



Rheinland-Pfalz

Dienstleistungszentrum
Ländlicher Raum
Rheinpfalz



Hochschule
Geisenheim
University

Klimawandelbedingte Änderungen des Wasserbedarfs für den Gemüse- anbau in der Vorderpfalz

Abschlussbericht

Projektlaufzeit: 07 / 2012 bis 07 / 2013

Projektpartner: M. Sc. Nadine Schmidt (nadine.schmidt@hs-gm.de)

Prof. Dr. Jana Zinkernagel (jana.zinkernagel@hs-gm.de)

Hochschule Geisenheim University

Institut für Gemüsebau

Von-Lade-Str.1

65366 Geisenheim

Tel.: +49 6722 502 511

Dr. Sebastian Weinheimer (Sebastian.Weinheimer@dlr.rlp.de)

Dienstleistungszentrum Ländlicher

Raum Rheinland-Pfalz

Breitenweg 71

67435 Neustadt a. d. Weinstraße

Tel.: +49 6321 671 272

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| 1. EINLEITUNG | 1 |
| 1.1. Aktuelle Problemstellung und Zielsetzung | 1 |
| 1.2. Kurzbeschreibung des Projektes | 2 |
| 1.3. Untersuchungsgebiet | 3 |
| 1.4. Gemüseanbau in Rheinland-Pfalz..... | 3 |
| 1.5. Landwirtschaftliche Bewässerung | 6 |
| 2. STRUKTUR DES VORHABENS | 6 |
| 2.1. Datengrundlage..... | 7 |
| 2.2. Simulationen | 9 |
| 2.2.1. Niederschlagsverteilung und niederschlagsfreie Zeiträume | 10 |
| 2.2.2. Grasreferenz-Verdunstung nach FAO 56..... | 11 |
| 2.2.3. Klimatische Wasserbilanz (KWB) und kulturspezifischer Bewässerungsbedarf | 13 |
| 3. ERGEBNISSE | 16 |
| 3.1. Regionale Analyse und Bewertung der zukünftigen Klimaentwicklung für die Vorderpfalz | 17 |
| 3.1.1. Zeitliche Niederschlagsverteilung | 17 |
| 3.1.2. Niederschlagsfreie Zeiträume | 21 |
| 3.1.3. Klimatische Wasserbilanz | 29 |
| 3.1.4. Mittlerer jährlicher Bewässerungsbedarf | 32 |
| 4. FAZIT | 44 |
| 5. LITERATUR..... | 49 |
| 6. ANHANG | 51 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|---------------|---|----|
| Abbildung 1: | Anbaufläche von Gemüse auf dem Freiland (in Hektar) von 1988 bis 2012..... | 4 |
| Abbildung 2: | Exemplarische Darstellung von IDP-Karten für die Zuordnung der Gitterpunkte bzw. Stationen für die Regionalmodelle a) C-CLM, b) WETTREG 2010 und c) REMO. Die rote Markierung stellt die Region Vorderpfalz dar. Auf Grundlage dieser Gebietsabgrenzung wurde anschließend die Auswahl durchgeführt.. | 8 |
| Abbildung 3: | Simulierte Niederschlagsverteilung für die Vorderpfalz (Flächenmittel) im Jahresverlauf mit dem Regionalmodell C-CLM (Szenario A1B / ECHAM 5). Prozentuale Differenz der mittleren monatlichen Niederschlagssummen basierend auf dem Vergleich der modellierten zukünftigen Periode 2021 – 2050 mit der Referenzperiode 1971 – 2000. | 18 |
| Abbildung 4: | Simulierte Niederschlagsverteilung für die Vorderpfalz (Flächenmittel) im Jahresverlauf mit dem Regionalmodell REMO (Szenario A1B / ECHAM 5). Prozentuale Differenz der mittleren monatlichen Niederschlagssummen basierend auf dem Vergleich der modellierten zukünftigen Periode 2021 – 2050 mit der Referenzperiode 1971 – 2000. | 19 |
| Abbildung 5: | Simulierte Niederschlagsverteilung für die Vorderpfalz (Flächenmittel) im Jahresverlauf mit dem Regionalmodell WETTREG 2010 (Szenario A1B / ECHAM 5). Prozentuale Differenz der mittleren monatlichen Niederschlagssummen basierend auf dem Vergleich der modellierten zukünftigen Periode 2021 – 2050 mit der Referenzperiode 1971 – 2000. | 20 |
| Abbildung 6: | Simulierte maximale Länge niederschlagsfreier Zeiträume mit C-CLM (Szenario A1B / ECHAM5) auf Monatsbasis für die Vorderpfalz (Flächenmittel) als 30jähriges Mittel der Perioden 1971 – 2000 und 2021 – 2050 sowie der Vergleich der zukünftigen Periode mit der Referenz 1971 – 2000, dargestellt als prozentuale Differenz. | 22 |
| Abbildung 7: | Simulierte maximale Länge niederschlagsfreier Zeiträume mit REMO (Szenario A1B / ECHAM5) auf Monatsbasis für die Vorderpfalz (Flächenmittel) als 30jähriges Mittel der Perioden 1971 – 2000 und 2021 – 2050 sowie der Vergleich der zukünftigen Periode mit der Referenz 1971 – 2000, dargestellt als prozentuale Differenz. | 23 |
| Abbildung 8: | Simulierte maximale Länge niederschlagsfreier Zeiträume mit WETTREG 2010 (Szenario A1B / ECHAM5) auf Monatsbasis für die Vorderpfalz (Flächenmittel) als 30jähriges Mittel der Perioden 1971 – 2000 und 2021 – 2050 sowie der Vergleich der zukünftigen Periode mit der Referenz 1971 – 2000, dargestellt als prozentuale Differenz. | 24 |
| Abbildung 9: | Simulierte maximale Länge niederschlagsfreier Zeiträume innerhalb der Vegetationsperiode mit C-CLM, REMO und WETTREG 2010 (Szenario A1B / ECHAM5) im Vergleich zwischen in den Perioden 1971 – 2000 und 2021 – 2050 für die Vorderpfalz (Flächenmittel). | 25 |
| Abbildung 10: | Simulierte maximale Länge niederschlagsfreier Zeiträume innerhalb der Vegetationsperiode mit C-CLM, REMO und WETTREG 2010 (Szenario A1B / ECHAM5) dekadenweise für die Vorderpfalz (Flächenmittel). | 26 |
| Abbildung 11: | Simulierte absolute Häufigkeiten niederschlagsfreier Zeiträume mit C-CLM (Szenario A1B / ECHAM5) innerhalb der Vegetationsperiode für die 30jährigen Zeiträume 1971 – 2000 (Referenz) sowie 2021 – 2050 in der Vorderpfalz. | 27 |
| Abbildung 12: | Simulierte absolute Häufigkeiten niederschlagsfreier Zeiträume mit REMO (Szenario A1B / ECHAM5) innerhalb der Vegetationsperiode für die 30jährigen Zeiträume 1971 – 2000 (Referenz) sowie 2021 – 2050 in der Vorderpfalz. | 28 |

| | | |
|---------------|---|----|
| Abbildung 13: | Simulierte absolute Häufigkeiten niederschlagsfreier Zeiträume mit WETTREG 2010 (Szenario A1B / ECHAM5) innerhalb der Vegetationsperiode für die 30jährigen Zeiträume 1971 – 2000 (Referenz) sowie 2021 – 2050 in der Vorderpfalz..... | 28 |
| Abbildung 14: | Mittlere Dekadenwerte für Niederschlag, Verdunstung und daraus resultierende klimatische Wasserbilanz (jeweils in mm) innerhalb (oben) und außerhalb der Vegetationsperiode (unten) auf Grundlage der Simulationsdaten von C-CLM (ECHAM5 / Szenario A1B) für die Vorderpfalz (Flächenmittel)..... | 30 |
| Abbildung 15: | Mittlere Dekadenwerte für Niederschlag, Verdunstung und daraus resultierende klimatische Wasserbilanz (jeweils in mm) innerhalb (oben) und außerhalb der Vegetationsperiode (unten) auf Grundlage der Simulationsdaten von REMO (ECHAM5 / Szenario A1B) für die Vorderpfalz (Flächenmittel)..... | 31 |
| Abbildung 16: | Mit C-CLM (ECHAM 5 / Szenario A1B) ermittelter mittlerer jährlicher Bewässerungsbedarf von Blumenkohl in den Jahren 1971 bis 2050 für die Vorderpfalz (Flächenmittel)..... | 33 |
| Abbildung 17: | Mit C-CLM (ECHAM 5 / Szenario A1B) ermittelter mittlerer jährlicher Bewässerungsbedarf von Bundzwiebeln in den Jahren 1971 bis 2050 für die Vorderpfalz (Flächenmittel)..... | 34 |
| Abbildung 18: | Mit C-CLM (ECHAM 5 / Szenario A1B) ermittelter mittlerer jährlicher Bewässerungsbedarf von Möhren in den Jahren 1971 bis 2050 für die Vorderpfalz (Flächenmittel)..... | 35 |
| Abbildung 19: | Mit C-CLM (ECHAM 5 / Szenario A1B) ermittelter mittlerer jährlicher Bewässerungsbedarf von Radies in den Jahren 1971 bis 2050 für die Vorderpfalz (Flächenmittel)..... | 36 |
| Abbildung 20: | Mit C-CLM (ECHAM5 / Szenario A1B) ermittelte mittlere Zusatzwassermenge innerhalb der Dekaden und die Veränderung des Bewässerungsbedarfs zur vorangegangenen Dekade für alle betrachteten Kulturen. Fehlerbalken kennzeichnen die Standardabweichung..... | 37 |
| Abbildung 21: | Mit REMO (ECHAM 5 / Szenario A1B) ermittelter mittlerer jährlicher Bewässerungsbedarf von Blumenkohl in den Jahren 1971 bis 2050 für die Vorderpfalz (Flächenmittel)..... | 38 |
| Abbildung 22: | Mit REMO (ECHAM 5 / Szenario A1B) ermittelter mittlerer jährlicher Bewässerungsbedarf von Bundzwiebeln in den Jahren 1971 bis 2050 für die Vorderpfalz (Flächenmittel)..... | 39 |
| Abbildung 23: | Mit REMO (ECHAM 5 / Szenario A1B) ermittelter mittlerer jährlicher Bewässerungsbedarf von Möhren in den Jahren 1971 bis 2050 für die Vorderpfalz (Flächenmittel)..... | 40 |
| Abbildung 24: | Mit REMO (ECHAM 5 / Szenario A1B) ermittelter mittlerer jährlicher Bewässerungsbedarf von Radies in den Jahren 1971 bis 2050 für die Vorderpfalz (Flächenmittel)..... | 41 |
| Abbildung 25: | Mit REMO (ECHAM5 / Szenario A1B) ermittelte mittlere Zusatzwassermenge innerhalb der Dekaden und die Veränderung des Bewässerungsbedarfs zur vorangegangenen Dekade für alle betrachteten Kulturen. Fehlerbalken kennzeichnen die Standardabweichung..... | 42 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|------------|---|----|
| Tabelle 1: | Für Freilandgemüse im Verkaufsanbau genutzte Fläche (ha) sowie die Anzahl der Betriebe von 1996 bis 2011..... | 5 |
| Tabelle 2: | Ertrag sowie Erntemenge von Gemüse in den Jahren 2010 und 2011 nach ausgewählten Arten..... | 5 |
| Tabelle 3: | Kulturdauer der einzelnen Sätze und Auflagedauer der Vliesabdeckung | 14 |
| Tabelle 4: | Für die Kalkulation verwendete k_c Faktoren..... | 15 |
| Tabelle 5: | Klimaänderungssignale der Zusatzbewässerung | 43 |

1. Einleitung

1.1. Aktuelle Problemstellung und Zielsetzung

Die Untersuchungen des Klimawandels und seiner Folgen in Hessen zeigen, dass diese Klimaentwicklungen des 21. Jahrhunderts den zukünftigen Anbau von Sonderkulturen in Hessen stark beeinflussen werden (Berthold 2009). Dies ist auch für die benachbarte Region „Vorderpfalz“ anzunehmen. Während für den Obst- und Weinbau der Einfluss klimatischer Veränderungen dokumentiert ist, fehlen diese Abschätzungen noch weitgehend für den Gemüsebau. Das geplante Projekt strebt daher die Beurteilung der Folgen des Klimawandels für die gemüsebaulich wichtige Anbauregion „Vorderpfalz“ an und zielt auf die Entwicklung des potenziell zukünftigen Wasserbedarfs ab.

Im Jahr 2011 stellten Radies (2735 ha), Möhren (1576 ha), Bundzwiebel (1532 ha) und Blumenkohl (1237 ha), flächenmäßig die wichtigsten Kulturen in der Vorderpfalz (DLR-Rheinpfalz 2011) dar. Unter den klimatischen Bedingungen dieses Gemüseanbaugebiets ist eine wirtschaftliche Pflanzenproduktion schon jetzt nur durch Zusatzbewässerung möglich.

Besonders für Gemüsekulturen wirken sich aufgrund ihrer Einjährigkeit die projizierte Erhöhung der jahresdurchschnittlichen Tagesmitteltemperatur um 1,8°C, der zehnpromzentigen Reduktion der sommerlichen Niederschlagsmengen sowie die Zunahme der Niederschlagsvariabilität und -charakteristik direkt auf die Erträge und Qualitäten aus. Der Anstieg der CO₂-Konzentration von derzeit ca. 385 ppm auf ca. 550-600 ppm projiziert für das Jahr 2075 kann großen Einfluss auf die pflanzliche Wasserhaushaltsregulierung sowie die gesamte Pflanzenentwicklung nehmen (IPCC 2007). Die Erhöhung der Temperatur und der Sonnenscheindauer im Frühjahr, Sommer und Herbst bedingt eine weitere Verfrühung sowie Verlängerung der Anbausaison und führt folglich zu einer Zunahme von Anbausätzen. Eine jahreszeitliche Verschiebung der Pflanzenentwicklung ist bereits für die Vorderpfalz für den Zeitraum von 1991 bis 2009 (<http://www.klimlandrp.de>) als auch für das Nachbarbundesland Hessen für den Zeitraum von 1961 bis 2000 an der phänologischen Uhr abzulesen (Grünhaage 2009). Eine weitere Ausdehnung der Vegetationsperiode würde einen weiteren Anstieg des Wasserbedarfs pro Saison mit sich bringen. So ergab die Simulierung von Wasserbilanzen im Hessischen Ried als Bewertungsgrundlage für den Bewässerungsbedarf bis 2050 einen durchschnittlichen Zusatzwasserbedarf pro Dekade um ca. 10 mm (Berthold 2009).

Diese Kalkulationen des Zusatzwasserbedarfs beziehen sich allerdings auf das „Hessische Ried“ und berücksichtigen auch nicht die Veränderungen des Wasserbedarfs, die sich aus der Verlängerung der Vegetationszeit, Erhöhung der Anbausätze pro Saison und evtl. Ver-

änderungen in den Anbauverhältnissen ergeben werden. Eine Erweiterung der Wasserbedarfsberechnungen um die potenzielle Ausdehnung der Anbausaison und des Anbauspektrums von Gemüsekulturen ist daher erforderlich.

Der Zusatzwasserbedarf wird zukünftig zudem einer erhöhten (räumlich und zeitlich variablen) Sommertrockenheit gegenüberstehen, sodass eine Abschätzung der Berechnungsmenge und ihrer zeitlichen Verfügbarkeit und eine Anpassung der Bewässerungsverfahren und -steuerung in der „Vorderpfalz“ erforderlich ist.

1.2. Kurzbeschreibung des Projektes

Wesentliches Ziel des Projektes ist die Abschätzung des Wasserbedarfs für die Gemüsebauproduktion in der „Vorderpfalz“ unter Annahme sich zukünftig ändernder klimatischer Rahmenbedingungen sowie deren mögliche Auswirkungen auf den Wasserhaushalt.

Die wichtigsten klimatischen Faktoren, die die Wasserverfügbarkeit beeinflussen, sind der Niederschlag und die stark temperaturabhängige Verdunstung. Ebenfalls von erheblicher Bedeutung werden die Niederschlagsmuster sein. Allgemein wird damit gerechnet dass durch den Klimawandel die Variabilität der Niederschläge zunehmen wird. D.h. es fallen zu bestimmten Jahreszeiten mehr Niederschläge, zu anderen weniger, und es kommt zu stärkeren Gegensätzen zwischen Starkniederschlägen und Trockenphasen.

Die Beschreibung der regionalen und zeitlichen Variabilität der klimatischen Bedingungen im Untersuchungsraum stellt einen notwendigen, statistisch fundierten Bewertungsmaßstab für künftige klimatische Änderungen und Auswirkungen auf den Wasserhaushalt dar. Als Bewertungsgrundlage für diese zukünftigen klimatischen Bedingungen wird daher das bisherige Zeitreihenverhalten der wichtigsten Klimagrößen analysiert.

Ziel ist eine kulturspezifische Berechnung des saisonalen Wasserbedarfs der Vegetationsperioden von 1971 bis 2050 durch Gegenüberstellen der regionalen Wasserbilanz der Ist-Situation und den Projektionen differenziert nach Zeitabschnitten innerhalb der Anbauphase.

Zur Abschätzung der möglichen Bandbreite der künftig möglichen Klimaänderungen sollen sowohl statistische als auch dynamische Regionalmodelle ausgewertet werden. Diese werden durch das globale Modell ECHAM5 angetrieben sowie durch Szenario A1B definiert.

Mit Hilfe des aktuellen Umfangs, der Verfahren und Steuerung der Bewässerung der Region soll mit der Simulation des Boden- und Pflanzenwasserhaushalts die zukünftige Wasserbedarfssituation einzelner Gemüsekulturen in Abhängigkeit des Bodens geschätzt werden. Da-

zu wird die potenzielle Wasserverfügbarkeit modelliert, um den kultur- und saisonbedingten Wasserverbrauch zu erfassen.

Ziele des Projekts sind:

- Analyse des Einflusses der regionalen Klimaprojektionen für den Gemüseanbau in der „Vorderpfalz“ hinsichtlich Wasserhaushalt
- Ermittlung von kulturspezifischen Vulnerabilitäten für die Wasserdefizite.

1.3. Untersuchungsgebiet

Die Vorderpfalz – auch als „Gemüsegarten Deutschlands“ bezeichnet – gilt als das größte, geschlossene Freilandgemüse-Anbaugebiet Deutschlands. Im linksrheinischen Rheintal gelegen, erstreckt sie sich von der Haardt im Westen bis zum Rhein im Osten sowie von Rheinhessen im Norden und der Südpfalz im Süden. Zusammen mit der Südpfalz bildet sie den pfälzischen Anteil der Oberrheinischen Tiefebene.

Der Gemüseanbau in der Vorderpfalz profitiert von den günstigen Boden- und Klimabedingungen. Vorherrschend sind sandige bis lehmige Böden sowie Lössböden - leichte Böden mit guter Kalkversorgung und dem notwendigen Humusgehalt. In Kombination mit einer Jahresdurchschnittstemperatur von etwa 10,9 °C sowie einem Jahresdurchschnittsniederschlag von ca. 550 mm ergeben sich beste Voraussetzungen für eine kontinuierliche und vielfältige gemüsebauliche Nutzung.

1.4. Gemüseanbau in Rheinland-Pfalz

Aktuell wird in Rheinland-Pfalz auf ca. 19 000 ha Gemüse angebaut. Im Vergleich zum Jahr 1988 mit einer Flächennutzung von gerade mal 6739 ha für den Gemüseanbau, entspricht das einem Anstieg von 188%, also fast als einer Verdreifachung der Fläche in den letzten 25 Jahren (siehe Abbildung 1).

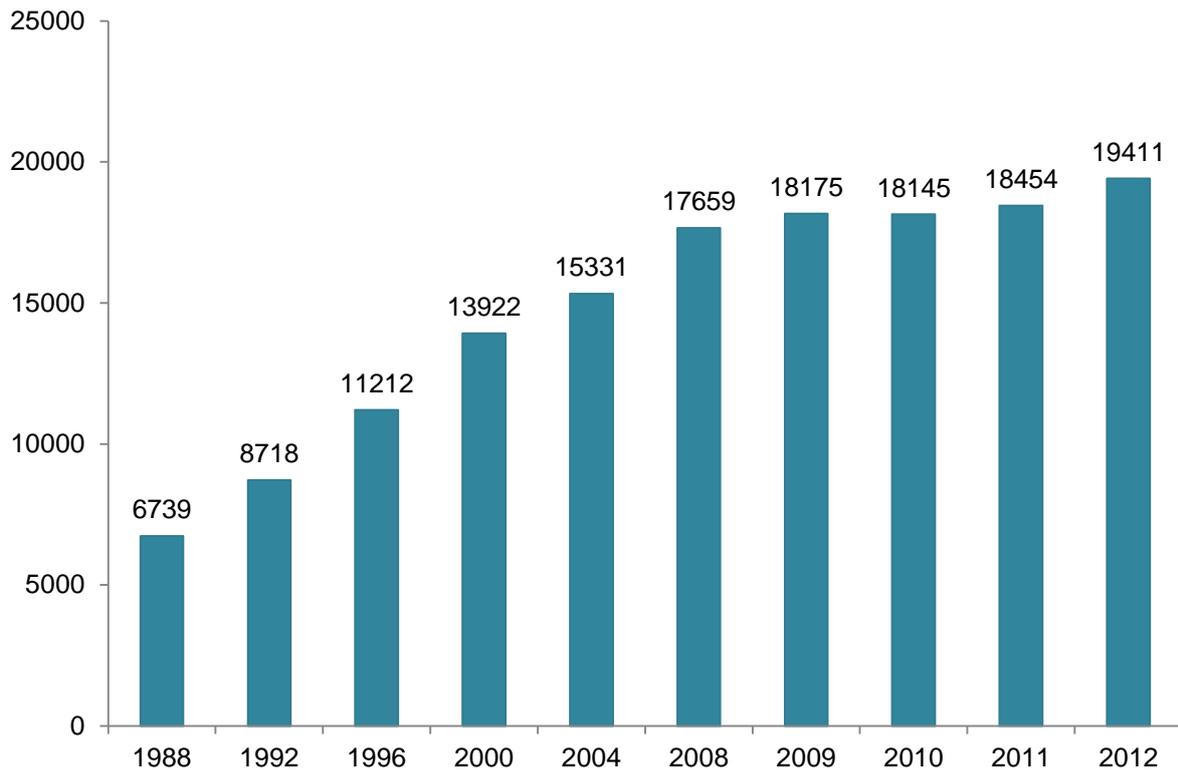


Abbildung 1: Anbaufläche von Gemüse auf dem Freiland (in Hektar) von 1988 bis 2012 (Statistisches Landesamt Rheinland-Pfalz, 2013)

Bezogen auf die Flächennutzung (siehe Tabelle 1) zählen Radies mit einem Anteil von ca. 15% an der Anbaufläche, gefolgt von Möhren und Karotten (8,5%), Bundzwiebeln (8,3%), Blumenkohl (6,7 Prozent), Speisezwiebeln (6,5%), Spargel (6,2 Prozent) und Feldsalat (6,2 Prozent) zu den wichtigsten Gemüsekulturen. Hinsichtlich des Ertrags und der Erntemenge in den Jahren 2010 und 2011 entfiel ein Großteil der Produktionsmenge auf Möhren und Karotten, Radies, Speisezwiebeln und Blumenkohl (siehe Tabelle 2).

Tabelle 1: Für Freilandgemüse im Verkaufsanbau genutzte Fläche (ha) sowie die Anzahl der Betriebe von 1996 bis 2011 (Statistisches Landesamt Rheinland-Pfalz, 2013)

| Verkaufsanbau von Gemüse 1996 - 2011 | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-------------|-------|-------|-------|-------|------|----------|-----|
| Gemüse auf dem Freiland | Anbaufläche | | | | | | Betriebe | |
| | 1996 | 2000 | 2004 | 2008 | 2011 | 2004 | 2008 | |
| | ha | | | | | % | Anzahl | |
| Radies | 1448 | 1816 | 2318 | 2662 | 2735 | 14,8 | 60 | 54 |
| Möhren und Karotten | 1671 | 1845 | 1809 | 1696 | 1576 | 8,5 | 153 | 104 |
| Bundzwiebeln | - | 610 | 693 | 1242 | 1532 | 8,3 | 44 | 44 |
| Blumenkohl | 1113 | 1294 | 1568 | 1336 | 1237 | 6,7 | 142 | 106 |
| Speisezwiebeln | 918 | 931 | 1170 | 1121 | 1196 | 6,5 | 173 | 125 |
| Feldsalat | 140 | 931 | 947 | 1161 | 1143 | 6,2 | 109 | 88 |
| Spargel | 629 | 765 | 944 | 1081 | 1137 | 6,2 | 314 | 209 |
| Sonstige | 5293 | 5730 | 5882 | 7360 | 7899 | 42,8 | - | - |
| insgesamt | 11212 | 13922 | 15331 | 17659 | 18454 | 100 | 738 | 559 |

Tabelle 2: Ertrag sowie Erntemenge von Gemüse in den Jahren 2010 und 2011 nach ausgewählten Arten (Statistisches Landesamt Rheinland-Pfalz, 2013)

| Ernte von Gemüse 2010 und 2011 nach ausgewählten Arten | | | | | | |
|--|--------------|-------|-------|-------------|---------|---------|
| Gemüse | Hektarertrag | | | Erntemenge | | |
| | Ø 2005/2010 | 2010 | 2011 | Ø 2005/2010 | 2010 | 2011 |
| | dt/ha | | | dt | | |
| Möhren und Karotten | 489,9 | 472,9 | 488,2 | 848 262 | 828 672 | 769 380 |
| Radies | 281,7 | 286,3 | 276,5 | 759 377 | 796 574 | 756 255 |
| Speisezwiebeln | 481,9 | 498,6 | 507,2 | 562 313 | 587 407 | 606 781 |
| Blumenkohl | 300,8 | 319,7 | 305,8 | 404 872 | 417 257 | 378 274 |

Laut Statistischem Landesamt Rheinland-Pfalz konzentriert sich der Gemüseanbau 2012 hauptsächlich auf den Rhein-Pfalz-Kreis. Die dort ansässigen 142 Betriebe bauten Gemüse auf ca. 11.500 ha Fläche an, was einen Anteil von 59% an der Gesamtfläche für Freilandgemüseanbau des Landkreises entspricht. Des Weiteren haben sich die Flächennutzung für den Freilandgemüseanbau sowie die Gemüse anbauenden Betriebe in den letzten Jahren kontinuierlich vergrößert. Die durchschnittliche Anbaufläche für Gemüse beträgt pro Betrieb ca. 40 Hektar, im Vergleich dazu lag sie im Jahr 2000 gerade mal bei 15 ha.

1.5. Landwirtschaftliche Bewässerung

Die Klima- und Bodenverhältnisse in der Vorderpfalz sind ausgesprochen günstig für einen hochwertigen Anbau von Gemüse. Allerdings bedingen die relativ geringen natürlichen Niederschläge eine intensive Beregnung in der Vegetationsperiode, um das oftmals auftretende Defizit des pflanzenverfügbaren Bodenwassers auszugleichen.

Bereits in den 1950er Jahren wurde mit künstlicher Beregnung, vorwiegend aus Brunnenwasser, begonnen, was jedoch negative Auswirkungen auf das Grundwasser hatte. Zum Schutz der Grundwasserreserven gründete sich in den 1970er Jahren der Wasser- und Bodenverband zur Beregnung der Vorderpfalz auf Grundlage des „Generalplans zur Beregnung der Vorderpfalz“ von 1961. Heute ist der Verband in der Lage, etwa 13 500 ha der landwirtschaftlich genutzten Fläche zentral mit Beregnungswasser aus dem Altrhein zu versorgen, was einen Anteil von etwa 70% der landwirtschaftlich genutzten Fläche in der Vorderpfalz ausmacht. Die durchschnittliche Beregnungsmenge im Verbandsgebiet liegt bei ca. 15 Mio. m³ pro Jahr.

Im Vergleich dazu macht die beregnungswürdige Fläche in Rheinland-Pfalz ca. 55 000 Hektar der gesamten landwirtschaftlichen Fläche (ca. 700 000 Hektar) aus, wobei weniger als die Hälfte derzeit beregnet werden kann.

2. Struktur des Vorhabens

Das Projekt wurde gemeinsam vom Institut für Gemüsebau der Hochschule Geisenheim und dem Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Rheinpfalz (DLR) bearbeitet. Die für die Simulationen notwendigen meteorologischen Daten wurden zum einen vom Fachzentrum Klimawandel (FZK) in Wiesbaden und zum anderen vom Deutschen Wetterdienst (DWD) zur Verfügung gestellt.

Im Vordergrund des Projektes steht, wie bereits erwähnt, die Beurteilung der klimawandelbedingten Veränderungen hinsichtlich des zukünftigen Wasserbedarfs von Gemüse in der Region Vorderpfalz im Zeitraum von 1971 bis 2050. Um diese beurteilen zu können, ist neben der Erfassung der Ist-Situation bezüglich Gemüseanbau und Zusatzwasserbedarf auch die Auswertung von Projektionen der zukünftigen regionalen Klimaentwicklung notwendig.

Im Rahmen des Projektes wurde aus der Vielzahl möglicher Kombinationen von Global-, und Regionalmodellen sowie verfügbaren SRES-Szenarien die Auswahl auf die Regionalmodelle WETTREG 2010, REMO und C-CLM unter Antrieb des Globalmodells ECHAM5 und Verwendung des Szenario A1B beschränkt, da aufgrund des Projektzeitraums nur ein Bruchteil der möglichen Kombinationen betrachtet werden kann.

Für das Projekt wird eine Auswahl von Gemüsearten auf Grundlage ihres Stellenwertes im Anbau in der Vorderpfalz berücksichtigt. Zu den wichtigsten Kulturen zählen Radies, Möhre, Bundzwiebel und Blumenkohl, weshalb die Analysen auf jene fokussiert sind.

2.1. Datengrundlage

Die genannten Regionalmodelle beruhen auf einer unterschiedlichen Datengrundlage, was für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse als durchaus problematisch anzusehen ist. Den beiden dynamischen Modellen REMO und C-CLM liegen Gitterpunkte zugrunde, während das statistische Modell WETTREG 2010 auf Stationsdaten basiert.

Damit die Region Vorderpfalz in den Simulationen als Gebiet entsprechend abgebildet werden kann, muss vorab eine Auswahl repräsentativer Stationen bzw. Gitterpunkte getroffen werden. Dies ist insofern notwendig, da die Auswertung einzelner Stationen bzw. Gitterpunkte für wissenschaftliche Fragestellungen im Sinne der Repräsentativität der Ergebnisse nicht immer sinnvoll ist, und daher vorzugsweise eine gebietsbezogene Auswertung vorzunehmen ist (Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten 2010). Dies gewährleistet zudem eine gezielte, regionale Auswertung, reduziert gleichermaßen die zu analysierende Datenmenge auf ein sinnvolles Maß und erhöht die Spezifität der Ergebnisse für die Region. Als Richtlinie gelten folgende Aggregationen: optimaler Weise 3x3 Gitterpunkte für REMO sowie 5x5 Gitterpunkte für C-CLM und mehrere, räumlich eng korrelierte Stationen bei WETTREG 2010, die den gleichen Flächenausschnitt abdecken, der durch die Gitterpunkte der dynamischen Modelle vorgegeben wird.

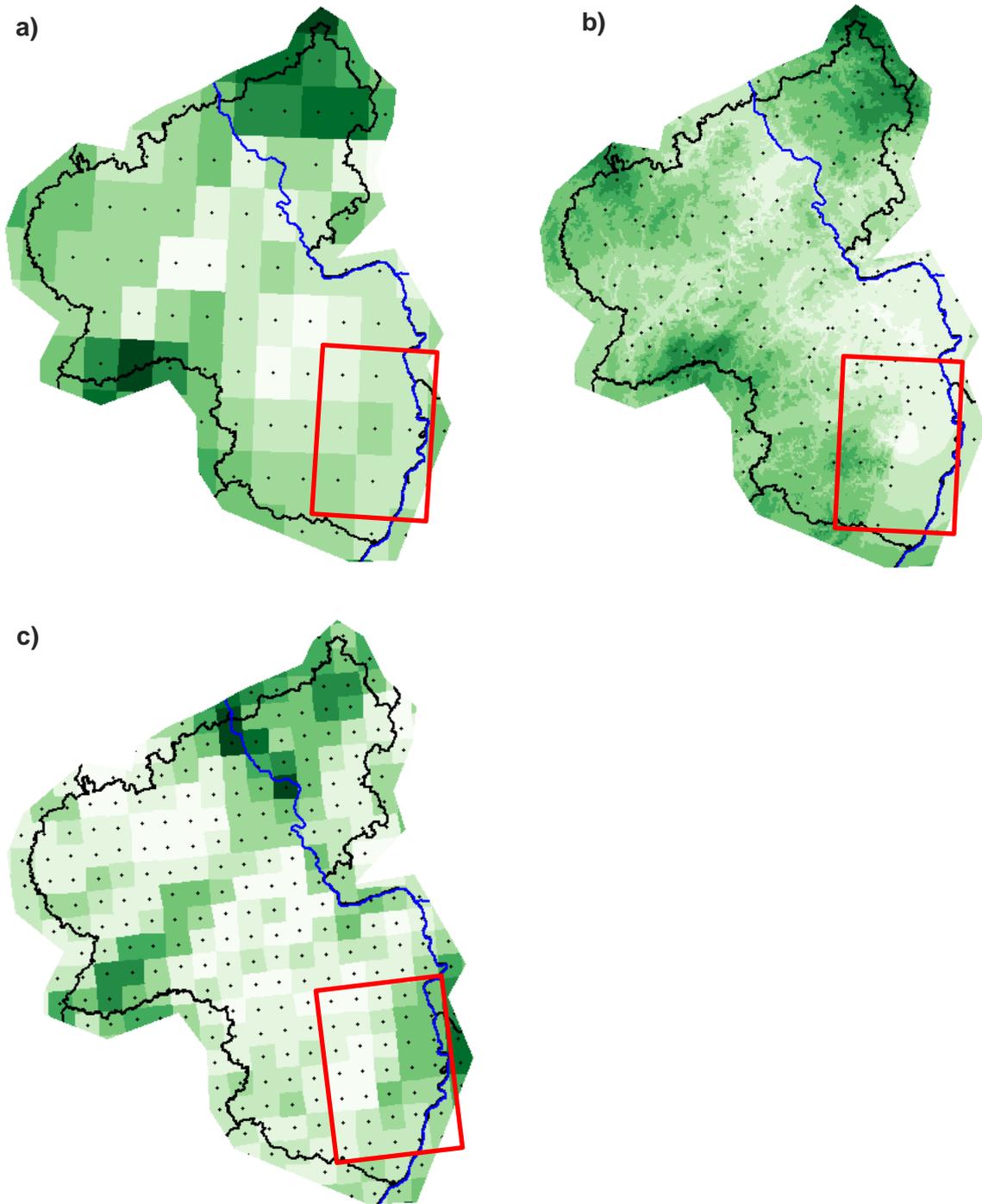


Abbildung 2: Exemplarische Darstellung von IDP-Karten für die Zuordnung der Gitterpunkte bzw. Stationen für die Regionalmodelle a) C-CLM, b) WETTREG 2010 und c) REMO. Die rote Markierung stellt die Region Vorderpfalz dar. Auf Grundlage dieser Gebietsabgrenzung wurde anschließend die Auswahl durchgeführt.

Aufgrund der Tatsache, dass bestimmte klimatische Parameter (Sonnenscheindauer, Globalstrahlung usw.) in den über das Interaktive Diagnose- und Präsentationstool IDP verfügbaren REMO Daten nicht verfügbar sind, diese allerdings für die Berechnung der Gras-Referenzverdunstung nach FAO 56 benötigt werden, erfolgte eine Datenabfrage direkt vom DWD Server, wobei die Koordinaten der Region für die Auswahl der jeweiligen Gitterpunkte herangezogen wurden.

Unter Berücksichtigung der genannten Aspekte ergibt sich somit eine Auswahl von 21 Stationen für WETTREG 2010, von 9 Gitterpunkten für C-CLM und 72 Gitterpunkten für REMO für die Region Vorderpfalz (siehe Tab. A1 im Anhang).

2.2. Simulationen

Die auf Zeitreihen basierenden Simulationen der Regionalmodelle C-CLM, REMO und WETTREG 2010, angetrieben durch das Globalmodell ECHAM5, werden in Bezug auf die wesentliche Fragestellungen wie **Niederschlags- und Temperaturentwicklung**, die daraus resultierende **Klimatische Wasserbilanz** und **Trockenheitsbelastung** hin ausgewertet. Der Schwerpunkt der Auswertungen liegt dabei auf den Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag und potentielle Verdunstung im Hinblick auf ihr Verhalten im Zeitraum von 1971 bis 2050, um somit eine Einschätzung hinsichtlich zukünftiger Entwicklung der klimatischen Eingangsgrößen für landwirtschaftliche Bewässerung zu gewinnen.

Die Rahmenbedingungen sind durch das vom IPCC beschriebene Szenario A1B definiert. Dieses wird hinsichtlich der Entwicklung als moderat angesehen und geht von einer weiter steigenden Treibhausgaskonzentration, einem raschen Wirtschaftswachstums, einem zukünftig rückläufigen Weltbevölkerungsmaximum im 21. Jahrhundert sowie einer schnellen Einführung von neuen, effizienten Technologien.

Für die Beurteilung klimatischer Trends, hinsichtlich einer statistisch abgesicherten Auswertung, werden üblicherweise 30jährige Zeiträume ausgewertet, da die Ergebnisse der Klimamodelle keine exakten Vorhersagen sind. Dabei stehen die Mittelwerte der Klimaparameter im Vordergrund. Aus diesem Grund wird eine Einteilung der Daten in die 30jährigen Perioden 1971 – 2000 und 2021 – 2050 vorgenommen. Die Referenzperiode 1971 – 2000 wird wegen der besseren Datenlage zugrunde gelegt und die zukünftige Periode 2021 – 2050 anhand der Referenzperiode 1971 – 2000 verglichen.

In einigen Fällen kann es jedoch von Bedeutung sein, die Variabilität des Klimas auf verschiedenen Zeitskalen zu betrachten. Da sich der Simulationszeitraum „nur“ bis 2050 er-

streckt, erfolgt also zusätzlich eine Auswertung der Dekaden, um die Variabilität der klimatischen Parameter in Bezug auf die Fragestellungen hinreichend darstellen zu können.

2.2.1. Niederschlagsverteilung und niederschlagsfreie Zeiträume

Aus landwirtschaftlicher Sicht stehen neben einer optimalen Entwicklung der Kulturen die Ertrags- und Qualitätssicherung im Vordergrund. Insbesondere Gemüsekulturen weisen einen sehr hohen Wasserbedarf auf. Allerdings ist die Verfügbarkeit von natürlichem Niederschlag nur in wenigen Anbauregionen ausreichend, um den erforderlichen Wasserbedarf zum Zwecke eines hohen Ertrags- und Qualitätsniveaus zu decken. Die Verfügbarkeit natürlicher Niederschläge bestimmt also, inwiefern die Kulturen zusätzlich mit Wasser versorgt werden müssen. Da eine wirtschaftliche Produktion von Gemüse oftmals nur durch Zusatzbewässerung gewährleistet werden kann, wird Gemüse generell als berechnungsbedürftig eingestuft. Aufgrund dessen ist die Untersuchung der Variabilität von Niederschlagsereignissen sowie der zukünftigen, maximalen niederschlagsfreien Zeiträume innerhalb der Vegetationsperiode sowie von großem Interesse.

Für die Analyse der Niederschlagsverteilung werden aus den vorliegenden Klimadaten zunächst für jede einzelne Station bzw. Gitterpunkt monatliche Niederschlagssummen berechnet und dann, zum einen basierend auf den Dekaden und zum anderen auf den 30jährigen Perioden, gruppiert. Im Anschluss erfolgt eine Berechnung des Mittelwerts für die einzelnen Monate bezogen auf den jeweiligen Zeitabschnitt (Dekade bzw. 30jährige Periode) über alle betrachteten Stationen bzw. Gitterpunkte hinweg. Somit erhält man eine monatliche Niederschlagssumme sowohl im zeitlichen als auch im Flächenmittel. Zur Beurteilung der zukünftigen Entwicklung ist die Veränderung der mittleren monatlichen Niederschlagssummen zwischen den Dekaden sowie den 30jährigen Perioden 1971 – 2000 und 2021 – 2050 als prozentuale Differenz dargestellt.

Als niederschlagsfrei werden die Tage definiert, an denen kein Niederschlag gefallen ist, sprich Niederschlag = 0mm. Ein niederschlagsfreier Zeitraum ist demnach die Anzahl der fortlaufenden Tage ohne Niederschlag. Für die Auswertung hinsichtlich der Trockenheitsbelastung wird die maximale Anzahl fortlaufender Tage ohne Niederschlag auf unterschiedlichen Zeitskalen sprich Grenzen betrachtet:

1. auf Monatsbasis, wobei hier das Maximum, welches im Monat vorkommt, betrachtet wird
2. innerhalb der Vegetationsperiode, also das Maximum des niederschlagsfreien Zeitraums innerhalb des Zeitabschnitts von März bis Oktober

Somit wird einerseits die Entwicklung im Jahresverlauf und andererseits speziell der Zeitraum der Vegetationsperiode (März bis Oktober) betrachtet.

Hintergrund für die Betrachtung der Maxima sowie der Einteilung in unterschiedliche Betrachtungszeiträume ist, dass die Variabilität ausreichend wiedergegeben werden kann. Üblicherweise würden die niederschlagsfreien Zeiträume, also die Anzahl der fortlaufenden Tage ohne Niederschlag über die 30jährigen Perioden bzw. die Dekaden gemittelt. Dies hätte jedoch zur Folge, dass sich die Aussagen zu einzelnen Extremereignissen stark relativieren würden, also beispielsweise ein niederschlagsfreier Zeitraum von 25 Tagen im Mittelwert als Information verloren ginge. Des Weiteren wird neben den Monaten auch der Zeitraum der Vegetationsperiode als kontinuierlicher Zeitabschnitt von März bis Oktober betrachtet, da die Auswertung auf Monatsbasis gewisse Ereignisse an den Monatsgrenzen abschneidet, das heißt der maximale niederschlagsfreie Zeitraum in einem Monat kann nur 30 bzw. 31 Tage lang sein, obwohl die ersten Tage des nächsten Monats durchaus auch niederschlagsfrei sein können und sich fortlaufend ein niederschlagsfreier Zeitraum von bspw. 37 Tagen ergeben würde.

Je nach verwendetem Regionalmodell erfolgt dann aber wieder die Berechnung des Mittelwertes über alle Stationen bzw. Gitterpunkte, um die Information bezüglich der Region, also das Flächenmittel, zu erhalten. Abschließend erfolgt dann wieder der Vergleich zwischen den zukünftigen Perioden / Dekaden und der Referenz.

Zusätzlich wird die Häufigkeitsverteilung der Maxima pro Monat über die jeweils gesamte Periode / Dekade und alle die Vorderpfalz abbildenden Stationen bzw. Gitterpunkte ausgewertet, ohne eine Mittelwertbildung über den Zeitraum und die Fläche. Dies ist insofern sinnvoll, um die gesamte Spannbreite möglicher Trockenheitsbelastung durch ausbleibende Niederschläge erfassen zu können. Dies hat den Vorteil, dass die Darstellung somit auf tatsächlich simulierten niederschlagsfreien Zeiträumen basiert und damit einhergehend eine genauere Einschätzung dieser und der damit verbundenen, in Zukunft möglicherweise auftretenden Anforderung hinsichtlich einer zusätzlichen Bewässerung möglich ist.

2.2.2. Grasreferenz-Verdunstung nach FAO 56

Die Verdunstung spielt für die Beurteilung zur Abschätzung des Wasserverlusts eine wichtige Rolle, da sie eine entscheidende Größe für die pflanzliche Produktion und den Bodenwasserhaushalt darstellt. Insbesondere bei der Bewässerungssteuerung muss die Verdunstung von Pflanzenbeständen berücksichtigt werden.

Die direkte Bestimmung der Verdunstung ist in der Regel nur mit relativ großem Aufwand möglich. Daher wird die Verdunstung meistens mit Hilfe eines Berechnungsverfahrens auf Grundlage von Formeln ermittelt.

In diesem Projekt erfolgt die Berechnung der Verdunstung nach FAO 56 Grasreferenzverdunstung (Allen *et al.* 1998) auf Tagesbasis für den Zeitraum von 1971 – 2050 mit den simulierten klimatischen Daten der beiden Regionalmodelle REMO und C-CLM. Das Regionalmodell WETTREG 2010, welches auf Stationsdaten basiert, umfasst für die Region Vorderpfalz fast ausschließlich Niederschlagsstationen und keine Klimastationen, die die zur Berechnung der Grasreferenzverdunstung benötigten klimatischen Parameter erfassen. Die Anzahl der verfügbaren Klimastationen beträgt lediglich 4 von 21 und wären für eine repräsentative Darstellung der Vorderpfalz unzureichend. Des Weiteren sind die Daten in den Aufzeichnungen unvollständig, sodass keine kontinuierliche Zeitreihe der Verdunstung berechnet werden kann.

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

| | | |
|-------|-------------|--|
| wobei | ET_0 | Grasreferenzverdunstung [mm/Tag] |
| | R_n | Nettoglobalstrahlung [MJ/m ² Tag] |
| | G | Bodenwärmestrom [MJ/m ² Tag] |
| | T | Tagesmitteltemperatur [°C] |
| | u_2 | Windgeschwindigkeit in 2m Höhe [m/s] |
| | e_s | Sättigungsdampfdruck [kPa] |
| | e_a | aktueller Dampfdruck [kPa] |
| | $e_s - e_a$ | Sättigungsdampfdruckdefizit [kPa] |
| | Δ | Anstieg der Sättigungsdampfdruckkurve [kPa/°C] |
| | γ | Psychrometerkonstante [kPa/°C] |

Die Verdunstungswerte werden im Anschluss mit den simulierten Niederschlagsdaten der Zeitreihen verrechnet, resultierend in der klimatischen Wasserbilanz (siehe 2.2.3).

2.2.3. Klimatische Wasserbilanz (KWB) und kulturspezifischer Bewässerungsbedarf

Um abschätzen zu können, welche Auswirkungen der Klimawandel auf den zukünftigen Bewässerungsbedarf von Gemüse hat, wird die klimatische Wasserbilanz simuliert. Sie stellt eine Größe dar, die maßgeblich zur Bewässerungssteuerung im Freilandgemüsebau herangezogen wird. Die KWB berechnet sich aus der Differenz von Niederschlag und der Evapotranspiration des Bodens und des Pflanzenbestands.

Bei der Bilanzierung der klimatischen Wasserbilanz spielen der Wasserbedarf der betrachteten Kultur und der Vorrat an Bodenwasser sowie dessen Verfügbarkeit eine wesentliche Rolle. Ein Ansatz, der auf der Auswertung der KWB beruht, ist die so genannte „Geisenheimer Bewässerungssteuerung“, bei dem pflanzenbauliche Korrekturfaktoren (k_c Werte) einbezogen werden. Diese k_c Faktoren berücksichtigen, dass sich verschiedene Gemüsearten hinsichtlich der KWB in der morphologischen Entwicklung und daraus resultierend im zeitlichen und mengenmäßigen Wasserbedarf unterscheiden.

Für die KWB werden diese k_c Werte anhand von Entwicklungsmerkmalen der Pflanzen definiert. Somit wird der entwicklungspezifische Wasserbedarf der jeweiligen Kultur in einem Koeffizienten zusammengefasst, was eine wesentliche Präzisierung der klimatischen Wasserbilanz darstellt. Die aus meteorologischen Daten berechnete Verdunstung (ET_0) wird mit diesem Faktor multipliziert.

Um eine möglichst praxisnahe Simulation zu gewährleisten, wird ein gestaffelter (satzweiser) Anbau der unterschiedlichen Kulturen angenommen. Die Pflanz- bzw. Saatzeitpunkte und die Kulturdauer sind in Tabelle 3 ersichtlich. Daneben wird eine praxisübliche Bedeckung mit Vlies angenommen. Dies ist in den ersten Sätzen Standard und dient einer Verfrüfung der Kulturen, da die Durchschnittspreise zu Saisonbeginn höher sind als zu einem späteren Zeitpunkt. Die Werte für eine durchschnittliche Bedeckungszeit sind ebenfalls in Tabelle 3 angegeben. Aus langjährigen Erfahrungen und aus Bodenfeuchtemessungen ist bekannt, dass die Evapotranspiration unter den praxisüblichen Bedeckungen mit Vlies ca. $2/3$ der Werte von unbedeckten Flächen beträgt. Bei der Berechnung der Tagesbilanzen wird dies berücksichtigt, indem von dem jeweiligen Tageswert nur $2/3$ angerechnet werden.

Tabelle 3: Kulturdauer der einzelnen Sätze und Auflagedauer der Vliesabdeckung

| | Blumenkohl | | Bundzwiebel | | Radies | | Möhre | |
|----------------|----------------------|------------------|----------------------|------------------|----------------------|------------------|----------------------|------------------|
| | Kulturdauer | Bedeckung [Tage] |
| Satz 1 | 03. März – 03. Juni | 56 | 15. Feb. – 01. Juni | 30 | 15. Feb. – 11. April | 55 | 15. Feb. – 10. Juni | 89 |
| Satz 2 | 17. März – 04. Juni | 42 | 01. März – 05. Juni | | 01. März – 22. April | 41 | 01. März – 01. Juli | 75 |
| Satz 3 | 31. März – 10. Juni | 28 | 01. April – 20. Juni | | 15. März – 29. April | 27 | 01. April – 15. Juli | 44 |
| Satz 4 | 14. April – 20. Juni | 14 | 15. April – 01. Juli | | 01. April – 11. Mai | 10 | 15. Juni – 15. Sept. | |
| Satz 5 | 21. April – 26. Juni | 7 | 01. Mai – 09. Juli | | 15. April – 20. Mai | | 01. Juli – 01. Okt. | |
| Satz 6 | 05. Mai – 07. Juli | | 15. Juni – 01. Sept. | | 01. Mai – 31. Mai | | 10. Juli – 10. Okt. | |
| Satz 7 | 12. Mai – 12. Juli | | 15. Juli – 10. Okt. | | 15. Mai – 09. Juni | | | |
| Satz 8 | 26. Mai – 26. Juli | | | | 01. Juni – 23. Juni | | | |
| Satz 9 | 02. Juni – 02. Aug. | | | | 15. Juni – 06. Juli | | | |
| Satz 10 | 16. Juni – 18. Aug. | | | | 01. Juli – 22. Juli | | | |
| Satz 11 | 23. Juni – 26. Aug. | | | | 15. Juli – 06. Aug. | | | |
| Satz 12 | 07. Juli – 13. Sept. | | | | 01. Aug. – 26. Aug. | | | |
| Satz 13 | 14. Juli – 22. Sept. | | | | 15. Aug. – 13. Sept. | | | |
| Satz 14 | 28. Juli – 12. Sept. | | | | 01. Sept. – 06. Okt. | | | |
| Satz 15 | 04. Aug. – 23. Okt. | | | | 10. Sept. – 18. Okt. | | | |
| Satz 16 | | | | | 15. Sept. – 27. Okt. | | | |

Die Korrekturfaktoren (k_c Werte) für die unterschiedlichen Entwicklungsstadien der Kulturen sind in Tabelle 4 aufgeführt. Um die Umstellungszeitpunkte von einem Entwicklungsstadium auf das nächste festzulegen, sowie die Kulturdauer möglichst genau abzuschätzen, wurden Datensätze des Versuchsbetriebes Queckbrunnerhof ausgewertet. Anhand der Daten konnte das komplette Kulturspektrum und der komplette Vegetationszeitraum abgedeckt werden. Die Datensätze zeigen ein sehr genaues Bild, da auf diesem Versuchsbetrieb seit 1991 die Bewässerung nach der Klimatischen Wasserbilanz gesteuert wird und damit die Umstellungstermine dokumentiert sind.

Tabelle 4: Für die Kalkulation verwendete k_c Faktoren

| Kultur | Entwicklungsstadium 1 ab... | k_c | Entwicklungsstadium 1 ab... | k_c | Entwicklungsstadium 1 ab... | k_c |
|-----------------------------|-----------------------------|-------|-----------------------------|-------|-----------------------------|-------|
| Blumenkohl | BBCH 12 | 0,7 | BBCH 18 | 1,1 | BBCH 37 | 1,7 |
| Bundzwiebel | BBCH 09 | 0,7 | BBCH 14 | 1,0 | BBCH 16 | 1,7 |
| Möhre | BBCH 09 | 0,4 | BBCH 15 | 0,8 | BBCH 43 | 1,1 |
| Radies (Frühjahr-Herbst) | BBCH 09 | 0,7 | BBCH 13 | 1,0 | | |
| Radies (Sommer) | BBCH 09 | 1,1 | BBCH 13 | 1,5 | | |

Da sich zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Vegetationsperiode unterschiedlich viele Sätze in Kultur befinden, erfolgt die Auswertung auf Grundlage von Jahresmittelwerten. Die Daten für die Monate sind bezüglich des Anbauumfanges in jedem Jahr gleich. Dies bedeutet, dass in jedem Jahr zu einem gewissen Stichtag derselbe Anbauumfang festgelegt ist. Annahmen hinsichtlich möglicher Verkürzung oder Verlängerung von Anbauzeiträumen werden nicht unterstellt. Ebenso werden die gleichen Aussaatzeitpunkte festgelegt. Die in der Praxis vorkommenden Verlegungen des Aussaattermins in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte können nicht berücksichtigt werden.

Berechnet wurde jeweils der Jahresmittelwert des Bewässerungsbedarfs. Als Größe dient die Angabe in L/m^2 Anbaufläche (mm Wasserbedarf). Um diese Jahresmittelwerte zu berechnen wurden zunächst die Werte für jeden Gitterpunkt berechnet und anschließend über die gesamte Region gemittelt. Diese Mittelwerte wurden dann ausgewertet und als mittlerer jährlicher Bewässerungsbedarf für die Region angegeben.

3. Ergebnisse

Die Wasserverfügbarkeit spielt für die landwirtschaftliche Produktion eine große Rolle. Dabei ist die Verfügbarkeit von Wasser abhängig von den klimatischen Bedingungen, insbesondere von der jährlichen Höhe sowie der räumlichen und zeitlichen Verteilung der Niederschläge, von der Verdunstung, aber auch vom Speichervermögen des Bodens. Zudem wird der Wasserbedarf von der Kultur selbst als auch von der Effizienz der eingesetzten Bewässerungstechnik bestimmt.

Die Landwirtschaft zählt weltweit zu den größten Verbrauchern von Wasser. Laut FAO werden auf rund 260 Mio. Hektar, was 17% der landwirtschaftlich genutzten Fläche ausmacht, 70% des weltweiten Wasseraufkommens für Bewässerung verbraucht. Regional ergeben sich aufgrund der klimatischen Bedingungen allerdings starke Unterschiede. In Rheinland-Pfalz liegt der Anteil landwirtschaftlicher Wasserentnahme bei ca. 1% des Gesamtwasserverbrauchs und spielt somit eine eher untergeordnete Rolle. Eine Zusatzbewässerung dient vor allem der Ertragssicherheit beregungswürdiger Kulturen und der Deckung von Wasserdefiziten während der Vegetationsperiode.

Speziell im Gemüseanbau gewinnt die Verfügbarkeit von Wasser zur Bewässerung durch den sich ankündigenden Klimawandel an Bedeutung, da vorwiegend Ertrags- und Qualitätssicherung im Vordergrund stehen. Daraus ergibt sich für den Gemüseanbau die Herausforderung, Anpassungsstrategien für den Anbau unter sich verändernden klimatischen Bedingungen zu entwickeln. Voraussetzung dafür ist eine weitgehend abgesicherte Vorstellung von den Auswirkungen des Klimas und seiner Veränderung.

Wie sich der klimatische Wandel in der Vorderpfalz mit Schwerpunkt Wasserbedarf für Gemüseanbau nach den betrachteten Simulationen darstellt, wird im Folgenden näher erläutert.

3.1. Regionale Analyse und Bewertung der zukünftigen Klimaentwicklung für die Vorderpfalz

Unter Berücksichtigung, dass die vollständige Bandbreite möglicher Klimaveränderungen nur in einer Betrachtung möglichst vieler Realisationen abgedeckt werden kann, muss sich im Projekt aufgrund des begrenzten Zeitrahmens für die Bearbeitung auf die Simulationen der Regionalmodelle REMO, C-CLM und WETTREG 2010 und das Szenario A1B beschränkt werden. In diesem Projekt wurden mögliche Auswirkungen einer Klimaänderung auf den Wasserbedarf von Gemüse in der Vorderpfalz für den Zeitraum 1971 bis 2050 untersucht.

3.1.1. Zeitliche Niederschlagsverteilung

Beim Niederschlag ergibt sich hinsichtlich des Klimaänderungssignals regional ein stark differenziertes Bild. Die Analyse der Klimasimulationen für die Region der Vorderpfalz zeigen, unabhängig vom Modell, in der Jahresbilanz nur einen schwach positiven Trend, das heißt die Summe der jährlichen Niederschläge bleibt weitgehend unverändert. Dies bedeutet jedoch nicht, dass die Niederschlagssummen nicht zwischen den einzelnen Jahren variieren können. Ursache ist die natürliche Variabilität der Niederschläge.

Im Jahresverlauf wird allerdings eine zeitliche Verschiebung der Niederschlagsverteilung deutlich, die saisonal stark ausgeprägt ist. Alle innerhalb der Studie verwendeten regionalen Klimamodelle simulieren bis 2050 eine Umverteilung von abnehmenden Sommerniederschlägen hin zu zunehmenden Winterniederschlägen, jedoch unterscheiden sich die Regionalmodelle in der absoluten Höhe deutlich (Abb. 3 bis 5).

Die Simulation der Niederschlagsverteilung für die Region der Vorderpfalz mit dem Modell C-CLM (Abb. 3) zeigt im Vergleich der Periode 2021 – 2050 mit dem Referenzzeitraum eine Abnahme der sommerlichen Niederschläge bis zu 24%, während die Winterniederschläge bis zu 19% zunehmen. Insgesamt wird deutlich, dass zukünftig besonders in der Zeit von April bis September, also innerhalb der Vegetationsperiode, weniger Niederschläge simuliert werden. Zudem ist die Abnahme der Niederschläge innerhalb der Vegetationsperiode stärker ausgeprägt als die jeweilige Zunahme außerhalb dieses Zeitraums.

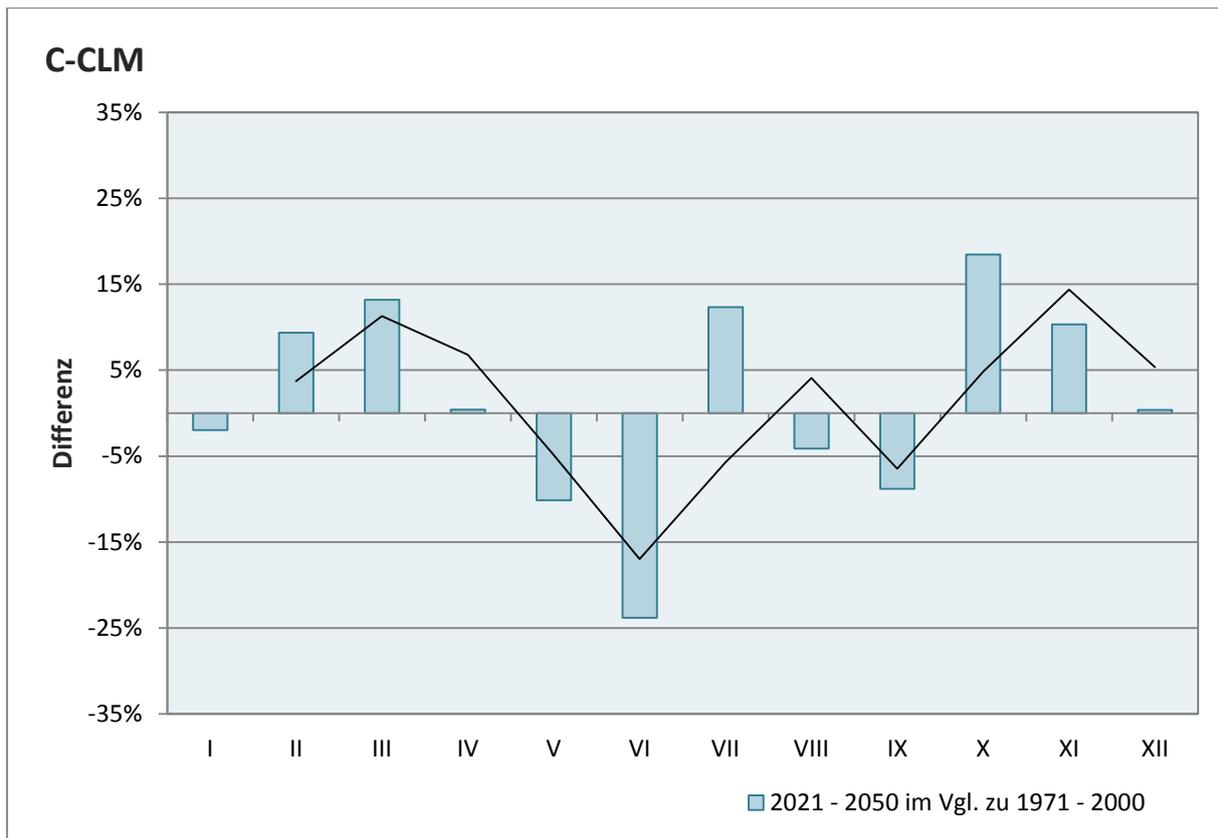


Abbildung 3: Simulierte Niederschlagsverteilung für die Vorderpfalz (Flächenmittel) im Jahresverlauf mit dem Regionalmodell C-CLM (Szenario A1B / ECHAM 5). Prozentuale Differenz der mittleren monatlichen Niederschlagssummen basierend auf dem Vergleich der modellierten zukünftigen Periode 2021 – 2050 mit der Referenzperiode 1971 – 2000.

Das Regionalmodell REMO zeigt ein ähnliches Bild, wobei hier die Zunahmen außerhalb der Vegetationsperiode wesentlich höher ausfallen als bei C-CLM und im Gegensatz dazu die sommerliche Abnahme eher gering ausfällt (Abb. 4). Die Simulation der Niederschlagsverteilung mit diesem Modell zeigt ebenfalls eine zukünftige saisonale Umverteilung, wobei die Niederschläge jedoch erst ab Mai (ca. 2%) abnehmen. Die sommerliche Abnahme der Niederschläge beträgt lediglich bis zu 7% und bereits ab August tritt eine erneute Zunahme ein. Die nochmals auftretende Reduzierung im September ist mit 2,6% vernachlässigbar klein. Die winterlichen Niederschläge außerhalb der Vegetationsperiode weisen zukünftig jedoch einen erhöhten Anstieg auf. Von Februar bis April und von Oktober bis Dezember wird eine zukünftig Zunahme von bis zu 33% simuliert.

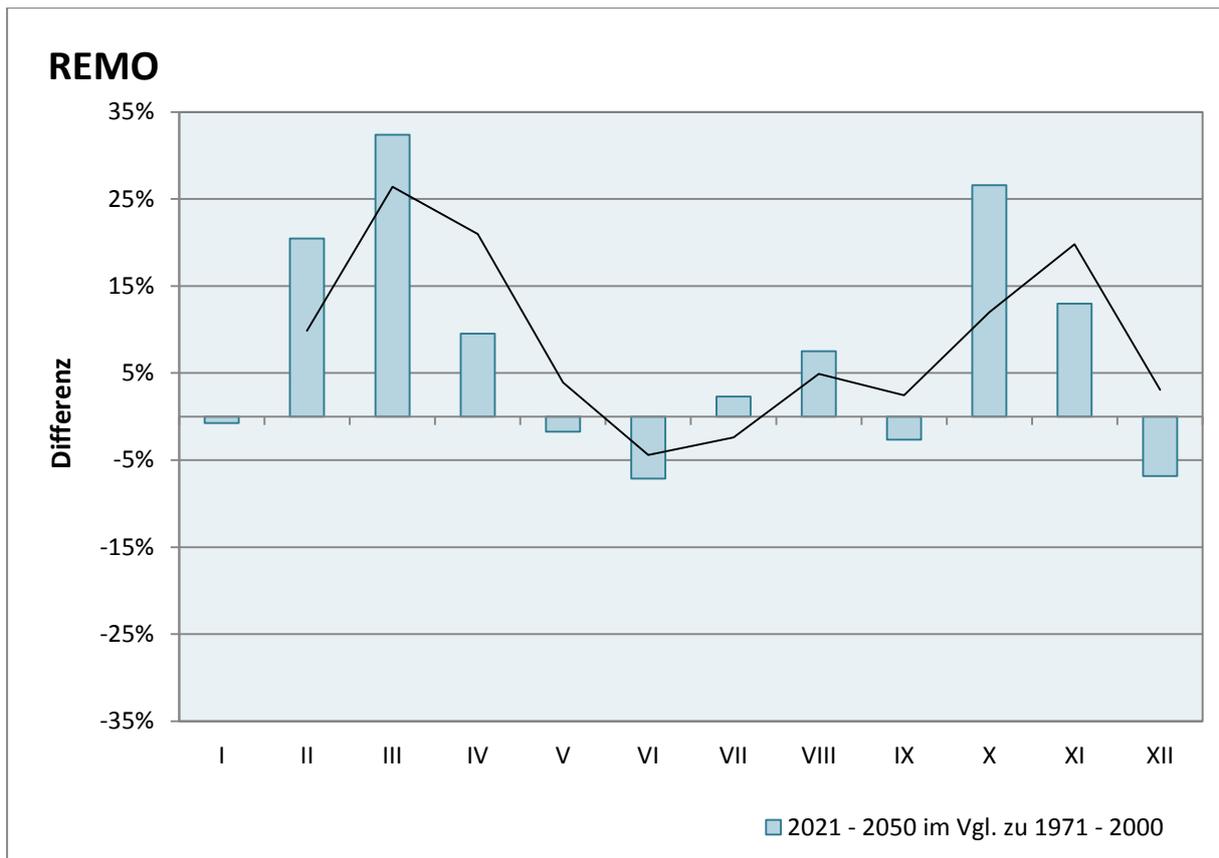


Abbildung 4: Simulierte Niederschlagsverteilung für die Vorderpfalz (Flächenmittel) im Jahresverlauf mit dem Regionalmodell REMO (Szenario A1B / ECHAM 5). Prozentuale Differenz der mittleren monatlichen Niederschlagssummen basierend auf dem Vergleich der modellierten zukünftigen Periode 2021 – 2050 mit der Referenzperiode 1971 – 2000.

Das stationsbasierte Modell WETTREG 2010 simuliert ebenfalls eine Umverteilung, zeigt hinsichtlich der Ausprägung der Umverteilung allerdings ein anderes Bild (Abb. 5). Es lässt sich keine eindeutige Zuordnung einer Niederschlagsabnahme innerhalb der Vegetationsperiode (März bis Oktober) und im Umkehrschluss einer Zunahme außerhalb der Vegetationsperiode (November bis Februar) erkennen. Auffällig ist, dass insgesamt eher eine Abnahme der monatlichen Niederschlagssummen im Jahresverlauf für die zukünftige Periode 2021-2050 im Vergleich zur Referenz simuliert wird. Mit diesem Modell wird eine zukünftige Niederschlagszunahme für die Monate Januar, April, November und Dezember simuliert, wobei diese lediglich bis zu maximal 5% beträgt. In allen anderen Monaten nehmen die Niederschläge zukünftig ab, das Maximum liegt hierbei im Monat September mit -12%.

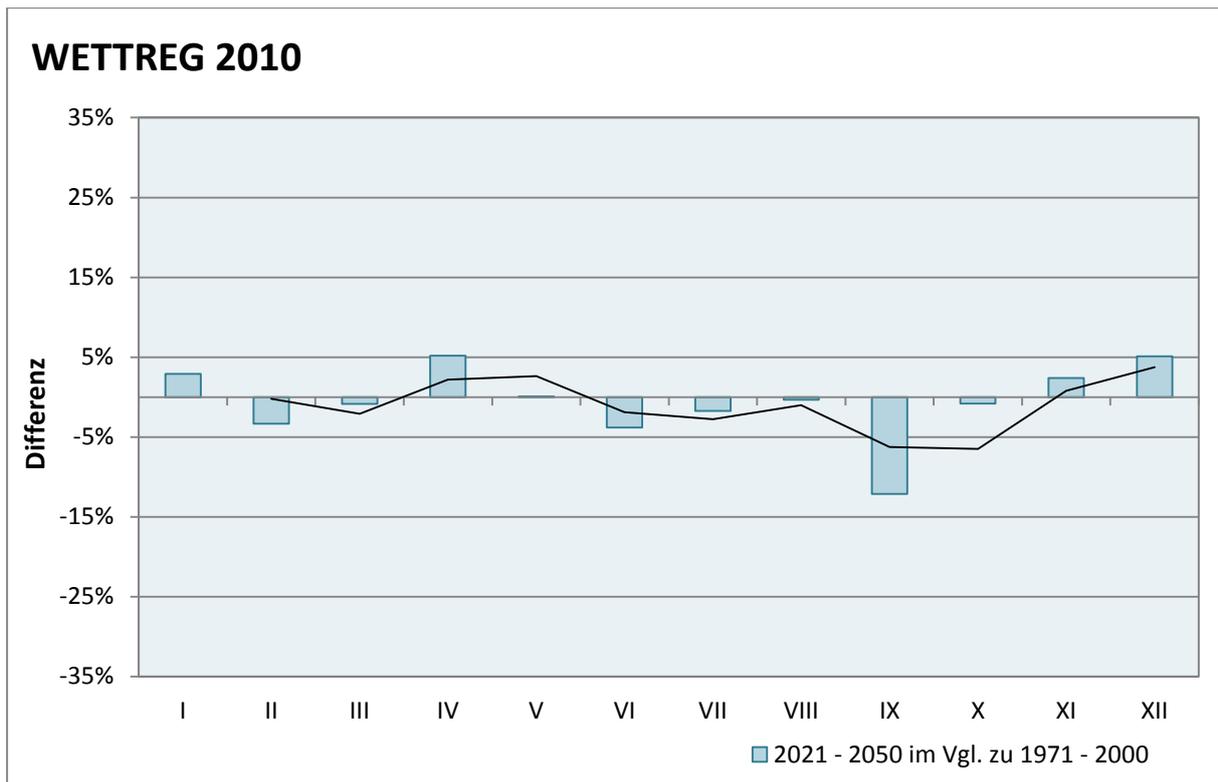


Abbildung 5: Simulierte Niederschlagsverteilung für die Vorderpfalz (Flächenmittel) im Jahresverlauf mit dem Regionalmodell WETTREG 2010 (Szenario A1B / ECHAM 5). Prozentuale Differenz der mittleren monatlichen Niederschlagssummen basierend auf dem Vergleich der modellierten zukünftigen Periode 2021 – 2050 mit der Referenzperiode 1971 – 2000.

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass die Analyse der Niederschläge in der Vorderpfalz bis 2050 weniger eine Veränderung der jährlichen Niederschlagssumme, als vielmehr eine Veränderung in der saisonalen Verteilung aufzeigt. Dabei lassen die dynamischen Regionalmodelle C-CLM und REMO eher eine eindeutige Umverteilung der Niederschläge vom Sommer in den Winter bis 2050 erkennen, während das stationsbasierte Modell WETTREG 2010 insgesamt eher eine Abnahme über das Jahr hinweg simuliert. Des Weiteren umfasst die Umverteilung der beiden dynamischen Modelle auch einen größeren Wertebereich als es bei WETTREG 2010 der Fall ist. C-CLM simuliert eine Niederschlagssummenverteilung im Bereich von +19% bis -24%, REMO von +33% bis -7%. Bei WETTREG fällt der Bereich wesentlich kleiner aus, lediglich von +5% bis -12%. Dennoch zeigen die Ergebnisse der drei Modelle im Ansatz, dass zukünftig eine wenn auch geringfügige Abnahme der Niederschläge, speziell in der Vegetationsperiode, auftreten könnte.

Einen weiteren wichtigen Aspekt für die Landwirtschaft stellt die von den Modellen simulierte Niederschlagszunahme in den Monaten zu Beginn (vorwiegend März und April) sowie zum

Ende der Vegetationsperiode (ab Oktober) dar, wenn auch je nach Modell unterschiedlich stark ausgeprägt. Diese erhöhten Niederschläge sind zwar willkommen, um das sommerliche Defizit auszugleichen, stellen die Praxis aber durchaus vor einige Probleme. Zu viel Niederschlag kann zu einer Vernässung der landwirtschaftlich genutzten Flächen führen, sodass diese nicht befahrbar sind. Einerseits kann dies dazu führen, dass wichtige Kulturarbeiten zu Beginn der Vegetationsperiode nicht durchgeführt werden können, andererseits kann es zu deutlichen Ernteverzögerungen kommen. Diese könnten dann wiederum sowohl die Ertragserwartungen als auch die Qualitäten reduzieren.

3.1.2. Niederschlagsfreie Zeiträume

Aus landwirtschaftlicher Sicht ist die zukünftige Dauer niederschlagsfreier Perioden, definiert als maximale Anzahl fortlaufender Tage ohne Niederschlag (0 mm), vorrangig während der Vegetationsperiode von großem Interesse, da die Verfügbarkeit von natürlichem Niederschlag die zusätzliche Wasserversorgung der Kulturen mitbestimmt.

Die Modellierung mit C-CLM (Abb. 6) zeigt ab April eine Zunahme der „fortlaufenden Tage ohne Niederschlag“ für den Zeitraum 2021 – 2050 im Vergleich zur Referenz 1971 – 2000. Zu Beginn der Vegetationsperiode im März liegen die Werte des Zeitraums 2021 – 2050 unterhalb der Referenzwerte, d.h. es wird zukünftig eine Zunahme der Niederschläge zu Vegetationsbeginn simuliert, wie er sich bereits in der Simulation Niederschlagsverteilung (s. Abb. 3) abgezeichnet hat. Zum Ende der Vegetationsperiode, ab Oktober, erreichen die Werte wieder das Referenzniveau und unterschreiten diese minimal. Dies bedeutet eine Annäherung der niederschlagsfreien Zeiträume zum Ende der Vegetationsperiode an die Verhältnisse in 1971 – 2000. Die Länge der niederschlagsfreien Zeiträume für die Zukunftsperiode 2021 – 2050 nimmt ab April stetig zu und erreicht ihr Maximum im September, bevor ein Rückgang auf Referenzniveau zu verzeichnen ist. Im Vergleich zum Referenz 1971 – 2000 wird eine zunehmende Länge niederschlagsfreier Zeiträume bis zu 30% simuliert. Liegt der Fokus hauptsächlich auf der Vegetationsperiode von März bis Oktober, so ergibt sich mittelfristig eine deutliche Zunahme der niederschlagsfreien Zeiträume.

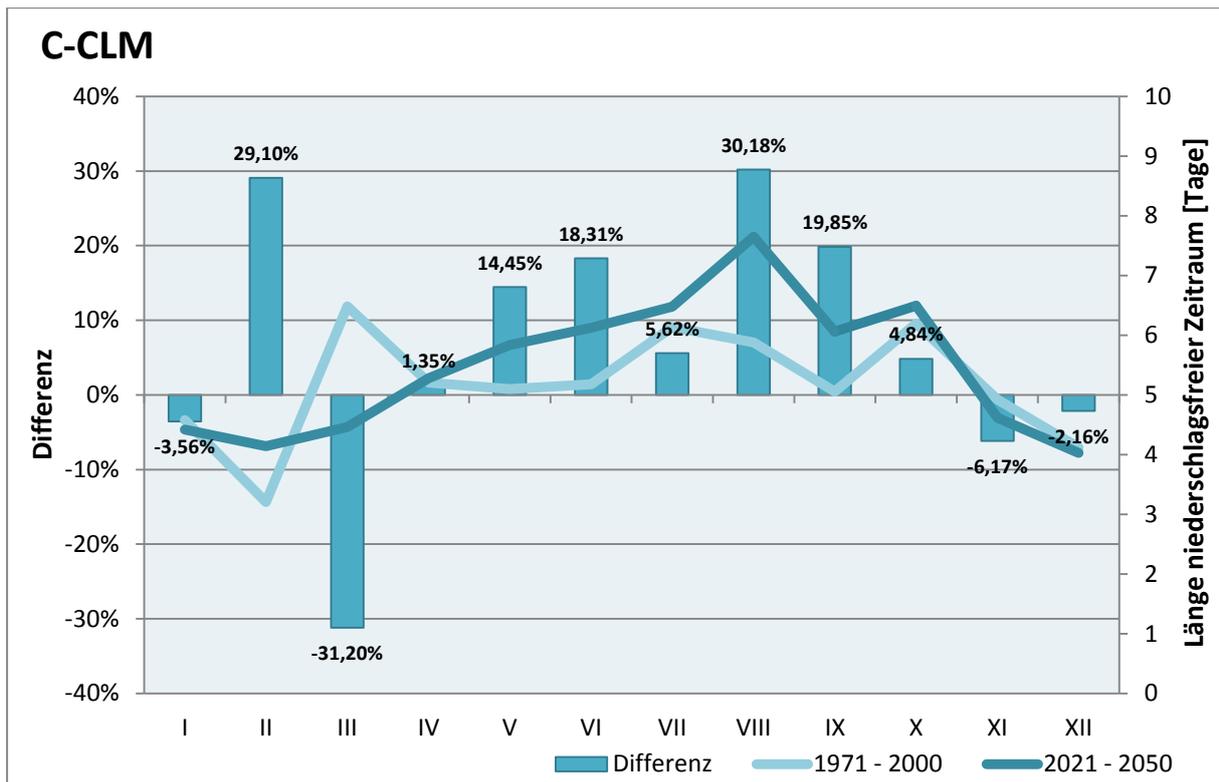


Abbildung 6: Simulierte maximale Länge niederschlagsfreier Zeiträume mit C-CLM (Szenario A1B / ECHAM5) auf Monatsbasis für die Vorderpfalz (Flächenmittel) als 30jähriges Mittel der Perioden 1971 – 2000 und 2021 – 2050 sowie der Vergleich der zukünftigen Periode mit der Referenz 1971 – 2000, dargestellt als prozentuale Differenz.

Das Regionalmodell REMO simuliert analog zur Abnahme der sommerlichen Niederschläge zunehmend längere niederschlagsfreie Zeiträume in der Vegetationsperiode, wobei die zukünftigen Andauern im März noch unterhalb des Referenzniveaus liegen und ein Anstieg erst ab April auftritt. Generell verlaufen die Werte für die Periode 2021 – 2050 relativ nah am Referenzniveau. Bereits im September nähert sich die Länge der niederschlagsfreien Zeiträume wieder dem Referenzniveau an. Im Vergleich zu C-CLM fällt die Zunahme der niederschlagsfreien Zeiträume insgesamt nicht so stetig aus, wobei auch hier das Maximum der Zunahme ca. 30% beträgt. Zukünftig ergeben sich also in dieser Simulation verhältnismäßig gleiche Bedingungen wie im Referenzzeitraum 1971 – 2000 und die zunehmend längeren niederschlagsfreien Zeiträume finden sich hauptsächlich von April bis August (Abb. 7).

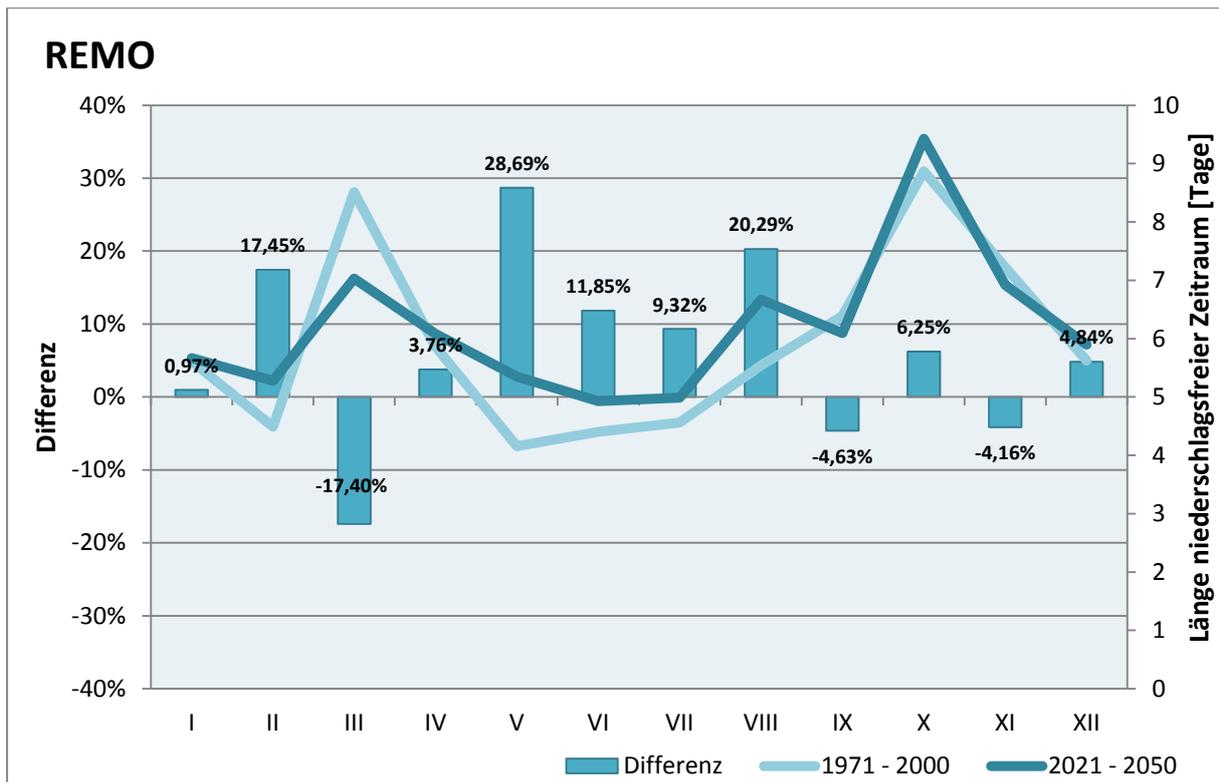


Abbildung 7: Simulierte maximale Länge niederschlagsfreier Zeiträume mit REMO (Szenario A1B / ECHAM5) auf Monatsbasis für die Vorderpfalz (Flächenmittel) als 30jähriges Mittel der Perioden 1971 – 2000 und 2021 – 2050 sowie der Vergleich der zukünftigen Periode mit der Referenz 1971 – 2000, dargestellt als prozentuale Differenz.

Die Simulation der Länge niederschlagsfreier Zeiträume mit WETTREG 2010 (Abb. 8) zeigt im Vergleich zu den beiden anderen Modellen eine stark schwankende „maximale Anzahl an Tagen ohne Niederschlag“. Auffällig ist, dass die Zunahme für den Zeitraum 2021 – 2050 fast im gesamten Jahresverlauf oberhalb bzw. auf dem Niveau der Referenzwerte liegt. Lediglich in den Monaten Januar, November und Dezember wird das Referenzniveau unterschritten, wobei dies mit bis zu 6% als minimal anzusehen ist. Bereits im Februar ist ein geringer Anstieg vorhanden, sodass zunehmend längere niederschlagsfreie Zeiträume bereits vor Beginn der Vegetationsperiode simuliert werden. Bereits ab August sinkt die Länge der niederschlagsfreien Zeiträume und erreicht im Oktober das Referenzniveau, sodass zum Ende der Vegetationsperiode eine Abnahme der niederschlagsfreien Zeiträume simuliert wird.

Die nahe Zukunft 2021 – 2050 weist hinsichtlich der Länge niederschlagsfreier Zeiträume einen Verlauf ähnlich dem Referenzzeitraum 1971 – 2000 auf, dennoch zeigt sich eine geringfügige Zunahme bis zu 13%. WETTREG 2010 simuliert daher generell einen Anstieg der

niederschlagsfreien Zeiträume für die Zukunft. Im Vergleich zu den anderen beiden Modellen lässt sich zwar ebenso ein Trend einer zukünftigen Verlängerung der niederschlagsfreien Zeiträume bei Betrachtung der Werte auf Monatsbasis erkennen, da zukünftig eine Zunahme zu erkennen ist, jedoch kann aufgrund der minimalen Ausprägung mittelfristig nicht unbedingt von längeren niederschlagsfreien Zeiträumen ausgegangen werden

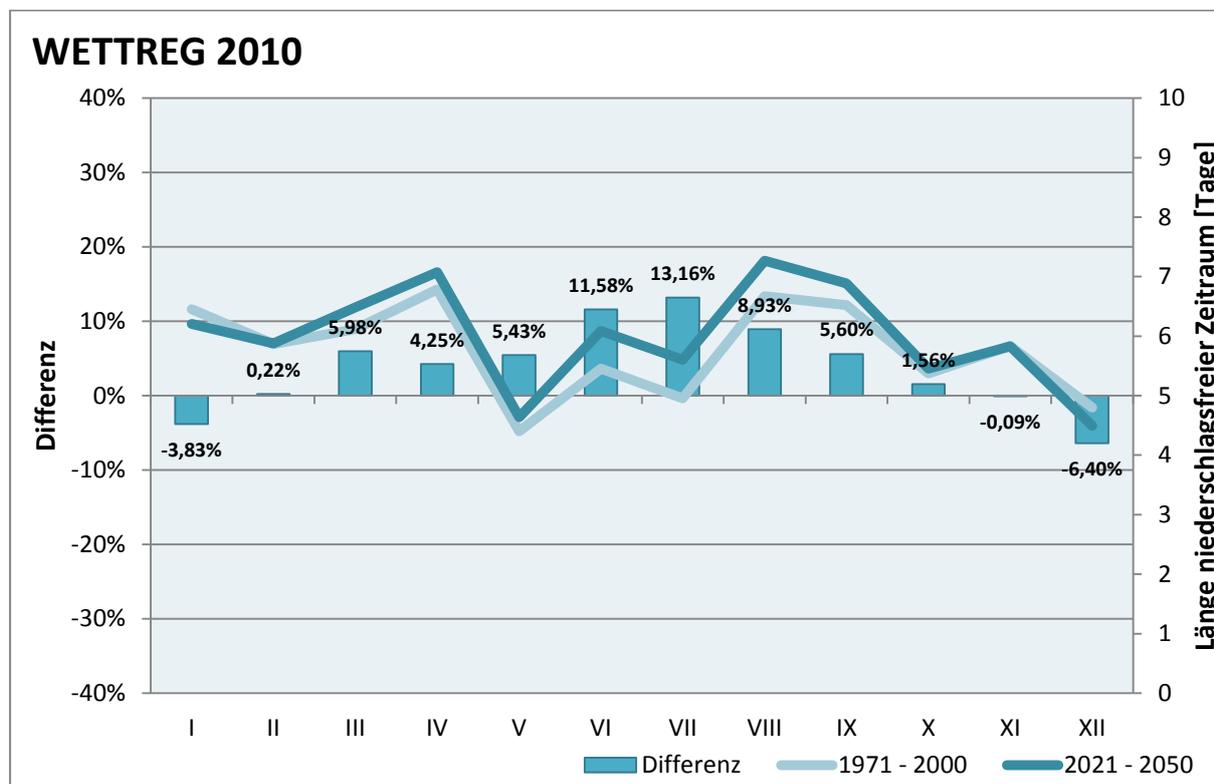


Abbildung 8: Simulierte maximale Länge niederschlagsfreier Zeiträume mit WETTREG 2010 (Szenario A1B / ECHAM5) auf Monatsbasis für die Vorderpfalz (Flächenmittel) als 30jähriges Mittel der Perioden 1971 – 2000 und 2021 – 2050 sowie der Vergleich der zukünftigen Periode mit der Referenz 1971 – 2000, dargestellt als prozentuale Differenz.

Die vorläufigen Auswertungen der Simulationen deuten darauf hin, dass tendenziell die maximalen niederschlagsfreien Zeiträume innerhalb der Vegetationsperiode zunehmen, außerhalb allerdings eine Abnahme unter bzw. auf Referenzniveau erfolgt. Bei Beurteilung der vorliegenden Simulationsergebnisse muss berücksichtigt werden, dass diese auf Monatsbasis beruhen, sprich die Monatsgrenzen wurden exakt eingehalten. Demnach könnte sich ein maximal niederschlagsfreier Zeitraum von einer Monatslänge, also maximal 31 Tagen ergeben. Es werden keine Ereignisse berücksichtigt, in denen bspw. die letzten Tage eines Monats sowie die ersten Tage des folgenden Monats niederschlagsfrei sind, also sich ein niederschlagsfreier Zeitraum über die Monatsgrenzen hinweg ergibt, was hinsichtlich Bewässerung, insbesondere während der Vegetationsperiode, eine wesentlich höhere Belastung für die Kulturführung zur Folge hätte, als die Zuordnung der Einzelereignisse in dem jeweiligen

Monat. Aus diesem Grund empfiehlt sich eine Betrachtung einer fortlaufenden Zeitreihe, jeweils beschränkt auf den Zeitraum 01. März bis 31. Oktober.

Vorerst werden die Simulationen der drei regionalen Klimamodelle hinsichtlich der maximalen Anzahl fortlaufender Tage ohne Niederschlag in der Vegetationsperiode unabhängig von den Monatsgrenzen für die 30jährigen Perioden 1971 – 2000 und 2021 – 2050 der Region Vorderpfalz ausgewertet (Abb. 9). Hierbei zeigt sich, dass die niederschlagsfreien Zeiträume im Mittel bis zu 26 Tage andauern. Die dynamischen Modelle C-CLM und REMO simulieren zukünftig zunehmend längere niederschlagsfreie Zeiträume, während WETTREG 2010 keine Veränderung simuliert. Im Einzelnen wird anhand des Modells REMO auch deutlich, dass durchaus niederschlagsfreie Perioden simuliert werden, die einer Länge von ≥ 31 Tagen entsprechen.

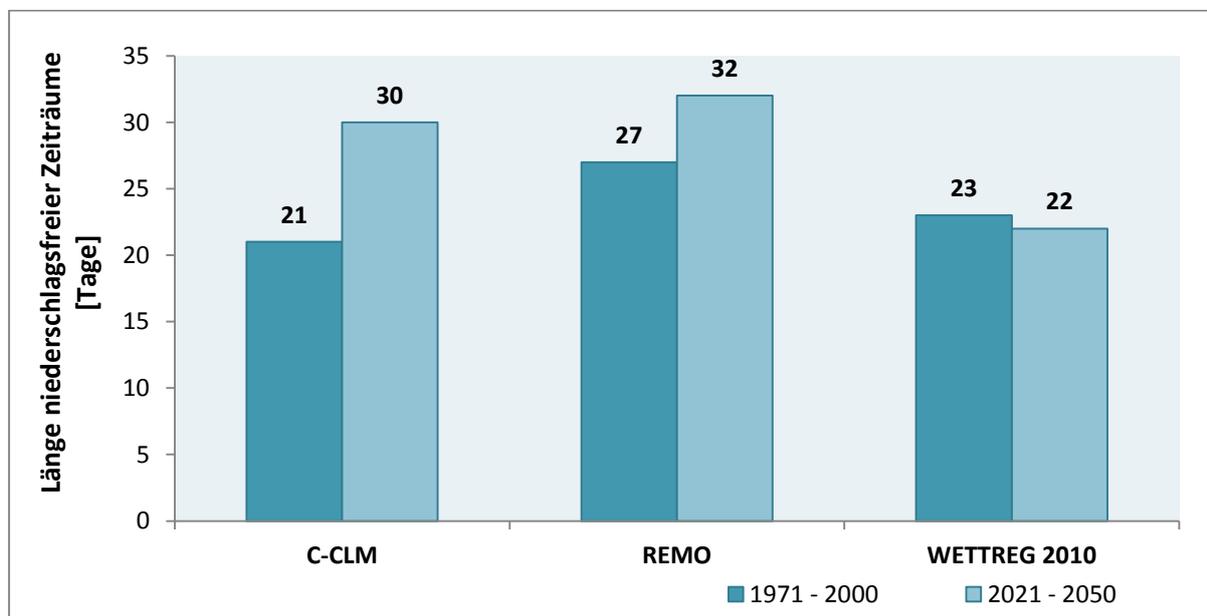


Abbildung 9: Simulierte maximale Länge niederschlagsfreier Zeiträume innerhalb der Vegetationsperiode mit C-CLM, REMO und WETTREG 2010 (Szenario A1B / ECHAM5) im Vergleich zwischen in den Perioden 1971 – 2000 und 2021 – 2050 für die Vorderpfalz (Flächenmittel).

Im Anschluss werden die Simulationsergebnisse auf Basis der 10 jährigen Dekaden betrachtet, wobei auch in diesem Fall die Vegetationsperiode unabhängig von den Monatsgrenzen betrachtet wird (Abb. 10). Das Modell C-CLM zeigt hier am deutlichsten einen Trend für zunehmend längere niederschlagsfreie Zeiträume in der Zukunft, während bei REMO diese tendenziell etwas geringer ausfällt, wenngleich die niederschlagsfreien Zeiträume insgesamt länger sind als es bei C-CLM der Fall ist. Das Modell WETTREG 2010 zeigt für die einzelnen Dekaden keinen Trend für zunehmend längere niederschlagsfreie Perioden innerhalb der Vegetationsperiode für die Region Vorderpfalz.

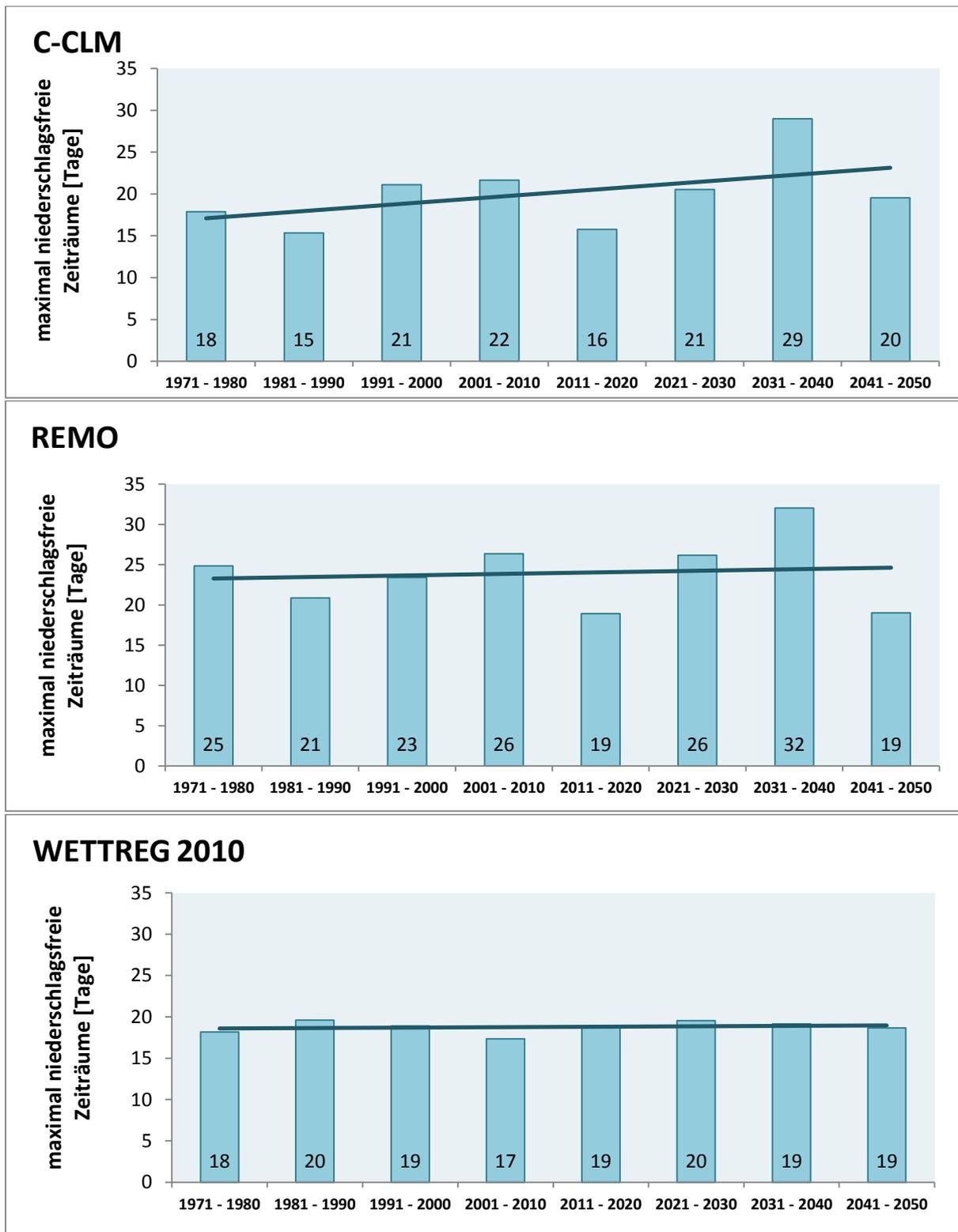


Abbildung 10: Simulierte maximale Länge niederschlagsfreier Zeiträume innerhalb der Vegetationsperiode mit C-CLM, REMO und WETTREG 2010 (Szenario A1B / ECHAM5) dekadenweise für die Vorderpfalz (Flächenmittel).

Ausgehend von der Tatsache, dass niederschlagsfreie Zeiträume unabhängig von ihrer Länge durch die Häufigkeit ihres Auftretens ebenso eine Zusatzbewässerung erforderlich machen können, ist vor allem die Häufigkeitsverteilung dieser Ereignisse während der Vegetationsperiode von Interesse. Dazu wurde die absolute Häufigkeit niederschlagsfreier Perioden innerhalb der Vegetationsperiode betrachtet (Abb. 11 bis 13). Dem Trend folgend, den die Simulationen der Modelle aufzeigen, erhöht sich bis 2050 sowohl die Häufigkeit längerer niederschlagsfreier Perioden von mehr als 10 - 15 Tagen Länge als auch die Andauer der Trockenphasen selbst auf im Einzelfall über 30 Tage Länge.

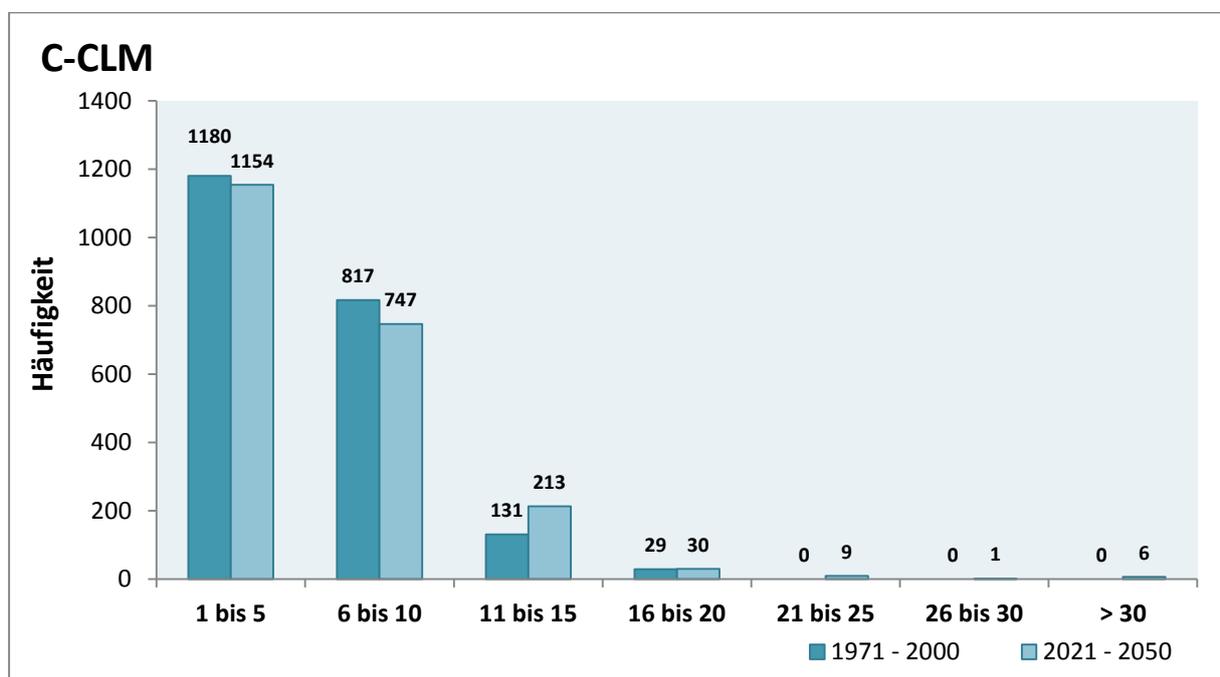


Abbildung 11: Simulierte absolute Häufigkeiten niederschlagsfreier Zeiträume mit C-CLM (Szenario A1B / ECHAM5) innerhalb der Vegetationsperiode für die 30jährigen Zeiträume 1971 – 2000 (Referenz) sowie 2021 – 2050 in der Vorderpfalz.

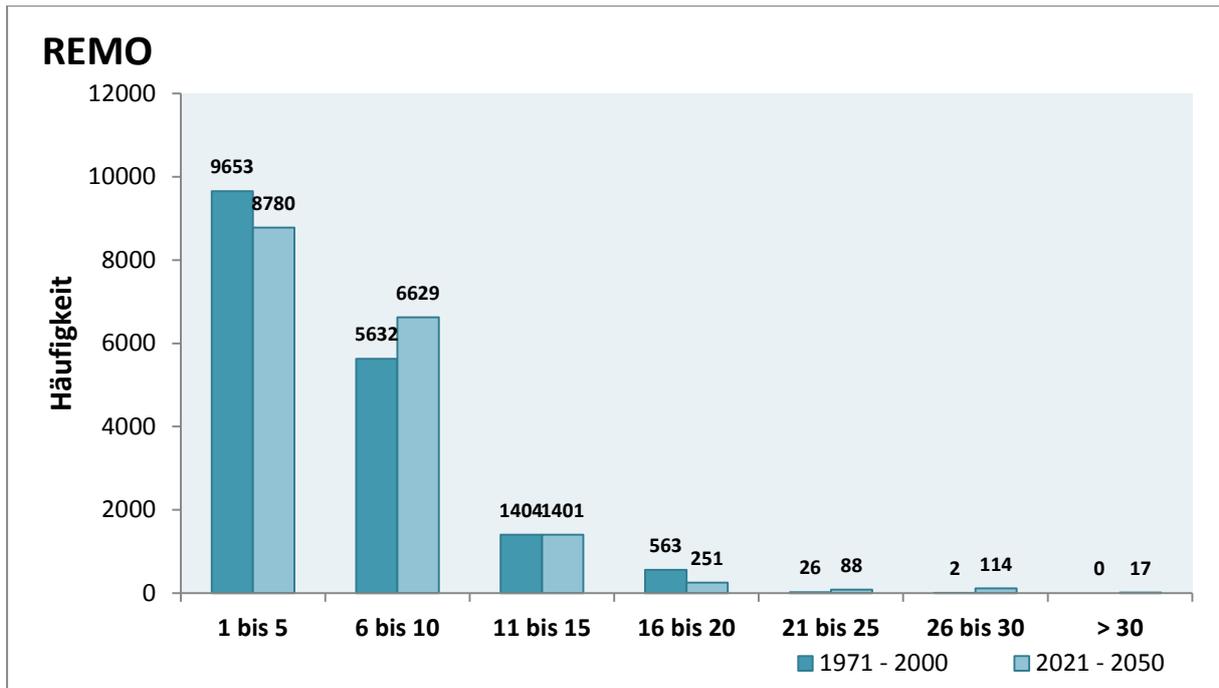


Abbildung 12: Simulierte absolute Häufigkeiten niederschlagsfreier Zeiträume mit REMO (Szenario A1B / ECHAM5) innerhalb der Vegetationsperiode für die 30jährigen Zeiträume 1971 – 2000 (Referenz) sowie 2021 – 2050 in der Vorderpfalz.

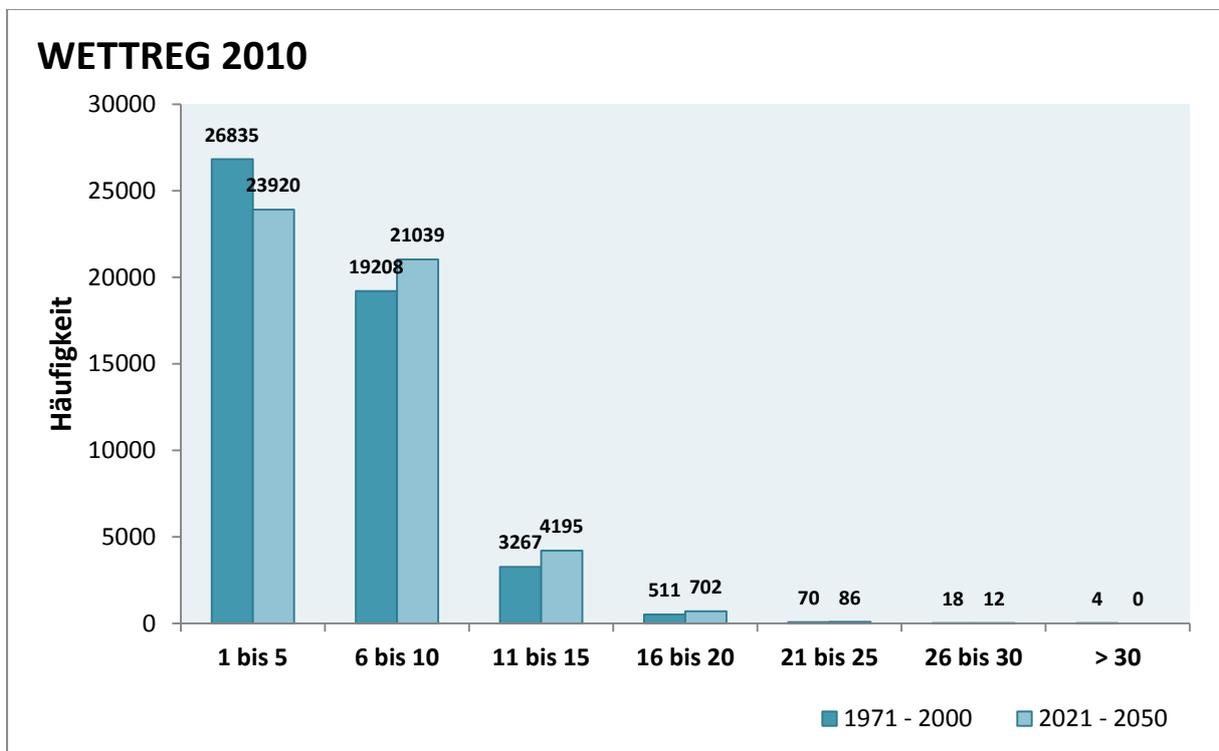


Abbildung 13: Simulierte absolute Häufigkeiten niederschlagsfreier Zeiträume mit WETTREG 2010 (Szenario A1B / ECHAM5) innerhalb der Vegetationsperiode für die 30jährigen Zeiträume 1971 – 2000 (Referenz) sowie 2021 – 2050 in der Vorderpfalz.

3.1.3. Klimatische Wasserbilanz

Eine ausreichende Wasserversorgung ist ein wichtiger Faktor für optimales Pflanzenwachstum. Die zusätzliche Bewässerung zur Abdeckung des Wasserbedarfs gewinnt hinsichtlich der simulierten, zukünftigen klimatischen Veränderungen wie bspw. die Niederschlagsumverteilung von Sommer in den Winter sowie länger werdende und häufiger vorkommende niederschlagsfreie Phasen während der Vegetationsperiode an Bedeutung. Unter Zuhilfenahme der klimatischen Wasserbilanz, definiert als Differenz aus Niederschlag und Verdunstung, lassen sich die Auswirkungen der Klimaveränderung auf die den Wasserhaushalt beeinflussenden Größen abschätzen.

Aus den vorliegenden klimatischen Daten für Niederschlag und Verdunstung wird zunächst die klimatische Wasserbilanz auf Tagesbasis durch Differenzbildung berechnet und anschließend sowohl das Flächen- als auch das zeitliche Mittel (30-jährige Perioden / Dekaden) ermittelt, wobei die KWB auf die beiden Zeitabschnitte innerhalb Vegetationsperiode (März bis Oktober) sowie außerhalb Vegetationsperiode (Oktober bis Februar) aggregiert wird.

Die Auswertung der beiden dynamischen Modelle C-CLM und REMO (Abb. 14 und 15) macht deutlich, dass innerhalb der Vegetationsperiode (im Zeitraum von März bis Oktober) negative klimatische Wasserbilanzen auftreten, während für den Zeitraum außerhalb der Vegetationsperiode sich positive klimatische Wasserbilanzen zeigen. Die negative klimatische Wasserbilanz in der Vegetationsperiode ergibt sich sowohl aus den geringeren Niederschlägen als auch aus den länger werdenden und häufigeren Trockenphasen, während die Verdunstung im Sommer aufgrund vieler Sonnenscheinstunden und damit verbunden hohen Globalstrahlungswerten größer ist. Im Gegenzug dazu führen weniger Globalstrahlung und damit niedrigere Verdunstung sowie die umverteilten, höheren Niederschläge in den Wintermonaten zu einer positiven klimatischen Wasserbilanz.

Darüber hinaus wird deutlich, dass sich bei der Simulation mit C-CLM die klimatischen Wasserbilanzen innerhalb der Vegetationsperiode im Laufe der Zeit zunehmend negativ entwickeln, wohingegen außerhalb der Vegetationsperiode zukünftig mit ständig steigenden positiven Wasserbilanzen zu rechnen ist (Abb. 14). Die Simulation mit REMO zeigt zwar ebenso, deutlich positive außerhalb bzw. negative klimatische Wasserbilanzen innerhalb der Vegetationsperiode, jedoch ergeben sich nur geringfügige Veränderungen im betrachteten Zeitraum (1971 bis 2050), sodass sich im zeitlichen Verlauf kein eindeutiger Trend zu stärker negativ bzw. positiv werdenden KWBs darstellt (Abb. 15).

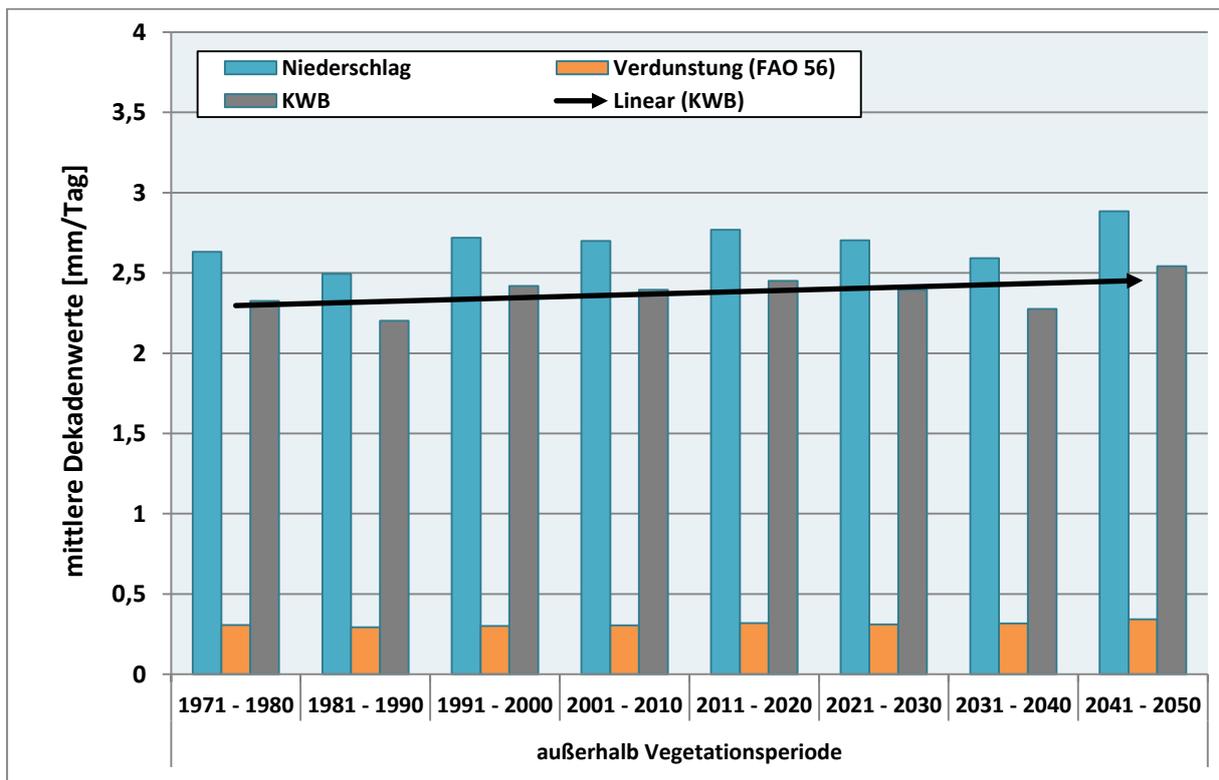
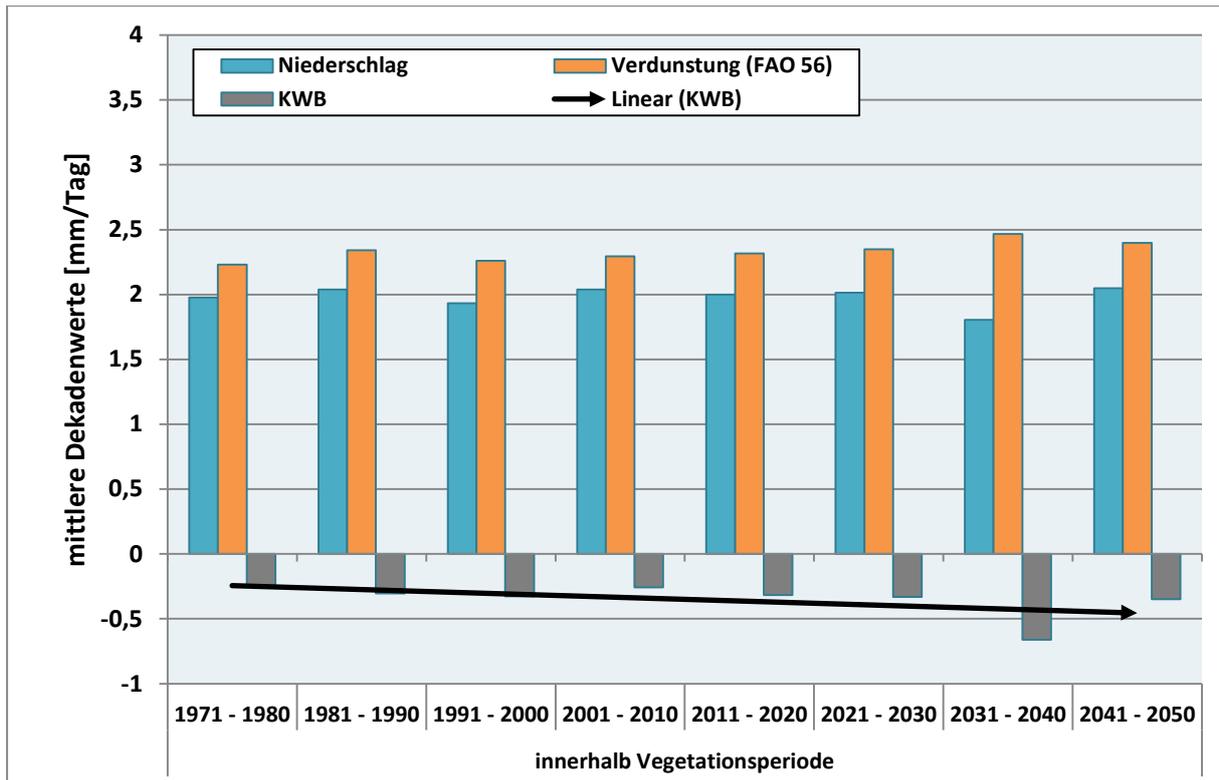


Abbildung 14: Mittlere Dekadenwerte für Niederschlag, Verdunstung und daraus resultierende klimatische Wasserbilanz (jeweils in mm) innerhalb (oben) und außerhalb der Vegetationsperiode (unten) auf Grundlage der Simulationsdaten von C-CLM (ECHAM5 / Szenario A1B) für die Vorderpfalz (Flächenmittel).

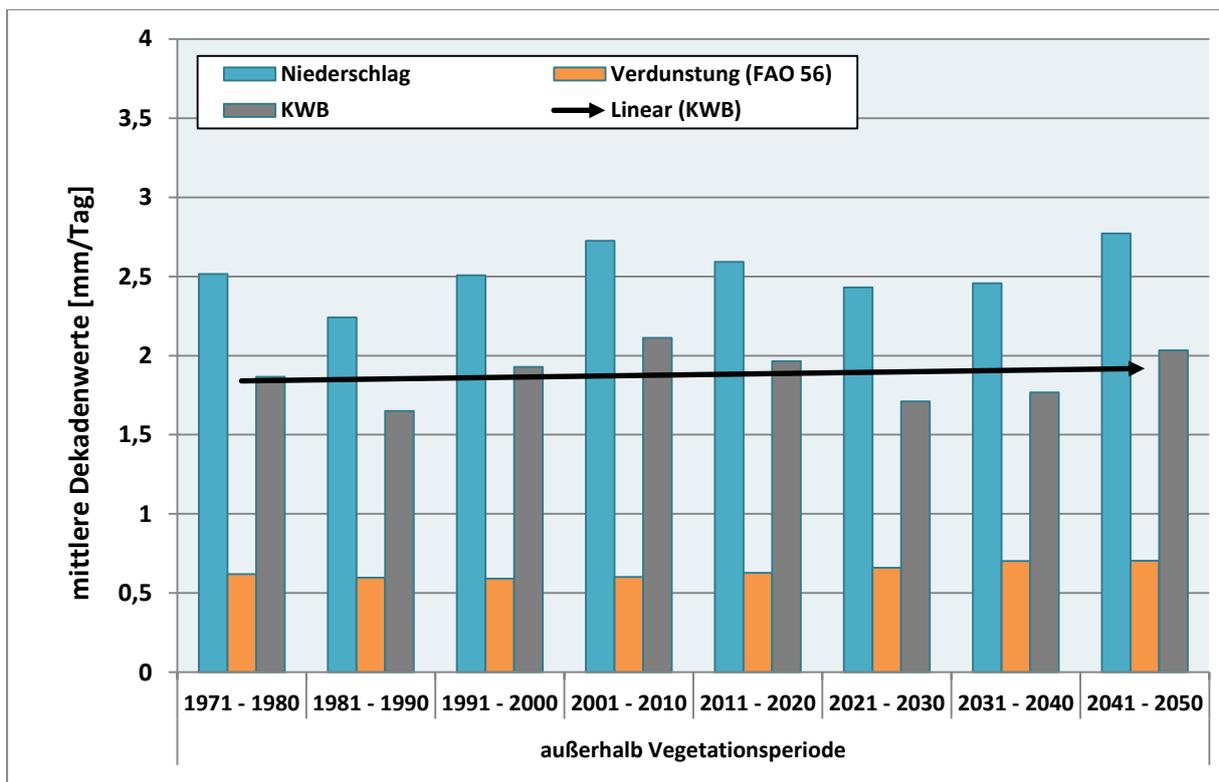
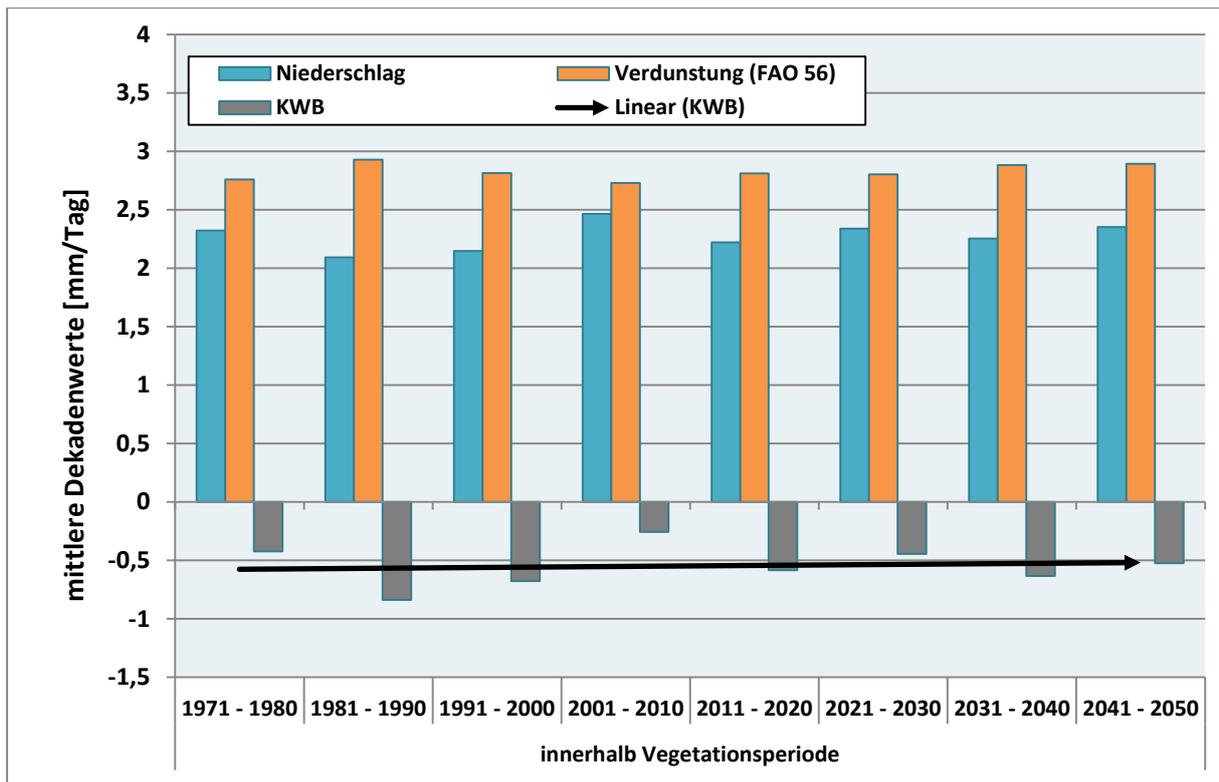


Abbildung 15: Mittlere Dekadenwerte für Niederschlag, Verdunstung und daraus resultierende klimatische Wasserbilanz (jeweils in mm) innerhalb (oben) und außerhalb der Vegetationsperiode (unten) auf Grundlage der Simulationsdaten von REMO (ECHAM5 / Szenario A1B) für die Vorderpfalz (Flächenmittel).

3.1.4. Mittlerer jährlicher Bewässerungsbedarf

Die berechneten klimatischen Wasserbilanzen aus den Simulationsdaten der Modelle C-CLM und REMO können als Bewertungsgrundlage für den kulturspezifischen Wasser- sowie Bewässerungsbedarf von Gemüse herangezogen werden, indem die Differenz zwischen Wasser, das dem Boden durch Niederschlag zugeführt wird und dem Wasser, das durch Pflanzenwachstum und Verdunstung entzogen wird, rechnerisch ermittelt wird.

3.1.4.1. C-CLM

Blumenkohl

Den höchsten Zusatzwasserbedarf innerhalb der betrachteten Periode weist Blumenkohl im Jahr 2011 mit einem durchschnittlichen Bedarf von 277 mm auf (Abbildung 16). Innerhalb dieses Jahres weist der Mai den höchsten Bedarf innerhalb aller berechneten Monate auf. Den geringsten durchschnittlichen Bedarf weist das Jahr 2006 mit 152 mm auf. Der gleitende Durchschnitt weist innerhalb der betrachteten Periode zwei Peaks im Zeitraum 1980-1989 und 2035-2044 auf. Den geringsten durchschnittlichen Bewässerungsbedarf weisen die Jahre 1971-1980 auf.

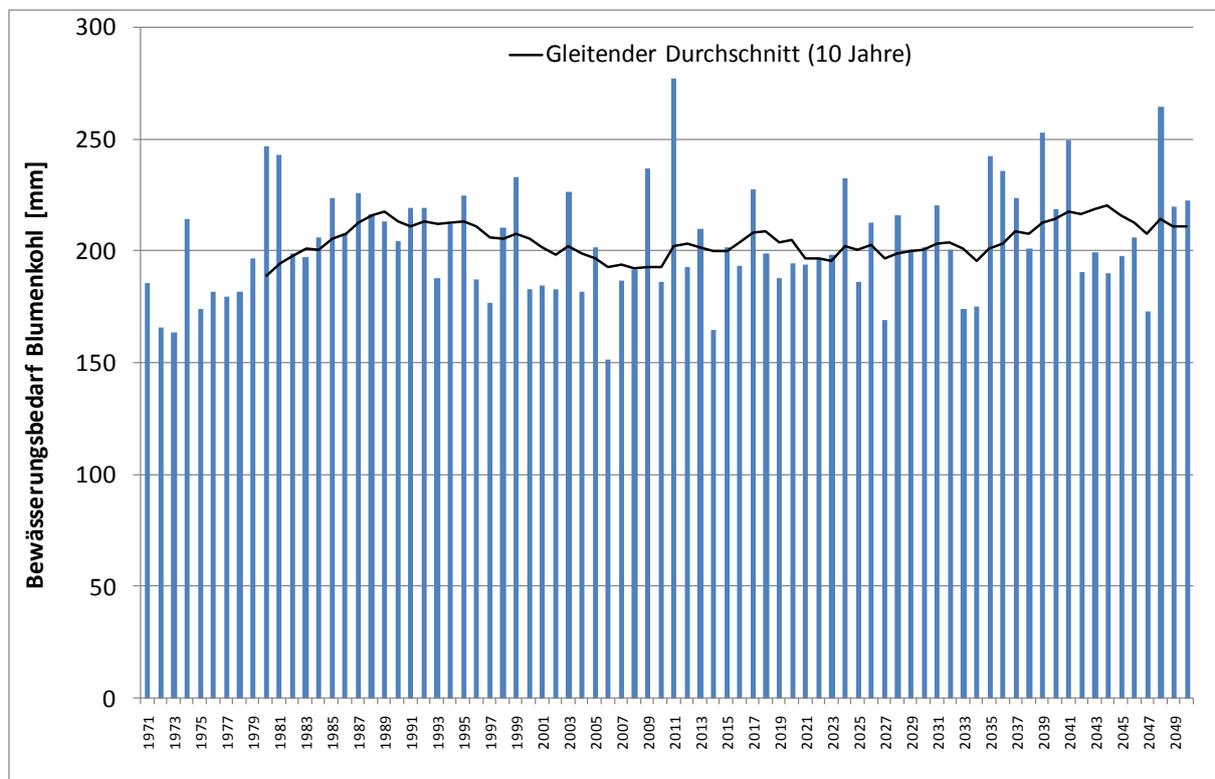


Abbildung 16: Mit C-CLM (ECHAM 5 / Szenario A1B) ermittelter mittlerer jährlicher Bewässerungsbedarf von Blumenkohl in den Jahren 1971 bis 2050 für die Vorderpfalz (Flächenmittel).

Bundzwiebel

Den höchsten Bedarf an Zusatzwasser weisen Bundzwiebel im Jahr 2011 mit 280 mm auf (Abbildung 17). Im Jahr 2008 liegt der Zusatzwasserbedarf durchschnittlich jedoch nur bei 183 mm. Den höchsten Bewässerungsbedarf innerhalb aller berechneten Monate weist der Mai 2013 auf. Der gleitende Durchschnitt weist innerhalb der betrachteten Periode zwei Peaks im Zeitraum 1980-1989 und 2037-2046 auf. Den geringsten durchschnittlichen Bewässerungsbedarf weisen die Jahre 1971-1980 auf.

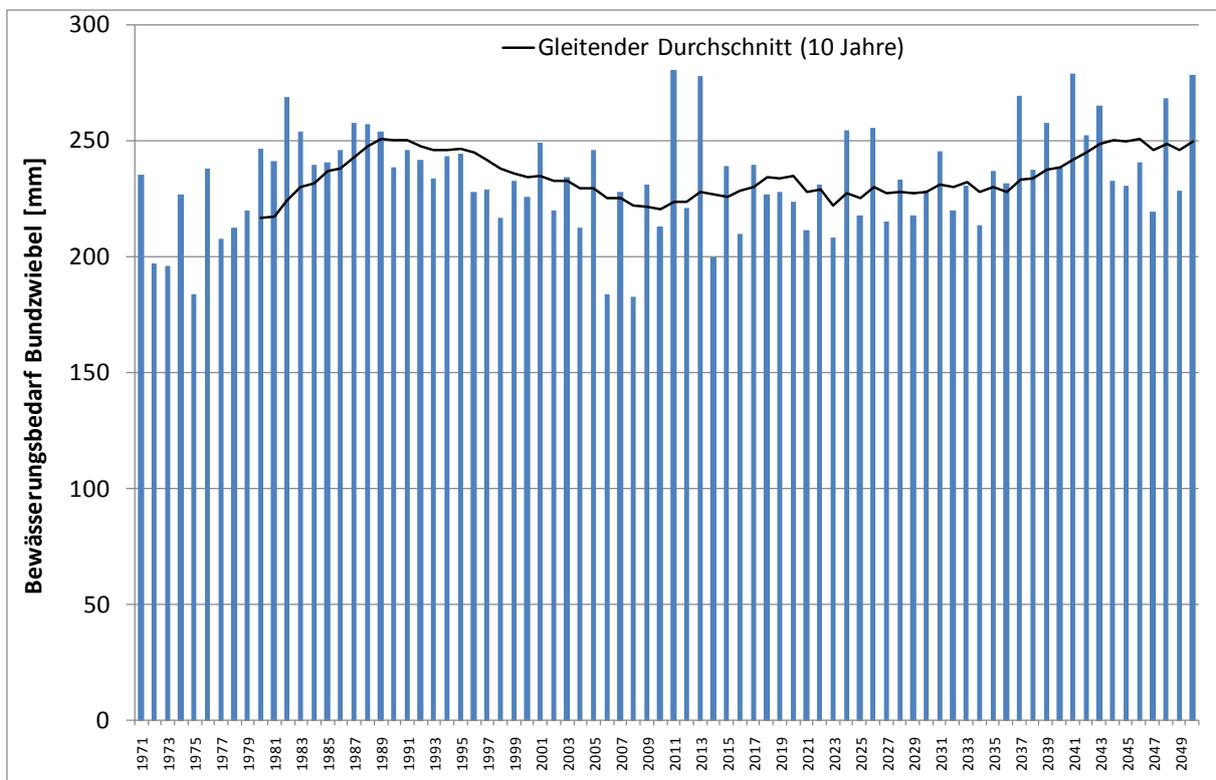


Abbildung 17: Mit C-CLM (ECHAM 5 / Szenario A1B) ermittelter mittlerer jährlicher Bewässerungsbedarf von Bundzwiebeln in den Jahren 1971 bis 2050 für die Vorderpfalz (Flächenmittel).

Möhre

Möhren weisen den höchsten Bedarf an Zusatzwasser im Jahr 2011 mit 220 mm auf (Abbildung 18). Im Jahr 1972 liegt der Zusatzwasserbedarf durchschnittlich jedoch nur bei 139 mm. Den höchsten Bewässerungsbedarf innerhalb aller berechneten Monate weist der Juni 2011 auf. Der gleitende Durchschnitt weist innerhalb der betrachteten Periode zwei Peaks im Zeitraum 1980-1989 und 2037-2046 auf. Die Jahre 1971-1980 weisen den geringsten durchschnittlichen Bewässerungsbedarf auf.

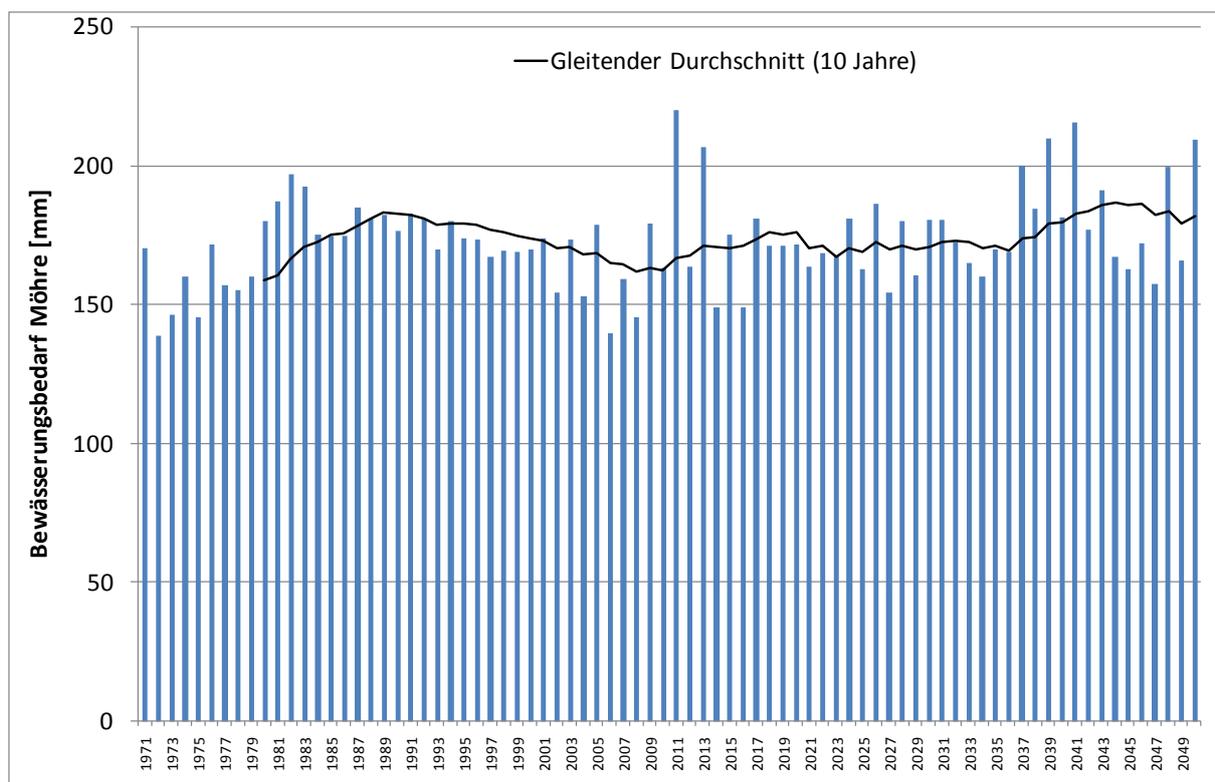


Abbildung 18: Mit C-CLM (ECHAM 5 / Szenario A1B) ermittelter mittlerer jährlicher Bewässerungsbedarf von Möhren in den Jahren 1971 bis 2050 für die Vorderpfalz (Flächenmittel).

Radies

Den höchsten Zusatzwasserbedarf innerhalb der betrachteten Periode weisen Radies im Jahr 2041 mit einem durchschnittlichen Bedarf von 85 mm auf (Abbildung 19). Im Mai 2013 liegt innerhalb der betrachteten Periode der höchste Zusatzwasserbedarf. Den geringsten durchschnittlichen Bedarf weist das Jahr 1975 mit 58 mm auf. Der gleitende Durchschnitt weist innerhalb der betrachteten Periode zwei Peaks im Zeitraum 1980-1989 und 2035-2044 auf. Den geringsten durchschnittlichen Bewässerungsbedarf weisen die Jahre 1971-1980 auf.

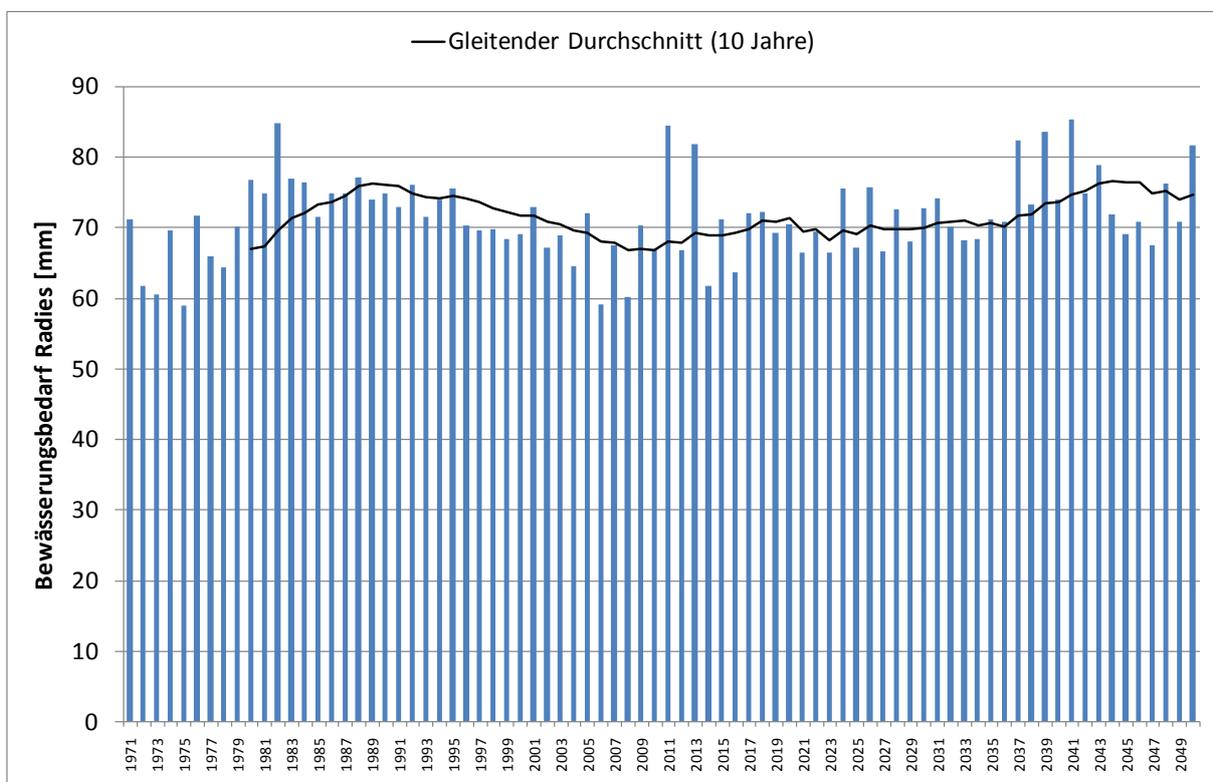


Abbildung 19: Mit C-CLM (ECHAM 5 / Szenario A1B) ermittelter mittlerer jährlicher Bewässerungsbedarf von Radies in den Jahren 1971 bis 2050 für die Vorderpfalz (Flächenmittel).

Veränderung zwischen den Dekaden

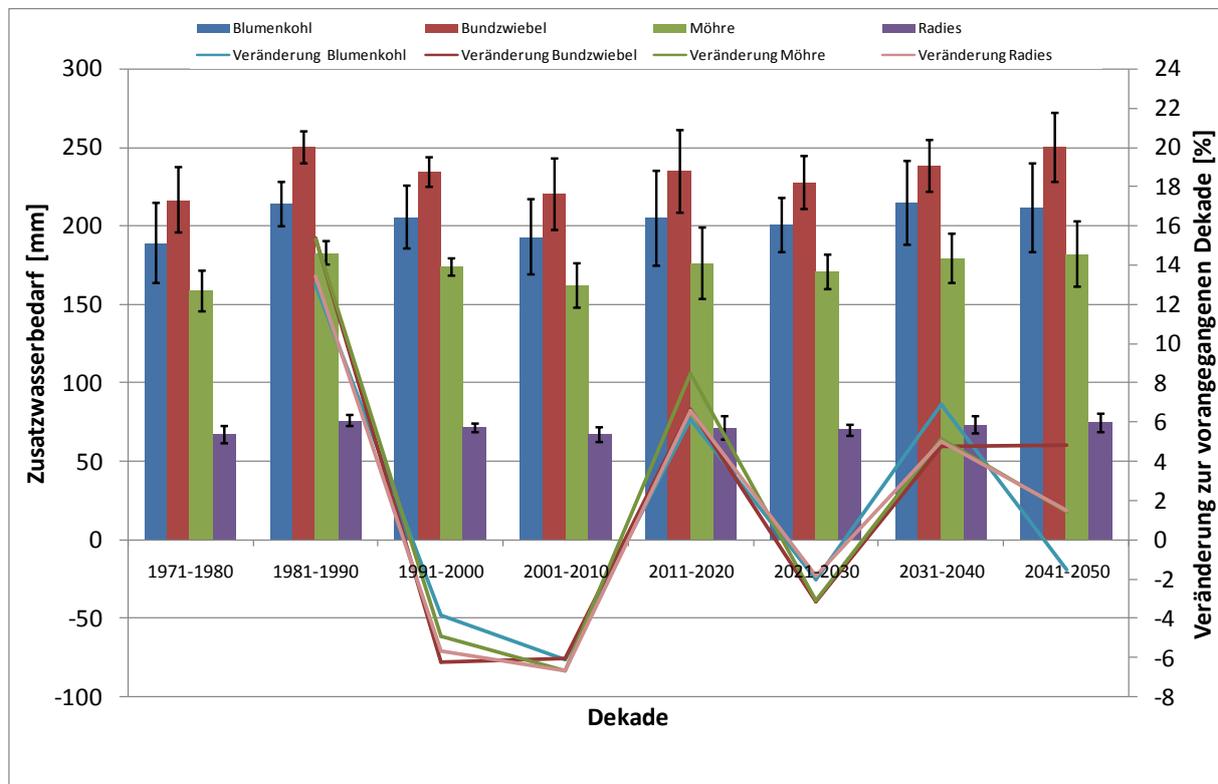


Abbildung 20: Mit C-CLM (ECHAM5 / Szenario A1B) ermittelte mittlere Zusatzwassermenge innerhalb der Dekaden und die Veränderung des Bewässerungsbedarfs zur vorangegangenen Dekade für alle betrachteten Kulturen. Fehlerbalken kennzeichnen die Standardabweichung.

Der Beregnungsbedarf der vier ausgewählten Kulturen steigt im Mittel der 2. Dekade (1981-1990) im Vergleich zur vorhergegangenen Dekade um 14,3 % an (Abbildung 20). In den beiden nachfolgenden Dekaden nimmt der Beregnungsbedarf um 5,2 % bzw. nochmals um 6,4 % ab. In der 5. Dekade steigt der Bewässerungsbedarf dann im Vergleich um 7 %. Wobei hier die Möhre mit einem Anstieg von 8,5 % die höchste Zunahme aufweist. In der Dekade von 2021-2030 nimmt der Beregnungsbedarf dann wieder um durchschnittlich 2,5 % ab. Die Verläufe der Zu- und Abnahme bei den einzelnen Kulturen laufen in allen Dekaden gleich. Die Ausnahme ist die letzte Dekade von 2041-2050 in der sich ein anderes Bild zeigt. Während Blumenkohl eine Abnahme des Beregnungsbedarfs um 1,5 % aufweist, steigt der Beregnungsbedarf von Bundzwiebel um 4,8 % und bei Radies und Möhre um 1,5 %. Der Beregnungsbedarf der Kulturen liegt in der Dekade von 2041-2050 nicht über dem Bewässerungsbedarf der Periode von 1981-1990.

3.1.4.2. REMO

Blumenkohl

Den höchsten Zusatzwasserbedarf innerhalb des Zeitraums von 1971 - 2050 weist Blumenkohl im Jahr 2048 mit einem durchschnittlichen Bedarf von 273 mm auf (Abbildung 21). Den geringsten durchschnittlichen Bedarf weist das Jahr 1972 mit 106 mm auf. Im Juni 2010 liegt innerhalb aller Monate der höchste durchschnittliche Bewässerungsbedarf vor.

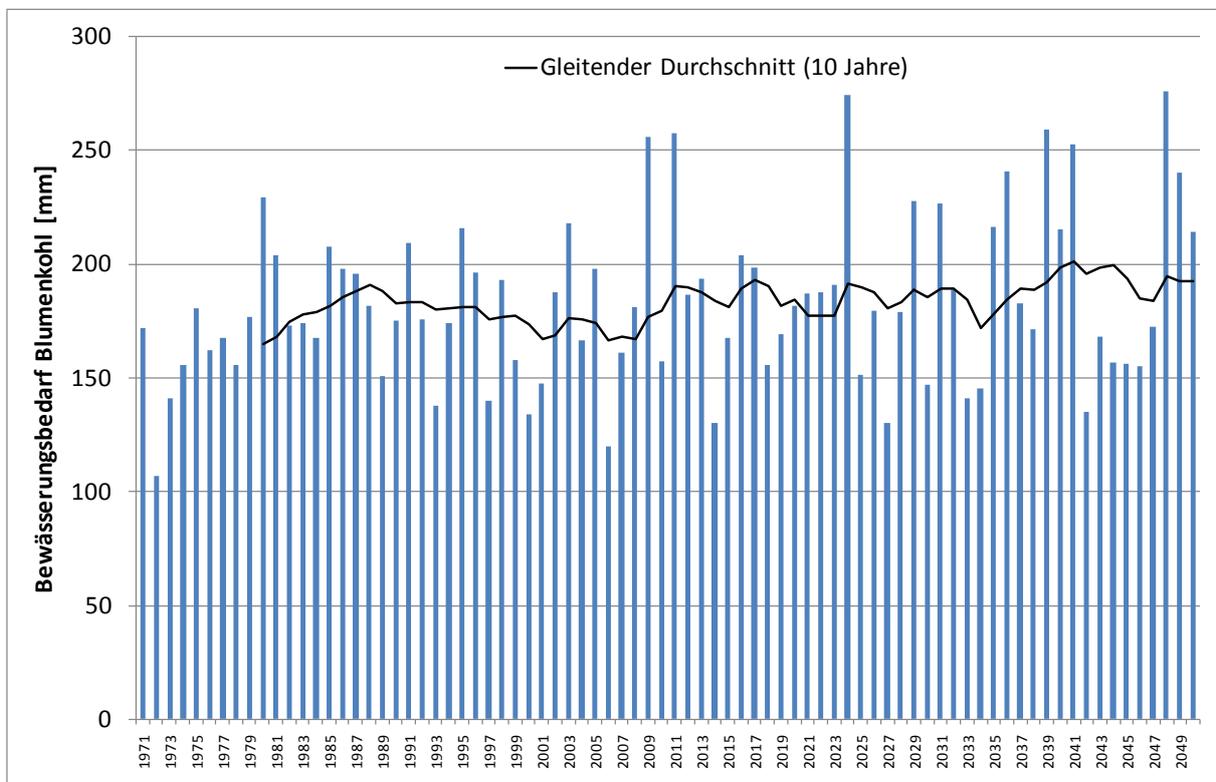


Abbildung 21: Mit REMO (ECHAM 5 / Szenario A1B) ermittelter mittlerer jährlicher Bewässerungsbedarf von Blumenkohl in den Jahren 1971 bis 2050 für die Vorderpfalz (Flächenmittel).

Bundzwiebel

Bundzwiebeln weisen den höchsten Zusatzwasserbedarf im Jahr 2025 mit einem durchschnittlichen Bedarf von 300 mm auf (Abbildung 22). Den geringsten durchschnittlichen Bedarf weist das Jahr 2007 mit 130 mm auf. Im Mai 2025 liegt innerhalb aller Monate der höchste durchschnittliche Bewässerungsbedarf vor.

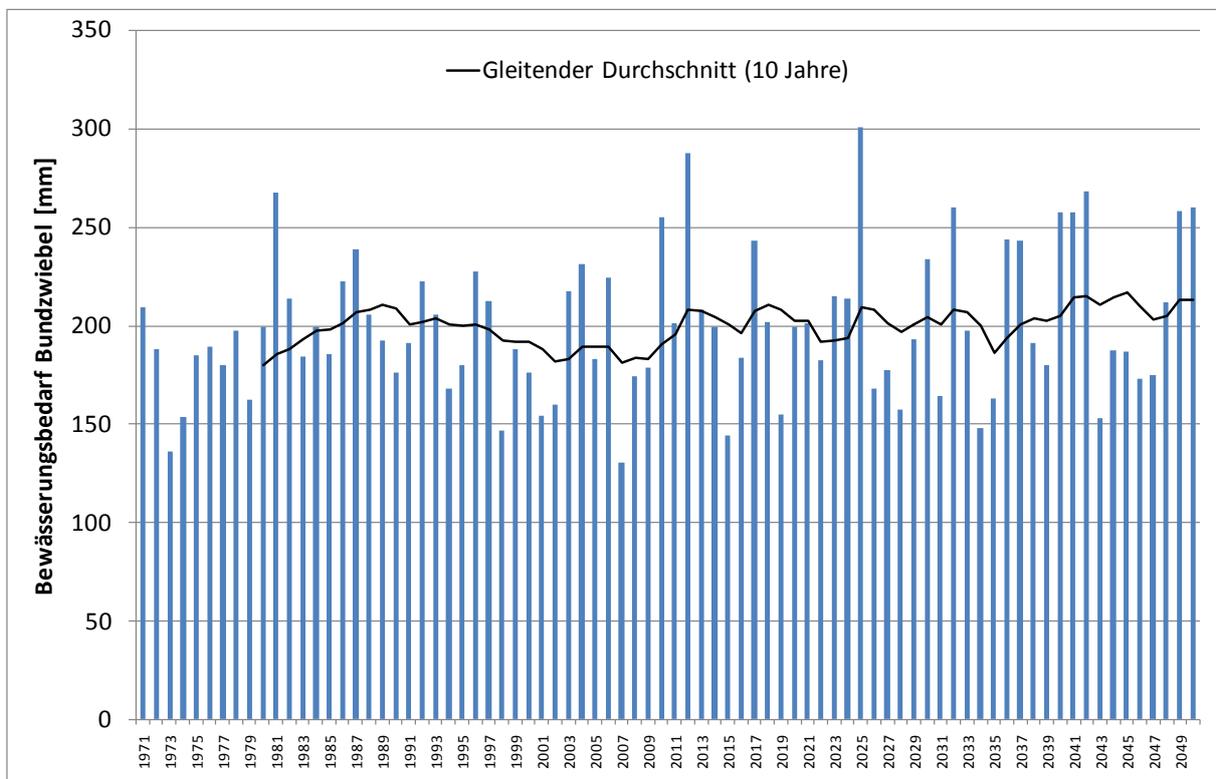


Abbildung 22: Mit REMO (ECHAM 5 / Szenario A1B) ermittelter mittlerer jährlicher Bewässerungsbedarf von Bundzwiebeln in den Jahren 1971 bis 2050 für die Vorderpfalz (Flächenmittel).

Möhre

Möhren weisen den höchsten Zusatzwasserbedarf innerhalb der betrachteten Periode im Jahr 2048 mit einem durchschnittlichen Bedarf von 230 mm auf (Abbildung 23). Den geringsten durchschnittlichen Bedarf weist das Jahr 1972 mit 90 mm auf. Im Juni 2009 liegt bei Möhre innerhalb aller Monate der höchste durchschnittliche Bewässerungsbedarf vor.

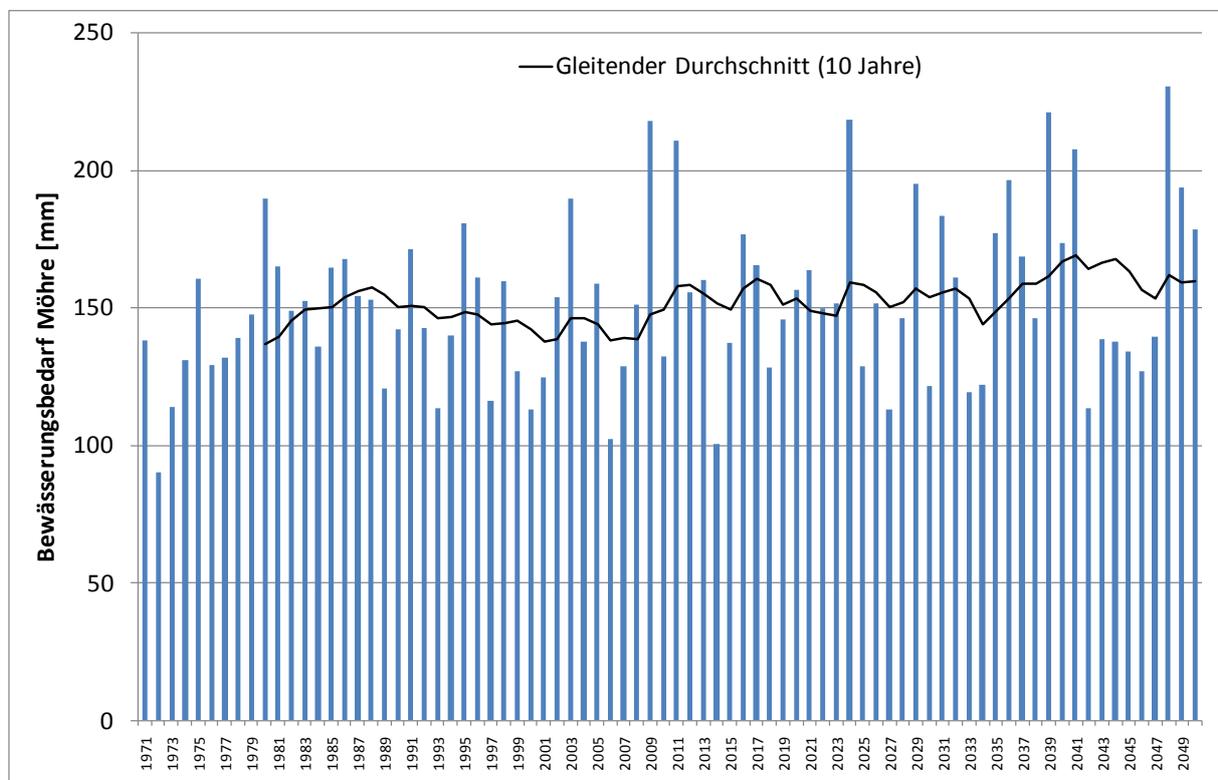


Abbildung 23: Mit REMO (ECHAM 5 / Szenario A1B) ermittelter mittlerer jährlicher Bewässerungsbedarf von Möhren in den Jahren 1971 bis 2050 für die Vorderpfalz (Flächenmittel).

Radies

Den höchsten Zusatzwasserbedarf innerhalb der betrachteten Periode weisen Radies im Jahr 2024 mit einem durchschnittlichen Bedarf von 83 mm auf (Abbildung 24). Den geringsten durchschnittlichen Bedarf weist das Jahr 2014 mit 43 mm auf.

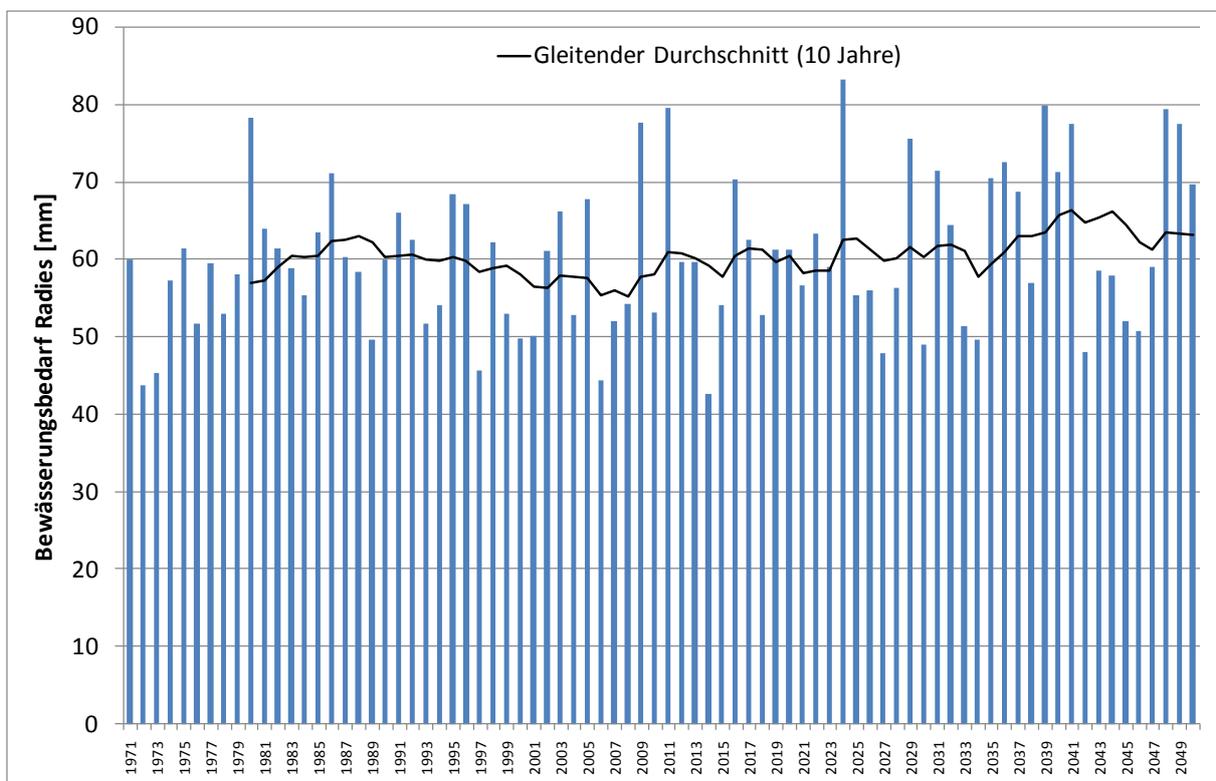


Abbildung 24: Mit REMO (ECHAM 5 / Szenario A1B) ermittelter mittlerer jährlicher Bewässerungsbedarf von Radies in den Jahren 1971 bis 2050 für die Vorderpfalz (Flächenmittel).

Veränderung zwischen den Dekaden

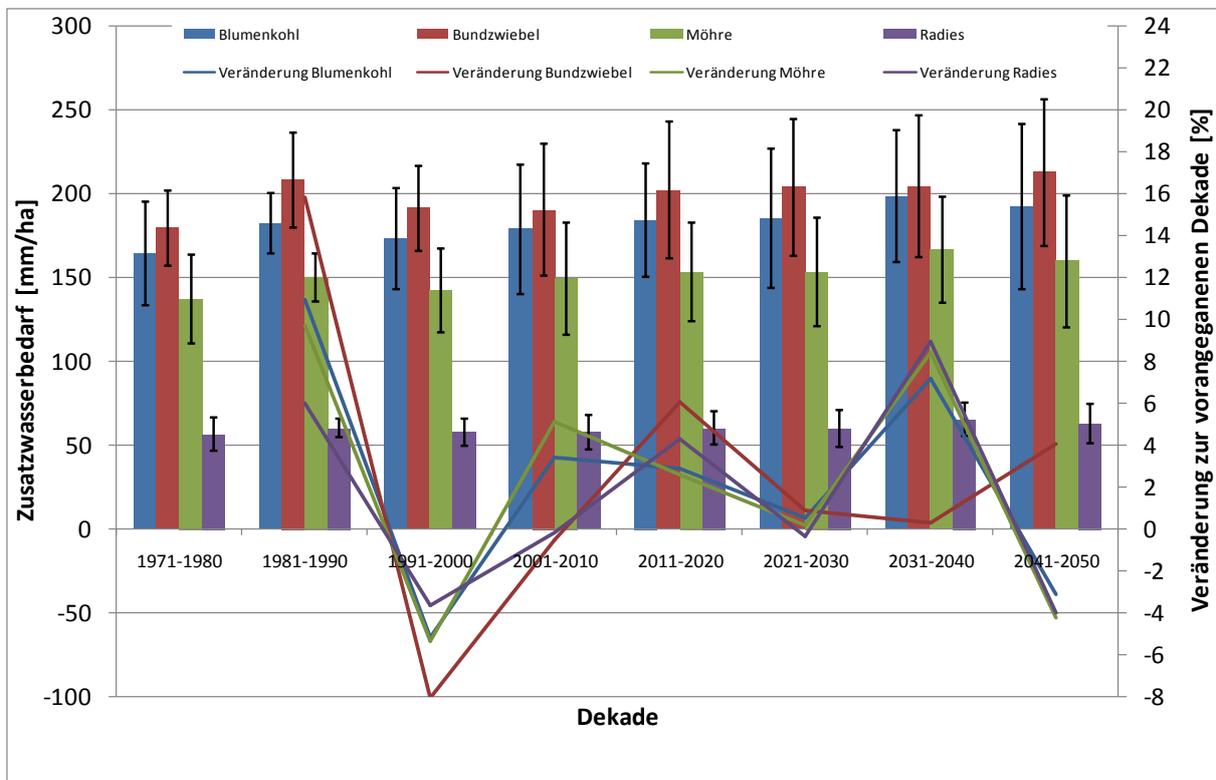


Abbildung 25: Mit REMO (ECHAM5 / Szenario A1B) ermittelte mittlere Zusatzwassermenge innerhalb der Dekaden und die Veränderung des Bewässerungsbedarfs zur vorangegangenen Dekade für alle betrachteten Kulturen. Fehlerbalken kennzeichnen die Standardabweichung.

Der Beregnungsbedarf der vier ausgewählten Kulturen steigt im Mittel der 2. Dekade (1981-1990) im Vergleich zur vorhergegangenen Dekade um 10,6% an (Abbildung 25). Der Anstieg fällt für die Kulturen jedoch sehr unterschiedlich aus. So steigt der Bewässerungsbedarf bei Radies nur um 6% an, während er sich bei Bundzwiebeln um 15,9% erhöht. In der Dekade von 1991-2000 nimmt der Beregnungsbedarf um 5,5% ab. Auch hier sind wieder deutliche Unterschiede zwischen den Kulturen festzustellen. Die höchste Abnahme weisen die Bundzwiebeln mit 8% auf. In den beiden nachfolgenden Dekaden nimmt der Beregnungsbedarf um durchschnittlich 2% bzw. nochmals um 4% zu. Ein deutlicher Unterschied zwischen den Kulturen ist nochmals in den Dekaden 2031-2040 und 2041-2050 festzustellen. Während die Kulturen Blumenkohl, Möhre und Radies in der Dekade 2031-2040 im Mittel eine Zunahme des Bewässerungsbedarfs von 8,2 % aufweisen, liegt die Zunahme bei Bundzwiebel lediglich

lich bei 0,3 %. In der Dekade von 2041-2050 weist die Bundzwiebel nochmals eine Zunahme von 4,1 % auf, während die anderen Kulturen eine Abnahme von durchschnittlich 3,8 % aufweisen.

Die Ergebnisse zeigen eine deutliche dekadische Variabilität, wobei die Ergebnisse der zukünftigen Dekaden ab 2021 sich innerhalb der Schwankungsbreite der auf den Referenzzeitraum beruhenden Ergebnisse bewegen. Zusätzlich zu den dekadischen Absolutwerten sind die Klimaänderungssignale des Zusatzwasserbedarfs als relative Abweichung des 30jährigen Zeitraums 2021 – 2050 gegenüber dem Referenzzeitraum 1971 – 2000 in Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5: Klimaänderungssignale der Zusatzbewässerung

| Klimaperiode | 2021 – 2050 vs. 1971 – 2000 Änderung [%] | | | |
|--------------|---|-------------|--------|--------|
| | Blumenkohl | Bundzwiebel | Möhre | Radies |
| C-CLM | +3.06 | +2.11 | +3.27 | +1.62 |
| REMO | +10.74 | +7.22 | +11.81 | +7.88 |

Ausgehend von den Ergebnissen kann festgehalten werden, dass bis zum Jahr 2050 kein eindeutiger Trend eines steigenden Zusatzwasserbedarfs für die Projektregion Vorderpfalz auf Grundlage der betrachteten Klimaprojektionen erkennbar ist. Jedoch zeigen alle Projektionen einen Zusatzwasserbedarf - es gibt somit zumindest eine Richtungssicherheit.

4. Fazit

Die Vorderpfalz ist eine landwirtschaftlich intensiv genutzte Region, wobei die guten Anbaubedingungen auf die klimatischen Rahmenbedingungen zurückzuführen sind. Mit einer durchschnittlichen Tagesmitteltemperatur von über 10°C sowie weniger als 500-600 mm Niederschlag gehört die Vorderpfalz zu einer der wenigen Regionen in Deutschland, die somit durchaus ideale Voraussetzungen für viele verschiedene Sektoren, wie bspw. für den Tourismus oder den Anbau von Sonderkulturen, bietet.

Insbesondere zeigt sich aufgrund der hohen ökonomischen Stellung von Sonderkulturen ein zunehmend verstärkter Gemüseanbau in der Vorderpfalz, der sich in den letzten Jahren positiv entwickelt hat. Durch die vorhandenen, zentralen Märkte, wie z. B. der Pfalzmarkt in Mutterstadt, bestehen bundesweit erstklassige Absatzmöglichkeiten. Je nachdem, wie sich zukünftig sowohl die klimatischen Bedingungen als auch die Flächennutzung gestalten, kann auch in Zukunft mit großer Wahrscheinlichkeit von einer Intensivierung des Gemüseanbaus ausgegangen werden.

Ein essentielles Kriterium für eine intensive gemüsebauliche Nutzung ist das Vorhandensein der Möglichkeit zur Bewässerung, da gerade Wasser im Gemüseanbau einen unverzichtbaren Produktionsfaktor darstellt. Zwar sind erhöhte Temperaturen und damit verbunden längere Anbauzeiträume in erster Linie positiv für den Gemüseanbau, allerdings steigt in diesem Zusammenhang auch der Bedarf an Wasser und Nährstoffen. Die durchaus speziellen klimatischen Bedingungen der Vorderpfalz stellen den Gemüsebau daher vor einige Probleme, denn gerade die Landwirtschaft ist direkt vom Klima abhängig, weshalb sie entsprechend vulnerabel gegenüber Klimaveränderungen ist.

Auch bei einer nach wie vor großen Variabilität der meteorologischen Parameter Niederschlag und Temperatur sind im Zuge des Klimawandels, gekennzeichnet durch den Anstieg der Lufttemperatur und einem Rückgang der natürlichen Niederschläge während der Vegetationsperiode, ein Anstieg der Verdunstungswerte und dementsprechend eine zunehmend negative klimatische Wasserbilanz die Folge. Für den Gemüsebau mit vorwiegend bereg-

nungswürdigen Kulturen hätte eine Entwicklung hin zu extremer Trockenheit schwerwiegende Folgen.

Die vorliegenden Simulationen möglicher klimatischer Veränderungen für die Vorderpfalz ergeben eine für den Gemüseanbau eher ungünstige Tendenz zu einer Niederschlagsumverteilung. Die Abnahme der sommerlichen Niederschläge liegt bei 7% bis 24%. Die Niederschlagszunahme im Winter liegt laut den verwendeten Modellen bei 5% bis 32%. Zudem muss mit einer Zunahme niederschlagsfreier Phasen gerechnet werden. Im Referenzzeitraum von 1971 bis 2000 finden sich innerhalb der Vegetationsperiode bereits vier niederschlagfreie Perioden mit einer Dauer von ≥ 30 Tagen. Den Simulationsergebnissen nach ergibt sich ein Trend hin zu einer tendenziell erhöhten Häufigkeit als auch zunehmender Länge dieser niederschlagsfreien Phasen innerhalb der Vegetationsperiode.

Ausgehend von der möglichen Umverteilung der Niederschläge und dem zu erwartenden Anstieg der Verdunstung aufgrund steigender Temperaturen ergibt sich eine Entwicklung hin zu einer negativen klimatischen Wasserbilanz. Sie weist innerhalb der Vegetationsperiode im Vergleich von 2021 – 2050 zur Referenz 1971 – 2000 eine Abnahme von rund 52% (Modell C-CLM) bzw. 17% (Modell REMO) auf, während außerhalb der Vegetationsperiode die Zunahme zukünftig gerade mal 3,85% (Modell C-CLM) bzw. 1,17% (Modell REMO) beträgt (siehe Abb. A1 und A2). Vergleicht man die Entwicklung über die Jahre hinweg, so schwankt die KWB im Zeitraum von 1971 bis 2050 bei der Simulation mit C-CLM im Bereich von -0,66 mm/Tag bis +2,54 mm/Tag und bei der Simulation mit REMO von -0,83 mm/Tag bis +2,11 mm/Tag.

Zusammenfassend lässt sich also festhalten, dass die verwendeten Zeitreihen einen Trend zu trockeneren Verhältnissen simulieren. In Anbetracht der Annahmen, dass es in der Region Vorderpfalz zukünftig wärmer wird, weniger natürliche Niederschläge vorhanden sind, Gemüse bereits einen hohen Wasserbedarf aufweist und sich daher für diese Sonderkultur ein erhebliches Wasserdefizit ergeben kann, stellt sich die Frage, inwieweit zukünftig der Gemüseanbau und die notwendige Zusatzbewässerung gesichert werden können. Ohne Zweifel stellt dies im Zusammenhang mit dem Klimawandel eines der wichtigsten Probleme dar, da neben den landwirtschaftlichen auch wasserwirtschaftliche Gesichtspunkte eine wichtige Rolle spielen.

Diesbezüglich wird näher betrachtet, wie sich der Zusatzwasserbedarf bestimmter Kulturen – in diesem Fall Radies, Möhre, Blumenkohl und Bundzwiebel – darstellt:

Der Zusatzwasserbedarf schwankt innerhalb des Simulationszeitraumes von 1971 bis 2050 jährlich um einen Mittelwert von ca. 204 mm für Blumenkohl, 234 mm für Bundzwiebel, 173 mm für Möhre und 71 mm für Radies (Modell C-CLM) bzw. 182 mm für Blumenkohl, 199 mm für Bundzwiebel, 151 mm für Möhre und 60 mm für Radies (Modell REMO). Hinsichtlich der absoluten Werte, ausgehend von 1971, kann zwar ein Anstieg des Bedarfs bis 2050 festgestellt werden, jedoch ergeben sich im Vergleich der 30jährigen Zeiträume 1971 – 2000 und 2021 – 2050 nur minimale Veränderungen. Der Bedarf an Zusatzwasser wird sich in Folge der Niederschlags- und Verdunstungsveränderung somit zwar geringfügig erhöhen, stellt aber keine maßgeblichen Änderungen der Berechnungsmengen dar, da das Klimaänderungssignal zu schwach ausgeprägt ist. Des Weiteren liegt das Klimaänderungssignal im Bereich der natürlichen Schwankungen des Referenzzeitraumes, das heißt die Schwankungen innerhalb sowie zwischen den Dekaden unterliegen der natürlichen Varianz. Der Unterschied zwischen den Dekaden kann demnach nicht als signifikant eingestuft werden und somit auch keine Rückschlüsse für einen zukünftig erhöhten Zusatzbewässerungsbedarf gezogen werden.

Nichtsdestotrotz ist der Zusatzwasserbedarf bei den untersuchten Kulturen gegeben und eine Bewässerung für eine entsprechend qualitative und quantitative Produktion notwendig. Dies macht es auch zukünftig erforderlich, dass ausreichend Wasser für den Ausgleich des Defizits und zur Deckung des Bewässerungsbedarfs zur Verfügung steht. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage nach den Möglichkeiten zur Bereitstellung des Wassers. Zusätzlich zur Versorgungsfrage aus Grund- und Oberflächenwasser, muss auch die Verteilung des Wassers gewährleistet sein. Aus wasserwirtschaftlicher Sicht erscheint die Wasserentnahme aus dem Rhein sowie aus dem Grundwasser eher unproblematisch, da diese Vorräte nicht defizitär sind. Allerdings ergeben sich Interessenskonflikte hinsichtlich der Wassernutzung mit Kommunen und Industrie. Ein weiterer Aspekt sind mögliche Konflikte mit Natur- und Grundwasserschutz (siehe EU WRRL). Die Vorderpfalz profitiert in dieser Hinsicht vom „Wasser- und Bodenverband zur Beregnung der Vorderpfalz“. Dieser Verband ermöglicht bereits heutzutage eine flächendeckende Bewässerung auf ca. 13 500 ha. Aufgrund des zunehmenden Wasserbedarfs und als Reaktion auf den Klimawandel sind bereits Planungen zur Erweiterung auf 22 000 ha angelaufen.

Insgesamt betrachtet ergeben sich mittelfristig für den Gemüseanbau in der Vorderpfalz keine schwerwiegenden Nachteile hinsichtlich des Zusatzwasserbedarfs. Dennoch werden die sich ändernden klimatischen Bedingungen sowohl die Anbauplanung als auch die Kulturführung in Zukunft beeinflussen. Insbesondere werden eine effiziente Wassernutzung sowie

Wasserversorgung im Vordergrund stehen, damit Ertragsverluste vermieden und Kosten gespart werden können.

Die hier vorgestellten Ergebnisse der Klimasimulationen sind nicht als Vorhersagen für die Zukunft zu interpretieren, da die klimatischen Verhältnisse bis zum Ende des Jahrhunderts in den Klimamodellen nicht exakt dargestellt werden. Vielmehr handelt es sich dabei um mögliche zukünftige Entwicklungen. Des Weiteren sind die Simulationen der Klimamodelle auch immer von den definierten Rahmenbedingungen abhängig. Viele der einbezogenen Rahmenbedingungen wie bspw. Wachstum der Bevölkerung, soziale und ökonomische Entwicklungen oder technischer Fortschritt können nicht exakt vorhergesagt werden, da ihre Entwicklung von Entscheidungen abhängen, die erst in der Zukunft selbst getroffen werden.

Somit sind auch die hier vorgestellten Ergebnisse mit einigen Unsicherheiten behaftet, da die verwendete Kombination aus Modellen (C-CLM, REMO, WETTREG 2010) unter Antrieb eines Globalmodells (ECHAM5) und dem Szenario A1B nur einen Bruchteil der möglichen Varianten an Kombinationen darstellt. Dennoch liefern bereits diese für den betrachteten Zeitraum von 1971 bis 2050 eine große Ergebnisbandbreite.

Ebenso muss bei der Interpretation der Ergebnisse beachtet werden, dass bestimmte Aspekte wie beispielsweise sich zukünftig ändernde Anbauverhältnisse oder Veränderungen hinsichtlich der thermischen Vegetationsperiode in den Berechnungen nicht berücksichtigt worden sind. Denn es besteht zum einen die Möglichkeit, dass zukünftig andere Kulturen angebaut werden, die mitunter weniger Wasser benötigen, was sich wiederum auf die Beregnungspraxis auswirken würde, wobei hier hauptsächlich die Nachfrage auf dem Markt eine der wichtigsten Einflussgrößen ist. Zum anderen können sich ausgehend von erhöhten Temperaturen der Vegetationszeitraum und die Kulturzeit verändern. Im Klimabericht für Rheinland-Pfalz aus dem Jahr 2007 wird darauf hingewiesen, dass sich die Vegetationsperiode verfrüht. Demnach besteht die Möglichkeit, dass zukünftig mehrere Sätze pro Saison angebaut werden können, da die Kulturen selbst schneller erntereif wären und sich das zeitliche Anbaufenster vergrößert. All dies würde dann abermals eine Erhöhung des Wasserbedarfs zur Folge haben.

Es wird deutlich, wie schwierig es ist, Anpassungsstrategien auf Grundlage regionale Klimamodellsimulationen zu entwickeln. Die große Bandbreite an Modell-Szenario-Kombinationen führt zu einem hohen Maß an Unsicherheit. Daher empfiehlt es sich einerseits das Spektrum der verwendeten Modell-Szenarien-Kombination und andererseits den Betrachtungszeitraum bis zum Ende des Jahrhunderts (2100) zu erweitern, um statistisch

abgesicherte Trends ableiten zu können und eine möglichst große Bandbreite in den Ergebnissen zu erhalten.

5. Literatur

Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M., 1998: Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. 300pp In: Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome, Italy.

ATV-DVWK-M 504, 2002: Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden.

Berthold, G., 2009: Sicherstellung der landwirtschaftlichen Produktion mit Zusatzwasserbedarf bei veränderten klimatischen Bedingungen. Integriertes Klimaschutzprogramm Hessen INKLIM 2012 II plus (Abschlussbericht).

BMBF 2010: Anpassungsstrategien an Klimatrends und Extremwetter und Maßnahmen für ein nachhaltiges Grundwassermanagement. BMBF Fördermaßnahme (Abschlussbericht)

Heidt, L., 2009: Auswirkungen des Klimawandels auf die potenzielle Beregnungsbedürftigkeit Nordost-Niedersachsens. GeoBerichte 13. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen (Hrsg.)

IPCC, 2007a: Climate Change 2007. In: Synthesis Report. Pachauri, R.K.; Reisinger, A. (Eds.). Core Writing Team. Cambridge University Press, Cambridge.

IPCC, 2007b: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. In: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Chen, Z.; Marquis, M.; Averyt, K. B.; Tignor, M. and Miller, H.L., ed. Cambridge University Press, Cambridge.

IPCC, 2007c: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. In: Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Parry, M. L.; Canziani, O.F.; Palutikof, J.P.; van der Linden, P.J. and Hanson, C.E. Cambridge University Press, Cambridge.

Jacob, D., 2001: A note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin. Meteorological Atmospheric Physics 77, 61-73.

Jacob, D. et al., 2007: An inter-comparison of regional climate models for Europe: Design of the experiments and model performance. PRUDENCE Special Issue. Climatic Change. Vol. 81.

KLIWA (Hrsg.), 2008: Langzeitverhalten von Sonnenscheindauer und Globalstrahlung sowie von Verdunstung und Klimatischer Wasserbilanz in Baden-Württemberg und Bayern. KLIWA-Berichte, Heft 12.

Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz (Hrsg.), 2007: Klimabericht Rheinland-Pfalz

Olesen, J.E., Bindi, M., 2002: Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *European Journal of Agronomy* 16, 239 – 262.

Paschold, P. J., 2010: Bewässerung im Gartenbau. Ulmer Verlag, Stuttgart.

Regierungspräsidium Darmstadt (Hrsg.), 2009: Landwirtschaftliche Bewässerung.

Rockel, B.; Will, A.; Hense, A., 2008: The regional climate model COSMO-CLM (C-CLM). *Meteorologische Zeitschrift* 17, 347-348.

Roeckner, E.; Bäuml, G.; Bonaventura, L.; Brokopf, R.; Esch, M.; Giorgetta, M.; Hagemann, S.; Kirchner, I.; Kornblüeh, L.; Manzini, E.; Rhodin, A.; Schlese, U.; Schulzweida, U.; Tompkins, A., 2003: The atmospheric general circulation model ECHAM5 Part I: Model description. 127pp. In: Report No. 349. Max Planck Institute for Meteorology. Hamburg.

Smith, M., 2000: The application of climatic data for planning and management of sustainable rainfed and irrigated crop production. *Agricultural and Forest Meteorology* 103, 99 – 108.

Spekat, A.; Enke W.; Kreienkamp F., 2010: Weiterentwicklung von WETTREG bezüglich neuartiger Wetterlagen. Bericht.

6. Anhang

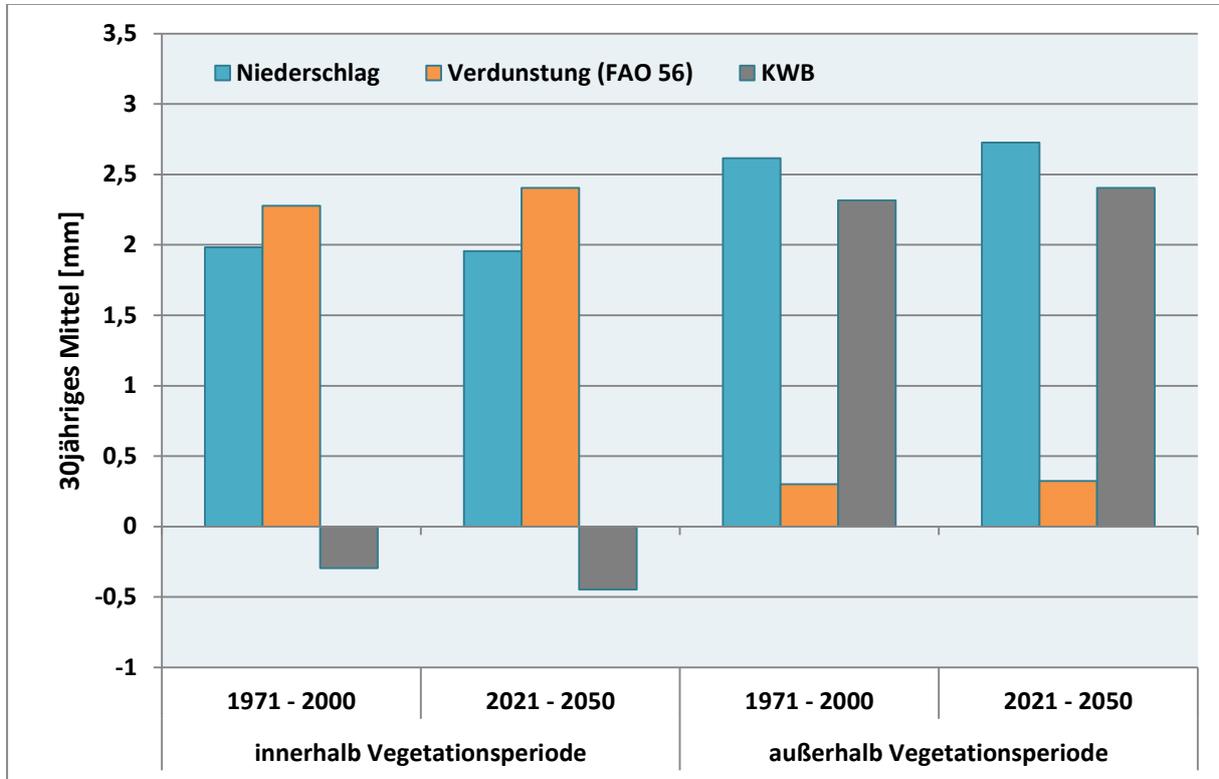


Abbildung A 1: 30jähriges Mittel für Niederschlag, Verdunstung und daraus resultierende klimatische Wasserbilanz (jeweils in mm) innerhalb und außerhalb der Vegetationsperiode auf Grundlage der Simulationsdaten von C-CLM (ECHAM5 / Szenario A1B) für die Vorderpfalz (Flächenmittel).

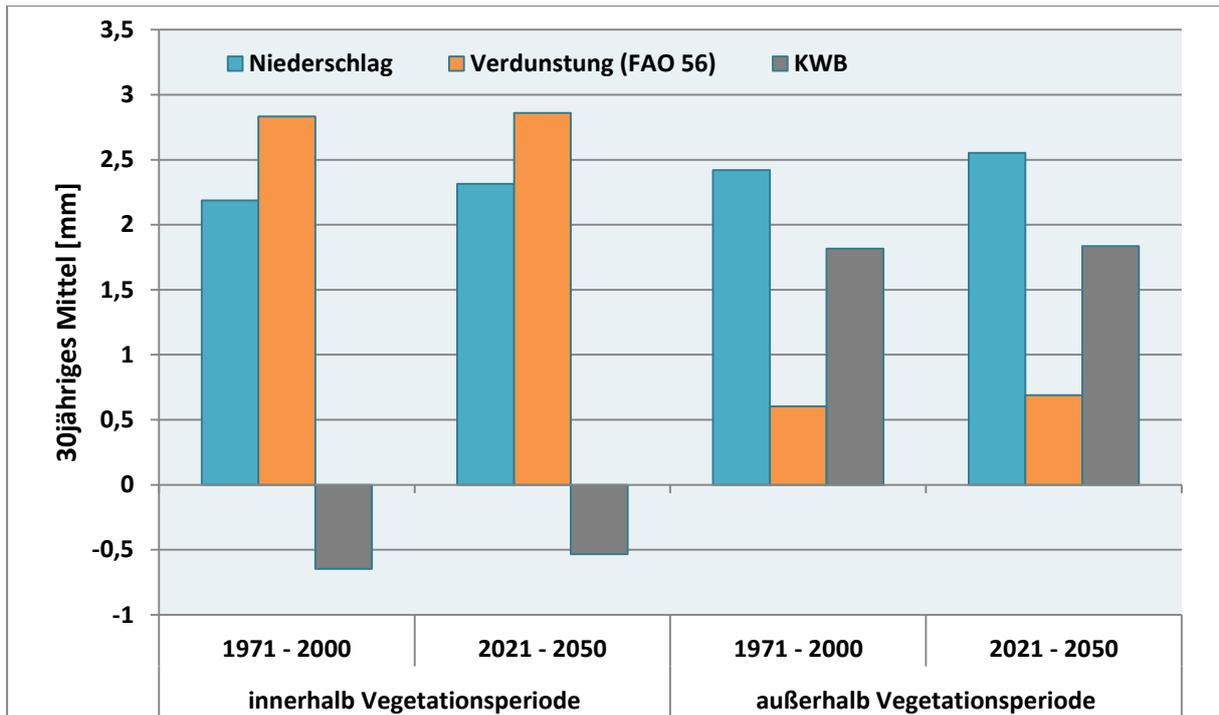


Abbildung A 2: 30jähriges Mittel für Niederschlag, Verdunstung und daraus resultierende klimatische Wasserbilanz (jeweils in mm) innerhalb und außerhalb der Vegetationsperiode auf Grundlage der Simulationsdaten von REMO (ECHAM5 / Szenario A1B) für die Vorderpfalz (Flächenmittel).

Tabelle A 1: Übersicht der einzelnen Gitterpunkte bzw. Stationen der Regionalmodelle zur Abbildung des Untersuchungsgebietes Vorderpfalz für die Simulationen

| REMO | C-CLM | WETTREG 2010 |
|---------------|------------|-----------------------------|
| GP_49.05_7.75 | GP_074_094 | Biblis |
| GP_49.05_7.85 | GP_074_095 | Stetten Kreis Donnersberg |
| GP_49.05_7.95 | GP_074_096 | Kirchheimbolanden |
| GP_49.05_8.05 | GP_075_094 | Göllheim |
| GP_49.05_8.15 | GP_075_095 | Ruppertsecken |
| GP_49.05_8.25 | GP_075_096 | Falkenstein (Pfalz) |
| GP_49.05_8.35 | GP_076_094 | Enkenbach - Alsenborn |
| GP_49.05_8.45 | GP_076_095 | Ramsen (Pfalz) |
| GP_49.15_8.55 | GP_076_096 | Grünstadt |
| GP_49.15_7.75 | | Dirmstein |
| GP_49.15_7.85 | | Frankenthal |
| GP_49.15_7.95 | | Worms |
| GP_49.15_8.05 | | Dackenheim |
| GP_49.15_8.15 | | Bad Dürkheim |
| GP_49.15_8.25 | | Hochdorf - Assenheim |
| GP_49.15_8.35 | | Waldleiningen |
| GP_49.15_8.45 | | Weinbiet (AWST) |
| GP_49.15_8.55 | | Rhodt |
| GP_49.25_7.75 | | Landau (Pfalz) – Taubensuhl |
| GP_49.25_7.85 | | Landau (Pfalz) |
| GP_49.25_7.95 | | Eggenstein Leopoldshafen |
| GP_49.25_8.05 | | |
| GP_49.25_8.15 | | |
| GP_49.25_8.25 | | |
| GP_49.25_8.35 | | |
| GP_49.25_8.45 | | |
| GP_49.25_8.55 | | |
| GP_49.35_7.75 | | |
| GP_49.35_7.85 | | |
| GP_49.35_7.95 | | |
| GP_49.35_8.05 | | |
| GP_49.35_8.15 | | |
| GP_49.35_8.25 | | |
| GP_49.35_8.35 | | |
| GP_49.35_8.45 | | |

| | | |
|---------------|--|--|
| GP_49.35_8.55 | | |
| GP_49.45_7.75 | | |
| GP_49.45_7.85 | | |
| GP_49.45_7.95 | | |
| GP_49.45_8.05 | | |
| GP_49.45_8.15 | | |
| GP_49.45_8.25 | | |
| GP_49.45_8.35 | | |
| GP_49.45_8.45 | | |
| GP_49.45_8.55 | | |
| GP_49.55_7.75 | | |
| GP_49.55_7.85 | | |
| GP_49.55_7.95 | | |
| GP_49.55_8.05 | | |
| GP_49.55_8.15 | | |
| GP_49.55_8.25 | | |
| GP_49.55_8.35 | | |
| GP_49.55_8.45 | | |
| GP_49.55_8.55 | | |
| GP_49.65_7.75 | | |
| GP_49.65_7.85 | | |
| GP_49.65_7.95 | | |
| GP_49.65_8.05 | | |
| GP_49.65_8.15 | | |
| GP_49.65_8.25 | | |
| GP_49.65_8.35 | | |
| GP_49.65_8.45 | | |
| GP_49.65_8.55 | | |
| GP_49.75_7.75 | | |
| GP_49.75_7.85 | | |
| GP_49.75_7.95 | | |
| GP_49.75_8.05 | | |
| GP_49.75_8.15 | | |
| GP_49.75_8.25 | | |
| GP_49.75_8.35 | | |
| GP_49.75_8.45 | | |
| GP_49.75_8.55 | | |