

Ermittlung des regionalen Bewässerungsbedarfs für die Landwirtschaft in Bayern

Jacob Jeff Bernhardt, Lennart Rolfes, Peter Kreins, Martin Henseler

Thünen Report 96

Bibliografische Information:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikationen in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information:
The Deutsche Nationalbibliothek (German National Library) lists this publication in the German National Bibliography; detailed bibliographic data is available on the Internet at www.dnb.de

Bereits in dieser Reihe erschienene Bände finden Sie im Internet unter www.thuenen.de

Volumes already published in this series are available on the Internet at www.thuenen.de

Zitationsvorschlag – Suggested source citation:

Bernhardt JJ, Rolfes L, Kreins P, Henseler M (2022) Ermittlung des regionalen Bewässerungsbedarfs für die Landwirtschaft in Bayern. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 138 p, Thünen Rep 96, DOI:10.3220/REP1657029754000

Die Verantwortung für die Inhalte liegt bei den jeweiligen Verfassern bzw. Verfasserinnen.

The respective authors are responsible for the content of their publications.



Thünen Report 96

Herausgeber/Redaktionsanschrift – Editor/address

Johann Heinrich von Thünen-Institut
Bundesallee 50
38116 Braunschweig
Germany

thuenen-report@thuenen.de
www.thuenen.de

ISSN 2196-2324
ISBN 978-3-86576-243-6
DOI:10.3220/REP1657029754000
urn:nbn:de:gbv:253-202207-dn065033-6

Ermittlung des regionalen Bewässerungsbedarfs für die Landwirtschaft in Bayern

Jacob Jeff Bernhardt, Lennart Rolfes, Peter Kreins, Martin Henseler

Thünen Report 96

Studie im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten

**Bayerisches Staatsministerium für
Ernährung, Landwirtschaft und Forsten**



Jacob Jeff Bernhardt, M.Sc.
Lennart Rolfes, M.Sc.
Dr. Martin Henseler (bis 08/2020)
Dipl.-Ing. agr. Peter Kreins

Institut für Lebensverhältnisse in ländlichen Räumen
Johann Heinrich von Thünen-Institut
Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei
Bundesallee 64
D-38116 Braunschweig

Telefon: +49 531 596-5271
Fax: +49 531 596-5599
E-Mail: jacob-jeff.bernhardt@thuenen.de

Thünen Report 96

Braunschweig/Germany, Juli 2022

Zusammenfassung

Die Herausforderungen des fortschreitenden Klimawandels stellen die globale Landwirtschaft zukünftig vor große Herausforderungen und erfordern durchdachte Anpassungsstrategien. So zählt eine Anpassung des Wassermanagements zu einer der großen Aufgaben, die es zu bewältigen gilt. Änderungen der monatlichen Wasserbilanz und der Niederschlagshöhen und deren innerjährige Verschiebung zugunsten des Winterhalbjahres sowie Steigerungen der Verdunstungsraten lassen die Verfügbarkeit von Wasser als zunehmend begrenzten Produktionsfaktor gelten. Diese globalen Änderungen lassen sich auch auf regionalem Maßstab betrachten und sind somit auch in Deutschland von hoher Relevanz. Im vorliegenden Projekt wird der erwartbare Klimawandel durch das globale RCP 8.5-Szenario angenommen und durch das Kernensemble des Deutschen Wetterdienstes (DWD) regionalisiert abgebildet. Auf Basis dieser Klimaprojektionen wird die Bewässerungsbedürftigkeit der Landwirtschaft Bayerns in einer Modellsimulation berechnet und nach Ackerbau-, Gemüsebau- und weiteren Sonderkulturen aufgeschlüsselt. In der Vergangenheit am Thünen-Institut durchgeführte Studien zur Bewässerungsbedürftigkeit stellen die Grundlage der Modellentwicklung dar, die im Zuge des Projekts kontinuierlich optimiert wurde. Im Modell werden, basierend auf dem Prinzip der Geisenheimer Beregnungssteuerung, neben Klimadaten zusätzlich bodenkundliche und pflanzenspezifische Parameter verwendet, um kulturspezifische Unterschiede der Bewässerungsbedürftigkeit zu ermitteln. Diese Informationen werden mit räumlichen Daten zur landwirtschaftlichen Landnutzung Bayerns verknüpft, um die Bewässerungsbedürftigkeit räumlich differenziert abschätzen zu können.

Das in dieser Studie entwickelte Modell weist eine hohe Sensitivität gegenüber den Eingangsparametern auf und erlaubt es, Simulationen verschiedener Zeiträume und Untersuchungsgebiete durchzuführen. Im Verlauf der Modellentwicklung wurden, in Abstimmung mit einem Landesexpertenkreis, verschiedene Annahmen getroffen. Insgesamt konnte die Methodik verbessert und weiterentwickelt werden, sodass eine Übertragbarkeit auf andere Projekte und Fragestellungen möglich ist.

Die räumliche Analyse der Ergebnisse zeigt eine hohe Übereinstimmung mit den Schwerpunktregionen Bayerns, in denen eine überdurchschnittliche Bewässerungsbedürftigkeit zu erwarten ist. In der vorliegenden Studie wird die Bewässerungsbedürftigkeit der bayerischen Landwirtschaft für die Perioden 1991–2020 (Ex-Post-Periode) und 2021–2050 (Zukunft) simuliert. So lässt sich beispielsweise im Knoblauchsland, den unterfränkischen Weinbauregionen sowie den Bereichen südlich von Regensburg ein hoher Wasserbedarf der Landwirtschaft durch das Modell identifizieren, der auch in der Realität zu beobachten ist. Die mittlere Bewässerungsbedürftigkeit aller betrachteten Kulturen nimmt, im Vergleich der beiden Beobachtungszeiträume, zu. Es sind Steigerungen der mittleren jährlichen Bewässerungsbedürftigkeit von 19 % bis in das Jahr 2050 zu erwarten. Differenziert nach Landnutzungsklassen nimmt die Bewässerungsbedürftigkeit Bayerns im Ackerbau um 19 %, im Gemüsebau um 23 % und im Anbau von sonstigen Sonderkulturen um 10 % zu. Jährliche Schwankungen der klimatischen Bedingungen können allerdings zu deutlichen Abweichungen vom mittleren Trend führen.

JEL: Q15, Q25, Q54, C21

Schlagwörter: Landwirtschaft, Bewässerung, Dürre, Wassermanagement, Wasser, , Klimawandel, Raumbezogene Modelle, Bayern

Summary

The challenges associated with ongoing climate change will pose major challenges for global agriculture in the future and require well thought-out adaptation strategies. Thus, adaptation of water management is one of the major tasks to be tackled. Changes in the monthly water balance and precipitation depths and their intra-annual shift in favor of the winter half-year, as well as increasing evaporation rates, indicate that the availability of water is a limited production factor. These global changes can also be considered on a regional scale and are consequently also of high relevance in Germany. The regional representation of the scenario succeeds on the basis of the core ensemble of the German Weather Service (DWD). Based on these climate projections, the irrigation demand of Bavaria's agriculture is calculated in a model simulation. The model results are subdivided into arable crops, vegetable crops and special crops. Studies on irrigation demand done in the past at the Thünen Institute form the basis of the model development, which has been continuously optimized in the course of the project. The model approach is based on the principle of Geisenheim irrigation management where soil and crop-specific characteristics are used in addition to climate data to differentiate plants water requirements. This information is combined with spatial data on agricultural land use in Bavaria in order to estimate regional irrigation demands.

In this study, the irrigation demands of Bavarian agriculture are simulated for the periods 1991–2020 (ex-post period) and 2021–2050 (future). The mean irrigation demand of all considered crops increases, comparing the two observation periods. By 2050 the mean annual water demand is expected to increase by 19 %. Differentiated by land use classes, Bavaria's irrigation demand increases by 19 % in arable farming, by 23 % in vegetable growing and by 10 % in the cultivation of special crops. However, annual fluctuations in climatic conditions can lead to significant deviations from the mean trend. The spatial analysis of the model results displays a high degree of correspondence with the current irrigation regions of Bavaria. Thus, a high water demand of agriculture can be identified by the model in the regions Knoblauchsland, the wine-growing regions of Lower Franconia, the areas south of Regensburg and north of Augsburg. The model developed in this study has a high sensitivity to the input parameters and allows simulations of different time periods and study areas. The methodology could be improved and further developed. Also, the transferability to other projects and issues is given.

JEL: Q15, Q25, Q54, C21

Keywords: Agriculture and Environment, Irrigation, Drought, Water Supply, Climate Change, Spatial Model

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	i
Summary	ii
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VII
Anhangsverzeichnis	VIII
Abkürzungsverzeichnis	X
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung des Projekts und allgemeine Vorgehensweise	1
1.2 Aufbau und Struktur des Thünen Reports	3
2 Bewässerungsrelevante Grundlagen und methodische Zusammenhänge	4
2.1 Hintergrund und Stand der Forschung	4
2.2 Modell und Datenstruktur	4
2.3 Datenerfassung und -aufbereitung der bewässerungsrelevanten Parameter	6
2.3.1 Boden	7
2.3.2 Klima	9
2.3.3 Landnutzung	9
2.3.4 Pflanze	10
2.4 Berechnung der täglichen Wasserbilanzen	13
2.5 Ermittlung der spezifischen nutzbaren Feldkapazität des Anbausystems	13
2.6 Kalkulation der Einzelwassergaben je Gemeinde und Aggregat	14
2.7 Ermittlung der Jahresbilanzen der Bewässerungsbedürftigkeit	16
3 Bestandsanalyse der bayerischen Landwirtschaft	17
3.1 Geografische Lage und naturräumliche Gliederung	17
3.1.1 Administrative Einheiten	17
3.1.2 Einteilung nach Großlandschaften und Naturräumen	18
3.2 Boden	20
3.3 Landnutzung	23
3.3.1 Ackerbau	24
3.3.2 Grünland	31
3.3.3 Gemüsebau	32

3.3.4	Sonderkulturen	36
3.4	Klima	40
3.4.1	Niederschlag	41
3.4.2	Verdunstung	42
3.4.3	Klimatische Wasserbilanz	43
3.4.4	Grundwasserneubildung	44
3.5	Entwicklung des Klimas in Bayern	46
3.5.1	Einordnung des Klimaszenarios	46
3.5.2	Änderungssignale der Klimamodelle (Vergleich von Modellvergangenheit und Observationsdaten)	47
3.5.3	Veränderung des Klimas im Monats- und Jahresverlauf 1991–2050	52
3.6	Aktueller Stand der Bewässerung in Bayern	57
4	Ergebnis – Entwicklung der regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von 1991–2050	61
4.1	Regionale Bewässerungsbedürftigkeit Bayern (gesamt)	62
4.2	Räumliche Änderungssignale im Vergleich von Ex-Post-Periode und Zukunftsperiode der Klimaprojektionen	65
4.3	Ackerbau	66
4.3.1	Allgemein	66
4.3.2	Ausgewählte Kulturen	68
4.4	Gemüsekulturen	73
4.4.1	Allgemein	73
4.4.2	Ausgewählte Kulturen	75
4.5	Sonderkulturen	77
4.5.1	Allgemein	77
4.5.2	Ausgewählte Kulturen	79
5	Ergebnis – Bewässerungsbedürftigkeit in Schwerpunktgebieten der bayerischen Bewässerungslandwirtschaft	82
6	Diskussion des entwickelten Modells und Interpretation der Modellergebnisse	85
7	Fazit und Ausblick	87
	Literaturverzeichnis	89
	Anhang	93

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Fließschema zum Aufbau und zur Datenstruktur des entwickelten Modells	5
Abbildung 2:	Feinbodenartendiagramm mit Klassifizierung nach den Bodenartengruppen; Eigenschaften von Böden in Abhängigkeit von Ton- und Sandgehalt	7
Abbildung 3:	Modellierter Verlauf des Pflanzenkoeffizienten im jahreszeitlichen Verlauf am Beispiel von Wintergetreide	11
Abbildung 4:	Modellierter Verlauf der Durchwurzelungstiefen (in cm) im jahreszeitlichen Verlauf am Beispiel von Wintergetreide	12
Abbildung 5:	Schematische Darstellung des jahreszeitlichen Verlaufs der durchwurzelten Bodenschicht, die durch Bewässerungsgaben aufgefüllt werden muss	14
Abbildung 6:	Kreise und Regierungsbezirke in Bayern	17
Abbildung 7:	Topografische Karte und Großlandschaften in Bayern	18
Abbildung 8:	Topografische Karte und Naturraum-Haupteinheiten in Bayern	19
Abbildung 9:	Verteilung der Bodenarten in Bayern	20
Abbildung 10:	Nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum in Bayern	21
Abbildung 11:	Ackerbauliches Ertragspotenzial der Böden in Bayern	22
Abbildung 12:	Landnutzung in Bayern	23
Abbildung 13:	Regionaler Anteil der Ackerfläche an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Bayern, 2016	24
Abbildung 14:	Regionaler Anteil von Wintergetreide an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Bayern, 2016	25
Abbildung 15:	Regionaler Anteil von Sommergetreide an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Bayern, 2016	26
Abbildung 16:	Regionaler Anteil von Mais an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Bayern, 2016	27
Abbildung 17:	Regionaler Anteil von Kartoffeln an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Bayern, 2016	28
Abbildung 18:	Regionaler Anteil von Zuckerrüben an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Bayern, 2016	29
Abbildung 19:	Regionaler Anteil von Raps und weiteren Ölfrüchten an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Bayern, 2016	30
Abbildung 20:	Regionaler Anteil von Grünland an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Bayern, 2016	31

Abbildung 21:	Regionaler Anteil von Gemüse an der landwirtschaftlichen Fläche in Bayern, 2016	32
Abbildung 22:	Regionaler Anbau von Erdbeeren an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Bayern, 2016	33
Abbildung 23:	Regionaler Anbau von Gurken an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Bayern, 2016	34
Abbildung 24:	Regionaler Anbau von Spargel an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Bayern, 2016	35
Abbildung 25:	Regionaler Anteil von Sonderkulturen an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Bayern, 2016	36
Abbildung 26:	Regionaler Anteil von Wein an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Bayern, 2016	37
Abbildung 27:	Regionaler Anteil von Hopfen an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Bayern, 2016	38
Abbildung 28:	Regionaler Anteil von Kern-, Stein- und Beerenobst an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Bayern, 2016	39
Abbildung 29:	Mittlere Jahresniederschläge in Bayern (1991–2020)	41
Abbildung 30:	Mittlere jährliche Verdunstung in Bayern (1991–2020)	42
Abbildung 31:	Mittlere jährliche klimatische Wasserbilanz in Bayern (1991–2020)	43
Abbildung 32:	Mittlere jährliche Grundwasserneubildung aus Niederschlag (1971–2000)	45
Abbildung 33:	Änderungen der mittleren globalen Erdoberflächentemperatur nach RCP-Szenarien	47
Abbildung 34:	Beobachtete und projizierte Entwicklung der Jahresmittelniederschläge (1991–2020)	48
Abbildung 35:	Beobachtete und projizierte mittlere Änderungen des Monatsniederschlags im jahreszeitlichen Verlauf (1991–2020)	48
Abbildung 36:	Beobachtete und projizierte Entwicklung der mittleren jährlichen Grasreferenzverdunstung (1991–2020)	49
Abbildung 37:	Beobachtete und projizierte Änderungen der mittleren monatlichen Grasreferenzverdunstung im jahreszeitlichen Verlauf (1991–2020)	50
Abbildung 38:	Beobachtete und projizierte Entwicklung der jährlichen klimatischen Wasserbilanz (1991–2020)	51
Abbildung 39:	Beobachtete und projizierte mittlere klimatische Wasserbilanz im jahreszeitlichen Verlauf (1991–2020)	51
Abbildung 40:	Modellierte langjährige Entwicklung der mittleren Jahresniederschläge (1991–2050)	52

Abbildung 41:	Median des mittleren Monatsniederschlags aller Projektionen im jahreszeitlichen Verlauf der Zeiträume 1991–2020 und 2021–2050 und deren Abweichungen zueinander	53
Abbildung 42:	Modellierte langjährige Entwicklung der mittleren jährlichen Verdunstung (1991–2050)	54
Abbildung 43:	Beobachtete und projizierte mittlere Änderungen der Verdunstung im jahreszeitlichen Verlauf (2021–2050)	54
Abbildung 44:	Modellierte langjährige Entwicklung der mittleren jährlichen klimatischen Wasserbilanz (1991–2050)	55
Abbildung 45:	Beobachtete und projizierte mittlere Änderungen der klimatischen Wasserbilanz im jahreszeitlichen Verlauf (2021–2050)	56
Abbildung 46:	Bewässerte Fläche in Deutschland im Jahr 2019 nach Bundesländern	58
Abbildung 47:	Gebiete mit erhöhtem Bewässerungsaufkommen in Bayern	59
Abbildung 48:	Anteil der bewässerten Fläche an der gesamten landwirtschaftlichen Fläche auf Kreisebene	60
Abbildung 49:	Entwicklung der mittleren jährlichen Bewässerungsbedürftigkeit im bayernweiten Durchschnitt von 1991–2050	62
Abbildung 50:	Mittlere Bewässerungsbedürftigkeit bezogen auf die Gesamt-LF je Gemeinde auf Grundlage von Klimaprojektionsdaten (1991–2020)	63
Abbildung 51:	Mittlere Bewässerungsbedürftigkeit bezogen auf die Gesamt-LF je Gemeinde auf Grundlage von Klimaprojektionsdaten (2021–2050)	64
Abbildung 52:	Änderungen der mittlere Bewässerungsbedürftigkeit je Gemeinde von 1991–2020 zu 2021–2050	65
Abbildung 53:	Entwicklung der mittleren jährlichen Bewässerungsbedürftigkeit des Ackerbaus im bayernweiten Durchschnitt von 1991–2050	66
Abbildung 54:	Entwicklung der durchschnittlichen jährlichen regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von Ackerbaukulturen je Gemeinde in Bayern	67
Abbildung 55:	Änderungssignale der durchschnittlichen regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von Ackerbaukulturen zwischen den Referenzperioden 1991–2020 und 2021–2050	67
Abbildung 56:	Entwicklung der durchschnittlichen jährlichen regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von Wintergetreide je Gemeinde in Bayern	68
Abbildung 57:	Entwicklung der durchschnittlichen jährlichen regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von Sommergetreide je Gemeinde in Bayern	69
Abbildung 58:	Entwicklung der durchschnittlichen jährlichen regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von Silomais je Gemeinde in Bayern	69
Abbildung 59:	Entwicklung der durchschnittlichen jährlichen regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von Körnermais je Gemeinde in Bayern	70

Abbildung 60:	Entwicklung der durchschnittlichen jährlichen regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von Kartoffeln je Gemeinde in Bayern	71
Abbildung 61:	Entwicklung der durchschnittlichen jährlichen regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von Zuckerrüben je Gemeinde in Bayern	71
Abbildung 62:	Entwicklung der durchschnittlichen jährlichen regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von Raps je Gemeinde in Bayern	72
Abbildung 63:	Entwicklung der mittleren jährlichen Bewässerungsbedürftigkeit des Gemüsebaus im bayernweiten Durchschnitt von 1991–2050	73
Abbildung 64:	Entwicklung der durchschnittlichen jährlichen regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von Gemüsekulturen je Gemeinde in Bayern	74
Abbildung 65:	Änderungssignale der durchschnittlichen regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von Gemüsekulturen zwischen den Referenzperioden 1991–2020 und 2021–2050	74
Abbildung 66:	Entwicklung der durchschnittlichen jährlichen regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von Erdbeeren je Gemeinde in Bayern	75
Abbildung 67:	Entwicklung der durchschnittlichen jährlichen regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von Einlege-/Gurken je Gemeinde in Bayern	76
Abbildung 68:	Entwicklung der durchschnittlichen jährlichen regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von Spargel je Gemeinde in Bayern	76
Abbildung 69:	Entwicklung der mittleren jährlichen Bewässerungsbedürftigkeit von Sonderkulturen im bayernweiten Durchschnitt von 1991–2050	77
Abbildung 70:	Entwicklung der durchschnittlichen jährlichen regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von Sonderkulturen je Gemeinde in Bayern	78
Abbildung 71:	Änderungssignale der durchschnittlichen regionalen Bewässerungsbedürftigkeit der Sonderkulturen zwischen den Referenzperioden 1991–2020 und 2021–2050	78
Abbildung 72:	Entwicklung der durchschnittlichen jährlichen regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von Wein je Gemeinde in Bayern	79
Abbildung 73:	Entwicklung der durchschnittlichen jährlichen regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von Hopfen je Gemeinde in Bayern	80
Abbildung 74:	Entwicklung der durchschnittlichen jährlichen regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von Kern-, Stein- und Beerenobst (ohne Erdbeeren) je Gemeinde in Bayern	81
Abbildung 75:	Schwerpunktgebiete der bayerischen Bewässerungslandwirtschaft	83

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Berücksichtigte Kulturen und Aggregate der festgelegten Kategorien Ackerbau, Gemüsebau und Sonderkulturen	10
Tabelle 2:	Verhältnis von nutzbarer Feldkapazität und Pflanzenwachstum	12
Tabelle 3:	Beispielhafte Bilanzierung der Bewässerungsgaben	16
Tabelle 4:	Globale und regionale Klimamodelle des RCP 8.5-Ensembleszenarios	46
Tabelle 5:	Auszug aus der Statistik: Mögliche und tatsächliche Bewässerung im Vergleich der Bundesländer	57
Tabelle 6:	Kennwertklassifizierung der Bewässerungsbedürftigkeit	61
Tabelle 7:	Zuordnung von Gebietskörperschaften zu den Schwerpunktgebieten der Bewässerung in Bayern	82
Tabelle 8:	Absolute Bewässerungsbedürftigkeit für die Schwerpunktgebiete als Mittelwerte über 30 Jahreszeiträume und für alle Kulturaggregate	84

Anhangsverzeichnis

Tabelle A.1:	Gebildete Kulturaggregate der landwirtschaftlichen Landnutzung	93
Tabelle A.2:	Pflanzenkoeffizienten im jahreszeitlichen Verlauf, differenziert nach Kulturaggregaten	94
Tabelle A.3:	Wurzeltiefen im jahreszeitlichen Verlauf, differenziert nach Kulturaggregaten	95
Tabelle A.4:	Bewässerungsschwellen und Zielfeuchte, differenziert nach Kulturaggregaten	96
Tabelle A.5:	Absolute Bewässerungsbedürftigkeit in Schwerpunktgebiet 1 differenziert nach Kulturaggregaten	97
Tabelle A.6:	Absolute Bewässerungsbedürftigkeit in Schwerpunktgebiet 2 differenziert nach Kulturaggregaten	98
Tabelle A.7:	Absolute Bewässerungsbedürftigkeit in Schwerpunktgebiet 3 differenziert nach Kulturaggregaten	99
Tabelle A.8:	Absolute Bewässerungsbedürftigkeit in Schwerpunktgebiet 4 differenziert nach Kulturaggregaten	100
Tabelle A.9:	Absolute Bewässerungsbedürftigkeit in Schwerpunktgebiet 5 differenziert nach Kulturaggregaten	101
Tabelle A.10:	Absolute Bewässerungsbedürftigkeit in Schwerpunktgebiet 6 differenziert nach Kulturaggregaten	102
Karte A.11:	Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Ackerbaukulturen (1991–2020 und 2021–2050)	103
Karte A.12:	Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Wintergetreide (1991–2020 und 2021–2050)	104
Karte A.13:	Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Sommergetreide (1991–2020 und 2021–2050)	105
Karte A.14:	Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Silomais (1991–2020 und 2021–2050)	106
Karte A.15:	Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Körnermais (1991–2020 und 2021–2050)	107
Karte A.16:	Durchschnittliche jährliche potenzielle Bewässerungsbedürftigkeit von Kartoffeln (1991–2020 und 2021–2050)	108
Karte A.17:	Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Zuckerrüben und weiteren Hackfrüchten (1991–2020 und 2021–2050)	109

Karte A.18:	Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Raps und weiteren Ölfrüchten (1991–2020 und 2021–2050)	110
Karte A.19:	Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Gemüsekulturen (1991–2020 und 2021–2050)	111
Karte A.20:	Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Erdbeeren (1991–2020 und 2021–2050)	112
Karte A.21:	Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Gurken (Einlegegurken) (1991–2020 und 2021–2050)	113
Karte A.22:	Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Spargel (1991–2020 und 2021–2050)	114
Karte A.23:	Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Sonderkulturen (1991–2020 und 2021–2050)	115
Karte A.24:	Durchschnittliche jährliche potenzielle Bewässerungsbedürftigkeit von Wein (1991–2020 und 2021–2050)	116
Karte A.25:	Durchschnittliche jährliche potenzielle Bewässerungsbedürftigkeit von Hopfen (1991–2020 und 2021–2050)	117
Karte A.26:	Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Kern-, Stein-, Beerenobst (ohne Erdbeeren) (1991–2020 und 2021–2050)	118

Abkürzungsverzeichnis

A	
AWC	Nutzbare Feldkapazität (englisch: ‚available water capacity‘)
C	
CWB	Klimatische Wasserbilanz (englisch: ‚climatic water balance‘)
D	
DWD	Deutscher Wetterdienst
E	
ET ₀	Potenzielle Verdunstung bzw. Evapotranspiration
ET _{spez}	Pflanzenspezifische Evapotranspiration
F	
FAO56	FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) Irrigation and drainage Paper No. 56
G	
GIS	Geografisches Informationssystem
I	
ID	Bewässerungsbedürftigkeit (englisch: ‚irrigation demand‘)
InVeKoS	Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
K	
K _c	Pflanzenkoeffizient (englisch: ‚plant coefficient‘)
L	
LBEG	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen
LF	Landwirtschaftliche Fläche
LfU	Bayerisches Landesamt für Umwelt
N	
nFK	Nutzbare Feldkapazität
P	
P	Niederschlag (englisch: ‚precipitation‘)
R	
RCP	Representative Concentration Pathways
RD	Wurzeltiefenverteilung (englisch: ‚root depth‘)
S	
StMUV	Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz

1 Einleitung

Durch den Klimawandel zeichnen sich weltweit ein Anstieg der Durchschnittstemperaturen, Veränderungen des Niederschlags und eine Häufung von Extremwetterereignissen ab. Für Deutschland ist ein Anstieg der Niederschlagshöhen zu erkennen und gleichzeitig zeichnet sich eine Verschiebung der Niederschlagszeiten vom Sommerhalbjahr in die Wintermonate ab. Die Klimaprognosen gehen diesbezüglich von einem Trend aus, infolgedessen die Wasserverfügbarkeit für Pflanzen und für die Landwirtschaft während der Wachstumsperiode rückläufig sein wird. Die landwirtschaftliche Produktion hängt in Deutschland sowohl mit der zeitlichen als auch mit der mengenmäßigen Verfügbarkeit von Wasser zusammen. Durch die klimawandelbedingten Veränderungen wird Wasser zum knappen Gut und zunehmend ein begrenzter Produktionsfaktor für landwirtschaftliche Erzeugnisse. Es ist von zunehmenden Ertragsausfällen sowie einer reduzierten Ertragsqualität auszugehen. Derartige Risiken, die durch Trockenstress und Wassermangel ausgehen, lassen sich in Deutschland durch die Missernten und Ertragsausfälle der Dürrejahre 2018, 2019 und teilweise 2020 belegen, in denen die Landwirtschaft deutschlandweit einen Einbruch des hohen Ertragsniveaus verzeichnen musste.

Außerdem haben sich die Rahmenbedingungen für die Landwirtschaft in Deutschland in den letzten Jahren stark gewandelt. Viele internationale Agrarmarktexterten gehen langfristig von einem weltweiten Wirtschaftswachstum aus, wodurch die Nachfrage nach Agrarprodukten, insbesondere in Indien und China, steigen wird. Gleichzeitig wird die Nachfrage durch die Förderung der Bioenergie erhöht. Insgesamt ist demnach mit einem deutlichen Anstieg der Agrarpreise und dadurch mit einer Intensivierung der Landwirtschaft zu rechnen. Die intensive Landwirtschaft gewinnt an Wettbewerbskraft und ermöglicht ein hohes Ertragsniveau. Das Produktionsrisiko steigt und produktionstechnische Lösungen, insbesondere die Bewässerung, werden vielerorts nötig, um das hohe Ertragsniveau und die gute Qualität der landwirtschaftlichen Produktion in Zeiten des Klimawandels aufrechtzuerhalten.

Die Bewässerung landwirtschaftlicher Kulturen zielt darauf ab, das Wasserdefizit, verursacht durch ausbleibende Niederschläge, auszugleichen, um damit optimale Wachstumsbedingungen für die landwirtschaftliche Erzeugung zu gewährleisten. Gartenbauliche Kulturen können in der Regel ohne Bewässerung nicht kultiviert werden. Durch die klimatischen Veränderungen ist jedoch deutschlandweit mit einem zusätzlichen Bedarf an künstlich zugeführtem Wasser in der Landwirtschaft zu rechnen. Dieser kann regional sehr unterschiedlich ausfallen. Da ein zunehmender Wasserbedarf der Landwirtschaft für die Bewässerung regional bereits bestehende Wassernutzungskonflikte verstärken kann, besteht in diesem Bereich ein besonderer Bedarf an Informationen.

1.1 Zielsetzung des Projekts und allgemeine Vorgehensweise

Ziel des Projekts war die Entwicklung eines Ansatzes, der es erlaubt, die zukünftige regionale Bewässerungsbedürftigkeit landwirtschaftlicher Intensivkulturen unter Klimawandelbedingungen flächendeckend und auf Gemeindeebene für ganz Bayern realitätsnah abzuschätzen.

Das Projekt baute auf den bestehenden Arbeiten des Thünen-Instituts für Lebensverhältnisse in ländlichen Räumen auf und ermöglicht eine Übertragbarkeit auf andere Regionen Deutschlands.

Zur Erreichung des Ziels wurden folgende Unterziele verfolgt:

- Abbildung der regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von Intensivkulturen für die Ex-Post-Periode von 1991–2020
- Regionale Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf die Bewässerungsbedürftigkeit von Intensivkulturen (Zukunftsperiode von 2021–2050)

Zur Erreichung der Ziele wurde die Arbeit in fünf aufeinander aufbauende Arbeitspakete gegliedert.

Ex-Post-Zustandsbeschreibung

Das erste Arbeitspaket hat eine vorbereitende Funktion, indem Daten und Literatur gesammelt und ausgewertet werden. Darüber hinaus wird durch Experten- und Praktikergespräche eine detaillierte Beschreibung der Ex-Post-Entwicklung und des Ist-Zustands hinsichtlich des regionalen Bewässerungsumfangs sowie der Anbaustruktur der Landwirtschaft in Bayern erstellt. Diese Zusammenstellung liefert wertvolle Informationen für die Entwicklung eines realitätsnahen Ansatzes zur Abbildung der Bewässerungsbedürftigkeit und zur Einschätzung der Plausibilität der Analyseergebnisse der zukünftigen Entwicklung der Bewässerung.

Datenerfassung und -aufbereitung

In einem zweiten Schritt erfolgt eine gebietsumfassende, flächendifferenzierte Datenerfassung auf möglichst disaggregierter Ebene, das Einpflegen in eine GIS-gestützte (Geografisches Informationssystem) Datenbank sowie eine Verschneidung der unterschiedlichen Datensätze. Eine differenzierte, kartografische Auswertung der Parameter dient zum einen der Konsistenzprüfung und zum anderen der regionalen Beschreibung der Untersuchungsregion. Die wichtigsten Datengrundlagen zu Boden- und Klimaverhältnissen in Bayern wurden im Rahmen dieses Projekts vom Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) und vom DWD zur Verfügung gestellt. Zur Aussage über die Anbauumfänge werden Daten zur Gemeindestatistik sowie Informationen aus dem Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystem (InVeKoS) zusammengetragen, ausgewertet und für nächste Arbeitspakete aufbereitet.

Berechnung der Bewässerungsbedürftigkeit für den Ist-Zustand

Das dritte Arbeitspaket umfasst die Erstellung eines Modells zur Berechnung der regionalen Bewässerungsbedürftigkeit. Die Informationen aus der Literaturrecherche sowie die gesammelten Daten in der GIS-Datenbank bilden die Basis für die Weiterentwicklung des methodischen Ansatzes zur Abschätzung der Bewässerungsbedürftigkeit für die Ex-Post-Periode.

Validierung der Modellergebnisse und Optimierung des Modellansatzes

Für die Validierung der ermittelten Ergebnisse werden zum einen die Ergebnisse der Ex-Post-Analyse und Validierungsdaten aus typischen bayerischen Bewässerungsregionen herangezogen. Darüber hinaus werden die modellierten Ergebnisse mit einem Landesexpertenkreis aus Vertreter*innen der Landwirtschaftsverwaltung, Landwirtschaft und Forschung diskutiert. Die Expertengespräche dienten der Abstimmung der Modellergebnisse und der angewandten Methodik. Diese Anmerkungen werden genutzt, um den bestehenden Ansatz weiterzuentwickeln und die Abschätzung der Bewässerungsbedürftigkeit in Bayern zu verbessern.

Analyse des erwartbaren Klimawandels auf die Bewässerungsbedürftigkeit

Zur Abschätzung der Folgen des erwartbaren Klimawandels werden vermehrt quantitative Schätzungen des Klimas für die Zukunft herangezogen. Derartige Klimaprojektionen werden mit globalen und regionalen Klimamodellen berechnet. Den Projektionen liegen verschiedene Szenarien zugrunde, die jeweils spezifische Annahmen über die zukünftigen Treibhausgasemissionen und über die Sensitivität des globalen Klimas einbeziehen. Im Rahmen des Projekts wird das Kernensemble des Deutschen Wetterdienstes für das Klimaprojektionsszenario RCP 8.5 verwendet. Diese Daten wurden vom Deutschen Wetterdienst zur Verfügung gestellt und als klimatische Parameter in den validierten Modellansatz zur Berechnung der regionalen Bewässerungsbedürftigkeit eingepflegt. Die Ergebnisse des Ex-Post-Zustands und der zukünftigen Entwicklung der Bewässerungsbedürftigkeit in Bayern werden gegenübergestellt und interpretiert.

1.2 Aufbau und Struktur des Thünen Reports

Strukturell ist die durchgeführte Studie in mehrere Bereiche gegliedert, die im Folgenden erläutert werden. Nach der Einleitung in die Thematik wird in Kapitel 2 die der Modellsimulation zugrunde liegende Methodik näher beschrieben. Dabei werden alle Schritte der Erfassung und Aufbereitung der bewässerungsrelevanten Parameter aufgezeigt. Deren Verarbeitung wird im Modell anschließend erläutert: Kapitel 2.3 bis 2.7 beinhalten von der Berechnung der täglichen Wasserbilanzen über die Kalkulation der pflanzen- und standortspezifischen Einzelwassergaben bis hin zur abschließenden Ermittlung der Jahresbilanzen der Bewässerungsbedürftigkeit.

In Kapitel 3 werden das Untersuchungsgebiet und der Beobachtungszeitraum hinsichtlich geografischer und bodenkundlicher Eigenschaften beschrieben, bevor tiefergehende Informationen zur Landnutzung (3.3), zum Klimas (3.4), dessen zukünftiger Entwicklung (0) und zum aktuellen Stand der Bewässerung (3.6) genannt werden.

Kapitel 4 beinhaltet die Ergebnisse der Modellsimulation in Form der Bewässerungsbedürftigkeit der Perioden 1991–2020 und 2021–2050. Dieser ist zunächst nach seiner räumlichen Verteilung (4.1) und dessen Änderung im Kontext des Klimawandels beschrieben (4.2). Daran schließt sich in den Unterkapiteln 4.3 bis 4.5 die Darstellung der Kulturen des Acker- und Gemüsebaus sowie ausgewählte Sonderkulturen an. In Kapitel 5 werden absolute Ergebnisse für Bewässerungsschwerpunktgebiete in Bayern dargestellt.

Abschließend werden in Kapitel 6 und 7 die Ergebnisse der Studie diskutiert, im Kontext des Klimawandels eingeordnet und ein Ausblick gegeben.

Weiterführende Informationen zu verwendeter Literatur, tiefergehenden Modellergebnissen und ausgewählten Schwerpunktregionen der landwirtschaftlichen Bewässerung Bayerns sind im Literaturverzeichnis und im Anhang des Berichts aufgeführt.

2 Bewässerungsrelevante Grundlagen und methodische Zusammenhänge

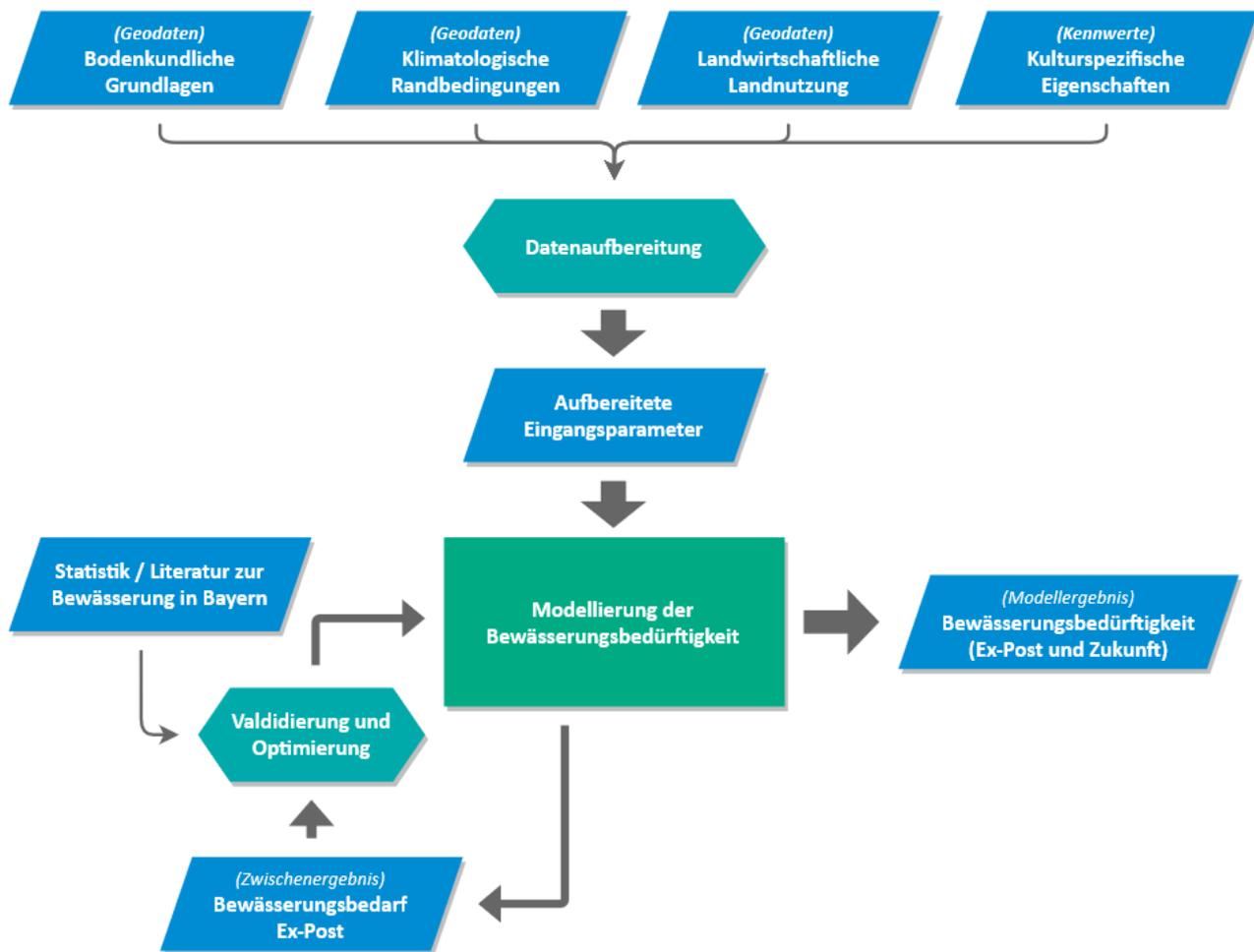
2.1 Hintergrund und Stand der Forschung

Für Deutschland gibt es bislang nur wenige flächendeckende Analysen der zukünftigen Entwicklung der Bewässerungsbedürftigkeit. Die Bewässerungsbedürftigkeit bzw. der Bewässerungsbedarf (oder: Beregnungsbedarf) beschreibt die Zusatzwassermenge die notwendig ist, um landwirtschaftliche Kulturen mit ausreichend Wasser zu versorgen. In Ermangelung flächendeckender Daten und Statistiken zur tatsächlich eingesetzten Wassermenge durch die Landwirtschaft wird die Bewässerungsbedürftigkeit als zu modellierender Parameter herangezogen. Dieser ermöglicht es, den Zusatzwasserbedarf für heutige und zukünftige Klima-, Boden- und Landnutzungssysteme räumlich abzuschätzen.

Aufgrund der räumlich differenzierten Unterschiede der Bewässerungsbedürftigkeit bedarf es bei der Interpretation und der Ableitung von Handlungsbedarf einer regionalen Betrachtung. Es gibt einige Untersuchungen, die sich mit einer regionalen Betrachtung des Klimawandels und dessen Auswirkungen auf den Wasserhaushalt und den Wasserbedarf der Landwirtschaft befassen haben. Diese wurden vornehmlich für bereits bestehende, typische Bewässerungsregionen wie beispielsweise in Nordost-Niedersachsen, das Hessische Ried oder in Nordrhein-Westfalen durchgeführt. Zu nennen sind hier die Arbeiten der Landwirtschaftskammer Niedersachsen für die Region Nordost-Niedersachsen mit dem Projekt „No Regret – Genug Wasser für die Landwirtschaft?!“ (LWK Niedersachsen, 2008) oder das Projekt „Auswirkungen des Klimawandels auf die potenzielle Bewässerungsbedürftigkeit Nordost-Niedersachsen“ vom Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen (LBEG) (Heidt, 2009). Darüber hinaus haben (Kreins et al., 2013) einen flächendeckenden Ansatz zur Abschätzung der Auswirkungen des erwartbaren Klimawandels auf die Bewässerungsbedürftigkeit in Nordrhein-Westfalen entwickelt. Diese Ansätze werden im vorliegenden Projekt aufgegriffen, weiterentwickelt und für das Bundesland Bayern umgesetzt.

2.2 Modell und Datenstruktur

Die methodische Ermittlung des Wasserbedarfs ausgewählter Kulturen zu verschiedenen Zeitpunkten und in definierten Zeiträumen erfolgte in mehreren Teilschritten, die im Folgenden dargestellt sind. Einen Überblick über die durchgeführten Schritte liefert das folgende Fließschema (siehe Abbildung 1), dessen Teilaspekte in den folgenden Unterkapiteln näher erläutert sind.

Abbildung 1: Fließschema zum Aufbau und zur Datenstruktur des entwickelten Modells

Quelle: Eigene Darstellung.

Das Prinzip des entwickelten Modells basiert auf den Erkenntnissen der Geisenheimer Beregnungssteuerung (Paschold et al., 2009; LAP, 2002; HGU, 2021) und der Bewässerungs- und Einzelwassergaben-App des ALB Bayern e. V. (Müller et al., 2020). Die Beregnungssteuerung wurde ursprünglich für den Gemüsebau entwickelt, mit dem Ziel, Zusatzwassergaben auf Grundlage klimatischer Eingangsgrößen festzulegen. Dabei basiert das Prinzip auf einer Erweiterung der klimatischen Wasserbilanz (Niederschlag minus Verdunstung) durch den sogenannten Pflanzenkoeffizienten. Der Pflanzenkoeffizient (K_c -Wert) ist ein durch die Hochschule Geisenheim mit Versuchen empirisch ermittelter Korrekturwert, mit dem ein pflanzenspezifischer Wasserbedarf aus der Verdunstung ermittelt werden kann. In Kombination mit Informationen zu den vorherrschenden Böden und Pflanzenentwicklungsstadien kann auf diese Weise der Verlauf der Bodenfeuchte bilanziert werden. Damit lassen sich tägliche Wasserbedarfe bzw. Wasserdefizite für landwirtschaftliche Kulturen ermitteln, um auf dieser Basis Zeitpunkt und Höhe von Bewässerungsgaben festzulegen.

Das entwickelte Modell setzt diese Prinzipien auf räumlicher Ebene um und stellt eine Weiterentwicklung der Arbeiten von (Kreins et al., 2015; Kreins et al., 2013) dar. Eine Grundlage dafür sind räumliche und bodenkundliche Informationen bzw. Bodendaten, klimatologische Daten,

Informationen zur Landnutzung sowie pflanzenspezifische Kennwerte. Die Ermittlung der Bewässerungsbedürftigkeit in Bayern findet mit einem räumlichen Bezug statt, sodass alle Eingangsdaten auf der Gemeindeebene räumlich aggregiert werden.

Für das Modell werden einige **Annahmen** getroffen, die im Folgenden aufgeführt und in Kapitel 2.3 detaillierter erläutert werden. In der Modellrechnung:

- wird jeder Gemeinde ein mittlerer Wert der nutzbaren Feldkapazität der landwirtschaftlichen Flächen (LF) zugewiesen, der als gewichtetes Flächenmittel kalkuliert wird (vgl. Kapitel 2.3.1),
- wird eine konstante Landnutzungsverteilung aus den InVeKoS-Daten von 2016 auf Gemeindeebene für Bayern angenommen, die als Basisdaten in die Modellierungen einfließen (eine Landnutzung für alle Jahre von 1991–2050) (vgl. Kapitel 2.3.3),
- wird die pflanzenspezifische Evapotranspiration durch den Kc-Wert von 0,3 außerhalb des Anbauzeitraums definiert,
- wird eine Wurzeltiefenverteilung berechnet, die außerhalb der Anbauperiode konstant bei 5 cm liegt und innerhalb der Anbauperiode basierend auf festgelegten Eingangsgrößen stetig zunimmt und mit der Ernte abfällt,
- finden Bewässerungsgaben lediglich innerhalb der Anbauperiode statt,
- werden Bewässerungsgaben auf maximal 30 mm pro Tag sowie die maximale Aufnahmefähigkeit des Anbausystems, ausgedrückt durch die nutzbare Feldkapazität, limitiert (vgl. Kapitel 2.6),
- handelt es sich bei den Standorten um grundwasserferne Böden, sodass kein Wasserzuschuss aus Grundwasser oder Hangabfluss dem System zu- oder abgeführt wird; die Wasseraufnahmefähigkeit der Böden ist auf 100 % der nutzbaren Feldkapazität limitiert (vgl. Kapitel 2.6),
- wird für die Bilanzierung der Bodenfeuchten zu Beginn der Vegetationsphase eine vollständige Wassersättigung der Böden (100 % der nutzbaren Feldkapazität) angenommen (vgl. Kapitel 2.6),
- wird ein optimaler Bewässerungsbedarf berechnet. Als Schwelle der nutzbaren Feldkapazität (untere Bewässerungsschwelle) ist ein pflanzenspezifischer Wert definiert, der nicht unterschritten werden darf und ab dem eine Bewässerungsgabe stattfindet. Die obere Bewässerungsschwelle (Zielfeuchte) wird für alle Kulturen pauschal bei 80 % der nutzbaren Feldkapazität festgelegt, sodass eine optimale Bodenfeuchte erhalten bleibt.

2.3 Datenerfassung und -aufbereitung der bewässerungsrelevanten Parameter

Im Folgenden werden Grundlagen der bewässerungsrelevanten Parameter und die einzelnen Schritte der betrachteten Kompartimente der Datenaufbereitung dargestellt. Es werden die entsprechenden Hintergründe erläutert, Quellen genannt und die Aufbereitung der Daten beschrieben.

Datenaufbereitung und Modellentwicklung werden mit gängiger Geoinformationssoftware sowie dem statistischen Datenverarbeitungsprogramm RStudio durchgeführt.

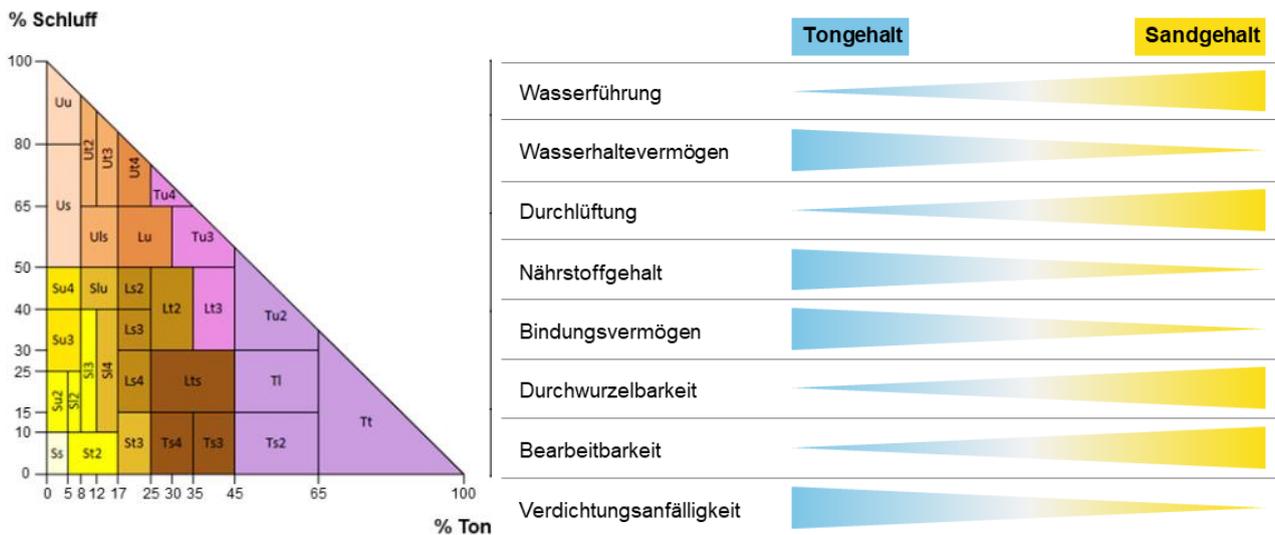
2.3.1 Boden

Bodenkundliche Grundlagen

Der Boden ist aufgrund seiner unterschiedlichen Wasserspeicherfähigkeit ein wichtiger Baustein bei der Abschätzung der Bewässerungsbedürftigkeit landwirtschaftlicher Kulturen. Das Wasserspeichervermögen eines Bodens ist im Wesentlichen durch die Bodenart, also durch die Korngrößenzusammensetzung und die Porengrößenverteilung, bestimmt. Die sogenannte Feldkapazität beschreibt dabei das maximale Wasserspeichervermögen eines Bodens und wird weiter in die nutzbare Feldkapazität (nFK – englisch: AWC ‚available water capacity‘) differenziert, die lediglich den pflanzenverfügbaren Teil des Porenwassers aus Mittel- und Grobporen zusammenfasst und das nicht verfügbare Wasser (Totwasser) ausklammert. Die nFK wird in Prozent des Bodenvolumens (Vol. %) oder in Millimetern (mm) bzw. Litern pro Quadratmeter (l/m²) Bodenwasser angegeben und ist eine wichtige Eingangsgröße für das entwickelte Modell.

Die Oberbodenarten werden je nach Zusammensetzung ihrer Korngrößen in Sandböden, Schluffböden, Lehm Böden und Tonböden unterteilt. Die Bodenarten sind durch unterschiedliche pflanzenbauliche Eigenschaften bezüglich der Wasserspeicherung und -nachlieferung, der Nährstoffspeicherung und der Bearbeitbarkeit gekennzeichnet (siehe Abbildung 2).

Abbildung 2: Feinbodenartendiagramm mit Klassifizierung nach den Bodenartengruppen; Eigenschaften von Böden in Abhängigkeit von Ton- und Sandgehalt



Quelle: Links: Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden (2005), rechts: LfU (2021a).

Die pflanzenbaulichen Eigenschaften der Schluffböden liegen zwischen denen der leichten Sandböden (hohe Wassernachlieferung, geringe Wasserspeicherung, geringer Nährstoffspeicher, gute Bearbeitbarkeit) und den schweren Lehm- und Tonböden (geringe Wassernachlieferung,

hohe Wasserspeicherung, hoher Nährstoffspeicher, schlechte Bearbeitbarkeit). Somit erfüllen Schluffböden die pflanzenbaulichen Kriterien wie gute Bearbeitbarkeit, gute Wassernachlieferung und -speicherung sowie gute Nährstoffverfügbarkeit. Schluffböden können je nach spezifischer Zusammensetzung in ihren Eigenschaften auch Merkmale von Sand, Lehm oder Ton haben. So sind Tonschluffe (t_u) beispielsweise eher schwerere Schluffböden mit einer guten Nährstoffspeicherung, die durch den hohen Tonanteil bedingt ist.

Die Aufbereitung der bodenkundlichen Grundlagen erfolgt in mehreren vorbereitenden Stufen, um sie abschließend auf die räumliche Ebene der Gemeinde zu aggregieren. Zunächst werden die durch das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) zur Verfügung gestellten, bodenkundlichen Karten als Vektordaten (.shp-Format) im Maßstab 1:25.000 und 1:50.000 bayernweit in ein Geoinformationssystem eingelesen. Da die Datengrundlage im Maßstab 1:25.000 (Stand der digitalen Übersichtsbodenkarte von Bayern im April 2020) noch nicht flächig für das gesamte Bundesland vorliegt, müssen entsprechende Datenlücken mit weniger hochaufgelösten Bodendaten ergänzt werden, um eine flächendeckende Karte der Böden Bayerns zu generieren. Dazu werden beide Datensätze verschnitten. Aus dieser Karte können Informationen zur nutzbaren Feldkapazität (mm) und zum potenziellen Wurzelraum (cm) entnommen, in die Form eines Rasterdatensatzes mit einer Rasterzellengröße von 5x5 km überführt und abschließend exportiert werden.

Unter der Annahme, dass landwirtschaftliche Flächen lediglich auf Böden höherer Güte verortet sind und Böden geringerer Wasserhaltefähigkeit eher nachrangig für den Anbau von Kulturen sind, werden für die Aggregation der Böden auf Gemeindeebene Daten zur landwirtschaftlichen Landnutzung hinzugezogen. Die Landnutzung findet dabei indirekt Berücksichtigung, indem durch eine räumliche Überlagerung nur die Bodeninformationen mit einer landwirtschaftlichen Nutzung extrahiert werden und anschließend in die Gemeindeaggregation einfließen.

Anschließend wird der Mittelwert je Gemeinde berechnet. Auf diese Weise lassen sich flächengewichtete Werte für die nFK und die maximale Durchwurzelbarkeit bzw. die Wurzeltiefenverteilung (englisch: RD ‚root depth‘) des Bodens ableiten und bei der Abschätzung bzw. Modellierung der regionalen Bewässerungsbedürftigkeit direkt nutzen.

Beispielhaft für die Ermittlung der mittleren nutzbaren Feldkapazität aller Teilflächen i je Gemeinde $AWC_{Gemeinde}$, gewichtet nach den Anteilen landwirtschaftlicher Teilflächen LF_i , steht folgende Formel:

$$AWC_{Gemeinde} = \frac{\sum_i AWC_i \times LF_i}{\sum LF_i}$$

Somit wird jeder Gemeinde ein individueller Wert der nutzbaren Feldkapazität und der maximalen Durchwurzelbarkeit zugewiesen, der für die spätere Berechnung der Bewässerungsbedürftigkeit genutzt wird. Eine bayernweite Übersicht über die relevanten Bodeninformationen liefert Kapitel 3.2.

2.3.2 Klima

Klimatologische Randbedingungen

Neben den Bodendaten nehmen die Klimadaten einen wesentlichen Bestandteil bei der Ermittlung der Bewässerungsbedürftigkeit ein. Auf die methodischen und rechnerischen Zusammenhänge der Klimaparameter Niederschlag und Verdunstung wird in Kapitel 2.3 näher eingegangen.

Die Klimadaten wurden durch den DWD aktuell und deutschlandweit zur Verfügung gestellt. Dabei werden Observations- und Klimaprojektionsdaten unterschieden. Die Parameter Niederschlag und Grasreferenzverdunstung nach FAO56 (Allen et al., 1998) liegen als Observationsdaten (real gemessene Daten, Einheit mm/d) im Rasterdatenformat mit einer räumlichen Auflösung von 1x1 km und einer täglichen zeitlichen Auflösung für 1991–2020 vor. Die Projektionsdaten der Periode 1991–2020 und 2021–2050 liegen ebenfalls in täglichen Rasterdaten vor und haben eine räumliche Auflösung von 5x5 km. Alle Dateien wurden in Form von netCDF-Datensätzen übermittelt. Mit RStudio lassen sich die umfangreichen Daten aufbereiten, sodass im nächsten Schritt die räumliche Aggregation auf Gemeindeebene stattfinden kann. Die übermittelten Daten decken das Bundesgebiet ab, sodass die Daten zunächst auf das Land Bayern zugeschnitten werden. Für jede Gemeindefläche werden mit räumlicher Statistik Tagesmittelwerte für die klimatischen Parameter Niederschlag und Verdunstung berechnet. Abschließend erfolgt der Export der Datensätze für das entsprechende Jahr als komma-separierte Datei (.csv-Format). Diese Daten gehen direkt in das entwickelte Modell ein.

2.3.3 Landnutzung

Landnutzung

Als Grundlage für die Abbildung der Kulturen, kulturspezifischer Unterschiede und insbesondere deren flächenhafte Ausprägung dienen Landnutzungsinformationen aus dem Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystem für das Jahr 2016. Zunächst werden alle in den InVeKoS-Daten befindlichen Kulturen gruppiert und aggregiert. Dies fand auf Basis der Kultureigenschaften statt. Anschließend wurden Anbau- und Erntezeitpunkt sowie Art und Typ der Kulturen miteinander verglichen. Eine ausführliche Auflistung aller zugeordneten Kulturen in den Aggregaten findet sich im Anhang in Tabelle A.1. Insgesamt wurden 21 Aggregate gebildet, die wiederum in die Kulturgruppen „Ackerkulturen“, „Gemüsekulturen“ und „Sonderkulturen“ eingeteilt worden sind (siehe Tabelle 1). Dieser Prozess wurde in einer Expert*innenrunde diskutiert und gemeinsam abgestimmt. So werden beispielsweise Kartoffeln aufgrund ihres hohen Anbauumfangs unabhängig von weiteren Hackfrüchten separat betrachtet. Die Unterteilung der Kulturen weicht demnach bewusst von der praxisüblichen Einteilung ab. Die Auswertung des Wasserbedarfs findet einerseits allgemeiner, bezogen auf diese Gruppen, statt. Andererseits werden ausgewählte Aggregate und Kulturen separiert dargestellt. Auf die Muster und die räumliche Verteilung sowie flächenmäßige Ausprägung der landwirtschaftlichen Landnutzung wird in Kapitel 3.3 näher eingegangen.

Tabelle 1: Berücksichtigte Kulturen und Aggregate der festgelegten Kategorien Ackerbau, Gemüsebau und Sonderkulturen

Ackerbau	Gemüsebau	Sonderkulturen
Wintergetreide	Gurken	Hopfen
Sommergetreide	Spargel	Wein
Sonstige Getreidearten (z. B. <i>Buchweizen, Amaranth, Körnersorghum</i>)	Erdbeeren	Heil-, Duft- und Gewürzpflanzen
Körnermais	Sonstiges Gemüse im Freiland (z. B. <i>Artischocken, Topinambur etc.</i>)	Blumen und Zierpflanzen im Freiland
Silomais		Samenvermehrung (z. B. <i>Gartenbausämerei oder Gras- und Rübensamenvermehrung</i>)
Kartoffeln		Handelsgewächse (z. B. <i>Flachs, Rollrasen, Tabak</i>)
Zuckerrüben und weitere Hackfrüchte		Kern-, Stein- und Beerenobst
Hülsenfrüchte (z. B. <i>Erbsen, Linsen, Klee</i>)		Sonstige Dauerkulturen
Raps und weitere Ölfrüchte		

Quelle: Eigene Darstellung.

Die Landnutzungsdaten wurden basierend auf InVeKoS-Daten des Jahres 2016 verarbeitet. Dabei wurde die Annahme getroffen, dass sich diese im zeitlichen Verlauf aller betrachteten Jahre zwischen 1991 und 2050 nicht verändern und somit konstanter Natur sind. Etwaige Änderungen im Anbauverhalten, deren Umfang und der Gesamtanbaufläche werden demnach nicht berücksichtigt.

Je Gemeinde wurde der Gesamtumfang (ha) jedes betrachteten Aggregats berechnet. Zusätzliche Informationen konnten ebenfalls aus den bereitgestellten Daten extrahiert werden. Die Anbauflächen der Obergruppen Landwirtschaft, Gemüsebau, Sonderkulturen und Grünland ließen sich ergänzend zu den anderen Informationen berechnen.

2.3.4 Pflanze

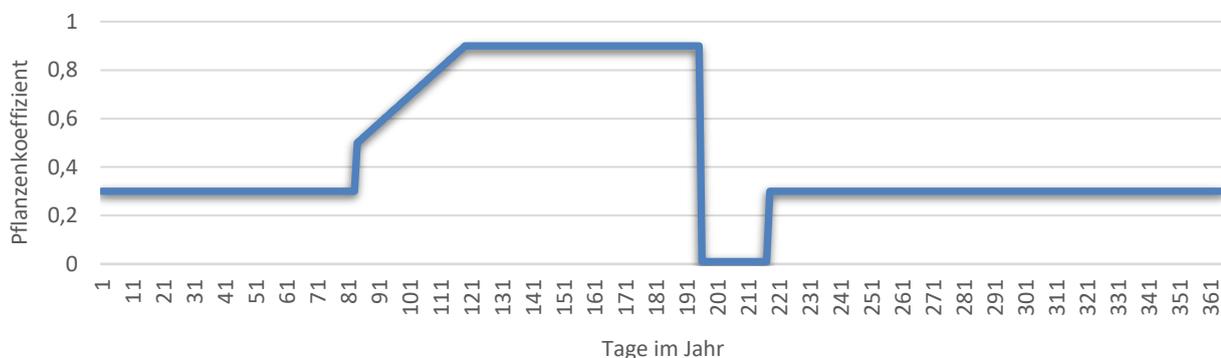
Kulturspezifische Eigenschaften

Die Aufbereitung der kulturspezifischen Eigenschaften basiert auf mehreren Schritten und hat in einem engen Austausch mit dem Landesexpertenkreis aus Vertreter*innen der Landwirtschaftsverwaltung, Landwirtschaft und Forschung in Bayern stattgefunden.

Auf Basis der aggregierten Kulturen werden anschließend pflanzenspezifische Kennwerte festgelegt, die für die Abschätzung der Bewässerungsbedürftigkeit relevant sind. Basierend auf den Werten der Geisenheimer Bewässerungssteuerung (HGU, 2021) werden die Pflanzenkoeffizienten zugeordnet. Aufgrund nicht vorhandener empirisch erhobener Werte für einige Kulturen mussten diese geschätzt werden. Dieser Schritt erfolgte basierend auf Annahmen, die durch den Expertenkreis evaluiert, bearbeitet und bestätigt wurden.

Für jede Kultur wurden bis zu vier K_c -Stadien ermittelt und analog dazu jedem K_c -Stadium ein mittlerer Startzeitpunkt im jahreszeitlichen Verlauf zugeordnet. Der Anfang eines K_c -Stadiums wird entsprechend durch die Kalenderwoche definiert. Die Kalenderwoche als Zeiteinheit wird anschließend in einen Tageswert (1–365) umgerechnet. Der Endzeitpunkt des letzten K_c -Stadiums und der Erntezeitpunkt für einjährige Kulturen bzw. das Ende der Kulturphase bei mehrjährigen Kulturen wird ebenfalls auf Basis der Kalenderwochen als Tageswert festgelegt. Ein Beispiel für den typischen K_c -Verlauf von Wintergetreide liefert Abbildung 3. Eine Zuordnung aller in das Modell eingegangenen K_c -Werte zu den jeweiligen Kulturaggregaten findet sich in Tabelle A.2.

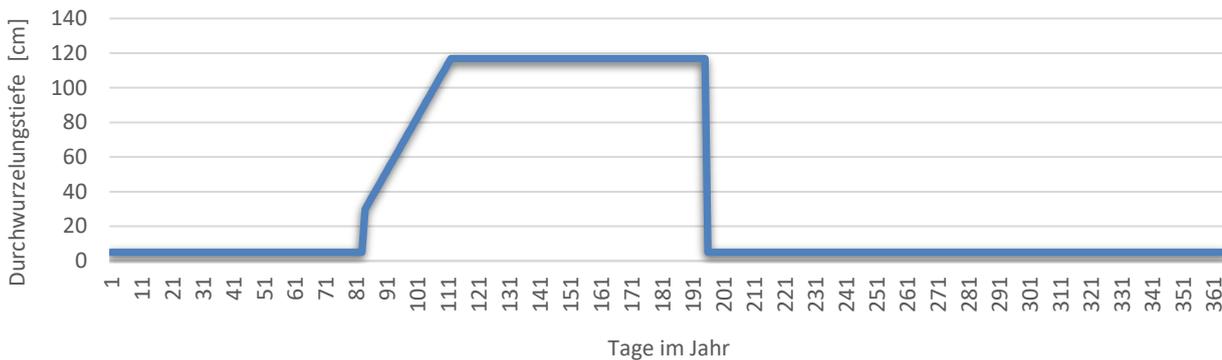
Abbildung 3: Modellierter Verlauf des Pflanzenkoeffizienten im jahreszeitlichen Verlauf am Beispiel von Wintergetreide



Quelle: Eigene Darstellung.

Weitere Eigenschaften der Kulturen wurden ebenfalls durch den Landesexpertenkreis definiert: Der durchwurzelte Bereich jeder Kultur wird durch eine Mindest- und eine Maximalwurzeltiefe bestimmt. Innerhalb dieser beiden Werte wurzelt die Pflanze im Boden und erschließt somit weitere Horizonte. Der wasserspeichernde Bereich des Bodens, der für die Pflanze verfügbar ist, steigt somit innerhalb der Vegetationsperiode. Zeitpunkte unterschiedlicher Durchwurzelungstiefen werden ebenfalls mit betrachtet (vgl. Tabelle A.3). Die Wurzeltiefen werden anhand der Eintrittsdaten der Kulturen in die entsprechenden K_c -Stadien kulturspezifisch festgelegt. Beginnend mit dem ersten K_c -Stadium steigt die Durchwurzelungstiefe vom vorgegebenen Minimalwert linear bis zum Maximalwert an und verstetigt sich bis zum Erntezeitpunkt auf dem Maximalniveau (siehe Abbildung 4).

Abbildung 4: Modellierter Verlauf der Durchwurzelungstiefen (in cm) im jahreszeitlichen Verlauf am Beispiel von Wintergetreide



Quelle: Eigene Darstellung.

Neben Pflanzenkoeffizient und Durchwurzelungstiefe sind für die Bewässerungsentscheidung weitere Eigenschaften der Pflanze relevant. So gibt die untere Bewässerungsschwelle (% nFK) den Sättigungsgehalt des Bodens an, bei dessen Unterschreitung eine Bewässerungsgabe erfolgen muss. Dieser Wert liegt beim Wintergetreide i. d. R. bei 35 % nFK. Die Bewässerungszielfeuchte hingegen liegt bei allen Kulturen bei 80 % nFK. Der Bereich zwischen Ziel- und Schwellenwert ist kulturspezifisch. Bei dauerhaftem Aufrechterhalten dieser Bodenfeuchte wird von optimaler Wasserversorgung von landwirtschaftlichen Kulturen gesprochen (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Verhältnis von nutzbarer Feldkapazität und Pflanzenwachstum

nFK in %	Pflanzenentwicklung
< 30	Die Pflanze steht unter Wasser- bzw. Trockenstress, es ist mit Ertragseinbußen zu rechnen
30–50	Noch ausreichend Wasserversorgung der Pflanzen
50–80	Optimales Wasserangebot
80–100	Beginn der Überversorgung, Gefahr von Sauerstoffmangel
> 100	Überversorgung und Sauerstoffmangel

Quelle: Verändert nach DWD (2020).

Die Mindestbewässerungsmenge (mm/a) ist ein weiterer Parameter, der indirekt das Verhalten und die Bewässerungsentscheidung der Landwirt*innen berücksichtigen soll. Mit dem Parameter soll die „Praxisüblichkeit“ von Bewässerungssystemen in der Modellvorhersage integriert werden. Die Mindestbewässerungsmenge ist demnach die Höhe des Zusatzwassers, ab der ein Einsatz einer Bewässerungstechnik ökonomisch sinnvoll ist und in der Praxis tatsächlich eingesetzt wird. So liegt der Wert dieser Menge bei Gemüsekulturen stets bei 0 mm. Das bedeutet, dass im Gemüsebau immer Bewässerungstechnik vorhanden ist und ggf. auch eingesetzt wird. Auf ackerbaulichen Flächen ist dies hingegen anders. So wurde der Wert für Wintergetreide beispielsweise auf 60 mm/a abgeschätzt. Ab einem Wasserdefizit von 60 mm/a wird die Technik eingesetzt bzw. ein Bewässerungsbedarf überhaupt erst erfasst. Darunter ist ein Einsatz derzeit nicht wirtschaftlich

und Einbußen im Ertrag können in Kauf genommen werden. Mit der Mindestbewässerungsmenge soll die ökonomische Perspektive der Bewässerung, die sogenannte Bewässerungswürdigkeit, in das Bewässerungsbedarfsmodell integriert werden.

Während die Informationen zur Bewässerungsschwelle oft auf empirischen Werten basieren, wurden die Werte zur Mindestbewässerungsmenge im Kollektiv der Experten diskutiert, abgeschätzt und festgelegt. Eine Zusammenfassung aller Bewässerungsschwellen und Zielbodenfeuchte differenziert nach Kulturaggregaten befindet sich in Tabelle A.4.

2.4 Berechnung der täglichen Wasserbilanzen

Die klimatische Wasserbilanz CWB (mm) stellt die Differenz aus Niederschlag P (mm) und potenzieller Evapotranspiration ET_0 (mm) dar. Somit lässt sich die Wasserbilanz auf Tagesbasis (tägliche klimatische Wasserbilanz CWB_t) berechnen.

$$CWB_t = P_t - ET_{0t}$$

Die pflanzenspezifische Evapotranspiration ET_{spez} wird unter Berücksichtigung der vorgegebenen Pflanzenkoeffizienten als Korrekturfaktor k_c (-) je Stadium berechnet. Die FAO56-Grasreferenzverdunstung ET_0 (mm) je Gemeinde und Tag wird mit dem K_c -Wert multipliziert.

$$ET_{spez,t} = ET_0 \times k_c$$

Die aufbereiteten Daten zum Niederschlag, zur Grasreferenzverdunstung sowie zum Pflanzenkoeffizienten (vgl. Kapitel 2.3) dienen als Grundlage der Berechnung. Die täglichen Wasserbilanzen werden für jede Gemeinde und für jedes Kulturaggregat durchgeführt und im nächsten Modellschritt verwendet.

2.5 Ermittlung der spezifischen nutzbaren Feldkapazität des Anbausystems

Die bodenkundlichen Grundlagen (vgl. Kapitel 2.3.1) werden mit den pflanzenspezifischen Eigenschaften (vgl. Kapitel 2.3.4) verschnitten. Je Kultur und Aggregat ist die tagesaktuelle Wurzeltiefe – und somit auch der wassernachliefernde Bereich des Bodens – unterschiedlich mächtig. Die Wurzeltiefenverteilung RD wird durch die Mindest- und Maximalwurzeltiefe in Kombination mit den durch die K_c -Stadien definierten Zeiträumen berechnet. Limitierend kann aber auch die maximale Durchwurzelbarkeit des Bodens sein, die durch die bodenkundlichen Eigenschaften vorgegeben sind. Anhand dieser Eingangsgrößen wird die tagesaktuelle nutzbare Feldkapazität $AWC_{spez,t}$ des Anbausystems kalkuliert.

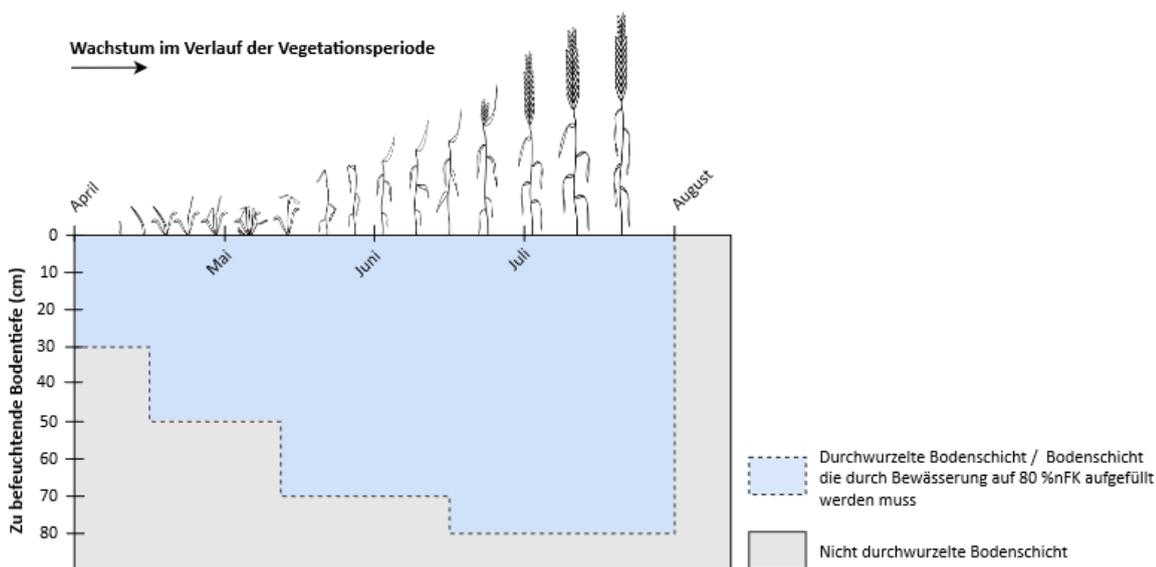
$$AWC_{spez,t} = AWC_{i,t} \times RD_{i,spez,t}$$

2.6 Kalkulation der Einzelwassergaben je Gemeinde und Aggregat

Die Kalkulation der Einzelwassergaben hängt direkt mit dem jahreszeitlichen Verlauf der pflanzenverfügbaren Wassermenge im Boden zusammen, die es primär zu berechnen gilt. Für diese Kalkulation werden weitere Annahmen und Festlegungen getroffen. Die untere Bewässerungsschwelle (in % nFK) ist als unterer Grenzwert pflanzenspezifisch festgelegt (vgl. Kapitel 2.3.4). Sinkt der Bodenwassergehalt unterhalb dieses Wertes, so findet eine Bewässerungsgabe statt, dessen Höhe die Bodenfeuchte bis zur oberen Bewässerungsschwelle (Zielfeuchte) auffüllt. In dieser Studie wird die Bewässerungsbedürftigkeit und entsprechend die Einzelwassergabe mit dem Ziel berechnet, dauerhaft optimale Wachstumsbedingungen für die unterschiedlichen Kulturen zu erhalten. Das heißt, dass sich die Bodenfeuchte stets zwischen der unteren und oberen Bewässerungsschwelle bewegt. Dabei ist in der Modellvorhersage, die den ganzjährigen Zeitraum betrachtet, der Anbauzeitraum relevant, der für jede Kultur unterschiedlich lang ist und durch die Zeiträume der K_c -Stadien ausgedrückt wird. Vor dem ersten Stadium und nach der Ernte findet demnach keine Bewässerung der Kultur statt, innerhalb der Anbauperiode hingegen schon. Ausgewählte Kulturen wie Getreide und Mais sind zusätzlich durch eine Abreifephase gekennzeichnet, in der ebenfalls nicht mehr bewässert wird, auch wenn ein Wasserdefizit im Boden vorläge.

Die Höhe der jeweiligen Einzelwassergabe ist ein Parameter, der von der Struktur des Bodens, ausgedrückt durch dessen Wasseraufnahmefähigkeit sowie den pflanzenspezifischen Ansprüchen an die Wasserversorgung bestimmt wird. Dabei beeinflussen die nutzbare Feldkapazität und die effektive Wurzeltiefe die maximale Bewässerungshöhe. Die Höhe der Bewässerung überschreitet demnach im Modell nie die Aufnahmefähigkeit des Bodens des jeweiligen Anbausystems. Angepasst an die Durchwurzelungstiefe, die sich entsprechend der phänologischen Entwicklung einer Kultur im jahreszeitlichen Verlauf ändert und die einzuhaltende Bodenfeuchte (siehe Abbildung 5) werden die Einzelwassergaben täglich festgelegt.

Abbildung 5: Schematische Darstellung des jahreszeitlichen Verlaufs der durchwurzelten Bodenschicht, die durch Bewässerungsgaben aufgefüllt werden muss



Quelle: Eigene Darstellung verändert nach Kleber (2020).

Neben der unteren Bewässerungsschwelle, die pflanzenspezifisch definiert wird (vgl. Tabelle A.4), ist die obere Bewässerungsschwelle (Zielfeuchte) als weitere Randbedingung definiert. In der Praxis ist eine Bewässerung bis zu 100 % der nutzbaren Feldkapazität des Bodens nicht realistisch, da Wasser oftmals eine begrenzte Ressource ist und Pflanzen ein geringes Wasserdefizit tolerieren. Darüber hinaus führt eine Überversorgung mit Wasser zu eingeschränkter Sauerstoffversorgung der Pflanzen und dadurch zu eingeschränktem Wachstum. Aus diesem Grund ist die obere Schwelle der Bewässerungsgaben für alle Kulturen pauschal auf 80 % nFK begrenzt. So lässt sich die Bewässerungshöhe $ID_{spez,t}$ des Anbausystems unter Berücksichtigung des volumetrischen Wassergehalts θ wie folgt berechnen:

$$ID_{t,spez} = AWC_{t,spez} \times \frac{\theta_{AWC} \times \frac{\text{Obere Grenze}}{100} - \theta_{AWC} \times \frac{\text{Untere Grenze}}{100}}{100}$$

Die Bewässerungshöhe kann bei Böden mit einer hohen Wasserhaltefähigkeit und gleichzeitig großem Wurzelraum Werte über 30 mm ergeben, wird allerdings in der Praxis (und in den Modellberechnungen) auf 30 mm limitiert, da derartige Bewässerungsgaben nicht direkt von der durchwurzelten Bodenschicht aufgenommen werden können (Müller et al., 2020). Überschüsse können versickern oder laufen oberflächlich ab, waschen dabei wertvolle Nährstoffe aus und überschreiten das Wasserhaltevermögen des Bodens.

Eine weitere Begrenzung der nutzbaren Feldkapazität liegt bei 100 %. Zwar wird dieser Wert durch eine Bewässerungsgabe nicht erreicht, doch können Niederschlagsereignisse in der Realität temporär zu Werten über 100 % führen. Da dessen Kalkulation von diversen Eigenschaften des betrachteten Systems abhängt und ein Sicker- oder Oberflächenabfluss somit nicht berechnet werden kann, wird dieser in den Modellannahmen nicht berücksichtigt.

Die Modellierung der Bewässerungsbedürftigkeit wird jahresweise durchgeführt. Dies findet unter der Annahme statt, dass der Wassergehalt der durchwurzelten Bodenhorizonte im Winter die Feldkapazität erreicht und zu Beginn der Anbauperiode (Beginn der Vegetationsperiode) voll aufgefüllt ist (100 % nFK).

Anhand aller definierten Rand- und Nebenbedingungen, den verarbeiteten Eingangsdaten und den berechneten Parametern lassen sich nun die Einzelwassergaben der Kulturen und Aggregate aller Standorte berechnen. Analog zur Geisenheimer Bewässerungssteuerung wird die täglich nutzbare Feldkapazität AWC_t durch die klimatische Wasserbilanz CWB_t erstellt, welche die nutzbare Feldkapazität des Vortages AWC_{t-1} berücksichtigen. Unterschreitet die tägliche nutzbare Feldkapazität die kritische untere Grenze (von beispielhaft 30 % nFK), so findet eine Bewässerungsgabe ID (englisch: ID ,irrigation demand') unter den beschriebenen Bedingungen statt.

$$AWC_{t,spez} = CWB_t + AWC_{t-1}$$

Beispielhaft für die Kalkulation steht Tabelle 3, in der tägliche Verdunstungsraten, Niederschläge und Zusatzwassergaben dargestellt und aufsummiert werden.

Tabelle 3: Beispielhafte Bilanzierung der Bewässerungsgaben

(1) t	(2) $ET_{t,spez}$ (mm)	(3) P_t (mm)	(4) CWB_t (mm)	(5) $ID_{t,spez}$ (mm)	(6) $AWC_{t,spez}$ (mm)
114	2,4	0	-2,4	0	41,6
115	5,6	0	-5,6	0	36,0
116	6,0	1,2	-4,6	0	31,4
117	4,3	0	-4,3	0	27,1
118	2,0	0	-2,0	24	49,1
119	8,7	6,4	2,8	0	51,9
120	4,4	0	-4,4	0	47,5

Anm.: Beispielhafte Bilanzierung eines ausgewählten Zeitraums der Anbauperiode mit Angabe der Tage (1), der täglichen Verdunstungsraten (2), des Niederschlags (3) und der berechneten klimatischen Wasserbilanz (4), ergänzt um die Bewässerungsgaben (5) und deren Auswirkung auf die Gesamtbilanz (6). Unterschreitet die nutzbare Feldkapazität des Bodens (Annahme: nutzbare Feldkapazität des Anbausystems urspr. 100 mm) die Bewässerungsschwelle von 30 % (rote Markierung), so findet eine Bewässerungsgabe statt (hellblaue Markierung).

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von HGU (2021).

2.7 Ermittlung der Jahresbilanzen der Bewässerungsbedürftigkeit

Für alle Gemeinden werden die Zusatzwassergaben (siehe Tabelle 3, Spalte 5) aller berücksichtigten Tage aufsummiert und als Jahressumme zusammengefasst. Dieses Vorgehen ist für Berechnungen auf Basis von Observations- und Projektionsdaten identisch. Dabei handelt es sich lediglich um die jährliche Zusatzwassergabe (mm/ha oder m³/ha) der entsprechenden Kultur und für den jeweiligen Standort. Durch die Verschneidung dieser Teilergebnisse mit den Anbauumfängen (ha) je Gemeinde und Kultur (für das Basisjahr 2016) wird der Wasserbedarf (mm/ha oder m³/ha) ermittelt. Für die weiteren Auswertungen werden für die betrachteten Zeiträume (1991–2020 und 2021–2050) Mittelwerte der Jahressummen erstellt. Eine Besonderheit stellt dabei der Umgang mit den Klimaprojektionsdaten dar. Für die Projektionsdaten (1991–2020 und 2021–2050) wird zunächst der Median für jeden Tag aller Ensemblemitglieder gebildet. Aus dem täglichen Median wird schließlich der Mittelwert aller Jahre eines Zeitraums errechnet. Die erstellten Werte werden in räumliche Daten auf Gemeindeebene überführt und dargestellt. In Kapitel 4 werden die Ergebnisse der regionalen Bewässerungsbedürftigkeit für Bayern dargestellt und ausgewertet.

3 Bestandsanalyse der bayerischen Landwirtschaft

3.1 Geografische Lage und naturräumliche Gliederung

3.1.1 Administrative Einheiten

Die Untersuchungsregion ist das Bundesland Bayern. Administrativ lässt sich Bayern unterteilen in 7 Regierungsbezirke mit 96 Landkreisen und kreisfreien Städten sowie in 2.056 politisch selbstständige Gemeinden. Die Modellrechnungen zur Schätzung der Bewässerungsbedürftigkeit wurden auf der Gemeindeebene durchgeführt und erlauben daher eine relativ hohe räumliche Auflösung, in der die regionale Heterogenität von Anbaustrukturen, Produktions- und Bewässerungsbedingungen berücksichtigt wird. Die großräumigere, aggregierte Darstellung auf Kreis- oder Regierungsbezirksebene kann die Analyse vereinfachen (z. B. auf kommunaler Ebene) und die Information direkt auf politische, entscheidungsrelevante Regionen beziehen (z. B. Regierungsbezirke). Abbildung 6 zeigt die Verwaltungsgrenzen der bayerischen Regierungsbezirke und Landkreise.

Abbildung 6: Kreise und Regierungsbezirke in Bayern

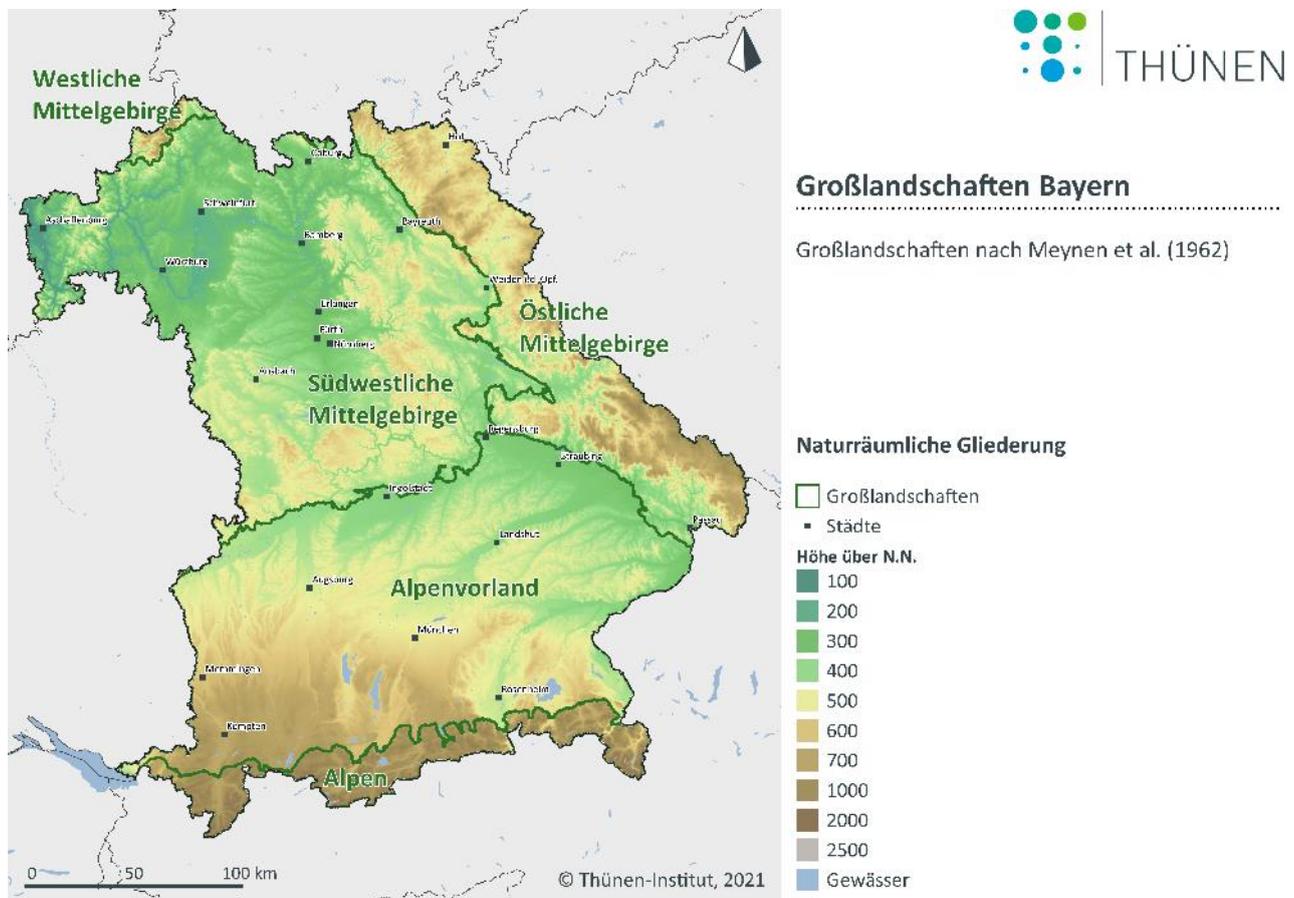


Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von GeoBasis-DE/BKG (2019 und 2020).

3.1.2 Einteilung nach Großlandschaften und Naturräumen

Bayern lässt sich in folgende vier Großlandschaften aufteilen (siehe Abbildung 7): die Alpen, das Alpenvorland, das Östliche Mittelgebirge und das Südwestliche Mittelgebirge. Der Verlauf der Donau trennt die Alpen und das Alpenvorland im Süden von Bayern vom Östlichen und Südwestlichen Mittelgebirge (Azizi et al., 2010; GeoBasis-DE/BKG, 2020).

Abbildung 7: Topografische Karte und Großlandschaften in Bayern

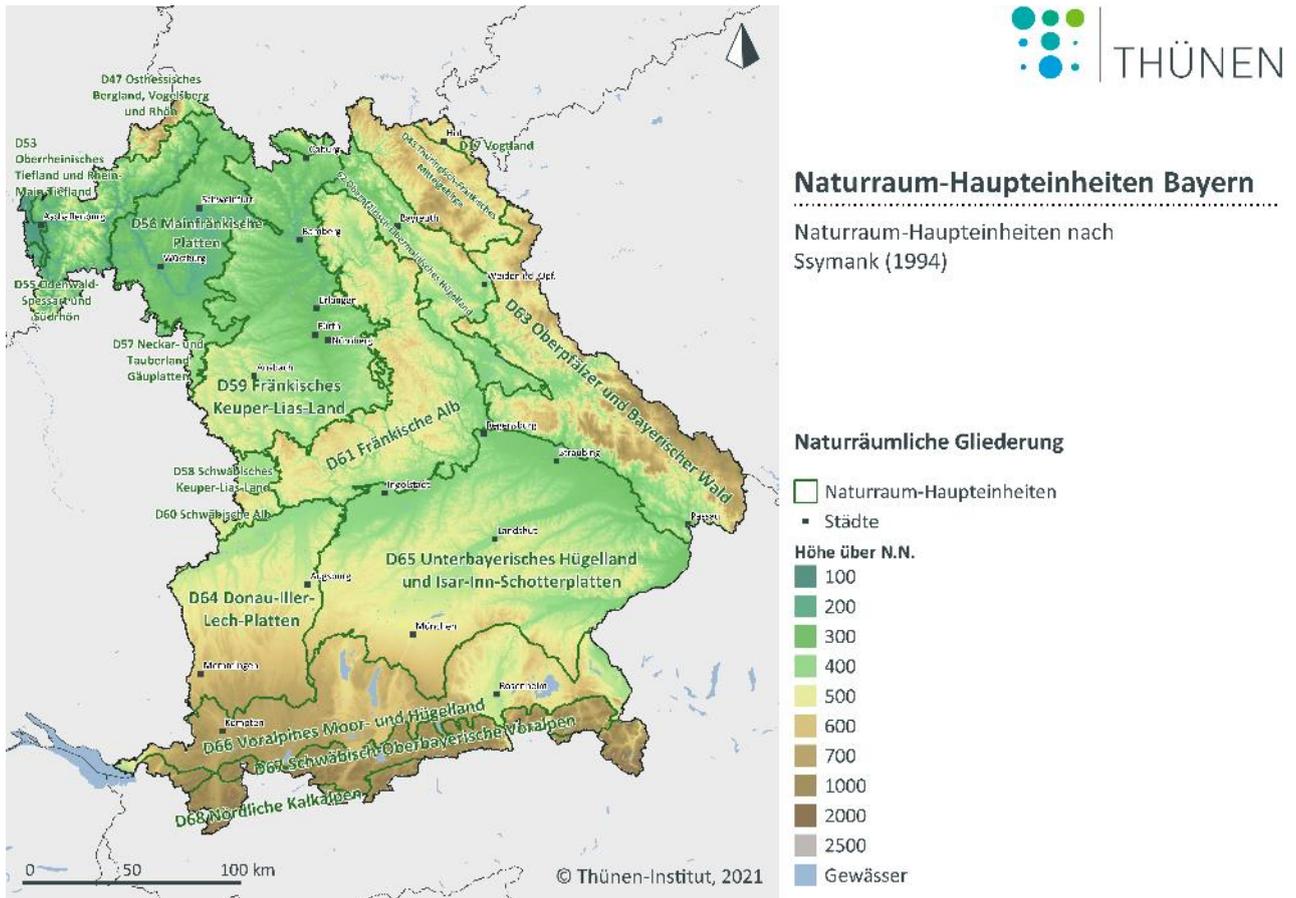


Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Meynen et al. (1962).

Des Weiteren lässt sich Bayern in 18 verschiedene Naturräume unterteilen. Naturräume unterscheiden sich in Boden, Klima, Wasserhaushalt und Relief. Die Standorte eines Naturraums ähneln sich in der Ausprägung dieser geologischen Attribute, welche die regionale Landnutzung und die pflanzliche Produktion bestimmen. Die Naturraum-Haupteinheiten (siehe Abbildung 8) eignen sich gut zur räumlichen Darstellung von Informationen zur Bewässerungsbedürftigkeit, die von den Faktoren Boden, Klima und Landnutzung abhängt.

Zur räumlichen Einordnung bestimmter Kulturen (z. B. Sonderkulturen) oder spezieller Ausprägungen der Geofaktoren (z. B. Bodengüte) eignet sich die räumliche Einteilung in Anbauregionen oder Kulturlandschaften. Zur Beschreibung der Kulturlandschaften wird auf die Einteilung nach (LfU, 2011) Bezug genommen, wenn dies einen vereinfachten räumlichen Bezug ermöglicht.

Abbildung 8: Topografische Karte und Naturraum-Haupteinheiten in Bayern

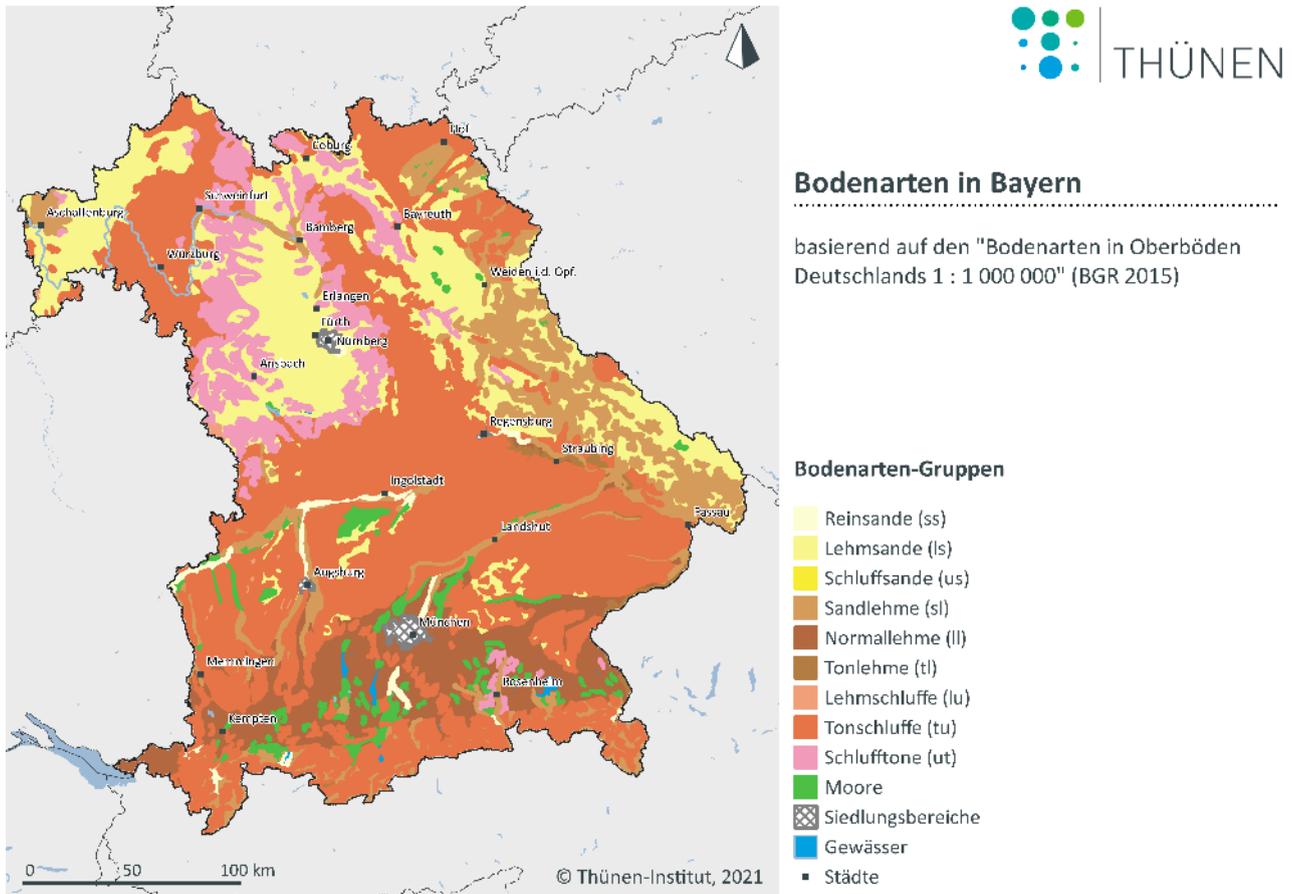


Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von GeoBasis-DE/BKG (2018) und Ssymank (1994).

3.2 Boden

Tonschluffe (tu) bedecken als Oberböden große Teile des Voralpenlands und des westlichen Randes des südwestlichen Mittelgebirges, z. B. die Mainfränkische Platte und die Alpen. Die pflanzenbaulichen Eigenschaften der Tonschluffe erlauben in weiten Teilen Bayerns die Produktion von intensiven Kulturen wie Hackfrüchten und Gemüse, wenn die klimatischen Bedingungen gegeben sind.

Abbildung 9: Verteilung der Bodenarten in Bayern



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von BGR (2015a).

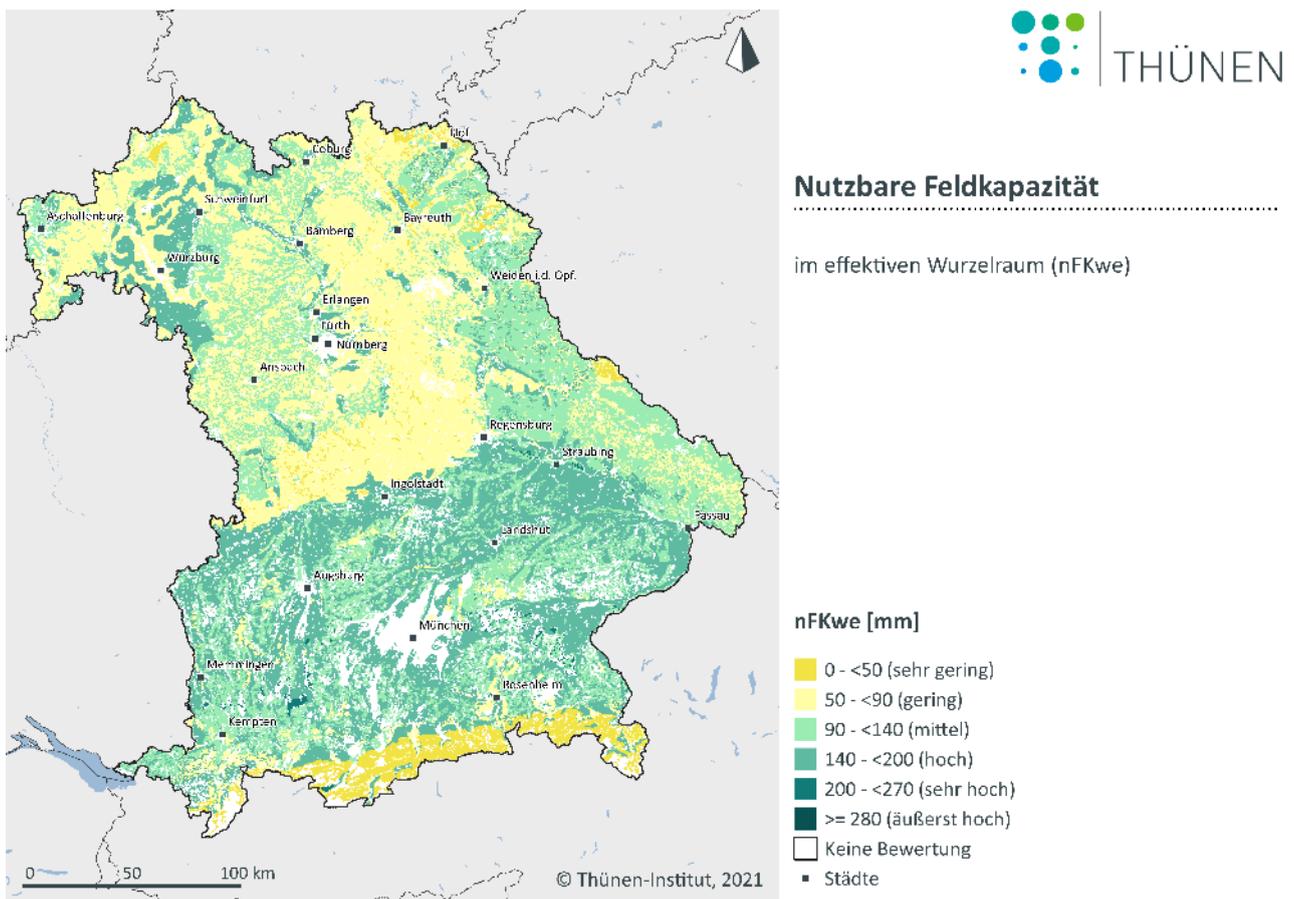
Lehmsande (ls) machen den zweitgrößten Anteil der Oberböden in Bayern aus. Als Sandböden haben sie eine weniger gute Wassernachlieferung, Wasserspeicherung und Nährstoffverfügbarkeit und sind daher limitiert für den Anbau von extensiven Kulturen wie Getreide. Im südwestlichen Mittelgebirge, im osthessischen Bergland und im Fränkischen Keuper-Lias-Land sind die Lehmsande (ls) regional mit Schlufftonen (ut) durchzogen. Im östlichen Mittelgebirge decken die Lehmsande (ls) die Hälfte der Oberböden ab. Die andere Hälfte sind Tonschluffe (tu) (siehe Abbildung 9).

Normallehme (ll) sind schwer bearbeitbar, aber von guten Eigenschaften bezüglich der Wassernachlieferung, Wasserspeicherung und Nährstoffverfügbarkeit. Daher sind Normallehme (ll) auch eher für Grünlandwirtschaft geeignet. Normallehme (ll) bedecken das voralpine Moor- und Hügelland.

Des Weiteren treten vereinzelt Moorböden (mo), Tonlehme (tl) und Schlufftone (ut) auf, z. B. im Voralpenland. Diese „Inseln“ können lokal andere Bodeneigenschaften haben als die sie umgebenden, dominierenden Bodenarten.

Die Oberbodenarten und deren Korngrößenzusammensetzung bestimmen die regionale nutzbare Feldkapazität. In Bayern (siehe Abbildung 10) liegen die Böden mit hoher nFK vor allem in den Tälern und Niederungen im Alpenvorland und den Mainfränkischen Platten im Raum Würzburg und Schweinfurt. Geringe nutzbare Feldkapazität weisen hingegen die Böden der Fränkischen Alb, des Oberpfälzer- und des Bayerischen Waldes sowie die alpinen Regionen auf.

Abbildung 10: Nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum in Bayern

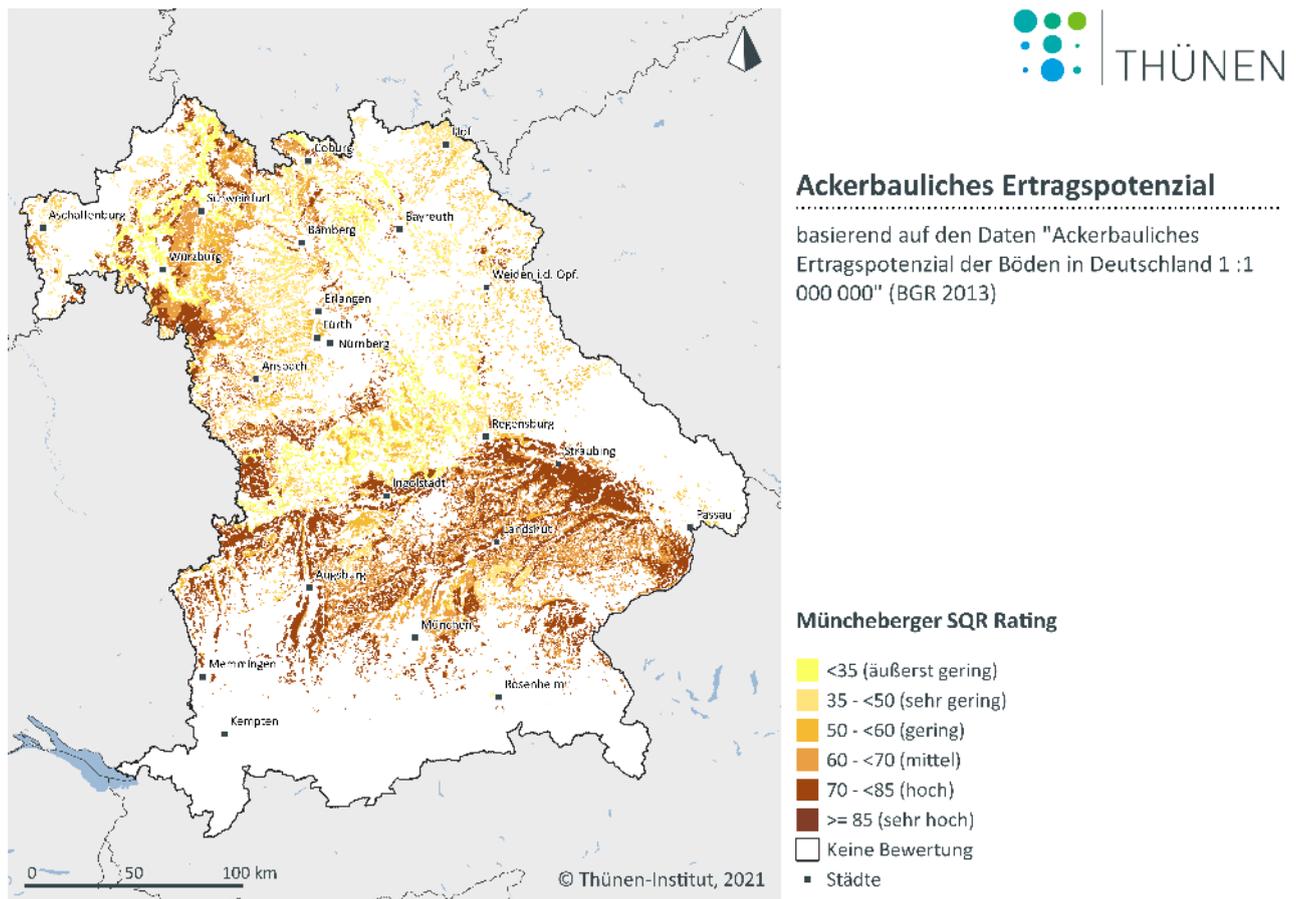


Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von BGR (2015b).

Die Bodeneigenschaften lassen sich im Ertragspotenzial zusammenfassen. Neben den Eigenschaften der Oberböden bestimmen auch die mögliche Durchwurzelungstiefe und die Topografie die Eignung zur pflanzlichen Produktion.

Abbildung 11 zeigt, dass sich die Böden mit den höchsten Erträgen auf der Mainfränkischen Platte (den Mainfränkischen Gäulandschaften) und im Alpenvorland (im Dungau mit Lössböden) finden. In Gebirgslagen ermöglichen die geringen Durchwurzelungstiefen und Hanglagen nur die Grünlandbewirtschaftung.

Abbildung 11: Ackerbauliches Ertragspotenzial der Böden in Bayern



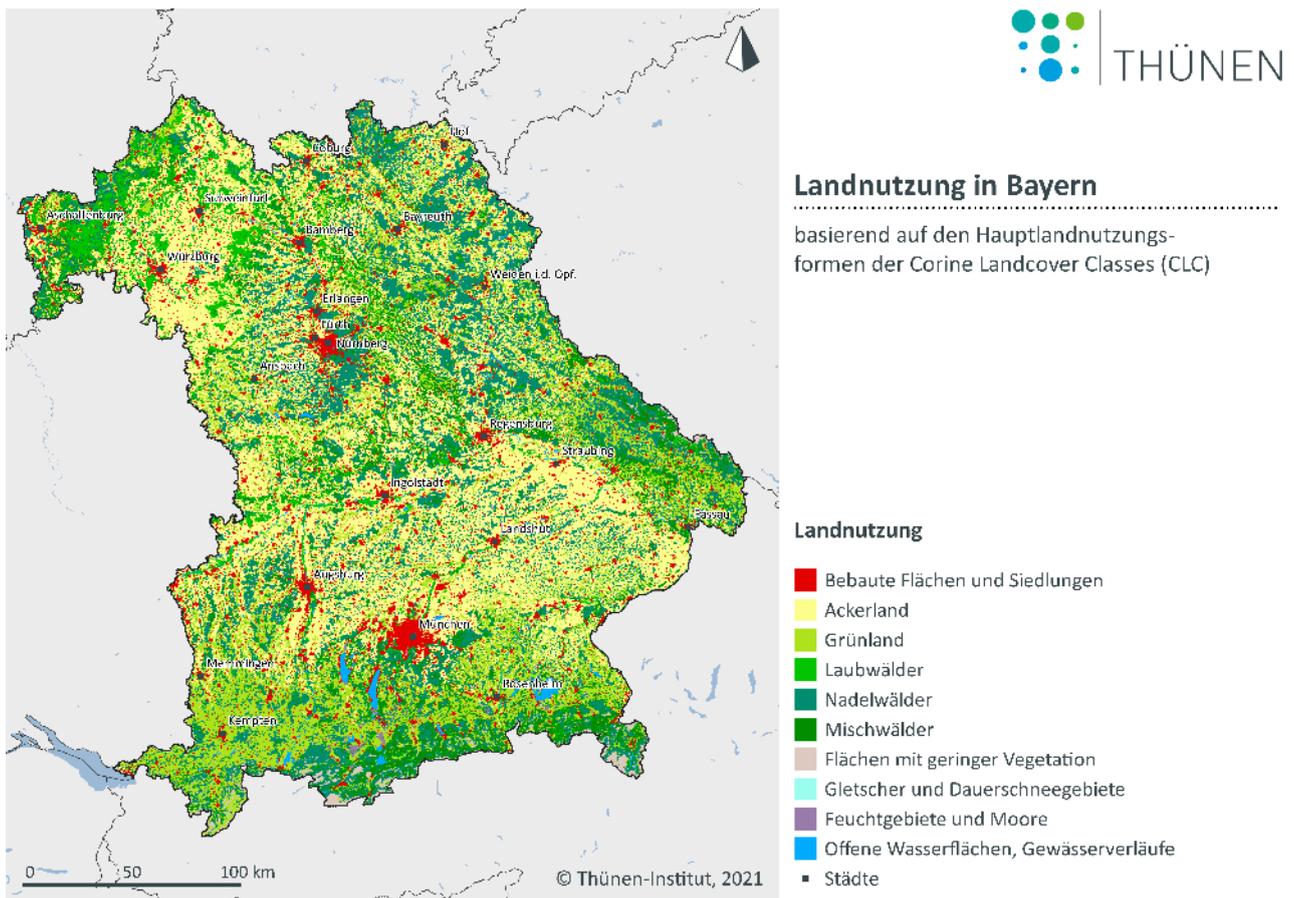
Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage des ackerbaulichen Ertragspotenzials der Böden in Deutschland (BGR, 2013).

3.3 Landnutzung

Die Landnutzung ist ein wesentlicher Einflussparameter bei der Abschätzung der regionalen Bewässerungsbedürftigkeit. Im Folgenden wird auf die landwirtschaftliche Landnutzung und die regionalen Anbaustrukturen näher eingegangen.

Die gesamte landwirtschaftliche Gesamtfläche in Bayern beträgt rund 3,15 Millionen ha, davon sind 1,07 Millionen ha (34 %) Grünland, 1,97 Millionen ha (63 %) Ackerland und 0,10 Millionen ha (3 %) Sonderkulturen (InVeKoS, 2016). Die räumliche Verteilung der Anbaustrukturen zeigt Abbildung 12.

Abbildung 12: Landnutzung in Bayern



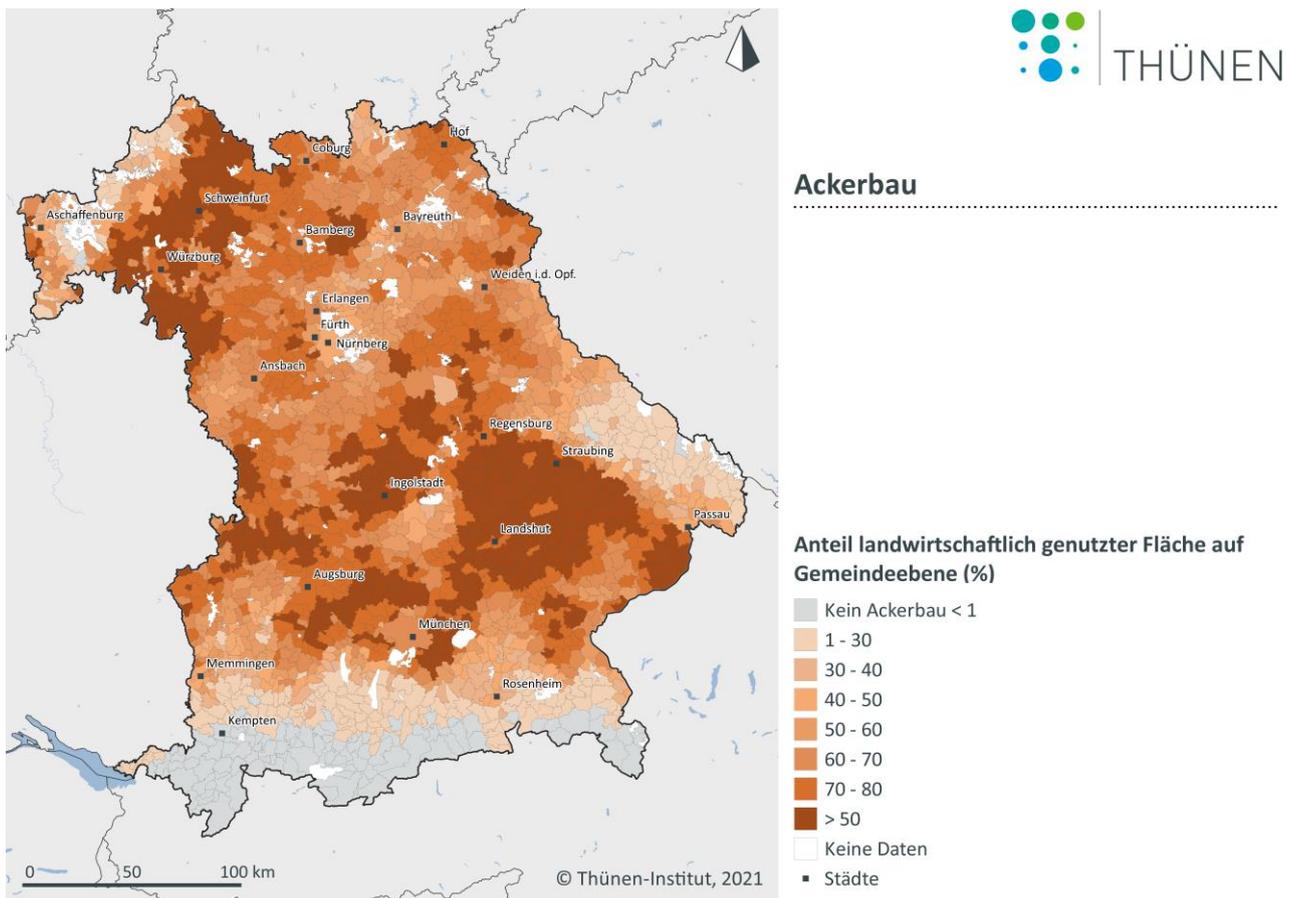
Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Corine Land Cover (GeoBasis-DE/BKG, 2012).

Die landwirtschaftliche Landnutzung und Pflanzenproduktion ist durch die Ausprägung der Geofaktoren bestimmt. Die Bodeneigenschaften (vgl. Kapitel 3.2), die Geländeeigenschaften und das Klima (vgl. Kapitel 3.4) bestimmen, welche Landnutzung regional wirtschaftlich ist. Dementsprechend hat sich in Bayern historisch eine regional diversifizierte Landnutzung und Pflanzenproduktion etabliert.

3.3.1 Ackerbau

Der Anteil der Ackerbaufläche an der landwirtschaftlich genutzten Fläche ist regional besonders hoch, wo die Böden und das Klima hohe Erträge ermöglichen (siehe Abbildung 13). Insgesamt wurden 2016 rund 63 % der LF für den Ackerbau genutzt. Landesweit werden hier Getreide und Futtermittel auf Tonschluffen (tu) in warm-gemäßigtem Klima angebaut. Auf der Mainfränkischen Platte, dem nördlichen Fränkischen Keuper-Lias-Land sowie im niederbayerischen Hügelland und auf der Isar-Inn-Schotterplatte machen Bodeneigenschaften und warme Temperaturen den Anbau von intensiven Ackerkulturen, Gemüse- und Sonderkulturen möglich.

Abbildung 13: Regionaler Anteil der Ackerfläche an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Bayern, 2016

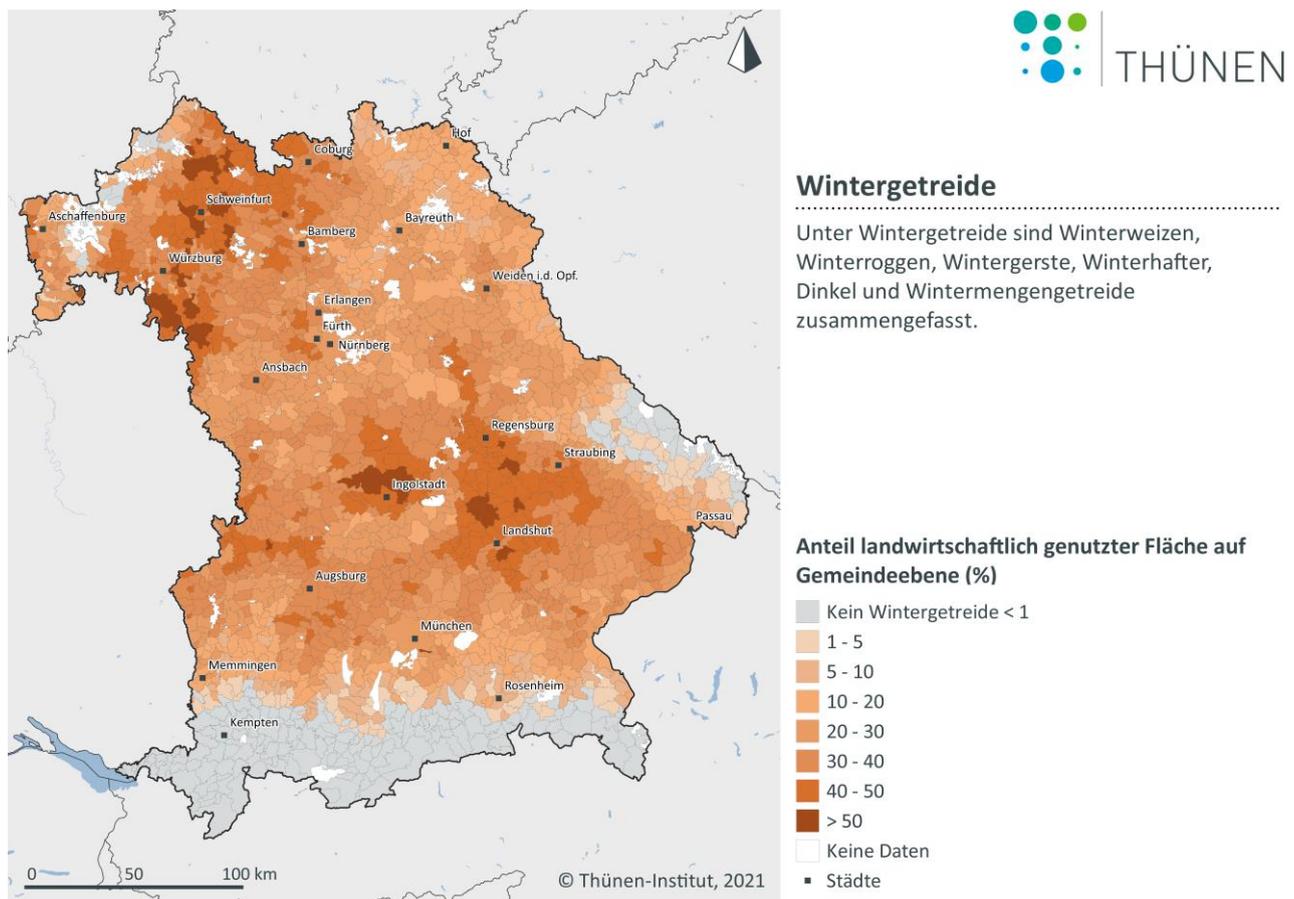


Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Landnutzungsdaten aus der InVeKoS-Datenbank Bayern (InVeKoS, 2016).

3.3.1.1 Winter- und Sommergetreide

In Bayern wurde 2016 auf rund 27 % der landwirtschaftlichen Fläche Wintergetreide angebaut. Die regionalen Schwerpunkte lassen sich räumlich abbilden (siehe Abbildung 14). Das dominierende Getreide ist mit ~17 % der LF der Winterweizen. Weitere Wintergetreide sind Wintergerste (~8 % der LF) und Winterroggen (~1 % der LF). Die Winterweizenproduktion hat die höchsten Flächenanteile in den ertragreichen Ackerstandorten auf der Mainfränkischen Platte, dem Keuper-Lias-Land und im Alpenvorland.

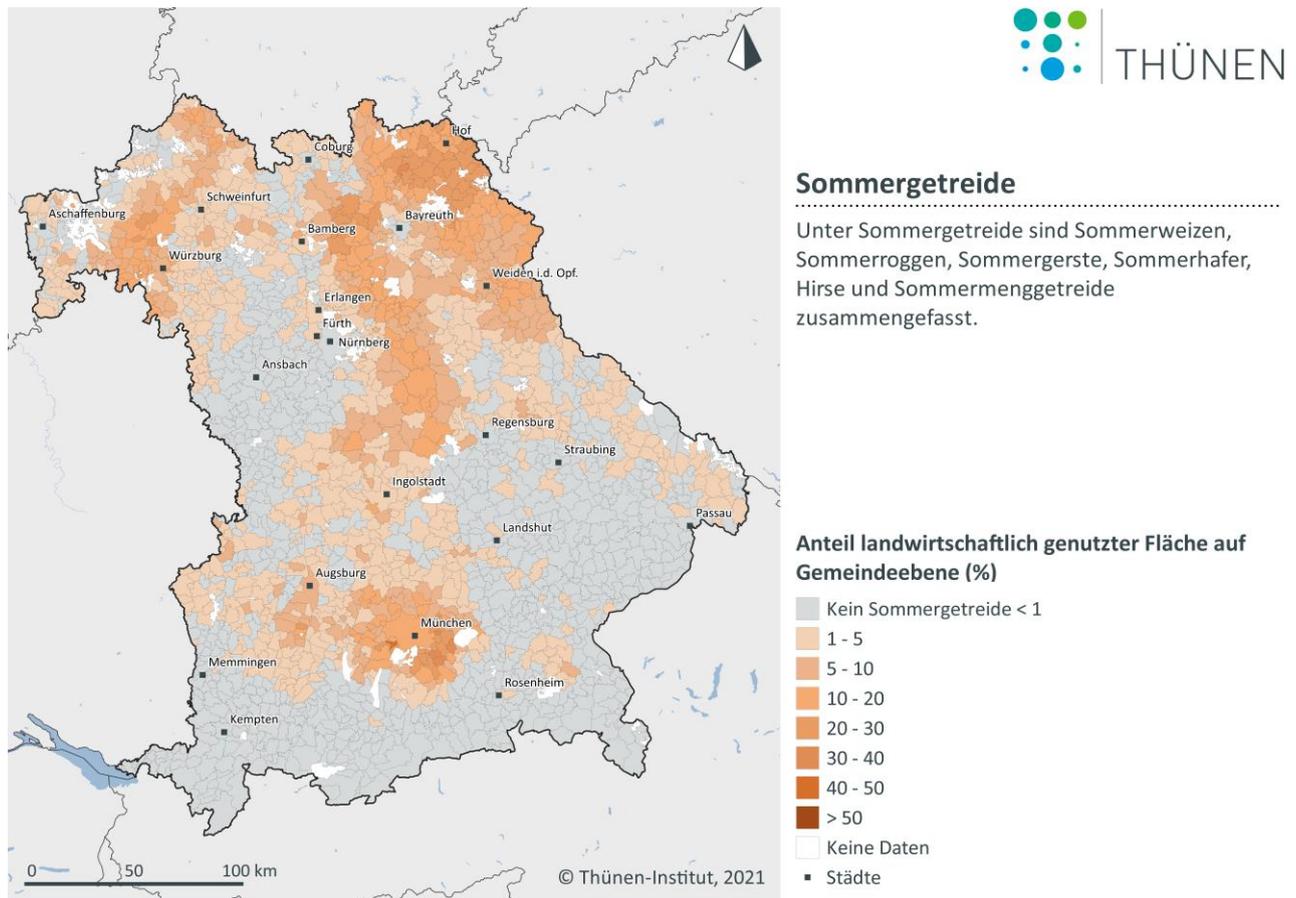
Abbildung 14: Regionaler Anteil von Wintergetreide an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Bayern, 2016



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Landnutzungsdaten aus der InVeKoS-Datenbank Bayern (InVeKoS, 2016).

Neben Wintergetreide werden in Bayern verschiedene Sommergetreidesorten angebaut (siehe Abbildung 15). Dies sind neben Sommerweizen noch Sommerroggen, -gerste, -hafer, Hirse und Sommermengengetreide. Schwerpunktgebiete mit Sommergetreideanteilen an der landwirtschaftlichen Fläche je Gemeinde zwischen 10 und 30 Prozent liegen in Ober- und Unterfranken, der Oberpfalz sowie in Oberbayern zwischen Augsburg und München.

Abbildung 15: Regionaler Anteil von Sommergetreide an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Bayern, 2016

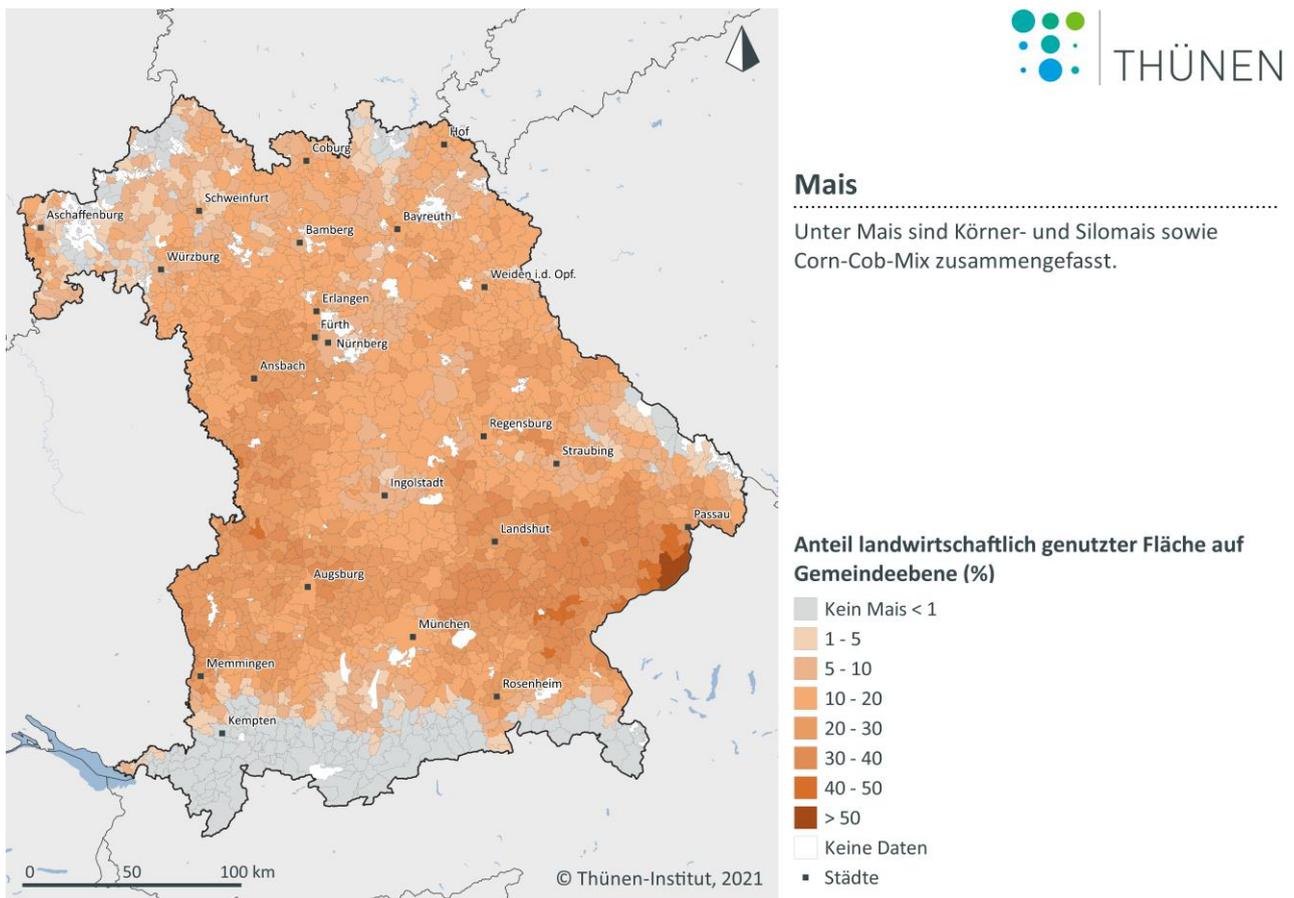


Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Landnutzungsdaten aus der InVeKoS-Datenbank Bayern (InVeKoS, 2016).

3.3.1.2 Mais

Mais wurde 2016 in ganz Bayern auf rund 18 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche angebaut. Diese Flächenanteile setzen sich aus Silo- und Körnermais zusammen. Die regionalen Schwerpunktgebiete für den Maisanbau werden in Abbildung 16 dargestellt. In den Mittelgebirgslagen produzieren Futterbetriebe den Silomais für die Milchviehhaltung. In den Ackerregionen wird Silomais auch für die Rindermast angebaut (z. B. auf der Donau-Iller-Lech-Platte im Südwesten). Auf den klimabegünstigten und ertragreichen Ackerlandstandorten im westlichen Alpenvorland wird auch Körnermais produziert.

Abbildung 16: Regionaler Anteil von Mais an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Bayern, 2016

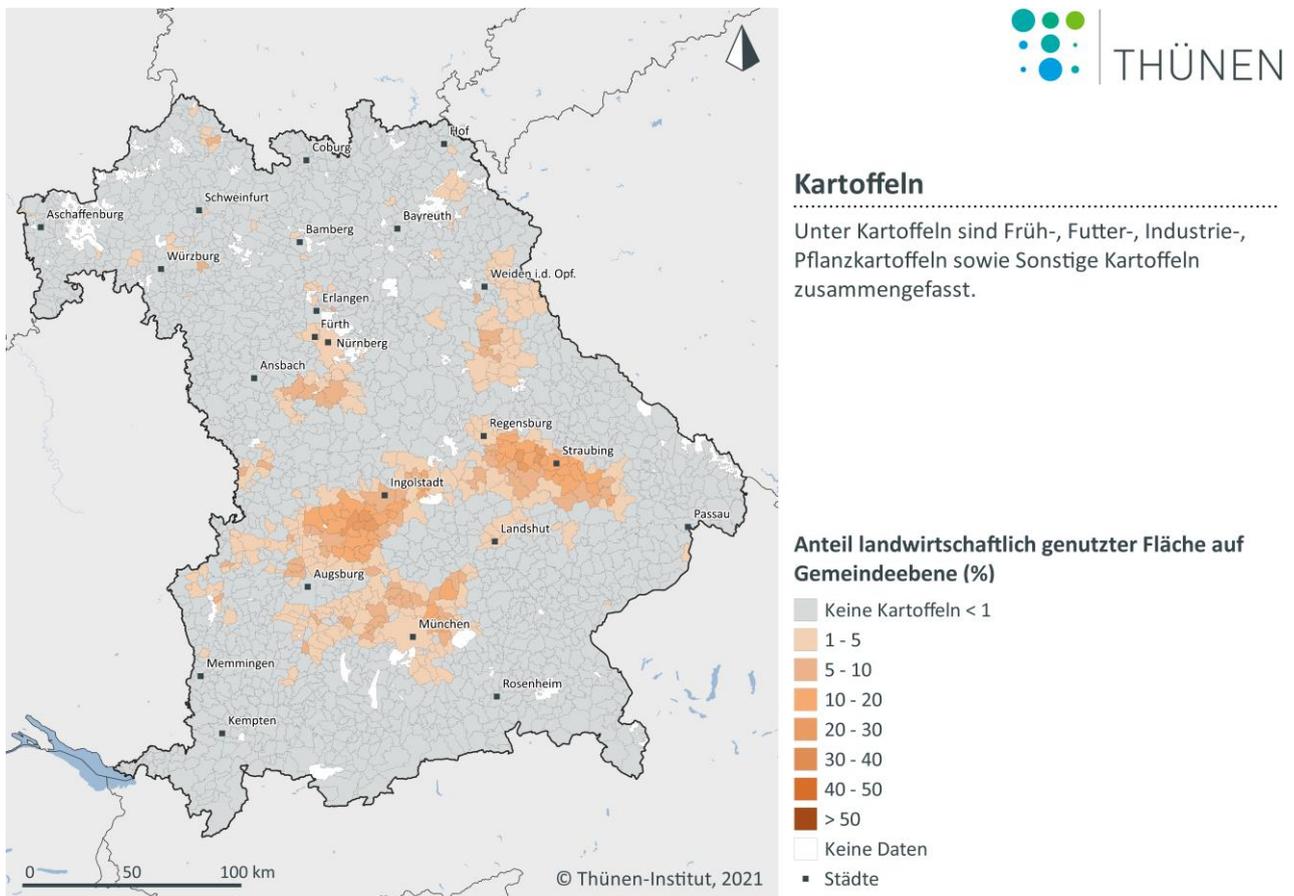


Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Landnutzungsdaten aus der InVeKoS-Datenbank Bayern (InVeKoS, 2016).

3.3.1.3 Kartoffeln

Der Kartoffelanbau (siehe Abbildung 17) nimmt in Bayern mit rund 40.000 ha der landwirtschaftlich genutzten Fläche nur einen geringen Anteil (~1,3 %) ein. Hauptschwerpunktgebiete liegen in den Ackerbauregionen des Alpenvorlands (z. B. auf den Lössböden des Dungau bei Straubing) und zwischen Ingolstadt und Augsburg.

Abbildung 17: Regionaler Anteil von Kartoffeln an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Bayern, 2016



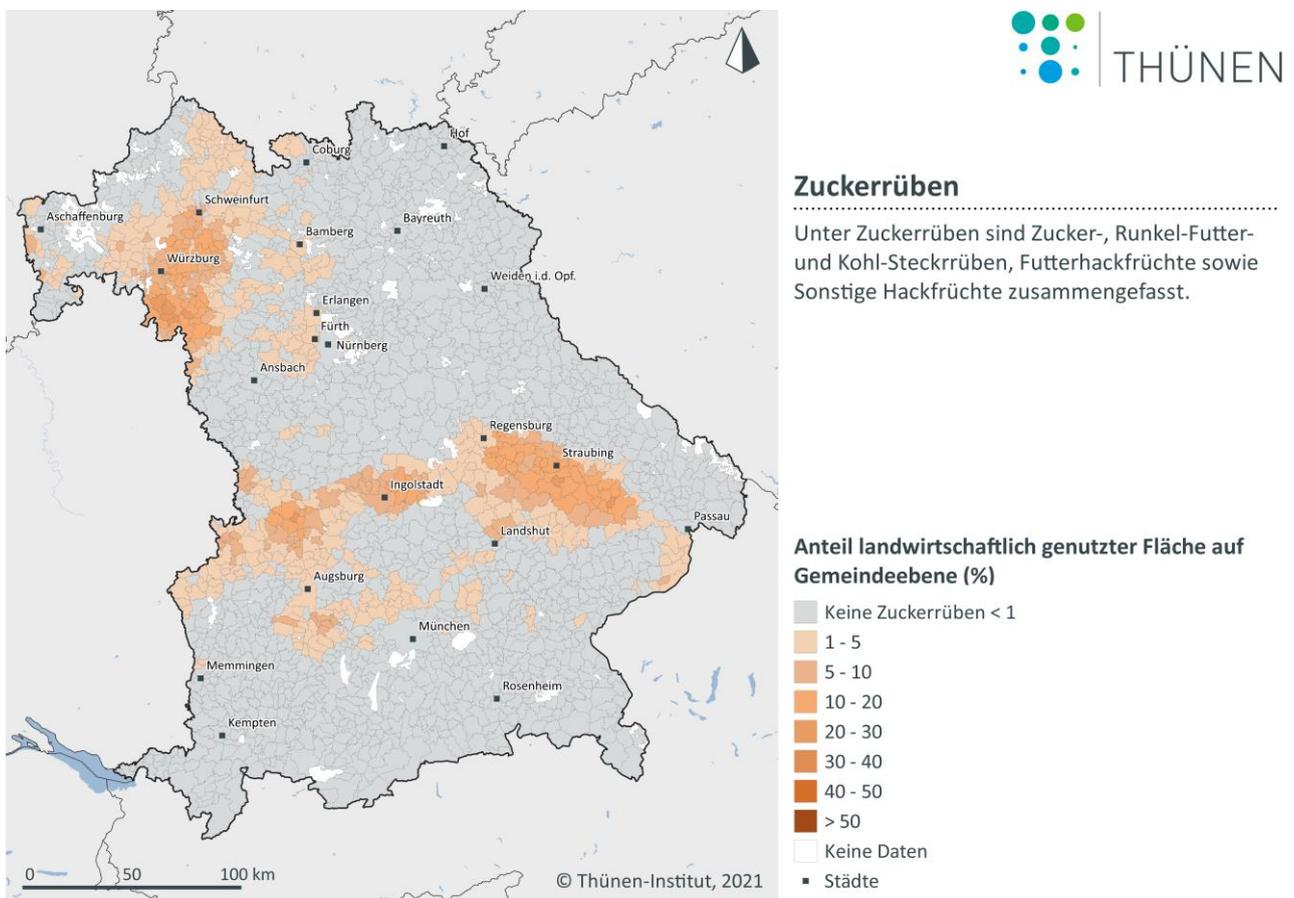
Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Landnutzungsdaten aus der InVeKoS-Datenbank Bayern (InVeKoS, 2016).

3.3.1.4 Zuckerrüben

Zuckerrüben und weitere Hackfrüchte werden in Bayern 2016 auf ~2 % der landwirtschaftlich genutzten Flächen angebaut. Da weitere Hackfrüchte nur einen geringen Prozentanteil an den landwirtschaftlichen Kulturen haben, werden primär die pflanzenspezifischen Eigenschaften von Zuckerrüben betrachtet. Die Kartoffeln, die ebenfalls als Hackfrüchte gelten, werden in Kapitel 3.3.1.3 separiert dargestellt.

Der Anbauswerpunkt von Zuckerrüben fällt zum einen in die Regionen, in denen auch weitere Hackfrüchte und Kartoffeln angebaut werden (Ingolstadt, Regensburg, Straubing) (siehe Abbildung 18). Zum anderen konzentriert sich die Zuckerrübenproduktion auf die Main-Franken-Region (südwestlich von Würzburg und Schweinfurt), in welcher die Standortbedingungen den Anbau von Zuckerrüben begünstigen: schluff- und lehmsandige Böden mit ausgewogener Wasserhaltungskapazität und Nährstoffspeicherung sowie guter Bearbeitbarkeit. Historisch hat sich hier die Zuckerindustrie angesiedelt (z. B. Südzucker AG in Ochsenfurt am Main) und dadurch die regionale Produktionsausrichtung bestimmt.

Abbildung 18: Regionaler Anteil von Zuckerrüben an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Bayern, 2016

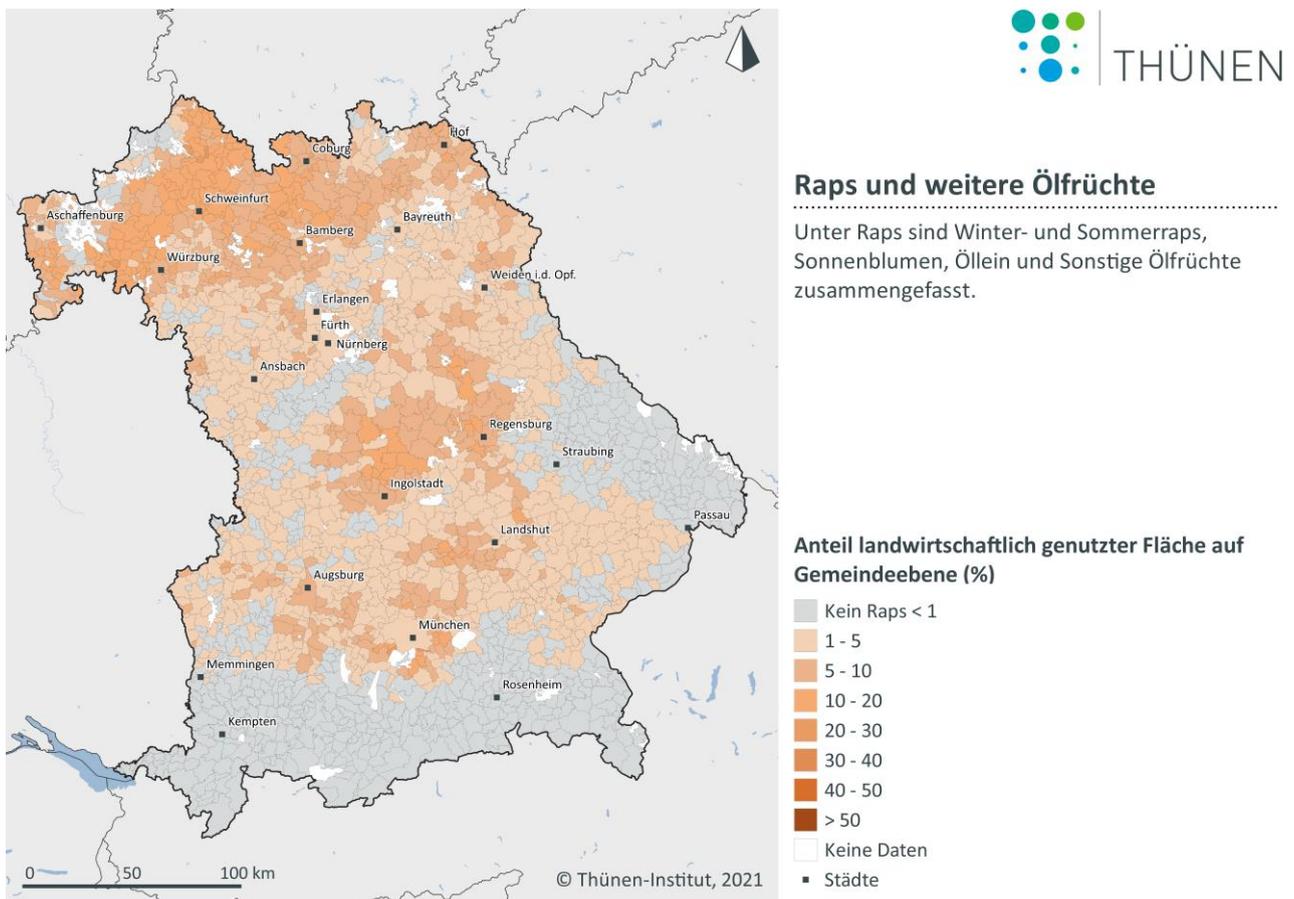


Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Landnutzungsdaten aus der InVeKoS-Datenbank Bayern (InVeKoS, 2016).

3.3.1.5 Raps

Der Rapsanbau in Bayern ist dominiert durch den Winterraps. Winterraps wurde 2016 auf rund 4 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche Bayerns angebaut. Als Blattkultur wird Winterraps als Fruchtfolgekultur in Kombination mit Getreide angebaut. Daher finden sich die größeren Ausdehnungen von Rapsflächen (10 % der landwirtschaftlichen Fläche der Gemeinden) in den Ackerbauregionen (siehe Abbildung 19).

Abbildung 19: Regionaler Anteil von Raps und weiteren Ölfrüchten an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Bayern, 2016

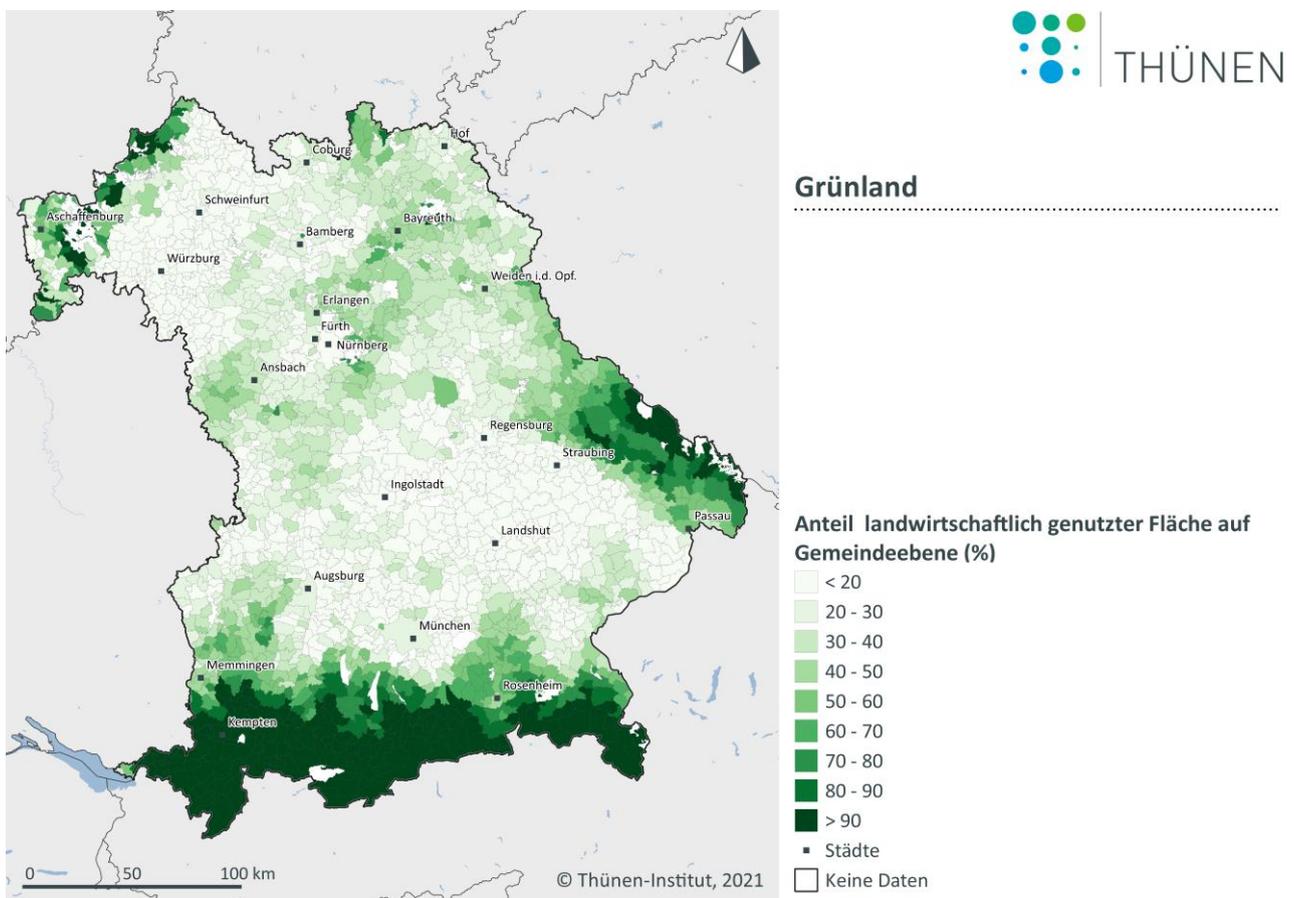


Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Landnutzungsdaten aus der InVeKoS-Datenbank Bayern (InVeKoS, 2016).

3.3.2 Grünland

Die Nutzung als Grün- oder Ackerland hängt von den Bodenbedingungen, vom Klima und vom Relief ab. Der Grünlandanteil ist regional dort besonders hoch, wo geringe Bodenerträge, hohe Niederschläge und niedrige Temperaturen gegeben sind und wo außerdem durch hügeliges Gelände die Bodenbearbeitung erschwert ist. Somit dominiert in den Alpen und in den höheren Mittelgebirgslagen die Grünlandnutzung (siehe Abbildung 20). Insgesamt nahmen die Grünlandflächen 2016 rund 34 % der landwirtschaftlich genutzten Flächen ein. Trotz geringer Ackererträge, kalter Durchschnittstemperaturen und bedingter Befahrbarkeit (Hanglage) kann Grünlandbewirtschaftung und Rinderhaltung erfolgen. So sind in den Alpen und in den Höhenlagen des Bayerisch-Pfälzischen Waldes die Grünlandnutzung und Milchviehhaltung dominierend. Auf dem geringen Anteil von Ackerflächen in diesen Regionen wird aufgrund von niedrig zu erwartenden Erträgen vorwiegend extensives Getreide oder Futtermittel angebaut.

Abbildung 20: Regionaler Anteil von Grünland an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Bayern, 2016

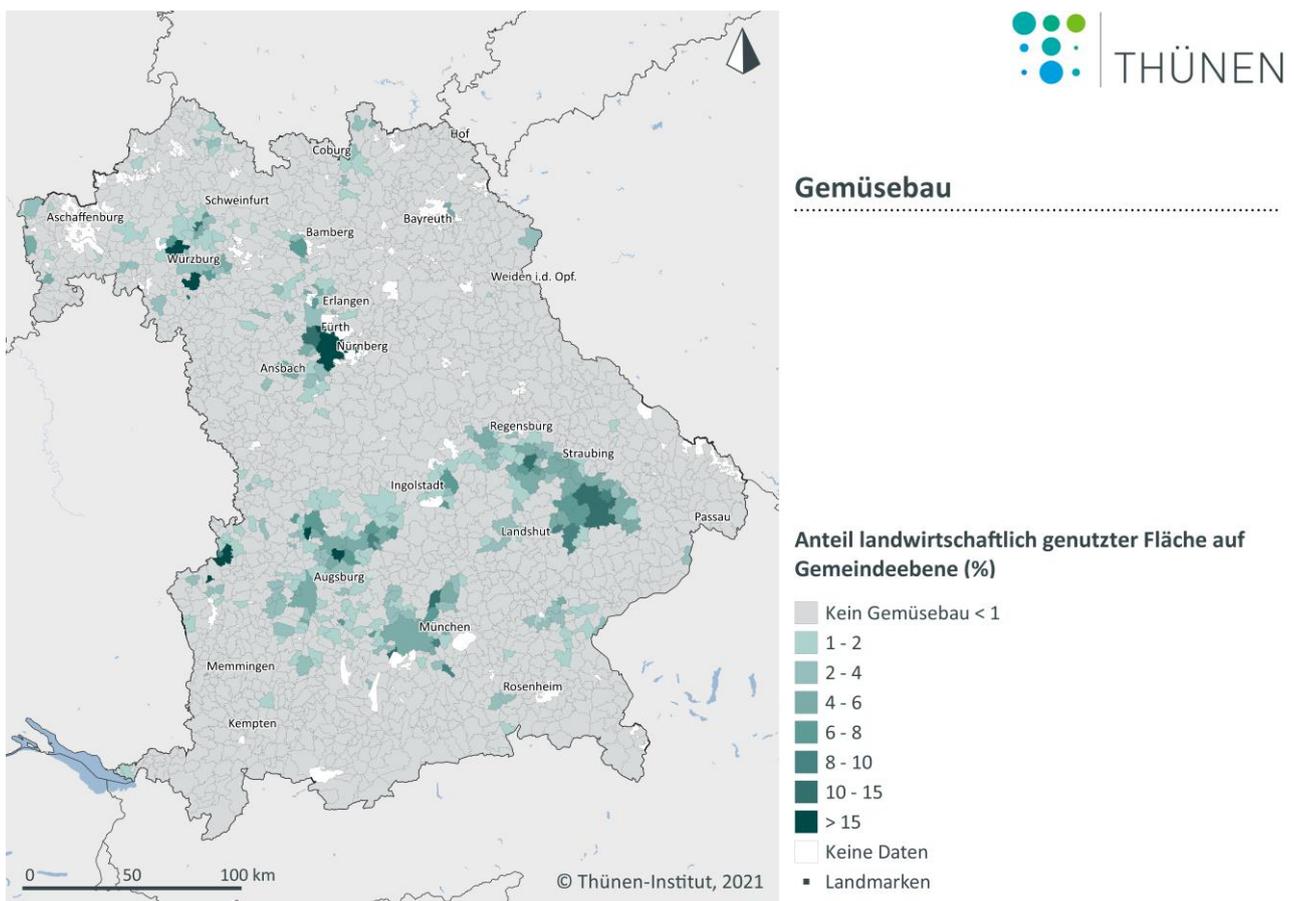


Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Landnutzungsdaten aus der InVeKoS-Datenbank Bayern (InVeKoS, 2016).

3.3.3 Gemüsebau

Die Gemüseproduktion hat regional hohe Bedeutung in Anbauregionen mit warmem Klima auf ackerbautauglichen Böden. In Flusstälern ergibt sich die günstige Kombination aus warmen Temperaturen und guten Bodenverhältnissen aus angelagerten Sedimentböden. In fünf Schwerpunktregionen ist der Gemüsebau von Bedeutung: in Würzburg/Kitzingen, im Knoblauchsland (bei Nürnberg), in Niederbayern auf dem Dungau (bei Regensburg), im Raum nördlich von Augsburg sowie im Isartal (siehe Abbildung 21). Diese Regionen produzieren vorwiegend die Gemüsearten Zwiebel, Einlegegurken, Spargel, Möhren und Kohlgemüse. In der unterfränkischen Region Würzburg/Kitzingen werden im warmen Mittelmaintal auf den mittelfränkischen Gäulandschaften Möhren und unterschiedliche Kohlarten produziert. In Mittelfranken hat sich das traditionelle Gemüseanbaugebiet Knoblauchsland entwickelt. Wegen warmen Temperaturen und Marktnähe zum Ballungsraum Nürnberg-Fürth-Erlangen hat sich die Produktion von Gemüse traditionell hier angesiedelt. Die Gemüseproduktion ist wenig spezialisiert, hat aber Schwerpunkte in der Produktion von unter anderem Salaten, Möhren, Kohlgemüse und Speisekürbissen. Bezüglich der Bewässerungssituation hat das Knoblauchsland mit dem 1960 gegründeten „Wasserverband Knoblauchsland“ eine besondere Bedeutung. In Niederbayern ist die Gemüseproduktion vielfältig, jedoch mit Schwerpunkt auf Speisezwiebeln und Einlegegurken. (Stroh et al., 2016).

Abbildung 21: Regionaler Anteil von Gemüse an der landwirtschaftlichen Fläche in Bayern, 2016

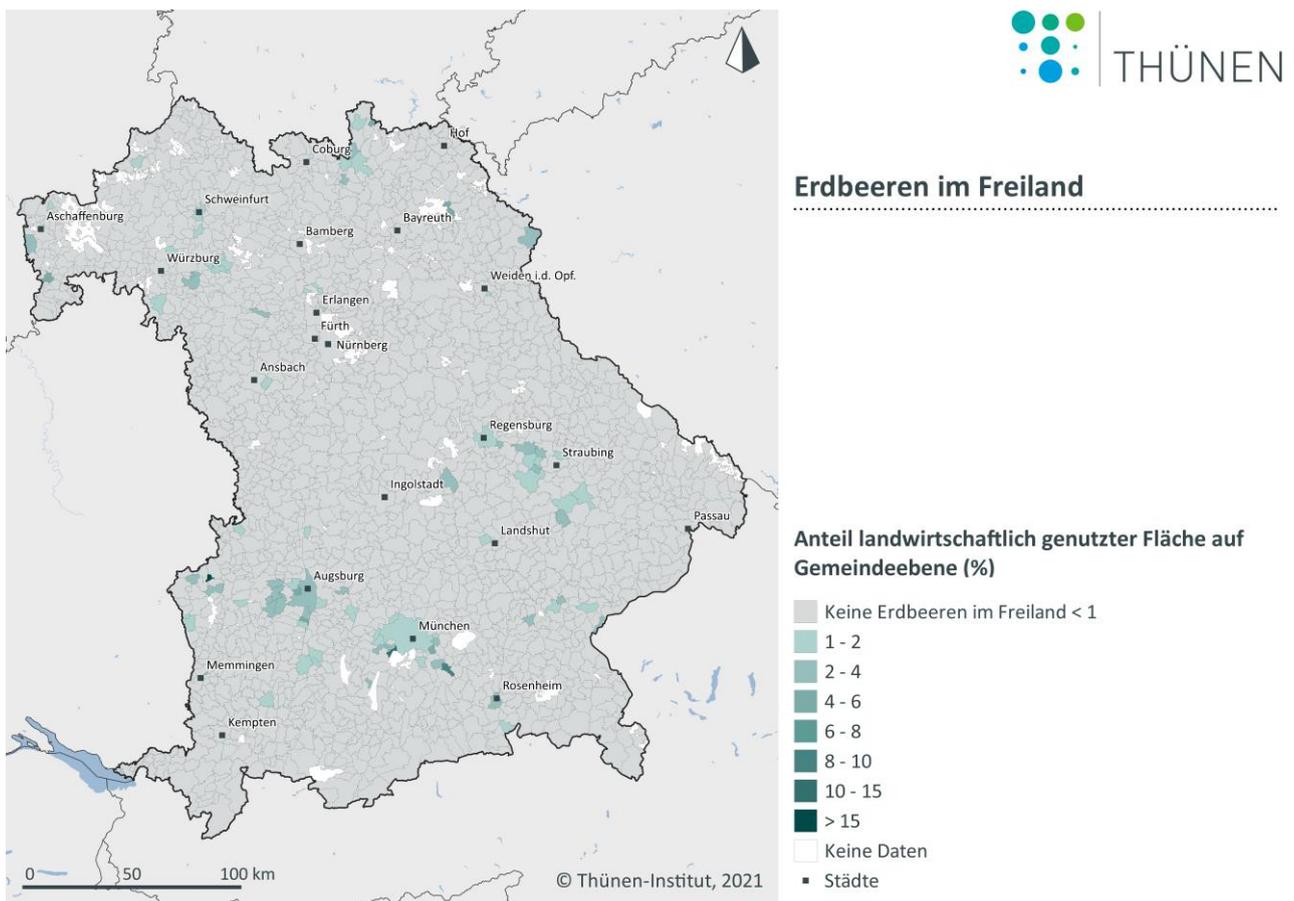


Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Landnutzungsdaten aus der InVeKoS-Datenbank Bayern (InVeKoS, 2016).

3.3.3.1 Erdbeeren

Die Produktion von Erdbeeren (siehe Abbildung 22) findet in Bayern in Regionen statt, in denen Klima und Boden hinreichende Bodenerwärmung und Sonnenscheindauer gewährleisten und in denen die Nähe zu großen Städten kurze Absatz- und Vermarktungswege ermöglicht. So findet man Flächenanteile von mehr als 2 % der landwirtschaftlichen Fläche z. B. in der Region um Augsburg und München sowie in den begünstigten Gemüsebauregionen bei Regensburg, Straubing, Ingolstadt und Landshut.

Abbildung 22: Regionaler Anbau von Erdbeeren an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Bayern, 2016

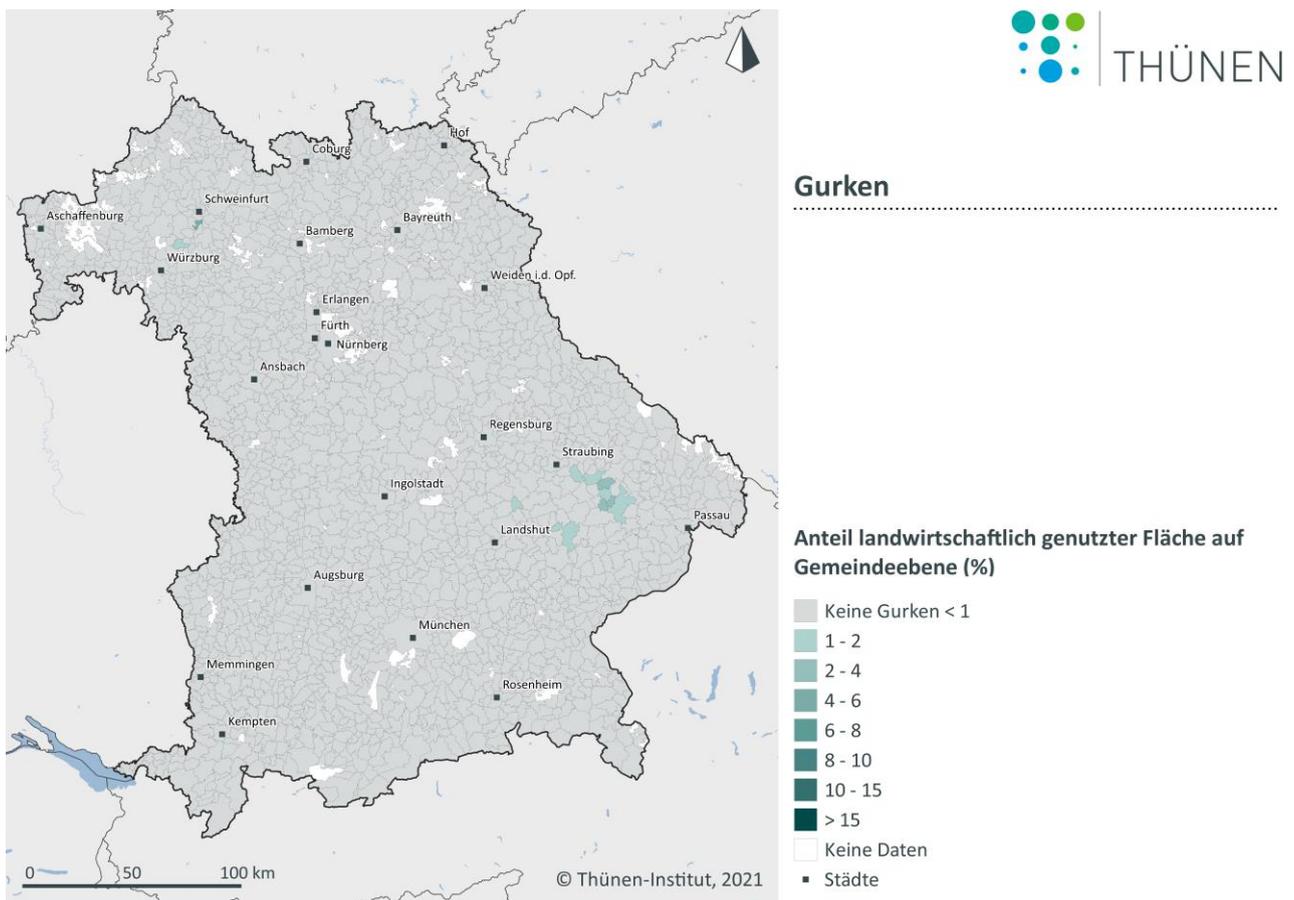


Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Landnutzungsdaten aus der InVeKoS-Datenbank Bayern (InVeKoS, 2016).

3.3.3.2 Gurken (Einlegegurken)

Einlegegurken werden auf mehr als 2 % der landwirtschaftlichen Fläche im warmen Mittelmaintal auf der Fränkischen Platte bei Würzburg/Kitzingen produziert. In Niederbayern, auf dem Dungau (z. B. in den Landkreisen Deggendorf, Straubing, Bogen) und im Unteren Isartal (z. B. in Dingolfing, Landau) haben die guten Produktionsbedingungen zur regionalen Spezialisierung auf Einlegegurken geführt (Strohm et al., 2016). Die Ansiedlung der verarbeitenden Industrie, die Etablierung des Vertragsanbaus und die Organisation in Anbauverbänden haben diese Region in Niederbayern zur europaweit größten zusammenhängenden Anbaufläche für Gurken wachsen lassen (siehe Abbildung 23).

Abbildung 23: Regionaler Anbau von Gurken an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Bayern, 2016

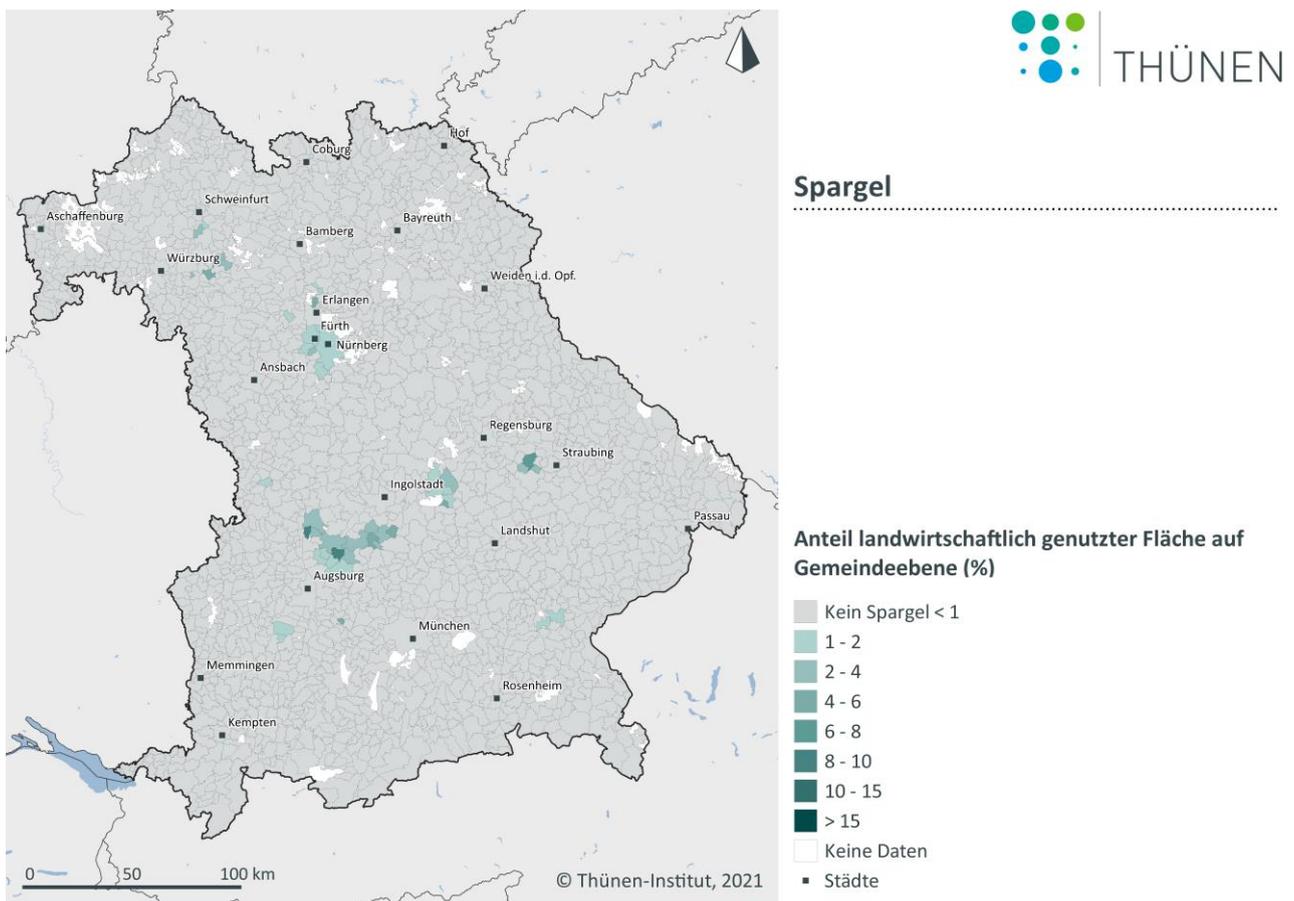


Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Landnutzungsdaten aus der InVeKoS-Datenbank Bayern (InVeKoS, 2016).

3.3.3.3 Spargel

Der Spargelanbau (siehe Abbildung 24) ist mit mehr als 2 % Ausdehnung auf der landwirtschaftlichen Fläche regional konzentriert in der unterfränkischen Region Würzburg/Kitzingen, im warmen Klima des Mittelmaintals und im traditionellen Gemüseanbaugebiet Knoblauchsland (am Ballungsraum Nürnberg-Fürth-Erlangen). In Südbayern findet die Spargelproduktion in Marktnähe und auf den Gemüseanbauregionen in der Nähe von Augsburg, Ingolstadt sowie westlich von Straubing statt.

Abbildung 24: Regionaler Anbau von Spargel an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Bayern, 2016

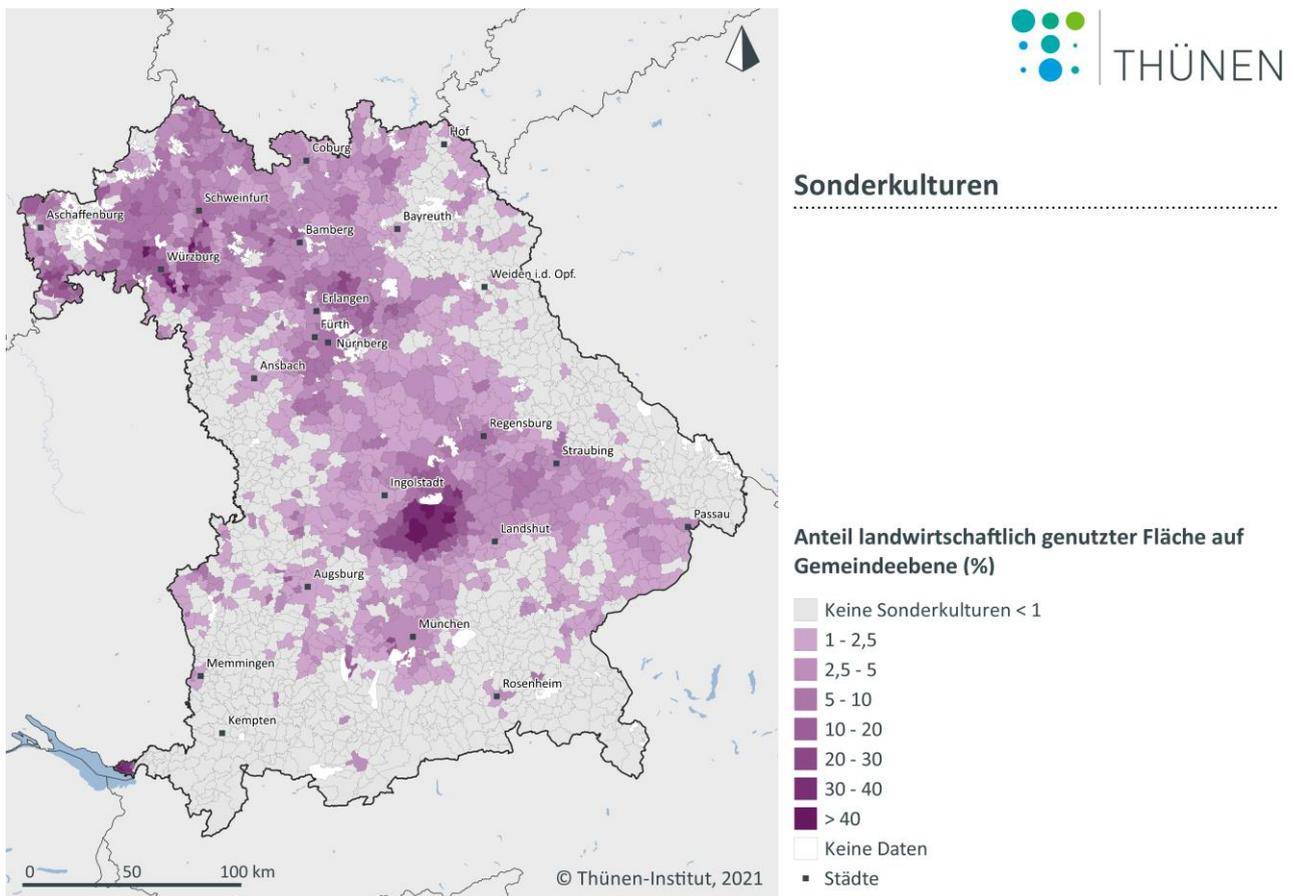


Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Landnutzungsdaten aus der InVeKoS-Datenbank Bayern (InVeKoS, 2016).

3.3.4 Sonderkulturen

Der regionale Flächenumfang von Sonderkulturen (Wein, Hopfen, Obst) wird durch das Klima und die regionale Anbauspezialisierung bestimmt (siehe Abbildung 25). Erdbeeren wurden der Gruppe der Gemüsekulturen zugeordnet (siehe Kapitel 3.3.3.1). Die regionale Ausdehnung der Sonderkulturen ist bedeutend in Regionen mit warmem Klima, wie sie in den Tallagen Bayerns zu finden sind: im Nordwesten, dem Mainfrankental, in den Flusstälern (z. B. Donau, Isar), am Bodensee und im Alpenvorland. Größere Flächenanteile (von mehr als 10 % der landwirtschaftlichen Fläche) lassen sich durch Anbauspezialisierungen erklären, z. B. auf die Hopfenproduktion (Region Hallertau und Spalt), die Obstproduktion in der Bodenseeregion oder auf die Produktion von Wein und Obst im Mainfrankental (bei Würzburg).

Abbildung 25: Regionaler Anteil von Sonderkulturen an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Bayern, 2016

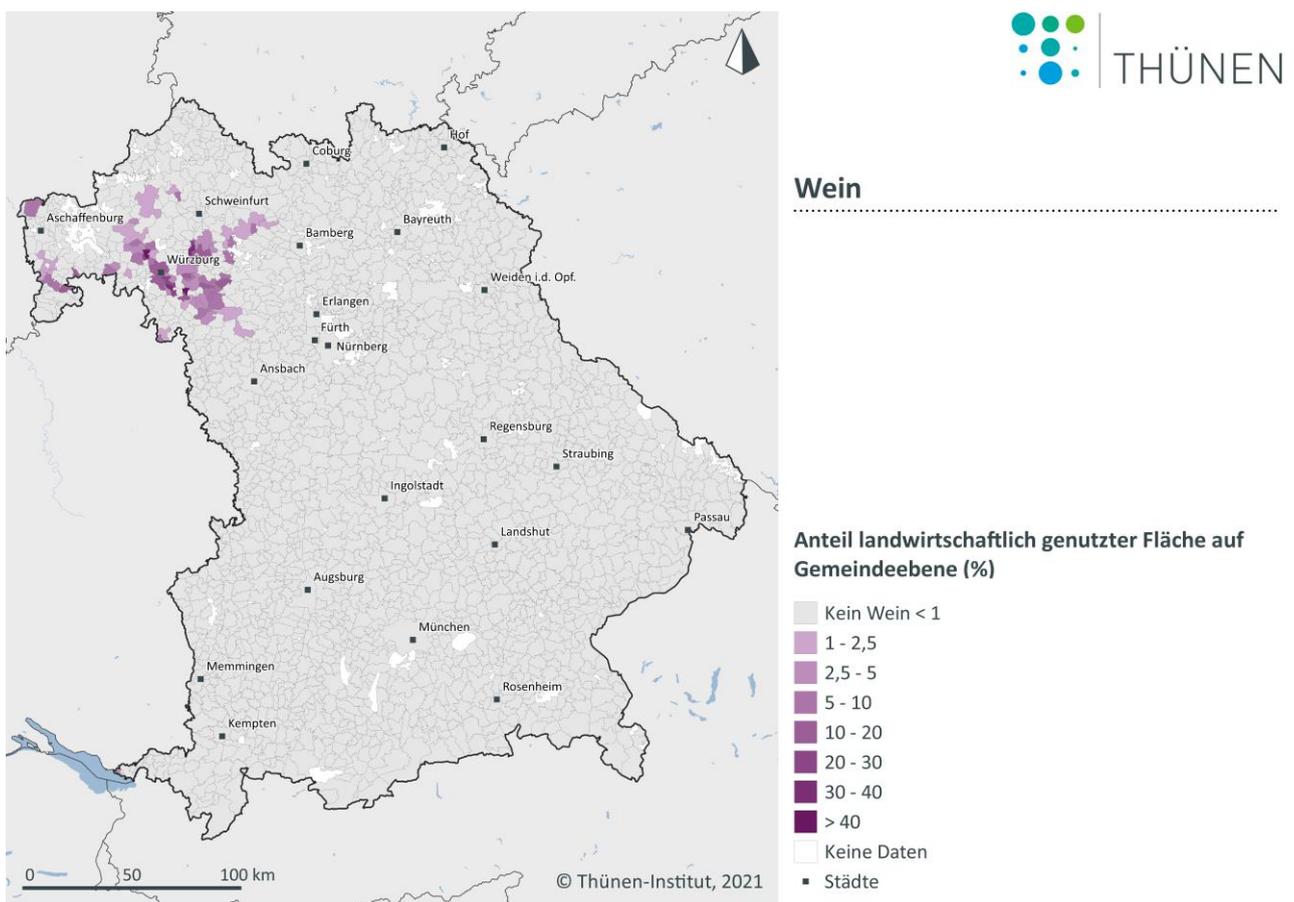


Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Landnutzungsdaten aus der InVeKoS-Datenbank Bayern (InVeKoS, 2016).

3.3.4.1 Wein

Wein (siehe Abbildung 26) wird im Fränkischen Weinland und auf den Mainfränkischen Platten in geschützten Lagen (in Seitentälern des Mains) produziert. Schwerpunkte der Weinproduktion finden sich in Kitzingen, Würzburg und Schweinfurt. Der Wein wird auf drei vorherrschenden Böden angebaut, deren Vorkommen das Weinbaugebiet folgendermaßen unterteilen: Muschelkalk, Keuper und Buntsandstein. Die Böden ermöglichen die Produktion von mineralstoffhaltigen Weinen. Die Region liegt noch südlich des 50. Breitengrades (der Mainlinie), bei einer Jahresdurchschnittstemperatur von rund 9 °C, die in Deutschland die Produktion von Wein ermöglicht (Bodmann, 2021).

Abbildung 26: Regionaler Anteil von Wein an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Bayern, 2016



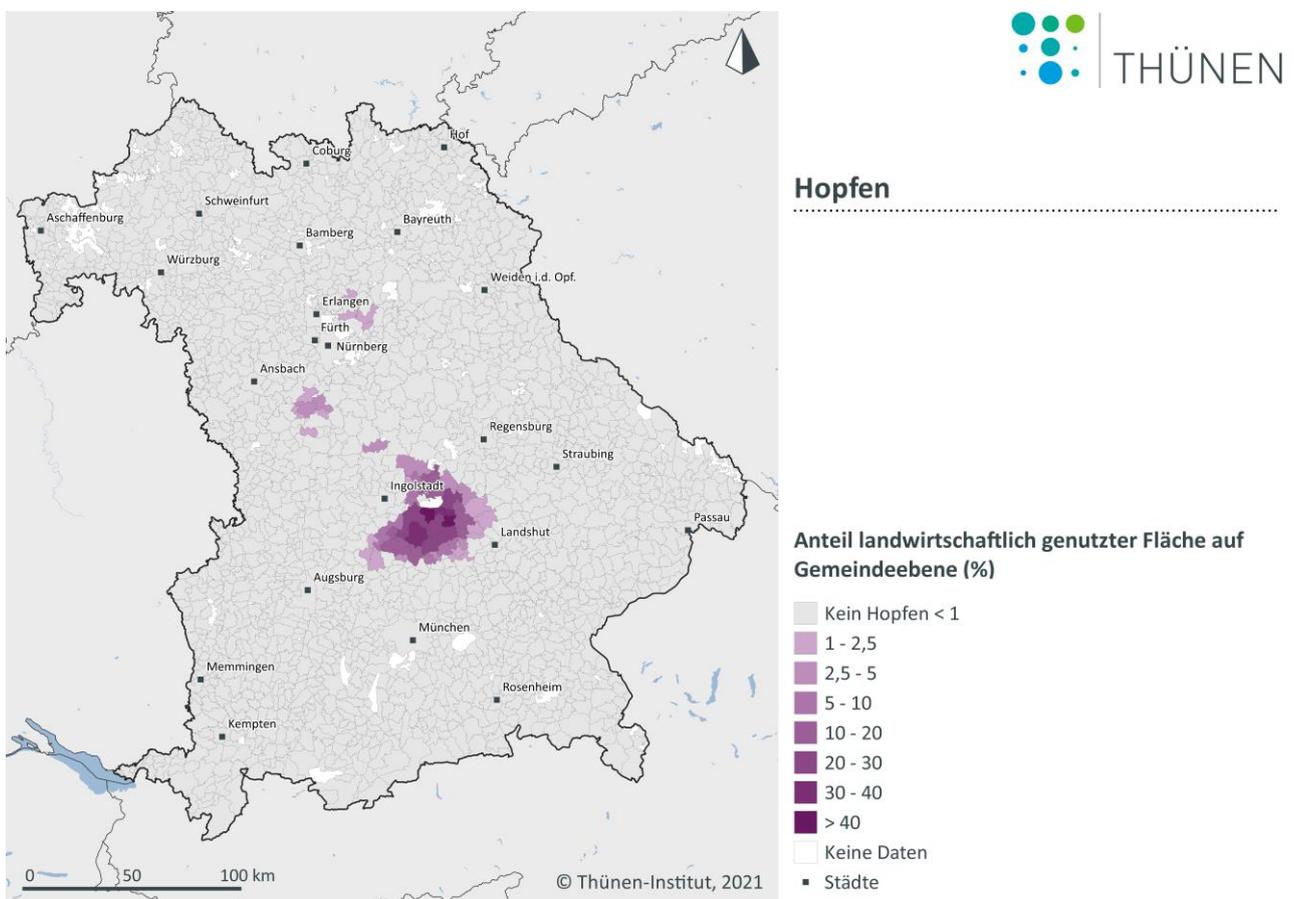
Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Landnutzungsdaten aus der InVeKoS-Datenbank Bayern (InVeKoS, 2016).

3.3.4.2 Hopfen

Hopfen wird in Bayern in drei Regionen angebaut: Im Anbaugebiet Hersbruck (Hersbrucker Schweiz, östlich von Nürnberg), im Anbaugebiet Spalt (im Spalter Land bei Spalt, südlich von Nürnberg) und im Anbaugebiet Hallertau (südöstlich von Ingolstadt). Letzteres ist das weltweit größte zusammenhängende Hopfenanbaugebiet der Welt. In diesen Anbauregionen werden die speziellen Produktionsansprüche an Boden und Klima erfüllt (siehe Abbildung 27).

Tiefgründige, gut bearbeitbare, leichte und mittelschwere Böden erlauben dem ausgedehnten und tiefgreifenden Wurzelsystem des Hopfens eine gute Durchwurzelbarkeit. Zur ertragreichen Produktion benötigt der wuchsstarke Hopfen hinreichende Sonneneinstrahlung und gleichzeitig eine permanente Wasserversorgung (LfL, 2021; Münsterer, 2011). Daher sind in bestimmten Wachstumsphasen hohe Niederschläge sowie eine hohe klimatische Wasserbilanz vorteilhaft, ebenso wie Böden, die eine Bodenfeuchte ohne Staunässe gewährleisten (Braun, 2015).

Abbildung 27: Regionaler Anteil von Hopfen an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Bayern, 2016

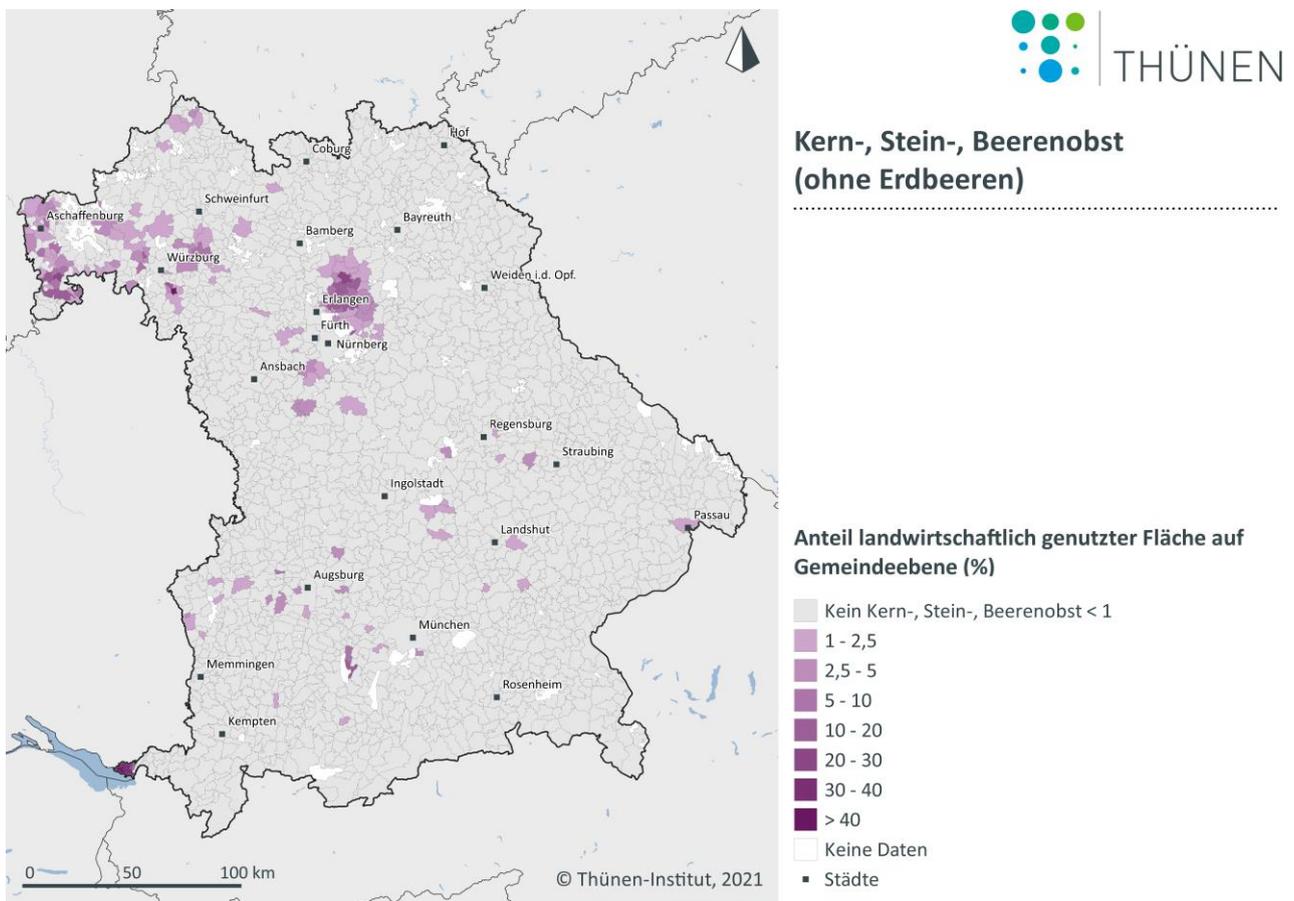


Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Landnutzungsdaten aus der InVeKoS-Datenbank Bayern (InVeKoS, 2016).

3.3.4.3 Kern-, Stein- und Beerenobst (ohne Erdbeeren)

In Unterfranken, wo die klimatischen Bedingungen den Weinanbau und die Baumobstproduktion begünstigen, finden sich mit mehr als 2 % der landwirtschaftlichen Fläche regional große Obstflächen (siehe Abbildung 28). Hier werden vorwiegend Baumobst (Äpfel, Pflaumen, Zwetschen, Birnen, Kirschen und Mirabellen) und Strauchbeeren (z. B. Johannisbeeren, Holunder) produziert. In Oberfranken liegen vereinzelt Regionen mit Anbau von verschiedenen Obstkulturen (z. B. Süßkirschen, Pflaumen, Zwetschen, Äpfel und Birnen). Hier liegt der Schwerpunkt der bayerischen Süßkirschenproduktion. Im Regierungsbezirk Niederbayern werden vor allem Erdbeeren und Himbeeren produziert. In Schwaben konzentriert sich der Obstbau im günstigen Klima der Bodenseeregion. Dort findet der Anbau von Baumobst (Äpfel, Birnen) und Beerenobst (schwarze Johannisbeere) statt (Garming et al.,2018).

Abbildung 28: Regionaler Anteil von Kern-, Stein- und Beerenobst an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Bayern, 2016



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Landnutzungsdaten aus der InVeKoS-Datenbank Bayern (InVeKoS, 2016).

3.4 Klima

Die Analyse der Bodenarten zeigt, dass in Bayern die Bodenqualität großräumig gut ist, um hohe pflanzenbauliche Erträge zu erzielen. Doch werden die Produktionsmöglichkeiten auch stark durch das regionale Klima bestimmt. So können bestimmte Gemüsesorten nur auf entsprechend geeigneten Böden und nur bei hinreichend warmen Temperaturen und ausreichenden Niederschlägen wirtschaftlich produziert werden.

Das Klima in Bayern ist im Landesinneren vorwiegend trocken-warm ausgeprägt und in den Gebirgs- und Höhenlagen im Osten und Süden feucht-kalt. Bayern liegt in der Übergangsregion zwischen West- und Osteuropa und wird somit durch seine geografische Lage vom Westen durch eine maritime Klimazone und im Osten von einem kontinentalen Klima beeinflusst (StMUV, 2015). Die Wetterlagen der Westwindzone bestimmen ein gemäßigtes, maritimes Klima mit milden Wintern, kühlen Sommern und insgesamt einer hohen Luftfeuchtigkeit. Die Wetterlagen östlich von Bayern bestimmen den kontinentalen Einfluss (kalte, lange und schneereiche Winter, warme Sommer, geringe Luftfeuchte).

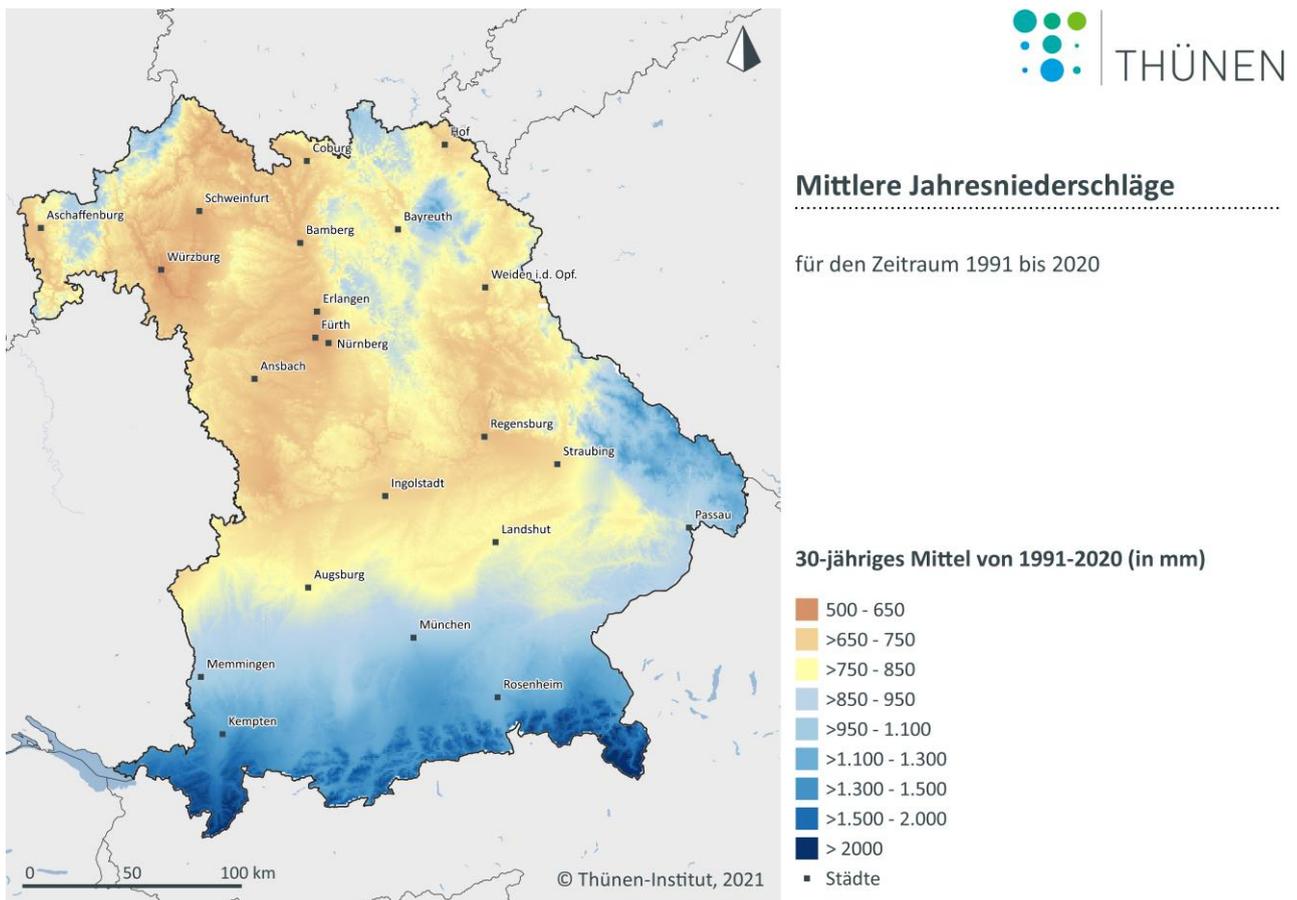
Auch die Höhenlagen und die Gliederung der Landschaften (Mittelgebirge, Alpenvorland, Alpen) bestimmen das Klima. Die Luv- und Lee-Effekte der Gebirge beeinflussen die Temperatur, die Bewölkung und den Niederschlag. Die räumliche Verteilung der Lufttemperatur hängt von der Geländehöhe ab. Mit der Höhe nimmt die Temperatur ab. Die Bewölkung, die durch den Wind auf die Luvseite der Gebirge transportiert wird staut sich auf, wodurch auf den Luvseiten in höheren Regionen auch der Niederschlag höher ist.

Die großen Höhenunterschiede in Bayern führen zu deutlichen regionalen Temperaturabweichungen vom historischen Jahresmittel (für den Zeitraum 1971-2000). Diese Abweichung beträgt bis zu 7,8 °C. So liegen die Jahresdurchschnittstemperaturen in Unterfranken in einer Lage von 200 m ü. NN bei 10 °C und auf der Zugspitze in knapp 3.000 m bei -5 °C. Becken- oder Tallagen – wie z. B. im Main-Becken – sind besonders wärmebegünstigend (StMUV, 2015). Die Anzahl der Sommertage und der heißen Tage (Tage mit Mindesttemperaturen von 25 bzw. 30 °C) ist regional im westlichen Maingebiet, im Bodenseebereich sowie im Gebiet der westlichen Donau und der Isar besonders hoch. In diesen besonders warmen Regionen können dadurch auf günstigen Böden Kulturen angebaut werden, die warme Temperaturen benötigen (z. B. Gurken, Kürbisse etc.).

3.4.1 Niederschlag

Tiefdruckgebiete aus dem warmen Mittelmeerraum transportieren feuchte Luftmassen in die kühleren Gebirgsregionen der Alpen und des Alpenvorlands, welche in Bayern zu starken Niederschlägen führen können (StMUV, 2015) (siehe Abbildung 29). In Zentralbayern sowie im südwestlichen Mittelgebirge ist das Klima durch kontinentale Einflüsse geprägt, sodass vergleichsweise moderate Niederschläge im Jahresmittel gemessen werden können. Die Nordseite (Luv) der Alpen, die Höhen und Gebirgslagen weisen die höchsten Niederschläge auf. In den niederschlagreichen Regionen fällt mit über 1.800 mm pro Jahr dreimal so viel Niederschlag als in den trockenen Regionen in Mittel- und Nordwestbayern.

Abbildung 29: Mittlere Jahresniederschläge in Bayern (1991–2020)



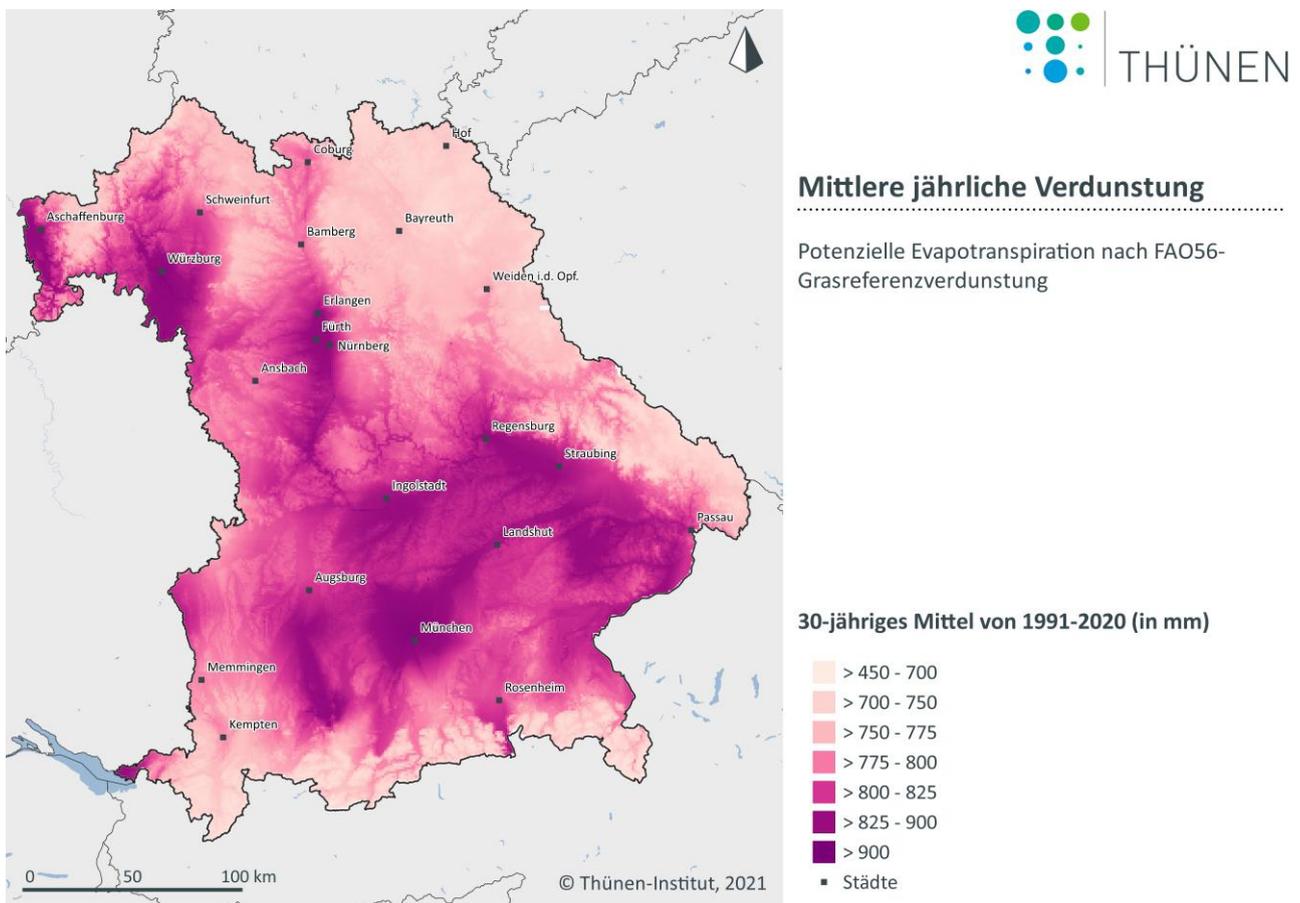
Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von interpolierten Messwerten des Deutschen Wetterdienstes (DWD, 2021a).

3.4.2 Verdunstung

Neben dem Niederschlag ist die Verdunstung eine ausschlaggebende Variable für die Abbildung von agrarmeteorologischen Situationen. Die Verdunstung lässt sich weiter in reale und potenzielle Verdunstung unterscheiden. Die im Projekt verwendete potenzielle Evapotranspiration (ET₀) enthält die maximal mögliche Verdunstung eines Pflanzenbestands über Gras nach (Allen et al., 1998) – auch als FAO56-Grasreferenzverdunstung bezeichnet.

Hohe Verdunstungsraten gehen mit hoher Einstrahlung einher. In Bayern sind hohe Verdunstungsraten entlang der Flüsse wie Donau, Isar, Lech und Mai und den großen Städten entlang der Flüsse zu erkennen (siehe Abbildung 30). Große zusammenhängende Bereiche mit hohen Verdunstungsraten sind im nördlichen Oberbayern bis Niederbayern zu verorten. In den Mittelgebirgen sowie im alpinen Raum sind die Verdunstungsraten vergleichsweise gering.

Abbildung 30: Mittlere jährliche Verdunstung in Bayern (1991–2020)

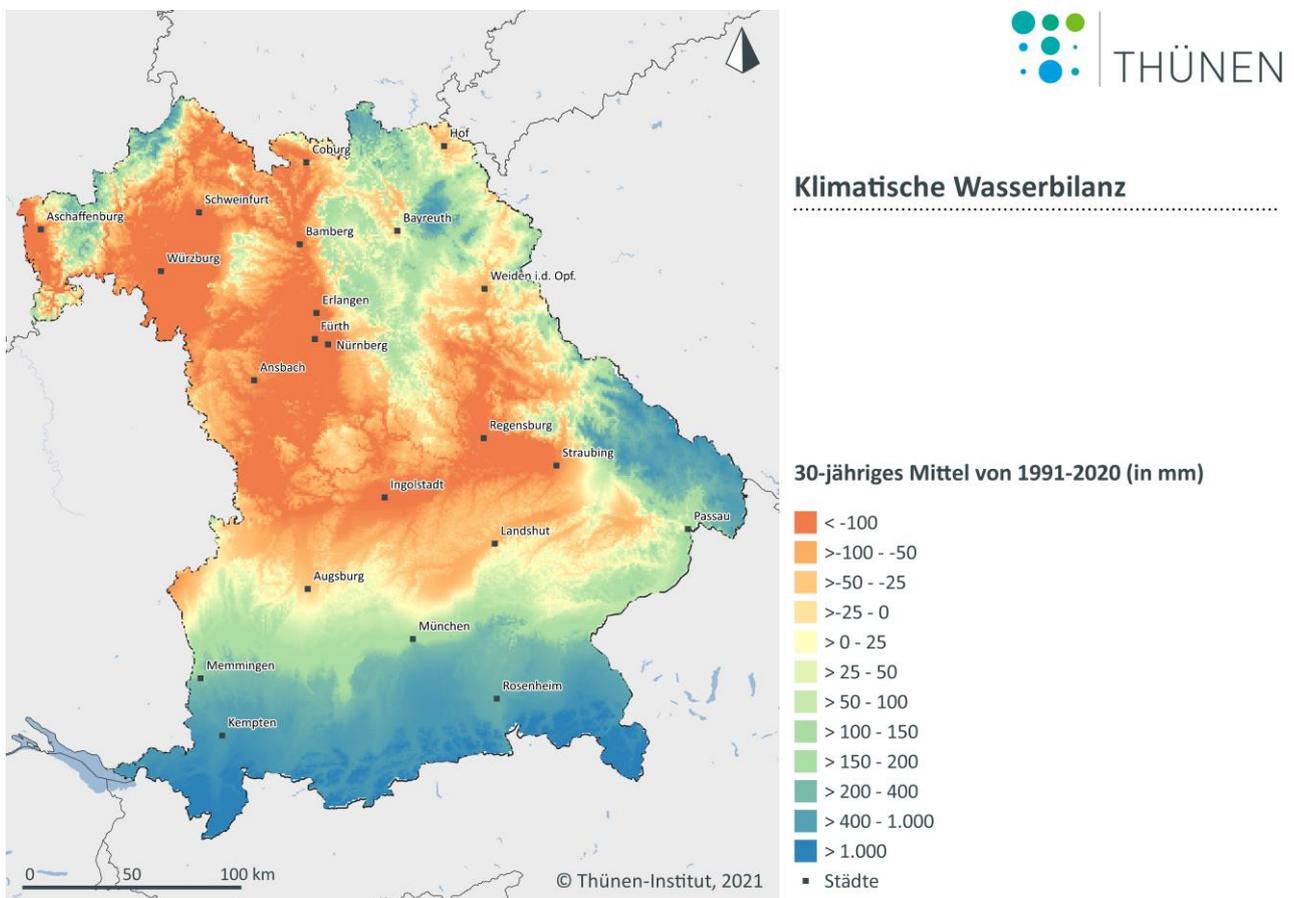


Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von modellierten Werten des Deutschen Wetterdienstes (DWD, 2021c).

3.4.3 Klimatische Wasserbilanz

Die klimatische Wasserbilanz ist die Differenz aus Niederschlag (Abbildung 29) und Verdunstung (Abbildung 30) und liefert einen ersten räumlichen Blick über mögliche Wasserdefizite in Bayern. Je nach Zeitreihe lassen sich tägliche, monatliche, jährliche oder Mittelwerte über die Vegetationsperiode hinweg berechnen. Abbildung 31 präsentiert die mittleren jährlichen Werte der klimatischen Wasserbilanz für Bayern. Diese wird – entgegen der in der Klimatologie üblichen Differenz auf Niederschlag und potenzieller Verdunstung – als Differenz aus Niederschlag und Grasreferenzverdunstung dargestellt und bildet lediglich die in das Modell eingehenden Werte ab. Die Grasreferenzverdunstung entspricht der Höhe der Verdunstung, die eine dichte Grasbedeckung ohne Limitierung der Nachlieferung von Wasser aufweist. Eine Einschränkung der Verdunstung im jahreszeitlichen Verlauf aufgrund von Wassermangel ist also nicht vorhanden. Aus diesem Grund kann die reale Evapotranspiration die Grasreferenzverdunstung sowohl unter- als auch überschreiten, liegt aber bei Wasserknappheit oft unterhalb dieser. Aus diesem Grund fällt die klimatische Wasserbilanz in vielen Bereichen negativ aus. Dennoch lässt die Grasreferenzverdunstung aufgrund einer einheitlichen Methodik einen bayernweiten Überblick und Vergleich für alle Standorte zu.

Abbildung 31: Mittlere jährliche klimatische Wasserbilanz in Bayern (1991–2020)



Quelle Eigene Darstellung auf Grundlage von DWD (2021a) und (2021c).

Regional fallen geringe Niederschläge und hohe Verdunstung im Südwestlichen Mittelgebirge und im nördlichen Alpenvorland zusammen. Besondere Schwerpunkte liegen entlang des Mains bei Aschaffenburg und Würzburg, in großen Teilen des Fränkischen Keuper-Lias-Lands bei Bamberg, Erlangen, Fürth und Nürnberg sowie entlang der Isar und Donau. In diesen Regionen überwiegt die Verdunstung (Evapotranspiration) den Niederschlag, sodass von einem Wasserdefizit für die Landwirtschaft ausgegangen werden kann. Insgesamt ist in Bayern eine L-förmige regionale Struktur mit negativen klimatischen Wasserbilanzen zu erkennen. Deutlich positive klimatische Wasserbilanzen sind besonders in den Alpen und dem südlichen Alpenvorland zu verzeichnen. Dies liegt neben einer geringen Verdunstung an den hohen Niederschlägen (siehe Abbildung 29).

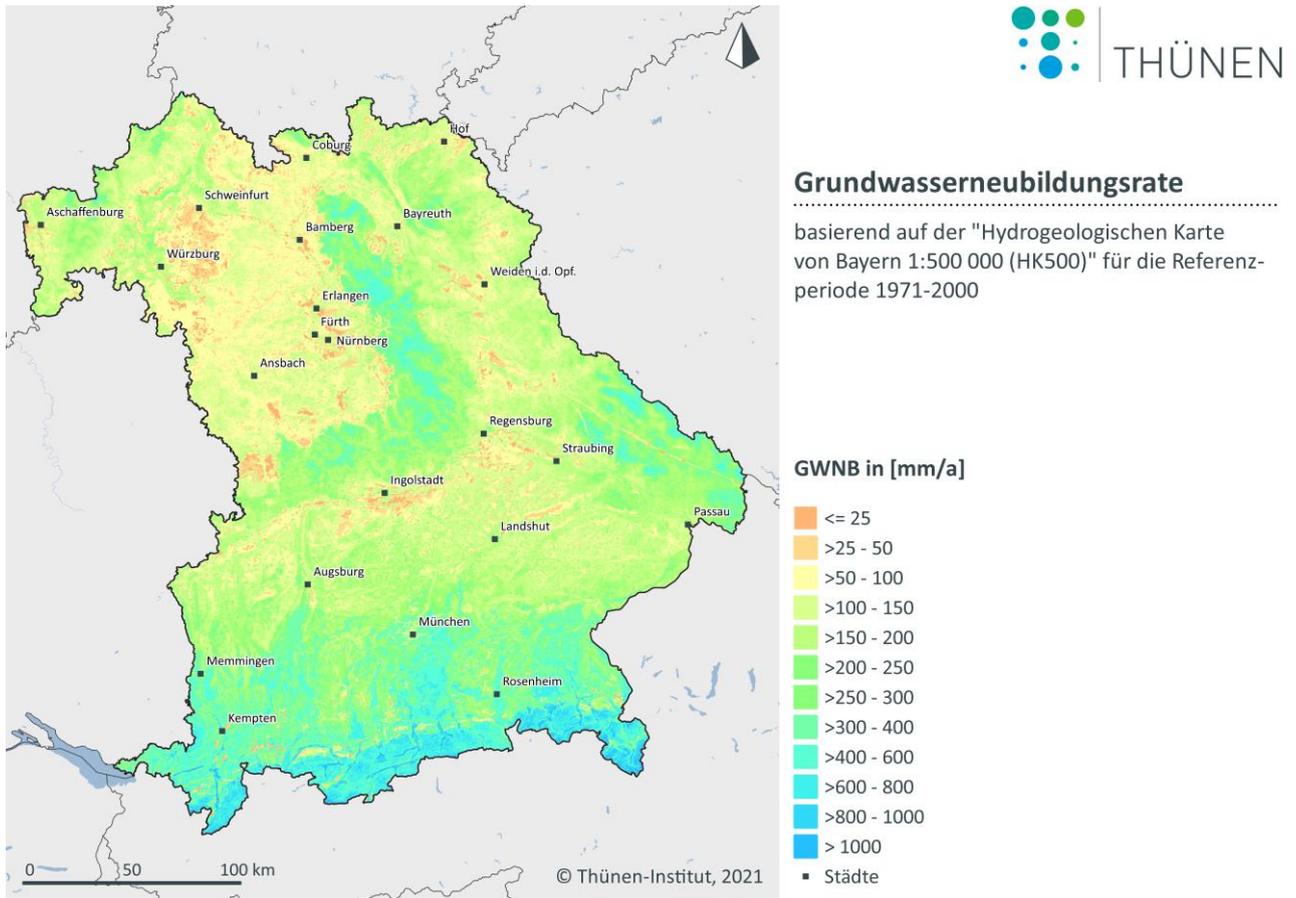
3.4.4 Grundwasserneubildung

Die Grundwasserneubildung wird berechnet aus der Bilanz aus Niederschlag, Verdunstung und Gesamtabfluss. Die Grundwasserneubildung variiert im Jahresverlauf (hohe Raten in den Winter- und geringe Raten in den Sommermonaten) und reagiert besonders empfindlich auf klimatische Änderungen (wenn z. B. höhere Temperaturen im Sommer zu höherer Verdunstung führen).

Die Grundwasserneubildung ist ein Indikator für die natürliche Regenerationsfähigkeit der Grundwasserkörper und somit für die regionale Wasserverfügbarkeit. Die regionale Wasserverfügbarkeit ist für die Bewässerung insofern von Bedeutung, als dass sie den Zugang zu Wasserressourcen beschreibt. In Bayern stellen natürliche Grundwasservorkommen zu ca. 95 % die Basis für die Trinkwasserversorgung dar. Erhöhter Bewässerungsbedarf, der aus dem Trinkwasser gedeckt wird, kann zu Nutzungskonflikten führen.

Abbildung 32 zeigt die regionale durchschnittliche Grundwasserneubildung in den Alpen, dem voralpinen Moor- und Hügelland sowie in der Fränkischen Alb als hoch. In Nordwest-Bayern ist die Grundwasserneubildung gering. Mit nur durchschnittlich 550 mm Jahresniederschlag ist dieses Gebiet, das Kerngebiet des fränkischen Weinbaus, eine der trockensten Regionen Bayerns. Bei einer Erhöhung der Bewässerungsbedürftigkeit kann es zu Investitionsbedarf für die Erstellung von Bewässerungsinfrastruktur kommen (StMUV, 2015).

Abbildung 32: Mittlere jährliche Grundwasserneubildung aus Niederschlag (1971–2000)



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von LfU (2017).

3.5 Entwicklung des Klimas in Bayern

3.5.1 Einordnung des Klimaszenarios

Um die Breite und einen möglichen Ergebnisfächer zukünftiger Klimaentwicklungen abzuschätzen, werden verschiedene Klimaszenarien als ein Ensembleszenario berücksichtigt. Dieses Szenario beinhaltet diverse sozio-ökonomische und technologische Entwicklungsszenarien, die entsprechende Auswirkungen auf das Globalklima haben. Seit 1988 trägt der Weltklimarat (englisch: IPCC ‚Intergovernmental Panel on Climate Change‘) in regelmäßigen Sachstandsberichten Informationen zum Klimawandel, dessen Prognose und Auswirkung zusammen. Im fünften Sachstandsbericht des IPCC (2014) werden fünf verschiedene, repräsentative Szenarien betrachtet, deren Eintrittswahrscheinlichkeit unterschiedlich hoch angegeben wird. Diese räumlichen Konzentrationspfade (englisch: RCP ‚Representative Concentration Pathways‘) basieren auf einer unterschiedlich starken Zunahme der mittleren jährlichen Globalstrahlung (W/m^2) vom Jahr 1950 bis in das Jahr 2100. Je nach RCP-Szenario wirken sich die Konzentrationspfade beispielsweise unterschiedlich auf die durchschnittliche globale Oberflächentemperatur aus (siehe Abbildung 33). Wie schon im fünften Sachstandsbericht von 2014 beschreibt der neueste, sechste Sachstandsbericht des IPCC (2021) das RCP 8.5-Szenario als maximales Szenario hinsichtlich der Zunahme der Konzentrationspfade und dessen Eintrittswahrscheinlichkeit wird als die höchste aller Szenarien bewertet. Aus diesem Grund werden im Modell die Klimaprojektionen nach RCP 8.5 verwendet.

Die klimatischen Veränderungen im RCP 8.5-Szenario werden auf regionaler Ebene durch diverse Mitglieder des DWD-Kernensembles abgedeckt, die auf globalen und regionalen Klimamodellen beruhen. Eine Übersicht der verwendeten Einzelmodelle ist in Tabelle 4 dargestellt.

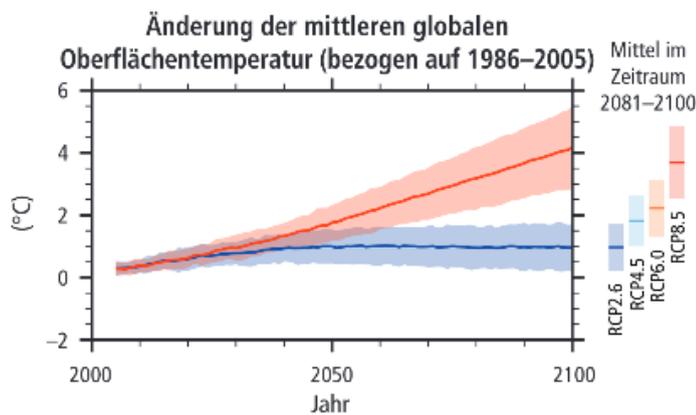
Tabelle 4: Globale und regionale Klimamodelle des RCP 8.5-Ensembleszenarios

Globales Klimamodell	Regionales Klimamodell
ICHEC-EC-EARTH (r1)	KNMI-RACMO22E
CCCma-CanESM2 (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17
MOHC-HadGEM-ES (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17
MIROC-MIROC5(r1)	GERICS-REMO2015
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	UHOH-WRF361H
MPI-M-MPI-ESM-LR (r2)	MPI-CSC-REMO2009

Quelle: Eigene Darstellung.

Dabei werden in den zur Verfügung gestellten Datensätzen je ein Globalmodell und das entsprechende Regionalmodell (derselben Tabellenzeile) miteinander verknüpft. Zusammen ergeben alle Modellsimulationen das DWD-Kernensemble, dessen Ergebnisse der Parameter Niederschlag und Grasreferenzverdunstung in die Berechnungen der Bewässerungsbedürftigkeit einfließen.

Abbildung 33: Änderungen der mittleren globalen Erdoberflächentemperatur nach RCP-Szenarien



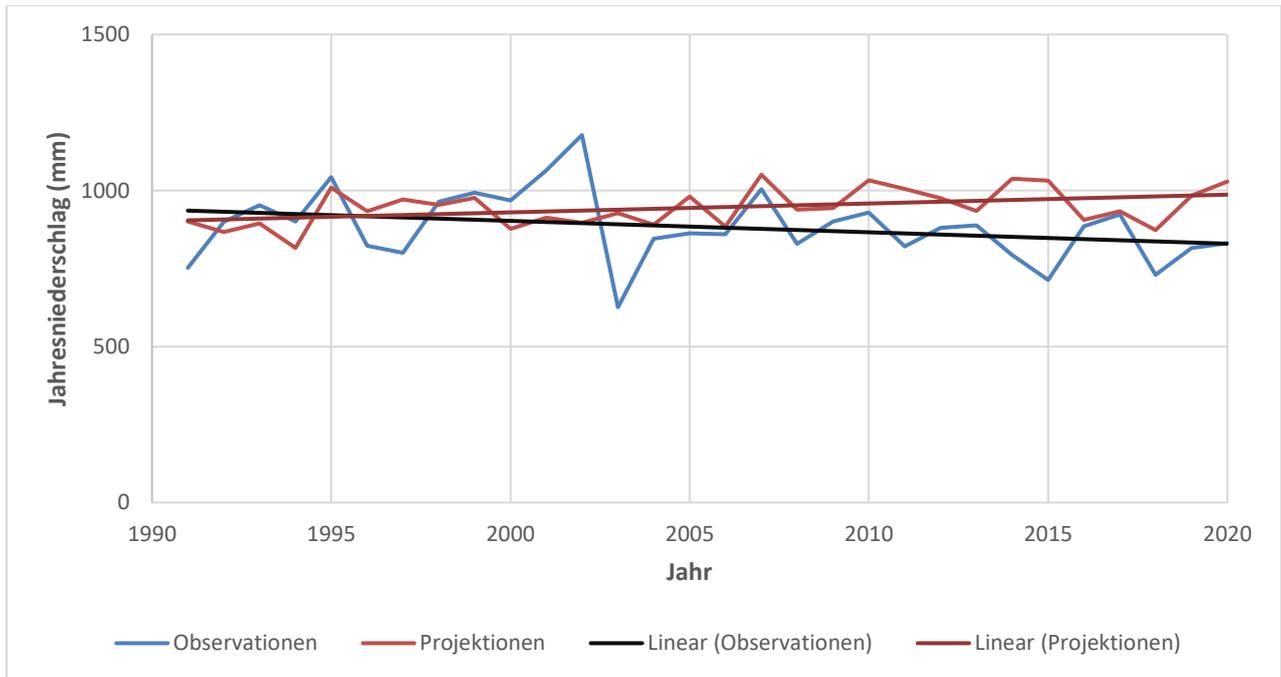
Quelle: Auszug aus der deutschen Übersetzung des Syntheseberichts zum fünften Sachstandsbericht des Weltklimarats (IPCC, 2014).

3.5.2 Änderungssignale der Klimamodelle (Vergleich von Modellvergangenheit und Observationsdaten)

Der erste Schritt der Modellsimulation ist der Blick in die Vergangenheit: Innerhalb der letzten 30 Jahre wurden Klimadaten in einem Observationsnetz bayernweit aufgezeichnet und ausgewertet. Dabei findet ein Vergleich dieser Daten mit den Ergebnissen der Vergangenheitsprojektion des RCP 8.5-Szenarios statt. Es werden die Parameter Niederschlag und Grasreferenzverdunstung betrachtet, aus deren Differenz die klimatische Wasserbilanz kalkuliert wird. Innerhalb der Ex-Post-Periode von 1991–2020 können diese Parameter differenziert betrachtet und miteinander verglichen werden (Abbildung 34 bis Abbildung 39). So sind in Abbildung 34 die mittleren Jahresniederschläge Bayerns aufgeführt. Dabei fällt auf, dass die Observationsdaten zu fast allen Zeitpunkten geringer sind als die simulierten Daten des Klimaszenarios. Der lineare Trend beider Datensätze läuft ebenfalls geringfügig auseinander.

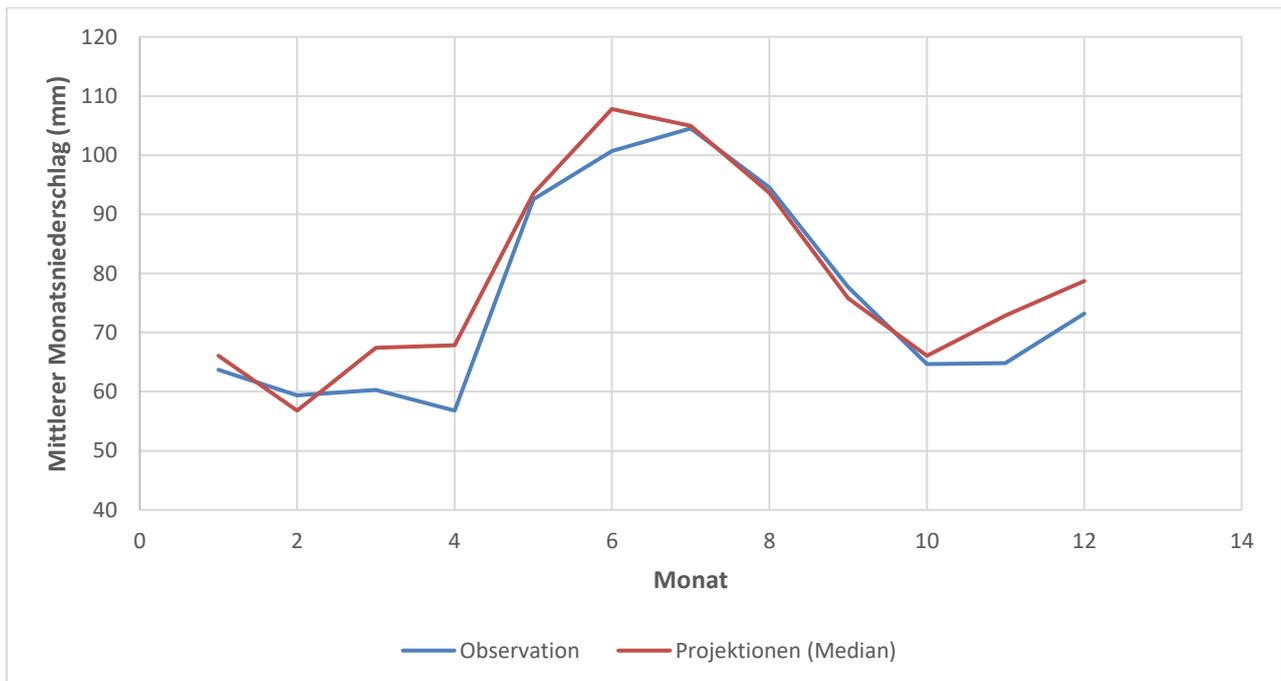
Im jahreszeitlichen Verlauf (Abbildung 35) lassen sich zeitliche Unterschiede innerhalb einzelner Monate ausmachen. So liegen die mittleren Niederschlagsraten der Observationsdaten in der Referenzperiode 1991–2020 in den Wintermonaten unterhalb derer der Projektionsdaten, wohingegen die Unterschiede in den Sommermonaten geringer ausfallen. Das Maximum der Niederschläge wird ebenfalls im Sommer erreicht und nimmt Werte von zum Teil über 100 mm je Monat ein. Zusätzlich gibt es starke regionale Unterschiede in der Niederschlagsverteilung. Im Winter ist die Höhe des Niederschlags leicht verringert und liegt bei Werten zwischen 60 und 70 mm.

Abbildung 34: Beobachtete und projizierte Entwicklung der Jahresmittelniederschläge (1991–2020)



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Klimaobservations- und Klimaprojektionsdaten (DWD, 2021a und 2021b).

Abbildung 35: Beobachtete und projizierte mittlere Änderungen des Monatsniederschlags im jahreszeitlichen Verlauf (1991–2020)

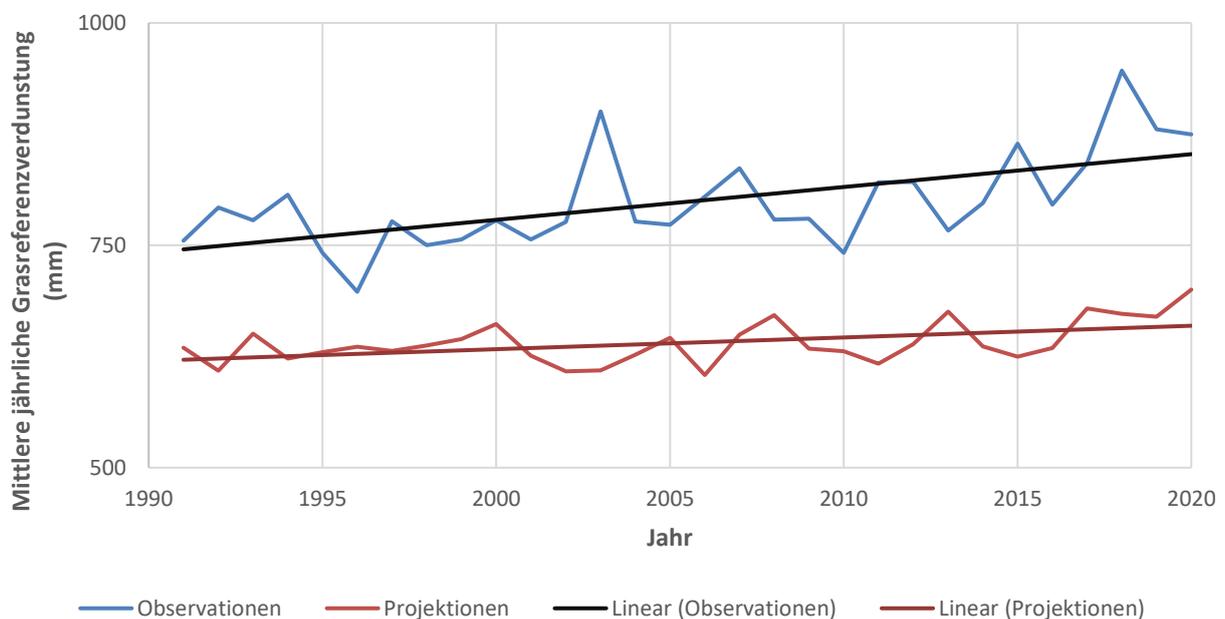


Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Klimaobservations- und Klimaprojektionsdaten (DWD, 2021a und 2021b).

Als weiterer in den Modellberechnungen berücksichtigter Parameter wurde die Grasreferenzverdunstung betrachtet. Analog zu den Niederschlagsdaten aus Observation und Projektion kann eine durchschnittliche jährliche Rate für Bayern kalkuliert werden, die in Abbildung 36 dargestellt ist. Die Observationsdaten sind stets höher als die Projektionsdaten. Bei beiden Datensätzen ist in der Periode 1991–2020 ein klarer Aufwärtstrend erkennbar, der eine ähnliche Steigung aufweist. Die Unterschiede zwischen beiden Datensätzen schwanken je Jahr zum Teil deutlich, liegen im langjährigen Mittel bei ca. 150 mm. Regionale Unterschiede werden aufgrund der bayernweiten Betrachtung allerdings nicht deutlich.

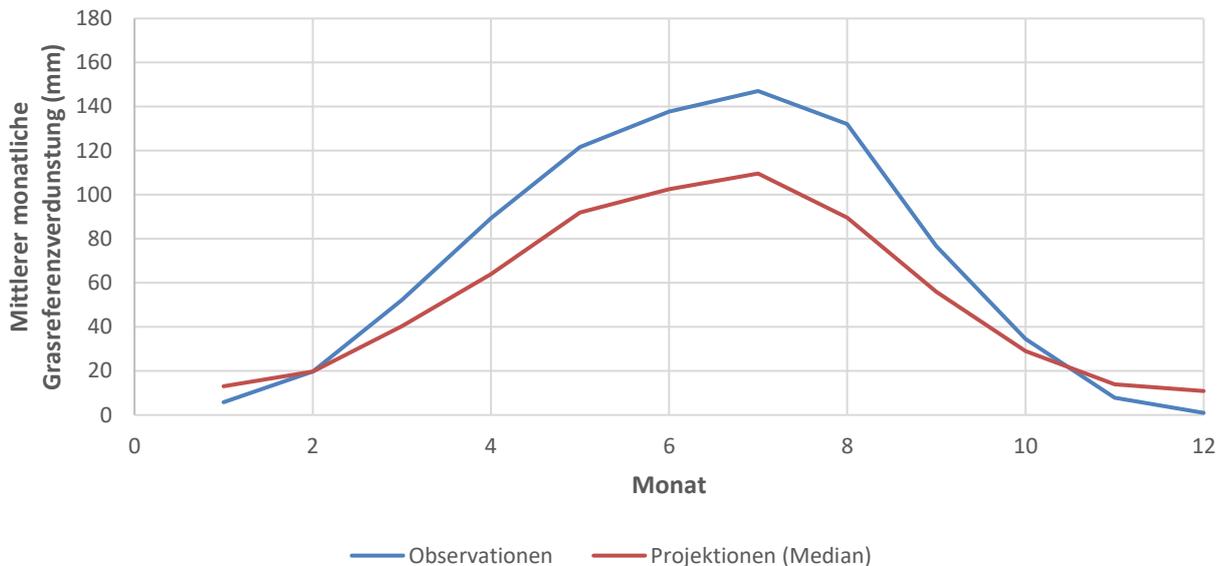
Im jahreszeitlichen Verlauf können die Unterschiede je Monat ausgemacht und verdeutlicht werden (siehe Abbildung 37). Das Maximum beider Datensätze liegt in den Sommermonaten, allerdings liegt dieses bei den Observationsdaten bei über 140 mm je Monat im Juli und bei den Projektionen bei lediglich 110 mm. Ähnliches lässt sich in allen Sommermonaten feststellen. Lediglich im Winter nähern sich die Datenreihen an und werden in wenigen Monaten von den Observationsdaten unterschritten.

Abbildung 36: Beobachtete und projizierte Entwicklung der mittleren jährlichen Grasreferenzverdunstung (1991–2020)



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Klimaobservations- und Klimaprojektionsdaten (DWD, 2021c und 2021d).

Abbildung 37: Beobachtete und projizierte Änderungen der mittleren monatlichen Grasreferenzverdunstung im jahreszeitlichen Verlauf (1991–2020)



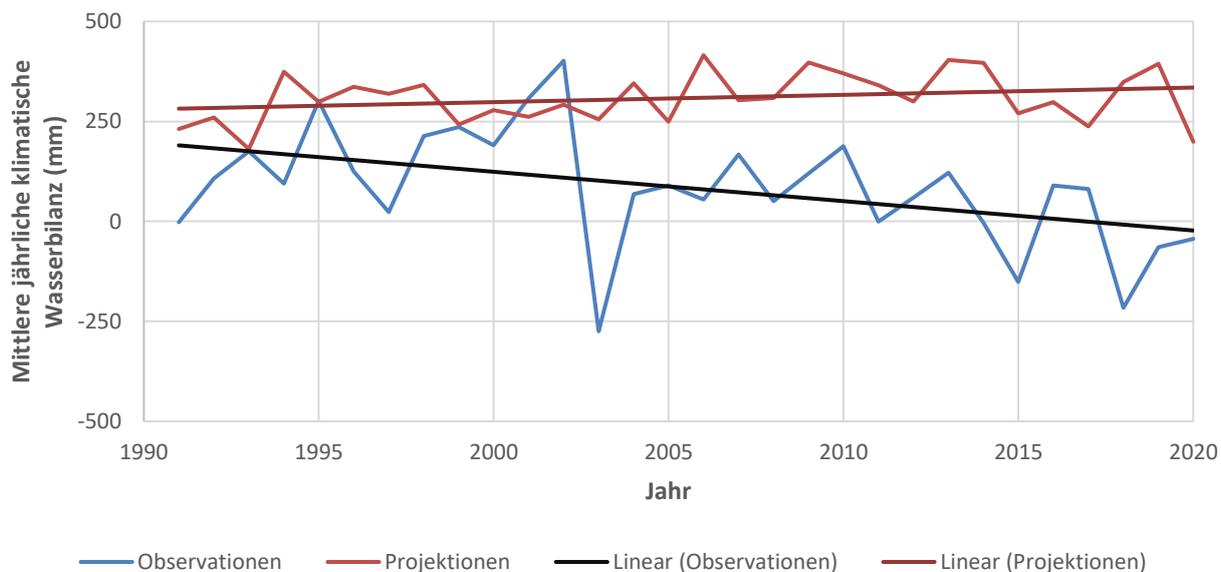
Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Klimaobservations- und Klimaprojektionsdaten (DWD, 2021c und 2021d).

In den Modellberechnungen finden primär die täglichen Wasserbilanzen Berücksichtigung. Aus diesem Grund ist ein Vergleich der klimatischen Wasserbilanz von besonderer Bedeutung. Diese wird aus der Differenz zwischen Niederschlag und Grasreferenzverdunstung berechnet und ist in Abbildung 38 dargestellt. Da die Niederschläge höher als die Verdunstung sind, liegt die klimatische Wasserbilanz in fast jedem Jahr im positiven Bereich. Es liegt also ein Wasserüberschuss innerhalb der Bilanz vor. Lediglich in den Observationsdaten lassen sich wenige Jahre – vor allem in den zurückliegenden fünf Jahren – mit einer negativen Bilanz ausmachen.

Der Vergleich der beobachteten und projizierten Daten zeigt analog zu den Niederschlags- und Verdunstungsdaten Unterschiede auf, die im Trend größer wurden und zwischen 100 und 150 mm Höhe annahmen.

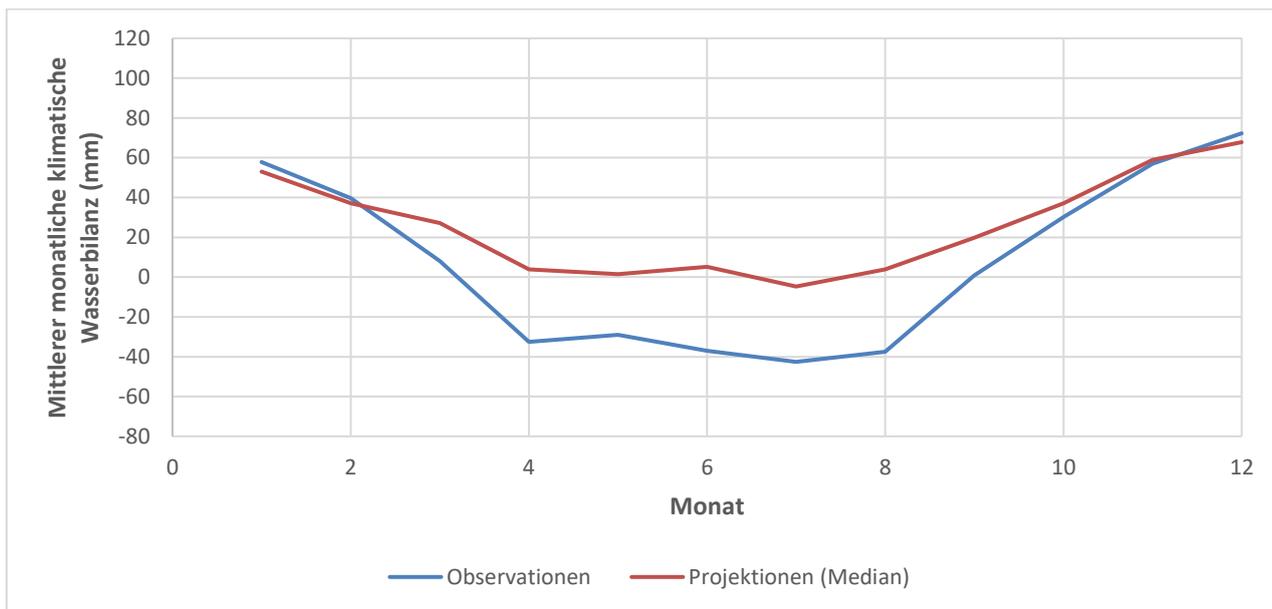
Im Vergleich der mittleren monatlichen klimatischen Wasserbilanz (siehe Abbildung 39) fallen deutliche Unterschiede zwischen den Monaten und den Datensätzen auf: In den Wintermonaten ist die Bilanz stets positiv, nimmt zum Sommer aber deutlich ab und erreicht zum Teil negative Werte. So sind vor allem die Observationsdaten von deutlichen Wasserdefiziten in den Sommermonaten gekennzeichnet. Monatliche Werte von -40 mm werden erreicht. Das RCP 8.5-Szenario zeigt für Bayern hingegen nur minimal negative Werte von -5 mm im Sommer auf. Die Überschüsse im Winter liegen bei bis zu 60 mm je Monat und somit in einer ähnlichen Höhe wie die gemessenen Werte des Deutschen Wetterdienstes.

Abbildung 38: Beobachtete und projizierte Entwicklung der jährlichen klimatischen Wasserbilanz (1991–2020)



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Klimaobservations- und Klimaprojektionsdaten (DWD, 2021a–2021d).

Abbildung 39: Beobachtete und projizierte mittlere klimatische Wasserbilanz im jahreszeitlichen Verlauf (1991–2020)



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Klimaobservations- und Klimaprojektionsdaten (DWD, 2021a–2021d).

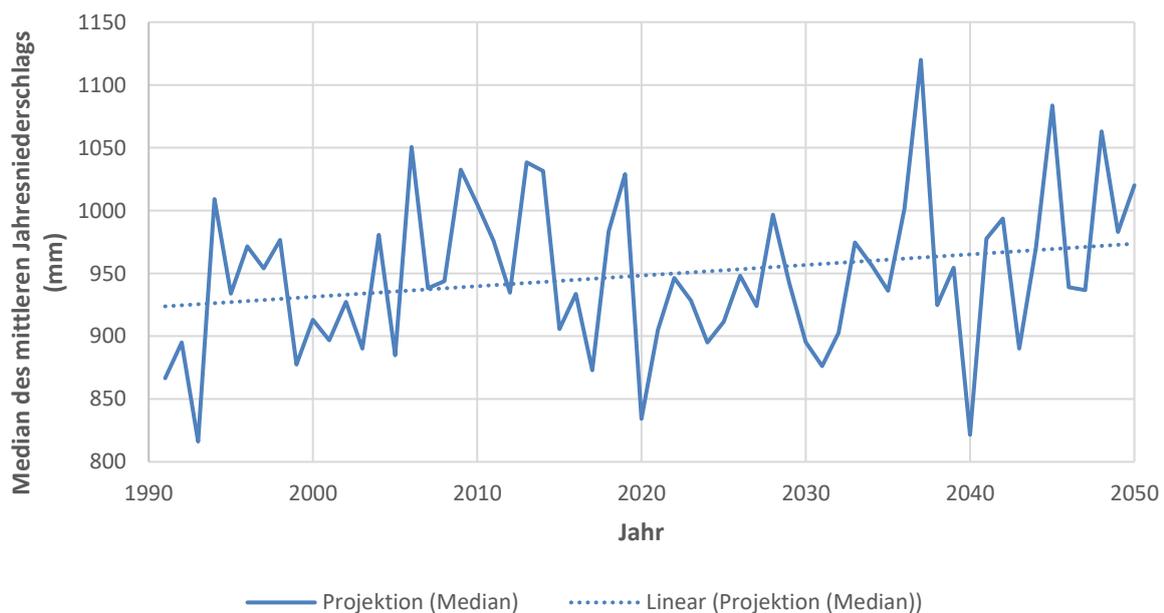
3.5.3 Veränderung des Klimas im Monats- und Jahresverlauf 1991–2050

Der Blick auf die vergangenen 30 Jahre wird um die Prognose der folgenden 30 Jahre bis 2050 ergänzt. Die Betrachtung und der Vergleich der beiden Perioden 1991–2020 und 2021–2050 der Klimaprojektionen war wesentlicher Gegenstand des Projekts. In den Zeitintervallen können die Parameter Niederschlag (siehe Abbildung 40 und Abbildung 41), Grasreferenzverdunstung (siehe Abbildung 42 und Abbildung 43) und die klimatische Wasserbilanz (siehe Abbildung 44 und Abbildung 48) dargestellt werden.

Die mittleren jährlichen Niederschläge, ausgedrückt als Medianwert der Einzelprojektionen, nehmen innerhalb dieser 60 Jahre leicht zu. Ebenso ist der Datensatz in diesem Zeitraum von großen Schwankungen geprägt. Die Bandbreite erstreckt sich zwischen ca. 800 und 1.125 mm Jahresmittelniederschlag.

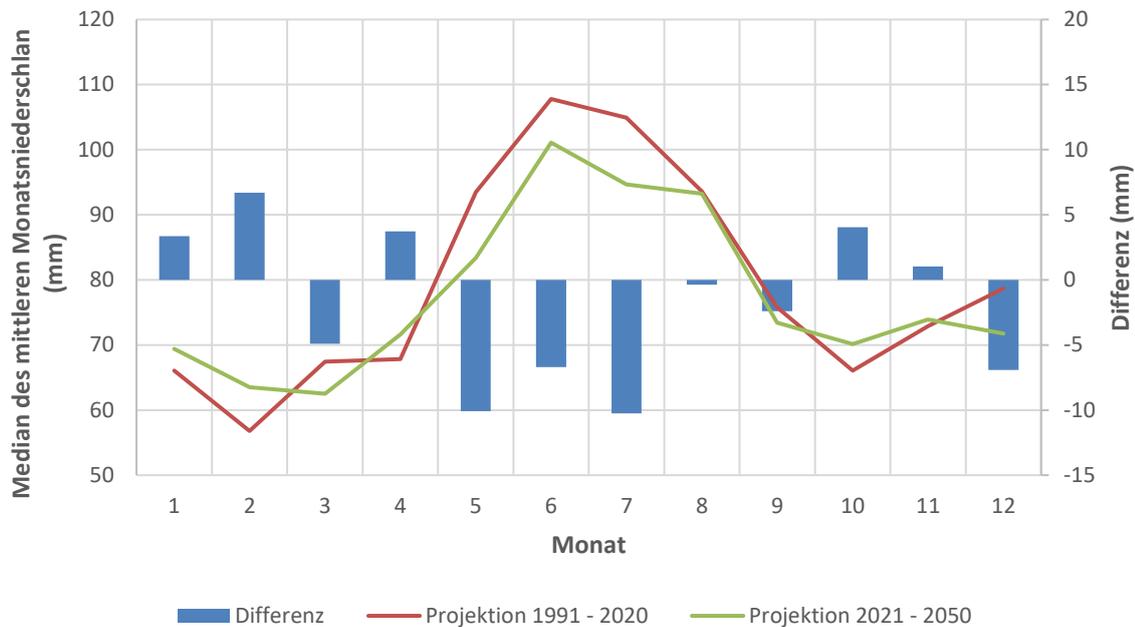
Der Blick auf die innerjährliche Verteilung des mittleren Monatsniederschlags aller Projektionen (Median) und deren Unterschiede in den zwei Beobachtungszeiträumen zeigt eine deutliche Verschiebung in der Zukunft. In der Periode 2021–2050 nehmen die Niederschläge in den Sommermonaten weiter ab und es kommt zu einer Verschiebung hin in die Wintermonate (Abbildung 41). Besonders die Monate Mai bis Juli sind von deutlich geringeren Niederschlägen als in der Periode 1991–2020 geprägt. Im langjährigen Mittel ist dieser in den drei genannten Monaten um 28 mm reduziert.

Abbildung 40: Modellierte langjährige Entwicklung der mittleren Jahresniederschläge (1991–2050)



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Klimaprojektionsdaten (DWD, 2021a und 2021b).

Abbildung 41: Median des mittleren Monatsniederschlags aller Projektionen im jahreszeitlichen Verlauf der Zeiträume 1991–2020 und 2021–2050 und deren Abweichungen zueinander

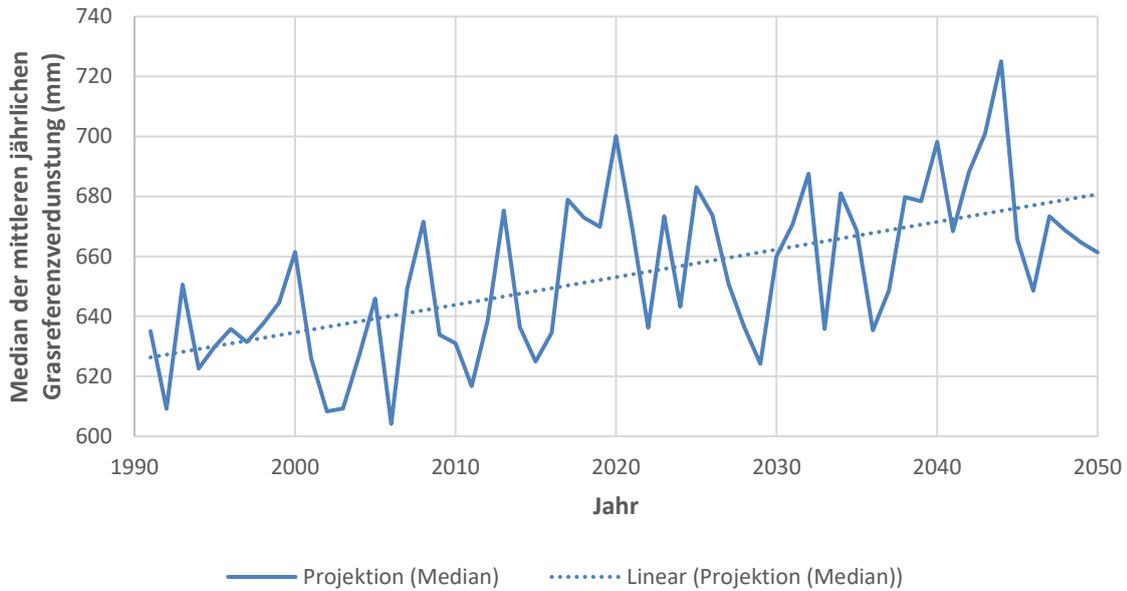


Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Klimaobservations- und Klimaprojektionsdaten (DWD, 2021a und 2021b).

Analog dazu lässt sich ein Trend im Median der mittleren jährlichen Grasreferenzverdunstung aller Ensembleprojektionen erkennen. Diese nimmt bis in das Jahr 2050 ebenfalls deutlich von ca. 620 auf 680 mm zu. Jährliche Schwankungen sind ebenfalls zu beobachten, wenn auch deutlich geringer ausgeprägt als es bei den Jahresmittelniederschlägen der Fall ist.

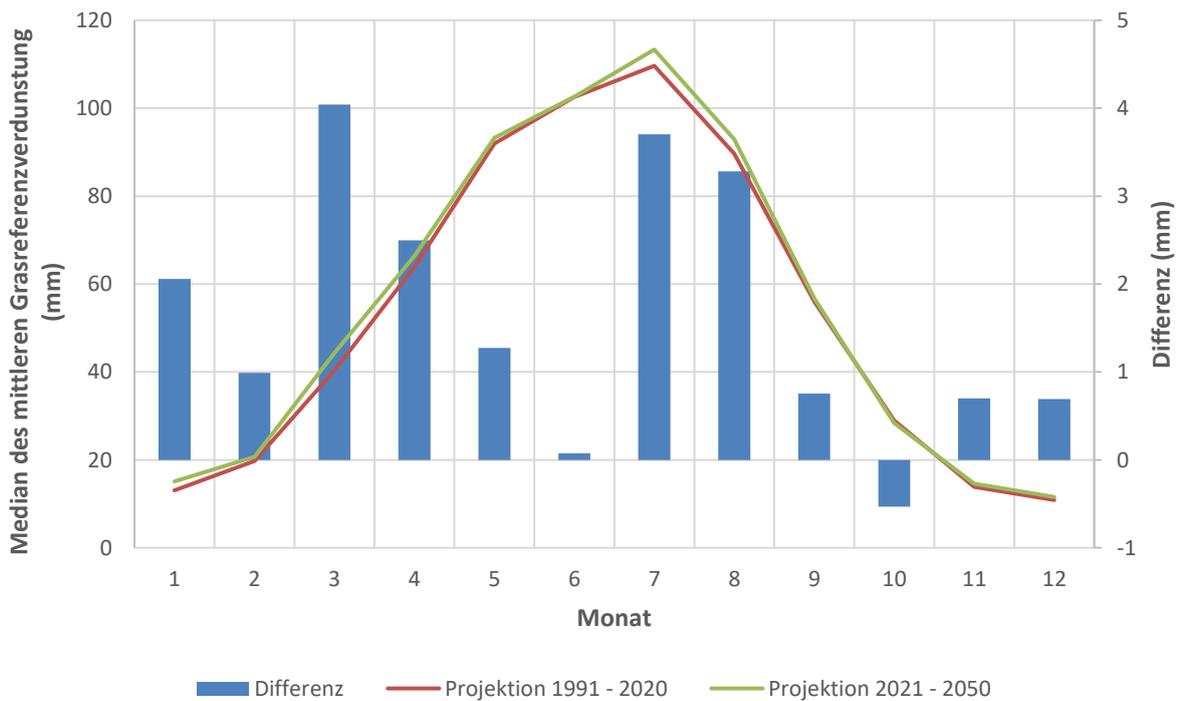
Der Vergleich der beiden durch die Klimaprojektionen beschriebenen Zeiträume weist nahezu jeden Monat eine steigende Grasreferenzverdunstung auf. Bis auf den Monat Oktober steigen diese moderat um bis zu 4 mm an. Ein deutlicher innerjähriger Trend mit jahreszeitlichen Unterschieden lässt sich nicht sicher ausmachen. In allen Jahreszeiten ist eine Erhöhung der Verdunstung zu beobachten (Abbildung 43).

Abbildung 42: Modellierte langjährige Entwicklung der mittleren jährlichen Verdunstung (1991–2050)



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Klimaprojektionsdaten (DWD, 2021c und 2021d).

Abbildung 43: Beobachtete und projizierte mittlere Änderungen der Verdunstung im jahreszeitlichen Verlauf (2021–2050)

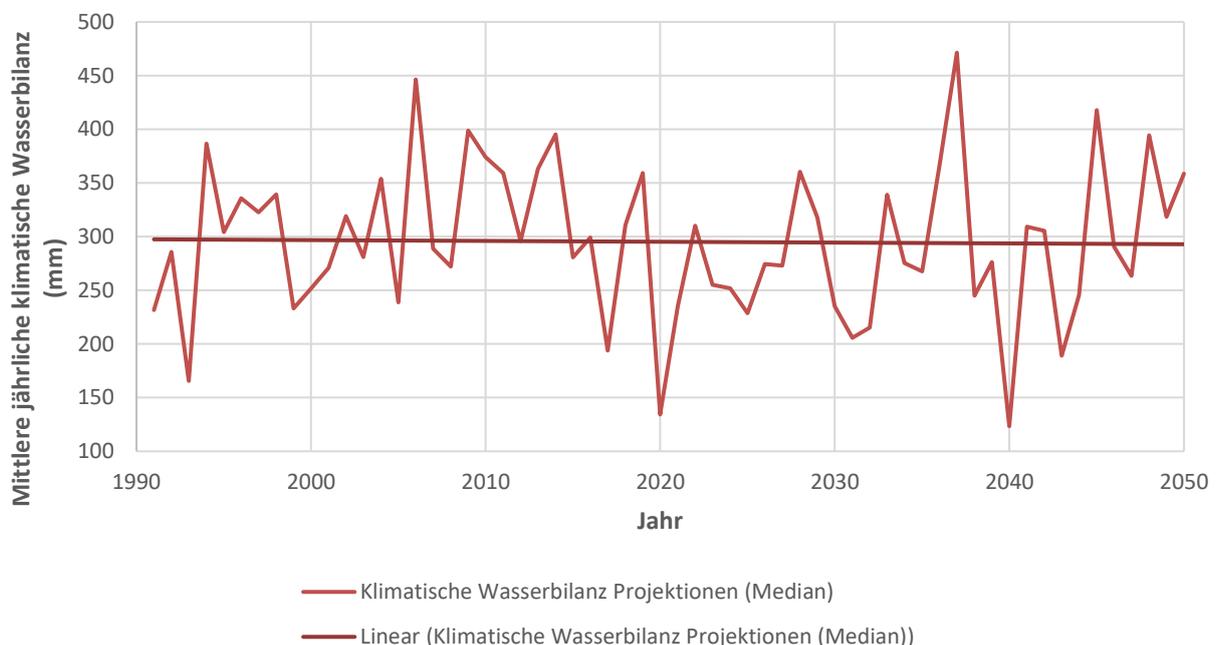


Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Klimaobservations- und Klimaprojektionsdaten (DWD, 2021a und 2021b).

Als Bilanz beider Teildatensätze geht die klimatische Wasserbilanz (siehe Abbildung 44) in die Modellberechnungen ein. Im langjährigen Mittel bewegt sich diese auf einem Niveau um 300 mm Wasserüberschuss je Jahr, wobei der Trend klar abnehmend ist. Der Wasserüberschuss nimmt im Vergleich zu 2050 im Trend um ca. 40 mm ab. Schwankungen zwischen den Jahren sind ebenfalls stark ausgeprägt, sodass die Bilanzen zwischen 120 und 460 mm je Jahr variieren können. Zukünftig wird die Wasserverfügbarkeit auf Basis der klimatischen Wasserbilanz der RCP 8.5-Ensembleprojektionen geringer werden.

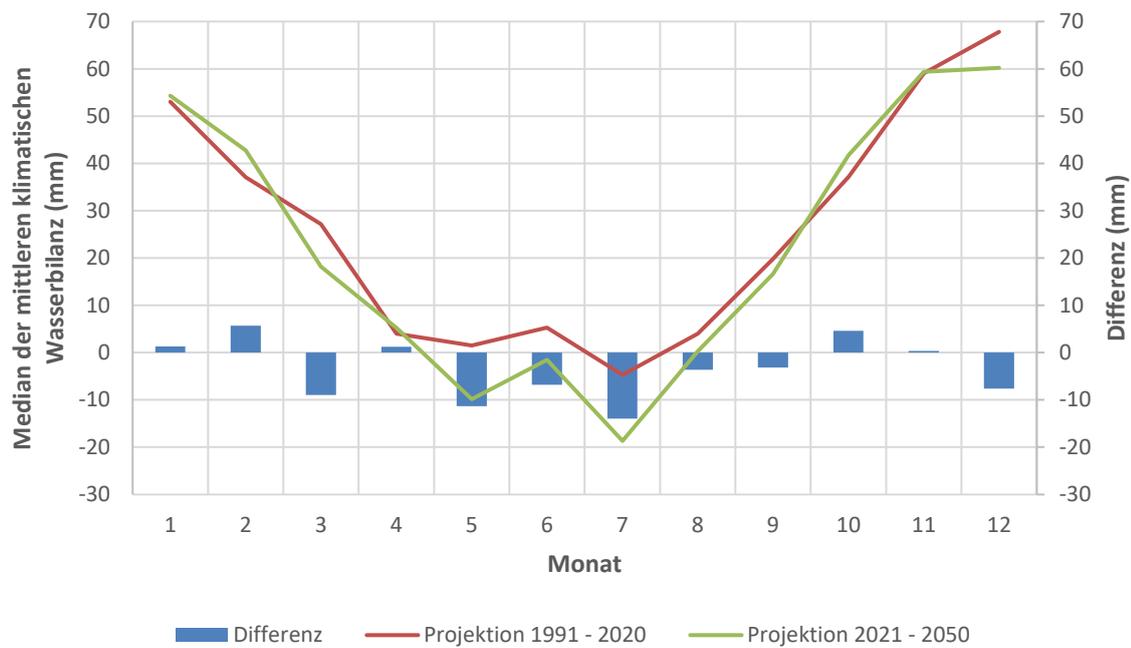
Die innerjährliche Verfügbarkeit des Wassers wird sich ebenso verschieben. In den Monaten Mai bis September ist eine Abnahme im Vergleich der Zeiträume 1991–2020 und 2021–2050 zu beobachten (Abbildung 45). In fünf Monaten nimmt diese in einem geringen Umfang zu, wobei die Zeiträume stets außerhalb des Sommers liegen. Eine Verknappung des Wassers im Sommer und eine leichte Zunahme in den verbleibenden Monaten wird durch die Ensembleprojektion in der Periode 2021–2050 beschrieben.

Abbildung 44: Modellierte langjährige Entwicklung der mittleren jährlichen klimatischen Wasserbilanz (1991–2050)



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Klimaprojektionsdaten (DWD, 2021a–2021d).

Abbildung 45: Beobachtete und projizierte mittlere Änderungen der klimatischen Wasserbilanz im jahreszeitlichen Verlauf (2021–2050)



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Klimaprojektionsdaten (DWD, 2021a und 2021b).

3.6 Aktueller Stand der Bewässerung in Bayern

In Deutschland gibt es nur wenige flächendeckende statistische Erhebungen, die Rückschlüsse über die Bewässerung auf Landesebene zulassen. Neben der Agrarstrukturerhebung ist die Landwirtschaftszählung zu nennen. Beide Ansätze erfassen die Flächenmerkmale „Möglichkeit zur Bewässerung“ und „Tatsächliche Bewässerung“, die Merkmale werden in Hektar (ha) erfasst. In Tabelle 5 sind die Flächenanteile dieser Merkmale je Bundesland für die vier Erfassungsperioden seit 2009 dargestellt.

Die Bewässerung in Deutschland gewinnt zunehmend an Bedeutung, wengleich mit 451.000 ha im Jahr 2015 nur rund 2,7 % der landwirtschaftlichen Fläche Deutschlands tatsächlich bewässert wurden (DESTATIS, 2017). Dennoch zeigt sich ein Anstieg der bewässerten Flächen in fast allen Bundesländern.

Tabelle 5: Auszug aus der Statistik: Mögliche und tatsächliche Bewässerung im Vergleich der Bundesländer

Bundesland	(1) 2009		(2) 2012		(3) 2015		(4) 2019	
	MB	TB	MB	TB	MB	TB	MB	TB
	<i>[Fläche in 1000 ha]</i>							
Baden-Württemberg	26,7	14,2	31,3	15,2	33,4	21,4	32,9	19,2
Bayern	38,2	14,4	55,6	16,8	52,8	28,1	55,7	26,7
Berlin	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
Brandenburg	39,0	21,1	38,1	20,9	39,3	24,4	49,6	32,0
Bremen	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Hamburg	1,5	0,8	1,5	0,7	1,6	0,8	2,1	1,3
Hessen	32,2	15,6	33,4	14,3	30,9	22,4	32,2	16,4
Mecklenburg-Vorpommern	30,4	14,6	32,4	19,0	34,4	21,8	40,6	21,7
Niedersachsen	313,7	219,1	330,5	206,9	322,2	242,2	358,8	278,2
Nordrhein-Westfalen	61,4	28,3	67,5	26,6	59,5	33,0	84,6	52,6
Rheinland-Pfalz	32,0	19,9	31,1	17,4	32,7	22,9	33,4	21,2
Saarland	0,2	0,1	0,3	0,1	0,2	0,1	0,3	0,2
Sachsen	11,8	3,3	12,0	4,7	12,7	5,5	11,0	5,3
Sachsen-Anhalt	24,4	12,4	28,2	15,2	31,4	19,4	35,8	20,9
Schleswig-Holstein	21,9	7,0	23,2	5,3	20,0	7,2	24,6	7,7
Thüringen	5,5	2,1	6,1	2,4	5,3	2,5	6,7	2,9
Deutschland	639,0	372,7	691,3	365,6	676,4	451,8	768,3	506,5

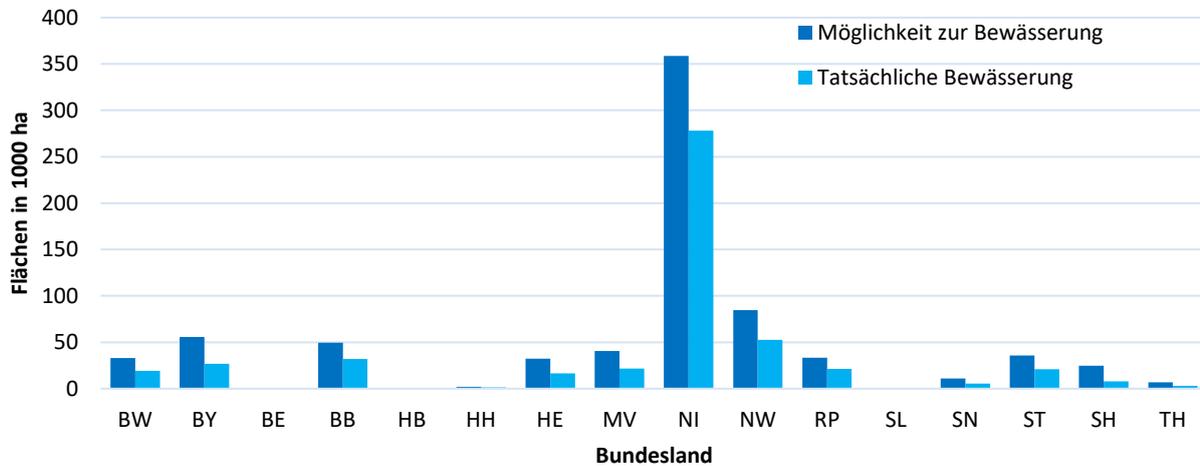
Anm.: MB = Möglichkeit zur Bewässerung, TB = Tatsächliche Bewässerung. Die Zahlen beinhalten die Flächenanteile der Bewässerung im Freiland, ohne Frostschutzberegnung, ohne Kulturen in Gewächshäusern und ohne Haus- oder Nutzgärten.

Quelle: Spalte (1) Daten aus DESTATIS (2011) und Bayerisches Landesamt für Statistik (2021); Spalte (2) Daten aus DESTATIS (2014); Spalte (3) Daten aus DESTATIS (2017); Spalte (4) Daten aus DESTATIS (2021 und Bayerisches Landesamt für Statistik (2021).

Im Ländervergleich (siehe Tabelle 5) steht Bayern 2019 mit rund 26.700 ha tatsächlich bewässertes Fläche nach Niedersachsen (~278.200 ha), Nordrhein-Westfalen (~52.600 ha) und Brandenburg

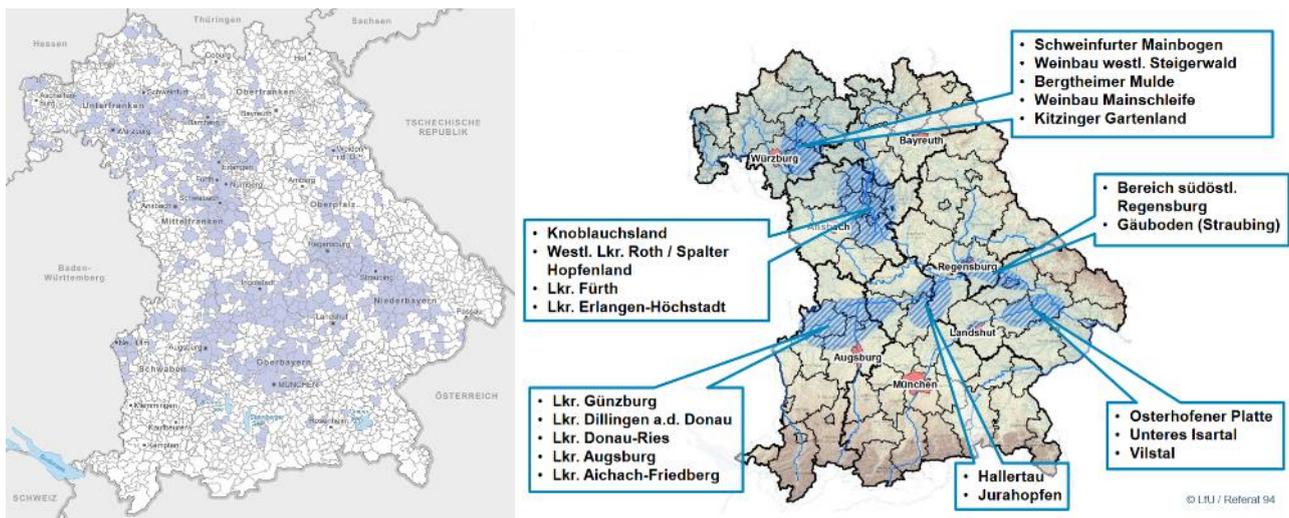
(~32.000 ha) auf Platz 4 der bewässerungsintensivsten Bundesländer (siehe Abbildung 46). Nach der neuesten Landwirtschaftszählung von 2020 bestand im Jahr 2019 in Bayern auf etwa 55.700 ha die Möglichkeit zur Bewässerung von Freilandkulturen, im Vergleich zu 2009 (38.200 ha) ist das ein Anstieg von rund 46 %. Die Fläche mit tatsächlicher Bewässerung stieg um 85 % von rund 14.400 ha im Jahr 2009 auf 26.700 ha im Jahr 2019.

Abbildung 46: Bewässerte Fläche in Deutschland im Jahr 2019 nach Bundesländern



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage der Landwirtschaftszählung 2020 (DESTATIS, 2021).

Neben den statistischen Erfassungen aus der Landwirtschaftszählung und den Agrarstrukturerhebungen liefert das Bayerische Landesamt für Umwelt Tendenzen über die regionale Intensität der Bewässerung in Bayern. Abbildung 47 zeigt die regionalen Unterschiede sowie grundsätzliche Tendenzen der räumlichen Verteilung der Bewässerung in Bayern. Die Bereiche mit einem hohen Anteil bewässerter Fläche verteilen sich L-förmig. Dazu zählen im nordwestlichen Teil Bayerns Landkreise und Gemeinden entlang der Main-Ebenen sowie in den Regionen Würzburg und Schweinfurt. Typische Bewässerungsschwerpunkte sind dort der Schweinfurter Mainbogen, der Weinbau in der Mainschleife oder das Kitzinger Gartenland. Im Bereich südlich von Bamberg, zwischen Erlangen und Nürnberg bis hin zur Fränkischen Alb, erstreckt sich eine weitere typische Bewässerungsregion in Bayern. Zu nennen sind dort das Knoblauchland, das Hopfenland sowie die Landkreise Roth, Fürth und Erlangen-Höchstadt. Darüber hinaus zieht sich ein breiter Streifen von Landkreisen und Gemeinden mit erhöhtem Bewässerungsaufkommen vom westlich gelegenen Ulm über die intensiven landwirtschaftlichen Bereiche der Donau-Ebene bis nach Regensburg und von dort südöstlich weiter entlang der Donau bis Passau an die österreichische Grenze. Innerhalb dieses Streifens fallen besonders fünf Schwerpunktbereiche heraus. Im Westen sind das die Landkreise Günzburg, Dillingen an der Donau, Donau-Ries, Augsburg und Aichach-Friedberg. Im Zentrum Bayerns zieht sich eine kleine Region von Ingolstadt Richtung Süden – das Hallertauer Hopfenland. Zusammen bilden die Bereiche südöstlich von Regensburg, der Landkreis Regensburg selbst und die Region Gäuboden bei Straubing einen weiteren Bereich mit intensiver Bewässerung. Der letzte Bereich zieht sich entlang der Isar vom Landkreis Landshut Richtung Osten bis Deggendorf. Typische Regionen sind dort das untere Isartal, das Vilstal und die Osterhofener Platte.

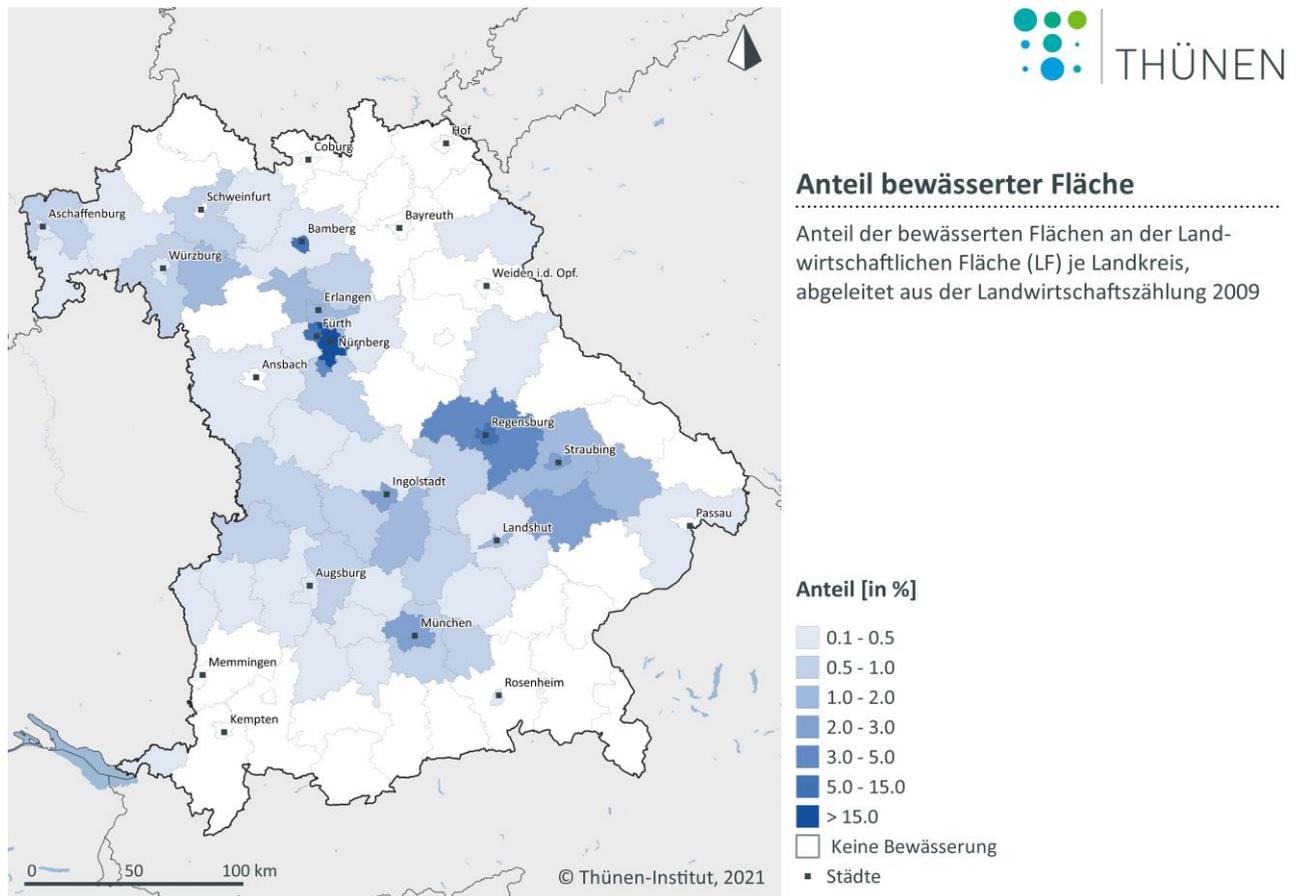
Abbildung 47: Gebiete mit erhöhtem Bewässerungsaufkommen in Bayern

Quelle: Links: (LfU, 2021b), rechts: (Bayerischer Landtag, 2020).

Neben Merkmalen wie die Flächen mit Möglichkeit zur Bewässerung bzw. die Flächen mit tatsächlicher Bewässerung lassen sich aus der Regionalstatistik der Landwirtschaftszählung 2009 Informationen über die eingesetzte Wassermenge für die landwirtschaftliche Bewässerung ableiten. Im Rahmen der Landwirtschaftszählung von 2009 wurden in Bayern 38.200 ha ermittelt, auf denen eine Bewässerung möglich gewesen wäre. Von diesen Flächen wurden 14.400 ha tatsächlich bewässert. Die verbrauchte Wassermenge für das Jahr 2009 beträgt rund 8,8 Millionen Kubikmeter (m³) (DESTATIS, 2011). Die Bewässerungshöhe pro Quadratmeter betrug demnach durchschnittlich 61 l/m² bzw. 61 mm.

Aus den statistischen Erfassungen der Landwirtschaftszählung 2009 lassen sich zudem räumliche Analysen der Verteilung der bewässerten Flächen auf Landkreisebene durchführen (siehe Abbildung 48). Dargestellt ist der Anteil der bewässerten Fläche an der landwirtschaftlichen Fläche je Gemeinde. Die räumlichen Muster sind mit denen aus Abbildung 47 vergleichbar.

Abbildung 48: Anteil der bewässerten Fläche an der gesamten landwirtschaftlichen Fläche auf Kreisebene



Anm.: Differenziert nach Landkreisen.

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage der Landwirtschaftszählung 2009 (DESTATIS, 2011; GeoBasis-DE/BKG, 2020).

4 Ergebnis – Entwicklung der regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von 1991–2050

Die Bewässerungsbedürftigkeit bzw. der Bewässerungsbedarf gibt den mittleren Zusatzwasserbedarf (in mm) pro Raum- und Zeiteinheit an, der notwendig ist, um einen landwirtschaftlichen Standort mit optimaler Bodenfeuchte auszustatten (vgl. Kapitel 2.6). Der Parameter beruht auf den klimatischen Eingangsgrößen Niederschlag und Verdunstung sowie pflanzenspezifischen Kennwerten (vgl. Kapitel 2). Eine Bewässerungsbedürftigkeit ist dann gegeben, wenn ein potenzieller Wassermangel zu Ertrags- und Qualitätsverlust bei Agrarprodukten führt. Unter Hinzunahme der Landnutzung von 2016 wird die regionale Bewässerungsbedürftigkeit unter realen Anbauverhältnissen kalkuliert. Schwerpunktregionen mit einer erhöhten landwirtschaftlichen Bewässerungsbedürftigkeit lassen sich so darstellen.

Im Folgenden wird die Bewässerungsbedürftigkeit für Bayern im Vergleich der Referenzperioden von 1991–2020 und 2021–2050 dargestellt. Dabei werden zunächst allgemeine, bayernweite Trends, beruhend auf der tatsächlichen landwirtschaftlichen Landnutzung (InVeKoS 2016), aufgezeigt (vgl. Kapitel 4.1) und im Anschluss in den Kapiteln 4.3 bis 4.5 auf die Entwicklung der Bewässerungsbedürftigkeit der drei Kulturgruppen Ackerbau, Gemüsebau und Sonderkulturen sowie für ausgewählte Kulturen eingegangen. In Kapitel 4.5.2.3 wird die Bewässerungsbedürftigkeit zusätzlich für sechs bestehende Schwerpunktgebiete der Bewässerung in Bayern beispielhaft dargestellt.

Um die Bewässerungsbedürftigkeit interpretieren zu können werden Kennwerte klassifiziert, welche die Höhe des Zusatzwasserbedarfs definieren (siehe Tabelle 6). Im Vergleich zur ursprünglichen Kennwertklassifizierung nach (Renger und Strebel, 1982) wurde die zusätzliche Klasse „besonders hoch“ hinzugefügt. Dies ist notwendig, um die durch den Klimawandel induzierte sehr hohe Bewässerungsbedürftigkeit, insbesondere in der zukünftigen Periode 2021–2050, visuell darzustellen. Aufgrund der starken Wertunterschiede zwischen den landwirtschaftlichen Gruppen werden für einzelne Kulturen, insbesondere im Gemüse- und Sonderkulturanbau, die Wertespanspannen verändert bzw. nach oben korrigiert, um die besonders hohe Bewässerungsbedürftigkeit darstellen zu können. Zusätzlich variiert die Farbgebung der Karten, sodass zwischen den Karten nur bedingt rein visuelle Vergleiche gezogen werden können.

Tabelle 6: Kennwertklassifizierung der Bewässerungsbedürftigkeit

Ø Bewässerungsmenge pro Jahr	Bewässerungsbedürftigkeit
<= 25 mm	keine
> 25–50 mm	sehr gering
> 50–75 mm	gering
> 75–100 mm	mittel
> 100–125 mm	hoch
> 125–150 mm	sehr hoch
> 150 mm	besonders hoch
no Data	keine Daten

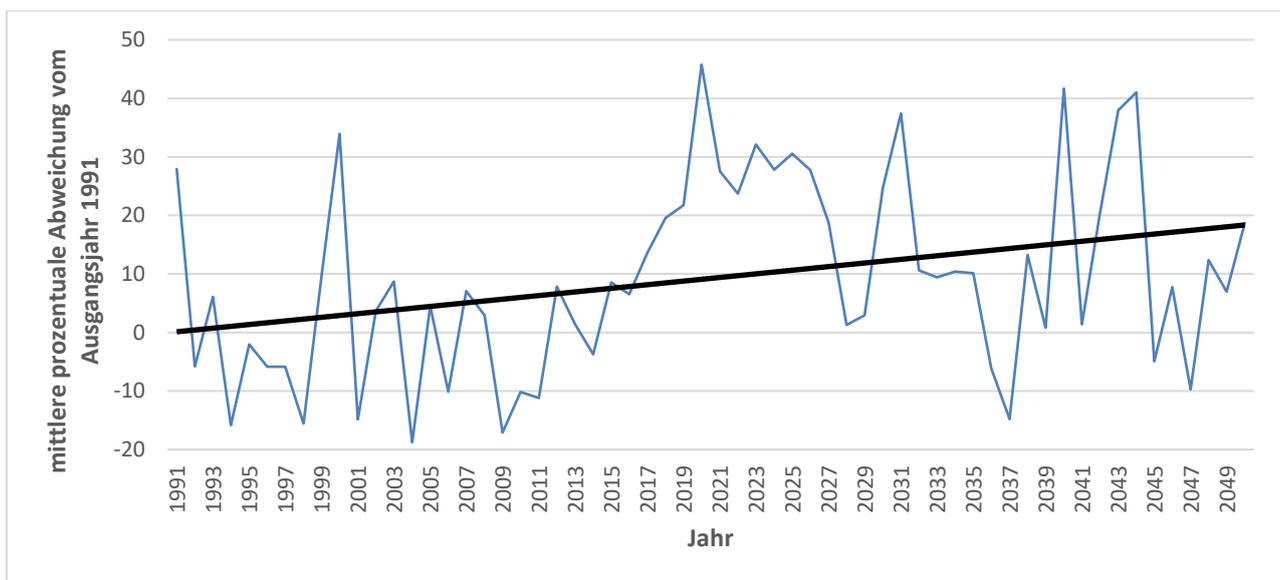
Quelle: Verändert nach Renger und Strebel (1982).

4.1 Regionale Bewässerungsbedürftigkeit Bayern (gesamt)

Die bayernweite Betrachtung der Bewässerungsbedürftigkeit lässt sich als jährlicher Mittelwert aller berücksichtigten Gemeinden auf Basis der InVeKoS-Daten 2016 darstellen (siehe Abbildung 49). Der langfristige Trend basiert auf den Rechenergebnissen der Vergangenheitsprojektionen und den zukünftig erwartbaren Klimaprojektionen. In Einzeljahren können somit deutliche Abweichungen vom Trend auftreten, die sowohl eine Über- als auch Unterschreitung des Trends darstellen können. In ausgewählten Jahren, beispielsweise im Jahr 2040, wird die Bewässerungsbedürftigkeit der Modellberechnung zur Folge um über 40 % höher ausfallen, als es der Trend prognostiziert. Im Gegensatz dazu führen feuchte Jahre (z. B. 2037) zu einer signifikant geringeren Bewässerungsbedürftigkeit in der Landwirtschaft Bayerns. Bei der Interpretation der absoluten Zahlen ist jedoch darauf zu achten, dass lediglich der langjährige Trend und die Veränderungen zwischen der Ex-Post-Periode und der Zukunftsperiode methodisch zulässig ist. Aufgrund der Unsicherheiten regionalisierter Klimaprojektionen sind Einzelaussagen zu jährlichen absoluten Bewässerungsbedarfen zu vermeiden.

Unabhängig von den beschriebenen Schwankungen zeigt der Trend ein deutliches Bild. Analog zu den Änderungen der Klimaprojektionsdaten und der darauf abgeleiteten jährlichen klimatischen Wasserbilanz sind deutliche Änderungen in der Bewässerungsbedürftigkeit im Anbau aller Kulturen zu erwarten. Im Mittel steigt diese bis in das Jahr 2050 um 19 % im Vergleich zur Ausgangsbasis von 1991.

Abbildung 49: Entwicklung der mittleren jährlichen Bewässerungsbedürftigkeit im bayernweiten Durchschnitt von 1991–2050

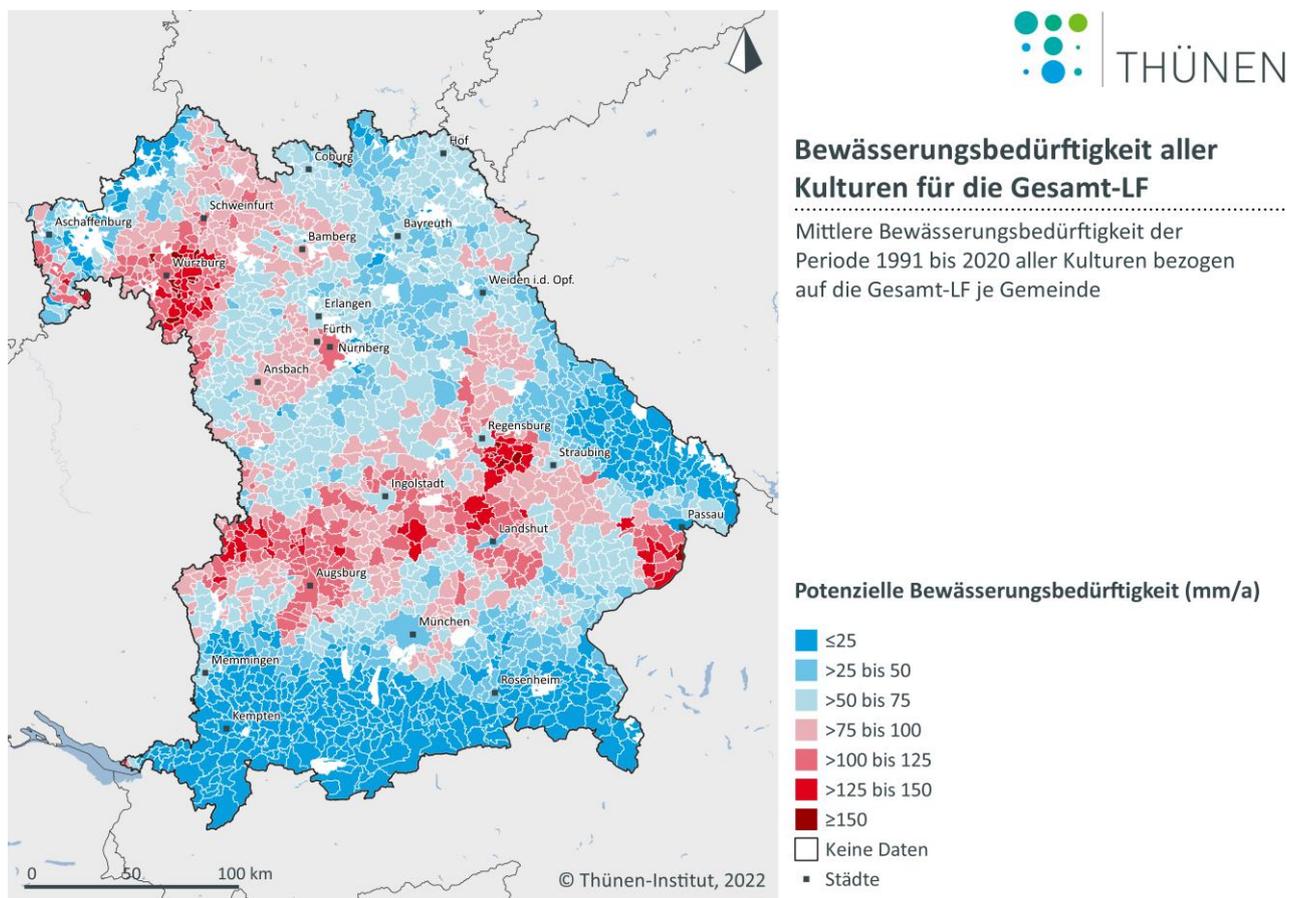


Quelle: Eigene Berechnungen.

Die räumliche Betrachtung auf Gemeindeebene erlaubt ein differenzierteres Bild hinsichtlich regionaler Schwerpunktregionen und Bewässerungsschwerpunkten. Durch die Verknüpfung der mittleren Bewässerungsbedürftigkeit aller Kulturen je Zeitraum mit den Landnutzungsdaten aus 2016 ergibt sich der Bewässerungsbedarf bezogen auf die landwirtschaftliche Anbaufläche (siehe Abbildung 50 und Abbildung 51). Dabei ist ganz Bayern von einer Bewässerungsbedürftigkeit im

Anbau geprägt, der jedoch unterschiedlich hoch ausfällt. Während die Ergebnisse der Modellrechnung in weiten Regionen einen geringen Zusatzwasserbedarf von unter 50 mm und Jahr aufzeigen, zeichnen sich deutlich regionale Bewässerungsregionen ab. Gerade die Gemeinden um Nürnberg und Fürth, die von Weinbau geprägten Gemeinden nahe Würzburg und einzelne Bereiche in der Mitte des Bundeslands müssen mit einem überdurchschnittlichen Anstieg des Bewässerungsbedarfs im Mittel aller Kulturen von 100 bis 150 mm pro Jahr rechnen. Auch die vom Obstanbau gekennzeichnete Region nahe des Bodensees weist ein ähnliches Bild auf. Im Gegensatz dazu ist der Alpenraum aufgrund der hohen mittleren Jahresniederschläge deutlich unterdurchschnittlich. Auch in Ostbayern, nördlich von Passau, kann landwirtschaftlicher Anbau unter geringen mittleren Zusatzwassergaben aller Kulturen erfolgen. Insgesamt werden die räumlichen Bewässerungsmuster, insbesondere im Vergleich mit den tatsächlichen Bewässerungsregionen in Bayern (vgl. Kapitel 3.6), valide abgebildet.

Abbildung 50: Mittlere Bewässerungsbedürftigkeit bezogen auf die Gesamt-LF je Gemeinde auf Grundlage von Klimaprojektionsdaten (1991–2020)

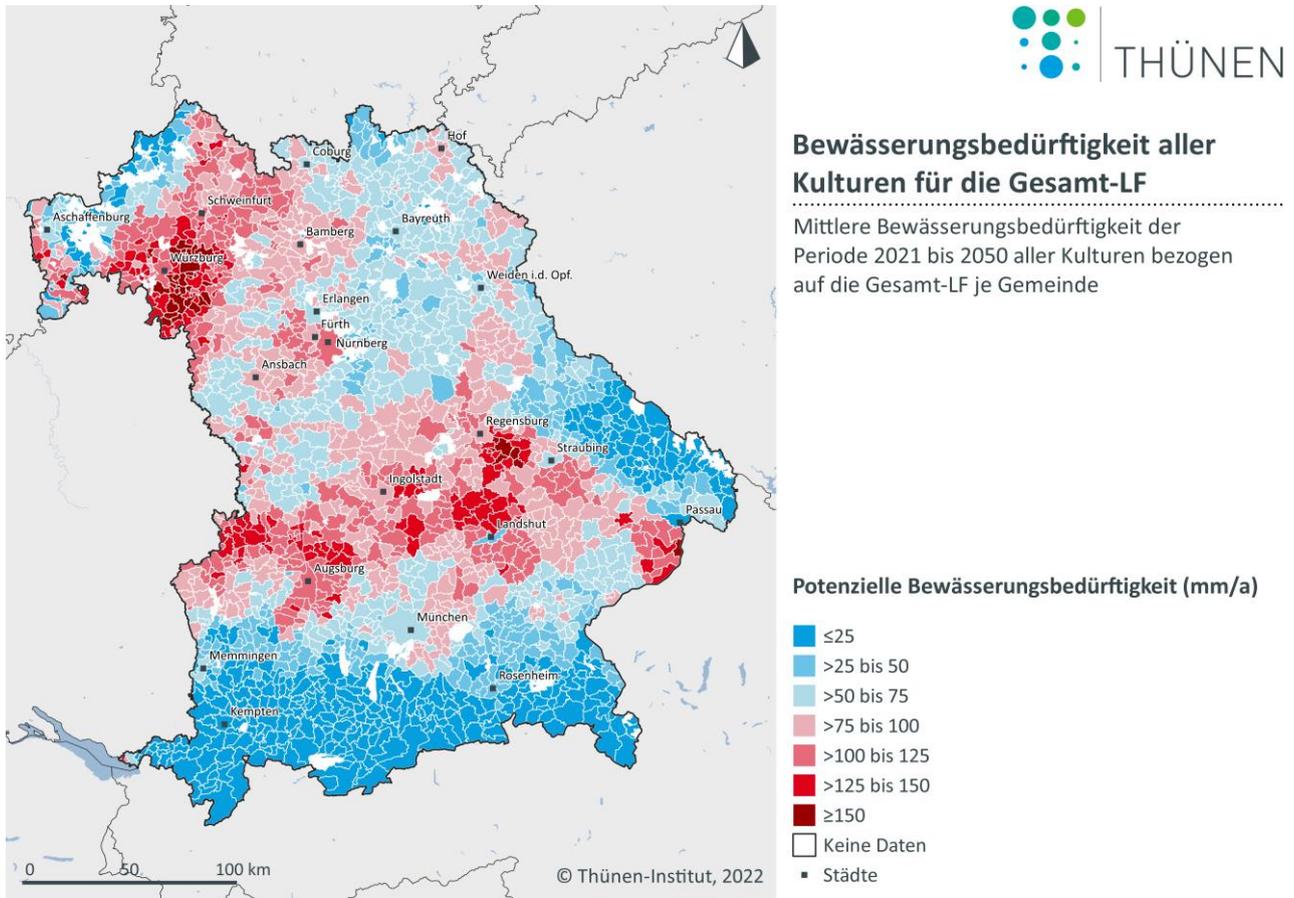


Quelle: Eigene Berechnungen.

Im Vergleich der Ex-Post-Periode zum Zeitraum 2021–2050 (siehe Abbildung 51) verändern sich die räumlichen Muster der Bewässerungsbedürftigkeit nur wenig, wenn auch deren Ausprägung stärker ausfällt. Eine durchschnittlich höhere Bewässerungsbedürftigkeit ist zu beobachten, der beispielsweise in den Schwerpunktregionen um die Städte Würzburg, Nürnberg, Augsburg und

anderen Bereichen des Bundeslands besonders hervorsteht. Der Alpenraum und der Osten Bayerns sind auch zukünftig von einer geringen Bewässerungsbedürftigkeit gekennzeichnet.

Abbildung 51: Mittlere Bewässerungsbedürftigkeit bezogen auf die Gesamt-LF je Gemeinde auf Grundlage von Klimaprojektionsdaten (2021–2050)

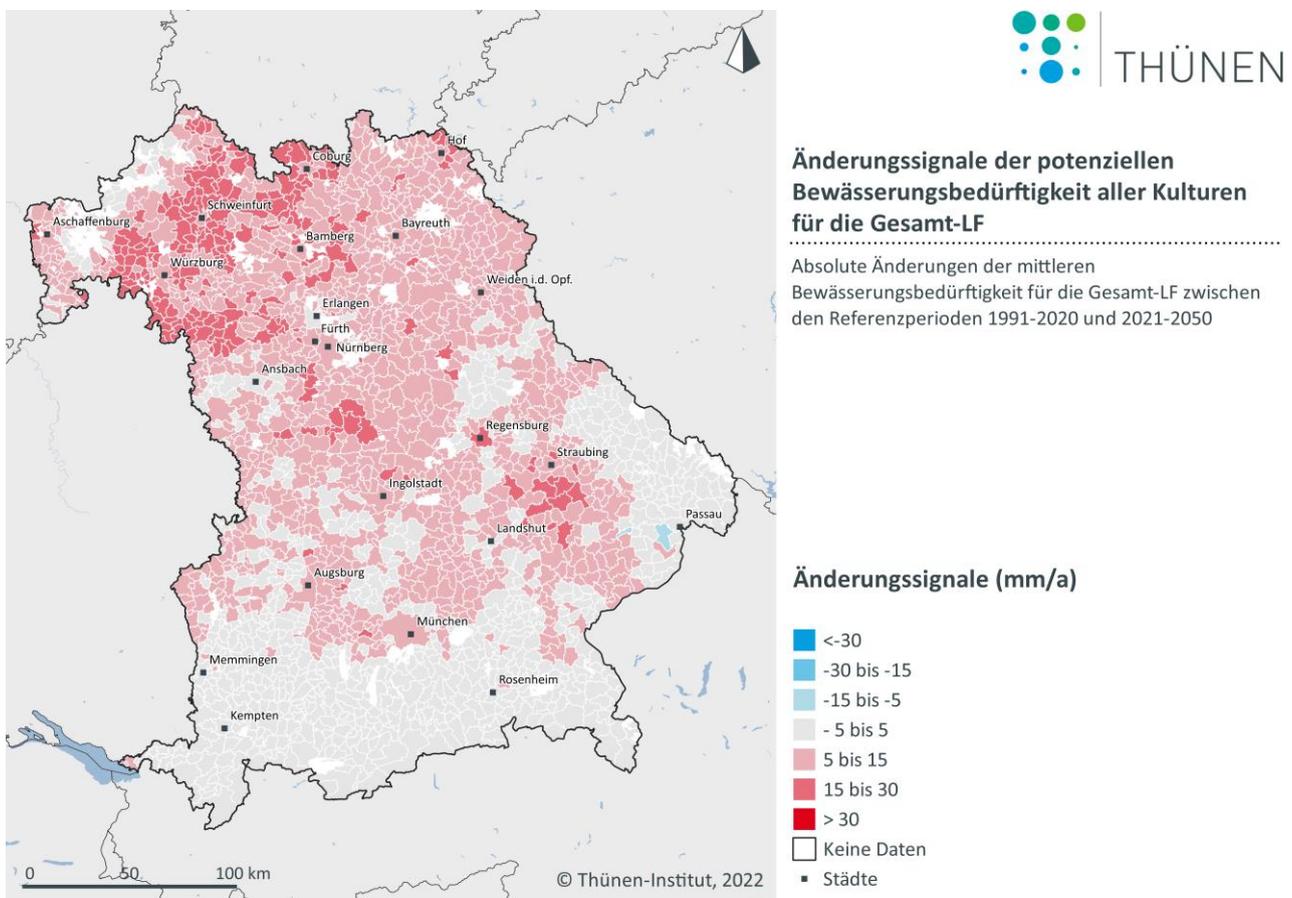


Quelle: Eigene Berechnungen.

4.2 Räumliche Änderungssignale im Vergleich von Ex-Post-Periode und Zukunftsperiode der Klimaprojektionen

Der Vergleich der Simulationsergebnisse der Bewässerungsbedürftigkeit der Perioden 1991–2020 und 2021–2050 zeigt Änderungen der mittleren Bewässerungshöhe auf (siehe Abbildung 52). Dargestellt ist die mittlere Höhe der Zusatzwassergaben aller Kulturen in allen Gemeinden unter Berücksichtigung der landwirtschaftlichen Fläche jeder Gemeinde. Als Differenz der Ergebnisse aus Abbildung 50 und Abbildung 51 sind die Änderungssignale kalkuliert worden. In großen Teilen Bayerns sind nur geringe bis keine Änderungen (-5 bis +5 mm/a) ermittelt worden. Die restlichen Gemeinden besitzen ein Defizit von bis zu 15 mm im Jahresmittel, einige Gemeinden auch bis zu 30 mm/a. Die Steigerungen sind nicht nur in den beschriebenen Schwerpunktregionen anzutreffen, sondern lassen sich in weiten Teilen Nordbayerns auffinden. Auch in Zentralbayern sind zukünftig deutliche Steigerungen des mittleren Wasserbedarfs zu erwarten. Differenziertere Aussagen über räumliche Muster und Tendenzen einzelner Kulturen lassen sich anhand der Abbildungen in den folgenden Kapiteln treffen.

Abbildung 52: Änderungen der mittlere Bewässerungsbedürftigkeit je Gemeinde von 1991–2020 zu 2021–2050



Quelle: Eigene Berechnungen.

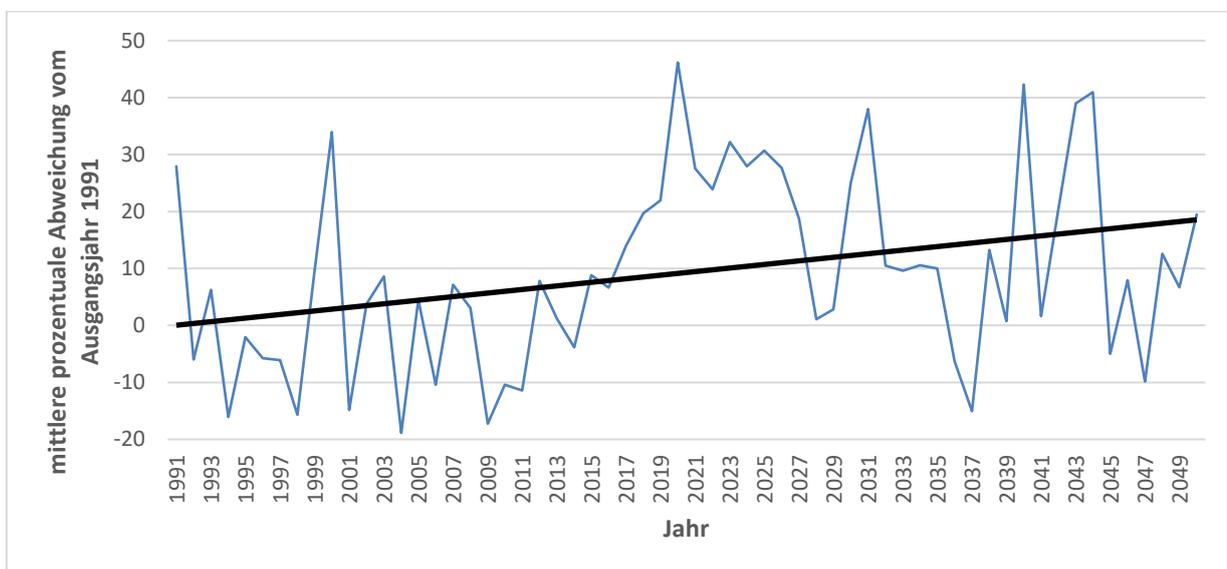
4.3 Ackerbau

4.3.1 Allgemein

Die Modellsimulationen der im Ackerbau berücksichtigten Kulturen bzw. Kulturaggregate (siehe Tabelle A.1) zeigen einen jahresspezifischen Wert der Bewässerungsbedürftigkeit in unterschiedlicher Höhe auf. So sind starke Schwankungen zwischen den Jahren (siehe Abbildung 53) zu beobachten. Die Abweichungen können außerordentlich hohe Werte annehmen, die in Extremjahren fast einer Verdopplung der Bewässerungsbedürftigkeit entsprechen. Im Gegensatz dazu sind Jahre zu beobachten, in denen der Zusatzwasserbedarf im Vergleich zum langjährigen Mittel deutlich geringer ausfällt.

Die Analyse des gesamten Beobachtungszeitraums von 60 Jahren zeigt allerdings einen klaren, steigenden Trend auf. So nimmt der Wasserbedarf im Ackerbau bis 2050 um ca. 19 % zu. In Extremjahren kann der Wasserbedarf darüber hinaus deutlich erhöht sein, so beispielsweise in den Jahren 2031 und 2040.

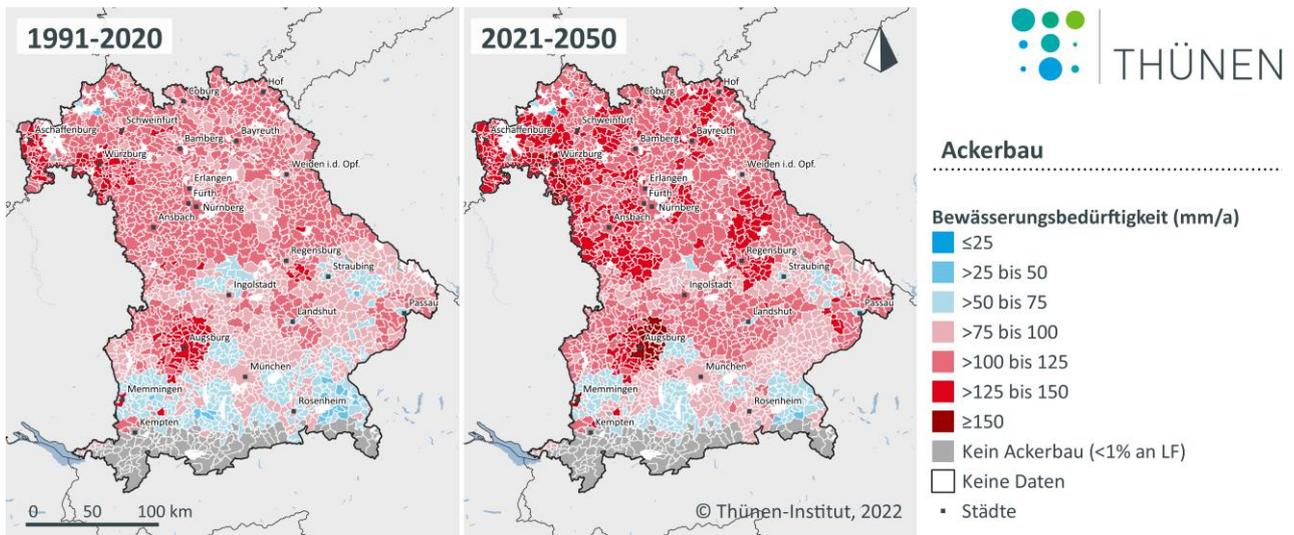
Abbildung 53: Entwicklung der mittleren jährlichen Bewässerungsbedürftigkeit des Ackerbaus im bayernweiten Durchschnitt von 1991–2050



Quelle: Eigene Berechnungen.

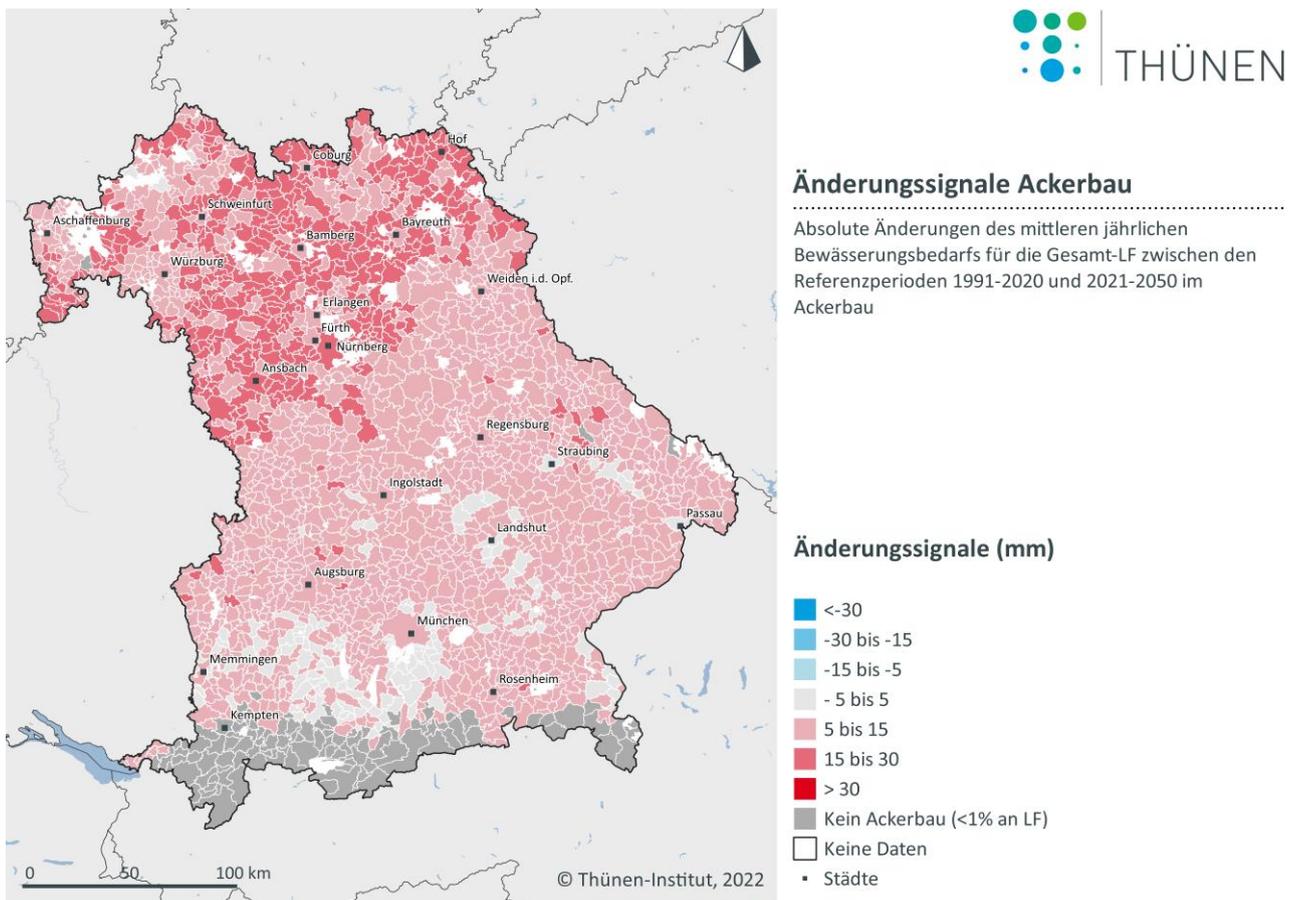
Die Bewässerungsbedürftigkeit aller Ackerbaukulturen ist in Abbildung 54 (vgl. Karte A.11) dargestellt. Berücksichtigt sind dabei alle Gemeinden, in denen im Basisjahr 2016 Ackerkulturen angebaut werden. Die Mittelwerte der Referenzperioden weisen in fast allen Gemeinden eine steigende Bewässerungsbedürftigkeit auf. Der Anstieg (Änderungssignale) im Vergleich der zwei Referenzperioden ist regional unterschiedlich ausgeprägt (siehe Abbildung 55). Die Veränderungen bewegen sich in Größenordnungen bis zu 30 mm pro Jahr, wobei in Extremjahren deutliche Überschreitungen dessen vorkommen können.

Abbildung 54: Entwicklung der durchschnittlichen jährlichen regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von Ackerbaukulturen je Gemeinde in Bayern



Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 55: Änderungssignale der durchschnittlichen regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von Ackerbaukulturen zwischen den Referenzperioden 1991–2020 und 2021–2050



Quelle: Eigene Berechnungen.

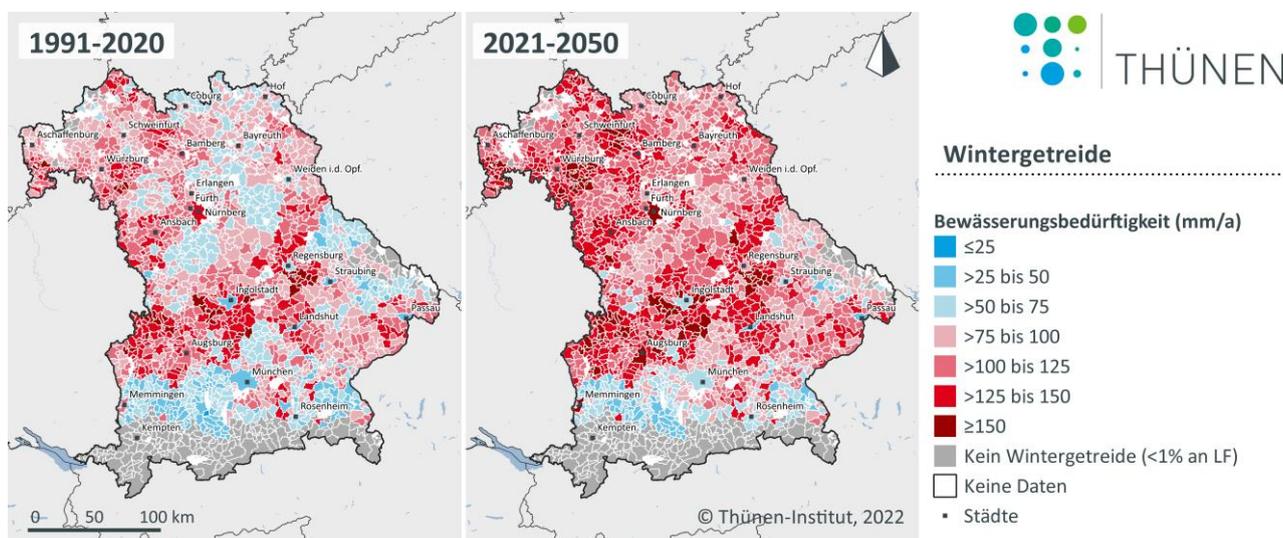
4.3.2 Ausgewählte Kulturen

In den folgenden Kapiteln sind die Ergebnisse der Modellsimulationen für ausgewählte Ackerbaukulturen dargestellt. Die Abbildungen zeigen bayernweit die regionale Bewässerungsbedürftigkeit auf Grundlage der tatsächlichen Landnutzung aus dem Basisjahr 2016.

4.3.2.1 Winter- und Sommergetreide

Die durchschnittliche Bewässerungsbedürftigkeit von Wintergetreide ist in Bayern sehr gering ausgeprägt. In der Ex-Post-Periode weisen nur sehr wenige Gemeinden eine Bewässerungsbedürftigkeit auf, die mit ≤ 25 mm/a darüber hinaus nur sehr gering ausfällt. In der Zukunftsperiode zeichnet sich eine leicht steigende Bewässerungsbedürftigkeit von bis zu 50 mm/a in einigen Gemeinden Ober-, Unter- und Mittelfrankens sowie in Teilen der Oberpfalz und in der Region Augsburg ab (siehe Abbildung 56; vgl. Karte A.12). Im langjährigen Mittel wird Wintergetreide keinen nennenswerten Bewässerungsbedarf aufweisen.

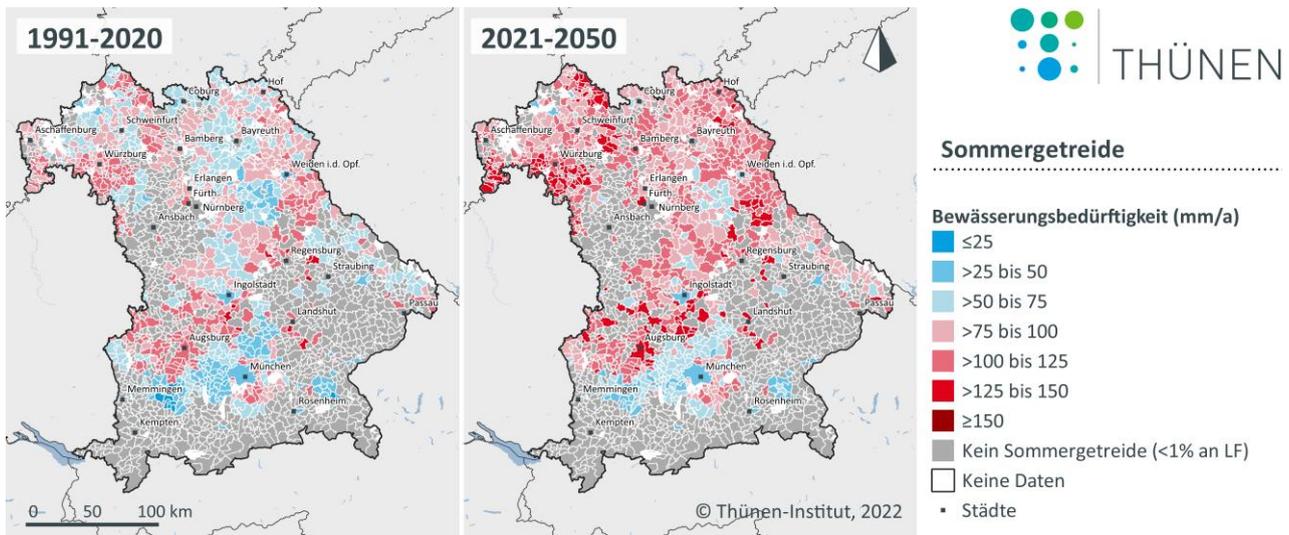
Abbildung 56: Entwicklung der durchschnittlichen jährlichen regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von Wintergetreide je Gemeinde in Bayern



Quelle: Eigene Berechnungen.

Im Gegensatz zum Wintergetreide ist beim Sommergetreide eine höhere Bewässerungsbedürftigkeit zu beobachten: Viele Gemeinden weisen in der Vergangenheit einen Wasserbedarf für die Bewässerung auf, welcher in der Zukunft weiter zunimmt (siehe Abbildung 57; vgl. Karte A.13). Der Bewässerungsbedarf der Sommergetreidekulturen verändert sich in der Zukunft in nahezu allen Gemeinden leicht, in einigen Regionen Unterfrankens, insbesondere in der Region südlich von Aschaffenburg, ergeben sich Zusatzwasserbedarfe von 75 bis 100 mm/a.

Abbildung 57: Entwicklung der durchschnittlichen jährlichen regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von Sommergetreide je Gemeinde in Bayern

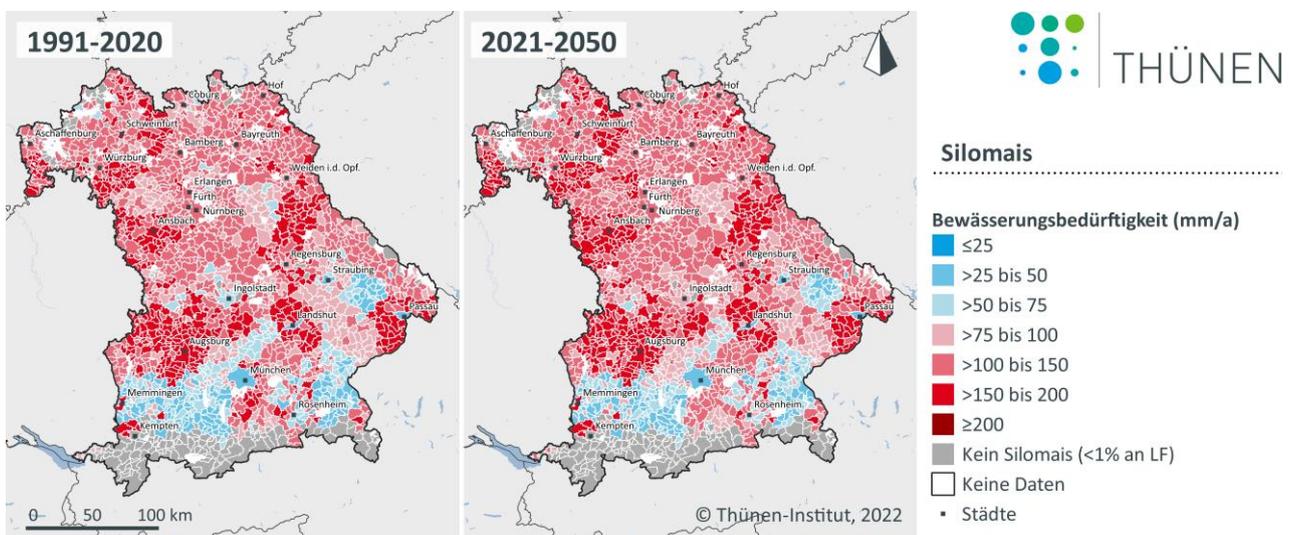


Quelle: Eigene Berechnungen.

4.3.2.2 Mais

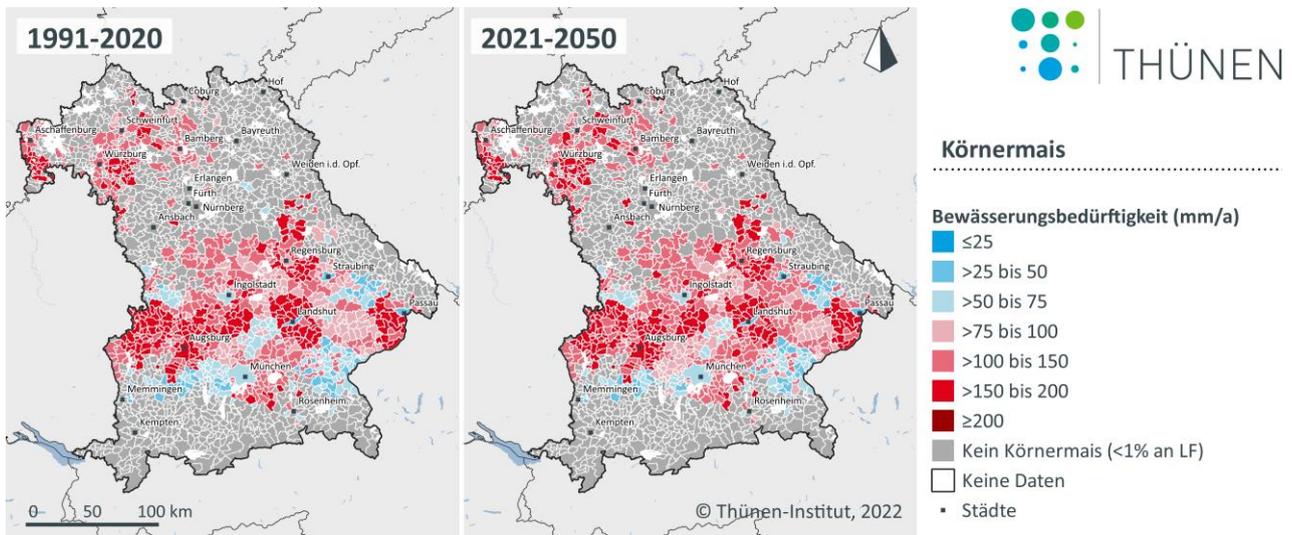
Der Anbau von Mais lässt sich in zwei Gruppen differenzieren. Neben Silomais (siehe Abbildung 58; vgl. Karte A.14) wird Körnermais (siehe Abbildung 59; Karte A.15) angebaut, der sich in Anbau- und Erntezeitpunkt geringfügig unterscheidet. Hinsichtlich der Bewässerungsbedürftigkeit lassen sich nur geringe Unterschiede zwischen der Ex-Post-Periode und der Zukunft erkennen. Insgesamt ist ein steigender Trend zu verzeichnen.

Abbildung 58: Entwicklung der durchschnittlichen jährlichen regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von Silomais je Gemeinde in Bayern



Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 59: Entwicklung der durchschnittlichen jährlichen regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von Körnermais je Gemeinde in Bayern

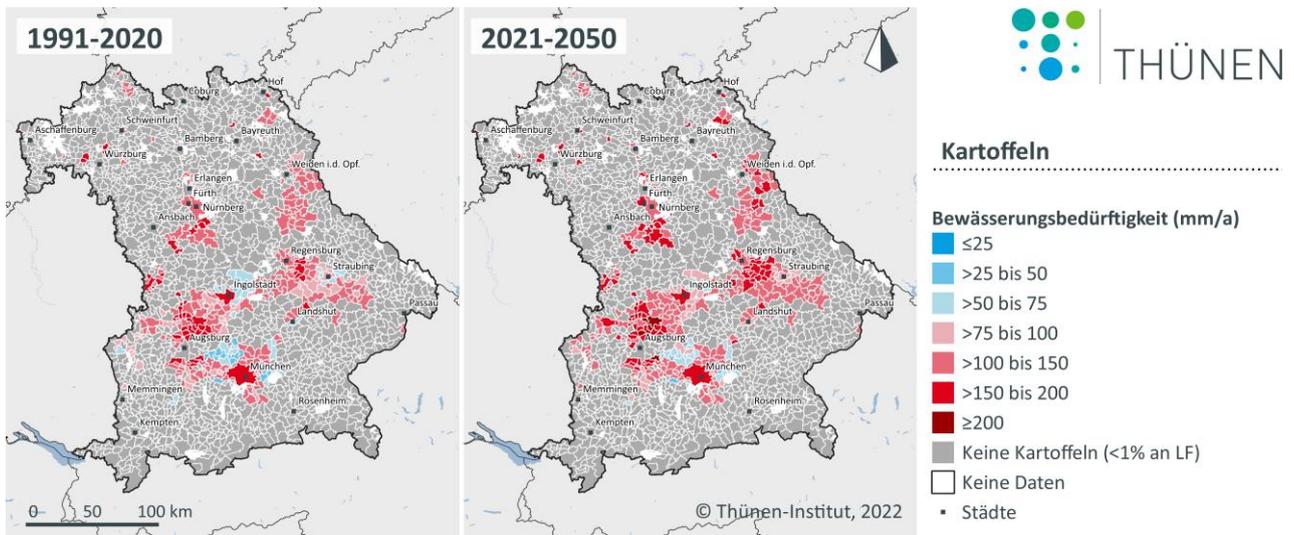


Quelle: Eigene Berechnungen.

4.3.2.3 Kartoffeln

Die Kartoffel als bewässerungswürdige Ackerbaukultur weist in fast allen Gemeinden und beiden Referenzperioden eine hohe Bewässerungsbedürftigkeit auf (siehe Abbildung 60; vgl. Karte A.16). Der Bewässerungsbedarf nimmt bis 2050 in allen Kartoffelbauregionen zu. Die Änderungen sind dabei jedoch sehr unterschiedlich. Sie bewegen sich in der Größenordnung zwischen 25 und 150 mm und Jahr. Insbesondere in den Gebieten, in denen in der Ex-Post-Periode eine hohe Bewässerungsbedürftigkeit ermittelt wurde, steigen diese weiter, sodass Zusatzwassermengen bis zu 150 mm pro Jahr und mehr nötig werden. Die Veränderung wird besonders deutlich im nördlichen Teil von Schwaben, der Region Ingolstadt sowie im Kartoffelanbau südlich von Regensburg. Bayernweit nehmen die Standorte ab, in denen Kartoffeln ohne Bewässerung angebaut werden können.

Abbildung 60: Entwicklung der durchschnittlichen jährlichen regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von Kartoffeln je Gemeinde in Bayern

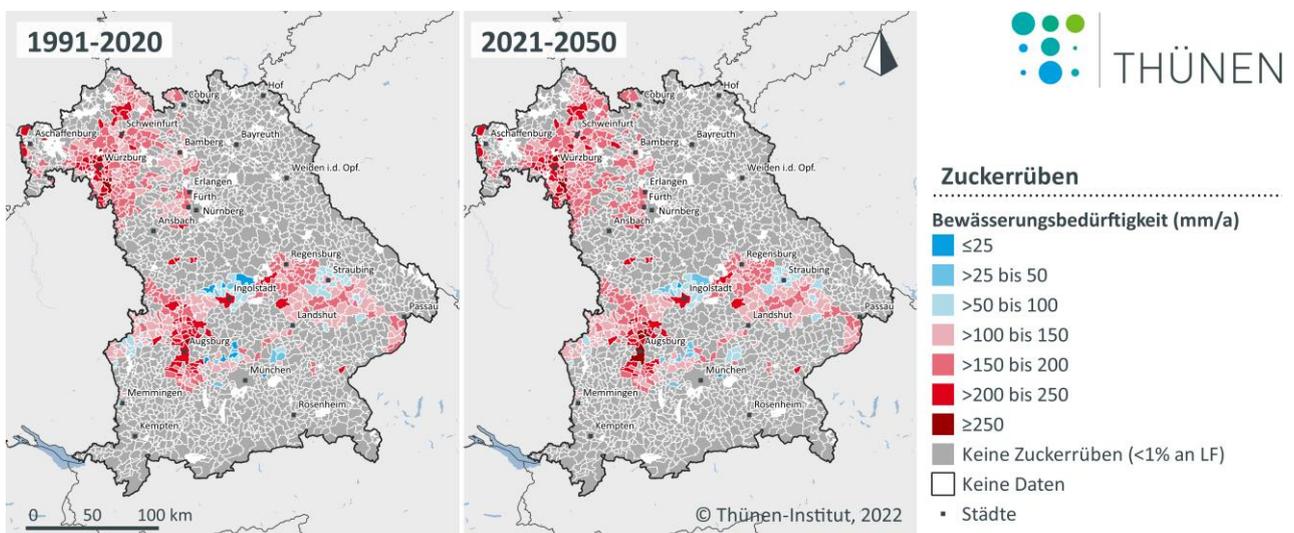


Quelle: Eigene Berechnungen.

4.3.2.4 Zuckerrüben

Der Anbau von Zuckerrüben ist in Bayern landesweit durch eine hohe Bewässerungsbedürftigkeit geprägt (siehe Abbildung 61; vgl. Karte A.17). Diese nimmt insgesamt in den meisten Gemeinden zu. Darüber hinaus wurden in einzelnen Gemeinden in der Zukunftsperiode häufiger notwendige Bewässerungsmengen von über 150 mm pro Jahr ermittelt. Zuckerrüben gelten als bewässerungswürdige Kulturen.

Abbildung 61: Entwicklung der durchschnittlichen jährlichen regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von Zuckerrüben je Gemeinde in Bayern

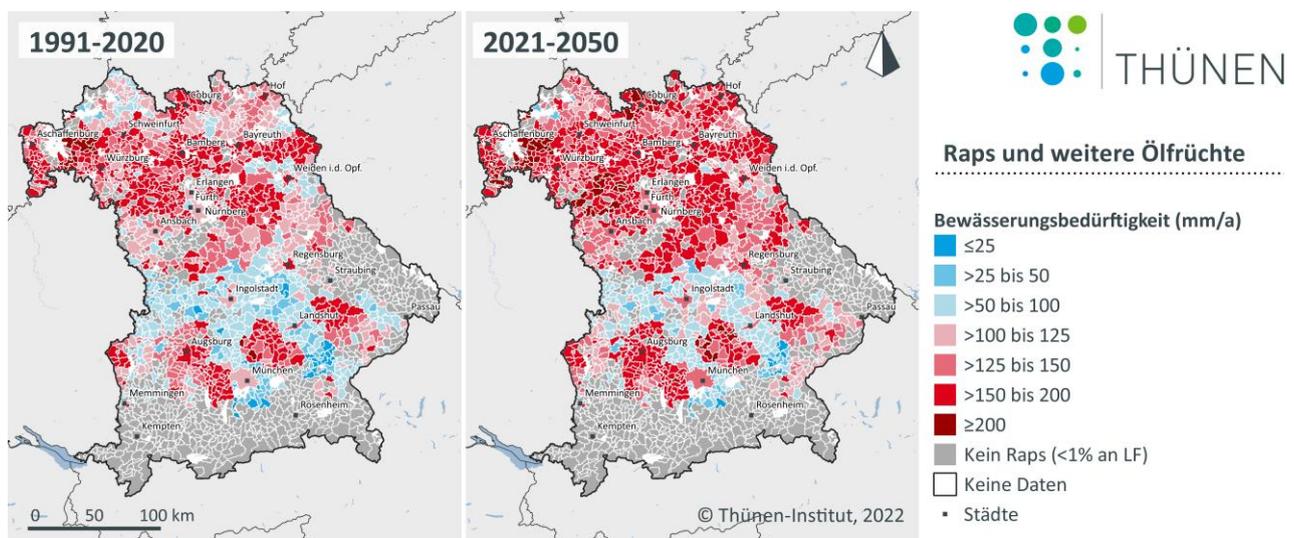


Quelle: Eigene Berechnungen.

4.3.2.5 Raps

Raps, Sonnenblumen und weitere Ölpflanzen wurden innerhalb eines Aggregates betrachtet und zusammen berechnet (siehe Abbildung 62; vgl. Karte A.18). Dabei nehmen Sommer- und Winterraps den überwiegenden Flächenanteil ein. Die ermittelte Bewässerungsbedürftigkeit für Winterraps zeigt in der Ex-Post-Periode in weiten Teilen Bayerns ein sehr hohes Wasserdefizit auf. Sehr hohe Bewässerungsbedürftigkeiten zeigen sich im Norden Bayerns, besonders in den Ackerbauregionen Ober-, Unter- und Mittelfranken sowie in einzelnen Gemeinden entlang der Donau. Der Trend bis 2050 zeigt eine Verschärfung der Situation in den beschriebenen Regionen sowie eine Intensivierung der Bewässerungsbedürftigkeit für Winterraps in der Region Ingolstadt sowie in der nördlichen Oberpfalz. Der modellierte Zusatzwasserbedarf liegt in großen Teilen bei 150 bis 200 mm pro Jahr und hat Spitzen in einigen Gemeinden bei > 250 mm pro Jahr.

Abbildung 62: Entwicklung der durchschnittlichen jährlichen regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von Raps je Gemeinde in Bayern



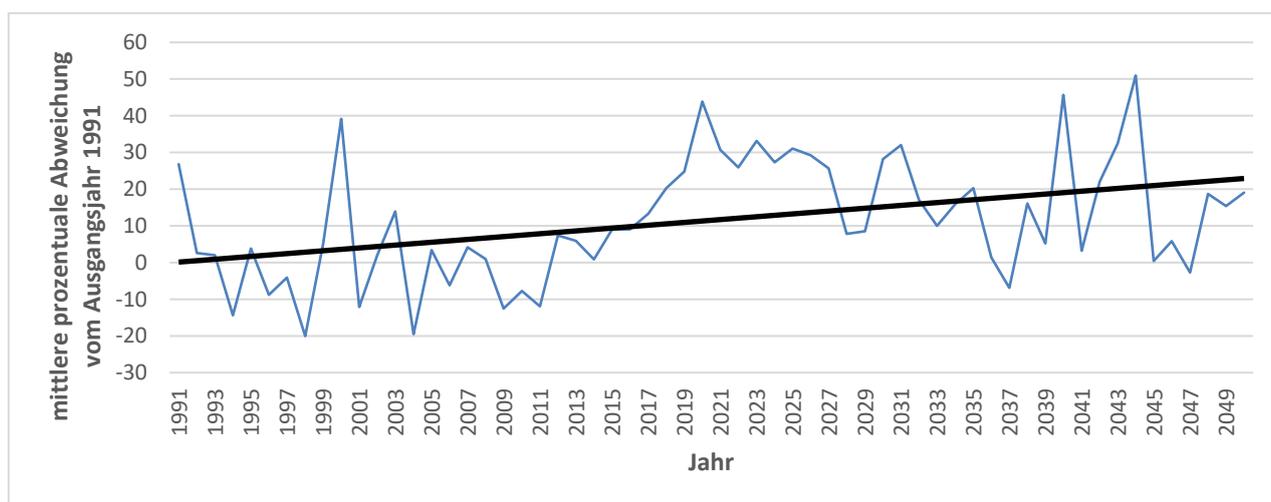
Quelle: Eigene Berechnungen.

4.4 Gemüsekulturen

4.4.1 Allgemein

Der langfristige Trend der Bewässerungsbedürftigkeit aller Kulturen setzt sich im Anbau von Gemüse fort (siehe Abbildung 63). Jährliche Abweichungen nach oben und unten sind je nach Jahr vorhanden, doch ist der Trend stets ansteigender Natur. So ist von 1991–2050 im gleitenden Mittel ein Anstieg von bis zu 23 % zu erwarten. In Einzeljahren können die Abweichungen der Bewässerungsbedürftigkeit deutlich höher ausfallen. In absoluten Zahlen ist der Bedarf zur Bewässerung der Gemüsekulturen deutlich geringer als der der Ackerkulturen, da der Anbauumfang deutlich geringer ist.

Abbildung 63: Entwicklung der mittleren jährlichen Bewässerungsbedürftigkeit des Gemüsebaus im bayernweiten Durchschnitt von 1991–2050

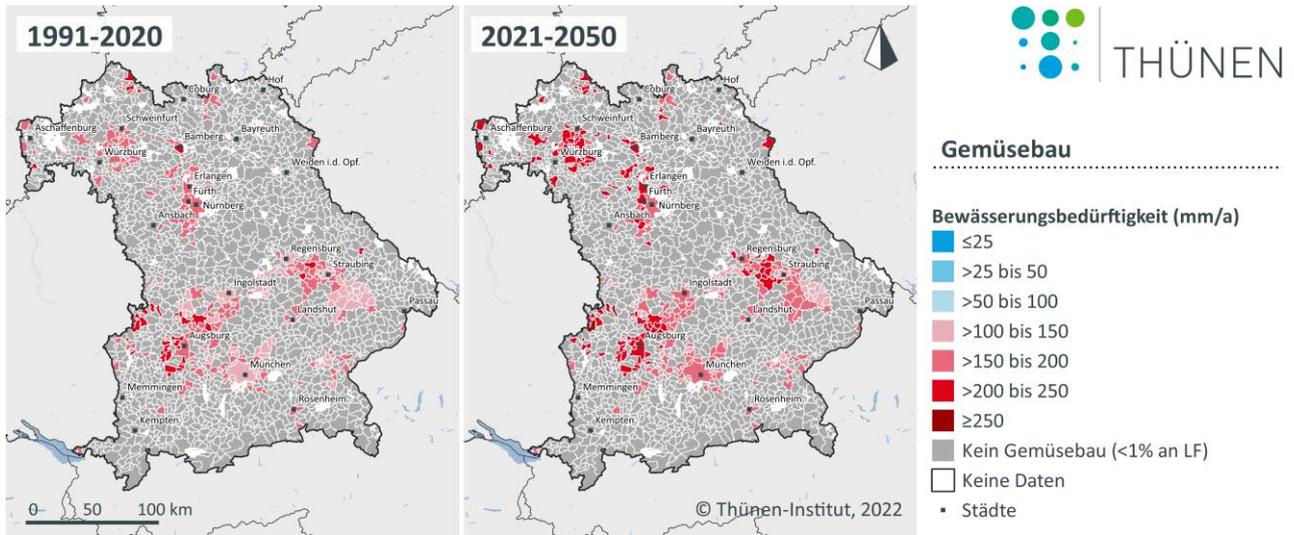


Quelle: Eigene Berechnungen.

Im Vergleich zu den Kulturen des Ackerbaus ist der Gemüsebau von deutlich höheren potenziellen Bewässerungsmengen gekennzeichnet. Diese bewässerungsintensiven Kulturen weichen in der mittleren Höhe deutlich nach oben vom Ackerbau ab. So sind Zusatzwassergaben eines Jahres von über 300 mm keine Seltenheit. In vielen Regionen Bayerns lässt sich dies in den Simulationsergebnissen wiederfinden (siehe Abbildung 64; vgl. Karte A.19). Lediglich in Zentralbayern und einigen Bereichen im Osten des Landes kann Gemüse mit vergleichsweise geringer potenzieller Bewässerungsbedürftigkeit (100–150 mm) angebaut werden.

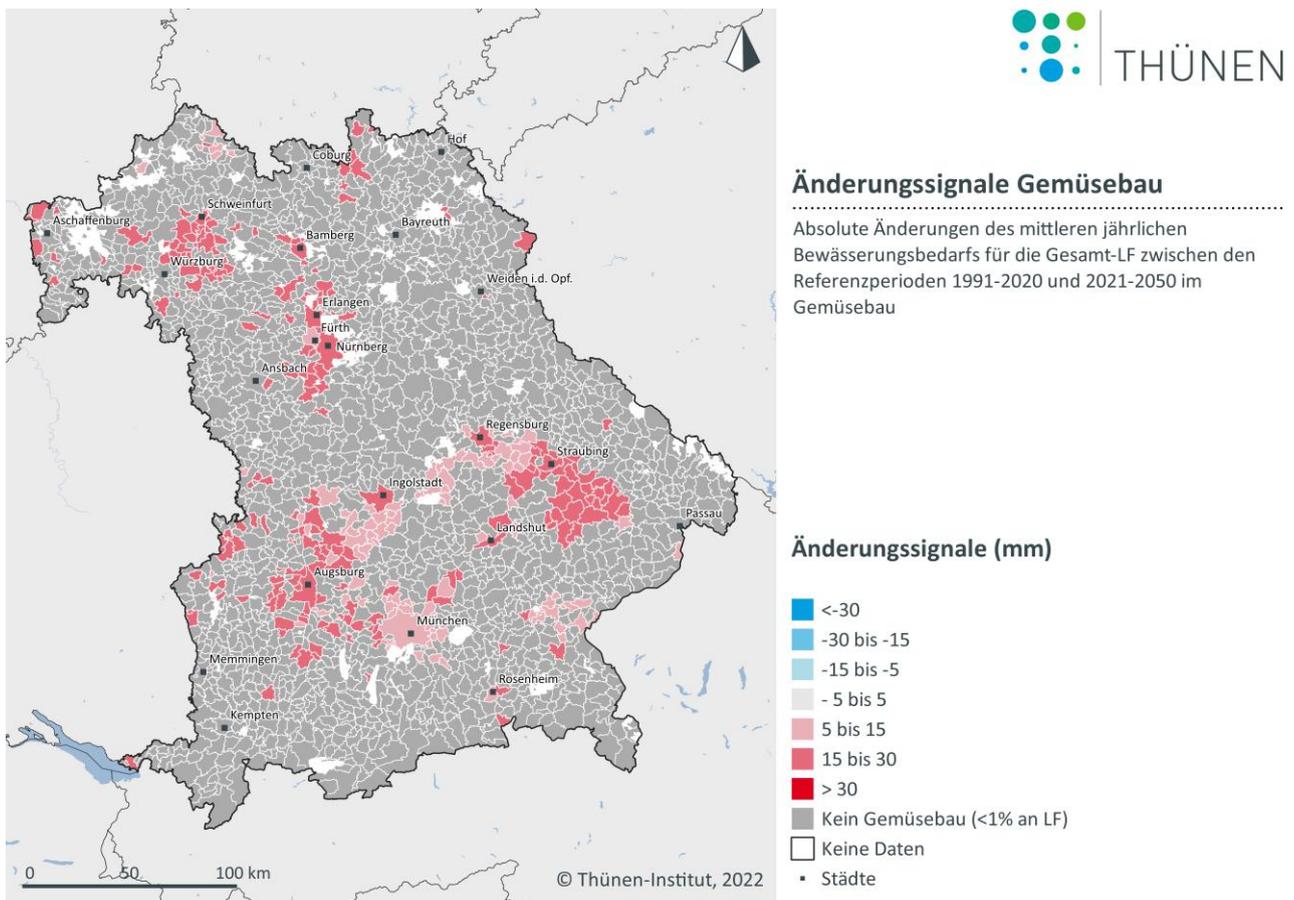
Im Vergleich beider Betrachtungszeiträume (siehe Abbildung 65) ist in ganz Bayern eine Steigerung des Wasserbedarfs im Gemüsebau zu erwarten. Nur in sehr wenigen Gemeinden ist diese gering ausgeprägt (< 5 mm), in sehr vielen Bereichen liegt diese deutlich darüber. In Franken und im südlichen Westen des Landes steigt der jährliche Bedarf um bis zu 15–30 mm. Lediglich in sehr wenigen Bereichen im Nordosten des Bundeslandes sind noch höhere Werte zu beobachten.

Abbildung 64: Entwicklung der durchschnittlichen jährlichen regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von Gemüsekulturen je Gemeinde in Bayern



Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 65: Änderungssignale der durchschnittlichen regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von Gemüsekulturen zwischen den Referenzperioden 1991–2020 und 2021–2050



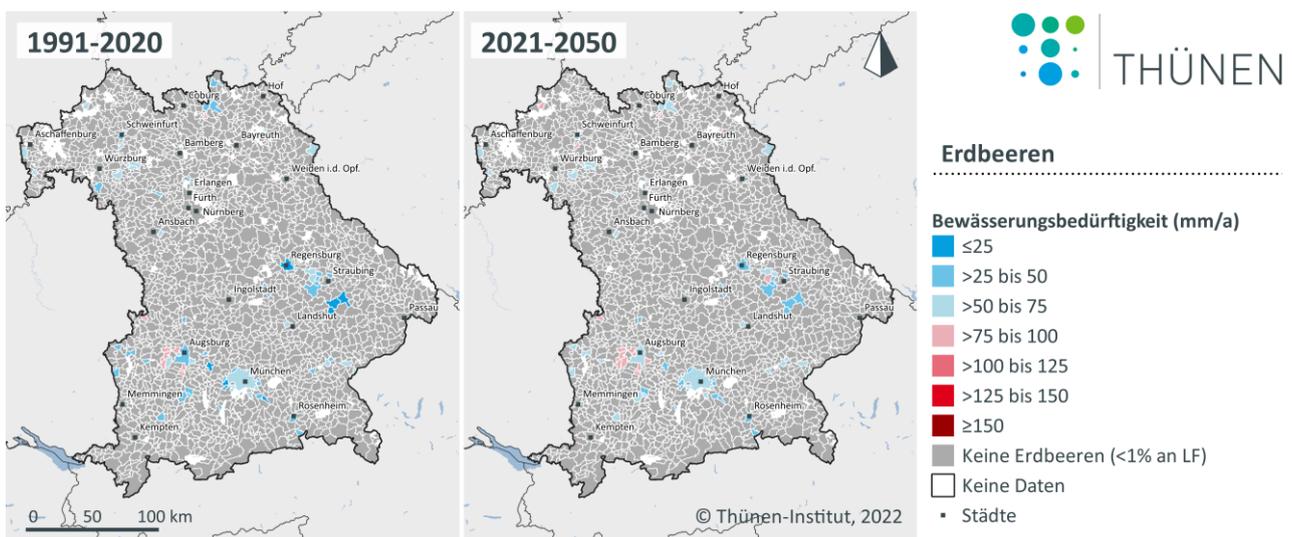
Quelle: Eigene Berechnungen.

4.4.2 Ausgewählte Kulturen

4.4.2.1 Erdbeeren

Der Anbau von Erdbeeren (siehe Abbildung 66; vgl. Karte A.20) ist grundsätzlich durch eine für den Gemüsebau unterdurchschnittliche Bewässerungsbedürftigkeit geprägt, der im allgemeinen trotzdem als hoch zu bewerten ist. Jährliche Zusatzwassergaben von über 150 mm sind nur sehr selten notwendig. Der Vergleich zwischen Ex-Post-Periode und Zukunft zeigt insgesamt in allen Gemeinden, in denen Erdbeeren angebaut werden, jedoch steigende mittlere Bewässerungsmengen.

Abbildung 66: Entwicklung der durchschnittlichen jährlichen regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von Erdbeeren je Gemeinde in Bayern

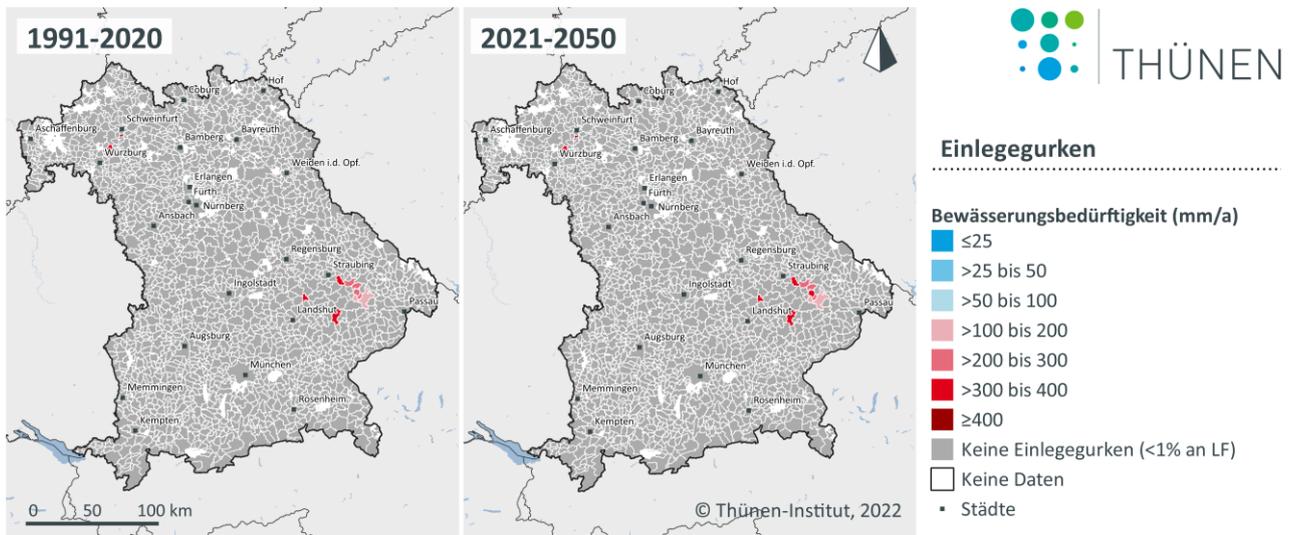


Quelle: Eigene Berechnungen.

4.4.2.2 Gurken (Einlegegurken)

Einlegegurken stellen eine Kultur mit einem hohen Wasserbedarf dar und sind darüber hinaus eine bewässerungswürdige Kultur. Diese Eigenschaft lässt sich in den Rechenergebnissen beider Beobachtungszeiträume wiederfinden. Mittlere jährliche Werte von bis über 400 mm sind keine Seltenheit und zukünftig noch häufiger zu beobachten. In den wenigen Gemeinden mit Gurkenanbau, der flächenmäßig mehr als 1 % der landwirtschaftlichen Fläche der Gemeinde einnimmt, ist der Wasserbedarf somit sehr hoch und wird bis in das Jahr 2050 weiter zunehmen (siehe Abbildung 67; vgl. Karte A.21).

Abbildung 67: Entwicklung der durchschnittlichen jährlichen regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von Einlege-/Gurken je Gemeinde in Bayern

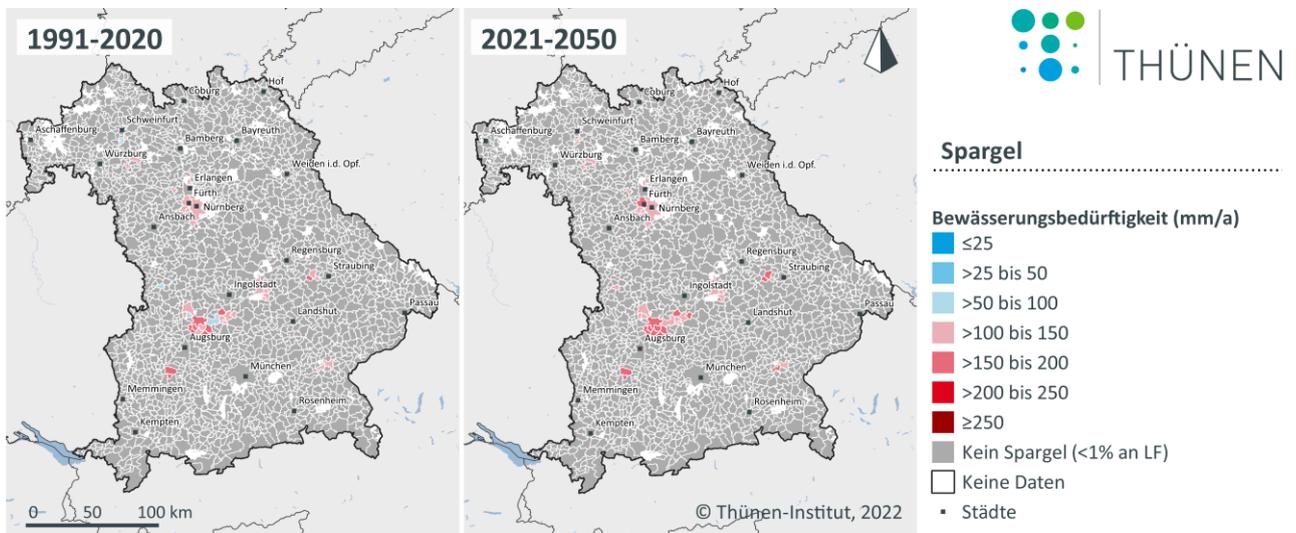


Quelle: Eigene Berechnungen.

4.4.2.3 Spargel

Der Anbau von Spargel erfordert für den Gemüsebau typisch hohe Wassergaben. In allen Gemeinden Bayerns müssen diese erfolgen (siehe Abbildung 68; vgl. Karte A.22). Zukünftig wird der Wasserbedarf zunehmen, sodass eine höhere Bewässerung erfolgen muss.

Abbildung 68: Entwicklung der durchschnittlichen jährlichen regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von Spargel je Gemeinde in Bayern



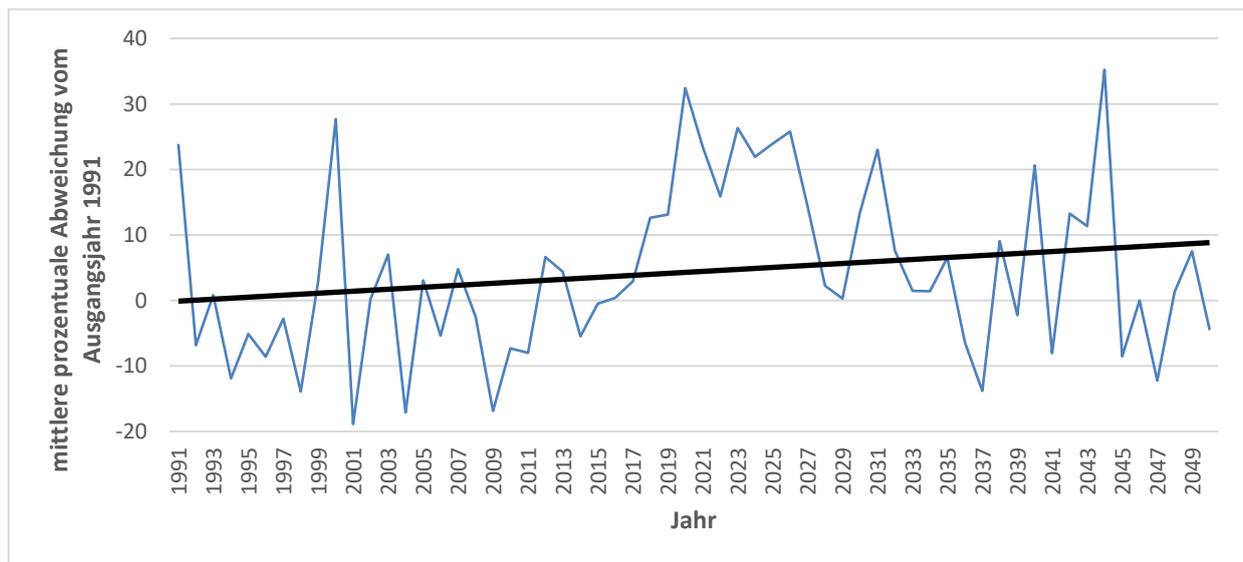
Quelle: Eigene Berechnungen.

4.5 Sonderkulturen

4.5.1 Allgemein

Der Anbau von Sonderkulturen in Bayern zeigt, wie die Kulturen des Acker- und Gemüsebaus, einen deutlichen Trend hinsichtlich der Bewässerungsbedürftigkeit auf (siehe Abbildung 69). Dieser ist allerdings deutlich geringer ausgeprägt und steigt bis in das Jahr 2050 um lediglich 10 % – basierend auf dem Jahr 1991. Jährliche Abweichungen nach oben und unten sind ebenfalls vorhanden, doch auch diese Schwankungen sind in der Höhe geringer.

Abbildung 69: Entwicklung der mittleren jährlichen Bewässerungsbedürftigkeit von Sonderkulturen im bayernweiten Durchschnitt von 1991–2050

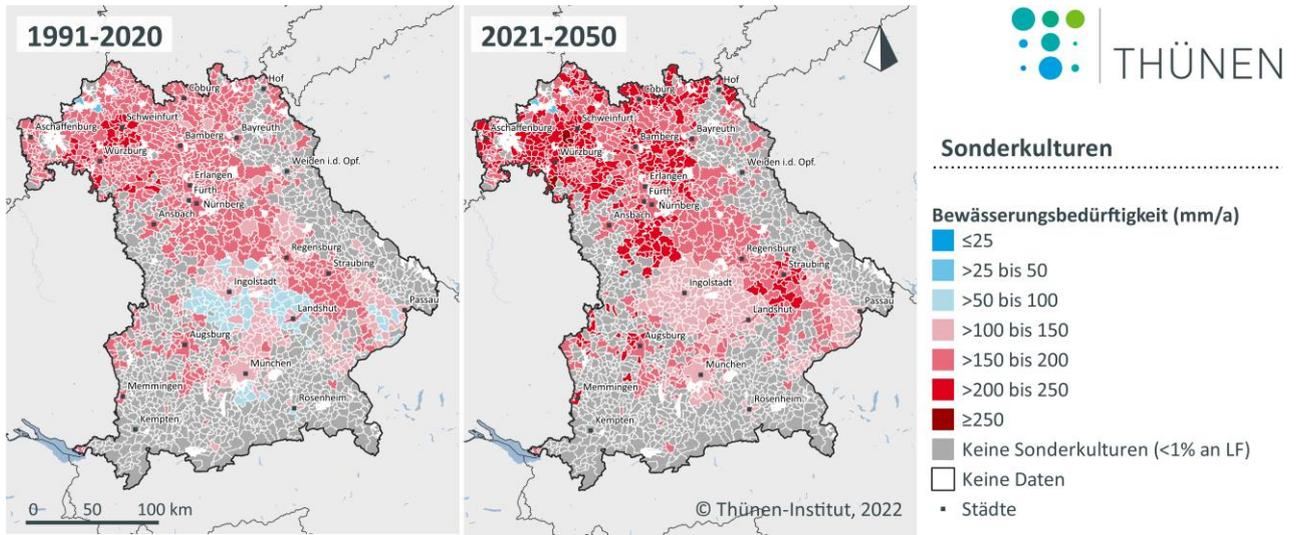


Quelle: Eigene Berechnungen.

In der regionalen Analyse der räumlichen Verteilung (siehe Abbildung 70; vgl. Karte A.23) der Bewässerungsbedürftigkeit der Sonderkulturen stechen einige Gemeinden in Ober-, Unter- und Mittelfranken sowie Flächen in der Region Augsburg in der Periode 1991–2020 deutlich hervor. In diesen Gemeinden sind Zusatzwassergaben im Jahr von bis zu 250 mm möglich. In Zentralbayern liegen diese deutlich darunter, wenn auch auf einem grundsätzlich hohen Niveau. Bis in das Jahr 2050 nehmen diese in ganz Bayern zu, sodass in einigen Gemeinden Werte bis 300 mm erreicht werden. In der Kulturgruppe der Sonderkulturen sind neben Heil-, Duft- und Gewürzpflanzen, Blumen und Zierpflanzen, sonstigen Dauerkulturen (vgl. Tabelle A.1) auch Hopfen, Wein und Kern-Stein- sowie Beerenobst, die im Folgenden detailliert dargestellt werden.

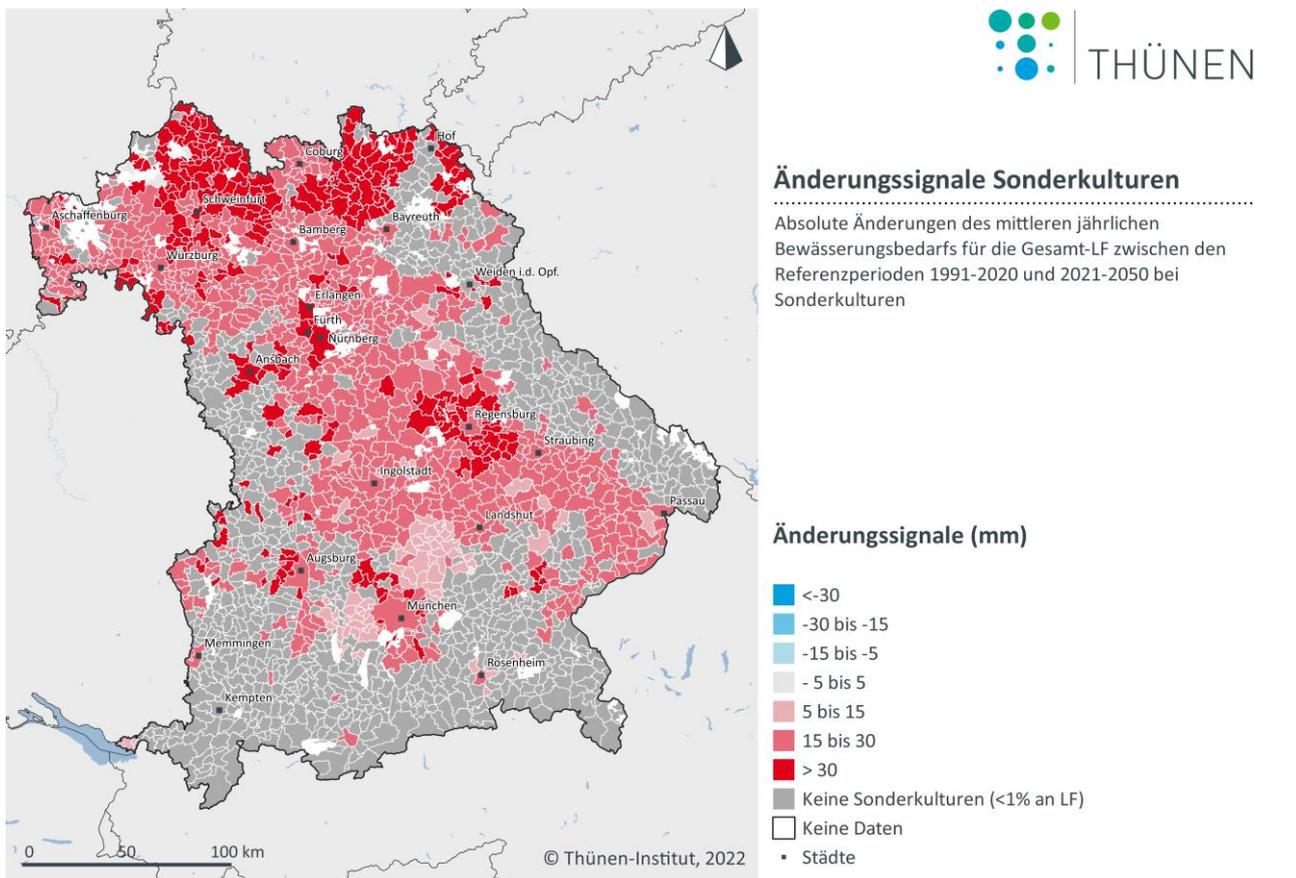
Die absoluten Änderungssignale zwischen beiden Perioden zeigen im überwiegenden Anteil der Gemeinden mit Sonderkulturanbau eine steigende Bewässerungsbedürftigkeit. Abnahmen sind nicht zu erwarten (siehe Abbildung 71). Die Regionen mit starken Zunahmen liegen ebenfalls im Norden und Westen des Bundeslands.

Abbildung 70: Entwicklung der durchschnittlichen jährlichen regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von Sonderkulturen je Gemeinde in Bayern



Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 71: Änderungssignale der durchschnittlichen regionalen Bewässerungsbedürftigkeit der Sonderkulturen zwischen den Referenzperioden 1991–2020 und 2021–2050



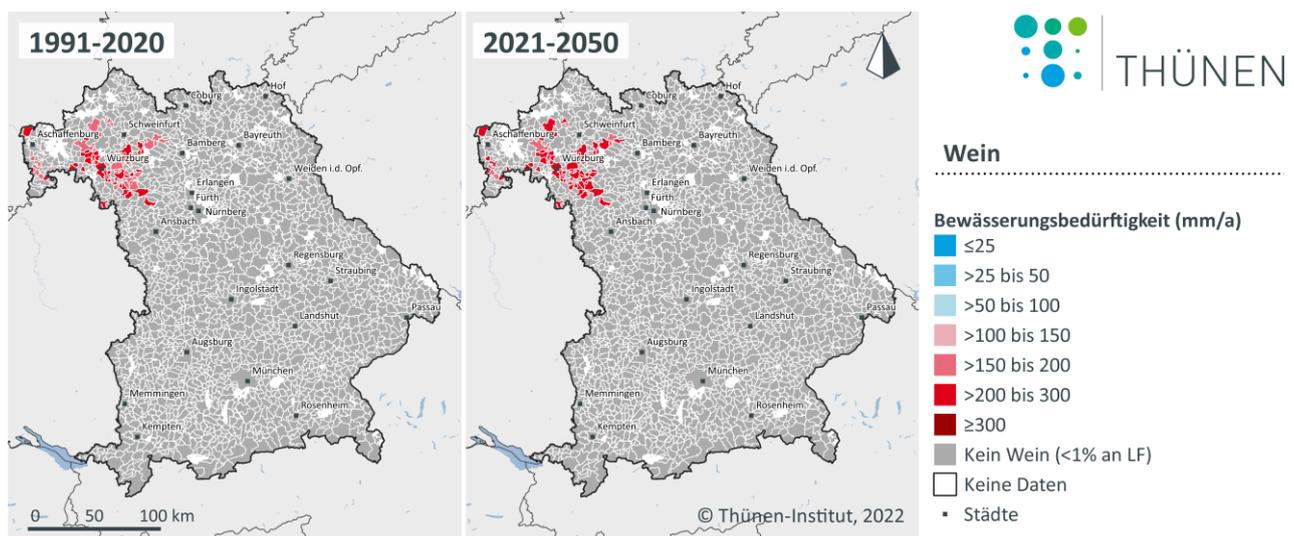
Quelle: Eigene Berechnungen.

4.5.2 Ausgewählte Kulturen

4.5.2.1 Wein

Wein wird als Sonderkultur nur in ausgewählten Regionen im Nordwesten Bayerns angebaut (siehe Abbildung 72; Karte A.24). Der Zusatzwasserbedarf in den Weinbauregionen ist auf einem hohen Niveau (> 150 mm/a). In einigen Gemeinden wurden durch die Modellrechnungen > 300 mm/a ermittelt. Die Entwicklung der Bewässerungsbedürftigkeit bis 2050 zeigt keine klaren räumlichen Veränderungsmuster auf, jedoch ist mit einem grundsätzlichen Anstieg zu rechnen. Die Strategie zur Beregnung von Reben basiert auf einer moderaten Defizitbewässerung, das heißt, dass in Trockenperioden das Niederschlagsdefizit durch eine Zusatzbewässerung bewusst nicht ausgeglichen wird. Ziel ist die Etablierung eines moderaten Trockenstresses der Reben bei Bodenfeuchtwerten um 30 % nFK, ein moderater Trockenstress fördert die Bildung und Einlagerung von wertgebenden Inhaltsstoffen wie z. B. Aminosäuren und Anthozyanen in die Beeren. Aufgrund der Defizitbewässerung im Rebenanbau sind in der Praxis die Bewässerungsgaben mit bis zu 65 mm/a wesentlich geringer und lassen sich mit der errechneten Bewässerungsbedürftigkeit nicht direkt vergleichen. Die Entwicklung der Bewässerungsbedürftigkeit bis 2050 zeigt keine klaren räumlichen Veränderungsmuster auf, jedoch ist mit einem grundsätzlichen Anstieg zu rechnen.

Abbildung 72: Entwicklung der durchschnittlichen jährlichen regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von Wein je Gemeinde in Bayern

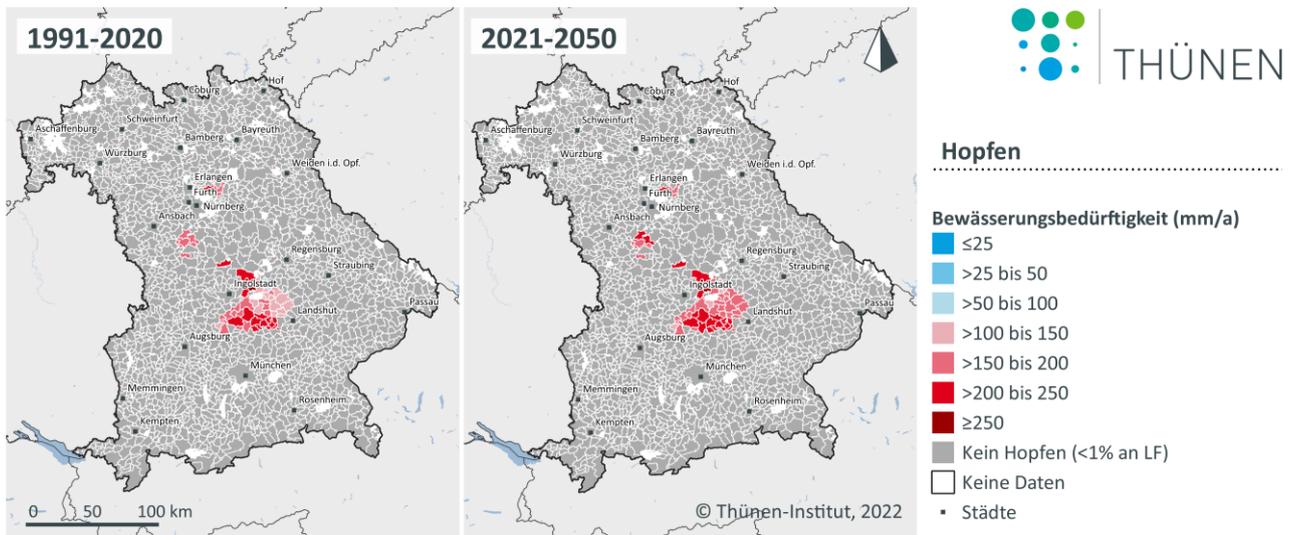


Quelle: Eigene Berechnungen.

4.5.2.2 Hopfen

Hopfen wird ebenfalls nur in ausgewählten Bereichen Bayerns angebaut. Die mittlere Bewässerungsbedürftigkeit in der Ex-Post-Periode liegt bei > 50 mm/a bis zu 250 mm/a. Durch die klimatischen Veränderungen steigt der Bedarf in den drei Hopfenbauregionen Bayerns an. Die Veränderungen werden besonders deutlich in der Hallertau, südöstlich von Ingolstadt (siehe Abbildung 73; vgl. Karte A.25).

Abbildung 73: Entwicklung der durchschnittlichen jährlichen regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von Hopfen je Gemeinde in Bayern

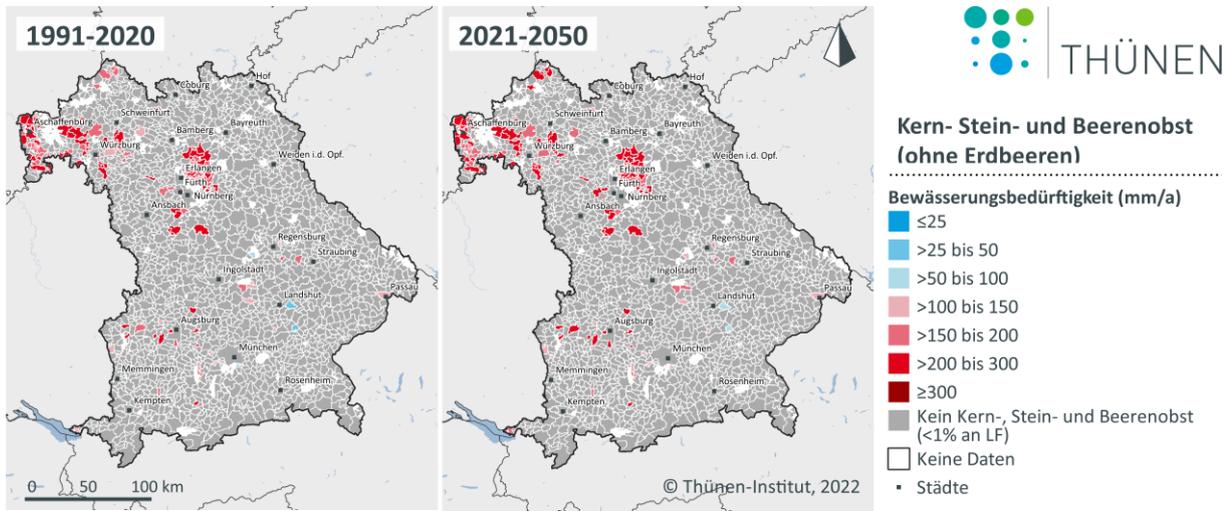


Quelle: Eigene Berechnungen.

4.5.2.3 Kern-, Stein- und Beerenobst (ohne Erdbeeren)

Der Obstanbau von Kern-, Stein und Beerenobst ist, hinsichtlich der Bewässerungsbedürftigkeit, regional stark unterschiedlich möglich (siehe Abbildung 74; vgl. Karte A.26). In beiden Perioden sind Regionen in Zentral-, Ost- und Südbayern auszumachen, in denen der notwendige Bewässerungsbedarf mit moderaten Zahlen von 25 bis 100 mm simuliert wurde. Andere Bereiche sind hingegen von einer Bewässerungsbedürftigkeit bis über 250 mm geprägt. Dies gilt für beide Zeiträume. In der Zukunft nehmen die Regionen mit einer hohen Bedürftigkeit an Wasser allerdings deutlich zu.

Abbildung 74: Entwicklung der durchschnittlichen jährlichen regionalen Bewässerungsbedürftigkeit von Kern-, Stein- und Beerenobst (ohne Erdbeeren) je Gemeinde in Bayern



Quelle: Eigene Berechnungen.

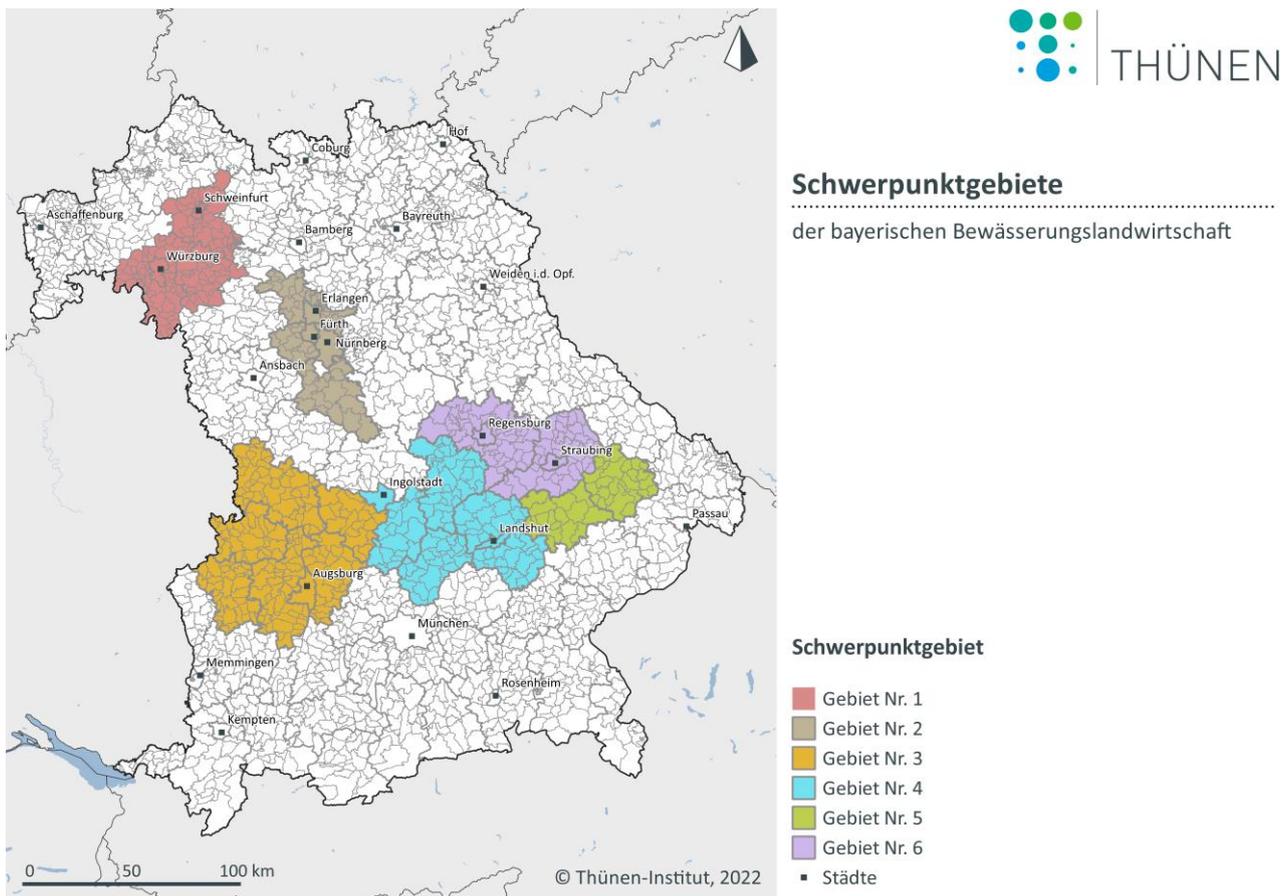
5 Ergebnis – Bewässerungsbedürftigkeit in Schwerpunktgebieten der bayerischen Bewässerungslandwirtschaft

In Bayern lassen sich sechs Schwerpunktgebiete der Bewässerung zusammenfassen und regional abgrenzen. Die Schwerpunktgebiete sind definiert als intensiv landwirtschaftlich genutzte Gebiete mit erhöhtem Bewässerungsaufkommen und wurden durch den Landesexpertenkreis festgelegt. In Tabelle 7 werden die Schwerpunktgebiete mit den dazugehörigen Kreisen bzw. Gebietskörperschaften aufgeführt und in Abbildung 75 visualisiert.

Tabelle 7: Zuordnung von Gebietskörperschaften zu den Schwerpunktgebieten der Bewässerung in Bayern

Schwerpunktgebiet (Nr.)	Gebietskörperschaften (Nr.)	Gebietskörperschaften (Bezeichnung)
Nr. 1	101	Kitzingen
	102	Schweinfurt
	103	Würzburg
Nr. 2	201	Erlangen
	202	Erlangen-Höchstadt
	203	Fürth
	204	Nürnberg
	205	Roth
Nr. 3	301	Aichach-Friedberg
	302	Augsburg
	303	Dillingen an der Donau
	304	Donau-Ries
	305	Günzburg
	306	Neuburg-Schrobenhausen
Nr. 4	401	Freising
	402	Ingolstadt
	403	Kelheim
	404	Landshut
	405	Pfaffenhofen an der Ilm
Nr. 5	501	Deggendorf
	502	Dingolfing-Landau
Nr. 6	601	Regensburg
	602	Straubing
	603	Straubing-Bogen

Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 75: Schwerpunktgebiete der bayerischen Bewässerungslandwirtschaft

Quelle: Eigene Darstellung.

In Tabelle 8 wird der absolute Bewässerungsbedarf in m^3 und mm je Schwerpunktgebiet dargestellt. Der angegebene Bewässerungsbedarf ist die Summe bzw. der Mittelwert über alle Kreise je Schwerpunktgebiet für ausgewählte Aggregate (vgl. Tabelle A.1). Aufgrund der Variabilität der Klimaprojektionsdaten, die sich in den Modellergebnissen widerspiegeln, wurden für die Ausgabe absoluter Bewässerungsmengen lediglich jene Kulturen berücksichtigt, die in der Praxis hauptsächlich bewässert werden. Die Summen umfassen den Bewässerungsbedarf folgender Aggregate: Hopfen (1), Kartoffeln (6), Zuckerrüben (7), Heil-, Duft- und Gewürzpflanzen (11), Gurken (12), Spargel (13), Erdbeeren im Freiland (14), weiteres Gemüse im Freiland (15), Blumen und Zierpflanzen im Freiland (16), Samenvermehrung (17), Handelsgewächse (18), Kern-, Stein und Beerenobst (19), Wein (20) und sonstige Dauerkulturen (21).

In Tabelle A.5 bis Tabelle A.10 werden die kulturspezifischen Bewässerungsmengen je Schwerpunktgebiet detaillierter dargestellt.

Tabelle 8: Absolute Bewässerungsbedürftigkeit für die Schwerpunktgebiete als Mittelwerte über 30 Jahreszeiträume und für alle Kulturaggregate

Schwerpunktgebiet	Landwirtschaftliche Fläche (LF) [ha]	Bewässerungsbedürftigkeit 1991–2020		Bewässerungsbedürftigkeit 2021–2050	
		[m ³]	[mm]	[Mio. m ³]	[mm]
1	22.718	43.162.400	190	46.102.523	203
2	5.199	7.602.627	146	9.376.980	180
3	25.738	36.433.557	142	40.366.087	157
4	25.698	37.960.137	148	41.382.600	161
5	15.280	19.199.191	126	20.556.999	135
6	24.289	29.070.467	120	32.409.139	133

Anm.: Summe der absoluten Bewässerungsmengen in m³ bzw. Mittelwert in mm für die Kulturaggregate Hopfen (1), Kartoffeln (6), Zuckerrüben (7), Heil-, Duft- und Gewürzpflanzen (11), Gurken (12), Spargel (13), Erdbeeren im Freiland (14), weiteres Gemüse im Freiland (15), Blumen und Zierpflanzen im Freiland (16), Samenvermehrung (17), Handelsgewächse (18), Kern-, Stein und Beerenobst (19), Wein (20) und sonstige Dauerkulturen (21).

Quelle: Eigene Darstellung.

Wie Tabelle 8 zeigt, steigt die Bewässerungsbedürftigkeit in der Zukunft in allen sechs Bewässerungsschwerpunktgebieten im Vergleich zur Ex-Post-Periode (1991–2020) an. In den Schwerpunktgebieten wird ein Großteil der bewässerungsintensiven Gemüse- und Sonderkulturen Bayerns angebaut. Das führt neben den klimatischen Veränderungen zu einem insgesamt hohen absoluten Wasserbedarf für die landwirtschaftliche Bewässerung in Bayern.

6 Diskussion des entwickelten Modells und Interpretation der Modellergebnisse

Im Zuge des Projekts wurde, entsprechend der Zielstellung, ein praktikabler Modellansatz bzw. ein räumliches Modell entwickelt, anhand dessen die heutige und zukünftige Bewässerungsbedürftigkeit der Landwirtschaft in Bayern quantifiziert und regional abgebildet werden kann. Das Modell basiert auf dem Prinzip der Geisenheimer Berechnungssteuerung und setzt dieses räumlich um. Dabei werden räumliche Daten zu Klima (tägliche Auflösung), Boden und Landnutzung mit hydrologischen Informationen und kulturspezifischen Eigenschaften kombiniert. Dies ermöglicht es, die Bewässerungsbedürftigkeit landwirtschaftlicher Kulturen regional (Gemeindeebene) und kulturspezifisch abzubilden. Bei der Modellentwicklung wurden in Abstimmung mit einem Landesexpertenkreis verschiedene Annahmen getroffen (siehe Kapitel 2), die es bei der Interpretation der Modellergebnisse zu berücksichtigen gilt.

Entsprechend des Projektantrags lag der Schwerpunkt des Projekts bei der Berechnung der derzeitigen und zukünftig erwartbaren Bewässerungsbedürftigkeit der Landwirtschaft nach der Geisenheimer Methode und damit den für die Pflanzen optimalen Bewässerungsmengen. Die optimale Bewässerungsmenge, die im Wesentlichen durch die Definition der unteren und oberen Bewässerungsschwelle bestimmt wird – also dem Festlegen einer Spanne der Bodenfeuchte (in % nFK) bezogen auf den kulturspezifischen Wasserbedarf – ermöglicht optimale Wachstumsbedingungen. Die tatsächliche Bewässerungsmenge der Kulturen liegt in der Realität erfahrungsgemäß deutlich niedriger, da eine ökonomische Abwägung häufig gegen eine für die Pflanzen optimale Bewässerung spricht. Die Bewässerungswürdigkeit einer Kultur liegt vor, solange die zusätzlichen Kosten durch die Bewässerung gering sind, als der zusätzliche Nutzen durch die Ertragssteigerung. In der Realität zeigt sich oftmals, dass bewässerungswürdige Kulturen wie Gemüse, Kartoffeln oder Zuckerrüben intensiver bewässert werden als beispielsweise Getreidekulturen wie Roggen oder Gerste. Kulturen mit einer quantitativ geringen Bewässerungswürdigkeit wurden erst ab einer jährlichen Bewässerungsbedürftigkeit von 60 mm in die Bilanz aufgenommen. Das Festlegen dieses Schwellenwertes der Bewässerungswürdigkeit wurde durch die Mitarbeit des Landesexpertenkreises möglich.

Bei der Darstellung des langjährigen bayernweiten Trends, also der Entwicklung der Bewässerungsbedürftigkeit von 1991 bis 2050, wird entsprechend der Empfehlungen des Deutschen Wetterdienstes aus methodischen Gründen weitestgehend auf die Nennung absoluter Zahlen der Bewässerungsbedürftigkeit verzichtet. Dies hängt von der Verwendung der Klimaprojektionsdaten ab (vgl. Kapitel 0). Mit der Verwendung von globalgültigen Klimaszenarien (RCP-Szenarien) gehen Unsicherheiten einher, die sich in der regionalen Ausprägung von täglichen Klimadaten zeigen können. Da das entwickelte Modell die Bewässerungsbedürftigkeit auf Grundlage täglicher Verdunstungs- und Niederschlagsmengen bilanziert, gilt es diese Unsicherheit bei der Interpretation der Ergebnisse (insbesondere von absoluten Zahlen) zu berücksichtigen. Bei der Simulation der zukünftigen Klimabedingungen wurde aus diesem Grund auf das Kernensemble des Deutschen Wetterdienstes zurückgegriffen. Mit Berechnung von sechs verschiedenen Regionalklimaprojektionen und dessen Aggregation in einem Ergebnisdatensatz werden die Unsicherheiten der räumlichen Ausprägung der Klimaparameter reduziert. Beim Vergleich der Ex-Post-Periode und der Zukunft (vgl. Kapitel 4.2) wird die prozentuale Änderung der Bewässerungsbedürftigkeit, also der Entwicklungstrend von 1991 bis 2050, dargestellt. Anders als

im bayernweiten Trend, lassen sich für die Schwerpunktgebiete der Bewässerung (vgl. Kapitel 5) absolute Zahlen für ausgewählte bewässerungsintensive Kulturen darstellen.

Im Modell wird, aus Gründen der Vergleichbarkeit und mit Fokus auf der Analyse der Veränderung der Klimaparameter, eine gleichbleibende landwirtschaftliche Landnutzung angenommen. Diese wird durch die Landnutzungs- und Flächendaten aus dem Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystem (InVeKoS) aus dem Jahr 2016 als Basisjahr über die 60 Jahre des Simulationszeitraums angenommen. Dies stellt eine Vereinfachung der Realität dar, da bedingt durch die Frucht Änderungen der Flächennutzung nicht explizit berücksichtigt werden und langfristige Änderungen der Anbaustruktur außen vor bleiben. Implizit sind Änderungen, die mit der Fruchtfolge zusammenhängen, durch die Aggregation der Anbauflächen auf Gemeindeebene weitestgehend vernachlässigbar.

7 Fazit und Ausblick

Im Projekt wurde ein räumliches Modell entwickelt, mit dem die Bewässerungsbedürftigkeit in Bayern mengenmäßig und räumlich differenziert abgeschätzt werden kann. Es wurden vorangegangene Forschungen des Thünen-Instituts zur regionalen Bewässerungsbedürftigkeit aufgegriffen und weiterentwickelt. Diese Weiterentwicklungen beinhalten:

- das Abbilden von phänologischen Phasen in der Wurzeltiefenverteilung der landwirtschaftlichen Kulturen im Jahresverlauf,
- einen dynamischen Ansatz zu täglichen pflanzenspezifischen K_c -Verläufen im jahreszeitlichen Verlauf,
- eine indirekte Berücksichtigung der Bewässerungswürdigkeit durch Integration einer unteren Schwelle der Bewässerungsbedürftigkeit,
- eine Datenschnittstelle zu den Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes sowie automatische Auswertungsmethoden für den Vergleich von 30-jährigen Klimareferenzperioden,
- eine kulturspezifische Berücksichtigung von 21 verschiedenen (intensiv landwirtschaftlichen) Kulturaggregaten (Acker-, Gemüse- und Sonderkulturen).
- Dadurch konnte eine deutliche Verbesserung in der Abbildung der regionalen Bewässerungsbedürftigkeit erreicht werden.

Insgesamt zeigt sich, dass das Modell stark sensitiv auf die eingegangenen Klima-, Landnutzungs- und Kulturparameter reagiert. Dies wird besonders bei der Interpretation der räumlichen Muster der regionalen Bewässerungsbedürftigkeit deutlich, welche sehr gut mit den in Kapitel 3.6 dargestellten Bewässerungsschwerpunktgebieten Bayerns übereinstimmen. Die Ergebnisse für den Ex-Post-Zeitraum zeigen gute Übereinstimmungen mit den Werten aus der Praxis in Bayern. Auch die räumliche Differenzierung der regionalen Bewässerungsbedürftigkeit stimmt mit den wenigen statistischen Daten gut überein, die es zur Bewässerung gibt. Diese regionalen Unterschiede lassen sich im Wesentlichen auf die gute räumliche und zeitliche Auflösung der klimatischen Eingangsparameter sowie den Einsatz realer Landnutzungsverteilungen zurückführen, die eine regionalisierte Analyse überhaupt erst ermöglichen.

Die Modellergebnisse zeigen, dass klimawandelinduzierte Veränderungen wie die Verschiebung der Niederschläge in das Winterhalbjahr und die steigende Verdunstung einen Anstieg der Bewässerungsbedürftigkeit in Bayern zur Folge haben werden. Die Auswertung der Modellergebnisse legt offen, dass die Klimadaten einen erheblichen Einfluss auf den Bewässerungsbedarf haben können und einen hochsensitiven Eingangsparameter darstellen. Die sechs Ensemblemitglieder aus dem DWD-Kernensemble decken die Bandbreite innerhalb des RCP 8.5-Szenarios ausreichend ab, sodass die grundsätzlichen Unsicherheiten von regionalisierten Global-Klimamodellen reduziert werden konnten. Dennoch ergibt sich weiterer Forschungsbedarf. Für eine breitere Abdeckung der möglichen Folgen des Klimawandels sollte in weiteren Modelldurchläufen mit den RCP-Szenarien 2.6, 4.5 und 6.0 gerechnet werden.

Die regionale Bewässerungsbedürftigkeit ist im Wesentlichen durch die Eingangsparameter bestimmt. Für Regionen wie die Alpen, die von hohen Niederschlägen und geringen

Verdunstungsraten geprägt sind, wurde bis 2050 ein vergleichsweise geringe Bewässerungsbedürftigkeit (0–25 mm pro Jahr) ermittelt. In den eher kontinental geprägten Regionen Nord- und Westbayerns hingegen führen geringe Niederschläge bei gleichzeitig hohen Verdunstungsraten zu einem höheren Bewässerungsbedarf, der bis 2050 ansteigt. Durch die regionale Abbildung der Bewässerungsbedürftigkeit lassen sich Gebiete mit günstiger und ungünstiger Entwicklung ermitteln. Die Verfügbarkeit von Wasser für die Bewässerung ist schon heute in Teilen Bayerns gefährdet, in bestehenden Bewässerungsregionen wird sie sich zunehmend verringern. Trotz dieser räumlichen Heterogenität zeigt sich im landesweiten Durchschnitt ein mittlerer Anstieg des Zusatzwasserbedarfs um 19 % im Vergleich der Referenzperiode von 1991–2020 mit der Zukunftsperiode 2021–2050. Differenziert nach den Landnutzungsklassen lassen sich Steigerungen von 19 % im Ackerbau, 23 % im Anbau von Gemüsekulturen und 10 % bei den Sonderkulturen feststellen.

Die Nennung von absoluten Zahlen aus der Modellsimulation ist aus genannten Gründen (vgl. Kapitel 5) als methodisch kritisch zu bewerten und aus langjährigen Vergleichen von Klimaszenarien ist lediglich ein Trend abzubilden. Die Expert*innen in Bayern schätzen den derzeitigen Wasserbedarf für die landwirtschaftliche Bewässerung in ganz Bayern auf ~300 Mio. Kubikmeter pro Jahr. Unter Berücksichtigung des ermittelten bayernweiten Trends (+19 %) wäre im Jahr 2050 mit einem klimawandelinduzierten Anstieg der Bewässerungsbedürftigkeit auf ~357 Mio. Kubikmetern zu rechnen. In Einzeljahren mit extremen klimatischen Bedingungen, die beispielsweise dem Dürrejahr 2018 ähneln, ist von einer deutlich höheren Bewässerungsbedürftigkeit der bayerischen Landwirtschaft auszugehen.

Trotz einiger Modellunsicherheiten und den im Modell getroffenen Annahmen ist von einem klaren Trend auszugehen. Die klimawandelbedingten Veränderungen erhöhen die Bewässerungsbedürftigkeit. Insbesondere in Extremjahren steht die Landwirtschaft in Bayern vor Problemen und Herausforderungen im Umgang mit der Ressource Wasser. Dem Wassermanagement kommt eine Schlüsselrolle dabei zu, Nutzungskonflikte zu vermeiden und die landwirtschaftliche Produktion auf der einen Seite und ökologische Aspekte im Umgang mit dem Wasserhaushalt auf der anderen Seite angemessen zu berücksichtigen.

Neben der Bewässerungsbedürftigkeit sollten weitere Parameter bei der Ableitung von Handlungsstrategien der bayerischen Landwirtschaft an die klimawandelbedingten Anpassungen des Wassermanagements hinzugezogen werden. Neben der quantitativen Frage des Bewässerungsbedarfs und dessen klimawandelbedingtem Anstieg in der Zukunft, die Gegenstand der vorliegenden Studie waren, müssen ökonomische Auswirkungen (Bewässerungswürdigkeit) auf die landwirtschaftlichen Betriebe und Risiken für Landwirtschaft und Wasserhaushalt erkannt und Lösungen ausgearbeitet werden.

Die Bereitstellung der zusätzlichen Wassermengen für die Bewässerung wird in Zukunft nur dann umweltverträglich umgesetzt werden können, wenn die Bewässerung weiter optimiert wird. Optimierungsbedarf besteht bei der Bewässerungstechnik, einer Anpassung der Förderpolitik sowie bei einer zielgerichteten Bewässerungssteuerung und einem nachhaltigen Wassermanagement. Dies war jedoch nicht Gegenstand der vorliegenden Studie.

Literaturverzeichnis

- Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden (2005) Bodenkundliche Kartieranleitung: Mit 103 Tabellen und 31 Listen, fünfte verbesserte und erweiterte Auflage. Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele und Obermiller), 438 p
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements, Food and Agricultural Organisation [FAO] (ed) FAO irrigation and drainage paper 56, zu finden in <<http://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>> [zitiert am 3.5.2022]
- Azizi A, Bischoff N, Böttcher W, Brügger J, Ebeling L, Folkers M, Geßler AK, Henscher M, Herdtle D, Hoffmann S, Imwalle C, Kuhnt G, Marahrens S, Meer U (2010) Die Böden Deutschlands – Sehen, Erkunden, Verstehen: Ein Reiseführer, Umweltbundesamt [UBA] (ed), zu finden in <<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4161.pdf>> [zitiert am 2.5.2022]
- Bayerischer Landtag (2020) Bewässerungsbedarf landwirtschaftlicher und gärtnerischer Kulturen in Bayern: Schriftliche Anfrage der Abgeordneten Andreas Winhart, Christian Klingen, Gerd Mannes, Prof. Dr. Ingo Hahn, Ralf Stadler (AfD) vom 23.12.2019. Drucksache 18/6768
- Bayerisches Landesamt für Statistik (2021) Landwirtschaftliche Betriebe mit Bewässerungsmöglichkeit auf Freilandflächen und bewässerten Flächen 2009 und 2019 in Bayern: Auszug aus der Landwirtschaftszählung 2009 und 2019, zu finden in <https://www.statistik.bayern.de/mam/presse/2021/306_2021_33_c_landwirtschaftsz%C3%A4hlung_storymap_leistungstr%C3%A4ger_boden_bew%C3%A4sserung.xls> [zitiert am 2.5.2022]
- BGR [Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe] (2013) Ackerbauliches Ertragspotenzial der Böden in Deutschland: Bewertet nach dem Müncheberger Soil Quality Rating – Final Rating (1:1.000.000) auf Basis der BÜK1000N, zu finden in <https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Ressourcenbewertung/Ertragspotential/Ertragspotential_node.html> [zitiert am 2.5.2022]
- BGR [Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe] (2015a) Karte der Bodenarten in Oberböden Deutschlands 1: 1.000.000 (BOART 1000 OB), zu finden in <https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Informationsgrundlagen/Bodenkundliche_Karten_Datenbanken/Themenkarten/BOART1000OB/boart1000ob_node.html> [zitiert am 2.5.2022]
- BGR [Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe] (2015b) Nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum in Deutschland (NFKWE 1000), zu finden in <https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Projekte/Ressourcenbewertung_und_management_abgeschlossen/Bodenatlas/Bodenatlas_Deutschland.html> [zitiert am 2.5.2022]
- Bodmann F (2021) Weinanbaugebiet Franken – die Böden zählen. Webweinschule, zu finden in <<https://www.webweinschule.de/franken-wein/>> [zitiert am 2.5.2022]
- Braun F (2015) Neues aus dem Hopfenanbaugebiet Spalt: Hopfen-Rundschau International 2014/2015, zu finden in <https://www.deutscher-hopfen.de/HRI_14_15/18%20HRI%2014-15%20Spalt.pdf> [zitiert am 2.5.2022]

- DESTATIS [Statistisches Bundesamt] (2011) Agrarstrukturen in Deutschland – Einheit in Vielfalt – Regionale Ergebnisse der Landwirtschaftszählung 2010: Gemeinschaftsveröffentlichung, zu finden in <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Landwirtschaftliche-Betriebe/Publikationen/Downloads-Landwirtschaftliche-Betriebe/agrarstrukturen-in-deutschland-5411203109005.xlsx;jsessionid=E055BCA0E11A5E1989866B8F060B92A3.live722?__blob=publicationFile> [zitiert am 2.5.2022]
- DESTATIS [Statistisches Bundesamt] (2014) Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Bewässerung in landwirtschaftlichen Betrieben/Agrarstrukturenerhebung: Agrarstrukturenerhebung 2013, zu finden in <https://www.statistischebibliothek.de/mir/servlets/MCRFileNodeServlet/DEHeft_derivate_0026891/5411205139004.pdf> [zitiert am 25.1.2022]
- DESTATIS [Statistisches Bundesamt] (2017) Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Bewässerung in landwirtschaftlichen Betrieben/Agrarstrukturenerhebung: Agrarstrukturenerhebung 2016, zu finden in <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Landwirtschaftliche-Betriebe/Publikationen/Downloads-Landwirtschaftliche-Betriebe/betriebe-bewaesserung-5411205169005.xlsx;jsessionid=E055BCA0E11A5E1989866B8F060B92A3.live722?__blob=publicationFile> [zitiert am 2.5.2022]
- DESTATIS [Statistisches Bundesamt] (2021) Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Bewässerung in landwirtschaftlichen Betrieben/Landwirtschaftszählung: Landwirtschaftszählung 2020, zu finden in <https://www.statistischebibliothek.de/mir/servlets/MCRFileNodeServlet/DEHeft_derivate_00063044/5411205209005.xlsx> [zitiert am 2.5.2022]
- DWD [Deutscher Wetterdienst] (2020) Bodenfeuchte. Deutscher Wetterdienst [DWD], zu finden in <https://www.dwd.de/DE/fachnutzer/landwirtschaft/dokumentationen/allgemein/bodenfeuchte_profil_doku.html?nn=16102&lsbld=375416> [zitiert am 2.5.2022]
- DWD [Deutscher Wetterdienst] (2021a) Niederschlag. Interpolierte Messwerte für die Jahre 1961–2021
- DWD [Deutscher Wetterdienst] (2021b) Niederschlagsdaten aus dem DWD-Kernensemble. Regionalisierte Klimaprojektionsdaten für die Jahre 1990–2050
- DWD [Deutscher Wetterdienst] (2021c) Verdunstung nach FAO56-Grasreferenzverdunstung: Erstellt mit interpolierten Messwerten
- DWD [Deutscher Wetterdienst] (2021d) Verdunstungswerte nach FAO56-Grasreferenzverdunstung aus dem DWD-Kernensemble. Regionalisierte Klimaprojektionsdaten für die Jahre 1990–2050
- GeoBasis-DE/BKG [GeoBasis-DE/Bundesamt für Kartografie und Geodäsie] (2012) CORINE Land Cover 10ha (CLC10)
- GeoBasis-DE/BKG [GeoBasis-DE/Bundesamt für Kartografie und Geodäsie] (2018) Digitales Geländemodell Gitterweite 200 m (DGM200)
- GeoBasis-DE/BKG [GeoBasis-DE/Bundesamt für Kartografie und Geodäsie] (2019) Verwaltungsgebiete 1:250.000 mit Einwohnerzahlen (VG250-EW), Stand 31.12.2019, zu finden in <<https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/verwaltungsgebiete-1-250-000-mit-einwohnerzahlen-ebenen-stand-31-12-vg250-ew-ebenen-31-12.html>> [zitiert am 2.5.2022]
- GeoBasis-DE/BKG [GeoBasis-DE/Bundesamt für Kartografie und Geodäsie] (2020) Verwaltungsgebiete 1:250.000 (VG250), Stand 1.1.2020

- Heidt L (2009) Auswirkungen des Klimawandels auf die potenzielle Beregnungsbedürftigkeit Nordost-Niedersachsens, Landesamt für Berbau, Energie und Geologie [LBEG] (ed) Geobericht 13, zu finden in <https://nibis.lbeg.de/DOI/dateien/GB_13_Text_web_klein.pdf> [zitiert am 2.5.2022]
- HGU [Hochschule Geisenheim] (2021) Geisenheimer Bewässerungssteuerung 2021: mit kc-Werten für FAO56-Grasverdunstung. Geisenheim: Hochschule Geisenheim [HGU], zu finden in <https://www.hs-geisenheim.de/fileadmin/redaktion/FORSCHUNG/Institut_fuer_Gemuesebau/Ueberblick_Institut_fuer_Gemuesebau/Geisenheimer_Steuerung/kc-Werte_FAO_Grasverdunstung_2021.pdf> [zitiert am 2.5.2022]
- InVeKoS [Integriertes Verwaltungskontrollsystem] (2016) Landnutzungsinformationen 2016 aus der InVeKoS-Datenbank
- IPCC [Intergovernmental Panel on Climate Change] (2014) Klimaänderungen 2014: Synthesebericht. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum fünften Sachstandsbericht des zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen [IPCC]: Deutsche Übersetzung durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn, 2016. Pachauri RK, Meyer LA (eds)
- Kleber J (2020) Effizienter Wassereinsatz durch sachgerechte Bewässerungssteuerung: Meisterschule Heidelberg
- Kreins P, Anter J, Henseler M (2013) ERB-NRW-Projektbericht – Entwicklung des regionalen Beregnungsbedarfes für die Landwirtschaft: Studie im Auftrag des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen; Johann Heinrich von Thünen-Institut, Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei
- Kreins P, Henseler M, Anter J, Herrmann F, Wendland F (2015) Quantification of Climate Change Impact on Regional Agricultural Irrigation and Groundwater Demand. *Water Resour Manage* 29(10):3585–3600. DOI: 10.1007/s11269-015-1017-8
- LAP [Landesanstalt für Pflanzenbau Forchheim] (ed) Beregnung und Bewässerung landwirtschaftlicher Kulturen. Merkblätter für die umweltgerechte Landbewirtschaftung 24, zu finden in <https://ltz.landwirtschaft-bw.de/pb/site/pbs-bw-mlr/get/documents_E-2140231358/MLR.LEL/PB5Documents/ltz_ka/Service/Schriftenreihen/Merkblatt%20f%C3%BCr%20die%20Umweltgerechte%20Landbewirtschaftung/Merkblatt-Bew%C3%A4sserung_DL/Merkblatt%2024%20Beregnung%20und%20Bew%C3%A4sserung.pdf> [zitiert am 2.5.2022]
- LfL [Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft] (2021) Hopfenbau und Produktionstechnik: Bewässerung und Fertigation im Hopfenbau. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft [LfL], zu finden in <<https://www.lfl.bayern.de/ipz/hopfen/022514/index.php>> [zitiert am 2.5.2022]
- LfU [Bayerisches Landesamt für Umwelt] (2011) Entwurf einer kulturlandschaftlichen Gliederung Bayerns als Beitrag zur Biodiversität. Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt [LfU], zu finden in <<https://www.lfu.bayern.de/natur/kulturlandschaft/gliederung/index.htm>> [zitiert am 2.5.2022]
- LfU [Bayerisches Landesamt für Umwelt] (2017) Hydrogeologische Karte von Bayern 1:500.000 (HK500): HK500 Mittlere Grundwasserneubildung aus Niederschlag (1971–2000), zu finden in <https://www.lfu.bayern.de/umweltdaten/geodatendienste/index_detail.htm?id=c4609de2-40fa-4f4d-872c-c67fd5d43a1a&profil=WMS> [zitiert am 2.5.2022]

- LfU [Bayerisches Landesamt für Umwelt] (2021a) Korngrößen. Bayerisches Landesamt für Umwelt [LfU], zu finden in https://www.lfu.bayern.de/boden/boeden_brauchen_wissenschaft/physik/korngroessen/index.htm [zitiert am 2.5.2022]
- LfU [Bayerisches Landesamt für Umwelt] (2021b) Wasserentnahmen für die Bewässerung: Gemeinden mit erhöhtem Bewässerungsaufkommen. Abbildung Bayerisches Landesamt für Umwelt [LfU], zu finden in <https://www.lfu.bayern.de/wasser/bewaesserung/index.htm> [zitiert am 2.5.2022]
- LWK Niedersachsen [Landwirtschaftskammer Niedersachsen] (2008) No regret – Genug Wasser für die Landwirtschaft!?: Projektbericht. Uelzen: Landwirtschaftskammer Niedersachsen [LWK Niedersachsen], zu finden in <https://www.lwk-niedersachsen.de/download.cfm/file/10425.html> [zitiert am 2.5.2022]
- Meynen E, Schmithüsen J, Gellert J, Neef E, Müller-Miny H, Schultze J (1962) Naturräumliche Großlandschaften. Bereitgestellt auf der Website des Bayerischen Landesamtes für Umwelt, zu finden in <https://www.lfu.bayern.de/natur/naturraeume/index.htm> [zitiert am 2.5.2022]
- Müller M, Demmel M, Sander G (2020) Bewässerungs-App: Ein webbasiertes Entscheidungssystem für bedarfsgerechtes Bewässern. Freising: Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und Landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e. V. [ALB], Beratungsblatt bef1, zu finden in https://www.alb-bayern.de/De/Bewaesserung/BewaesserungsforumBayern/Ergebnisse/bewaesserungssteuerung-anleitung-funktionalitaet_bef1.html [zitiert am 2.5.2022]
- Münsterer J (2011) Untersuchungen möglicher Methoden zur Steuerung der Tröpfchenbewässerung: Jahresbericht 2011. Sonderkultur Hopfen, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft [LfL] (ed) Jahresbericht
- Paschold PJ, Kleber J, Mayer N (2009) Geisenheimer Bewässerungssteuerung. In: Dirksmeyer W, Sourell H (eds) Wasser im Gartenbau: Tagungsband zum Statusseminar am 9. und 10. Februar 2009 im Forum des vTI in Braunschweig. Organisiert im Auftrag des BMELV 238: pp 43–48
- Renger M, Strebel O (1982) Berechnungsbedürftigkeit der landwirtschaftlichen Nutzfläche in Niedersachsen, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und den Geologischen Landesämtern in der Bundesrepublik Deutschland. Geologisches Jahrbuch, zu finden in https://www.schweizerbart.de/publications/detail/isbn/9783510960187/Geologisches_Jahrbuch_Reihe_F_Heft [zitiert am 2.5.2022]
- Ssymank A (1994) Natur-Haupteinheiten. Bereitgestellt auf der Website des Bayerischen Landesamtes für Umwelt, zu finden in <https://www.lfu.bayern.de/natur/naturraeume/index.htm> [zitiert am 2.5.2022]
- StMUV [Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz] (ed) (2015) Klima-Report Bayern 2015: Klimawandel, Auswirkungen, Anpassungs- und Forschungsaktivitäten
- Stroh K, Garming H, Dirksmeyer W (2016) Entwicklung des Gemüsebaus in Deutschland von 2000–2015: Anbauregionen, Betriebsstrukturen, Gemüsearten und Handel, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei (TI). Thünen Working Paper 56

Anhang

Tabelle A.1: Gebildete Kulturaggregate der landwirtschaftlichen Landnutzung

Agg.	Benennung	Kulturgruppe	C1-Nutzcodes
1	Hopfen	Sonderkultur	170101
2	Wintergetreide	Ackerbau	110101, 110102, 110403, 110404, 110405, 110601, 110803, 111103
3	Sommergetreide	Ackerbau	110201, 110402, 110701, 110802, 110901, 110801, 111105, 111104
4	Körnermais	Ackerbau	111001, 111002
5	Silomais	Ackerbau	120205, 120206, 120207, 120208
6	Kartoffeln	Ackerbau	130201, 130202, 130203, 130204, 130206, 130207
7	Zuckerrüben	Ackerbau	130301, 130401, 130402, 130501, 130502
8	Sonstige Getreidearten	Ackerbau	111101, 111102, 111201, 111202, 120101, 120102
9	Hülsenfrüchte	Ackerbau	120301, 140102, 140103, 140104, 140106, 140202, 140203, 140204, 140205, 140206
10	Raps und weitere Ölfrüchte	Ackerbau	150101, 150201, 150301, 150401, 150501, 150503, 150504
11	Heil-, Duft- und Gewürzpflanzen	Sonderkultur	160101, 160202
12	Gurken	Gemüsebau	160205
13	Spargel	Gemüsebau	160208
14	Erdbeeren im Freiland	Gemüsebau	190104
15	Weiteres Gemüse im Freiland	Gemüsebau	160206, 160201, 160214, 160204
16	Blumen und Zierpflanzen im Freiland	Sonderkultur	160401
17	Samenvermehrung	Sonderkultur	160601, 160602, 160603, 160604
18	Handelsgewächse	Sonderkultur	170201, 170202, 170203, 170301, 170303, 170304, 170305
19	Kern-, Stein- und Beerenobst	Sonderkultur	190102, 190105, 190106, 190107, 190108, 190110, 190111, 190112, 190113, 190114, 190115, 190116, 190117, 190118, 190119
20	Wein	Sonderkultur	190201, 190203, 190205, 190206
21	Sonstige Dauerkulturen	Sonderkultur	190401, 190402, 190403, 190404

Anm.: Die 21 verwendeten Kulturaggregate der landwirtschaftlichen Landnutzung werden auf Basis der InVeKoS-Nutzcodes gebildet.

Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle A.2: Pflanzenkoeffizienten im jahreszeitlichen Verlauf, differenziert nach Kulturaggregaten

Agg.	Bezeichnung	Kc-Werte								Eintrittsdaten								
		S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	Ernte
1	Hopfen	0,3	0,1	0,4	0,7	1	1,1	0,8	0,5	1	91	105	154	175	196	238	252	259
2	Wintergetreide	0,3	0,5	0,9	0					1	84	112	189					213
3	Sommergetreide	0,3	0,5	0,9	0					1	88	112	189					224
4	Körnermais	0,3	0,5	0,6	0,8	1	0,1			1	126	154	175	203	254			283
5	Silomais	0,3	0,5	0,6	0,8	1				1	126	154	175	203				285
6	Kartoffeln	0,3	0,5	0,8	1,1	0				1	102	102	150	201				220
7	Zuckerrüben und weitere Hackfrüchte	0,3	0,3	0,5	0,8	1,1				1	98	126	154	195				287
8	Sonstige Getreidearten	0,3	0,4	0,7	0					1	112	217	223					231
9	Hülsenfrüchte	0,3	0,3	0,7	0,9	0,8				1	138	166	189	206				261
10	Raps und weitere Ölfrüchte	0,3	0,3	0,8	1					1	84	126	188					240
11	Heil-, Duft- und Gewürzpflanzen	0,3	0,3	0,7	0,8	0,7				1	112	126	160	178				245
12	Gurken	0,3	0,7	1,1	1,5					1	77	105	125					245
13	Spargel	0,3	0,8	1,3	0					1	98	126	251					168
14	Erdbeeren im Freiland	0,3	0,5	0,7	0,6	0,3				1	98	126	203	243				273
15	Weiteres Gemüse im Freiland	0,3	0,4	0,8	1,1					1	85	110	133					243
16	Blumen und Zierpflanzen im Freiland	0,3	1,1							1	77							287
17	Samenvermehrung	0,3	0,4	0,8						1	77	105	125					227
18	Handelsgewächse	0,3	0,4	0,8	1,1					1	98	126	153					219
19	Kern-, Stein- und Beerenobst	0,3	0,4	0,9	1,1	0,8				1	98	126	203					287
20	Wein	0,3	0,4	1	1,2	0,8				1	98	126	203	244				273
21	Sonstige Dauerkulturen	0,3	1,1							1	98	126						287

Anm.: Für jedes Kulturaggregat wurde ein typischer jahreszeitlicher Kc-Wert-Verlauf festgelegt. Die Kennung S1-S6 bezeichnet das jeweilige Entwicklungsstadium der Geisenheimer KC-Werte. S0 ist der Startpunkt im jahreszeitlichen Verlauf der KC-Werte außerhalb der Vegetationsperiode definiert. Auf diese Weise lässt sich der zeitliche Verlauf der Kc-Werte (links) mit ihren spezifischen Eintrittsdaten (rechts) abgleichen.

Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle A.3: Wurzeltiefen im jahreszeitlichen Verlauf, differenziert nach Kulturaggregaten

Agg.	Bezeichnung	Wurzeltiefen				Eintrittsdaten			
		S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
1	Hopfen	5	10	100	5	1	91	196	260
2	Wintergetreide	5	30	116	5	1	84	112	215
3	Sommergetreide	5	16	70	5	1	89	113	224
4	Körnermais	5	30	100	5	1	126	203	285
5	Silomais	5	30	75	5	1	67	203	295
6	Kartoffeln	5	15	60	5	1	102	220	221
7	Zuckerrüben und weitere Hackfrüchte	5	10	90	5	1	98	199	287
8	Sonstige Getreidearten	5	33	100	5	1	30	217	231
9	Hülsenfrüchte	5	10	60	5	1	111	191	261
10	Raps und weitere Ölfrüchte	5	10	75	5	1	84	189	240
11	Heil-, Duft- und Gewürzpflanzen	5	10	50	5	1	98	161	245
12	Gurken	5	10	40	5	1	77	126	245
13	Spargel	5	10	105	5	1	98	168	252
14	Erdbeeren im Freiland	5	10	50	5	1	98	203	301
15	Weiteres Gemüse im Freiland	5	10	50	5	1	62	131	243
16	Blumen und Zierpflanzen im Freiland	5	10	50	5	1	77	126	301
17	Samenvermehrung	5	10	50	5	1	77	126	227
18	Handelsgewächse	5	10	70	5	1	98	153	219
19	Kern-, Stein- und Beerenobst	5	10	80	5	1	98	229	301
20	Wein	5	10	80	5	1	98	245	301
21	Sonstige Dauerkulturen	5	10	80	5	1	98	245	301

Anm.: Für jedes Kulturaggregat wurde ein typischer jahreszeitlicher Wurzeltiefen-Verlauf festgelegt. Die Kennung S1–S6 bezeichnet das jeweiligen Entwicklungsstadium. Auf diese Weise lässt sich der zeitliche Verlauf der Durchwurzelungstiefen (links) mit ihren spezifischen Eintrittsdaten (rechts) abgleichen.

Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle A.4: Bewässerungsschwellen und Zielfeuchte, differenziert nach Kulturaggregaten

Agg.	Bezeichnung	Bewässerungsschwelle (in % nFK)	Zielfeuchte (in % nFK)
1	Hopfen	70	80
2	Wintergetreide	35	80
3	Sommergetreide	35	80
4	Körnermais	35	80
5	Silomais	35	80
6	Kartoffeln	50	80
7	Zuckerrüben und weitere Hackfrüchte	35	80
8	Sonstige Getreidearten	35	80
9	Hülsenfrüchte	30	80
10	Raps und weitere Ölfrüchte	35	80
11	Heil-, Duft- und Gewürzpflanzen	60	80
12	Gurken	70	80
13	Spargel	60	80
14	Erdbeeren im Freiland	35	80
15	Weiteres Gemüse im Freiland	60	80
16	Blumen und Zierpflanzen im Freiland	60	80
17	Samenvermehrung	60	80
18	Handelsgewächse	50	80
19	Kern-, Stein- und Beerenobst	35	80
20	Wein	35	80
21	Sonstige Dauerkulturen	35	80

Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle A.5: Absolute Bewässerungsbedürftigkeit in Schwerpunktgebiet 1 differenziert nach Kulturaggregaten

Aggregat		Schwerpunktgebiet 1		
Nr.	Bezeichnung	LF [ha]	1991–2020 [m ³]	2021–2050 [m ³]
1	Hopfen	0	0	0
6	Kartoffeln	444	667.604	764.974
7	Zuckerrüben	13.057	23.830.216	24.991.350
11	Heil-, Duft- und Gewürzpflanzen	166	172.914	195.850
12	Gurken	88	320.622	352.285
13	Spargel	358	459.015	520.876
14	Erdbeeren im Freiland	299	167.189	209.210
15	Weiteres Gemüse im Freiland	1.973	3.500.001	3.982.101
16	Blumen und Zierpflanzen im Freiland	151	366.892	399.909
17	Samenvermehrung	47	54.791	58.585
18	Handelsgewächse	41	80.988	88.558
19	Kern-, Stein- und Beerenobst	1.466	3.137.606	3.399.955
20	Wein	4.586	10.231.650	11.037.174
21	Sonstige Dauerkulturen	42	172.914	101.696
Kulturübergreifendes Mittel		22.718	43.162.400	46.102.523

Quelle: Eigene Berechnungen.

Tabelle A.6: Absolute Bewässerungsbedürftigkeit in Schwerpunktgebiet 2 differenziert nach Kulturaggregaten

Aggregat		Schwerpunktgebiet 2		
Nr.	Bezeichnung	LF [ha]	1991–2020 [m ³]	2021–2050 [m ³]
1	Hopfen	220	413.445	441.106
6	Kartoffeln	930	1.214.152	1.406.537
7	Zuckerrüben	652	958.355	1.065.065
11	Heil-, Duft- und Gewürzpflanzen	189	223.230	239.389
12	Gurken	2	5.962	6.375
13	Spargel	206	245.445	278.261
14	Erdbeeren im Freiland	98	53.238	66.575
15	Weiteres Gemüse im Freiland	1.524	2.626.191	2.985.687
16	Blumen und Zierpflanzen im Freiland	82	202.101	223.124
17	Samenvermehrung	9	6.169	8.444
18	Handelsgewächse	312	529.864	588.884
19	Kern-, Stein- und Beerenobst	459	899.149	966.467
20	Wein	1	2.097	2.268
21	Sonstige Dauerkulturen	517	223.230	1.098.798
Kulturübergreifendes Mittel		5.199	7.602.627	9.376.980

Quelle: Eigene Berechnungen.

Tabelle A.7: Absolute Bewässerungsbedürftigkeit in Schwerpunktgebiet 3 differenziert nach Kulturaggregaten

Aggregat		Schwerpunktgebiet 3		
Nr.	Bezeichnung	LF [ha]	1991–2020 [m ³]	2021–2050 [m ³]
1	Hopfen	69	110.367	118.027
6	Kartoffeln	12.155	15.082.836	17.399.714
7	Zuckerrüben	7.694	12.952.674	13.325.024
11	Heil-, Duft- und Gewürzpflanzen	463	272.591	338.984
12	Gurken	0	838	877
13	Spargel	1.247	1.699.932	1.847.179
14	Erdbeeren im Freiland	813	501.357	574.927
15	Weiteres Gemüse im Freiland	2.292	4.323.112	4.738.628
16	Blumen und Zierpflanzen im Freiland	61	160.958	170.184
17	Samenvermehrung	6	5.218	6.060
18	Handelsgewächse	57	37.063	47.139
19	Kern-, Stein- und Beerenobst	548	1.014.020	1.114.768
20	Wein	0	0	0
21	Sonstige Dauerkulturen	335	272.591	684.576
Kulturübergreifendes Mittel		25.738	36.433.557	40.366.087

Quelle: Eigene Berechnungen.

Tabelle A.8: Absolute Bewässerungsbedürftigkeit in Schwerpunktgebiet 4 differenziert nach Kulturaggregaten

Aggregat		Schwerpunktgebiet 4		
Nr.	Bezeichnung	LF [ha]	1991–2020 [m ³]	2021–2050 [m ³]
1	Hopfen	15.569	26.285.917	28.285.812
6	Kartoffeln	3.371	3.798.541	4.296.374
7	Zuckerrüben	3.377	4.890.076	4.924.512
11	Heil-, Duft- und Gewürzpflanzen	135	128.502	135.740
12	Gurken	36	122.097	134.273
13	Spargel	512	607.868	653.954
14	Erdbeeren im Freiland	338	126.152	141.816
15	Weiteres Gemüse im Freiland	898	1.150.133	1.301.813
16	Blumen und Zierpflanzen im Freiland	83	113.886	126.084
17	Samenvermehrung	203	99.240	123.535
18	Handelsgewächse	77	59.578	70.199
19	Kern-, Stein- und Beerenobst	483	449.508	521.578
20	Wein	0	138	249
21	Sonstige Dauerkulturen	617	128.502	666.659
Kulturübergreifendes Mittel		25.698	37.960.137	41.382.600

Quelle: Eigene Berechnungen.

Tabelle A.9: Absolute Bewässerungsbedürftigkeit in Schwerpunktgebiet 5 differenziert nach Kulturaggregaten

Aggregat		Schwerpunktgebiet 5		
Nr.	Bezeichnung	LF [ha]	1991–2020 [m ³]	2021–2050 [m ³]
1	Hopfen	0	0	0
6	Kartoffeln	3.044	3.533.565	3.874.407
7	Zuckerrüben	7.346	10.142.178	9.892.138
11	Heil-, Duft- und Gewürzpflanzen	27	25.534	26.738
12	Gurken	640	1.682.161	1.876.301
13	Spargel	90	109.538	124.304
14	Erdbeeren im Freiland	355	75.131	110.402
15	Weiteres Gemüse im Freiland	3.664	3.505.396	4.451.135
16	Blumen und Zierpflanzen im Freiland	10	18.060	20.449
17	Samenvermehrung	25	15.607	19.138
18	Handelsgewächse	5	6.754	7.288
19	Kern-, Stein- und Beerenobst	35	59.735	61.079
20	Wein	0	0	0
21	Sonstige Dauerkulturen	39	25.534	93.620
Kulturübergreifendes Mittel		15.280	19.199.191	20.556.999

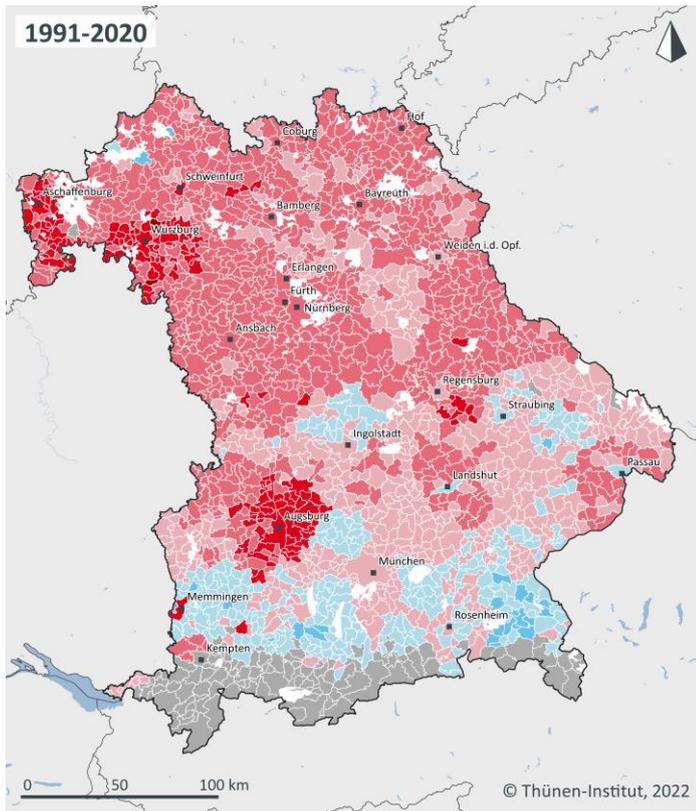
Quelle: Eigene Berechnungen.

Tabelle A.10: Absolute Bewässerungsbedürftigkeit in Schwerpunktgebiet 6 differenziert nach Kulturaggregaten

Aggregat		Schwerpunktgebiet 6		
Nr.	Bezeichnung	LF [ha]	1991–2020 [m ³]	2021–2050 [m ³]
1	Hopfen	0	0	0
6	Kartoffeln	9.633	10.501.471	12.583.848
7	Zuckerrüben	11.371	14.245.546	14.942.547
11	Heil-, Duft- und Gewürzpflanzen	158	140.669	151.341
12	Gurken	97	317.423	343.830
13	Spargel	324	462.067	492.116
14	Erdbeeren im Freiland	529	224.498	272.355
15	Weiteres Gemüse im Freiland	1.756	2.549.759	2.976.364
16	Blumen und Zierpflanzen im Freiland	26	44.033	50.137
17	Samenvermehrung	155	100.239	130.105
18	Handelsgewächse	25	39.938	44.199
19	Kern-, Stein- und Beerenobst	173	301.624	334.109
20	Wein	1	2.530	2.870
21	Sonstige Dauerkulturen	41	140.669	85.320
Kulturübergreifendes Mittel		24.289	29.070.467	32.409.139

Quelle: Eigene Berechnungen.

Karte A.11: Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Ackerbaukulturen (1991–2020 und 2021–2050)

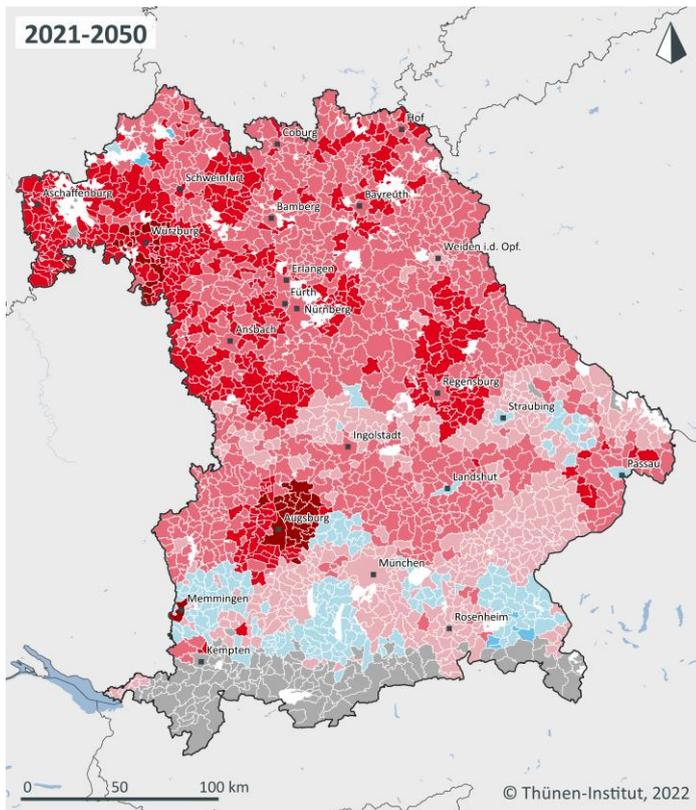


Ackerbau

Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Ackerbaukulturen je Gemeinde in Bayern im Zeitraum 1991-2020

Bewässerungsbedürftigkeit (mm/a)

- ≤25
- >25 bis 50
- >50 bis 75
- >75 bis 100
- >100 bis 125
- >125 bis 150
- ≥150
- Keine Daten
- Städte



Ackerbau

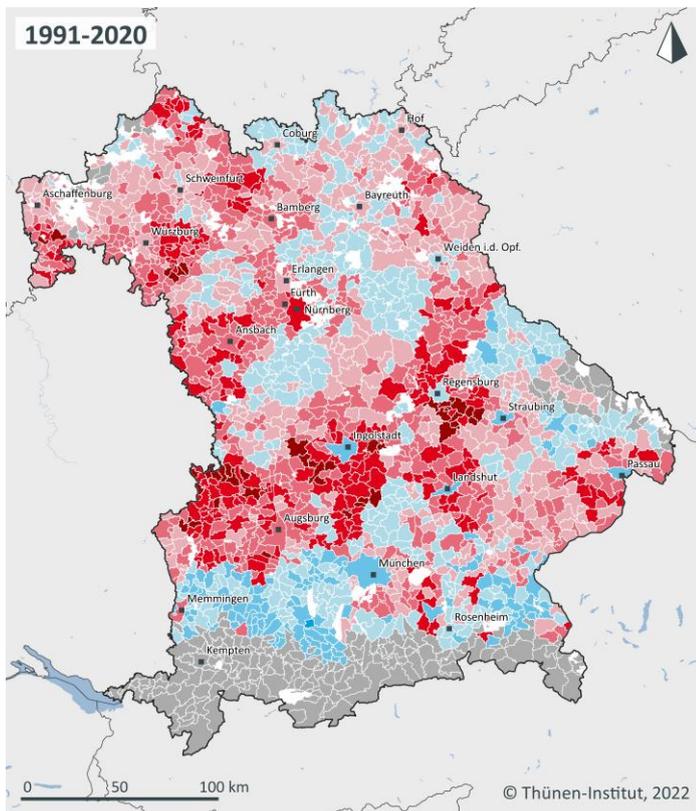
Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Ackerbaukulturen je Gemeinde in Bayern im Zeitraum 2021-2050

Bewässerungsbedürftigkeit (mm/a)

- ≤25
- >25 bis 50
- >50 bis 75
- >75 bis 100
- >100 bis 125
- >125 bis 150
- ≥150
- Keine Daten
- Städte

Quelle: Eigene Berechnungen.

Karte A.12: Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Wintergetreide (1991–2020 und 2021–2050)

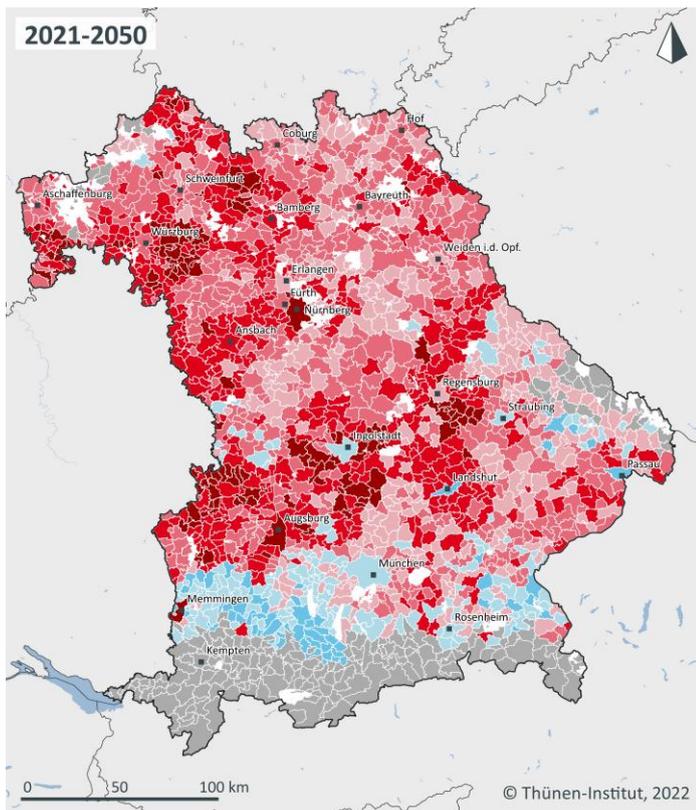


Wintergetreide

Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Wintergetreide je Gemeinde in Bayern für den Zeitraum 1991-2020 (inklusive Winterweizen, Winterroggen, Wintergerste, Winterhafter, Dinkel und Wintermengengetreide)

Bewässerungsbedürftigkeit (mm/a)

- ≤25
- >25 bis 50
- >50 bis 75
- >75 bis 100
- >100 bis 125
- >125 bis 150
- ≥150
- Keine Daten
- Städte



Wintergetreide

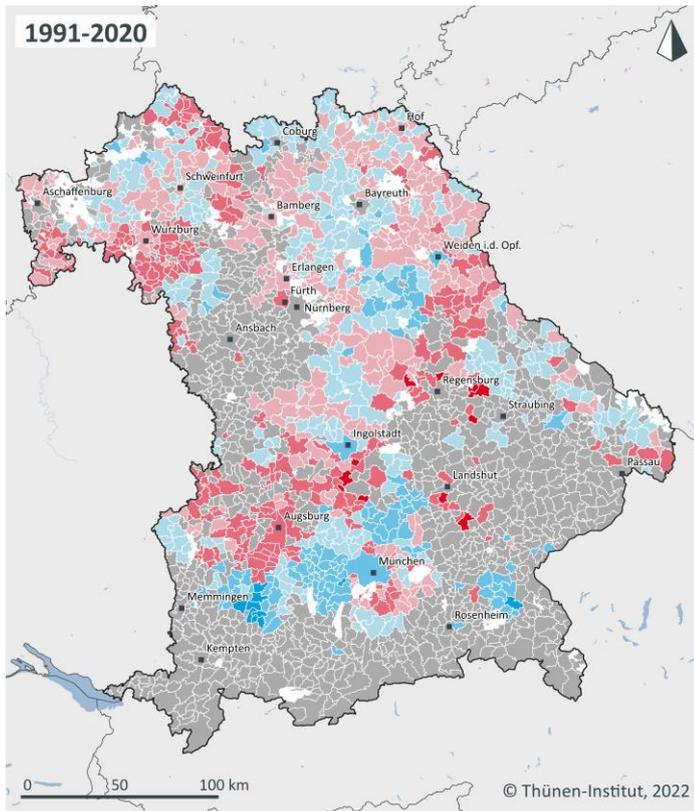
Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Wintergetreide je Gemeinde in Bayern für den Zeitraum 2021-2050 (inklusive Winterweizen, Winterroggen, Wintergerste, Winterhafter, Dinkel und Wintermengengetreide)

Bewässerungsbedürftigkeit (mm/a)

- ≤25
- >25 bis 50
- >50 bis 75
- >75 bis 100
- >100 bis 125
- >125 bis 150
- ≥150
- Keine Daten
- Städte

Quelle: Eigene Berechnungen.

Karte A.13: Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Sommergetreide (1991–2020 und 2021–2050)

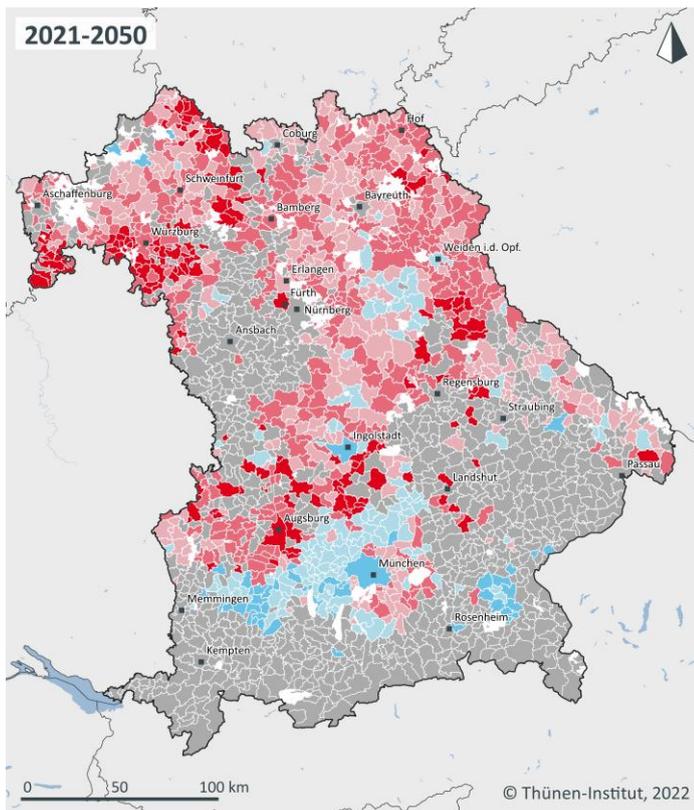


Sommergetreide

Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Sommergetreide je Gemeinde in Bayern für den Zeitraum 1991-2020 (inklusive Sommerweizen, Sommerroggen, Sommergerste, Sommerhafer, Hirse, Hafer und Sommermenggetreide)

Bewässerungsbedürftigkeit (mm/a)

- ≤25
- >25 bis 50
- >50 bis 75
- >75 bis 100
- >100 bis 125
- >125 bis 150
- ≥150
- Keine Daten
- Städte



Sommergetreide

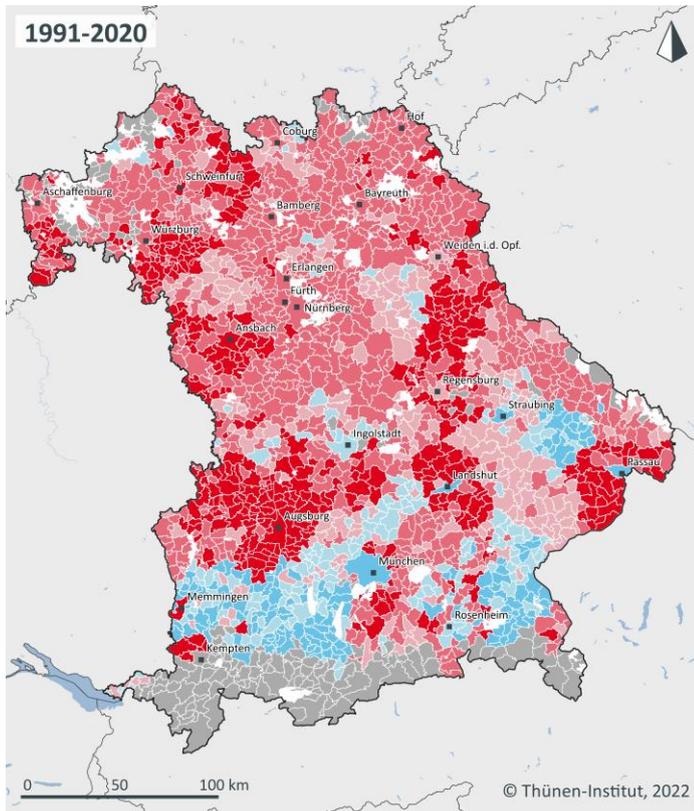
Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Sommergetreide je Gemeinde in Bayern für den Zeitraum 2021-2050 (inklusive Sommerweizen, Sommerroggen, Sommergerste, Sommerhafer, Hirse, Hafer und Sommermenggetreide)

Bewässerungsbedürftigkeit (mm/a)

- ≤25
- >25 bis 50
- >50 bis 75
- >75 bis 100
- >100 bis 125
- >125 bis 150
- ≥150
- Keine Daten
- Städte

Quelle: Eigene Berechnungen.

Karte A.14: Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Silomais (1991–2020 und 2021–2050)

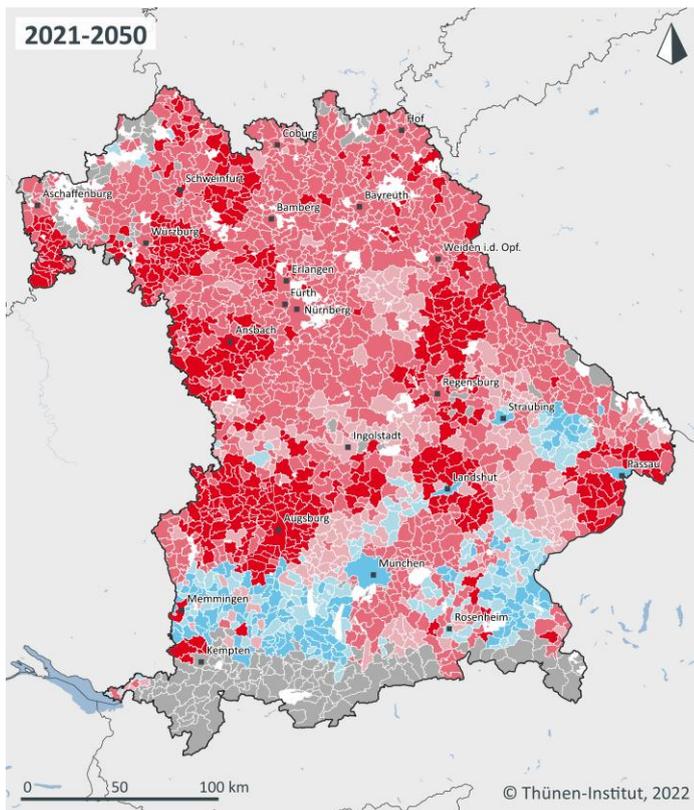


Silomais

Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Silomais je Gemeinde in Bayern für den Zeitraum 1991-2020

Bewässerungsbedürftigkeit (mm/a)

- ≤25
- >25 bis 50
- >50 bis 75
- >75 bis 100
- >100 bis 150
- >150 bis 200
- ≥200
- Keine Daten
- Städte



Silomais

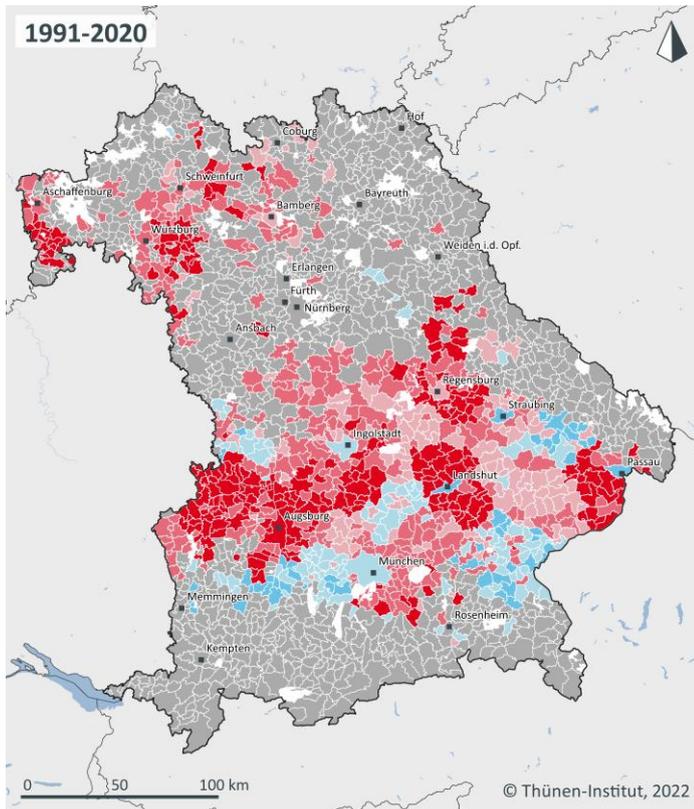
Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Silomais je Gemeinde in Bayern für den Zeitraum 2021-2050

Bewässerungsbedürftigkeit (mm/a)

- ≤25
- >25 bis 50
- >50 bis 75
- >75 bis 100
- >100 bis 150
- >150 bis 200
- ≥200
- Keine Daten
- Städte

Quelle: Eigene Berechnungen.

Karte A.15: Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Körnermais (1991–2020 und 2021–2050)

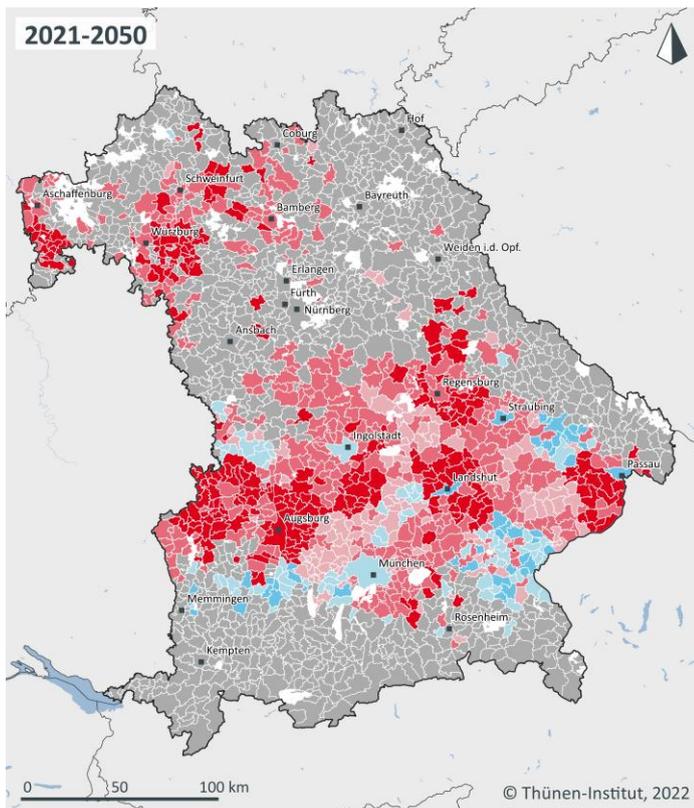


Körnermais

Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Körnermais je Gemeinde in Bayern für den Zeitraum 1991-2020

Bewässerungsbedürftigkeit (mm/a)

- ≤25
- >25 bis 50
- >50 bis 75
- >75 bis 100
- >100 bis 150
- >150 bis 200
- ≥200
- Keine Daten
- Städte



Körnermais

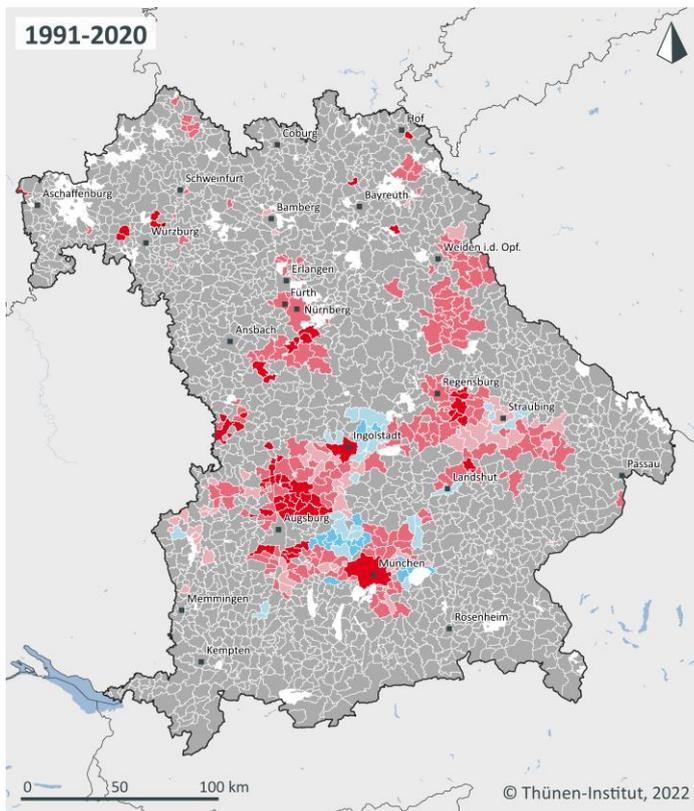
Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Körnermais je Gemeinde in Bayern für den Zeitraum 2021-2050

Bewässerungsbedürftigkeit (mm/a)

- ≤25
- >25 bis 50
- >50 bis 75
- >75 bis 100
- >100 bis 150
- >150 bis 200
- ≥200
- Keine Daten
- Städte

Quelle: Eigene Berechnungen.

Karte A.16: Durchschnittliche jährliche potenzielle Bewässerungsbedürftigkeit von Kartoffeln (1991–2020 und 2021–2050)

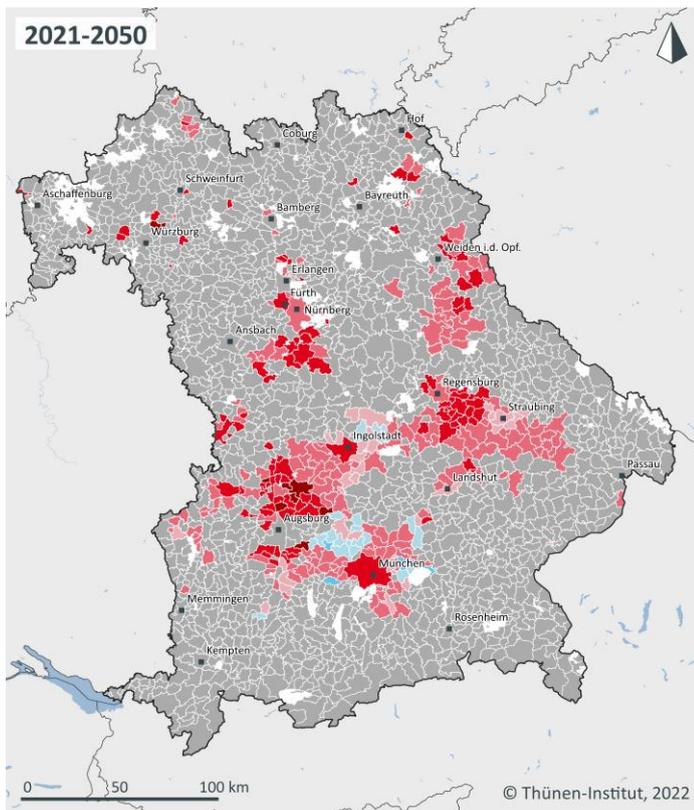


Kartoffeln

Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Kartoffeln je Gemeinde in Bayern für den Zeitraum 1991-2020 (inklusive Früh-, Futter-, Industrie-, Pflanzkartoffeln sowie Sonstige Kartoffeln)

Bewässerungsbedürftigkeit (mm/a)

- ≤25
- >25 bis 50
- >50 bis 75
- >75 bis 100
- >100 bis 150
- >150 bis 200
- ≥200
- Keine Daten
- Städte



Kartoffeln

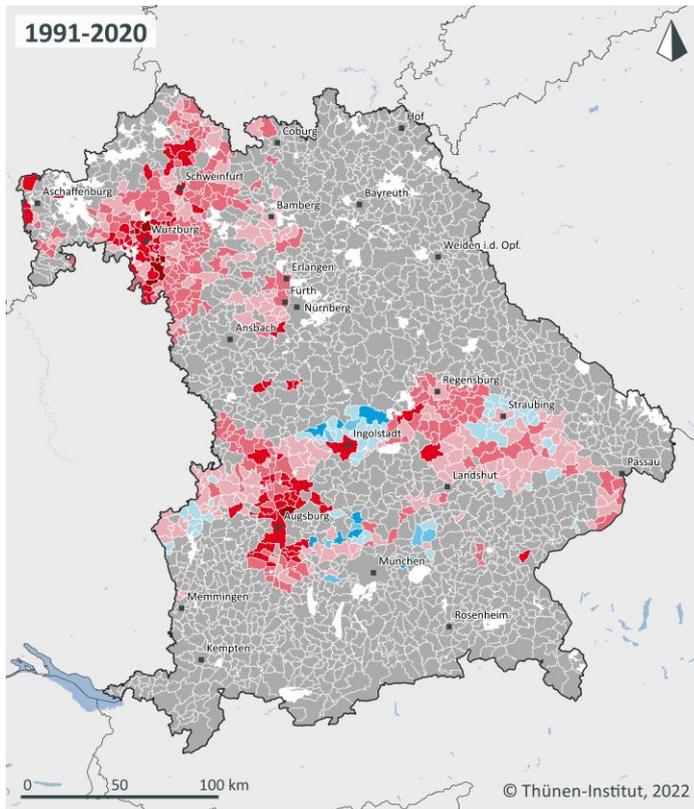
Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Kartoffeln je Gemeinde in Bayern für den Zeitraum 2021-2050 (inklusive Früh-, Futter-, Industrie-, Pflanzkartoffeln sowie Sonstige Kartoffeln)

Bewässerungsbedürftigkeit (mm/a)

- ≤25
- >25 bis 50
- >50 bis 75
- >75 bis 100
- >100 bis 150
- >150 bis 200
- ≥200
- Keine Daten
- Städte

Quelle: Eigene Berechnungen.

Karte A.17: Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Zuckerrüben und weiteren Hackfrüchten (1991–2020 und 2021–2050)

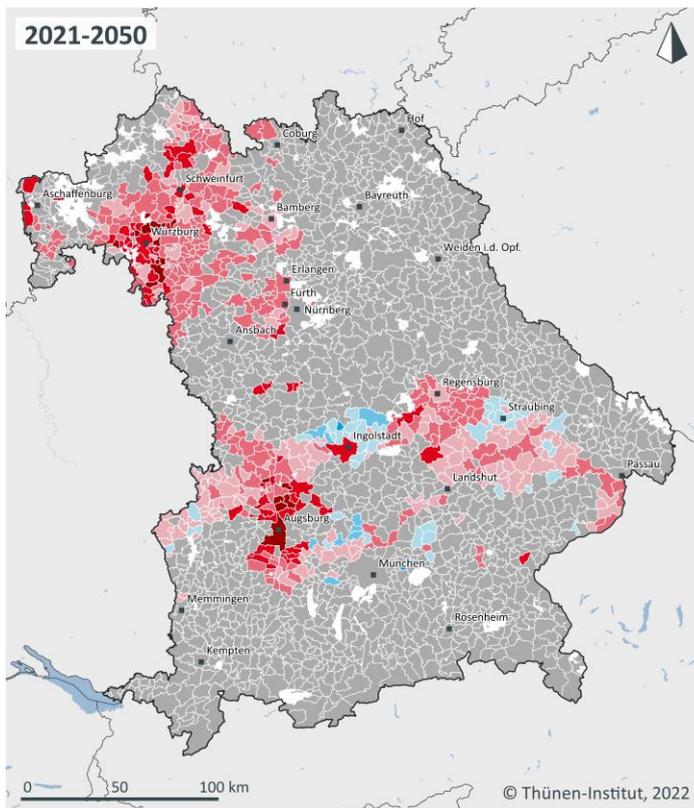


Zuckerrüben

Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Zuckerrüben je Gemeinde in Bayern für den Zeitraum 1991-2020 (inklusive Zucker-, Runkel-, Futter- und Kohl-Steckrüben, Futterhackfrüchte sowie Sonstige Hackfrüchte)

Bewässerungsbedürftigkeit (mm/a)

- ≤25
- >25 bis 50
- >50 bis 100
- >100 bis 150
- >150 bis 200
- >200 bis 250
- ≥250
- Keine Daten
- Städte



Zuckerrüben

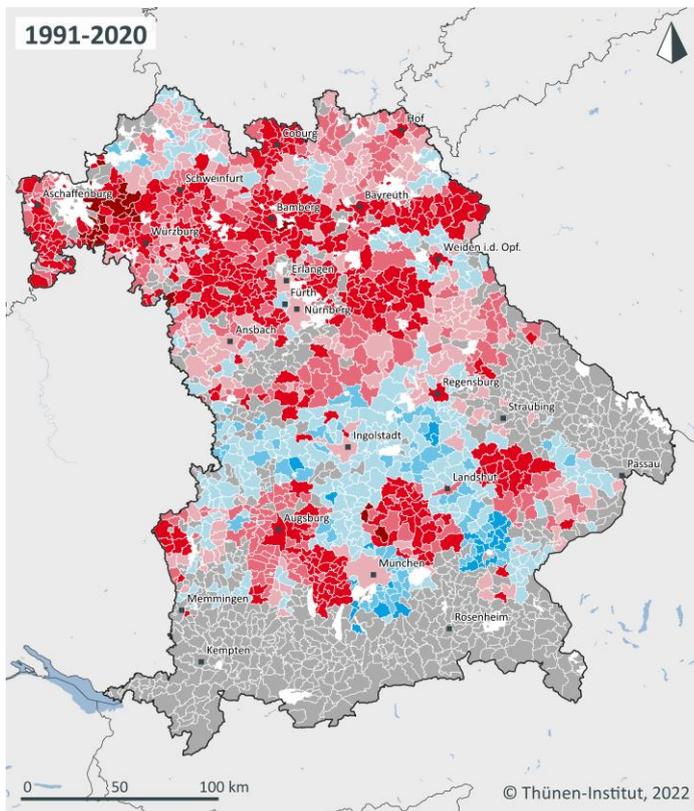
Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Zuckerrüben je Gemeinde in Bayern für den Zeitraum 2021-2050 (inklusive Zucker-, Runkel-, Futter- und Kohl-Steckrüben, Futterhackfrüchte sowie Sonstige Hackfrüchte)

Bewässerungsbedürftigkeit (mm/a)

- ≤25
- >25 bis 50
- >50 bis 100
- >100 bis 150
- >150 bis 200
- >200 bis 250
- ≥250
- Keine Daten
- Städte

Quelle: Eigene Berechnungen.

Karte A.18: Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Raps und weiteren Ölfrüchten (1991–2020 und 2021–2050)

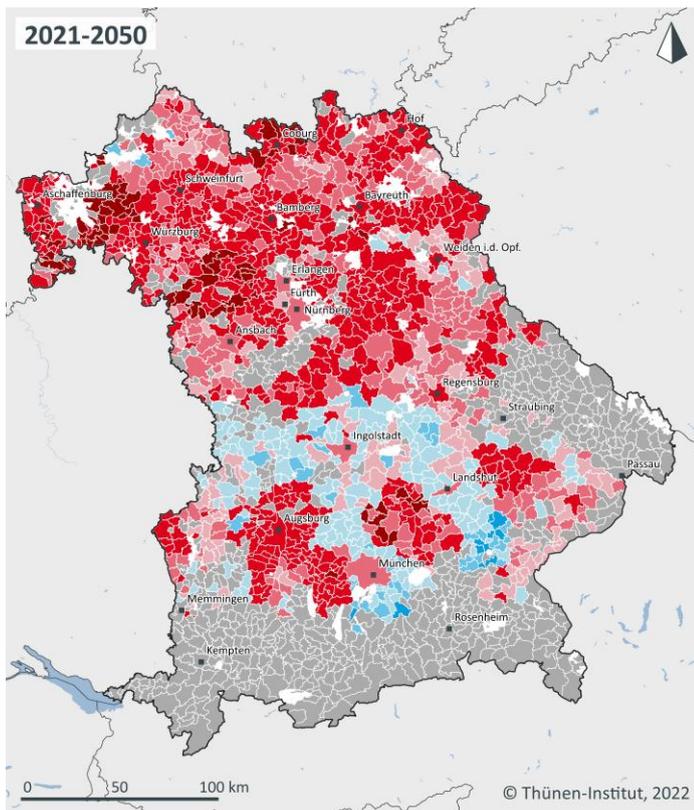


Raps und weitere Ölfrüchte

Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Winter- und Sommerraps, Sonnenblumen, Öllein und Sonstigen Ölfrüchten für den Zeitraum 1991-2020

Bewässerungsbedürftigkeit (mm/a)

- ≤25
- >25 bis 50
- >50 bis 100
- >100 bis 125
- >125 bis 250
- >150 bis 200
- ≥200
- Keine Daten
- Städte



Raps und weitere Ölfrüchte

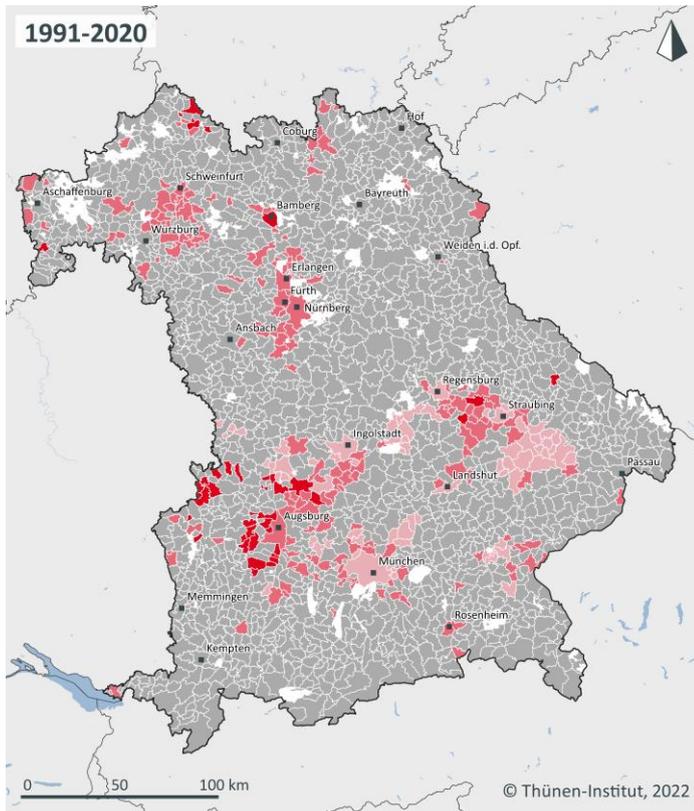
Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Winter- und Sommerraps, Sonnenblumen, Öllein und Sonstigen Ölfrüchten für den Zeitraum 2021-2050

Bewässerungsbedürftigkeit (mm/a)

- ≤25
- >25 bis 50
- >50 bis 100
- >100 bis 125
- >125 bis 250
- >150 bis 200
- ≥200
- Keine Daten
- Städte

Quelle: Eigene Berechnungen.

Karte A.19: Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Gemüsekulturen (1991–2020 und 2021–2050)

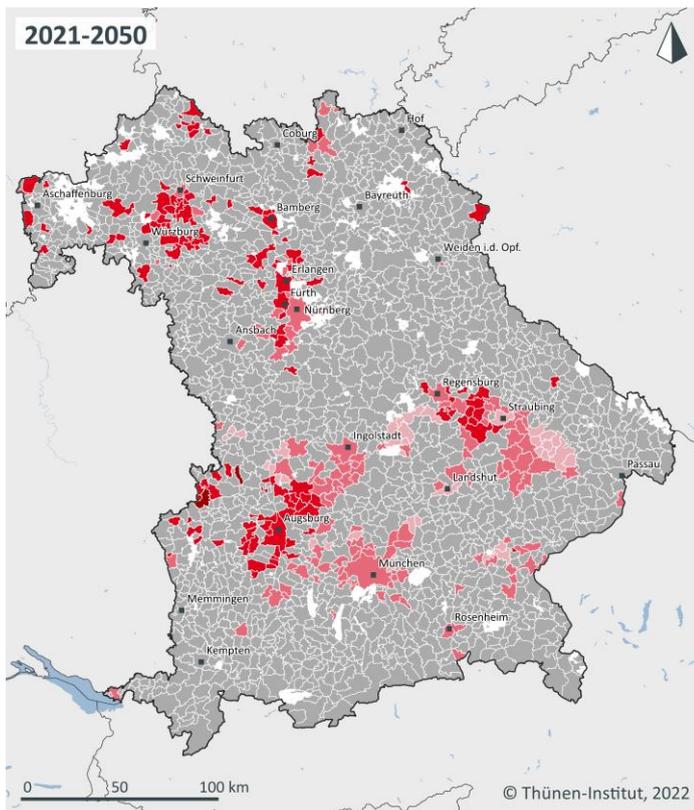


Gemüsebau

Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Gemüsekulturen je Gemeinde in Bayern für den Zeitraum 1991-2020

Bewässerungsbedürftigkeit (mm/a)

- ≤25
- >25 bis 50
- >50 bis 100
- >100 bis 150
- >150 bis 200
- >200 bis 250
- ≥250
- Keine Daten
- Städte



Gemüsebau

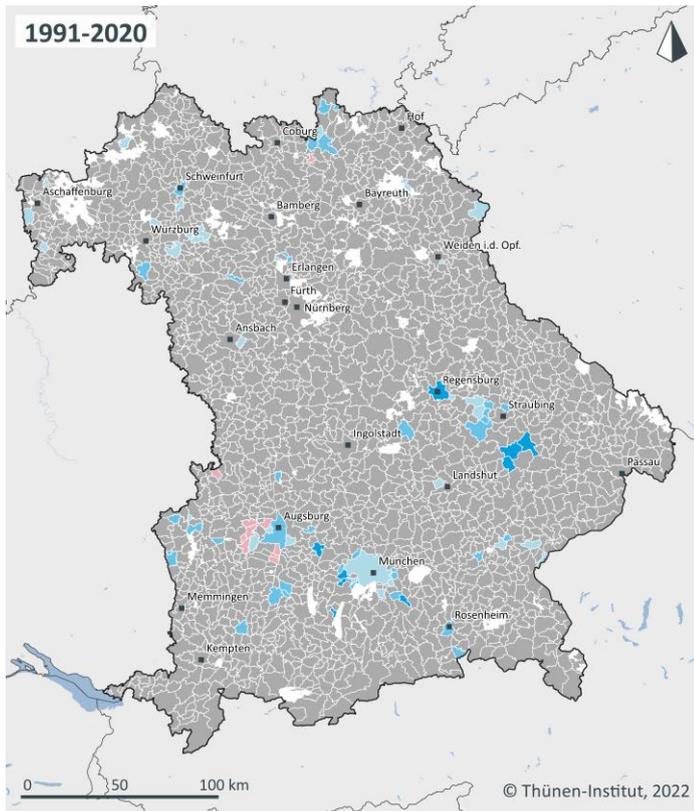
Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Gemüsekulturen je Gemeinde in Bayern für den Zeitraum 2021-2050

Bewässerungsbedürftigkeit (mm/a)

- ≤25
- >25 bis 50
- >50 bis 100
- >100 bis 150
- >150 bis 200
- >200 bis 250
- ≥250
- Keine Daten
- Städte

Quelle: Eigene Berechnungen.

Karte A.20: Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Erdbeeren (1991–2020 und 2021–2050)

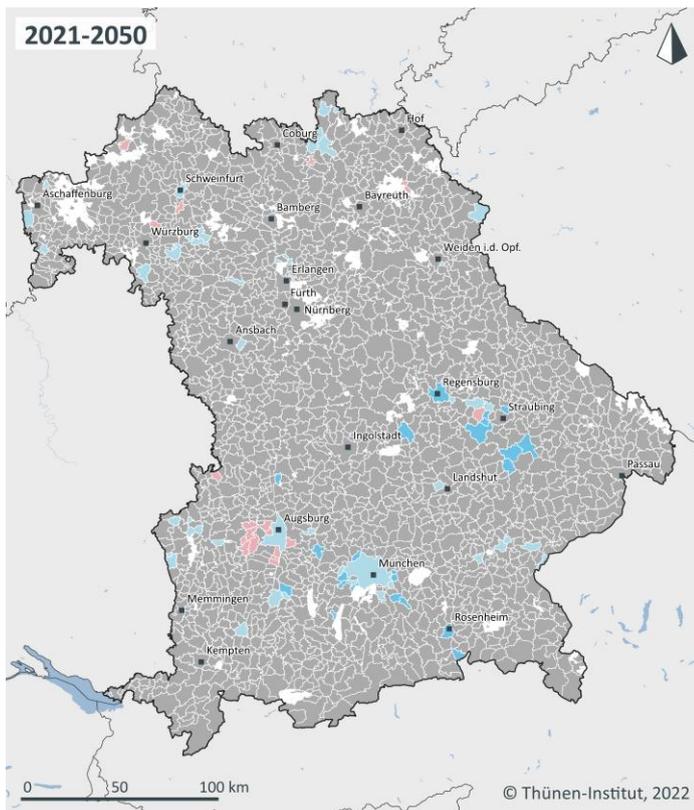


Erdbeeren

Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Erdbeeren je Gemeinde in Bayern für den Zeitraum 1991-2020

Bewässerungsbedürftigkeit (mm/a)

- ≤25
- >25 bis 50
- >50 bis 75
- >75 bis 100
- >100 bis 125
- >125 bis 150
- ≥150
- Keine Daten
- Städte



Erdbeeren

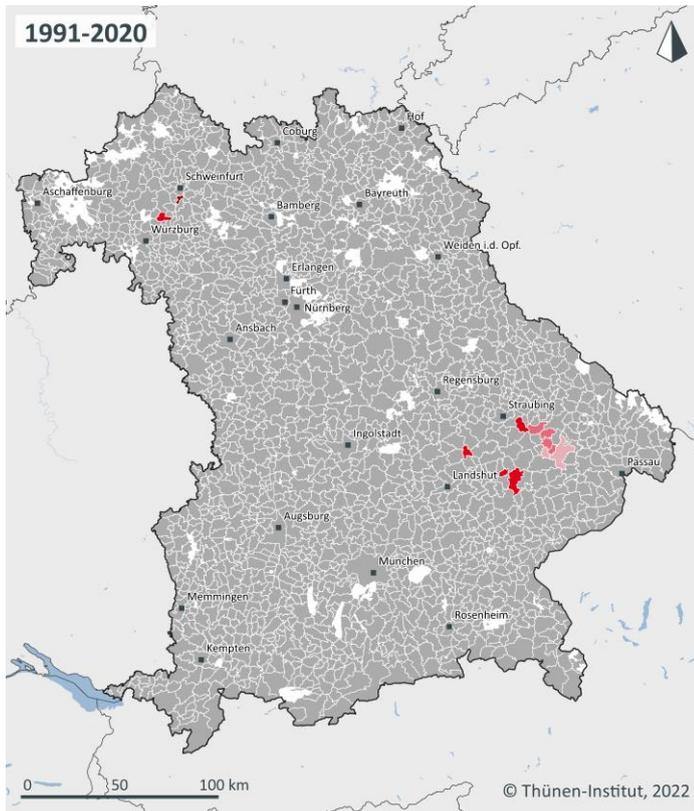
Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Erdbeeren je Gemeinde in Bayern für den Zeitraum 2021-2050

Bewässerungsbedürftigkeit (mm/a)

- ≤25
- >25 bis 50
- >50 bis 75
- >75 bis 100
- >100 bis 125
- >125 bis 150
- ≥150
- Keine Daten
- Städte

Quelle: Eigene Berechnungen.

Karte A.21: Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Gurken (Einlegegurken) (1991–2020 und 2021–2050)

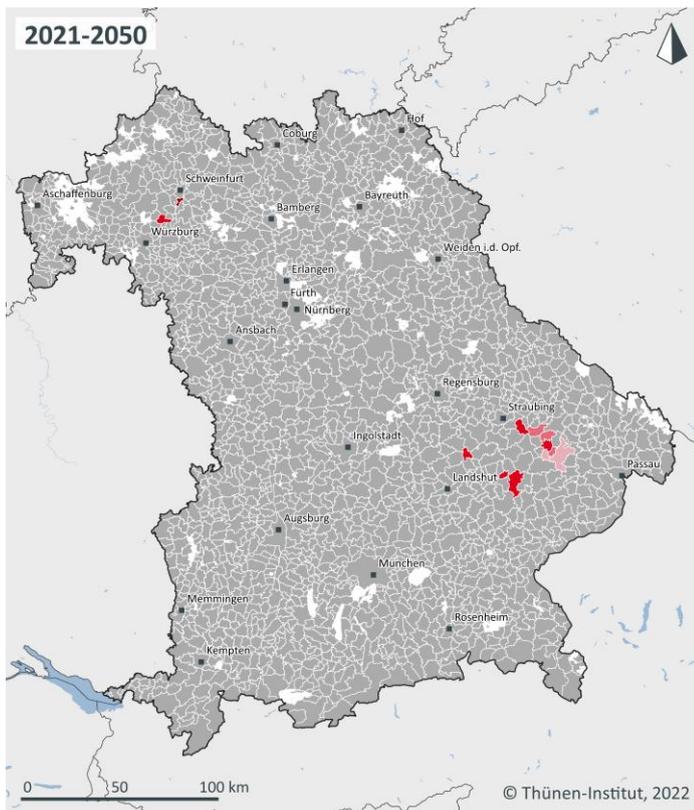


Gurken

Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Gurken je Gemeinde in Bayern für den Zeitraum 1991-2020

Bewässerungsbedürftigkeit (mm/a)

- ≤25
- >25 bis 50
- >50 bis 100
- >100 bis 200
- >200 bis 300
- >300 bis 400
- ≥400
- Keine Daten
- Städte



Gurken

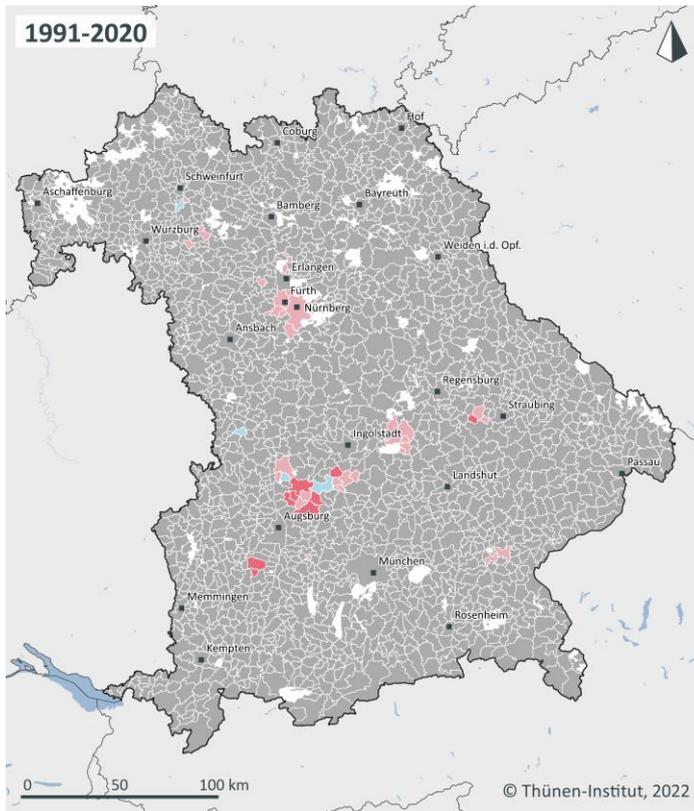
Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Gurken je Gemeinde in Bayern für den Zeitraum 2021-2050

Bewässerungsbedürftigkeit (mm/a)

- ≤25
- >25 bis 50
- >50 bis 100
- >100 bis 200
- >200 bis 300
- >300 bis 400
- ≥400
- Keine Daten
- Städte

Quelle: Eigene Berechnungen.

Karte A.22: Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Spargel (1991–2020 und 2021–2050)

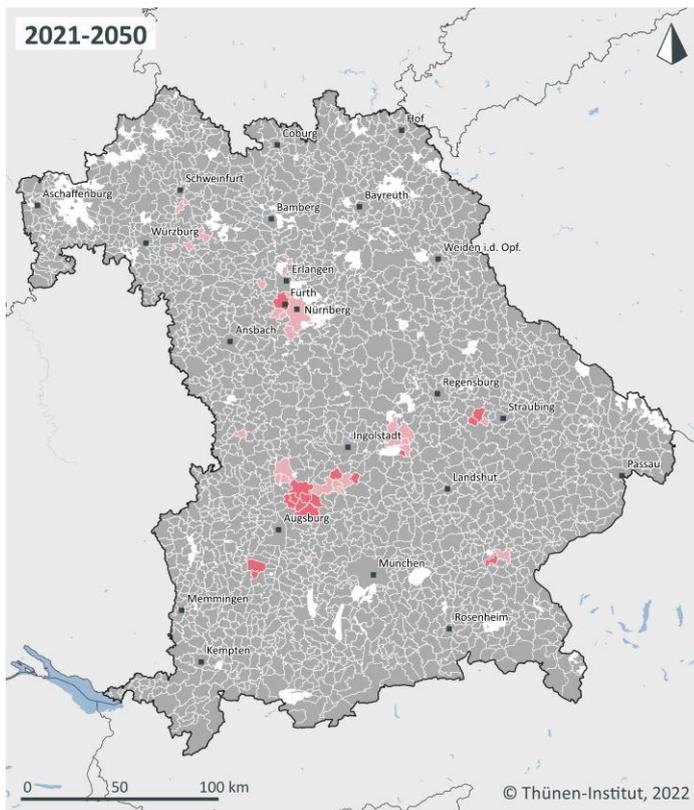


Spargel

Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Spargel je Gemeinde in Bayern für den Zeitraum 1991-2020

Bewässerungsbedürftigkeit (mm/a)

- ≤25
- >25 bis 50
- >50 bis 100
- >100 bis 150
- >150 bis 200
- >200 bis 250
- ≥250
- Keine Daten
- Städte



Spargel

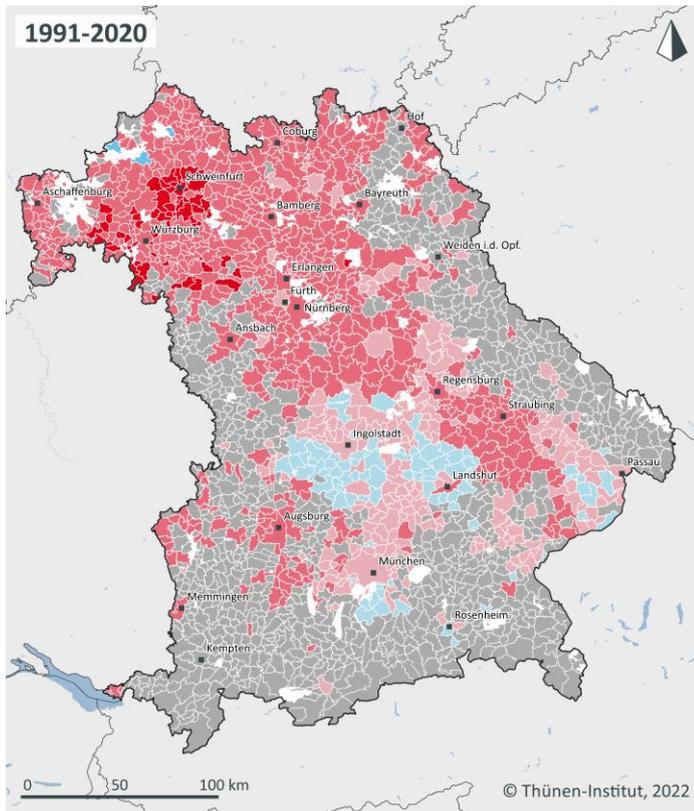
Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Spargel je Gemeinde in Bayern für den Zeitraum 2021-2050

Bewässerungsbedürftigkeit (mm/a)

- ≤25
- >25 bis 50
- >50 bis 100
- >100 bis 150
- >150 bis 200
- >200 bis 250
- ≥250
- Keine Daten
- Städte

Quelle: Eigene Berechnungen.

Karte A.23: Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Sonderkulturen (1991–2020 und 2021–2050)

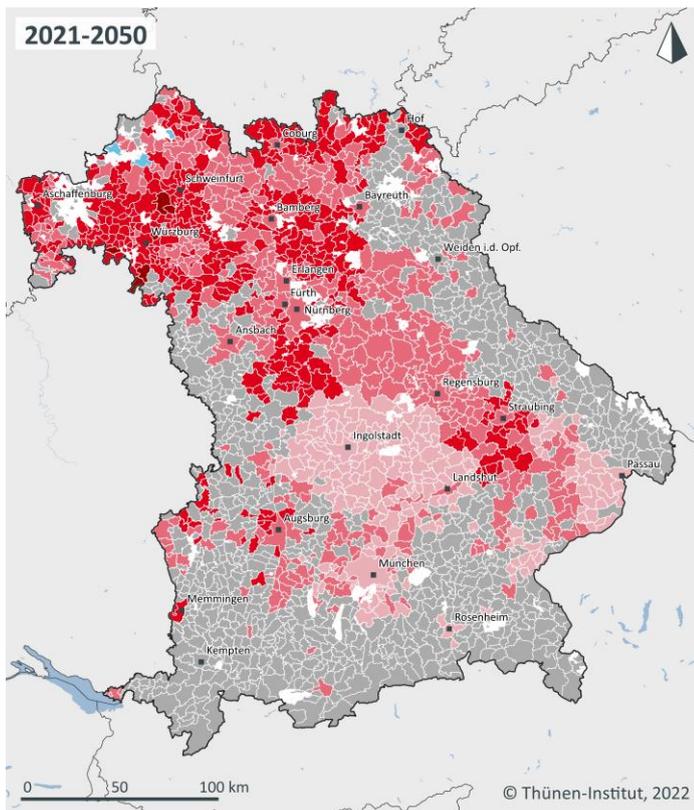


Sonderkulturen

Durchschnittliche jährliche potenzielle Bewässerungsbedürftigkeit von Sonderkulturen je Gemeinde in Bayern für den Zeitraum 1991-2020

Potenzielle Bewässerungsbedürftigkeit (mm/a)

- ≤25
- >25 bis 50
- >50 bis 100
- >100 bis 150
- >150 bis 200
- >200 bis 250
- ≥250
- Keine Daten
- Städte



Sonderkulturen

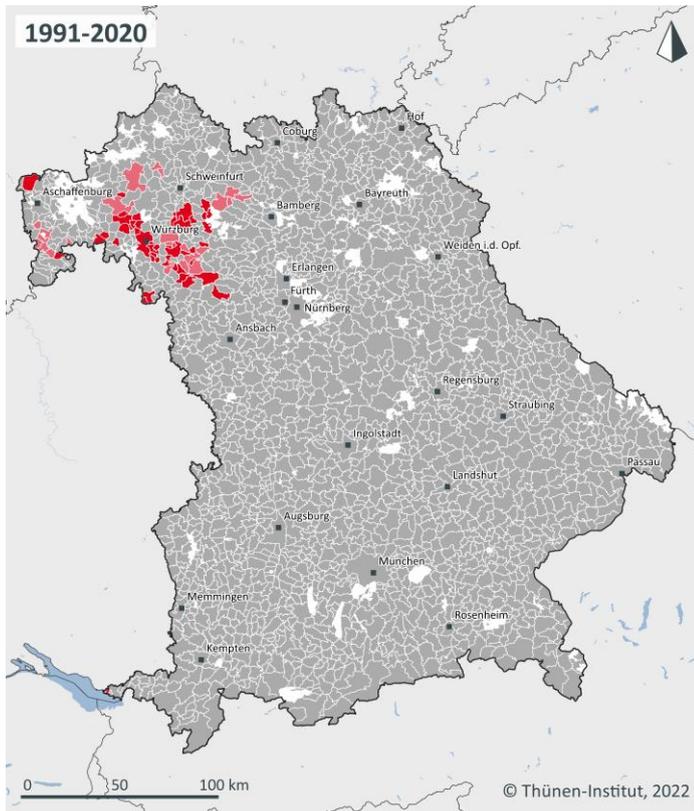
Durchschnittliche jährliche potenzielle Bewässerungsbedürftigkeit von Sonderkulturen je Gemeinde in Bayern für den Zeitraum 2021-2050

Potenzielle Bewässerungsbedürftigkeit (mm/a)

- ≤25
- >25 bis 50
- >50 bis 100
- >100 bis 150
- >150 bis 200
- >200 bis 250
- ≥250
- Keine Daten
- Städte

Quelle: Eigene Berechnungen.

Karte A.24: Durchschnittliche jährliche potenzielle Bewässerungsbedürftigkeit von Wein (1991–2020 und 2021–2050)

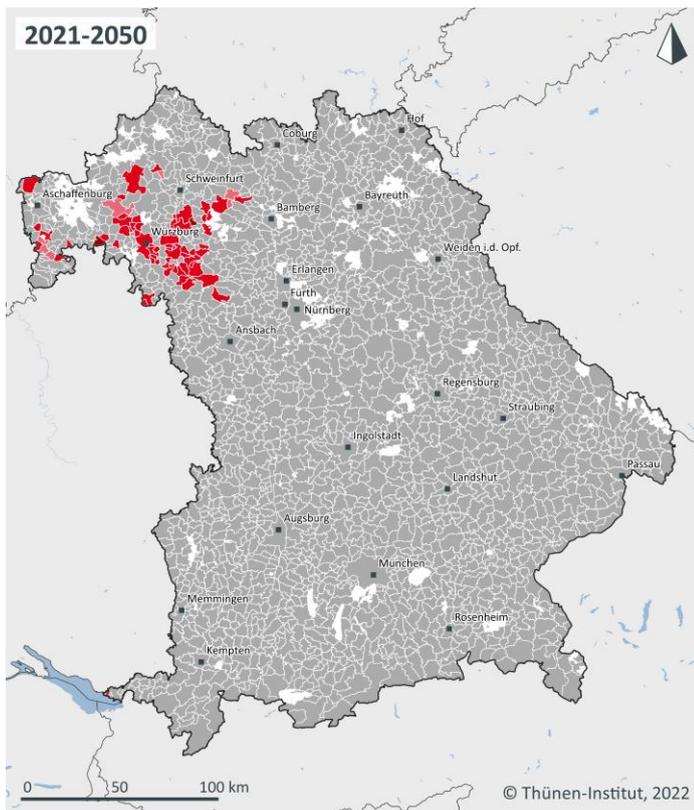


Wein

Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Wein je Gemeinde in Bayern für den Zeitraum 1991-2020

Bewässerungsbedürftigkeit (mm/a)

- ≤25
- >25 bis 50
- >50 bis 100
- >100 bis 150
- >150 bis 200
- >200 bis 300
- ≥300
- Keine Daten
- Städte



Wein

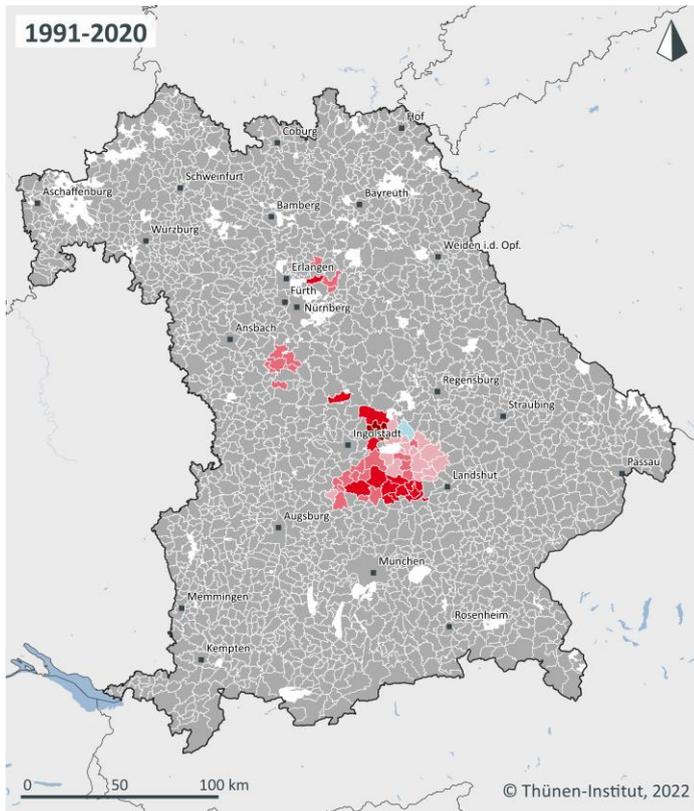
Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Wein je Gemeinde in Bayern für den Zeitraum 2021-2050

Bewässerungsbedürftigkeit (mm/a)

- ≤25
- >25 bis 50
- >50 bis 100
- >100 bis 150
- >150 bis 200
- >200 bis 300
- ≥300
- Keine Daten
- Städte

Quelle: Eigene Berechnungen.

Karte A.25: Durchschnittliche jährliche potenzielle Bewässerungsbedürftigkeit von Hopfen (1991–2020 und 2021–2050)

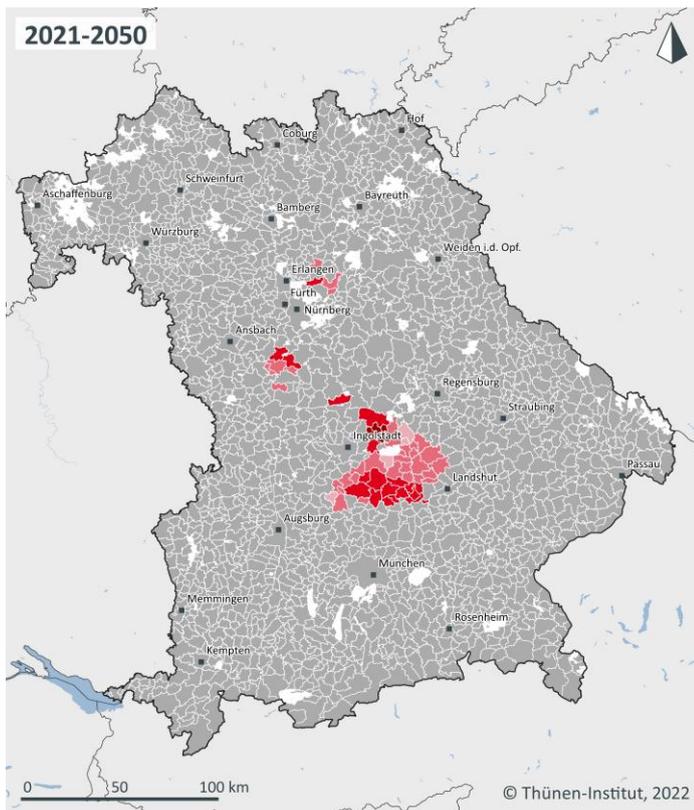


Hopfen

Durchschnittliche jährliche potenzielle Bewässerungsbedürftigkeit von Hopfen je Gemeinde in Bayern für den Zeitraum 1991-2020

Potenzielle Bewässerungsbedürftigkeit (mm/a)

- ≤25
- >25 bis 50
- >50 bis 100
- >100 bis 150
- >150 bis 200
- >200 bis 250
- ≥250
- Keine Daten
- Städte



Hopfen

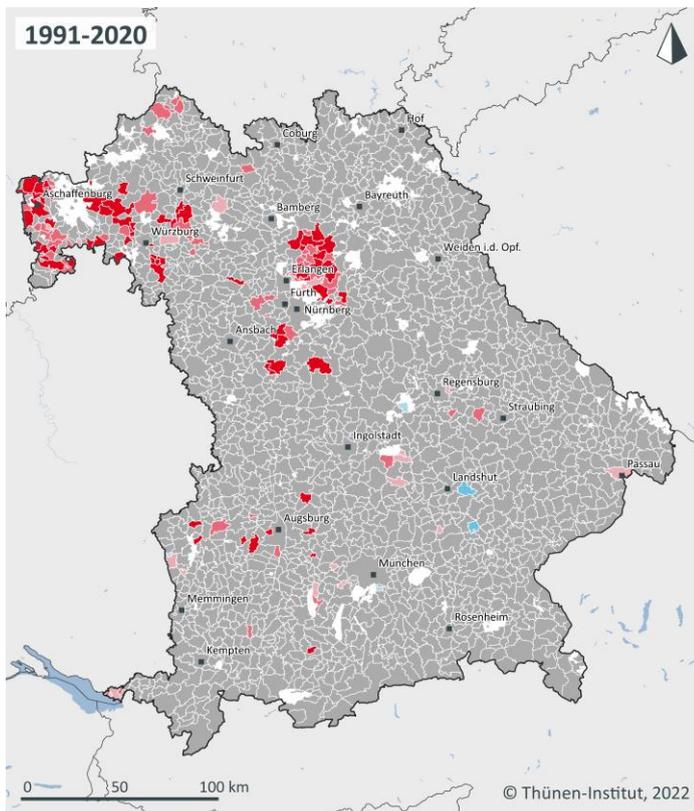
Durchschnittliche jährliche potenzielle Bewässerungsbedürftigkeit von Hopfen je Gemeinde in Bayern für den Zeitraum 2021-2050

Potenzielle Bewässerungsbedürftigkeit (mm/a)

- ≤25
- >25 bis 50
- >50 bis 100
- >100 bis 150
- >150 bis 200
- >200 bis 250
- ≥250
- Keine Daten
- Städte

Quelle: Eigene Berechnungen.

Karte A.26: Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Kern-, Stein-, Beerenobst (ohne Erdbeeren) (1991–2020 und 2021–2050)

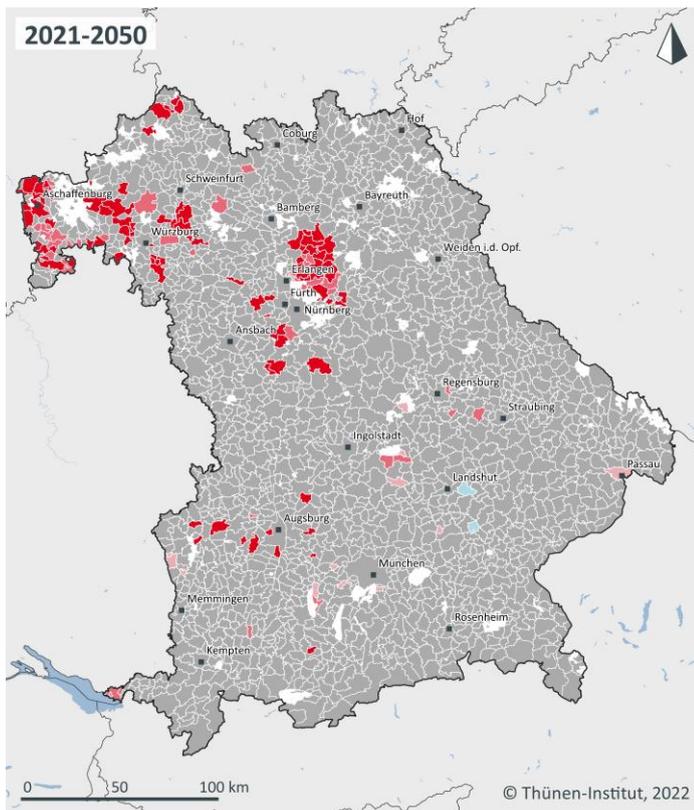


Kern-, Stein- und Beerenobst (ohne Erdbeeren)

Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Kern-, Stein- und Beerenobst (ohne Erdbeeren) je Gemeinde in Bayern für den Zeitraum 1991-2020

Bewässerungsbedürftigkeit (mm/a)

- ≤25
- >25 bis 50
- >50 bis 100
- >100 bis 150
- >150 bis 200
- >200 bis 300
- ≥300
- Keine Daten
- Städte



Kern-, Stein- und Beerenobst (ohne Erdbeeren)

Durchschnittliche jährliche Bewässerungsbedürftigkeit von Kern-, Stein- und Beerenobst (ohne Erdbeeren) je Gemeinde in Bayern für den Zeitraum 2021-2050

Bewässerungsbedürftigkeit (mm/a)

- ≤25
- >25 bis 50
- >50 bis 100
- >100 bis 150
- >150 bis 200
- >200 bis 300
- ≥300
- Keine Daten
- Städte

Quelle: Eigene Berechnungen.

Thünen Report

Bereits in dieser Reihe erschienene Hefte – *Volumes already published in this series*

1 - 75	siehe http://www.thuenen.de/de/infothek/publikationen/thuenen-report/
76	Mirko Liesebach (ed.) Forstpflanzenzüchtung für die Praxis, 6. Tagung der Sektion Forstgenetik/Forstpflanzenzüchtung vom 16. bis 18. September 2019 in Dresden, Tagungsband
77	Hans-Dieter Haenel, Claus Rösemann, Ulrich Dämmgen, Ulrike Döring, Sebastian Wulf, Brigitte Eurich-Menden, Annette Freibauer, Helmut Döhler, Carsten Schreiner, Bernhard Osterburg, Roland Fuß Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 – 2018 Berechnung von gas- und partikelförmigen Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft 1990 – 2018
78	Alexandra Purkus, Jan Lüdtko, Dominik Jochem, Sebastian Rüter, Holger Weimar Entwicklung der Rahmenbedingungen für das Bauen mit Holz in Deutschland: Eine Innovationssystemanalyse im Kontext der Evaluation der Charta für Holz 2.0
79	Peter Elsasser, Kerstin Altenbrunn, Margret Köthke, Martin Lorenz, Jürgen Meyerhoff Regionalisierte Bewertung der Waldleistungen in Deutschland
80	Lutz Laschewski, Andreas Tietz Auswirkungen überregional aktiver Investoren in der Landwirtschaft auf ländliche Räume : Ergebnisse aus zwei Fallstudien
81	Martin Ohlmeyer, Friederike Mennicke, Saskia Poth Erarbeiten eines objektiven Verfahrens unter Berücksichtigung der Besonderheiten von Holz und Holzwerkstoffen bei der Bewertung ihres Einflusses auf die Innenraumluftqualität (HolnRaLu), TV 1: Untersuchungen unter realen Raumluftbedingungen
82	Marlen Haß, Martin Banse, Claus Deblitz, Florian Freund, Inna Geibel, Alexander Gocht, Peter Kreins, Verena Laquai, Frank Offermann, Bernhard Osterburg, Janine Pelikan, Jörg Rieger, Claus Rösemann, Petra Salamon, Maximilian Zinnbauer, Max-Emanuel Zirngibl Thünen-Baseline 2020 – 2030: Agrarökonomische Projektionen für Deutschland
83	Marc Simon Weltersbach, Carsten Riepe, Wolf-Christian Lewin, Harry V. Strehlow Ökologische, soziale und ökonomische Dimensionen des Meeresangelns in Deutschland
84	Claus Rösemann, Hans-Dieter Haenel, Cora Vos, Ulrich Dämmgen, Ulrike Döring, Sebastian Wulf, Brigitte Eurich-Menden, Annette Freibauer, Helmut Döhler, Carsten Schreiner, Bernhard Osterburg, Roland Fuß Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 – 2019 Berechnung von gas- und partikelförmigen Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft 1990 – 2019
85	Andreas Tietz, Richard Neumann, Steffen Volkenand Untersuchung der Eigentumsstrukturen von Landwirtschaftsfläche in Deutschland
86	Katja Butter, Martin Ohlmeyer Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen von Holz und Holzwerkstoffen
87	Kim Pollermann Regional Governance: Begriffe, Wirkungszusammenhänge und Evaluationsansätze



- 88 Gerold Rahmann, Frédéric Rey, Reza Ardakani, Khalid Azim, Véronique Chable, Felix Heckendorn, Paola Migliorini, Bram Moeskops, Daniel Neuhoff, Ewa Rembiałkowska, Jessica Shade, Marc Tchamitchian (eds.)
From its roots, organic inspires science, and vice versa. Book of Abstracts of the Science Forum at the Organic World Congress 2021, September 8-10, 2021. Rennes, France
- 89 Walter Dirksmeyer, Klaus Menrad (eds.)
Aktuelle Forschung in der Gartenbauökonomie : Digitalisierung und Automatisierung - Welche Chancen und Herausforderungen ergeben sich für den Gartenbau? Tagungsband zum 3. Symposium für Ökonomie im Gartenbau am 15. November 2019 in Freising / Weihenstephan
- 90 Tobias Mettenberger, Patrick Küpper
Innovative Versorgungslösungen in ländlichen Regionen: Ergebnisse der Begleitforschung zum Modellvorhaben Land(auf)Schwung im Handlungsfeld „Daseinsvorsorge“ : Band 1 der Begleitforschung Land(auf)Schwung
- 90 Gesine Tuitjer, Christian Bergholz, Patrick Küpper
Unternehmertum, Netzwerke und Innovationen in ländlichen Räumen: Ergebnisse der Begleitforschung zum Modellvorhaben Land(auf)Schwung im Handlungsfeld „Regionale Wertschöpfung“ : Band 2 der Begleitforschung Land(auf)Schwung
- 91 Cora Vos, Claus Rösemann, Hans-Dieter Haenel, Ulrich Dämmgen, Ulrike Döring, Sebastian Wulf, Brigitte Eurich-Menden, Annette Freibauer, Helmut Döhler, Carsten Schreiner, Bernhard Osterburg, Roland Fuß
**Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 – 2020
Berechnung von gas- und partikelförmigen Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft 1990 – 2020**
- 92 Kurt-Jürgen Hülsbergen, Harald Schmid, Hans Marten Paulsen (eds)
Steigerung der Ressourceneffizienz durch gesamtbetriebliche Optimierung der Pflanzen- und Milchproduktion unter Einbindung von Tierwohlaspekten – Untersuchungen in einem Netzwerk von Pilotbetrieben
- 93 Heike Peter, Cornelia Toppel, Annett Steinführer
Wohnstandortentscheidungen in einer wohnbiographischen Perspektive : Eine explorative Studie in ländlichen und großstädtischen Kontexten
- 94 Daniel Ziche, Erik Grüneberg, Winfried Riek, Nicole Wellbrock
Comparison of the LUCAS 2015 inventory with the second National Forest Soil Inventory : Comparability and representativeness of two soil inventories conducted in Germany
- 95 Fanny Barz
Boats don't fish, people do – A sociological contribution towards holistic fisheries bycatch management
- 96 Jacob Jeff Bernhardt, Lennart Rolfes, Peter Kreins, Martin Henseler
Ermittlung des regionalen Bewässerungsbedarfs für die Landwirtschaft in Bayern



Thünen Report 96

Herausgeber/Redaktionsanschrift

Johann Heinrich von Thünen-Institut
Bundesallee 50
38116 Braunschweig
Germany

www.thuenen.de

ISBN 978-3-86576-243-6



9 783865 762436