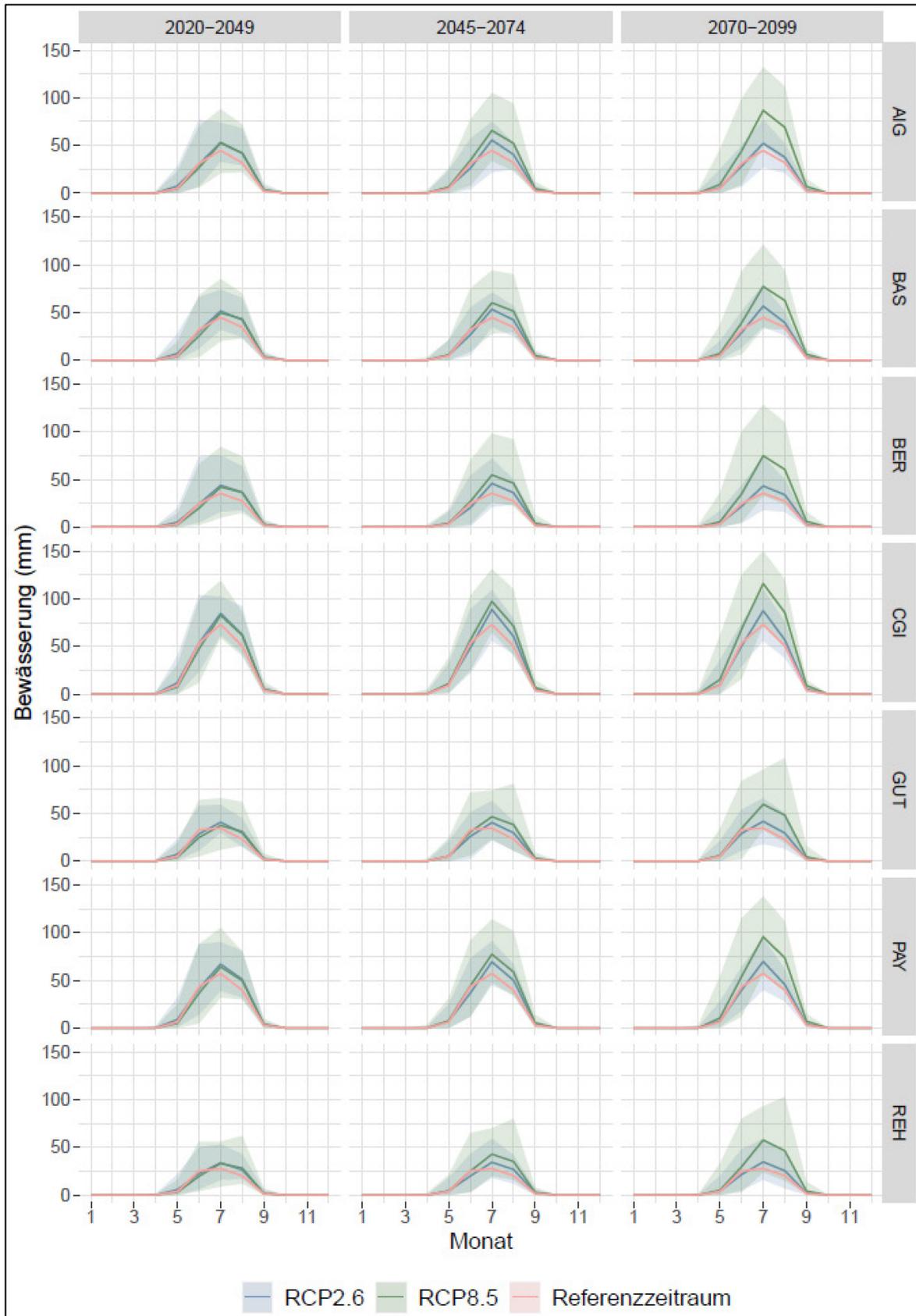


Abbildung A8: Die Linie bezeichnet die monatliche Bewässerungsmenge für Apfelbäume gemittelt über alle Modellketten und Böden. Die Fläche zeigt das maximale Intervall der modellierten Bewässerungsmenge.

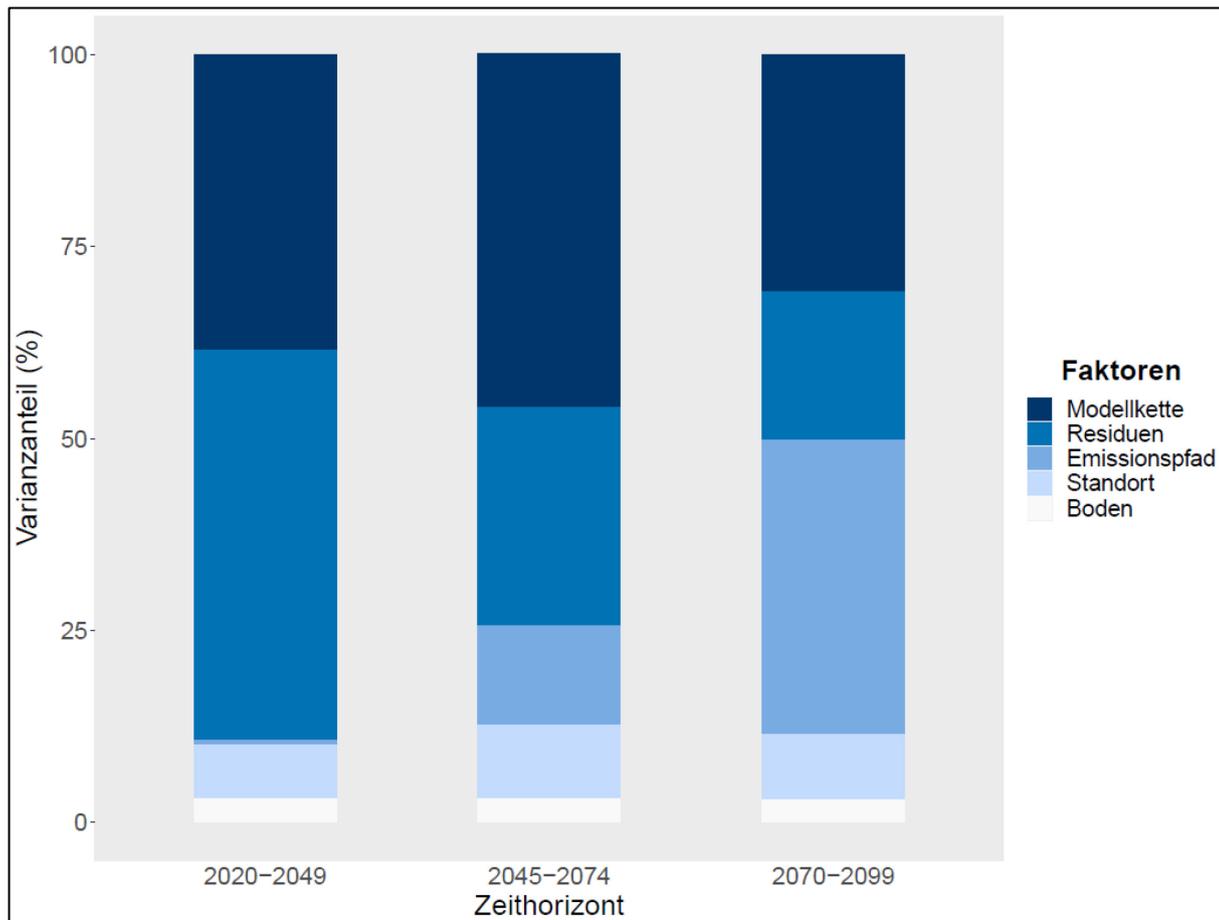


Abbildung A9: Balkendiagramm mit den Resultaten der Anova-Analyse der prozentualen Veränderung der Bewässerung für Apfelbäume bezüglich dem Referenzzeitraum.

3.4 Erdbeeren

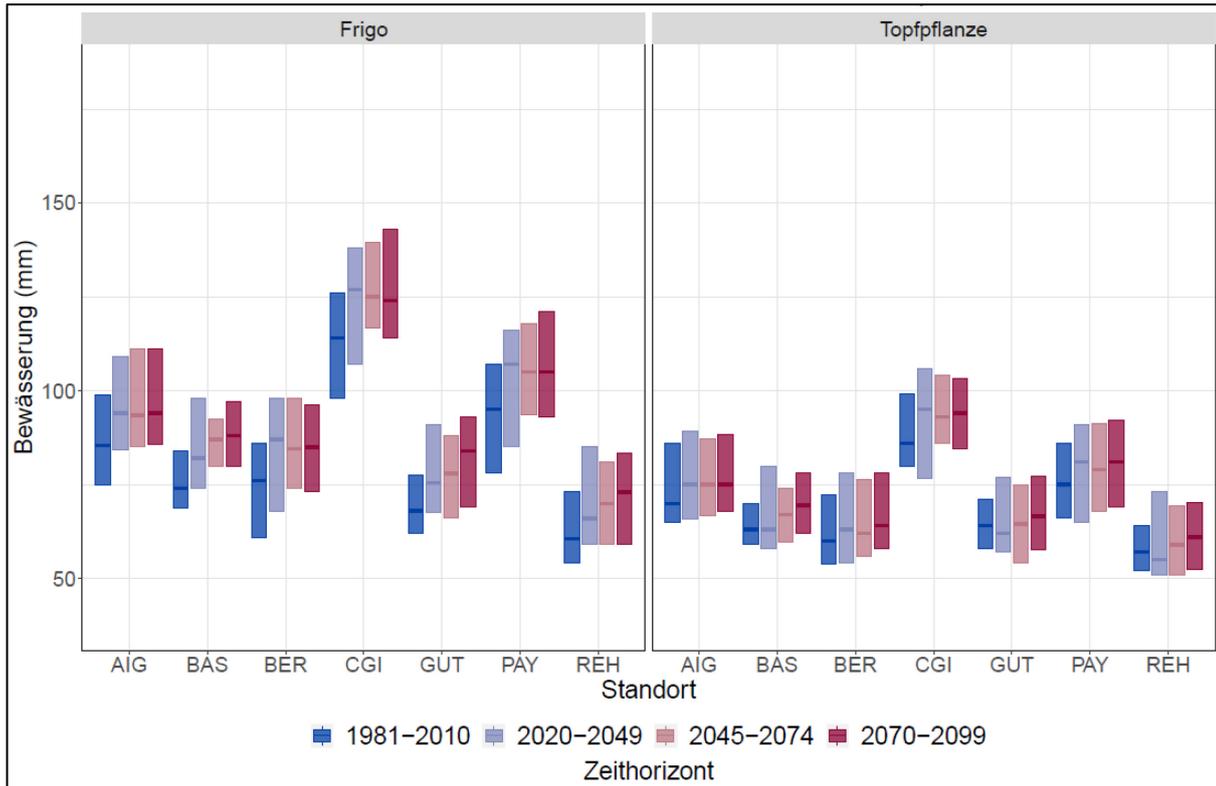


Abbildung A10: Boxplot der jährlichen Bewässerungsmengen für Erdbeeren über allen Modellketten des Emissionspfades RCP2.6 und Böden. Die Boxen sind durch das erste bzw. dritte Quartil begrenzt. Die fette Linie gibt den Median an.

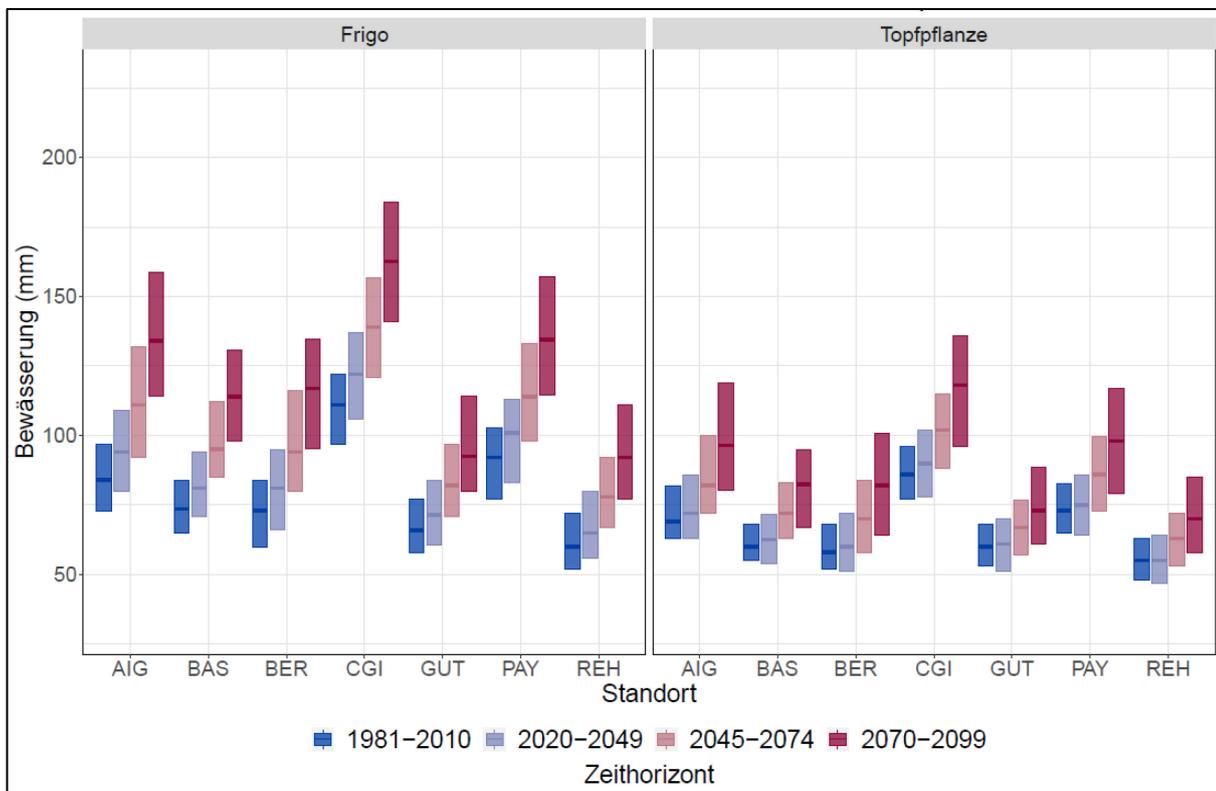


Abbildung A11: Boxplot der jährlichen Bewässerungsmengen für Erdbeeren über allen Modellketten des Emissionspfades RCP8.5 und Böden. Die Boxen sind durch das erste bzw. dritte Quartil begrenzt. Die fette Linie gibt den Median an.

Tabelle A8: Jährliche Bewässerungsmengen in Millimeter für Erdbeeren gemittelt über die entsprechenden Zeithorizonte, über die Modellketten der jeweiligen Emissionspfade und über alle Böden. Die Zahl in Klammern bezeichnet die Standardabweichung.

Emissionspfad	Standort	1981-2010	2020-2049	2045-2074	2070-2099
RCP2.6	Aigle (AIG)	163 (29)	176 (37)	176 (30)	175 (30)
	Basel (BAS)	143 (22)	154 (28)	156 (26)	160 (26)
	Bern (BER)	139 (29)	153 (37)	152 (30)	153 (29)
	Changins (CGI)	204 (28)	221 (41)	224 (32)	222 (33)
	Güttingen (GUT)	137 (23)	145 (26)	144 (29)	149 (31)
	Payerne (PAY)	171 (30)	186 (39)	187 (32)	189 (32)
	Reckenholz (REH)	123 (24)	133 (28)	133 (27)	136 (30)
RCP8.5	Aigle (AIG)	158 (30)	170 (34)	200 (41)	236 (52)
	Basel (BAS)	139 (23)	147 (28)	171 (30)	198 (41)
	Bern (BER)	133 (29)	144 (33)	170 (39)	202 (50)
	Changins (CGI)	198 (29)	212 (34)	243 (41)	281 (51)
	Güttingen (GUT)	130 (26)	134 (31)	153 (33)	173 (42)
	Payerne (PAY)	165 (29)	176 (34)	204 (40)	237 (52)
	Reckenholz (REH)	119 (26)	124 (29)	144 (31)	167 (41)

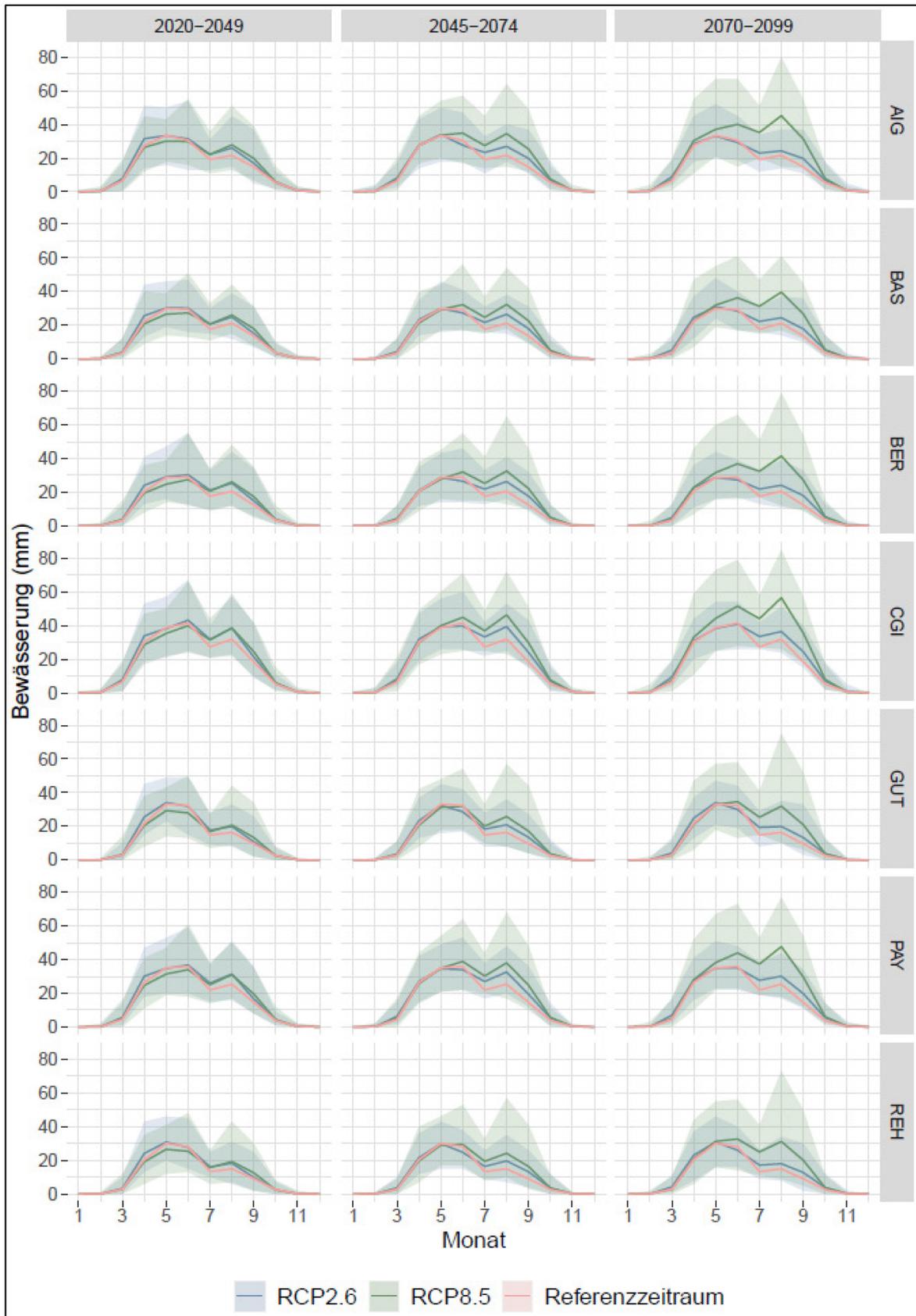


Abbildung A12: Die Linie bezeichnet die monatliche Bewässerungsmenge für Erdbeeren gemittelt über alle Modellketten und Böden. Die Fläche zeigt das maximale Intervall der modellierten Bewässerungsmenge.

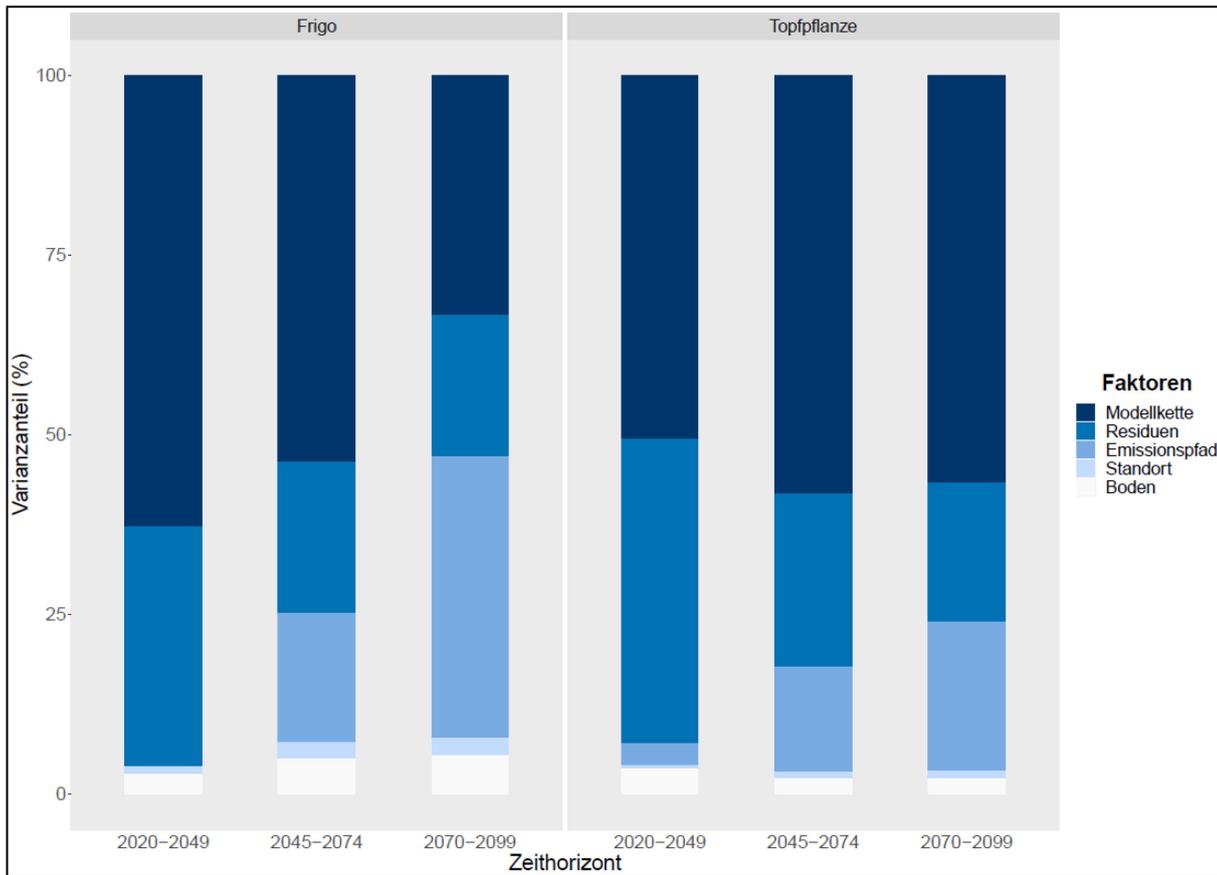


Abbildung A13: Balkendiagramm mit den Resultaten der Anova-Analyse der prozentualen Veränderung der Bewässerung für Erdbeeren bezüglich dem Referenzzeitraum.

3.5 Klee

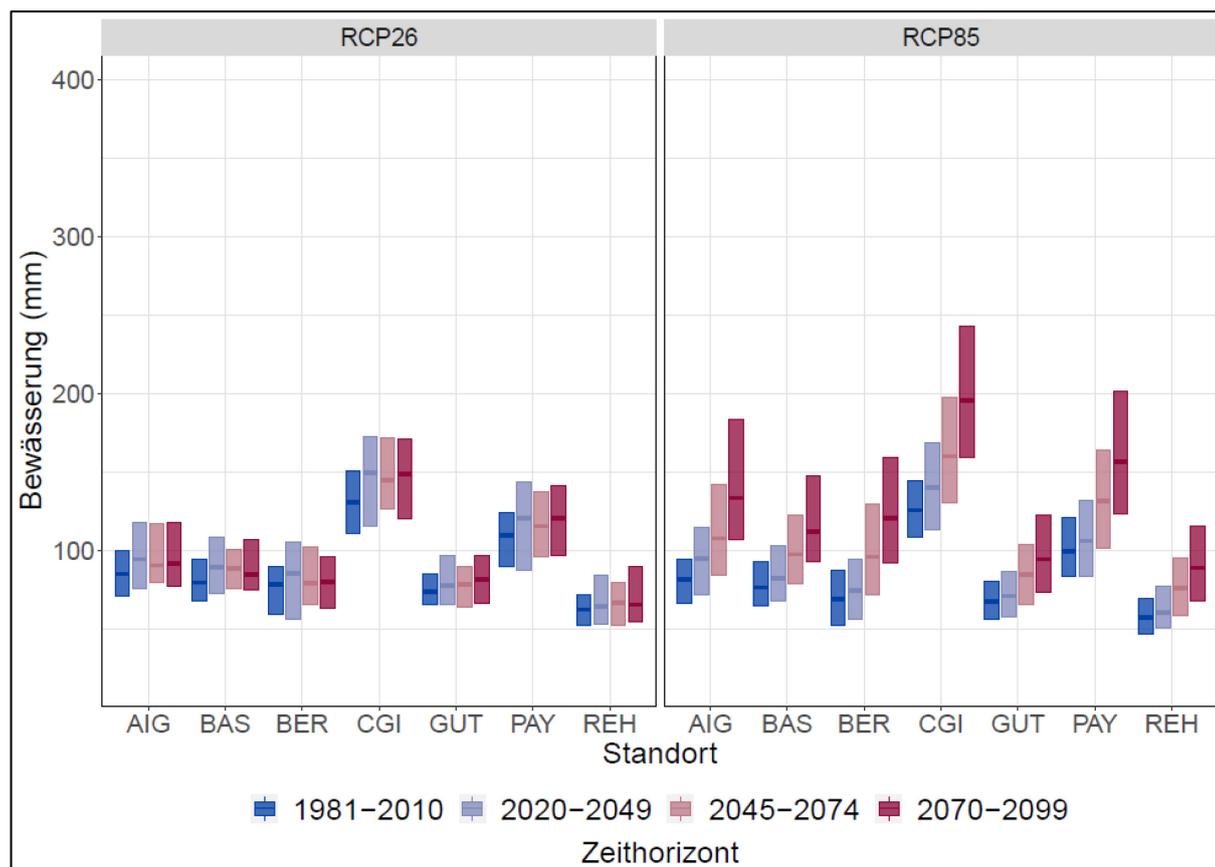


Abbildung A14: Boxplot der jährlichen Bewässerungsmengen für Klee über allen Modellketten und Böden; die Boxen sind durch das erste bzw. dritte Quartil begrenzt; die fette Linie gibt den Median an.

Tabelle A9: Jährliche Bewässerungsmengen in Millimeter für Klee gemittelt über die entsprechenden Zeithorizonte, über die Modellketten der jeweiligen Emissionspfade und über alle Böden. Die Zahl in Klammern bezeichnet die Standardabweichung.

Emissionspfad	Standort	1981-2010	2020-2049	2045-2074	2070-2099
RCP2.6	Aigle (AIG)	88 (23)	100 (32)	99 (29)	98 (28)
	Basel (BAS)	84 (24)	92 (28)	92 (26)	92 (26)
	Bern (BER)	78 (24)	86 (33)	85 (27)	84 (26)
	Changins (CGI)	134 (28)	152 (43)	151 (35)	150 (35)
	Güttingen (GUT)	79 (20)	84 (23)	80 (24)	85 (24)
	Payerne (PAY)	110 (25)	122 (39)	121 (31)	123 (32)
	Reckenholz (REH)	66 (19)	71 (23)	70 (23)	73 (25)
RCP8.5	Aigle (AIG)	83 (24)	97 (31)	117 (40)	148 (52)
	Basel (BAS)	82 (23)	89 (28)	103 (32)	121 (41)
	Bern (BER)	72 (25)	79 (29)	103 (39)	129 (49)
	Changins (CGI)	128 (28)	144 (37)	169 (47)	205 (60)
	Güttingen (GUT)	71 (22)	75 (25)	90 (31)	103 (38)
	Payerne (PAY)	103 (27)	111 (34)	137 (42)	166 (54)
	Reckenholz (REH)	61 (20)	66 (23)	81 (29)	96 (37)

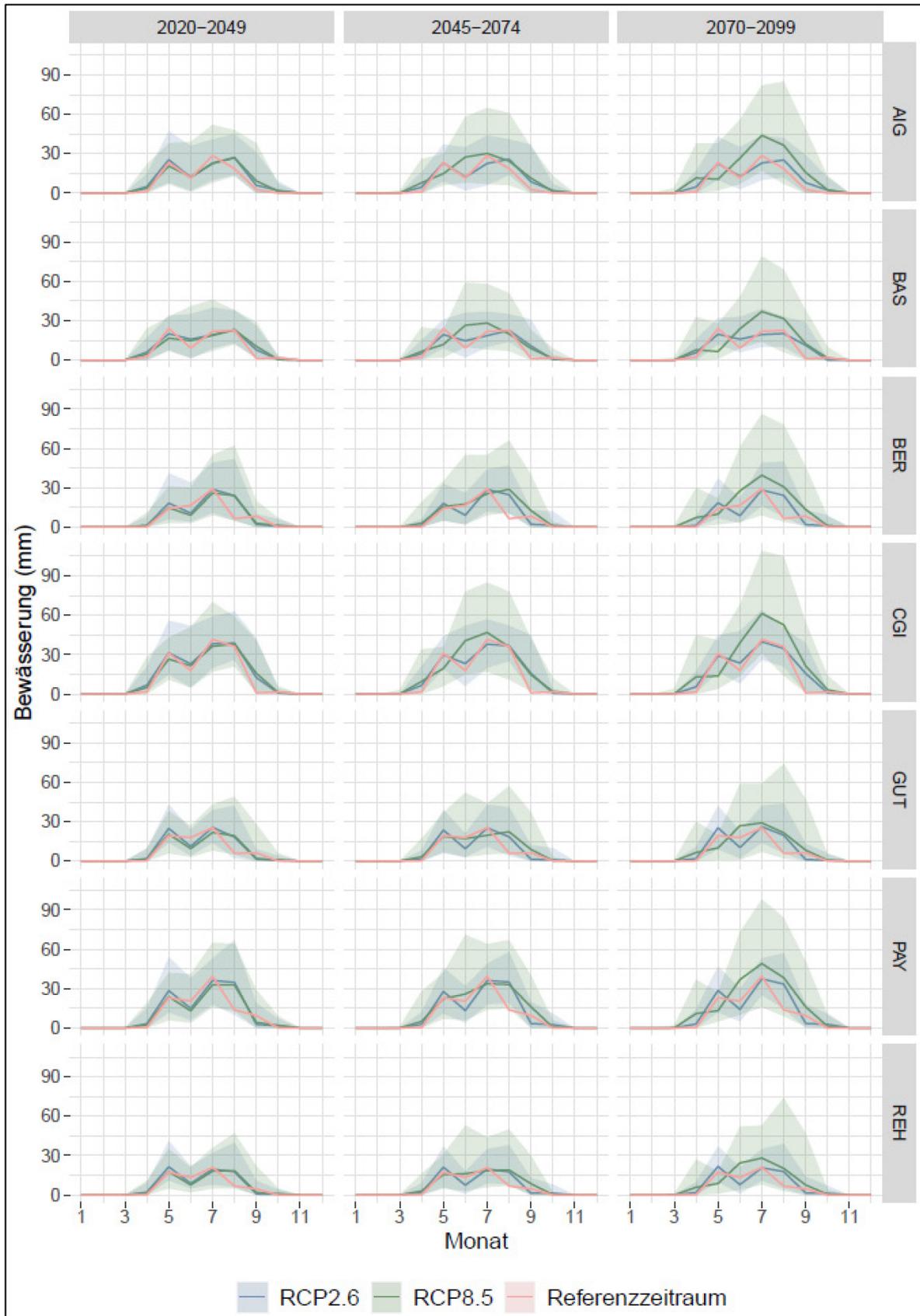


Abbildung A15: Die Linie bezeichnet die monatliche Bewässerungsmenge für Klee gemittelt über alle Modellketten und Böden. Die Fläche zeigt das maximale Intervall der modellierten Bewässerungsmengen.

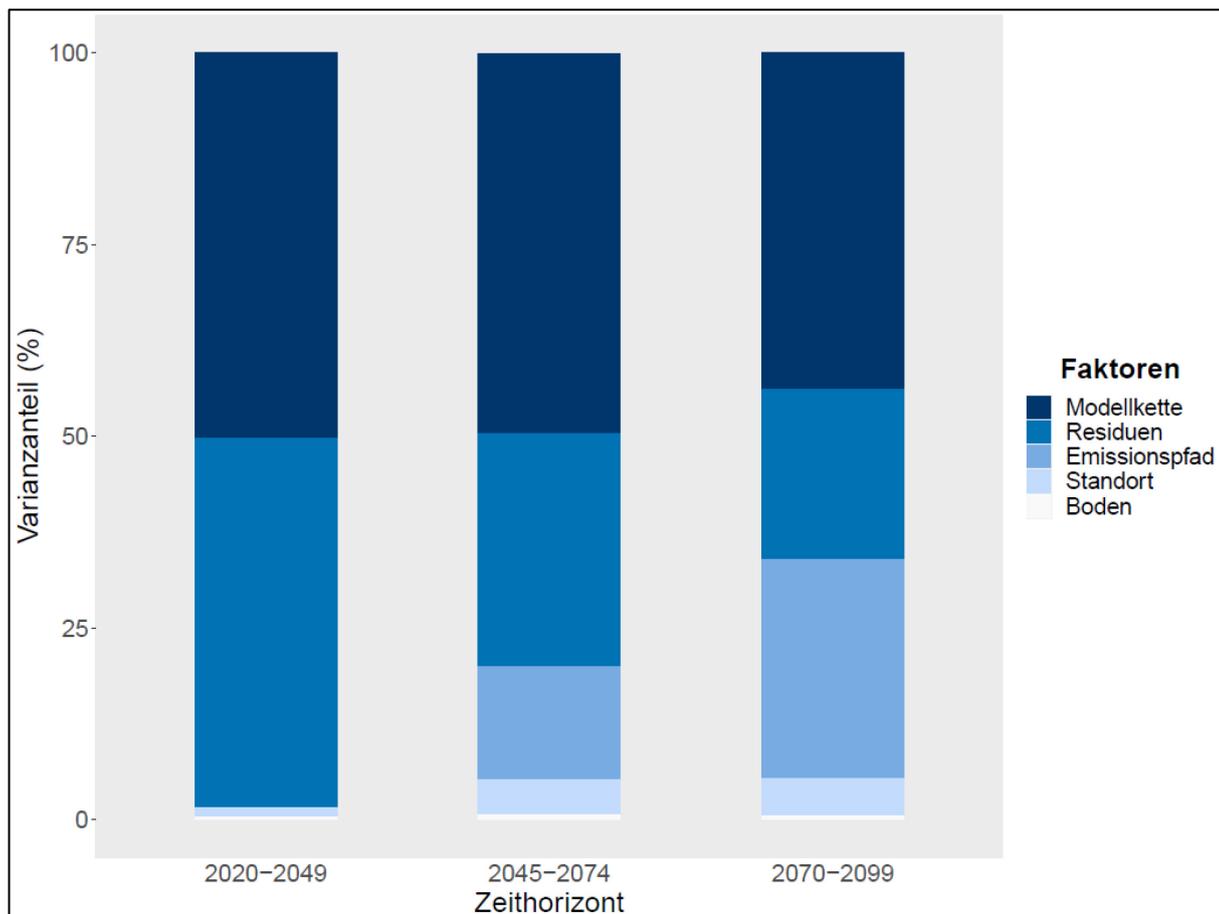


Abbildung A16: Balkendiagramm mit den Resultaten der Anova-Analyse der prozentualen Veränderung der Bewässerung für Klee bezüglich dem Referenzzeitraum.

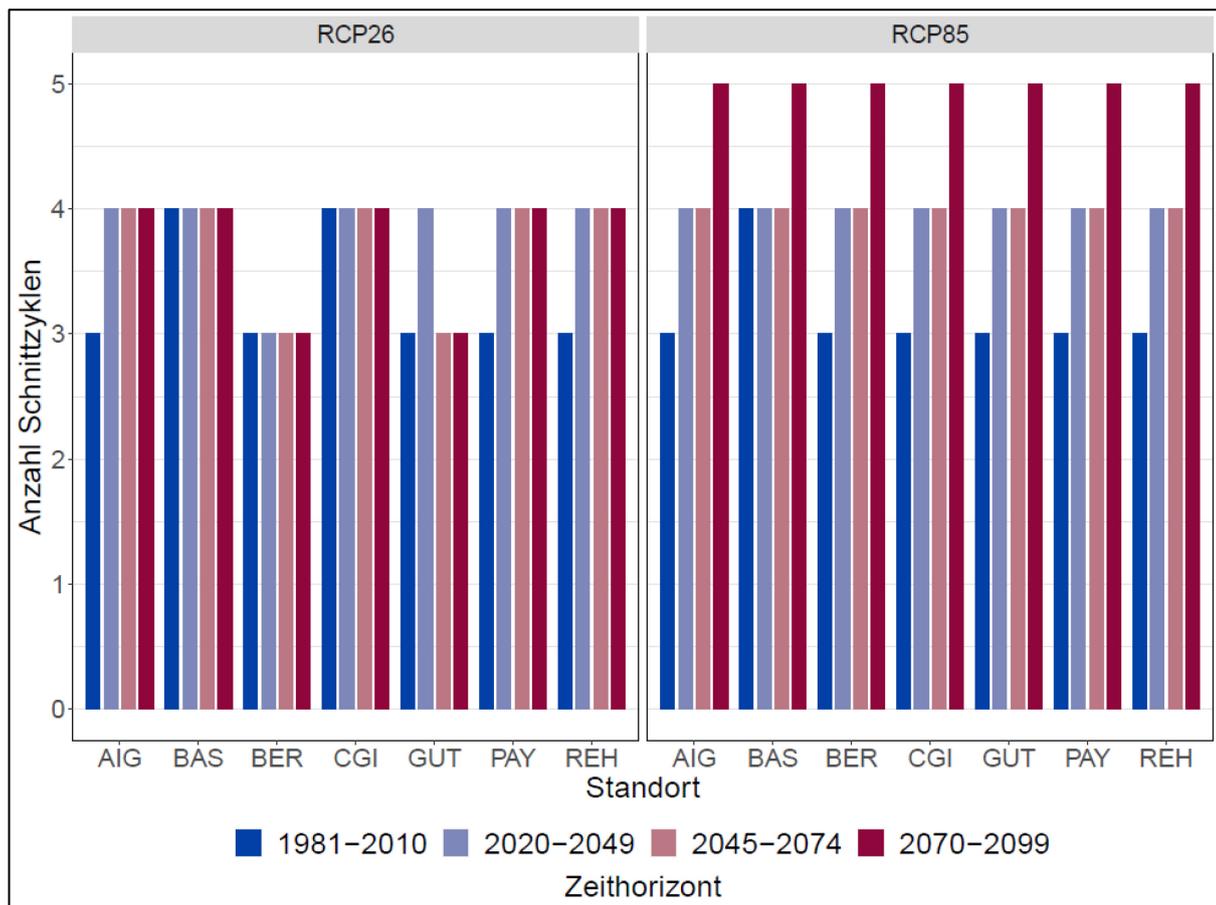


Abbildung A17: Balkendiagramm mit der Entwicklung der Anzahl Schnittzyklen für Klee für alle Standorte.

3.6 Weideland

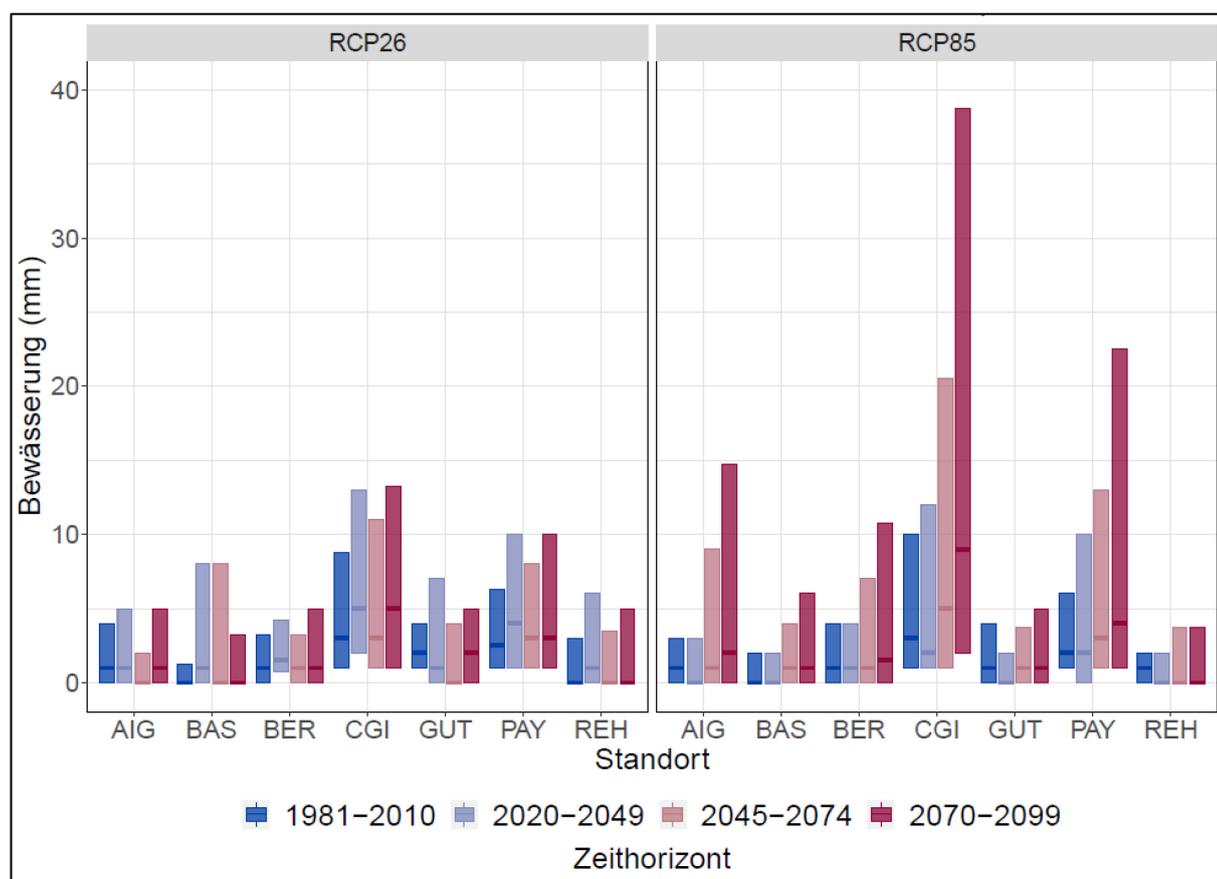


Abbildung A18: Boxplot der jährlichen Bewässerungsmengen für Weideland über allen Modellketten und Böden. Die Boxen sind durch das erste bzw. dritte Quartil begrenzt. Die fette Linie gibt den Median an.

Tabelle A10: Jährliche Bewässerungsmengen in Millimeter für Weideland gemittelt über die entsprechenden Zeithorizonte, über die Modellketten der jeweiligen Emissionspfade und über alle Böden. Die Zahl in Klammern bezeichnet die Standardabweichung.

Emissionspfad	Standort	1981-2010	2020-2049	2045-2074	2070-2099
RCP2.6	Aigle (AIG)	6 (11)	6 (11)	5 (10)	6 (10)
	Basel (BAS)	4 (8)	5 (9)	5 (8)	5 (8)
	Bern (BER)	6 (10)	7 (11)	6 (10)	6 (10)
	Changins (CGI)	13 (20)	15 (22)	13 (21)	15 (22)
	Güttingen (GUT)	6 (9)	6 (10)	5 (9)	6 (10)
	Payerne (PAY)	10 (15)	11 (17)	10 (16)	11 (17)
	Reckenholz (REH)	4 (7)	5 (8)	4 (7)	4 (8)
RCP8.5	Aigle (AIG)	6 (10)	5 (10)	8 (16)	14 (26)
	Basel (BAS)	4 (7)	4 (8)	6 (11)	8 (16)
	Bern (BER)	5 (9)	5 (10)	8 (14)	11 (23)
	Changins (CGI)	12 (19)	12 (20)	18 (28)	30 (45)
	Güttingen (GUT)	5 (8)	4 (8)	5 (10)	6 (13)
	Payerne (PAY)	9 (14)	9 (15)	13 (21)	18 (31)
	Reckenholz (REH)	4 (6)	3 (6)	4 (8)	5 (11)

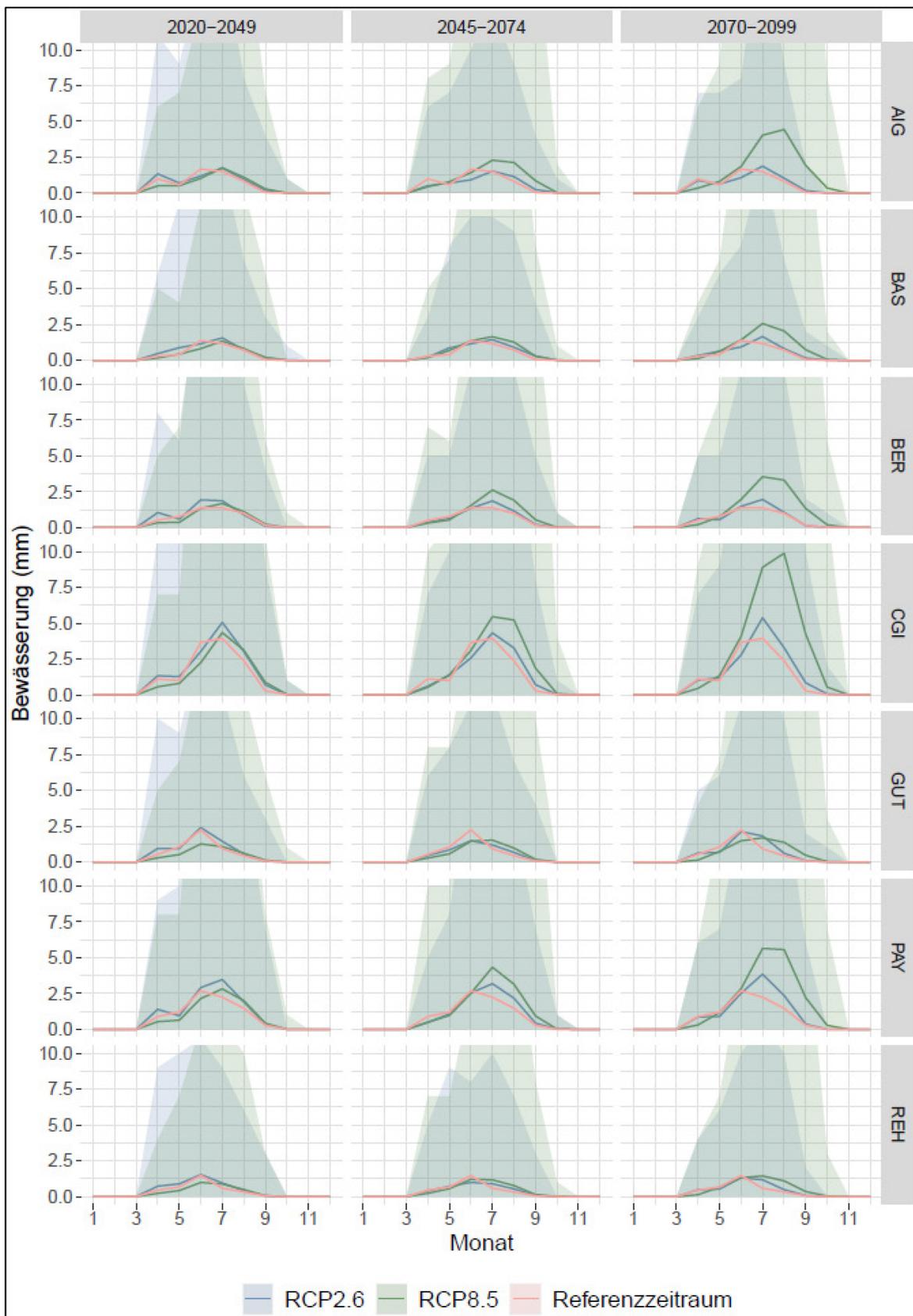


Abbildung A19: Die Linie bezeichnet die monatliche Bewässerungsmenge für Weideland gemittelt über alle Modellketten und Böden. Die Fläche zeigt das maximale Intervall der modellierten Bewässerungsmenge.

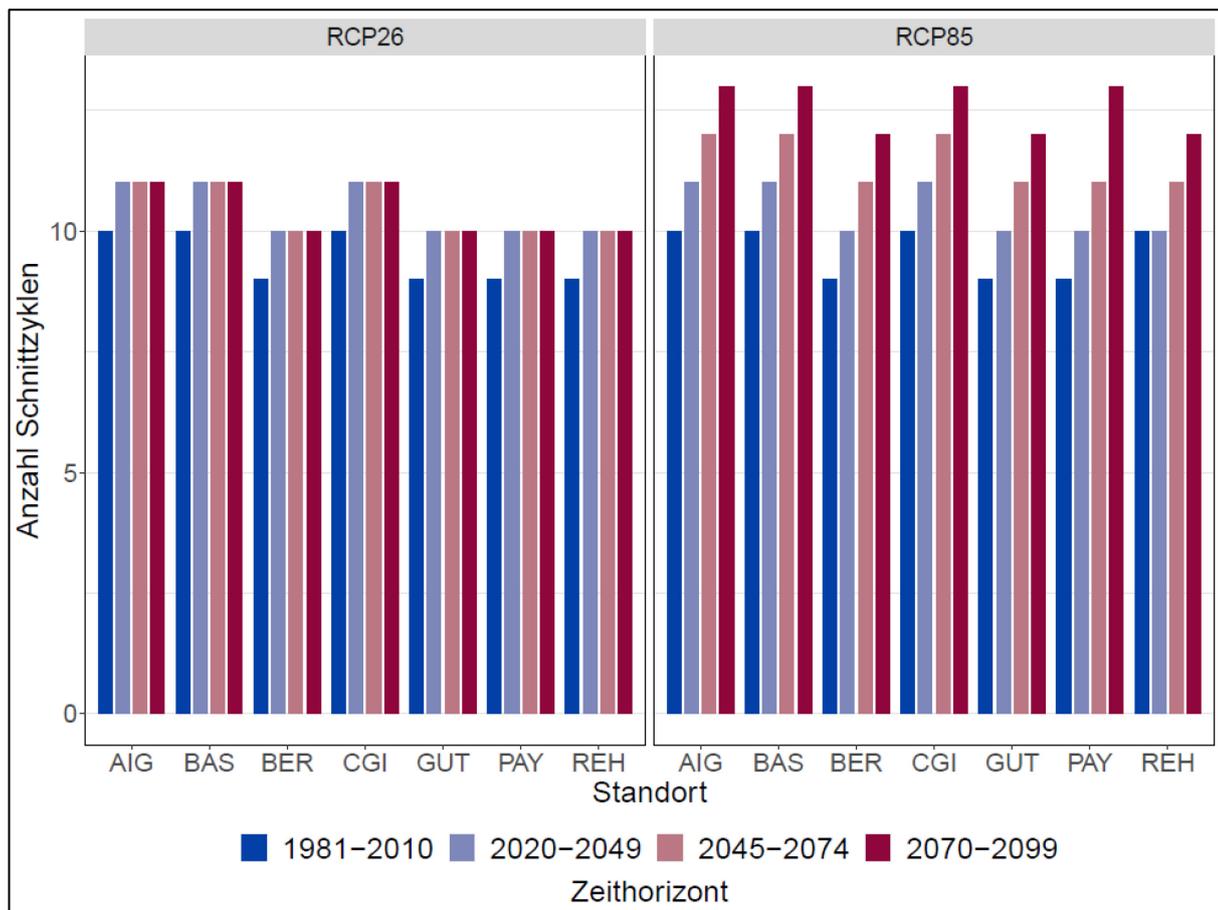


Abbildung A20: Balkendiagramm mit der Entwicklung der Anzahl Schnitzzyklen für Weideland für alle Standorte.