

Ermittlung des Bewässerungsbedarfs und dessen Sicherstellung für die Landwirtschaft (einschließlich Garten- und Weinbau) in Hessen (BEW-HE)

Franziska Potts, Jacob-Jeff Bernhardt, Maximilian Zinnbauer

Endbericht



Studie im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Landwirtschaft und Umwelt, Weinbau, Forsten, Jagd und Heimat (HMLU)



Hessisches Ministerium für Landwirtschaft
und Umwelt, Weinbau, Forsten, Jagd und
Heimat



Dr. Franziska Potts, M. Sc. Jacob-Jeff Bernhardt, M. Sc. Maximilian Zinnbauer
Thünen-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 5274
E-Mail: maximilian.zinnbauer@thuenen.de

Braunschweig/Germany, Mai 2025

Zusammenfassung

Der Klimawandel stellt eine der bedeutendsten Herausforderungen für die Landwirtschaft dar. Die Veränderungen in den Klimabedingungen, wie die Erwärmung und die Verschiebung der Niederschlagsmuster, haben direkte Auswirkungen auf die Wasserverfügbarkeit und damit auf die landwirtschaftliche Produktion. In Hessen ist die Jahresdurchschnittstemperatur seit Beginn der Wetteraufzeichnungen bereits um 1,7°C (bezogen auf 1881-2022) gestiegen und Prognosen deuten auf eine weitere Erhöhung um 3 bis 5°C bis zum Ende des Jahrhunderts hin. Diese Temperaturanstiege gehen einher mit einer Verschiebung der Niederschlagsmengen vom Frühling/Sommer in den Herbst/Winter. Während die jährlichen Niederschlagsmengen nahezu gleichbleiben, verringert sich die Wasserverfügbarkeit während der Vegetationsperiode deutlich. Die gestiegene Verdunstungsrate infolge höherer Temperaturen verschärft diese Entwicklung zusätzlich.

Die Landwirtschaft in Hessen sieht sich mit einer abnehmenden Wasserverfügbarkeit konfrontiert, was zu Ertrags- und Qualitätseinbußen bei pflanzlichen Erzeugnissen führen kann. Insbesondere in Dürre Jahren wie 2018, 2019 und 2020 wurden bereits signifikante Ertragsausfälle verzeichnet. Die Bewässerung stellt eine effektive Anpassungsmaßnahme dar, um den Wassermangel auszugleichen und die Pflanzen vor Trockenstress zu schützen. Insbesondere in den intensiven Bewässerungsregionen Hessens sind schon heute Nutzungskonflikte spürbar, die mit dem hohen Wasserbedarf der Landwirtschaft einhergehen. Gleichermaßen sind die Bewässerungsstrukturen über Jahre gewachsen und stellen einen wichtigen Baustein regionaler Wertschöpfungsketten dar. Allerdings konkurriert die Landwirtschaft mit anderen Sektoren um mitunter knappe Wasserressourcen. In Zeiten fallender Grundwasserpegel zeichnen sich zunehmend Konflikte um die Wassernutzung ab.

Das Projekt zielt darauf ab, den aktuellen Stand der landwirtschaftlichen Bewässerung in Hessen darzustellen, die zukünftige Entwicklungen der Bewässerungslandwirtschaft unter Berücksichtigung des Klimawandels zu quantifizieren, sowie mögliche Anpassungsstrategien aufzuzeigen. Methodisch basiert das Projekt einer intensiven Auseinandersetzung mit der bestehenden Literatur sowie auf einer modellgestützten Analyse der Bewässerung. Dazu wurden bestehende Modelle aufgegriffen und weiterentwickelt. Die entwickelte Modellkette ermöglicht die Integration von Szenarien, anhand derer neben veränderten Umwelteinflüssen (Klimawandel) auch mögliche Entwicklungspfade gezeichnet werden können. Im Fokus stehen Entwicklungsszenarien des potenziellen Bewässerungsbedarfs sowie dessen Interaktion mit der Wirtschaftlichkeit der Bewässerung (Bewässerungswürdigkeit). Um den zukünftigen Herausforderungen zu begegnen, werden zudem verschiedene Anpassungsstrategien vorgeschlagen und quantifiziert. Dazu gehören die Einführung effizienter Bewässerungstechnologien, wie beispielsweise Tropfbewässerung, die eine präzise Wasserabgabe ermöglicht und Wasserverluste minimiert, sowie die Nutzung alternativer Wasserressourcen wie Regenwasser und aufbereitetes Abwasser. Letztere können die Abhängigkeit von Grundwasser verringern und somit dessen nachhaltige Nutzung unterstützen. Darüber hinaus ist die Optimierung des Bewässerungsmanagements von entscheidender Bedeutung, um Wasserressourcen effizient einzusetzen. Zudem wird die Bedeutung organisatorischer Änderungen, wie die Gründung von Wasserverbänden, hervorgehoben, um eine nachhaltige Wasserbewirtschaftung zu gewährleisten.

Die vorliegende Studie unterstreicht die Dringlichkeit, die Anpassung der Landwirtschaft an den Klimawandel voranzutreiben. Durch die Kombination von modellbasierten Analysen und umfassenden Daten- und Literaturlauswertungen bieten die Projektergebnisse wertvolle Entscheidungshilfen für Politik und Verwaltung.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	I
Inhaltsverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	X
Abkürzungsverzeichnis	XII
1 Einleitung	1
1.1 Anlass für diese Studie	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise	2
2 Grundlagen der Bewässerung	3
2.1 Bewässerungstechnologien und -management	3
2.1.1 Wasserbereitstellung und -zuleitung	4
2.1.2 Wasserverteilung	5
2.1.3 Bewässerungssteuerung	9
2.1.4 Precision Irrigation	10
2.1.5 Fertigation	10
2.2 Ökonomik der Bewässerung	11
2.2.1 Kosten der Bewässerung	11
2.2.2 Wirtschaftlichkeit der Bewässerung	14
2.3 Qualitätsanforderungen für Bewässerungswasser	15
2.3.1 Mikrobiologische Anforderungen	15
2.3.2 Chemische Anforderungen	17
3 Methodische Grundlagen	19
3.1 Modellierung des potenziellen Bewässerungsbedarfs	19
3.2 Modellierung des potenziellen Wasserbedarfs für die Frostschutzberegnung	21
3.3 Modellierung der Bewässerungswürdigkeit	21
3.4 Quantifizierung des theoretischen Potenzials alternativer Wasserressourcen	23
4 Datengrundlagen	25
4.1 Untersuchungszeiträume	25
4.2 Bodenkundliche Datengrundlagen	25
4.3 Klimatische Datengrundlagen	25
4.4 Landnutzungsdaten	26
4.5 Kulturspezifische Parameter	27
4.5.1 Bewässerung	27
4.5.2 Frostschutzberegnung	28
4.6 Technische Parameter für die Bewässerung	28
4.7 Grundwasserneubildung	29
4.8 Daten zu Kosten der Bewässerung	30
4.9 Ertragsdaten	31
4.10 Preisdaten	32
4.11 Amtliche Gebäudeumringe	32

4.12	Topografische Datengrundlagen	33
4.13	Durchflussdaten	33
4.14	Daten zum kommunalen Abwasser	33
4.15	Daten zur Wasserentnahme im Regierungspräsidium Darmstadt	34
5	Status Quo der Landwirtschaft und Bewässerung in Hessen	35
5.1	Geografische Lage, naturräumliche Gliederung und Vertiefungsregionen	35
5.2	Boden	37
5.3	Landwirtschaft und Landnutzung	39
5.4	Klima heute und in Zukunft	41
	5.4.1 Klimatische Wasserbilanz der Vegetationsperiode	41
	5.4.2 Anzahl der Tage mit Spätfrostrisiko	45
5.5	Grundwasserneubildung	49
5.6	Stand der Bewässerung	51
	5.6.1 Hessen	51
	5.6.2 Vertiefungsregionen	54
	5.6.3 Gesetzlicher Rahmen	56
	5.6.4 Akteure	57
	5.6.5 Wasserrechtliche Zulassung	60
6	Entwicklung der Bewässerung in Hessen – Modellierungsergebnisse 1991–2020	64
6.1	Bewässerungsbedarf	64
	6.1.1 Potenzieller Bewässerungsbedarf	64
	6.1.2 Potenzieller Wasserbedarf für die Frostschutzberechnung	67
6.2	Bewässerungswürdigkeit	70
	6.2.1 Annahmen	70
	6.2.2 Ergebnisse	71
7	Entwicklungsszenarien und Anpassungsoptionen	100
7.1	Entwicklungsszenarien im Klimawandel	100
	7.1.1 Basisszenario RCP 8.5	100
	7.1.2 Trockenheitstolerante und wärmebedürftige Kulturen	112
	7.1.3 Bewässerungsmanagement: Defizitbewässerung	118
	7.1.4 Bewässerungstechnologien	119
7.2	Alternative Wasserressourcen	119
	7.2.1 Oberflächenwasser	120
	7.2.2 Regenwasser	129
	7.2.3 Aufbereitetes Abwasser	133
	7.2.4 Speicherung	142
	7.2.5 Gesamteinschätzung	144
7.3	Einzel- und überbetriebliche Fördermöglichkeiten	144
7.4	Anpassung der Organisationsstrukturen	151
8	Literaturverzeichnis	153
	Anhang	167

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Aufteilung von Bewässerungstechnik.....	4
Abbildung 2:	Verfahren zur Wasserverteilung.....	5
Abbildung 3:	Regionaler potenzieller Bewässerungsbedarf – Modellkomponenten	20
Abbildung 4:	Kreise und Regierungsbezirke in Hessen	35
Abbildung 5:	Topografische Karte mit Naturraum-Haupteinheiten in Hessen.....	36
Abbildung 6:	Lage der Vertiefungsregionen Hessisches Ried und Untermainebene	37
Abbildung 7:	Verteilung der Bodenarten in Hessen	38
Abbildung 8:	Nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum in Hessen	39
Abbildung 9:	Prozentualer Anteil ausgewählter landwirtschaftlicher Kulturen an der gesamten landwirtschaftlich genutzten Fläche je Gemeinde in Hessen für das Jahr 2020	40
Abbildung 10:	Entwicklung der mittleren jährlichen klimatischen Wasserbilanz in der Vegetationsperiode im hessenweiten Durchschnitt von 1991 bis 2020.....	42
Abbildung 11:	Mittlere klimatische Wasserbilanz der Vegetationsperiode für die Jahre 1991–2020 in Hessen	43
Abbildung 12:	Hessenweite Änderung der mittleren Klimatische Wasserbilanz der Vegetationsperiode im Vergleich der Referenzperiode (1971–2000) zur nahen (2031–2060) und fernen (2071–2100) Zukunft basierend auf Daten des RCP-Szenarios 8.5.....	44
Abbildung 13:	Räumliche Änderung der mittleren Klimatische Wasserbilanz der Vegetationsperiode im Vergleich der Referenzperiode (1971–2000) zur nahen (2031–2060) und fernen (2071–2100) Zukunft in Hessen basierend auf Daten des RCP-Szenarios 8.5	45
Abbildung 14:	Entwicklung der mittleren jährlichen Anzahl von Tagen mit Spätfrostisiko im hessenweiten Durchschnitt von 1991 bis 2020.....	46
Abbildung 15:	Mittlere Anzahl von Tagen mit Spätfrostisiko für die Jahre 1991–2020 in Hessen	46
Abbildung 16:	Räumliche Änderung der mittleren Anzahl von Tagen mit Frostisiko im Vergleich der Referenzperiode (1971–2000) zur nahen (2031–2060) und fernen (2071–2100) Zukunft in Hessen basierend auf Daten des RCP-Szenarios 8.5	47
Abbildung 17:	Hessenweite Entwicklung der mittleren Anzahl von Tagen mit Spätfrostisiko im Vergleich der nahen (2031–2060) und fernen Zukunft (2071–2100) zur Referenzperiode (1971–2000) basierend auf Daten des RCP-Szenarios 8.5.....	48
Abbildung 18:	Durchschnittliche jährliche Grundwasserneubildungsrate in Hessen (1991–2020)	49
Abbildung 19:	Mittlere Grundwasserneubildung für die Jahre 1991–2020 in Hessen.....	50
Abbildung 20:	Änderung der Grundwasserneubildung in Hessen in der nahen (2031–2060) und fernen Zukunft (2071–2100) im Vergleich der Referenzperiode (1971–2000) basierend auf Daten des RCP-Szenarios 8.5	51
Abbildung 21:	Bewässerung im Hessischen Ried nach Herkunft des Wassers.....	55

Abbildung 22:	Bewässerung in der Untermainebene aus dem Grundwasser	56
Abbildung 23:	Rechtsrahmen für die Bewässerung auf EU-, Bundes- und Landesebene sowie hessische Fachpläne, die die Bewässerung tangieren	57
Abbildung 24:	Akteure in Hessen	59
Abbildung 25:	Schematische Darstellung des Ablaufs eines wasserrechtlichen Verfahrens im Regierungspräsidium Gießen	62
Abbildung 26:	Entwicklung des mittleren jährlichen potenziellen Bewässerungsbedarfs im hessenweiten Durchschnitt von 1991 bis 2020	64
Abbildung 27:	Jährlicher Bewässerungsbedarfe der Landwirtschaft in Hessen im ex-post-Zeitraum von 1991 bis 2020	65
Abbildung 28:	Mittlerer potenzieller Bewässerungsbedarf bezogen auf die landwirtschaftlich genutzte Fläche je Gemeinde auf Grundlage von Klima-Observationsdaten (1991–2020)	66
Abbildung 29:	Verteilung (Boxplot) der kulturspezifischen Unterschiede des potenziellen Bewässerungsbedarfs	67
Abbildung 30:	Entwicklung des mittleren jährlichen Wasserbedarfs für Frostschutzberegnung im hessenweiten Durchschnitt von 1991 bis 2020	68
Abbildung 31:	Jährlicher Wasserbedarf für die Frostschutzberegnung der einzelnen Kulturen in Hessen (1991–2020)	69
Abbildung 32:	Mittlerer potenzieller Wasserbedarf für die Frostschutzberegnung bezogen auf die landwirtschaftlich genutzte Fläche je Gemeinde auf Grundlage von Klima-Observationsdaten (1991–2020)	70
Abbildung 33:	Verteilung der durchschnittlichen Schlaggrößen für die Kulturen	72
Abbildung 34:	Verteilung der durchschnittlichen Schlaggrößen für die Bewässerungstechnologien	72
Abbildung 35:	Durchschnittliche Kosten in Abhängigkeit von Bewässerungstechnologie und Wasserherkunft für Hessen (2010–2020)	73
Abbildung 36:	Durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Winterweizen in Hessen unter Vollkosten (2010–2020)	74
Abbildung 37:	Durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Winterweizen in Hessen unter variablen Kosten (2010–2020)	75
Abbildung 38:	Regionale Bewässerungswürdigkeit von Winterweizen unter variablen Kosten bei Bewässerung mit einer mobilen Beregnungsmaschine mit Starkregner	76
Abbildung 39:	Regionale Bewässerungswürdigkeit von Winterweizen unter variablen Kosten bei Bewässerung mit einer mobilen Beregnungsmaschine mit Düsenwagen	76
Abbildung 40:	Durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Kartoffeln in Hessen unter Vollkosten (2010–2020)	77
Abbildung 41:	Bewässerungswürdigkeit von Kartoffeln unter Vollkosten bei Bewässerung mit mobiler Beregnungsmaschine mit Starkregner	78

Abbildung 42:	Bewässerungswürdigkeit von Kartoffeln unter Vollkosten bei Bewässerung mit mobiler Beregnungsmaschine mit Düsenwagen	78
Abbildung 43:	Bewässerungswürdigkeit von Kartoffeln unter Vollkosten bei Bewässerung mit Tropfbewässerung.....	79
Abbildung 44:	Durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Kartoffeln unter variablen Kosten (2010–2020)	79
Abbildung 45:	Durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Zuckerrüben in Hessen unter Vollkosten (2010–2020)	80
Abbildung 46:	Durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Zuckerrüben unter variablen Kosten (2010–2020).....	81
Abbildung 47:	Regionale Bewässerungswürdigkeit von Zuckerrüben unter variablen Kosten bei Bewässerung mit einer mobilen Beregnungsmaschine mit Starkregner.....	81
Abbildung 48:	Regionale Bewässerungswürdigkeit von Zuckerrüben unter variablen Kosten bei Bewässerung mit einer mobilen Beregnungsmaschine mit Düsenwagen.....	82
Abbildung 49:	Durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Spargel in Hessen unter Vollkosten (2010–2020).....	83
Abbildung 50:	Regionale Bewässerungswürdigkeit von Spargel unter Vollkosten bei Bewässerung mit Rohrberegnung.....	83
Abbildung 51:	Regionale Bewässerungswürdigkeit von Spargel unter Vollkosten bei Bewässerung mit Tropfbewässerung.....	84
Abbildung 52:	Durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Spargel unter variablen Kosten (2010–2020)	84
Abbildung 53:	Durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Buschbohnen in Hessen unter Vollkosten (2010–2020)	85
Abbildung 54:	Bewässerungswürdigkeit von Buschbohnen unter Vollkosten und variablen Kosten bei Bewässerung mit Tropfbewässerung oder Rohrberegnung (2010–2020)	86
Abbildung 55:	Durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Zwiebeln in Hessen unter Vollkosten (2010–2020).....	87
Abbildung 56:	Regionale Bewässerungswürdigkeit von Zwiebeln unter Vollkosten bei Bewässerung mit Tropfbewässerung.....	87
Abbildung 57:	Regionale Bewässerungswürdigkeit von Zwiebeln unter Vollkosten bei Bewässerung mit Rohrberegnung.....	88
Abbildung 58:	Durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Erdbeeren in Hessen unter Vollkosten (2010–2020).....	89
Abbildung 59:	Regionale Bewässerungswürdigkeit von Erdbeeren unter Vollkosten bei Bewässerung mit Rohrberegnung.....	89
Abbildung 60:	Regionale Bewässerungswürdigkeit von Erdbeeren unter Vollkosten bei Bewässerung mit Tropfbewässerung.....	90

Abbildung 61:	Durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Erdbeeren unter variablen Kosten (2010–2020).....	90
Abbildung 62:	Regionale Bewässerungswürdigkeit von Erdbeeren unter variablen Kosten bei Bewässerung mit Tropfbewässerung.....	91
Abbildung 63:	Regionale Bewässerungswürdigkeit von Erdbeeren unter variablen Kosten bei Bewässerung mit Rohrberegnung	91
Abbildung 64:	Durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Himbeeren in Hessen unter Vollkosten (2010–2020).....	92
Abbildung 65:	Regionale Bewässerungswürdigkeit von Himbeeren unter Vollkosten bei Bewässerung mit Tropfbewässerung.....	93
Abbildung 66:	Durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Himbeeren unter variablen Kosten (2010–2020).....	93
Abbildung 67:	Regionale Bewässerungswürdigkeit von Himbeeren unter variablen Kosten bei Bewässerung mit Tropfbewässerung.....	94
Abbildung 68:	Durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Johannisbeeren in Hessen unter Vollkosten (2010–2020)	95
Abbildung 69:	Regionale Bewässerungswürdigkeit von Johannisbeeren unter Vollkosten bei Bewässerung mit Tropfbewässerung.....	95
Abbildung 70:	Durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Johannisbeeren unter variablen Kosten (2010–2020).....	96
Abbildung 71:	Regionale Bewässerungswürdigkeit von Johannisbeeren unter variablen Kosten bei Bewässerung mit Tropfbewässerung	96
Abbildung 72:	Durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Wein in Hessen unter Vollkosten (2010–2020)	97
Abbildung 73:	Regionale Bewässerungswürdigkeit von Wein unter Vollkosten bei Bewässerung mit Tropfbewässerung.....	98
Abbildung 74:	Durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Wein unter variablen Kosten (2010–2020) .	98
Abbildung 75:	Regionale Bewässerungswürdigkeit von Wein unter variablen Kosten bei Bewässerung mit Tropfbewässerung.....	99
Abbildung 76:	Hessenweite Entwicklung des potenziellen Bewässerungsbedarfs im Vergleich der Referenzperiode (1971–2000) zur nahen (2031–2060) und fernen Zukunft (2071–2100) basierend auf Daten des RCP-Szenarios 8.5.....	101
Abbildung 77:	Räumliche Änderung des mittleren potenziellen Bewässerungsbedarfs im Vergleich der Referenzperiode (1971–2000) zur nahen (2031–2060) und fernen Zukunft (2071–2100) in Hessen basierend auf Daten des RCP-Szenarios 8.5	102
Abbildung 78:	Hessenweite Entwicklung des potenziellen Wasserbedarfs für die Frostschutzberegnung im Vergleich der Referenzperiode (1971–2000) zur nahen (2031–2060) und fernen Zukunft (2071–2100) basierend auf Daten des RCP-Szenarios 8.5.....	104

Abbildung 79:	Räumliche Änderung des mittleren Wasserbedarfs für die Frostschutzberechnung im Vergleich der Referenzperiode (1971–2000) zur nahen (2031–2060) und fernen (2071–2100) Zukunft in Hessen basierend auf Daten des RCP-Szenarios 8.5	105
Abbildung 80:	Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Winterweizen unter variablen Kosten bei der Bewässerung durch eine mobile Beregnungsmaschine mit Starkregner und Grundwasser .	107
Abbildung 81:	Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Winterweizen unter variablen Kosten bei der Bewässerung durch eine mobile Beregnungsmaschine mit Düsenwagen und Grundwasser	108
Abbildung 82:	Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Erdbeeren unter Vollkosten bei Rohrberegnung und Grundwasser.....	109
Abbildung 83:	Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Erdbeeren unter Vollkosten bei Tropfbewässerung und Grundwasser.....	110
Abbildung 84:	Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Erdbeeren unter variablen Kosten bei Rohrberegnung und Grundwasser	111
Abbildung 85:	Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Erdbeeren unter variablen Kosten bei Tropfbewässerung und Grundwasser	112
Abbildung 86:	Potenzieller Bewässerungsbedarf von Sorghum, Silo- und Körnermais im Vergleich der Referenzperiode (1971–2000) zur nahen (2031–2060) und fernen (2071–2100) Zukunft im Hessischen Ried basierend auf Daten des RCP-Szenarios 8.5	114
Abbildung 87:	Potenzieller Bewässerungsbedarf von Sojabohne, Gemüsekulturen und Leguminosen im Vergleich der Referenzperiode (1971–2000) zur nahen (2031–2060) und fernen (2071–2100) Zukunft im Hessischen Ried basierend auf Daten des RCP-Szenarios 8.5.....	116
Abbildung 88:	Potenzieller Bewässerungsbedarf von Alfalfa, Silomais und Leguminosen im Vergleich der Referenzperiode (1971–2000) zur nahen (2031–2060) und fernen (2071–2100) Zukunft im Hessischen Ried basierend auf Daten des RCP-Szenarios 8.5	117
Abbildung 89:	Ausgewählte Oberflächengewässer und Messstellen im Hessischen Ried	123
Abbildung 90:	Täglicher Durchfluss der Oberflächengewässer von 1991 bis 2023.....	125
Abbildung 91:	Prozentualer Anteil des Jahres bzw. Vegetationszeitraums, in dem keine Entnahme von Wasser möglich ist.....	127
Abbildung 92:	Jährliche Anzahl an aufeinanderfolgenden Tagen ohne Entnahmemöglichkeit	128
Abbildung 93:	Jährlich entnehmbare Wassermengen aus den Oberflächengewässern	129
Abbildung 94:	Regenwasserabflüsse von landwirtschaftlichen Dachflächen im Hessischen Ried (1991–2020)	131
Abbildung 95:	Landwirtschaftliche Dachflächen im Hessischen Ried.....	132
Abbildung 96:	Theoretisches Potenzial von Regenwasser für die Bewässerung im Hessischen Ried	133
Abbildung 97:	Rechtliche Rahmenbedingungen auf EU-Ebene	134
Abbildung 98:	Rechtliche Rahmenbedingungen auf Bundesebene.....	134
Abbildung 99:	Standorte von Kläranlagen im Hessischen Ried	140

Abbildung 100: Theoretisches Potenzial der Wasserwiederverwendung für die Bewässerung auf Gemeindeebene (2008–2020).....	141
Abbildung 101: Trinkwasser- und Heilquellenschutzgebiete im Hessischen Ried.....	141

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Kostenüberblick für ausgewählte Beregnungsmaschinen.....	6
Tabelle 2:	Einsatzbereich, Wassereffizienz, Vor- und Nachteile der Verteiltechnologien.....	8
Tabelle 3:	Sensoren für die Bewässerungssteuerung	9
Tabelle 4:	Modelle für die Bewässerungssteuerung	10
Tabelle 5:	Investitionskosten für den Brunnenbau und Betriebskosten.....	11
Tabelle 6:	Investitionskosten für Pumpen mit einem Druck von 12 bar.....	12
Tabelle 7:	Verwaltungskosten für Grund- und Oberflächenwasserentnahmen in Hessen.....	13
Tabelle 8:	Investitionsbedarf und Betriebskosten für die Wasserzuleitung	13
Tabelle 9:	Arbeitsaufwand und Kosten bei einer Bewässerungsmenge von 90 mm (exemplarisch)	14
Tabelle 10:	Überblick zur (variablen) beregnungskostenfreien Leistung.....	15
Tabelle 11:	Hygienisch-mikrobiologischer Anspruch an Bewässerungswasser nach DIN 19650.....	16
Tabelle 12:	Obere Grenzwerte für Salze und Pflanzennährstoffe im Bewässerungswasser	17
Tabelle 13:	Frachten und Richtwerte für Schwer- und Halbmetalle.....	18
Tabelle 14:	Kennwertklassifizierung der Bewässerungsbedürftigkeit	21
Tabelle 15:	Klimatische Datengrundlagen des ex-post-Zeitraums.....	26
Tabelle 16:	Ensemblemitglieder des DWD-Kernensembles für das RCP-Szenario 8.5.....	26
Tabelle 17:	Übersicht der gebildeten Kulturaggregate aus den Nutzcodes der InVeKoS-Daten für Hessen	27
Tabelle 18:	Überblick zu den Quellen der kulturspezifischen Parameter	28
Tabelle 19:	Kulturspezifische Applikationsraten bei der Frostschutzberegnung.....	28
Tabelle 20:	Technische Parameter für die Bewässerung	29
Tabelle 21:	Berücksichtigte Bewässerungstechnologie-Kultur-Kombinationen	29
Tabelle 22:	Ensemblemitglieder des KLIWA-Ensemble.....	30
Tabelle 23:	Einstellungen des Feldarbeitsrechners.....	31
Tabelle 24:	Datenquellen für Erträge in Hessen	32
Tabelle 25:	Datenquellen zur Wasserproduktivität	32
Tabelle 26:	Jahreszeitliche Mittelwerte des Niederschlags in Hessen und erwartete Änderung im Klimawandel (RCP 8.5).....	41
Tabelle 27:	Auszug aus der Agrarstatistik: Mögliche und tatsächliche Bewässerung im Vergleich der Bundesländer.....	52
Tabelle 28:	Bewässerte Flächen nach Herkunft des Wassers in Hessen.....	53

Tabelle 29:	Bewässerungsverfahren nach Herkunft des Wassers in Hessen	53
Tabelle 30:	Mögliche und tatsächliche Bewässerung in den Regierungsbezirken 2009 und 2019.....	54
Tabelle 31:	Durchschnittlich bewässerte Fläche pro Betrieb und verbrauchte Wassermenge 2009	54
Tabelle 32:	Antragsunterlagen für die wasserrechtliche Zulassung von Wasserentnahmen	61
Tabelle 33:	Wasserentnahmeentgelt in den Bundesländern.....	63
Tabelle 34:	Preisszenarien.....	106
Tabelle 35:	Vergleich der Veränderung der potenziellen Bewässerungsbedarfe (in mm/a) in der nahen (2031–2060) und fernen Zukunft (2071–2100) zur Referenzperiode (1971–2000) bei Standard- und Defizitbewässerung im Hessischen Ried.....	118
Tabelle 36:	Potenzieller Bewässerungsbedarf für Kartoffeln im Hessischen Ried im Technologievergleich	119
Tabelle 37:	Potenzieller Bewässerungsbedarf für Gemüse im Hessischen Ried im Technologievergleich	119
Tabelle 38:	Exemplarische Darstellung der Fließgewässerwasserqualität (2023)	121
Tabelle 39:	Hydrologische Kennwerte zu den ausgewählten Oberflächengewässer	124
Tabelle 40:	Mit dem entnommenen Oberflächenwasser potenziell bewässerbare Flächen (in ha)	129
Tabelle 41:	Güteklassen von aufbereitetem Wasser – Einsatzbereich und Anforderungen	136
Tabelle 42:	Verfahren zur weitergehenden Abwasserbehandlung.....	138
Tabelle 43:	Übersicht über Wasserspeicheroptionen.....	143
Tabelle 44:	Förderrichtlinie Landwirtschaft, Investition, Existenzgründung (RL LIW/2014).....	147
Tabelle 45:	Förderrichtlinie Landwirtschaft, Investition, Existenzgründung 2023–2027.....	148
Tabelle 46:	Aktionsplan Bewässerung.....	148
Tabelle 47:	Bewässerungsrichtlinie Nordrhein-Westfalen.....	149
Tabelle 48:	Förderprogramm Gemeinschaftliche Bewässerungsinfrastruktur Baden-Württemberg	149
Tabelle 49:	Zuwendungen für wasserwirtschaftliche Maßnahmen (Förderrichtlinien der Wasserwirtschaftsverwaltung) Rheinland-Pfalz.....	150
Tabelle 50:	Förderrichtlinie Klimafolgenanpassung Wasserwirtschaft.....	150
Tabelle 51:	Förderung nachhaltiger wasserwirtschaftlicher Vorhaben	151

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ASE	Agrarstrukturerhebung
BB	Brandenburg
BBCH	Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Bundessortenamt und Chemische Industrie
BbgWG	Brandenburgisches Wassergesetz
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
BE	Berlin
BK50	Bodenkarte 1 : 50.000
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BremWEGG	Bremer Gesetz über die Erhebung einer Wasserentnahmegebühr
BSB5	Biochemische Sauerstoffbedarf nach 5 Tagen
BW	Baden-Württemberg
BWG	Berliner Wassergesetz
BY	Bayern
CSB	Chemische Sauerstoffbedarf
DE	Deutschland
Destatis	Statistisches Bundesamt
DWD	Deutscher Wetterdienst
EGFL	Europäischer Garantiefonds für die Landwirtschaft
ELER	Europäische Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums
ETa	aktuelle Evapotranspiration
EU	Europäische Union
FK	Feldkapazität
GAK	Gemeinschaftsaufgabe Agrarstruktur und Küstenschutz
GAP	Gemeinsame Agrarpolitik
GCM	Globales Klimamodell
GrdWasEntgG SL	Saarländisches Grundwasserentnahmeentgeltgesetz
GrwV	Verordnung zum Schutz des Grundwassers (Grundwasserverordnung)
HB	Bremen
HE	Hessen
HH	Hamburg
HLNUG	Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
Hmb GruwaG	Grundwassergebührengesetz Hamburg
HMLU	Hessisches Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt, Weinbau, Forsten, Jagd und Heimat
HMUCLV	Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
HSL	Hessisches Statistisches Landesamt
HWG	Hessisches Wassergesetz

Abkürzung	Bedeutung
InVeKoS	Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem
KA	Kapillaraufstieg
KWBv	Klimatische Wasserbilanz der Vegetationsperiode
LF	Landwirtschaftlich genutzte Fläche
LFrel	relative Luftfeuchtigkeit
LfU	Bayerische Landesamt für Umwelt
LLH	Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen
LWaG MV	Landeswassergesetz Mecklenburg-Vorpommern
LWBV Hessen	Landesverband der Wasser- und Bodenverbände Hessen
LWEntG RLP	Landesgesetz über die Erhebung eines Entgelts für die Entnahme von Wasser aus Gewässern
LWK	Landwirtschaftskammer
LZ	Landwirtschaftszählung
MV	Mecklenburg-Vorpommern
nFK	nutzbare Feldkapazität
NI	Niedersachsen
NTU	Nephelometric Turbidity Unit (Trübung)
NW	Nordrhein-Westfalen
NWG	Niedersächsisches Wassergesetz
OGewV	Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung)
ObflGebG	Oberflächengewässergebührengesetz
ObflGebO	Oberflächengewässergebührenordnung
P	Niederschlag
PWP	Permanenter Welkepunkt
RCM	Regionales Klimamodell
RCP	Representative Concentration Pathways (Repräsentative Konzentrationspfade)
RP	Rheinland-Pfalz
SächsWG	Wasserentnahmeentgeltverordnung für das Land Sachsen-Anhalt
SH	Schleswig-Holstein
SL	Saarland
SN	Sachsen
SR	Sickerwasserrate
ST	Sachsen-Anhalt
tf	Feuchtkugeltemperatur
TI	Thünen-Institut
TH	Thüringen
t _i	Lufttemperatur
TSS	Total suspended solids (gesamte suspendierte Feststoffe)
UBA	Umweltbundesamt
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
WasEE-VO LSA	Wasserabgabengesetz des Landes Schleswig-Holstein

Abkürzung	Bedeutung
WasEG NRW	Wasserentnahmeentgeltgesetz Nordrhein-Westfalen
WasserZustVO	Verordnung über die Zuständigkeit der Wasserbehörden (Zuständigkeitsverordnung Wasserbehörden)
WBL Hessen	Wasser-, Boden- und Landschaftspflegeverband Hessen
WE	effektive Durchwurzelungstiefe
WG BW	Wassergesetz Baden-Württemberg
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WHR- Beregnung	Beregnungswasserverband Hessisches Ried
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie
WVG	Gesetz über Wasser- und Bodenverbände (Wasserverbandsgesetz)

1 Einleitung

1.1 Anlass für diese Studie

Durch den Klimawandel ist es in Hessen bereits zu einem Anstieg der Jahresmitteltemperatur um 1,7 °C (1881-2022) gekommen und Klimaprojektionen gehen bis zum Ende des Jahrhunderts von einer weiteren Erhöhung um 3 bis 5 °C aus. Die tatsächliche Ausprägung dieses Anstiegs hängt stark von den globalen Anstrengungen zur Begrenzung der Treibhausgasemissionen ab. Durch die zunehmende Erwärmung nimmt auch insbesondere im Sommer die Verdunstung zu. Zudem kommt es bei in etwa gleichbeliebenden Jahresniederschlagsmengen zu einer Verschiebung der Niederschläge von Frühling und Sommer in den Herbst und Winter – besonders in der Vegetationsperiode ist ein Rückgang zu spüren (DWD und HLNUG, 2024). Diese Entwicklungen führen zu einer Verringerung der Wasserverfügbarkeit für Pflanzen und somit auch in Landwirtschaft, Garten- und Weinbau. Durch eine zu geringe Wasserverfügbarkeit kann es bei der Produktion pflanzlicher Erzeugnisse zu Ertrags- und Qualitätseinbußen kommen (Paschold, 2010). In den Dürrejahre des letzten Jahrzehnts konnten bereits Ertragsausfälle dokumentiert werden. Eine produktionstechnische Maßnahme zum Umgang mit fehlendem Niederschlag ist die Bewässerung oder Beregnung. Sie zielt darauf ab, durch Ausgleich des entstehenden Wasserdefizits Trockenstress bei den Pflanzen zu vermeiden und so Ertrag und Qualität zu sichern. Bei besonders wasserbedürftigen Kulturen wie beispielsweise Gemüse ist in einigen Regionen schon heute ein Anbau ohne zusätzliche Bewässerung nicht mehr denkbar.

Bisher werden in Hessen etwa 2 % der landwirtschaftlichen Flächen bewässert. Bezogen auf die Gesamtwassernutzung in Hessen werden 2,9 % für die Bewässerung in der Landwirtschaft genutzt. Dabei gibt es auch innerhalb von Hessen starke Unterschiede; so ist die Bewässerungsinfrastruktur in Nordhessen bisher wenig ausgeprägt, während im Hessischen Ried bereits ein Großteil der Fläche bewässerbar ist (Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2011; Berthold, 2010). Die klimatischen Veränderungen lassen davon ausgehen, dass der Bewässerungsbedarf für landwirtschaftliche, garten- und weinbauliche Kulturen in der Zukunft steigen wird (Herbst und Frühauf, 2018). Die regionalen Ausprägungen hängen allerdings stark von den angebauten Kulturen und den standortspezifischen Gegebenheiten ab. In Hessen wird derzeit hauptsächlich Grundwasser für die Bewässerung genutzt (Hessisches Statistisches Landesamt, 2012), aber die Grundwasserneubildung ist im Zeitraum 2003 bis 2022 im Vergleich zum Zeitraum 1971 bis 2000 um 28 % gesunken (HLNUG, 2023). Zudem ist die Landwirtschaft nicht der einzige Nutzer von Grundwasser, sondern beispielsweise auch die öffentliche Wasserversorgung und die Industrie. Verknappt sich das Grundwasserangebot, kann dies zu Nutzungskonkurrenzen und -konflikten um diese Ressource führen (Schwaller et al., 2020).

Vor diesem Hintergrund wurde das Thünen-Institut vom Hessischen Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUKLV) – seit 2024: Hessisches Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt, Weinbau, Forsten, Jagd und Heimat (HMLU) - im Jahr 2022 mit dem Projekt „Ermittlung des Bewässerungsbedarfs und dessen Sicherstellung für die Landwirtschaft (einschließlich Garten- und Weinbau) in Hessen (BEW-HE)“ beauftragt. Ziel des Projekts war es, den aktuellen Stand der landwirtschaftlichen Bewässerung für das Bundesland Hessen zu erarbeiten sowie zukünftige klimawandelinduzierte Veränderungen und die Wirkung potenzieller Anpassungsstrategien modellbasiert abzuschätzen.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel des vorliegenden Projekts ist es, den aktuellen Stand der landwirtschaftlichen Bewässerung für das Bundesland Hessen zu erarbeiten sowie zukünftige klimawandelinduzierte Veränderungen des Bewässerungsbedarfs und die Wirkung potenzieller Anpassungsstrategien abzuschätzen. Die gewonnenen Erkenntnisse verbessern die Entscheidungsgrundlage für politische Entscheidungen im Umgang mit klimawandelinduzierten Veränderungen der Bewässerungswirtschaft in Hessen.

Zur Erreichung dieses Ziels sind folgende Unterziele vorgesehen, die in folgenden Arbeitspaketen bearbeitet wurden:

- Aufarbeitung des Forschungsstands und Gewinnung von Informationen und Daten zu bewässerungsrelevanten Parametern und Darstellung der Bewässerungswirtschaft auf Landesebene mit einem besonderen Fokus auf bestehende Bewässerungsgebiete (**Kapitel 5**).
- Abbildung des potenziellen Bewässerungsbedarfs (inkl. Wasserbedarf für die Frostschutzberechnung) und der Bewässerungswürdigkeit für ausgewählte Kulturen regional und auf Landesebene für den Ex-post-Zustand (1991-2020) (**Kapitel 6**) sowie die Fortschreibung der Entwicklung für die Zukunft (bis 2100) (**Kapitel 7.1.1**). Die Arbeitspakete enthalten eine Analyse von teilraumspezifischen Betroffenheiten und regionalen Trends der genannten Untersuchungsgegenstände.
- Analyse und szenariobasierte Umsetzung von klimawandelbedingten Anpassungsstrategien der Bewässerungswirtschaft an den Klimawandel mit Fokus auf bestehende Bewässerungsgebiete (**Kapitel 7.1**).
- Qualitative Analyse zu Möglichkeiten der Förderung zur Verbesserung der Wasserverfügbarkeit auf betrieblicher- und überbetrieblicher Ebene (**Kapitel 7.3**) sowie zu Maßnahmen und Instrumenten zur Sicherstellung der Ressourcenverfügbarkeit für die landwirtschaftliche Bewässerung (**Kapitel 7.4**).

Dieser Endbericht ist wie folgt aufgebaut. In Kapitel 2 werden die Ergebnisse einer umfassenden Literaturrecherche zu den Grundlagen zur Bewässerung dargestellt, insbesondere Bewässerungstechnologien. Anschließend werden die methodischen Grundlagen (Kapitel 3) und die genutzten Daten (Kapitel 4) erläutert. Mit Kapitel 5 beginnt der inhaltliche Teil mit einem Überblick über den Status Quo der Bewässerung in Hessen, zusammen mit einer Beschreibung des Untersuchungsgebiets. In Kapitel 6 werden zunächst die Modellergebnisse zur Entwicklung der Bewässerung in Hessen in der Vergangenheit (1991–2020) dargestellt, in Kapitel 7 folgen die Ergebnisse einer Szenarioanalyse zur Veränderung des Bewässerungsbedarfs im Klimawandel sowie eine Diskussion von möglichen Anpassungsoptionen. Die Kapitel 7.3 und 7.4 schließen mit einem Überblick zu Fördermöglichkeiten im Bereich Bewässerung und zu Anpassungsmöglichkeiten von Organisationsstrukturen.

2 Grundlagen der Bewässerung

Die Verfügbarkeit von Wasser ist ein zentraler und oft knapper Faktor in der Pflanzenproduktion. Wenn Wasser knapp ist, reagieren die Pflanzen mit Trockenstress. Je nach Stärke des Stresses kommt es zu Einschränkungen bei der Photosynthese und beim Pflanzenwachstum. Bewässerung ist eine Möglichkeit, diesem Stress entgegenzuwirken (Farooq et al., 2012). Bei sachgemäßer Bewässerung erfolgt die Bewässerung pflanzenbedarfsgerecht, wobei unproduktive Wasserverluste wie Versickerung, Abfluss und Abdrift minimiert werden. Die Bewässerungszeitpunkte und die Höhe der einzelnen Wassergaben ergeben sich standort- und kulturspezifisch in Abhängigkeit von

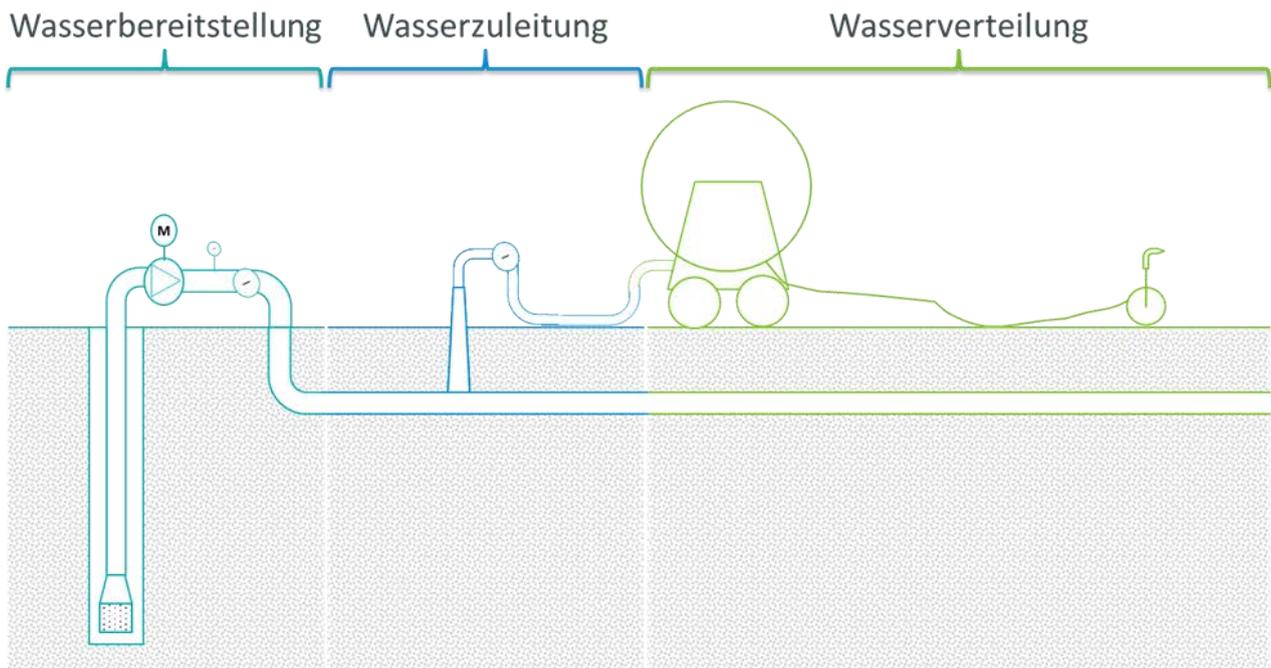
- Entwicklungsstadium und Wurzeltiefe der Pflanzen,
- nutzbarer Feldkapazität des Bodens (nFK),
- aktueller Bodenfeuchte im effektiven Wurzelraum (% nFK) und
- aktuellen Wetterverhältnissen (LWK Niedersachsen, 2017).

Durch eine sachgemäße Bewässerung und eine dadurch bessere Wasserverfügbarkeit kann die Wirksamkeit von pflanzenbaulichen Maßnahmen, wie z. B. der Düngung erhöht, die Ressourceneffizienz gesteigert und die jährlichen Ertragsschwankungen verringert werden (KTBL, 2013). Bewässerung dient somit der Sicherung von Erträgen, aber auch dem Erhalt von qualitativ hochwertigen und vermarktbareren Ernteprodukten vor allem im Gemüsebau. Auch kann es durch die höhere Bodenfeuchte im Herbst schon früher zu Sickerwasser und Grundwasserneubildung kommen (Roth und Werner, 2000; KTBL, 2013), ohne dass es zu erhöhter Stickstoffauswaschung kommen muss: aufgrund der besseren Stickstoffausnutzung durch die Bewässerung verringert sich die potentiell auswaschbare Stickstoffmenge im Boden (Michel und Sourell, 2014; Roth und Werner, 2000).

Bewässerung sollte möglichst effizient erfolgen. So sollten beispielsweise unproduktive Wasserverluste vermieden werden. Hierbei sind die Bewässerungstechnologien, die in Kapitel 2.1 dargestellt werden, von Bedeutung. Je nach Wasserverteilungstechnologie ist die Wassernutzungseffizienz (= Verhältnis von durch die Pflanze produktiv genutztem Wasser zur eingesetzten Bewässerungsmenge) unterschiedlich, aber nicht jede Technologie eignet sich für jede Kultur oder jeden Standort. Durch Bewässerung darf auch weder Umwelt (Boden, Grundwasser) noch Mensch oder Tier gefährdet werden, sodass das Wasser für die Bewässerung gewisse Qualitätsanforderungen erfüllen sollte, die in Kapitel 2.3 erläutert werden. Des Weiteren werden institutionelle Aspekte wie der rechtliche Rahmen und die wasserrechtliche Zulassung der Verwendung von Grund- und Oberflächenwasser für die Bewässerung in Kapitel 0 dargestellt.

2.1 Bewässerungstechnologien und -management

Die Bewässerungstechnik lässt sich grundlegend in die drei Bereiche Wasserbereitstellung, Wasserzuleitung und Wasserverteilung aufteilen (vgl. Abbildung 1). Die Wasserverteilung kann zudem durch eine Bewässerungssteuerung ergänzt werden. Weitere Aspekte der Bewässerungstechnik und -steuerung sind Fertigation, die Kombination von Düngung (**Fertilization**) und Bewässerung (**Irrigation**), sowie Precision Irrigation in Form von teilflächenspezifischer Bewässerung. In diesem Kapitel werden die einzelnen Bereiche mit ihren Unterschieden, Vor- und Nachteilen dargestellt. Ein Überblick zu den Kosten folgt in Kapitel 2.2.

Abbildung 1: Aufteilung von Bewässerungstechnik

Quelle: Eigene Darstellung.

2.1.1 Wasserbereitstellung und -zuleitung

Die Bereitstellung von Bewässerungswasser kann aus dem Grundwasser oder aus Oberflächengewässern (Seen, Flüsse, Wasserspeicher) erfolgen (KTBL, 2018). Die Gewinnung von Wasser aus dem Grundwasser kann je nach Grundwasserstand mit einem Flachbrunnen bei einer Tiefe von 10 bis 20 m oder einem Tiefbrunnen erfolgen. Tiefbrunnen fördern für gewöhnlich aus einer Tiefe von 20 bis 100 m, eine Förderung aus größerer Tiefe ist meist aufgrund hoher Investitionskosten nicht wirtschaftlich (KTBL, 2018).

Je nach Wasserquelle und Tiefe des Brunnens eignen sich unterschiedliche Pumpentechniken. Für den Wasserbezug aus einem Oberflächengewässer oder aus Grundwasser bis zu einer Tiefe von 6 m sind Oberflächenpumpen sinnvoll. Ab einer Tiefe von 6 m nimmt der Saugverlust stark zu und Unterwasserpumpen eignen sich besser. Die verschiedenen Pumpen gibt es mit unterschiedlichen Antriebsarten. Wenn ein Stromanschluss in der Nähe von der Pumpstation vorhanden ist, können Elektropumpen genutzt werden. Ist dies nicht der Fall, können alternativ mit einem Traktor oder einem Diesellaggregat betriebene Bohrlochwellen- oder Kreiselpumpen verwendet werden (Irripart24, 2022).

Bei den Betriebskosten spielen Abschreibung und Wartungskosten mit einem Anteil von etwa 15 % nur eine untergeordnete Rolle, während Energiekosten mit 85 % die Hauptrolle spielen. Um die Energiekosten möglichst gering zu halten, sollte die Pumpe möglichst gut auf den Druckbedarf des Bewässerungssystems abgestimmt sein. Ältere Pumpen sollten rechtzeitig ausgetauscht werden, um einen höheren Energieverbrauch durch Verschleiß zu vermeiden. Bei existierenden Pumpen mit zu hoher Leistung ist die Zwischenschaltung eines Frequenzumformers zur Kostensenkung sinnvoll (Hochschule Geisenheim et al., 2017). Der notwendige Betriebsdruck einer Pumpe hängt von der genutzten Verteiltechnologie ab, da diese unterschiedlich starke Betriebsdrücke benötigen. Insgesamt sind Drücke zwischen 0,5 und 8 bar am Hydranten und bis zu 4–5 bar am Regner notwendig (Sourell et al., 2010; LfL, 2008; KTBL, 2014).

Der Wassertransport von der Pumpe zum Hydranten am Feld gehört zum Bereich der Wasserzuleitung und erfolgt meist über Wasserleitungen. Die Länge der Zuleitung hängt vom Abstand zwischen Wasserquelle und Feld ab. Die Anzahl der Hydranten pro Schlag hängt von der Technologie zur Wasserverteilung und der Feldgröße ab.

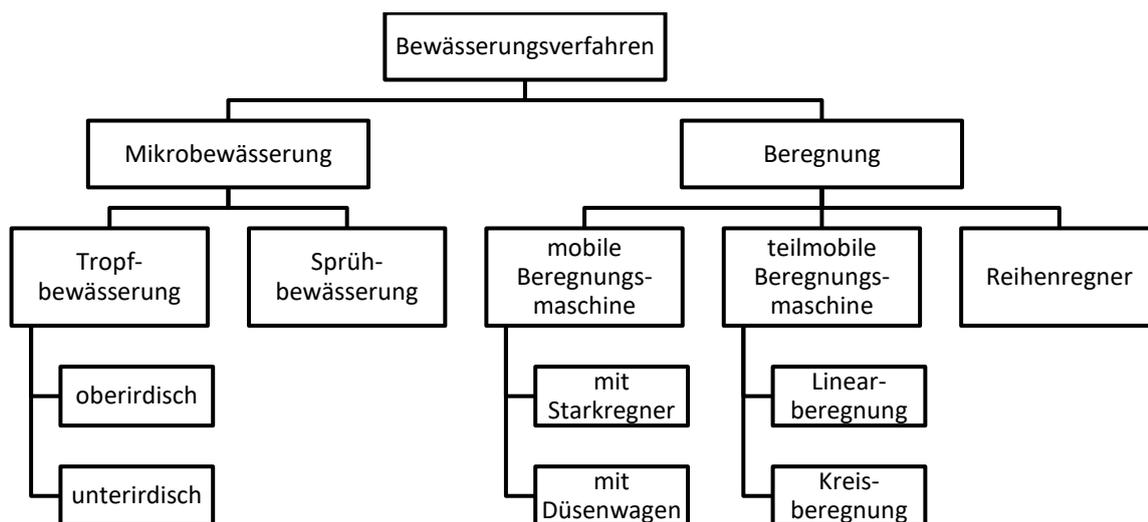
Für Kreis- und Rohrberegnungsanlagen sowie die Tropfbewässerung ist pro Anlage ein Hydrant notwendig. Bei Kreisberegnungsanlagen befindet dieser sich meist mittig auf dem Feld am Drehturm. Bei Linearberegnungsanlagen ist die Anzahl von der Zuleitungsschlauchlänge und der Feldlänge abhängig. Für mobile Beregnungsmaschinen ist der Abstand der am Feldrand positionierten Hydranten von der Beregnungsbreite des Einzelregners oder des Düsenwagens abhängig (Haaren und Haaren, 2014).

Bei der Planung der Zuleitung ist es zentral, Druck- und Energieverluste zu minimieren. Bei der Wahl des Rohrdurchmessers ist zu berücksichtigen, dass die Fließgeschwindigkeit den Druckverlust beeinflusst. Je höher die Fließgeschwindigkeit, desto höher ist der Druckverlust. Die Fließgeschwindigkeit wiederum wird durch den Rohrdurchmesser und die Länge des Rohres bestimmt. Je größer der Rohrdurchmesser ist bzw. je länger das Rohr ist, desto geringer ist die Fließgeschwindigkeit. Rohre mit einem geringeren Durchmesser benötigen für den gleichen Volumenstrom mehr Energie zum Ausgleich der Druckverluste als Rohre mit einem größeren Durchmesser. Neben der Wahl von Rohrdurchmesser und Leitungslänge können auch Ring- oder Parallelleitungen Druckwiderstände und somit Energieverluste verringern, da die Fließgeschwindigkeit bis zu halbiert wird (Hochschule Geisenheim et al., 2017; Haaren und Haaren, 2014). Ein weiterer Vorteil von Ringleitungen ist, dass diese auch genutzt werden können, um mehrere Brunnen miteinander zu verbinden. So kann in Nachfragespitzen – beispielsweise beim gleichzeitigen Betrieb von mehreren Beregnungsanlagen – der Druck besser sichergestellt werden (Haaren und Haaren, 2014).

2.1.2 Wasserverteilung

Bei der Wasserverteilung im Freilandbereich wird grundlegend zwischen zwei Bewässerungsverfahren unterschieden: Beregnung und Mikrobewässerung. Die Verfahren unterscheiden sich in Transport und Applikation des Wassers und lassen sich jeweils in weitere Gruppen unterteilen, wie in Abbildung 2 zu sehen ist.

Abbildung 2: Verfahren zur Wasserverteilung



Quelle: Eigene Darstellung nach DIN 19655 (2008).

Bei den **mobilen Beregnungsmaschinen** handelt es sich um Rohrtrommeln, bei denen entweder ein Einzelregner oder ein Düsenwagen angeschlossen werden kann. Die Fortbewegung über das Feld kann per Regnereinzug oder Maschinenvorschub entlang der Regnerleitung erfolgen (KTBL, 2014). Mobile Beregnungsmaschinen bieten ein hohes Maß an Mobilität und Flexibilität bei den Einsatzmöglichkeiten und werden hauptsächlich im Ackerbau eingesetzt (Haaren und Haaren, 2014; KTBL, 2014; Sourell et al., 2010). Bei der Verwendung von Einzelregnern können durch den notwendigen hohen Wasserdruck am Regner von 4 bis 5 bar hohe Energiekosten entstehen (KTBL, 2014; Haaren und Haaren, 2014; Sourell et al., 2010; LfL, 2008). Ein weiterer Nachteil ist die relativ

ungleichmäßige Wasserverteilung, v. a. durch eine starke Windanfälligkeit und die damit einhergehende schlechte Wassereffizienz (Thörmann und Sourell, 2011; LfL, 2008; Haaren und Haaren, 2014; Sourell et al., 2010). Durch die Verwendung eines Düsenwagens können die genannten Nachteile abgeschwächt werden. Eine geringere Wurfweite/-höhe verringert die Windanfälligkeit, zudem ist die Wasserverteilung homogener. Insgesamt sind die Verdunstungsverluste geringer und die Wassereffizienz ist besser (LfL, 2008; Spohrer, 2019). Außerdem ist der benötigte Wasserdruck geringer und so wird weniger Energie benötigt und die Energiekosten fallen geringer aus (Sourell et al., 2010; KTBL, 2014). Die Nutzung von mobilen Beregnungsmaschinen in Kombination mit Düsenwagen ist teurer, da die Kosten für den Düsenwagen noch hinzukommen. Wie in Tabelle 1 zu sehen, sind die Anschaffungskosten mit 6.500–50.000 € für mobile Beregnungsmaschinen mit Einzelregnern vergleichsweise gering. Mobile Beregnungsmaschinen in Kombination mit Düsenwagen sind teurer, da die Kosten für den Düsenwagen von 2.000 bis 34.500 € noch hinzukommen.

Tabelle 1: Kostenüberblick für ausgewählte Beregnungsmaschinen

Technologie	Nutzungsdauer Jahre	Schlaggröße ha	Anschaffungskosten		
			€	€/Jahr	€/(ha×Jahr)
mobile Beregnungsmaschine mit Einzelregner	12	7	6.500	740	110
		37	50.000	5.200	140
Mobile Beregnungsmaschine mit Düsenwagen	12	8,5	2.000	600	70
		36	34.500	4.150	120
Rohrberegnung	10–15	1	10.500	1.100	1.100
		5	100.000	10.700	2.100
Tropfbewässerung	1–12	0,5	2.600 (+ bis zu 18.000 für Verlegetechnik)	280	560
		20	100.000 (+ bis zu 18.000 für Verlegetechnik)	26.700	1.340
Kreisberegnungsmaschine	12	16	34.000	3.200	200
		87	81.000	8.600	100
Linearberegnungsmaschine	12	22	47.000	4.400	200
		55	96.000	9.200	170
kombinierte Linear- und Kreisberegnungsmaschine	12	56,5	63.000	7.600	130
		188	102.000	14.300	80

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf KTBL (2013) und KTBL (2022).

Die **teilmobilen Beregnungsmaschinen** Linearberegnung und Kreisberegnung sowie kombinierte Kreis- und Linearberegnung eignen sich für quadratische und rechteckige Feldstrukturen und größere Schläge (ab 20 ha) (Haaren und Haaren, 2014). Die Maschinen sind meist fest auf einem Feld aufgebaut, da ein Umsetzen, welches nur bei speziellen Maschinen möglich ist, einen hohen Arbeitsaufwand bedeutet (LfL, 2008). Diese Standortbindung der Maschinen stellt gemeinsam mit einem hohen Kapitalbedarf zwischen 34.000 € und 100.000 € die größten Nachteile dar (LfL, 2008; KTBL, 2022). Vorteilhaft sind der geringe Arbeitsaufwand durch die größtmögliche Automatisierung der Anlagen sowie die Möglichkeit, Felder bis zu einer Steigung von 10 % befahren zu können (KTBL, 2014). Zudem weisen Linear- und Kreisberegnung einen geringen Energiebedarf aufgrund eines niedrigen Betriebsdruck von 2 bis 4 bar auf und bieten eine gleichmäßige Verteilung des Wassers bei guter Wassernutzung an, da die Anfälligkeit für Winddrift gering ist (Haaren und Haaren, 2014; LfL, 2008).

Bei den **Reihenregnern** werden Schwachregner an Rohre, Schläuche oder einer Kombination aus beidem, die in Reihen über das Feld verlegt sind, angeschlossen (KTBL, 2014; Sourell et al., 2010). Das Einsatzgebiet der Reihenregner liegt vor allem im Bereich des Gemüse- und Obstbaus (Sourell et al., 2010). Vorteile dieses Beregnungsverfahrens sind die Möglichkeit zur Frostschutzberegnung sowie die Möglichkeit von kleinen Wassergaben (< 5 mm) (Sourell et al., 2010; KTBL, 2014). Nachteilig sind die schlechte Verteilgenauigkeit durch Windanfälligkeit (auch im Dreieck- oder Viereckverband) und der hohe Arbeitsaufwand durch jährlichen Auf- und Abbau sowie ggf. notwendiges Umsetzen (LfL, 2008; Sourell et al., 2010). Die Anschaffungskosten liegen je nach Feldgröße sowie Reihen- und Regnerabstand zwischen 10.500 und 100.000 €, wie in Tabelle 1 abgebildet.

Bei der **Mikrobewässerung** wird das Wasser mit geringem Betriebsdruck über Schläuche verteilt. Bei der **Tropfbewässerung** wird das Wasser ober- oder unterirdisch tropfenweise über Tropfer ausgegeben und benetzt eine punktförmige Fläche. Bei der **Sprühbewässerung** wird Wasser über Mikrodüsen verteilt und benetzt eine größere Fläche zwischen 0,75 und 12 m² (DIN 19655, 2008). Verwendung findet Tropfbewässerung hauptsächlich bei Sonderkulturen, Kulturen mit relativ langer Standzeit auf dem Feld und im Obst- und Gemüsebau und bei hochpreisigen Kulturen (KTBL, 2014; Gramm, 2014; Teichert, 2009). Durch einen vergleichsweise hohen Kapitalbedarf (vgl. Tabelle 1) und hohen Arbeitsaufwand bei Auf- und Abbau ist die Tropfbewässerung ein eher teures Verfahren. Die Spitzen im Arbeitsbedarf treten vor allem vor und nach dem Anbauzeitraum auf. Besonders arbeitsintensiv sind der Auf- und Abbau der Bewässerungsschläuche, während über den Bewässerungszeitraum kaum Arbeit notwendig ist (Gramm, 2014; Sourell, 2009; Teichert, 2009). Im Vergleich zu den anderen Bewässerungstechnologien ist die Tropfbewässerung effizienter. Es wird nur ein deutlich geringerer Bodenteil durchfeuchtet, wodurch es zu geringeren Verdunstungsverlusten kommt. Zudem gibt es bei dieser Technologie keine Probleme mit Windanfälligkeit und damit einhergehender Verteilungenunauigkeit (Drastig et al., 2010; Teichert, 2009; KTBL, 2014). Ein weiterer Vorteil ist der geringe notwendige Betriebsdruck von 0,5 bis 3,5 bar, was zu einem geringen Energiebedarf und somit zu geringeren Kosten für die Energie führt (KTBL, 2014; LfL, 2008; Sourell, 2009). Eine Kombination aus Tropfbewässerung mit Kreis- oder Linearberegnungsmaschinen ist die mobile Tropfbewässerung. Dabei wird das Wasser über an den Beregnungsmaschinen angebrachten Tropfschläuchen verteilt, anstatt durch Sprinkler oder Düsen, und die Vorteile von beiden Technologien werden kombiniert. Es werden Wasserverluste verringert und durch einen geringeren Betriebsdruck wird Energie eingespart (Sourell, 2009).

Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die Vor- und Nachteile sowie den Einsatzbereich der Technologien zur Wasserverteilung.

Tabelle 2: Einsatzbereich, Wassereffizienz, Vor- und Nachteile der Verteiltechnologien

Technologie	Einsatzbereich	Vorteile	Nachteile	Wassereffizienz
mobile Beregnungsmaschine mit Einzelregner	Ackerbau, Obst und Gemüsebau	<ul style="list-style-type: none"> flexible Einsatzmöglichkeiten 	<ul style="list-style-type: none"> schlechte Verteilgenauigkeit hoher Energiebedarf eher schlechte Wassereffizienz teilweise hoher Arbeitsaufwand 	0,6
mobile Beregnungsmaschine mit Düsenwagen	Ackerbau, Obst und Gemüsebau	<ul style="list-style-type: none"> flexible Einsatzmöglichkeiten hohe Wassernutzungseffizienz gute Wasserverteilung geringer Energiebedarf 	<ul style="list-style-type: none"> teilweise hoher Arbeitsaufwand 	> 0,6
Reihen-/Rohrberegnung	Obst- und Gemüsebau, Frostschutzberegnung	<ul style="list-style-type: none"> kleine Wassergaben 	<ul style="list-style-type: none"> schlechte Verteilgenauigkeit Arbeitsaufwand bei Auf- und Abbau 	0,6-0,7
Linearberegnungsmaschine	eher rechteckige Flächen, bewässerungswürdige Kulturen	<ul style="list-style-type: none"> geringer Arbeitsaufwand gute Wasserverteilung geringer Energiebedarf gute Wassereffizienz 	<ul style="list-style-type: none"> Flächengröße Arbeitsaufwand beim Umsetzen (wenn möglich) Bindung an Einsatzort 	0,7–0,8
Kreisberegnungsmaschine	eher quadratische Flächen ab 25 ha, bewässerungswürdige Kulturen	<ul style="list-style-type: none"> geringer Arbeitsaufwand gute Wasserverteilung geringer Energiebedarf gute Wassereffizienz 	<ul style="list-style-type: none"> Flächengröße Arbeitsaufwand beim Umsetzen (wenn möglich) hoher Kapitalbedarf Bindung an Einsatzort 	0,7–0,8
oberirdische Tropfbewässerung	Obst- und Gemüsebau, Sonderkulturen	<ul style="list-style-type: none"> geringer Energiebedarf gute Wasserverteilung geringe unproduktive Verdunstung hohe Wassereffizienz kleine, an die Kultur angepasste Wassergaben 	<ul style="list-style-type: none"> hoher Kapitalbedarf Arbeitsaufwand bei Auf- und Abbau 	0,9
unterirdische Tropfbewässerung	Gemüsebau, Sonderkulturen	<ul style="list-style-type: none"> geringer Energiebedarf gute Wasserverteilung hohe Wassereffizienz kleine, an die Kultur angepasste Wassergaben 	<ul style="list-style-type: none"> hoher Kapitalbedarf Arbeitsaufwand bei Auf- und Abbau Beseitigung von Leckagen 	0,9

Quelle: Sourell (2009), Sourell et al. (2010), LfL (2008), Spohrer (2019), Haaren und Haaren (2014), Thörmann und Sourell (2011), Teichert (2009; Drastig et al.), Drastig et al. (2010), Lamm (2002), KTBL (2018).

2.1.3 Bewässerungssteuerung

Mit der Bewässerungssteuerung können der optimale Beregnungszeitpunkt sowie die richtige Wassermenge ermittelt werden (Fricke, 2018). Die optimale Steuerung der Bewässerung bringt durch die verbesserte Wasser- und Nährstoffeffizienz der Pflanzen sowohl ökologische als auch ökonomische Vorteile (Paschold, 2010: S. 9–12). Durch eine optimale Bewässerungsstrategie kann zudem die Bewässerungseffizienz erhöht werden (Beck et al., 2021).

Moderne Bewässerungssteuerung erfolgt datenbasiert. Beispielsweise bestimmen Sensoren die Bodenfeuchte bzw. den Wasserzustand der Pflanze oder Produkte aus der Fernerkundung liefern Informationen zur Pflanzenvitalität. Die Messung der Bodenfeuchte ist die bisher praxistauglichste und am weitesten verbreitete Methode in diesem Bereich (Michel und Sourell, 2014: S. 105–109). Diese kann über die Messung der Saugspannung des Bodens oder des Bodenwassergehalts erfolgen (vgl. Tabelle 3).

Tabelle 3: Sensoren für die Bewässerungssteuerung

	Tensiometer	Watermark Sensor	Equitensiometer	Wassergehalts-sensoren
Messmethode	Bodenwasser-spannung bis 800 hPA	Bodenwasser-spannung bis 2.000 hPA	Bodenwasser-spannung bis 15.000 hPA	volumetrischer Wassergehalt
Sensorpreis (€)	Ab 50	40–200	150–700	70–120
Auslesegerätepreis (€)	-	280–1.000	-	80–1.400
Jährliche Kosten (€)	-	-	-	bis zu 199 (Lizenzgebühr für App)

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Beck et al. (2021).

Außerdem können sogenannte Steuerungsmodelle für die Ermittlung von Bewässerungszeitpunkt und -menge genutzt werden. Diese Modelle bilanzieren den Bodenwassergehalt unter Berücksichtigung von Niederschlags- und Evapotranspirationen und bestimmen darüber den optimalen Zeitpunkt und die Wassermenge von einzelnen Bewässerungsvorgängen. Einige Modelle beziehen auch komplexere Vorgänge wie Sickerwasser, kapillaren Aufstieg oder die Interaktionen zwischen den verschiedenen Parametern mit ein (Michel und Sourell, 2014). Allerdings haben diese Modelle auch Grenzen. Zwar können Bewässerungsgaben kulturspezifisch und angepasst auf die Entwicklungsstadien der Pflanzen ermittelt werden, eine Steuerung von Erntequalität oder -zeitpunkten ist im Modell jedoch nicht möglich. (Expert*innen Hessen, 2023). Die modellbasierten Bewässerungsempfehlungen reichen von vier Tagen in die Zukunft bis zu Empfehlungen für die gesamte Bewässerungsperiode. Einige Bewässerungssteuerungen bieten zusätzlich eine Beregnungsberatung an. Eine Auswahl an Modellen zur Bewässerungssteuerung ist in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Modelle für die Bewässerungssteuerung

	Anbieter	Kosten	Output
GESEHN	Hochschule Geisenheim	kostenfrei	Bewässerungsempfehlung basierend auf der Geisenheimer Steuerung
agrowetter Beregnung	DWD	kostenpflichtig	Bewässerungsempfehlung bis zu vier Tage in die Zukunft
BOdenWasser Bilanzierung (BOWAB)	LBEG	kostenfrei	Bewässerungsempfehlung basierend auf der Bilanzierung des Bodenwasserhaushalts
Bewässerungs-App	ALB Bayern e. V.	kostenfrei	Bewässerungsempfehlungen für die Anbauperiode
Einzelgaben-App	ALB Bayern e. V.	kostenfrei	maximale Höhe der Einzelwassergaben, sodass es nicht zu Versickerung kommt
IRRIGAMA		kostenpflichtig	Beregnungsberatung durch Dienstleister
Zephyr		kostenpflichtig	Beregnungsberatung durch Dienstleister oder selbstständige Anwendung

Quelle: DWD (2024), ALB (2024, 2020), Riedel (2017), Engel et al. (2013), HGU (2024).

Beregnungsmaschinen oder Pumpenschaltungen können außerdem mittels Mobilfunks aus der Ferne überwacht und gesteuert werden. Es können automatisiert Betriebszustände übertragen oder Störungen gemeldet werden, wodurch Kontrollfahrten entfallen. Zudem können die Beregnungsanlagen oder Pumpen per Mobilfunk ein- und ausgeschaltet werden. Durch die gesparten Wegzeiten kann es zu einer Senkung von Verfahrenskosten kommen (Sourell, 2009; Michel und Sourell, 2014). Neben der Überwachung und Steuerung ist auch die automatische Dokumentation der Bewässerung möglich.

2.1.4 Precision Irrigation

Bei Precision Irrigation handelt es sich um teilflächenspezifische Bewässerung. Die Bewässerungshöhen innerhalb einer Bewässerungsgabe und eines Feldes können durch unterschiedliche Laufgeschwindigkeiten der Bewässerungsmaschine im Feld und durch unterschiedliche Bewässerungsraten gesteuert werden (Evans et al., 2013). Für diese Art der Bewässerung sind zum einen detaillierte Informationen über die Heterogenität des Bodens und dessen Zustands – beispielsweise in Form von Applikationskarten – notwendig und die Technik muss um Magnetventile für die Düsen und um Steuerungskomponenten und -software ergänzt werden. In einer Studie von Thörmann et al. (2012) entstand für die Ausstattung einer Kreisberegnungsmaschine für ein 27-ha-Versuchsfeld und den sonstigen notwendigen Anpassungen ein Kapitalbedarf von ca. 2.100 €/ha. Die jährlichen Verfahrenskosten zusätzlich zu den Kosten für die Kreisberegnung belaufen sich auf ca. 274 €/ha. In einem zweijährigen Versuch mit Zuckerrüben und Kartoffeln (2010 und 2011) konnten keine Wasser- oder Kosteneinsparungen durch die Anwendung von Precision Irrigation Techniken ermittelt werden (Thörmann et al., 2012). Insgesamt sind die Adoptionsraten in diesem Bereich noch gering und es ist wenig über die tatsächlichen Vorteile der Technologie bekannt (Evans et al., 2013).

2.1.5 Fertigation

Bei der Fertigation handelt es sich um eine Kombination von Düngung (**Fertilization**) und Bewässerung (**Irrigation**) (Paschold, 2010: S. 112). Das Bewässerungswasser kann mit allen wasserlöslichen Einzel- oder Mehrnährstoffdüngern angereichert werden, was eine gezielte und effektive Möglichkeit zur Anwendung von Düngern ist und zu einem sparsameren Verbrauch führen kann (Paschold, 2010: S. 112). Voraussetzung ist eine

gleichmäßige Wasserverteilung, wodurch sich vor allem Tropfbewässerung sowie Linear- und Kreisberegnung für die Fertigation eignen (Lfl, 2008; Teichert, 2009; Spohrer, 2019). Insbesondere bei der Tropfbewässerung ist aufgrund der Möglichkeit von kleinen Bewässerungsgaben eine kontinuierliche Versorgung mit Nährstoffen möglich, wenngleich die Leitungen durch Salzablagerungen verstopft werden können, wenn nicht regelmäßig mit Klarwasser gespült wird (Paschold, 2010: S. 115).

2.2 Ökonomik der Bewässerung

2.2.1 Kosten der Bewässerung

Die Kosten für die Bewässerung lassen sich in fixe, variable und Lohnkosten unterteilen. Die fixen Kosten setzen sich aus Abschreibung, Zinskosten, Kosten für Versicherung, technischer Überwachung und Wartung zusammen und fallen unabhängig von der Nutzung aus. Variable Kosten sind abhängig von der Nutzungsintensität und umfassen Kosten für Betriebsmittel und Reparaturen (KTBL, 2013). Die Lohnkosten ergeben sich aus dem Arbeitszeitbedarf und dem Stundenlohn der Mitarbeiter*innen.

Für die Wasserbereitstellung von Grundwasser ist der Bau eines Brunnens notwendig, womit Baustelleneinrichtung, Bohrung und Brunnenausbau einhergehen. Für diese Arbeitsschritte fällt ein Investitionsbedarf von etwa 540 € pro m Tiefe (KTBL, 2013) an. Die Tiefe eines Brunnens hängt vom standortspezifischen Grundwasserstand ab, in Tabelle 5 sind die Kosten für mehrere Brunntiefen beispielhaft dargestellt. Die variablen Kosten entstehen im Fall von Brunnen nur für Reparaturen. Die Größe der Bewässerungsflächen die mit einem Brunnen versorgt werden können, hängt stark von den standortspezifischen Gegebenheiten ab, u.a. der Schüttung des Brunnens. Für einen Beispielbetrieb mit elf Brunnen und 502 ha bewässerter Fläche geben Haaren und Haaren (2014) durchschnittliche Fixkosten von 64 €/ha beregneter Fläche an, während Fricke (2006), in Abhängigkeit von der Brunntiefe und angeschlossenen Bewässerungsfläche, fixe Kosten zwischen 47 €/ha und 73 €/ha angibt.

Tabelle 5: Investitionskosten für den Brunnenbau und Betriebskosten

Tiefe (m)	Investitionsbedarf je m Tiefe (€)	Investitionsbedarf (€)	Fixe Kosten (€/Jahr)	Variable Kosten (€/Jahr)	Gesamtkosten (€/Jahr)
20	540	10.000	583	50	633
40	540	22.700	1.326	114	1.440
80	540	43.100	2.517	216	2.733

Anm.: Die angenommene Nutzungsdauer beträgt 30 Jahre.

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf KTBL (2013).

Für die Wasserbereitstellung fallen weitere Kosten für die Anschaffung und den Betrieb von Pumpen an. Die Anschaffungspreise für eine Auswahl an Pumpen in Abhängigkeit von Antriebsart und Förderleistung sind in Tabelle 6 abgebildet.

Tabelle 6: Investitionskosten für Pumpen mit einem Druck von 12 bar

Bezeichnung	Antriebsart	Förderleistung m^3/h	Anschaffungspreis €
Bohrlochwellenpumpe für Zapfwellenantrieb	Elektro	100	11.000
Bohrlochwellenpumpe für Zapfwellenantrieb	Elektro	150	13.500
Bohrlochwellenpumpe für Zapfwellenantrieb	Elektro	50	7.500
Bohrlochwellenpumpe	Diesel	100	28.500
Bohrlochwellenpumpe	Diesel	150	30.000
Bohrlochwellenpumpe	Diesel	50	24.000
Saugpumpe	Diesel	100	22.000
Saugpumpe	Diesel	50	18.500
Saugpumpe	Elektro	100	8.800
Saugpumpe	Elektro	50	6.000
Unterwassermotorpumpe	Elektro	100	13.500
Unterwassermotorpumpe	Elektro	150	15.000
Unterwassermotorpumpe	Elektro	50	6.500

Anm.: Betriebsdruck: 12 bar, Leistungspotenzial: 15.000 m³, Auslastungsschwelle: 1.000 Stunden.

Quelle: KTBL (2022).

Neben diesen Investitionskosten für den Bau des Brunnens fallen auch weitere Kosten für die Genehmigung an. Für die Erlaubnis zur Wasserentnahme fallen beispielsweise Verwaltungskosten und Kosten für hydrogeologische Gutachten an. In Hessen unterscheiden sich die Kosten je nach Bezugsquelle des Wassers. Für Wasserentnahmen aus Oberflächengewässern werden die Kosten in Abhängigkeit von der zu bewässernden Fläche bestimmt, beim Grundwasser wird die beantragte Entnahmemenge herangezogen (siehe Anlage 1 zur Verwaltungskostenordnung für den Geschäftsbereich des Ministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz – kurz: VwKostO-MUKLV¹). Die Kosten sind in Tabelle 7 dargestellt. Zusätzlich kann je nach geplanter Entnahmemenge eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) notwendig sein. Bei Projekten im Bereich der landwirtschaftlichen Bewässerung ist ab einer Entnahmemenge von 100.000 m³ eine allgemeine Vorprüfung zur UVP-Pflicht des Einzelfalls vorgesehen, bei Mengen zwischen 5.000 und 100.000 m³ ist eine standortbezogene Vorprüfung des Einzelfalls erforderlich, wenn durch die Entnahme negative Auswirkungen auf das entsprechende Ökosystem erwartbar sind. Ab einem Entnahmevervolumen von mehr als 10 Mio. m³ ist eine Umweltverträglichkeitsprüfung obligatorisch (§ 7 und Anlage 1 Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung [UVPG]). Auch für hydrogeologische Stellungnahmen des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie können 200 € oder mehr anfallen (Anlage 1 VwKostO-MUKLV¹). Neben den Verwaltungskosten können weitere Kosten für die Erstellung von hydrologischen oder hydrogeologischen Gutachten oder notwendigen Untersuchungsanalysen entstehen.

In der Literatur werden für die Bereitstellung von Wasser aus Oberflächengewässern Betriebskosten zwischen 0,10 €/m³ und 0,24 €/m³ angegeben. Bei der Bereitstellung aus Grundwasser nehmen die Verfahrenskosten mit Brunntiefe zu und liegen zwischen 0,11 €/m³ und 0,35 €/m³. Bei beiden Bereitstellungsverfahren sind die Kosten bei höheren Fördermengen geringer und der Betrieb der Pumpen mit Strom führt im Vergleich mit dem Betrieb durch ein Dieselaggregat zu Kosteneinsparungen (Sourell und Thörmann, 2010; Battermann und Theuvsen, 2009). Die Fixkosten für die Bereitstellung aus Grundwasser in der Literatur belaufen sich je nach Größe der bewässerten Fläche, Brunntiefe und Länge der Zuleitung auf 71–111 €/ha (Fricke, 2006; Haaren und Haaren, 2014).

¹ Verwaltungskostenordnung für den Geschäftsbereich des Ministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (VwKostO-MUKLV)

Tabelle 7: Verwaltungskosten für Grund- und Oberflächenwasserentnahmen in Hessen

Grundwasserentnahmen		Oberflächenwasserentnahmen	
Menge (in m ³)	Kosten	Fläche (in ha)	Kosten
bis 500	370 €	bis 30	23 € je ha (mind. 240 €)
bis 1.000	820 €	bis 100	1.050 €
bis 50.000	2.100 €	bis 500	2.100 €
bis 500.000	3.470 €	bis 1.000	3.500 €
bis 750.000	6.300 €	über 1.000	3.500 € + 480 € je weitere 500 ha
bis 1 Mio.	7.670 €		
bis 2,5 Mio.	15.750 €		
über 2,5 Mio.	25.200 €		

Quelle: Verwaltungskostenordnung für den Geschäftsbereich des Ministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (VwKostO-MUKLV¹).

Für die Zuleitung des Wassers von der Wasserquelle bis zum Feld sind Wasserleitungen sowie am oder auf dem Feld ein oder mehrere Hydranten notwendig. Die Leitungslängen sind standortspezifisch, während die Anzahl der Hydranten von der Bewässerungstechnologie abhängt. Der Investitionsbedarf und die Betriebskosten pro Einheit für Leitungsrohre und Hydranten sind in Tabelle 8 zusammengefasst. Für einen Beispielbetrieb mit 502 ha bewässerter Fläche, insgesamt 12,3 km Zuleitungen und 117 Hydranten ergeben sich jährliche Gesamtkosten von ca. 46 €/ha für die Wasserzuleitung, bei nur 2,35 km Zuleitung und 20 Hydranten belaufen sich die Kosten auf ca. 11 €/ha (Haaren und Haaren, 2014).

Tabelle 8: Investitionsbedarf und Betriebskosten für die Wasserzuleitung

Anlageelement	Einheit	Anschaffungspreis (€/Einheit)	Verlegungskosten (€/Einheit)	Fixe Kosten	Variable Kosten (€/Jahr × Einheit)	Gesamtkosten
Rohr PVC PN 10/DN 150	m	11	3,5	0,8	0,17	0,97
Betonwiderlager	Stück	27	42	1,91	0,41	2,32
Doppelmuffe 150/150	Stück	190	55	13,78	2,85	1,63
Hydrant	Stück	421		30,52	6,32	36,84

Anm.: Nutzungsdauer: 20 Jahre.

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf KTBL (2013).

Die Investitions- und Betriebskosten für die Wasserverteilung auf dem Feld sind abhängig von der Schlaggröße, der gewählten Bewässerungstechnologie und der Bewässerungsmenge. In der Literatur variieren die Gesamtkosten zwischen 151 €/ha und 2500 €/ha (Gramm, 2014; Haaren und Haaren, 2014; Lüttger et al., 2005; Belau und Fröba, 2009; Sourell et al., 2010; Fröba und Belau, 2018). In Tabelle 9 sind die Kosten für eine Bewässerungsmenge von 90 mm beispielhaft für alle Technologien dargestellt.

Tabelle 9: Arbeitsaufwand und Kosten bei einer Bewässerungsmenge von 90 mm (exemplarisch)

Technologie	Schlaggröße	Wassergaben	Arbeitsaufwand	Variable Kosten	Fixe Kosten	Lohnkosten	Gesamtkosten
	<i>ha</i>	<i>Anzahl</i>	<i>Akh/ha</i>	<i>€/ha</i>			
Topfbewässerung	5	5	11	34	666	165	864
mobile Beregnung mit Einzelregner	5	3	1	35	122	33	190
mobile Beregnung mit Düsenwagen	5	3	2	56	233	25	314
Kreisberegnung	16	3	0	25	250	2	277
Linearberegnung	22	3	1	27	391	7	425
Reihenregner/ Rohrberegnung	5	5	7	169	1095	98	1363

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf KTBL (2018, 2023).

2.2.2 Wirtschaftlichkeit der Bewässerung

Die Wirtschaftlichkeit von Bewässerungsmaßnahmen hängt von Standortfaktoren wie Wetter und Boden, der angebauten und bewässerten Kultur, der Bewässerungstechnik und damit einhergehenden Kosten sowie den Erzeugerpreisen und den durch Bewässerung erzielten Mehrerträgen ab. In der Literatur wird die beregnungskostenfreie Leistung, welche eine Form der Direkt- und arbeitsenergiekostenfreie Leistung ist, als Indikator für die Wirtschaftlichkeit verwendet. Direkt- und arbeitsenergiekostenfreie Leistungen bieten einen Maßstab für die Wirtschaftlichkeit von Produktionsverfahren (KTBL, 2017). Eine positive beregnungskostenfreie Leistung bedeutet, dass die Bewässerungsmaßnahme wirtschaftlich ist. Bei der Planung von Bewässerungsanlagen muss die langfristige Wirtschaftlichkeit (positive beregnungskostenfreie Leistung) über die Fruchtfolge gegeben sein, während bei existierenden Anlagen (kurzfristig) auch die positive variable beregnungskostenfreie Leistung, also die Deckung der variablen Kosten der Beregnung, ausreicht (Fricke, 2014).

Die beregnungskostenfreie Leistung ergibt sich aus der Differenz zwischen durch die Bewässerung abgesicherten, monetären Erlös und den Mehrkosten für die Bewässerung. Dieser Mehrerlös im Vergleich zu fehlender Bewässerung wird durch das Produkt aus abgesichertem, mengenmäßigem Ertrag der jeweiligen Kultur (t/ha) und dem jeweiligen Produktpreis (€/t) berechnet. Die Mehrkosten lassen sich in variable Kosten sowie fixe Kosten aufteilen. Die variable beregnungskostenfreie Leistung berücksichtigt ausschließlich variable Kosten wie Kosten für Reparaturen und Betriebsstoffe sowie Arbeitserledigung und Wasser. Dies ist ein Teilkostenansatz, welcher eine kurzfristige Aussage zur Wirtschaftlichkeit erlaubt. Der Vollkostenansatz, welcher auch fixe Kosten wie Zinsen und Abschreibungen für Investitionen und Wartungskosten umfasst, ermöglicht eine langfristige Bewertung der Wirtschaftlichkeit in Form der beregnungskostenfreien Leistung. Ein Überblick zu den Komponenten und Einflussfaktoren ist Tabelle 10 zu entnehmen. Je nach zugrundeliegenden Annahmen und Daten sind Klima-, Ertrags-, Preis- und Kostensignale auf die Wirtschaftlichkeit abbildbar.

Tabelle 10: Überblick zur (variablen) berechnungskostenfreien Leistung

	Komponenten	Einflussfaktoren
Mehrerlös	Preis	Kultur
	Abgesicherter Ertrag	Beregnung, Kultur, Standort
-		
Variable Kosten	Reparaturen	Beregnung, Wasserherkunft, Bewässerungstechnologie
	Betriebsstoffe	Beregnung, Wasserherkunft, Bewässerungstechnologie
	Wasser	Beregnung, Standort, Wasserherkunft
	Arbeitserledigung	Bewässerung, Bewässerungstechnologie
=	Variable berechnungskostenfreie Leistung	
-		
Fixe Kosten	Zinsen	Wasserherkunft, Bewässerungstechnologie, Standort
	Wartung	Wasserherkunft, Bewässerungstechnologie
	Abschreibung	Wasserherkunft, Bewässerungstechnologie, Standort
=	Berechnungskostenfreie Leistung	

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Ebers et al. (2023).

Ergebnisse aus der Literatur zeigen, dass für landwirtschaftliche Kulturen vor allem die Bewässerung von Kartoffeln mit berechnungskostenfreien Leistungen bis zu über 1.000 €/ha (Fricke, 2014; SMUL, 2014; Witte, 2018; Haaren und Haaren, 2014) wirtschaftlich ist. Die Höhe der berechnungskostenfreien Leistung kann je nach unterstellten Kosten und Preisen variieren. Bei den Getreidekulturen ist die variable (kurzfristige) berechnungskostenfreie Leistung meist positiv, während der Anbau unter Berücksichtigung von festen Kosten häufig unwirtschaftlich wird (Witte, 2018; Fricke, 2014). Die Ergebnisse für Zuckerrüben schwanken stark mit den Ertragsergebnissen der zugrundeliegenden Feldversuchen und den unterstellten Preisen, eine variable berechnungskostenfreie Leistung ist aber in allen Fällen gegeben (Fricke, 2014; Gramm, 2014; SMUL, 2014; Lüttger et al., 2005). Die Bewässerung von Gemüsekulturen ist in der Regel wirtschaftlich.

2.3 Qualitätsanforderungen für Bewässerungswasser

Bei der Bewässerung ist zu beachten, dass es zu keiner Gesundheitsgefährdung von Menschen oder Tieren oder Gefährdung der Umwelt – beispielsweise des Grundwassers – kommt. Um dies sicherzustellen, sollte das Bewässerungswasser bestimmte Qualitätsanforderungen erfüllen. Allerdings kann dabei unter Umständen von den Qualitätsanforderungen an Trink- und Badewasser abgewichen werden, da es im Normalfall nicht zu einem direkten Kontakt zwischen Mensch und Bewässerungswasser kommt (Paschold, 2010: 59f.).

2.3.1 Mikrobiologische Anforderungen

In der DIN 19650: 1999-02 sind hygienisch-mikrobiologische Anforderungen festgelegt. Zum anderen werden Nutzungseinschränkungen für Bewässerungswasser unterschiedlicher Qualität festgelegt (DIN 19650, 1999). In Tabelle 11 sind die Nutzungseinschränkungen und Grenzwerte für die vier sich ergebenden Nutzungsklassen dargestellt.

Tabelle 11: Hygienisch-mikrobiologischer Anspruch an Bewässerungswasser nach DIN 19650

Eignungs- klasse	Anwendung		Fäkal- streptokokken	E. coli	Salmonellen	Potenziell infektiöse Stadien von Mensch- und Haustierparasiten
	ohne Einschränkungen	mit Einschränkungen	je 100 ml	je 100 ml	je 1.000 ml	je 1.000 ml
1	alle Gewächshaus- und Freilandkulturen ohne Einschränkungen		nicht nachweisbar	nicht nachweisbar	nicht nachweisbar	nicht nachweisbar
2	Freiland- und Gewächshauskulturen für den Rohverzehr		≤ 100 ⁴⁾	≤ 200 ⁴⁾	nicht nachweisbar	nicht nachweisbar
3	nicht zum Verzehr bestimmte Gewächshauskulturen, Gemüse und Obst zur Konservierung und Lagerung, alle anderen Freilandkulturen ohne Einschränkungen	Freilandkulturen für den Rohverzehr bis Fruchtansatz bzw. Gemüse bis 2 Wochen vor der Ernte, Grünland bzw. Grünfütterpflanzen bis 2 Wochen vor dem Schnitt oder der Beweidung	≤ 400	≤ 2.000	nicht nachweisbar	nicht nachweisbar
4	Wein- und Obstkulturen zu Frostschutz, Forstkulturen, Polterplätze und Feuchtbiopten	Zuckerrüben, Stärkekartoffeln, Ölfrüchte und Nahrungspflanzen zur industriellen Verarbeitung und Saatgut bis 2 Wochen vor der Ernte, Getreide bis zur Milchreife (nicht zum Rohverzehr), Futter zur Konservierung bis 2 Wochen vor der Ernte	Abwasser, das mindestens eine biologische Reinigungsstufe durchlaufen hat	Abwasser, das mindestens eine biologische Reinigungsstufe durchlaufen hat	Abwasser, das mindestens eine biologische Reinigungsstufe durchlaufen hat	für Darmnematoden keine Standardempfehlung möglich; für Stadien von Taenia: nicht nachweisbar

Quelle: Eigene Darstellung nach DIN 19655, 2008.

2.3.2 Chemische Anforderungen

Die Eignung von Wasser für die Bewässerung aus chemischer Sicht lässt sich weniger eindeutig bewerten als aus mikrobiologischer Sicht, da die Anforderungen je nach Kultur und Bewässerungstechnologie variieren (Pfleger, 2009). Der überwiegende Teil der Stoffe führt zu keiner Schädigung, sondern hat Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum oder es kann zu Akkumulationen in Boden oder Pflanze und damit in Mensch oder Tier kommen (Paschold, 2010: S. 65). Aus technologischer Sicht sind vor allem Eisen und Calcium von Bedeutung, bei Tropfbewässerungsanlagen können diese Stoffe durch Oxidation zur Verstopfung der feinen Tropfstellen führen (Paschold, 2010: S. 46). Zudem können sie die Qualität von Ernteprodukten mindern, wenn es beispielsweise bei Gemüse zu Verfärbung kommt (Paschold, 2010: S. 65). Durch Salze kann ein negativer Einfluss auf das Pflanzenwachstum hervorgerufen werden. Als Parameter für den allgemeinen Salzgehalt wird die elektrische Leitfähigkeit verwendet, daneben gibt es auch Grenzwerte für die Gehalte einzelner Salze wie Natrium, Chlorid oder Nitrat. In Tabelle 12 sind obere Grenzwerte für salzempfindliche und -unempfindliche Pflanzen aufgeführt. Zu den salzempfindlichen Pflanzen gehören beispielsweise Bohnen, Zwiebeln und Äpfel, während Gerste, Spargel und Zuckerrüben eher unempfindlich sind (Fortmann und Grimm, 2017). Neben einer Hemmung des Pflanzenwachstums kann es bei natriumchloridhaltigem Wasser auch zu einer Versalzung des Bodens kommen (Hemming et al., 2009). Der Nitratgehalt von Bewässerungswasser sollte zudem auch bei der Stickstoffdüngung berücksichtigt werden (Pfleger, 2009). Bewässerungswasser mit einem Nitratgehalt von 200 mg/l enthält 45,2 mg Stickstoff pro Liter. Bei einer angenommenen Bewässerung von 100 mm, werden 1.000.000 l Wasser auf einen Hektar ausgebracht. Dies entspricht einer Menge von 45,2 kg Stickstoff (Pfleger, 2009).

Tabelle 12: Obere Grenzwerte für Salze und Pflanzennährstoffe im Bewässerungswasser

Kenngrößen	Salzempfindliche Pflanzen	Salzunempfindliche Pflanzen
Kalium (mg/l)	200	
Natrium (mg/l)	100	
Chlorid (mg/l)	250	500
Sulfat (mg/l)	1.200	
Nitrat (mg/l)	300	
pH-Wert	5–9,5	
Wasserhärte (°dH)	30	60
Leitfähigkeit (µS/cm)	2.000	3.000

Quelle: Eigene Darstellung nach Pfleger (2009), Paschold (2010: S. 66).

Schwermetalle werden in Boden und Pflanzen angereichert, ab gewissen Konzentrationen können die Stoffe toxisch für die Kulturpflanzen wirken. In der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenordnung von 2021 sind Grenzwerte für jährliche Frachten über alle Eintragspfade angegeben. Diese Angaben in Gramm pro Hektar und Jahr (vgl. Tabelle 13) lassen sich in Konzentrationen in Bewässerungswasser übertragen. Bei einer Bewässerungsmenge von 100 mm (1.000.000 l/ha) ergibt sich beispielsweise eine maximal zulässige Konzentration von 0,3 mg/l für Kupfer, wenn andere mögliche Eintragspfade nicht mitberücksichtigt werden. Bei stärkerer Bewässerung sinken die zulässigen Konzentrationen entsprechend. Ergänzt werden diese Angabe durch die Richtwerte zur Phytotoxizität in Bewässerungswasser in der DIN 19684-10 (vgl. Tabelle 13).

Tabelle 13: Frachten und Richtwerte für Schwer- und Halbmetalle

Stoff	Zulässige zusätzliche jährliche Frachten an Schadstoffen über alle Eintragspfade (gemäß BBodSchV 2021) (g/(ha×Jahr))	Maximale Konzentration bei 100 mm Bewässerung (µg/l)	Richtwerte für Phytotoxizität in Bewässerungswasser (DIN 19684-10) (µg/l)
Arsen	35	35	100
Blei	200	200	100
Cadmium	5	5	10
Chrom	150	150	50
Kupfer	300	300	1.000
Nickel	75	75	
Quecksilber	1	1	2
Thallium	1,5	1,5	
Zink	1.200	1.200	2.000
Eisen			10.000
Bor			300

Quelle: Eigene Darstellung nach Seis et al. (2016) und BBodSchV (2021).

3 Methodische Grundlagen

3.1 Modellierung des potenziellen Bewässerungsbedarfs

Der **potenzielle Bewässerungsbedarf** gibt die Zusatzwassermenge (in mm bzw. l/m²) – pro Raum- und Zeiteinheit – an, die notwendig ist, um den Bodenwassergehalt auf einem guten Niveau für das Wachstum der Kulturpflanzen zu erhalten. Der Bewässerungs- bzw. Beregnungsbedarf ist somit kultur- und standortspezifisch. Ziel der Bewässerung ist es, ein Ertrags- oder Qualitätsdefizit landwirtschaftlicher Produkte zu verhindern, die durch einen potenziellen Wassermangel auftreten. Durch die räumliche Aggregation auf Kreisebene kann der potenzielle Bewässerungsbedarf regional abgebildet werden. Wichtig bei der Interpretation der potenziellen Werte ist, dass die tatsächliche Bewässerung durch ökonomische und betriebswirtschaftliche Besonderheiten, Qualitätsansprüche und das Wasserdargebot beschränkt werden.

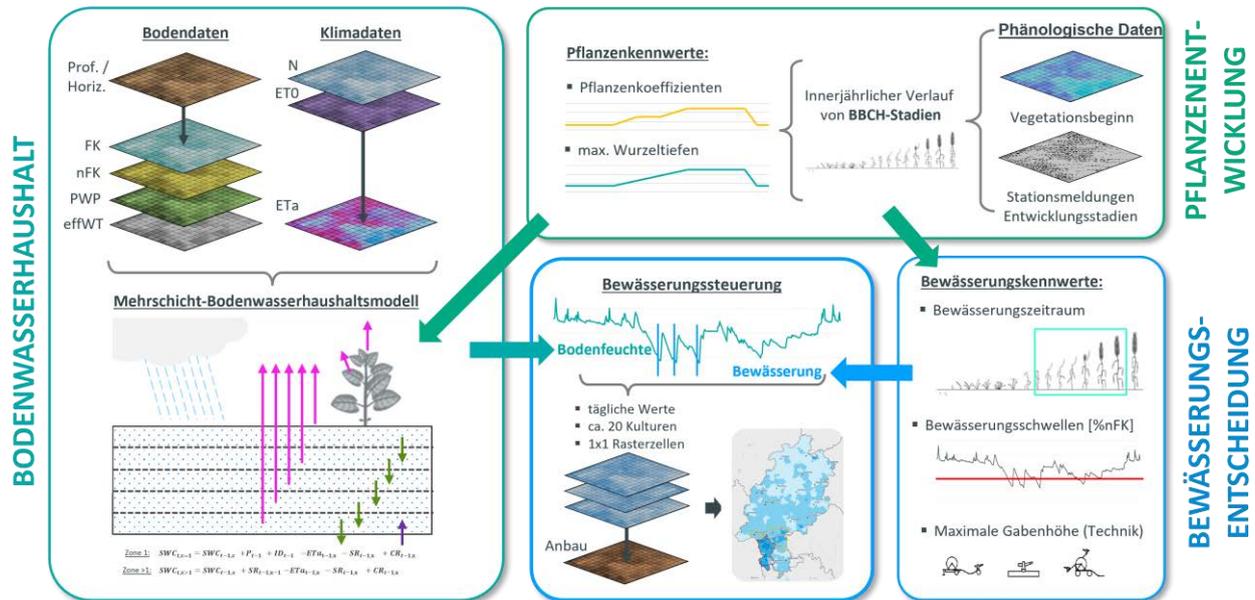
Das hier eingesetzte Modell zur Ermittlung des potenziellen Bewässerungsbedarfs landwirtschaftlicher Kulturen wurde am Thünen-Institut für Lebensverhältnisse in ländlichen Räumen (bis 11/2021: Thünen-Institut für Ländliche Räume) entwickelt und bildet den potenziellen Bewässerungsbedarf regional ab (räumliche Auflösung: Gemeindeebene). Es wurde für das Land Nordrhein-Westfalen (Kreins et al., 2013; Kreins et al., 2015) und Bayern (Bernhardt et al., 2022) entwickelt und erprobt. Es wird ein weiterentwickeltes Modell dieser Ansätze genutzt. Das Modell kombiniert ein eindimensionales Mehrschichtmodell zur Berechnung des Bodenwasserhaushalts (BOWAB-Modell nach Engel et al. (2012)) mit dem Prinzip der Beregnungssteuerung nach dem Vorbild der Bewässerungs- und Einzelwassergaben-App des ALB Bayern e. V. (Müller et al., 2020a).

Die **Bodenwasserhaushaltskomponente** (vgl. Abbildung 3) wird für die Berechnung täglicher standort- und kulturspezifischer Bodenwassergehalte (Bodenfeuchte in % nutzbare Feldkapazität – nFK) genutzt. Dazu werden die Kennwerte der Wasserbindung für Bodenprofile sowie Horizonte ermittelt. Kennwerte der Wasserbindung sind die nutzbare Feldkapazität (nFK), die Feldkapazität (FK) sowie der permanente Welkepunkt (PWP). Zudem wird die effektive Durchwurzelungstiefe (WE) ermittelt, um das Bodenwasser in der Wurzelzone abbilden zu können. Diese Daten werden anschließend auf horizontale Bodenschichten mit der gleichen Mächtigkeit (30 cm) aufgeteilt. Das Modell betrachtet den Boden als Überlaufspeicher, in dem Wasser durch Niederschlag (P) von oben oder Kapillaraufstieg (KA) von unten eindringen kann (Eintragspfad).

Über Sickerwasserraten (SR) dringt Wasser, das nicht durch die Saugspannung der Poren etc. gegen die Schwerkraft gehalten werden kann, vertikal nach unten. Wasser, das aus der untersten Schicht versickert, verlässt das System. Der Bodenwasserspeicher wird zudem durch die Evapotranspiration entleert (Austragspfad). Die aktuelle Transpiration (ETa) erfolgt kulturspezifisch und abhängig von der aktuell durchwurzelten Bodenzone aus den Schichten. Das verdunstete Wasser beeinflusst die Bodenfeuchte negativ.

Die Bilanzierung des Bodenwassergehalts, also die Verrechnung von Ein- und Austragspfaden, erfolgt auf diese Weise täglich, womit die Bodenfeuchte im jahreszeitlichen Verlauf modelliert werden kann. Der Bodenwassergehalt steht in Rückkopplung mit Bewässerungsgaben. Die Bewässerung wirkt also analog zum Niederschlag – als positiver Eintragspfad für den Bodenwasserspeicher.

Abbildung 3: Regionaler potenzieller Bewässerungsbedarf – Modellkomponenten



Quelle: Eigene Darstellung.

Die **Pflanzenkomponente** berechnet basierend auf phänologischen Daten die kulturspezifischen Informationen des Pflanzenkoeffizienten (sog. kc-Wert, bezieht Verdunstungsraten) und maximale Wurzeltiefen im zeitlichen Verlauf eines Jahres. Die täglichen Informationen sind für die Bodenfeuchteberechnung erforderlich, um tagesbezogene Einflüsse der Kulturen (z. B. potenzielle Verdunstungsraten) darzustellen.

Die **Bewässerungskomponente** berücksichtigt kulturspezifische Faktoren für die Bewässerungsentscheidung. Die Bewässerungsschwelle definiert den Bodenwassergehalt in % nFK, ab dem die Bewässerung ausgelöst wird. Der Bewässerungszeitraum definiert mögliche Zeitabschnitte für Wassergaben im Jahresverlauf. Bewässerungsgaben außerhalb der Vegetationsperiode einer Kultur werden so ausgeschlossen. Die maximale Bewässerungsgabe begrenzt die Höhe einer einzelnen Wassergabe technikspezifisch.

In der **Bewässerungssteuerung** werden Bodenfeuchteinformationen und Entscheidungsparameter kombiniert, um tägliche Bewässerungsgaben zu bestimmen. Diese Bewässerungsgaben wirken dabei positiv auf den Bodenfeuchteverlauf. Das Konzept einer Beregnungssteuerung wurde ursprünglich für den Gemüsebau entwickelt, mit dem Ziel, Zeitpunkt und Höhe der Zusatzwassergaben festzulegen. Durch die Hochschule Geisenheim wurde die „Geisenheimer Beregnungssteuerung“ entwickelt, welche die Grundlage für viele bisherigen Arbeiten im Bewässerungskontext liefert (Paschold et al., 2009; LAP, 2002; HGU, 2021).

Insgesamt ergibt die Summe der einzelnen Bewässerungsgaben den **(regionalen) potenziellen Bewässerungsbedarf** pro Raum- und Zeiteinheit. Die potenziellen Bewässerungsbedarfe werden flächendeckend für jede Kultur berechnet und können dann räumlich, zeitlich und unter Berücksichtigung von Landnutzungsanteilen aggregiert werden. Je nach Fragestellung können die Modelleingangsparameter mit unterschiedlichen räumlichen Daten ausgetauscht werden, um beispielsweise verschiedene Zeiträume abzubilden oder räumliche Ausschnitte detaillierter zu betrachten. Der regionale potenzielle Bewässerungsbedarf unter Berücksichtigung von Anbaustrukturen wird wie folgt berechnet:

$$regBEW_r = \sum_{k=1}^N \frac{AF_{k,r}}{LF_r} \times potBEW_{k,r}$$

r = Raumeinheit (z. B. Rasterzelle)

k = Kultur

N = Anzahl der Kulturen

AF = Anbaufläche (Summe einer Kultur)

LF = landwirtschaftlich genutzte Fläche (Summe aller Kulturen)

regBEW = regionaler potenzieller Bewässerungsbedarf

pfIBEW = potenzieller Bewässerungsbedarf

Die Interpretation des potenziellen Bewässerungsbedarfs erfolgt über eine Klassifizierung von Wertspannen, die den jährlichen Bewässerungsbedarf in Klassen von „sehr gering“ bis „besonders hoch“ einordnen (vgl. Tabelle 14). Die Werte wurden auf Grundlage von Renger und Strebel (Renger und Strebel, 1982) festgesetzt. Bei der Interpretation der Ergebnisse gilt es zu beachten, dass die modellierten Bewässerungsbedarfe nicht die reale Situation abbilden, sondern nur eine Annäherung auf Grundlage der bestmöglichen Datengrundlage darstellen. Der regionale Bewässerungsbedarf beschreibt den Mittelwert des pflanzenphysiologischen Bedarfs einer angebauten Kultur multipliziert mit den Anbauanteilen (Landnutzung) einer Region.

Tabelle 14: Kennwertklassifizierung der Bewässerungsbedürftigkeit

Ø Bewässerungsmenge pro Jahr	Bewässerungsbedarf
≤ 25 mm	keine
> 25–50 mm	sehr gering
> 50–75 mm	gering
> 75–100 mm	mittel
> 100–125 mm	hoch
> 125 mm	sehr hoch

Quelle: Eigene Darstellung, verändert nach Renger und Strebel (1982).

3.2 Modellierung des potenziellen Wasserbedarfs für die Frostschutzberegnung

Basierend auf den Ausführungen von Snyder et al. (2005) und Paschold (2010) wurde ein Modell zur Quantifizierung des Wasserbedarfs für die Frostschutzberegnung entwickelt. Die Frostschutzberegnung ist abhängig von der Feuchtkugeltemperatur sowie pflanzenspezifischen Kennwerten (kritische Temperatur, BBCH-Stadium und Applikationsraten). Für jeden Tag und jede Kultur wird geprüft, ob die minimale Feuchtkugeltemperatur kleiner gleich der kulturspezifischen und BBCH-spezifischen kritischen Temperatur ist. Ist dies der Fall, wird die Frostschutzberegnung eingeschaltet. Die benötigte Wassermenge ergibt sich aus der kulturspezifischen Applikationsrate ($m^3/(h \times ha)$) multipliziert mit der Frostschutzberegnungsdauer. Da die Klimadaten vom DWD nur in täglicher Auflösung vorliegen, kann die Beregnungsdauer nicht basierend auf dem Temperaturverlauf über den Tag ermittelt werden. Stattdessen wird, in Absprache mit Expert*innen aus Hessen (Expert*innen Hessen, 2023), eine Frostschutzberegnungsdauer von jeweils acht Stunden pro Tag, an dem die kritische Temperatur unterschritten wird, angenommen. Da die Klimadaten vom DWD nur in täglicher Auflösung vorliegen, kann die Beregnungsdauer nicht basierend auf dem Temperaturverlauf über den Tag ermittelt werden.

Die Berechnung findet auf Basis von Modellkulturen statt, für welche die notwendigen Daten, insbesondere die Phänologie, vorhanden sind. Anschließend werden die Ergebnisse der Modellkulturen zu den Kulturaggregaten zusammengefasst, wobei die einzelnen Modellkulturen anteilig eingehen. Die räumliche Rechenebene ist für Hessen ein 1×1 km-Raster. Die Ergebnisse der Rasterebene werden anschließend auf die Gemeindeebene aggregiert, wobei die einzelnen Kulturaggregate anhand der Landnutzung gewichtet werden.

3.3 Modellierung der Bewässerungswürdigkeit

Die Bewässerungswürdigkeit wird in Form der beregnungsfreien Leistung, die in Kapitel 2.2.2 erläutert wird, modelliert. Dabei wird der Mehrerlös, welcher durch die Bewässerung abgesichert wird, den variablen und/oder

fixen Kosten gegenübergestellt. Die Bewässerungswürdigkeit kann für verschiedene Kombinationen von Bewässerungstechnologien T Wasserherkünften H und Kulturen berechnet werden. Dabei sind auch standortspezifische Faktoren wie die Feldgröße, bewässerte Gesamtfläche und der Bewässerungsbedarf (Bewässerungsmenge und Anzahl der Gaben) von Bedeutung. Durch diese standortspezifischen Faktoren ist die Modellierung auf räumlicher Ebene möglich.

Für eine Kultur K , welche mit Wasser aus der Wasserherkunft H und der Technologie T bewässert wird, setzt sich die Bewässerungswürdigkeit W bei Vollkosten aus dem Mehrerlös ΔE_K abzüglich der fixen und variablen Kosten für Bereitstellung (fBk_H, vBk_H), Zuleitung ($fZk_{H,T,F}, vZk_{H,T,F}$) und Verteilung ($fMk_{T,F}, vMk_{T,F}$) zusammen:

$$W_{K,T,H} = \Delta E_K - (fBk_H + vBk_H + fZk_{H,T,F} + vZk_{H,T,F} + fMk_{T,F} + vMk_{T,F})$$

Erfolgt nur eine kurzfristige Betrachtung der Bewässerungswürdigkeit, wird die variable berechnungskostenfreie Leistung berechnet und die fixen Kosten bleiben unberücksichtigt:

$$vW_{K,T,H} = \Delta E_K - (vBk_H + vZk_{H,T,F} + vMk_{T,F})$$

Der Mehrerlös für eine Kultur K (ΔE_K) ergibt sich aus dem Produktpreis p_K multipliziert mit dem abgesicherten Ertrag $\Delta Y_{K,B}$, welcher sich in Abhängigkeit der Bewässerungsmenge B , der prozentualen Wasserproduktivität WP_K^{prz} und dem maximalen Ertrag Y_K^{max} ergibt:

$$\Delta E_K = P_K * \Delta Y_{K,B}(M_{Bew}, Y_K^{max}, WP_K)$$

Bei der Wasserbereitstellung hat die Wasserherkunft einen großen Einfluss auf die Kosten. Beim Bezug von Bewässerungswasser über einen Verband V fallen bis zum Feld fixe Kosten fBk in Form eines jährlichen Mitgliedbeitrags ($B_{Mitglied}$) an. Mit dem Mitgliedsbeitrag werden alle fixen Kosten im Zusammenhang mit der Bereitstellung abgeglichen, zum Beispiel Kosten für mögliche Entnahmerechte oder die Instandhaltung von Leitungsnetzen.

$$fBk_{H=V} = B_{Mitglied}$$

Die variablen Kosten fBk bis zum Feld werden durch die Bewässerungsmenge ($M_{Bewässerung}$), die Kosten für die Bereitstellung durch den Verband (K_{Wasser}) und das Wasserentnahmeentgelte (P_{Wasser}) bestimmt.

$$vBk_{H=V} = (K_{Wasser} + P_{Wasser}) * M_{Bew}$$

Wenn Grundwasser für die Bewässerung genutzt wird, fallen bei den variablen Kosten neben dem Wasserentnahmeentgelt Betriebskosten für die Brunnen und die Pumpe an. Beim Brunnen sind diese Kosten abhängig von der Brunnentiefe BT und der durch den Brunnen bewässerten Fläche (F_{bew}). Die variablen Kosten der Pumpe hängen von der Bewässerungsmenge ab, über welche die Betriebsdauer der Pumpe bestimmt wird.

$$vBk_{H=G} = P_{Wasser} * M_{Bew} + vK^{Brunnen}(BT, F_{bew}) + vK^{Pumpe}(M_{Bew})$$

Die fixen Kosten ergeben sich aus fixen Kosten für Brunnen und Pumpe, wie Zinsen und Abschreibung, und den Kosten, welche für die Wasserentnahmeerlaubnis anfallen. Für den Brunnen hängen diese Kosten wie bei den variablen Kosten von der Brunnentiefe und der bewässerten Fläche ab, bei der Pumpe von Bewässerungsmenge und der bewässerten Fläche (F_{bew}). Die Kosten für die Erlaubnis werden durch die erlaubte Entnahmemenge bestimmt, die sich aus der bewässerten Fläche und den Bewässerungsmengen ergibt.

$$fBk_{H=G} = fK^{Brunnen}(BT, F_{bew}) + fK^{Pumpe}(M_{Bew}, F_{bew}) + fK^{Erlaubnis}(M_{Bew}, F_{bew})$$

Bei Oberflächenwasser als Quelle für Bewässerungswasser setzen sich die variablen Kosten aus dem Wasserentnahmeentgelt und Betriebskosten für die Pumpe zusammen:

$$vBk_{H=0} = P_{Wasser} * M_{Bew} + vK^{Pumpe}(M_{Bew}, F_{bew})$$

Die fixen Kosten ergeben sich wie beim Grundwasser aus den Kosten für die Pumpe und die Wasserentnahmeerlaubnis. Bei Entnahmen aus einem Oberflächengewässer ermitteln sich die Kosten nicht in Abhängigkeit von der Bewässerungsmenge, sondern nur basierend auf der bewässerten Fläche.

$$fBk_{H=0} = fK^{Pumpe}(M_{Bew}, F_{bew}) + fK^{Erlaubnis}(F_{bew})$$

Die Kosten der Wasserzuleitung werden durch die Leitungslänge von der Wasserquelle zum Feld, der Anzahl der notwendigen Hydranten sowie der Leitungslänge zur Verbindung der Hydranten bestimmt. Die Anzahl der Hydranten und damit der Leitungslänge zur Verbindung der Hydranten hängt zum einen von Technologie zur Wasserverteilung und zum anderen von der Feldgröße ab.

$$vZk_{H,T,F} = vK_{H,T,F}^{Leitung}(Hydranten, Zuleitung) + vk_{H,T,F}^{Hydrant}(Hydranten)$$

$$fZk_{H,T,F} = fK_{H,T,F}^{Leitung}(Hydranten, Zuleitung) + fk_{H,T,F}^{Hydrant}(Hydranten)$$

Bei der Wasserverteilung lassen sich die Kosten in Teilschritte für Aufbau, Betrieb und Abbau zerlegen. Die Teilschritte Auf- und Abbau fallen bei Tropfbewässerung und Rohrberegnung an, da diese jedes Jahr auf- und wieder abgebaut werden. Linear- und Kreisberegnungsanlagen verbleiben für gewöhnlich dauerhaft auf den Flächen und bei mobilen Beregnungsmaschinen sind Auf-, Abbau und Umstellen auf der Fläche aufgrund des häufigen Vorkommens in den Kosten für den Betrieb inkludiert.

Die fixen Kosten setzen sich aus Abschreibung (*AfA*), Zinsen und sonstigen Kosten (*Sonstiges*) zusammen, die für jede der einzelnen Teilschritte anfallen. Beim Betrieb hängen die Kosten von der Bewässerungsmenge und der Anzahl der Bewässerungsgaben ab, während die Kosten für Auf- und Abbau unabhängig sind.

$$\begin{aligned} fMk_{T,F} = & AfA_{T,F}^{Aufbau} + Zinsen_{T,F}^{Aufbau} + Sonstiges_{T,F}^{Aufbau} + AfA_{T,F}^{Betrieb}(M_{Bew}, T_{Bew}) \\ & + Zinsen_{T,F}^{Betrieb}(M_{Bew}, T_{Bew}) + Sonstiges_{T,F}^{Betrieb}(M_{Bew}, T_{Bew}) + AfA_{T,F}^{Abbau} \\ & + Zinsen_{T,F}^{Abbau} + Sonstiges_{T,F}^{Abbau} \end{aligned}$$

In die variablen Kosten gehen Kosten für Reparaturen, Betriebsstoffe und Arbeitserledigung ein. Für Auf- und Abbau sind die Kosten unabhängig von Bewässerungsmenge und Anzahl der Bewässerungsgaben, beim Betrieb besteht eine Abhängigkeit. Die Arbeitserledigungskosten werden zudem vom Stundenlohn L beeinflusst.

$$\begin{aligned} vMk_{T,F} = & Reparaturen_{T,F}^{Aufbau} + Betriebsstoffe_{T,F}^{Aufbau} + Arbeitserledigung_{T,F}^{Aufbau}(L) \\ & + Reparaturen_{T,F}^{Betrieb}(M_{Bew}, T_{Bew}) + Betriebsstoffe_{T,F}^{Betrieb}(M_{Bew}, T_{Bew}) \\ & + Arbeitserledigung_{T,F}^{Betrieb}(T_{Bew}, L) + Reparaturen_{T,F}^{Abbau} + Betriebsstoffe_{T,F}^{Abbau} \\ & + Arbeitserledigung_{T,F}^{Abbau}(L) \end{aligned}$$

3.4 Quantifizierung des theoretischen Potenzials alternativer Wasserressourcen

Für die Quantifizierung alternativer Wasserressourcen wird ein **theoretisches** mengenmäßiges Potenzial der Wasserressourcen überschlägig abgeschätzt. Das sich ergebende Potenzial $RessourcenPotential_{regional}$ (in m^3) wird regionalen Bewässerungsbedarfen $bewBedarf_{regional}$ (in m^3 pro ha) gegenübergestellt und die potenziell mit der alternativen Wasserressource bewässerbare regionale Fläche $bewFläche_{regional}$ (in ha) bestimmt:

$$bewFläche_{regional}^{ha} = RessourcenPotential_{regional} / bewBedarf_{regional}$$

Zudem wird die zeitliche Verfügbarkeit der Wassermenge betrachtet. Es wird das mengenmäßige Potenzial für das gesamte Jahr und den Vegetationszeitraum (April bis September) bestimmt und ins Verhältnis zur tatsächlichen Bewässerungsmenge im Hessischen Ried (Regierungspräsidium Darmstadt, 2022) gesetzt. Die Abschätzung der theoretischen Wassermengen erfolgt für die alternativen Wasserressourcen auf unterschiedlichen Wegen und wird im Folgenden erläutert.

Oberflächenwasser

Für die Quantifizierung des theoretischen Potenzials eines Oberflächengewässers wird die Differenz aus dem täglichen Durchfluss eines Fließgewässers und einem Grenzwert, unter dem die Entnahme von Wasser verboten ist, berechnet. Als Grenzwert wird der mittlere Niedrigwasserabfluss (MNQ) genutzt und die Entnahmemengen werden jeweils für ein Entnahmerecht am Standort der Durchflussmessstation unter Berücksichtigung der Entnahmebeschränkung auf 0,2 MNQ durch den Erlass „Regelung zur Ermittlung der Mindestwasserführung in Ausleitungsstrecken hessischer Fließgewässer“² ermittelt. Die täglichen Werte werden zu jährlichen Werten aufsummiert, zum einen über das gesamte Jahr und zum anderen über den Vegetationszeitraum von April bis September. Des Weiteren wird analysiert, wann und in welcher Häufigkeit es zu Entnahmeverboten durch die Unterschreitung des Grenzwertes kommt.

Regenwasser

Für die Ermittlung des Potenzials von Regenwasser wird Niederschlagswasser, welches von landwirtschaftlichen Dachflächen gesammelt wird, berücksichtigt. Als erstes werden die Dachflächen von landwirtschaftlichen Flächen identifiziert, als Approximation für die Dachflächen werden die Flächen innerhalb von Hausumringen verwendet. Zur Selektion der relevanten Dächer auf landwirtschaftlichen Betrieben erfolgt eine Begrenzung auf Hausumringe, welche sich auf Flächen gemischter Nutzung der Funktion „Landwirtschaftliche Betriebsfläche“ befinden. Zu diesen Flächen zählen Flächen mit landwirtschaftlicher Nutzung. Des Weiteren werden die Dachflächen auf Gebäude mit der Gebäudefunktion Wohngebäude und Gebäude für Wirtschaft oder Gewerbe begrenzt. Dachflächen von Treib-/Gewächshäuser werden nicht berücksichtigt, da von diesen Dachflächen abfließendes Wasser häufig für die Bewässerung von Kulturen in diesen Gebäuden genutzt wird.

Aus den Hausumringen werden die Flächen der Dächer abgeleitet und der Regenwasserabfluss (RD) basierend auf dem DWA-Merkblatt DWA-M 102-4/BWK-M 3-4 berechnet (DWA, 2022). Dabei wird der Niederschlag mit einem Aufteilungswert a_F korrigiert, der Niederschlagsmenge (P), Evapotranspiration (ET_p) und Speicherhöhe (Sp) des Dachs berücksichtigt:

$$a_F = 0,9115 + 0,00007063 * P - 0,000007498 * ET_p - 0,2063 * \ln(Sp + 1)$$

Da keine Informationen über die Art der Dächer vorliegen, wird für die Speicherhöhe der Standardwert von 0,3 für Steildächer angenommen.

Der tägliche Niederschlagsabfluss vom Dach ergibt sich dann aus dem Aufteilungswert multipliziert mit der Niederschlagsmenge (in mm bzw. l/m²) und der jeweiligen Dachfläche F_{Dach} (in m²):

$$RD = a_F * P * F_{Dach}$$

Die täglichen Abflüsse werden zu zwei jährlichen Mengen aufsummiert. Zum einen wird die gesamte Jahresregenmenge bestimmt und zum anderen die Regenmenge innerhalb der Vegetationszeit, welche sich aus den Niederschlagsmengen der Monate April bis September ergibt, berechnet.

Wasserwiederverwendung

Für die Ermittlung des Potenzials der Wiederverwendung von gereinigtem Abwasser dienen die anfallenden jährlichen Abwassermengen aus kommunalen Kläranlagen als Grundlage. Diese Mengen ergeben direkt das mengenmäßige Potenzial über das gesamte Jahr einer Anlage. Die Mengen der einzelnen Anlagen werden zu regionalen Mengen auf Gemeindeebene aggregiert. Neben dem gesamten Jahr werden auch die Mengen im Vegetationszeitraum bestimmt, wofür 50 % der Jahresmenge angenommen werden.

² Regelung zur Ermittlung der Mindestwasserführung in Ausleitungsstrecken hessischer Fließgewässer, StAnz. 2023, 267. <https://www.rv.hessenrecht.hessen.de/bshe/document/VVHE-VVHE000019532>

4 Datengrundlagen

4.1 Untersuchungszeiträume

Die Modellierungen und Analysen erfolgen für zwei Untersuchungszeiträume. Der erste Zeitraum umfasst die ex-post-Periode von 1991–2020 und zeigt Entwicklungen der Vergangenheit. Der zweite Untersuchungszeitraum dient zur Darstellung von zukünftigen Entwicklungen im Vergleich zu einer Referenzperiode. Als Referenzperiode werden die Jahre 1971–2000 genutzt, für die Entwicklungen der nahen Zukunft werden die Jahre 2031–2060 betrachtet und für die Entwicklungen der fernen Zukunft die Jahre 2071–2100. Die Trennung der Untersuchungszeiträume ist wichtig, da vergleichende Analysen von Klimaprojektionsdaten (für zukünftige Betrachtungen) mit Messdaten (für die ex-post-Untersuchung) methodisch nicht zulässig sind (Linke, 2023).

4.2 Bodenkundliche Datengrundlagen

Im Rahmen des Projekts wurden die Bodenflächendaten 1:50.000 (BFD50 2. Ausbaustufe) für Hessen vom Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) bereitgestellt (HLNUG, 2022a). Die BFD50 weist 1.685 Bodenprofile und 4.554 Bodenhorizonte aus, mit denen 311.805 verschiedene Geometrien beschrieben werden. Von den Bodendaten werden nur Böden berücksichtigt, die zur Nutzungs- und Bedeckungskategorie 1 (Acker, Gartenland) gehören. Aus den Daten können Feldkapazität (FK) und nutzbare Feldkapazität (nFK) direkt entnommen werden und der permanente Welkepunkt (PWP) kann aus diesen Daten berechnet werden. Die maximale kapillare Aufstiegsrate, die Sickerwasserrate und die effektive Wurzeltiefe werden unter Berücksichtigung der „Bodenkundlichen Kartieranleitung“ (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden, 2005) sowie der Geoberichte 20 und 36 (Engel et al., 2012; Ertl et al., 2019) berechnet.

4.3 Klimatische Datengrundlagen

Für den ex-post-Zeitraum (1991–2020) werden klimatische Daten aus dem Climate Data Center (CDC) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verwendet. Es werden die Parameter Niederschlag, FAO-Grasreferenzverdunstung, relative Luftfeuchte und Tagestiefsttemperatur in täglicher Auflösung genutzt (CDC, 2024a, 2024b, 2024c). Der Niederschlag liegt in einem 1 × 1 km-Raster vor, die anderen beiden Parameter in einem 5 × 5 km-Raster. Alle Parameter werden in dasselbe 1 × 1 km-Raster überführt (vgl. Tabelle 15).

Die Tagestiefsttemperatur (t_l) wird unter Berücksichtigung der relativen Luftfeuchte (LF_{rel}) in die Feuchtkugelttemperatur (t_f) umgerechnet. Die Berechnung erfolgt nach Stull (2011):

$$t_f = t_l * \arctan(0.151977 * (LF_{rel} + 8.313659)^{1.5}) + \arctan(LF_{rel} - 0.676331) + 0.00391838 * LF_{rel}^{3/2} * \arctan(0.023101 * LF_{rel}) - 4.686036$$

Zudem werden Vegetationsbeginn und punkt-basierte Stationsmeldungen zu Eintrittsdaten und Entwicklungsstadien verschiedener landwirtschaftlicher Kulturen in jährlicher Auflösung genutzt (CDC, 2023a, 2023b). Aus den Eintrittsdaten und Entwicklungsstadien werden repräsentative Vegetationsverläufe – täglicher Verlauf von Entwicklungsphasen im BBCH-Format (Meier, 2018) – für die einzelnen Kulturen abgeleitet. Durch die Verschneidung mit dem jährlichen Vegetationsbeginn werden zwischenjährliche Unterschiede einbezogen und es entsteht ein tägliches 1 × 1 km-Raster der BBCH-Stadien.

Tabelle 15: Klimatische Datengrundlagen des ex-post-Zeitraums

Parameter	Einheit	Räumliche Auflösung	Zeitliche Auflösung
Tagessumme des Niederschlags	mm	1 × 1 km-Raster	täglich
FAO Grasreferenzverdunstung	mm	1 × 1 km-Raster	täglich
Tagestiefsttemperatur	°C	5 × 5 km-Raster	täglich
mittlere tägliche relative Luftfeuchte	%	5 × 5 km-Raster	täglich
jährlicher Vegetationsbeginn	Tag	1 × 1 km-Raster	jährlich
Eintrittsdaten verschiedener Entwicklungsstadien (BBCH) von Kulturpflanzen	Tag	Stationen	jährlich

Quelle: CDC (2023a, 2023b, 2024a, 2024b, 2024c).

Für die ex-ante-Zeiträume und Abbildung der zukünftigen klimatischen Entwicklungen wird der repräsentative Konzentrationspfad RCP 8.5 (Representative Concentration Pathway, RCP) genutzt. Dieser stellt ein sogenanntes „Weiter-wie-bisher“-Szenario dar. Der DWD stellt ein Kern-Ensemble zur Verfügung, bei dem sich auf eine geringere Anzahl von Ensembles beschränkt wird, ohne dabei die Bandbreite zu verlieren. Das DWD-Kern-Ensemble enthält für das RCP-Szenario 8.5 fünf verschiedene Ensembles (DWD, 2022), die entsprechenden Kombinationen aus globalen (GCM) und regionalen Klimamodellen (RCM) sind in Tabelle 16 dargestellt. Von den Ensemblemitgliedern werden die Parameter Niederschlag, FAO-Grasreferenzverdunstung, relative Luftfeuchte, Tagestiefsttemperatur in täglicher Auflösung und der Vegetationsbeginn als jährlicher Wert genutzt (DWD, 2021a, 2021b, 2021c, 2021d, 2021h). Aus der relativen Luftfeuchte und der Tagestiefsttemperatur wird wie beim ex-post Zeitraum die Feuchtkugeltemperatur berechnet.

Tabelle 16: Ensemblemitglieder des DWD-Kernensembles für das RCP-Szenario 8.5

Ensemblemitglieder	GCM	RCM
ICHEC	ICHEC-EC-EARTH (r1)	KNMI-RACMO22E
CCCMA	CCCma-CanESM2 (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17
HADGEM	MOHC-HadGEM-ES (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17
MIROC	MIROC-MIROC5 (r1)	GERICS-REMO2015
REMO2009	MPI-M-MPI-ESM-LR (r2)	MPI-CSC-REMO2009

Quelle: DWD (2022).

4.4 Landnutzungsdaten

Die Daten zur Landnutzung stammen aus dem Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystem (InVeKoS) des Bundeslandes Hessen (HMUKLV, 2020). Das InVeKoS dient zur einheitlichen Erfassung, Verarbeitung und Prüfung von Informationen zu flächen- und tierbezogenen Förderungen der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) (Europäische Kommission, 2024). Es sind u. a. Daten zu Betrieben, Flächennutzung und Maßnahmen enthalten. Die Flächennutzungen sind durch Geometrien exakt im Raum verortet und Angaben zur Größe der Fläche und der Kulturart sind enthalten. Diese Informationen liegen allerdings nur für diejenigen Flächen vor, für die ein Förderantrag vorliegt.

Die Flächengeometrien werden mit den hessischen Verwaltungsgrenzen verschnitten auf die räumliche Bezugseinheit (hier Gemeinde) aggregiert. Anschließend erfolgt die Bildung von Kulturaggregaten auf Basis ähnlicher Eigenschaften, die entsprechenden zwanzig Kulturaggregate sind in Tabelle 17 dargestellt und Tabelle A3 im Anhang zeigt die detaillierte Zuordnung der InVeKoS-Nutzcodes zu den Aggregaten. Dieser Prozess wurde mit einem projektinternen Länderexpertenkreis vom Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen (LLH) und aus dem Regierungspräsidium Darmstadt (Expert*innen Hessen, 2023) diskutiert und gemeinsam abgestimmt.

Da die InVeKoS-Daten nicht in einer Zeitreihe seit 1990 vorliegen, sondern nur für einzelne Jahre von 2010 bis 2021, wurde zunächst entschieden, die Daten aus dem Jahr 2020 als sogenanntes Basisjahr für die Landnutzung zu verwenden. Dadurch wird der Einfluss der Landnutzung auf den Bewässerungsbedarf ausgeklammert und ein Fokus auf den Einfluss des Klimawandels gelegt.

Aus den InVeKoS-Daten werden außerdem auf Gemeindeebene die typischen Schlaggrößen für die Kulturaggregate sowie weitere Kulturen (Buschbohnen, Spargel, Zwiebeln) ermittelt (vgl. Abbildung 33). Dafür werden für die einzelnen Kulturen und Kulturaggregate die mittlere Schlaggröße für jede Gemeinde berechnet.

Tabelle 17: Übersicht der gebildeten Kulturaggregate aus den Nutzcodes der InVeKoS-Daten für Hessen

Aggregat bzw. Nutzcode	Aggregatbenennung
1	Winterweizen
2	Wintergerste
3	Winterroggen und sonstige Wintergetreide
4	Sommerweizen
5	Sommergerste
6	Hafer und sonstige Sommergetreide
7	Triticale
8	Raps
9	Silomais
10	Körnermais
11	Hülsenfrüchte/Eiweißpflanzen
12	Futtermübe und andere Rüben
13	Kartoffeln
14	Zuckerrüben
15	Gemüse
16	Erdbeeren
17	sonstige Handelsgewächse
18	Beerenobst
19	Kern-, Steinobst und sonstige Dauerkulturen
20	Wein

Quelle: Eigene Darstellung.

4.5 Kulturspezifische Parameter

4.5.1 Bewässerung

Für die Modellierung des Bewässerungsbedarfs einzelner Kulturen sind verschiedene kulturspezifische Parameter notwendig, welche das Wachstum der Pflanzen und die Evapotranspiration beeinflussen. Für das Pflanzenwachstum sind die Parameter „maximale Durchwurzelungstiefe“ und „Pflanzenkoeffizient“, mit dem die Grasreferenzverdunstung in die kulturspezifische Verdunstung umgerechnet wird. Bei den Kulturen Zwiebeln, Spargel und Buschbohnen kommen noch Temperatursummen für die einzelnen Entwicklungsstadien und bei Sorghum, Alfalfa und Sojabohne die jeweilige Dauer der Entwicklungsstadien hinzu, da für diese Kulturen keine phänologischen Beobachtungsdaten verfügbar sind. Für die Bewässerungsdauer kommen außerdem Informationen zu Bewässerungsschwellen und Bewässerungszeiträumen hinzu. Diese Parameter stammen aus einer Literaturrecherche und sind mit einem Länderexpertenkreis (Expert*innen Hessen, 2023) abgestimmt. Tabelle 18 gibt einen Überblick zu den verwendeten Quellen.

Tabelle 18: Überblick zu den Quellen der kulturspezifischen Parameter

Kulturspezifischer Parameter	Quellen
Kc-Werte	Müller et al. (2020b), Zinkernagel et al. (2022), FAO (2024a), Piccinni et al. (2009)
Durchwurzelungstiefe	Müller et al. (2020b), FAO (2024a), LfULG, 2019
Temperatursummen	Schmidt und Zinkernagel (2019)
Dauer von Entwicklungsstadien	FAO (2024a)
Bewässerungszeiträume	FAO (2024a)
Bewässerungsschwellen	Müller et al. (2020b), FAO (2024a)

Quelle: Eigene Darstellung.

4.5.2 Frostschutzberechnung

Die kulturspezifischen Kennwerte „Applikationsrate“ und „kritische Temperatur“ werden aus der Literatur abgeleitet. Die kritischen Temperaturen der einzelnen Kulturen variieren zwischen -7 °C und 0 °C und unterscheiden sich für die Kulturen je nach BBCH-Stadium. Die kritischen Temperaturen für die Kulturen und BBCH-Stadien sind im Anhang in Tabelle A 4 aufgeführt. Für die Applikationsraten werden Mittelwerte von den in der Literatur angegebenen Spannweiten gebildet. Diese passen zu den Angaben aus einem Gespräch mit Expert*innen Hessen (2023). Die Applikationsraten unterscheiden sich nicht zwischen den BBCH-Stadien und sind in Tabelle 19 abgebildet.

Tabelle 19: Kulturspezifische Applikationsraten bei der Frostschutzberechnung

Kulturname	Applikationsrate ($m^3/(h \times ha)$)
Apfel, Birne, Süßkirsche, Sauerkirsche	29
Stachelbeere, Johannisbeere	29
Wein	32
Erdbeeren	32
Frühkartoffeln	25

Quelle: Eigene Darstellung nach Schnelle (1963).

4.6 Technische Parameter für die Bewässerung

Die technischen Parameter bei der Bewässerung werden durch verwendete Bewässerungstechnologie bestimmt. Dabei handelt es sich um einen Effizienzparameter, der widerspiegelt, wie effizient das verteilte Wasser für den Bodenwasserhaushalt und somit die Kulturen zur Verfügung steht, und die maximale tägliche Wassergabe, die festlegt, wie hoch eine Wassergabe maximal sein kann. Die Werte für die Parameter stammen aus der Literatur und sind in Tabelle 20 zusammengefasst.

Tabelle 20: Technische Parameter für die Bewässerung

	Mobile Beregnungsmaschine mit Starkregner	Mobile Beregnungsmaschine mit Düsenwagen	Tropf- bewässerung	Rohr- beregnung	Quelle
Effizienz- parameter	0,65	0,8	0,9	0,65	Irmak et al. (2011); DWA (2019)
Maximale Bewässerungs- gaben (mm)	30	30	10	10	Müller und Ebertseder (2020)

Quelle: Eigene Darstellung.

Zudem sind nicht alle Bewässerungstechnologien für alle Kulturen nutzbar oder können aufgrund der Schlagstrukturen nicht verwendet werden. Die in Hessen in der Praxis am häufigsten genutzten Kombinationen von Bewässerungstechnologien und ausgewählten Kulturen sind in Tabelle 21 dargestellt.

Tabelle 21: Berücksichtigte Bewässerungstechnologie-Kultur-Kombinationen

Kultur	Mobile Beregnungsmaschine mit Starkregner	Mobile Beregnungsmaschine mit Düsenwagen	Tropf- bewässerung	Rohr- beregnung
Getreidekulturen	✓	✓	X	X
(Früh-)Kartoffeln	✓	✓	✓	X
Zuckerrüben	✓	✓	X	X
Spargel	X	X	✓	✓
Erdbeeren	X	X	✓	✓
Buschbohnen	X	X	✓	✓
Zwiebeln	X	X	✓	✓
Johannisbeeren	X	X	✓	X
Himbeeren	X	X	✓	X
Wein	X	X	✓	X

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Expert*innen Hessen (2023).

4.7 Grundwasserneubildung

Daten zur Grundwasserneubildung in Hessen werden vom HLNUG zur Verfügung gestellt. Für den ex-post-Zeitraum 1991–2020 werden Jahressummen für Grundflächen zur Verfügung gestellt (HLNUG, 2022b). Die Jahressummen werden zu mittleren jährlichen Grundwasserneubildungsraten auf Gemeindeebene aggregiert. Für die ex-ante-Zeiträume und die Abbildung der zukünftigen Entwicklung der Grundwasserneubildung im Klimawandel werden Monatssummen der Grundwasserneubildung für die Mitglieder des KLIWA-Ensembles (vgl. Tabelle 22) bereitgestellt (HLNUG, 2022c). Die Monatssummen werden zunächst zu Jahressummen aggregiert und anschließend räumlich auf Gemeindeebene aggregiert.

Tabelle 22: Ensemblemitglieder des KLIWA-Ensemble

Projektion	Ensemblemitglieder	Realisation	RCM
Proj01	EC-EARTH	r12i1p1	CCLM4-8-17
Proj02	EC-EARTH	r12i1p1	KNMI-RACMO2
Proj03	EC-EARTH	r12i1p1	SMHI-RCA4
Proj04	EC-EARTH	r1p1i1	KNMI-RACMO2
Proj06	MIROC5	r1p1i1	CCLM4-8-17
Proj07	HadGEM2	r1p1i1	WRF361H
Proj08	MPI-ESM	r1p1i1	CCLM4-8-17
Proj09	MPI-ESM	r1p1i1	SMHI-RCA4
Proj10	MPI-ESM	r1p1i1	WRF361H
Proj11	CanESM3	r1p1i1	Episodes2018
Proj12	EC-EARTH	r12i1p1	Episodes2018
Proj13	HadGEM2	r1p1i1	WETTREG2018
Proj14	MPI-ESM	r1p1i1	WETTREG2018

Quelle: Eigene Darstellung nach HLNUG (2022c).

4.8 Daten zu Kosten der Bewässerung

Maschinen- und Arbeiterledigungskosten stammen aus dem Feldarbeitsrechner des KTBL (2023). Die Daten enthalten Kosten pro ha für verschiedene Maschinen der Bewässerungstechnologien und sowie verschiedene Feldgrößen und Bewässerungsmengen. Es werden die Daten von allen verfügbaren Feldgrößen und Bewässerungsmengen für Tropfbewässerung, Rohrberegnung, Linear- und Kreisberegnung sowie mobile Beregnungsmaschinen mit Starkregner und Düsenwagen genutzt, die verwendeten Einstellungen sind in Tabelle 23 aufgeführt. Die Daten werden genutzt, um Kostenfunktionen in Abhängigkeit von Bewässerungsmenge und Anzahl der Bewässerungsgaben abzuleiten.

Für Pumpen, Brunnen, Leitungen und Stromzuführung stammen die Daten zu den fixen und variablen Kosten aus KTBL (2013). Die Kosten sind pro Einheit angegeben und werden unter Zuhilfenahme von Annahmen zu Kosten pro ha umgerechnet bzw. Kostenfunktionen abgeleitet. Für den Wasserbezug über einen Verband stammen die Kosten vom WBL Hessen (2023) und umfassen einen Mitgliedsbeitrag von 100 €/ha und Wasserkosten von 0,30 €/m³.

Tabelle 23: Einstellungen des Feldarbeitsrechners

Technologie	Arbeitsbreite/ Radius m	Länge m	Durch- messer mm	Mechanisierung kW	Schlag- größen ha	Sonstiges
mobile Beregnungsmaschine mit Starkregner	36	350	75	45	0,5–5	-
mobile Beregnungsmaschine mit Starkregner	54	600	120	83	10–20	-
mobile Beregnungsmaschine mit Düsenwagen	54	600	125	83	0,5–20	-
Linearberegung	200–500	-	-	-	22–55	-
Kreisberegung	200–500	-	-	-	16–87	-
Rohrberegung	-	-	70	54	0,5–10	12×18 m, 2 Aufstellung pro Jahr
Tropfbewässerung	2 m	-	-	45	0,5–20	2-reihig, Tropfschlauch

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf KTBL (2023).

Bei der Beantragung von Wasserrechten fallen u. a. Verwaltungskosten an. Für Hessen werden diese aus der Anlage der Verwaltungskostenordnung für den Geschäftsbereich des Ministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz³ entnommen. Relevant sind aus dem Bereich Wasserrecht/Wasserwirtschaft die Gegenstände

- Erlaubnis für die Errichtung und/oder den Betrieb für die Grund- oder Oberflächenwasserentnahme (Nr. 1620221),
- Erlaubnis für die Wasserentnahme aus Oberflächengewässer zur Bewässerung einer landwirtschaftlichen Nutzfläche, einer Baumschule oder für den Erwerbsgartenbau, für eine zu bewässernde Fläche (Nr. 162081, 1620811–1620815),
- Erlaubnis für die Wasserentnahme aus Grundwasser zur Bewässerung einer landwirtschaftlichen Nutzfläche, einer Baumschule oder für den Erwerbsgartenbau, für eine Entnahmemenge (Nr. 162091, 1620911–1620918).

4.9 Ertragsdaten

Die Erträge für die wichtigsten Kulturarten werden bundesweit durch die Ernteberichterstattung erfasst. Für Winterweizen, Zuckerrüben und Kartoffeln werden harmonisierte Daten von Duden et al. (2024) auf Kreisebene verwendet. Für Erdbeeren, Spargel, Buschbohnen und Zwiebeln werden die Erträge aus der Gemüseerhebung verschiedener Jahrgänge genutzt und liegen auf Regierungsbezirksebene vor. Die Erträge für Beerenobst stammen aus der Strauchbeerenerhebung und liegen auf Ebene des Bundeslandes vor. Für Wein werden Erträge aus der amtlichen Weinmosterntestatistik erhoben und liegen für die beiden hessischen Weinbauregionen Rheingau und Hessische Bergstraße vor. Da die Ertragsdaten in der höchsten Auflösung auf Kreisebene (NUTS 3) vorliegen, erfolgt die Zuordnung der Erträge über die nächsthöhere Verwaltungsebene. Ein Überblick über die Ertragsdaten wird in Tabelle 24 gegeben.

³ Verwaltungskostenordnung für den Geschäftsbereich des Ministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (VwKostO-MUKLV), GVBl. I 2009, S.522.

Tabelle 24: Datenquellen für Erträge in Hessen

Kulturaggregat	Einheit	Räumliche Auflösung	Quelle
Winterweizen	dt/ha	Kreis	Duden et al. (2024)
Zuckerrüben	dt/ha	Kreis	Duden et al. (2024)
Kartoffeln	dt/ha	Kreis	Duden et al. (2024)
Spargel	dt/ha	Regierungsbezirk	HSL (v. J.a)
Erdbeeren	dt/ha	Regierungsbezirk	HSL (v. J.a)
Buschbohnen	dt/ha	Regierungsbezirk	HSL (v. J.a)
Zwiebeln	dt/ha	Regierungsbezirk	HSL (v. J.a)
Beerenobst	dt/ha	Hessen	HSL (v. J.c)
Wein	hl/ha	Anbaugebiete	HSL (v. J.b)

Quelle: Eigene Darstellung.

Die Wasserproduktivität gibt an, wie viel Ertrag (kg, dt oder t) pro mm oder m³ Wasser gebildet wird, sodass der durch eine Bewässerung abgesicherte Ertrag ermittelt werden kann. Die Wasserproduktivität kann aus Bewässerungsversuchen abgeleitet werden. Die verwendeten Daten (vgl. Tabelle 25) werden entweder aus deutschen Bewässerungsversuchen abgeleitet oder stammen aus der Literatur, wenn keine Daten aus Versuchen zur Verfügung stehen.

Tabelle 25: Datenquellen zur Wasserproduktivität

Kultur	Quelle
Winterweizen	LWK Niedersachsen (2023)
Zuckerrüben	LWK Niedersachsen (2023)
Kartoffeln	LWK Niedersachsen (2023), Pfleger et al. (2010)
Spargel	Rolbiecki et al. (2022)
Erdbeeren	Létourneau und Caron (2019)
Buschbohnen	Pfleger et al. (2010), Laber (2015)
Zwiebeln	Pfleger et al. (2010), Laber (2015)
Beerenobst	Ortega-Farias et al. (2022)
Wein	FAO (2024a)

Quelle: Eigene Darstellung.

4.10 Preisdaten

Jährliche Erzeugerpreise für die Ackerkulturen Zuckerrüben, (Früh-)Kartoffeln und Weizen stammen aus dem statistischen Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (BMEL, v. J.). Die Preise stellen einen jährlichen Durchschnittspreis für Deutschland dar. Für die Kulturen Spargel, Erdbeeren, Buschbohnen, Zwiebeln und Beerenobst werden ebenfalls jährliche Durchschnittspreise für Deutschland genutzt, diese stammen von der FAO (2024b). Für Wein werden Mostpreise für Rheingau Riesling Qualitätswein vom Regierungspräsidium Darmstadt (2024b) herangezogen. Alle Preise werden für den Zeitraum 2010–2020 genutzt.

4.11 Amtliche Gebäudeumringe

Hausumringe bilden die Grundrisse von Gebäuden als Umringe mit Raumbezug ab. Die Polygone enthalten zwar keine Dächer, aber aufgrund fehlender besserer Daten werden die Flächen in den Polygonen als Approximation für Dachflächen genutzt. Die Hausumringe basieren auf Daten des amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystems (ALKIS) (HVBG, 2024). Die Hausumringe für Hessen stammen vom HLBG (2024a).

4.12 Topografische Datengrundlagen

Die Erdoberfläche lässt sich in Form von Grundflächen und überlagernden Objekten mit unterschiedlichen Eigenschaften beschreiben. Ein Beispiel ist das digitale Basis-Landschaftsmodell (ATKIS® Basis-DLM), welches u. a. Informationen zu Vegetation, Gebäuden, Verkehr und Gewässern enthält. Die Auflösung beträgt 1:25.000. Aus dem Basis-DLM werden verschiedene Daten verwendet:

- Zur Identifikation von landwirtschaftlich genutzten Flächen innerhalb von Hessen werden Vegetationsflächen des Merkmals „Landwirtschaft“ (43001) genutzt, wobei eine Beschränkung auf Ackerland (1010), Hopfen (1012), Streuobstwiesen (1021), Gartenland (1030), Weingärten (1040) und Obstplantagen (1050) erfolgt. Die landwirtschaftlichen Flächen werden genutzt, um relevante Böden aus den Bodendaten zu filtern.
- Siedlungsflächen der Kategorie „Fläche mit gemischter Nutzung“ (41006) werden verwendet, um die Hausumringe auf landwirtschaftliche Gebäude zu begrenzen. Flächen mit gemischter Nutzung sind bebaute Flächen inklusive angrenzender Freiflächen, bei denen keine Art der baulichen Nutzung wie beispielsweise Wohnbaufläche oder Industrie- und Gewerbefläche vorliegt. Diese Flächen kommen vor allem in ländlichen Räumen vor und enthalten unter anderem land- und forstwirtschaftliche Betriebe (HLBG, 2024).
- Das Gewässernetz wird zur Darstellung ausgewählter Oberflächengewässer im Hessischen Ried genutzt. Die Daten für Hessen stammen vom HLNUG (2022d).
- Trinkwasser- und Heilquellenschutzgebiete haben den Zweck, die Qualität von Grundwasser bzw. Heilquellen zu schützen und Verunreinigungen zu vermeiden. Die Schutzgebiete werden in verschiedene Schutzzonen mit unterschiedlich starken Einschränkungen unterteilt (HLNUG, 2024e). Für Hessen stammen die Daten vom HLNUG (2024c).

4.13 Durchflussdaten

Das WISKI-Web des HLNUG stellt hydrologische Daten zu Oberflächengewässern für ausgewählte Messstationen zur Verfügung (HLNUG, 2024a). Zu diesen Daten gehören Daten zum täglichen Durchfluss sowie Informationen zu den Messstationen wie Standort, Einzugsgebiet, mittlerer Durchfluss (MQ), mittlerer Hoch- (MHQ) und Niedrigwasserabfluss (MNQ). Es werden die Daten von 1970 bis 2020 für vier Flüsse und entsprechenden Messstationen im Hessischen Ried genutzt:

- Schwarzbach (Messstation Nauheim, Nr. 23980353),
- Weschnitz (Messstation Lorsch, Nr. 23942300),
- Modau (Messstation Eberstadt, Nr. 23960709)
- Lauter (Bensheim, Nr. 23950104).

4.14 Daten zum kommunalen Abwasser

Für kommunale (> 2.000 EW) und industrielle Kläranlagen besteht alle zwei Jahre eine Berichtspflicht gemäß der Richtlinie des Rates vom 21. Mai 1991 über die Behandlung von kommunalem Abwasser (91/271/EWG)⁴, dabei werden Name, Größe und Lage der Anlage sowie die Art der Abwasserreinigung erfasst. Diese Daten stehen für die Jahre 2008, 2010, 2012, 2014, 2016, 2018 und 2020 zur Verfügung, um das Potenzial von gereinigtem Abwasser als alternative Wasserressource zu quantifizieren (UBA, 2024).

⁴ Richtlinie 91/271/EWG des Rates vom 21. Mai 1991 über die Behandlung von kommunalem Abwasser, ABl. L 135 vom 30.5.1991, S. 40–52.

4.15 Daten zur Wasserentnahme im Regierungspräsidium Darmstadt

Für den Zeitraum 1989–2020 liegen für das Regierungspräsidium Darmstadt Informationen zu den jährlichen Rheinwasserentnahmemengen für Infiltration und Beregnung sowie für den Zeitraum 2002–2020 jährlich Grundwasserfördermengen für die Beregnung vor. Zudem sind Informationen zu Entnahmerechten von Beregnungsverbänden und Einzelwasserentnahmen enthalten (Regierungspräsidium Darmstadt, 2022).

5 Status Quo der Landwirtschaft und Bewässerung in Hessen

5.1 Geografische Lage, naturräumliche Gliederung und Vertiefungsregionen

Das Land Hessen ist in die drei Regierungsbezirke Darmstadt, Gießen und Kassel untergliedert, umfasst in 21 Landkreise und kreisfreie Städte mit 421 Gemeinden (vgl. Abbildung 4).

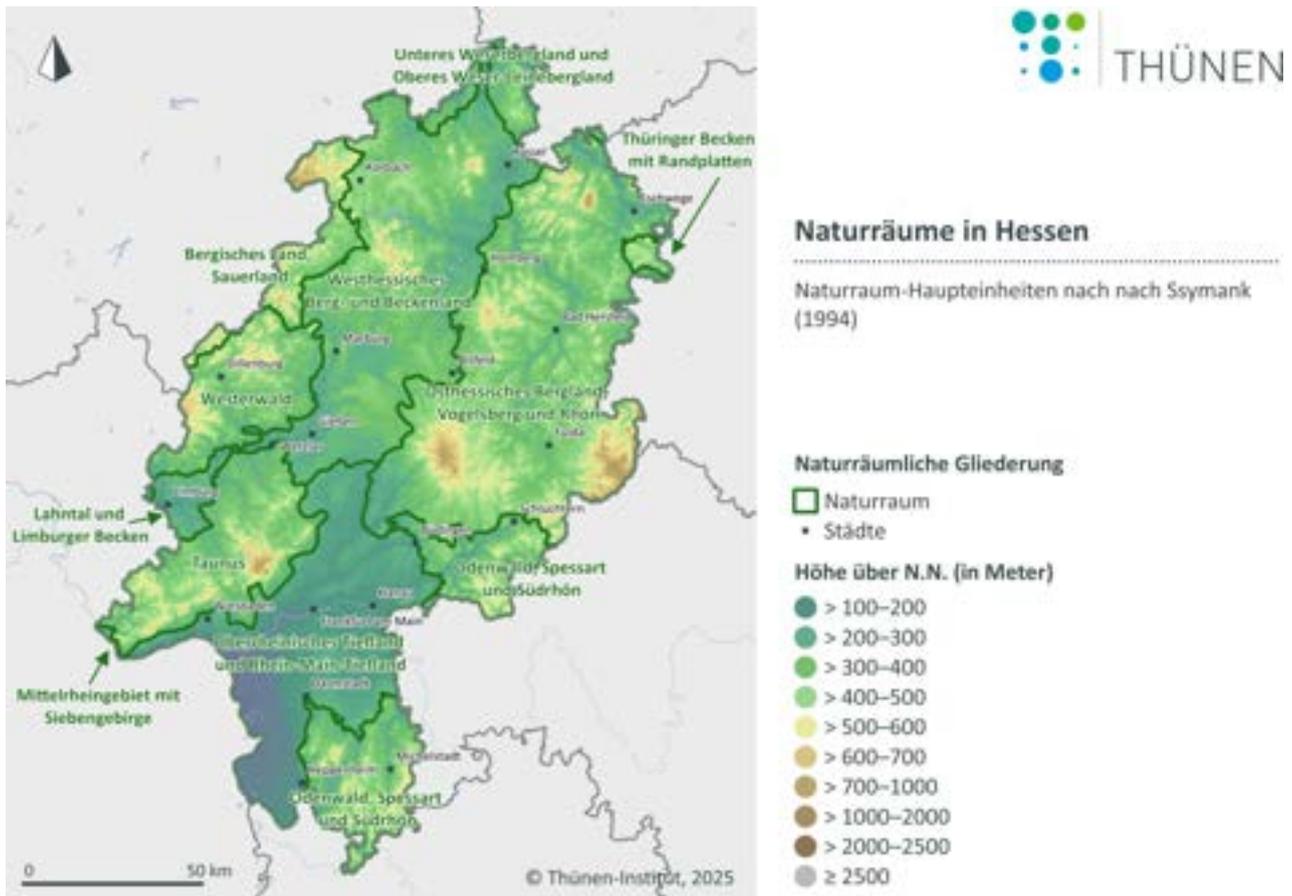
Abbildung 4: Kreise und Regierungsbezirke in Hessen



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von BKG (2022).

Hessen ist überwiegend von Mittelgebirgslagen zwischen 200 und 500 m über NN geprägt, deren stärkste Erhebungen bis 950 m (Wasserkuppe) reichen. Die Rhein-Main Ebene, die bis zur Wetterau den Ballungsraum Frankfurt einschließt, liegt deutlich tiefer. Dort sind der Sonderkulturanbau und die Bewässerung von großer Bedeutung. Die Landschaft Hessens ist in zehn Naturräume bzw. die Naturraum-Haupteinheiten gegliedert (vgl. Abbildung 5). Die Einteilung nach Ssymank (1994) gliedert die Landschaft in Naturräume, die sich in ihrer Ausprägung nach den Kriterien Boden, Klima, Relief und Wasserhaushalt ähneln. Diese Einteilung lässt sich nutzen, um vorab die Gebiete Hessens zu identifizieren, die wichtig für die Landwirtschaft und im Rahmen dieser Studie von besonderer Bedeutung sind.

Abbildung 5: Topografische Karte mit Naturraum-Haupteinheiten in Hessen



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von BKG (2018) und BFN (2021).

In dieser Studie werden neben einer landesweiten Betrachtung von Hessen die zwei Vertiefungsregionen Hessisches Ried und Untermainebene betrachtet. Beide Vertiefungsregionen liegen in Südhessen (vgl. Abbildung 6) im Regierungsbezirk Darmstadt und haben für die hessische Bewässerungslandwirtschaft eine große Bedeutung. Die Abgrenzung der Schwerpunktgebiete erfolgte auf Gemeindeebene.

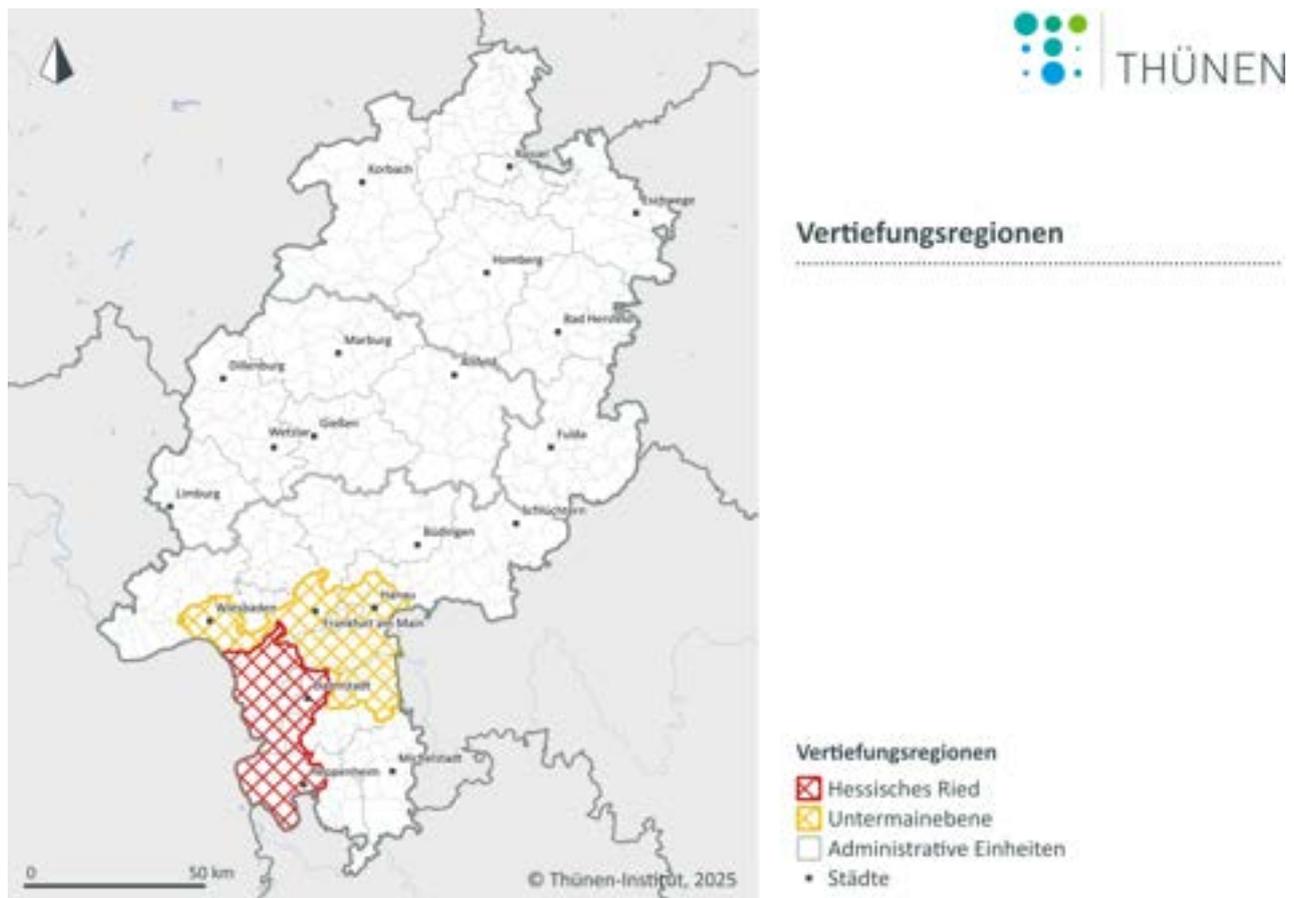
Hessische Ried

Das Hessische Ried umfasst den nördlichen Teil des Oberrheintalgrabens im Südosten von Hessen und ist ein Teilgebiet des Regierungsbezirkes Darmstadt. Die Abgrenzung erfolgte auf Basis des Beratungsgebietes WRRL Hessisches Ried des WBL Hessen. Gemeinden, welche ganz oder nur teilweise in das Beratungsgebiet zählen, wurden aus methodischen Gründen in dieser Studie zur Vertiefungsregion Hessisches Ried gezählt. In Abbildung 6 ist die Gebietsabgrenzung der Vertiefungsregion Hessisches Ried mit den betrachteten Gemeinden dargestellt. Eine tabellarische Auflistung der zugeordneten Gemeinden befindet sich im Anhang in Tabelle A1.

Untermainebene

Die Vertiefungsregion Untermainebene entspricht dem Naturraum Untermainebene. Es wurden der Vertiefungsregion Untermainebene alle Gemeinden zugeordnet, die auch nur anteilig im Naturraum liegen. Um eine Überschneidung der beiden Vertiefungsregionen zu vermeiden, werden Gemeinden, die beiden Vertiefungsregionen zugeordnet werden würden, nur der Vertiefungsregion Hessisches Ried zugeordnet. Abbildung 6 zeigt eine räumliche Darstellung der sich so ergebenden Vertiefungsregion Untermainebene auf Gemeindeebene. Eine tabellarische Auflistung der zugeordneten bzw. anteilig zugeordneten Gemeinden befindet sich im Anhang in Tabelle A2.

Abbildung 6: Lage der Vertiefungsregionen Hessisches Ried und Untermainebene

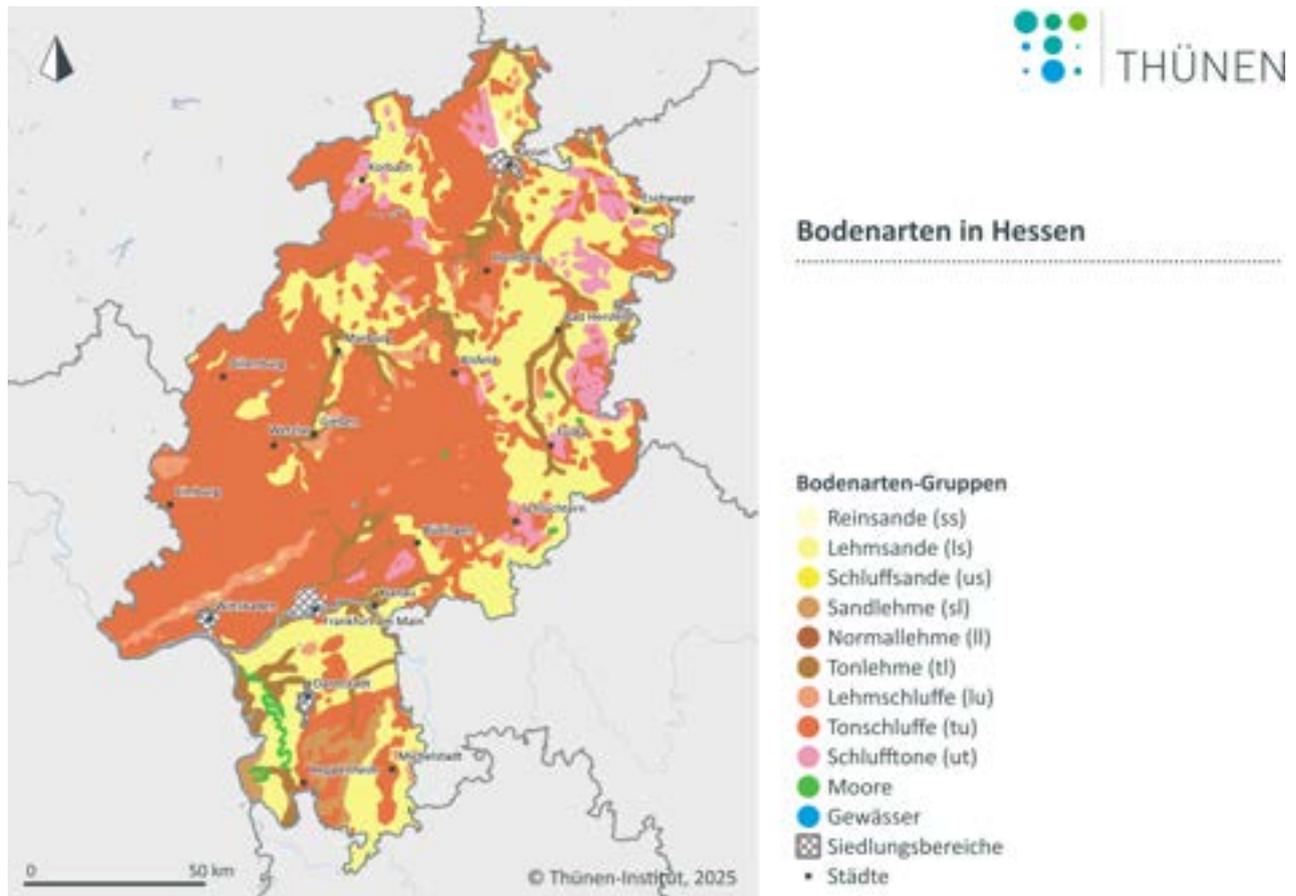


Quelle: Eigene Abbildung auf Grundlage von BKG (2022).

5.2 Boden

Böden beeinflussen maßgeblich die Wasserspeicherung und Wasserregulierung in der Landschaft. Hessens überwiegende Bodenarten sind Tonschluffe und leichte Sandböden (vgl. Abbildung 7); letztere dominieren zusammen mit Lehmböden die Vertiefungsregionen. Die Bodenart ist von zentraler Bedeutung für die Wasserspeicherfähigkeit eines Standorts, die wiederum erheblichen Einfluss auf die Bewässerung landwirtschaftlicher Kulturen hat. Leichte, sandige Böden erlauben eine schnelle Wasserinfiltration und -abgabe, was zu häufigem Bedarf an Bewässerung führen kann, um Kulturpflanzen ausreichend mit Wasser zu versorgen (LfL, 2008). Im Gegensatz dazu haben tonige Böden eine höhere Wasserspeicherkapazität, was einerseits eine effiziente Wassernutzung ermöglicht, andererseits jedoch das Risiko von Staunässe birgt. Diese Eigenschaften beeinflussen nicht nur die Produktivität landwirtschaftlicher Flächen, sondern auch die Planung und das Management von Bewässerungssystemen. Ein vertieftes Verständnis der Zusammenhänge zwischen Bodenarten und ihrer Wasserspeicherfähigkeit ist daher wesentlich für eine nachhaltige Bewässerungspraxis.

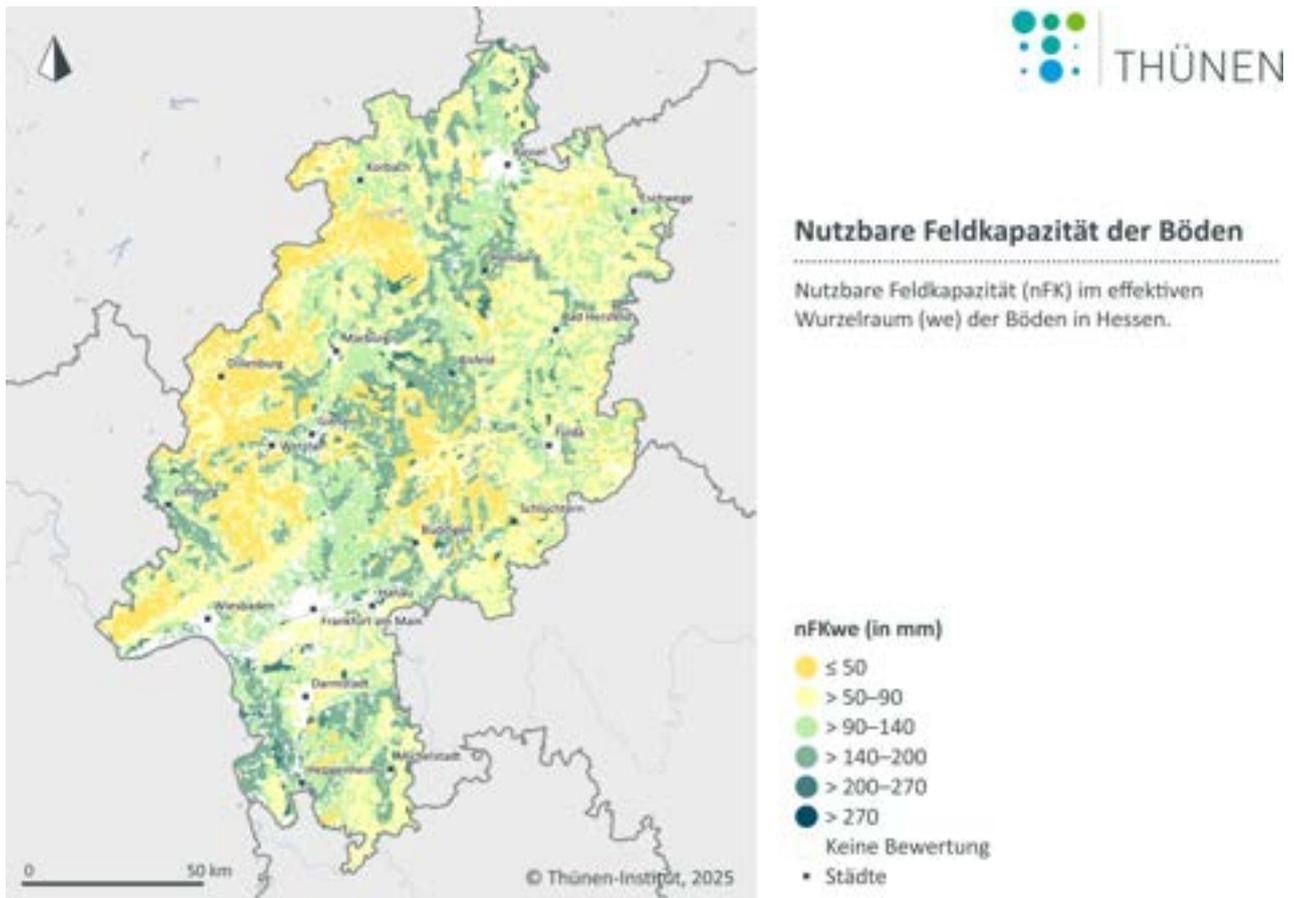
Abbildung 7: Verteilung der Bodenarten in Hessen



Quelle: Eigene Abbildung und Grundlage von BGR (2015a).

Ein zentraler Faktor bei der Bewässerung landwirtschaftlicher Kulturen ist die nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (nFK_{we}). Diese Größe beschreibt das Wasserspeichervermögen des Bodens im Bereich der Pflanzenwurzeln, das für das Pflanzenwachstum tatsächlich nutzbar ist. Die nFK_{we} ist entscheidend, da sie bestimmt, wie viel Wasser im Boden tatsächlich für die Pflanzen verfügbar ist: je höher die nFK_{we} , desto größer die Wasserspeicherkapazität. In Hessen variiert die nFK_{we} erheblich je nach Bodenart und geografischer Lage (vgl. Abbildung 8).

Abbildung 8: Nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum in Hessen



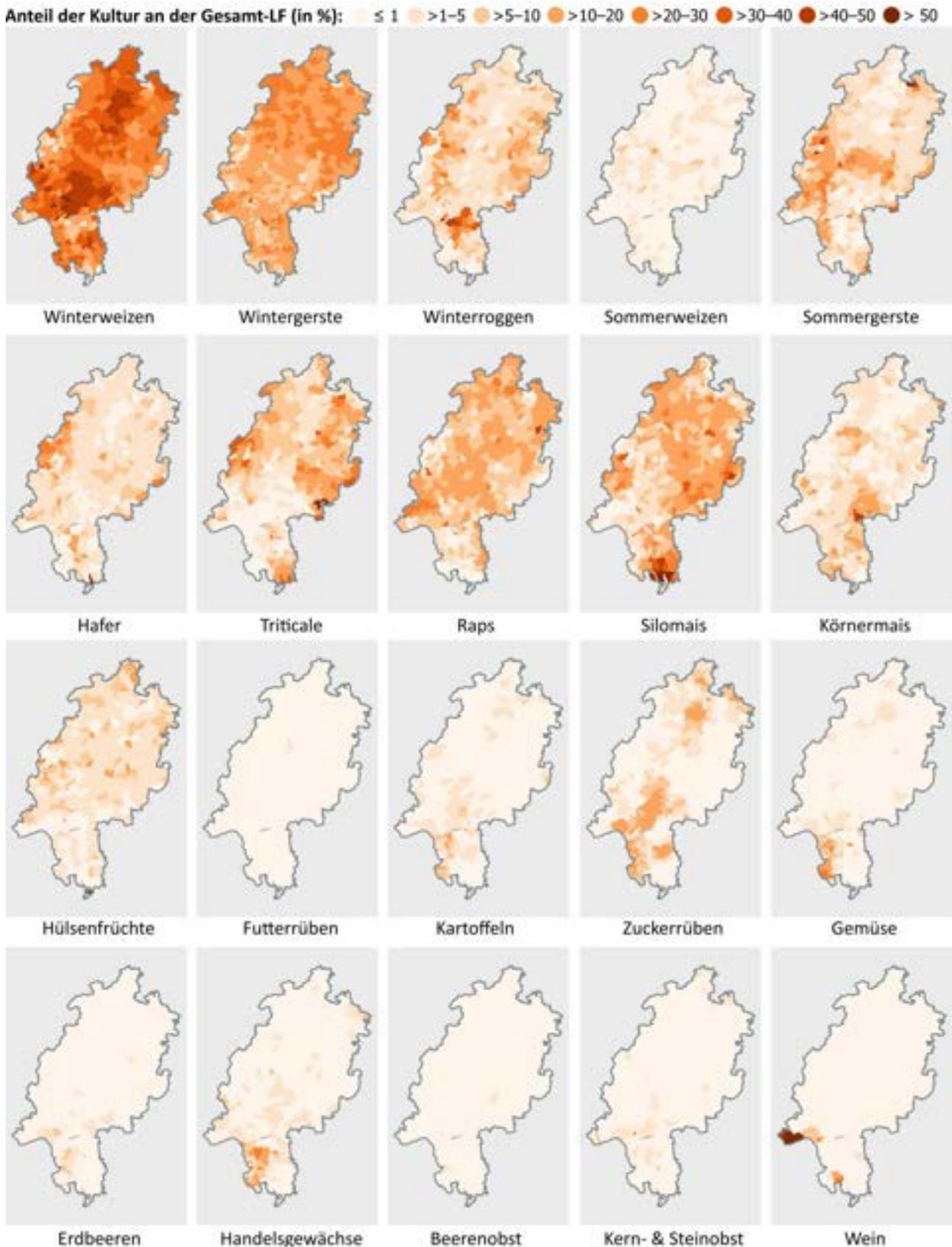
Quelle: Eigene Abbildung auf Grundlage von BGR (2015b).

5.3 Landwirtschaft und Landnutzung

Die landwirtschaftliche Produktion in Hessen ist vielfältig und wird durch die spezifischen geografischen und klimatischen Bedingungen der verschiedenen Regionen geprägt. Während einige Gebiete, wie das Limburger Becken oder die Wetterau, fruchtbare Ackerbauregionen sind, sind die Mittelgebirgslagen von Grünland und Futterbau geprägt.

Die regionalen Unterschiede lassen sich auch bei der Betrachtung der landwirtschaftlichen, garten- und weinbaulichen Kulturen erkennen. Abbildung 9 zeigt die Anbauanteile ausgewählter Kulturen bzw. Kulturaggregate (vgl. Anhang A.3) an der gesamten landwirtschaftlich genutzten Fläche einer Gemeinde in Hessen. Ackerbauliche Kulturen wie Winterweizen, Wintergerste, Raps und Silomais kommen vergleichsweise flächendeckend mit hohen Anteilen an der landwirtschaftlich genutzten Fläche vor. Andere Ackerbaukulturen, wie z. B. Winterroggen, Sommerweizen, Hafer, Körnermais und Zuckerrüben kommen nur sehr punktuell mit hohen Anteilen vor. Gemüse und Erdbeeren sind Kulturen, die aufgrund ihres hohen Wasserbedarfs und ihrer Wirtschaftlichkeit besonders relevant für die Bewässerung sind und werden fast ausschließlich in den Vertiefungsregionen Hessisches Ried und Untermainebene angebaut. Eine ähnliche Bedeutung für die Bewässerung spielen Handelsgewächse, Kartoffeln, Kern-, Stein- und Beerenobst sowie Wein, die ebenfalls primär in Südhessen angebaut werden.

Abbildung 9: Prozentualer Anteil ausgewählter landwirtschaftlicher Kulturen an der gesamten landwirtschaftlich genutzten Fläche je Gemeinde in Hessen für das Jahr 2020



Quelle: Eigene Abbildung auf Grundlage von HMUKLV (2020).

5.4 Klima heute und in Zukunft

Laut des aktuellen „Klimareport Hessen“ (DWD und HLNUG, 2024) befindet sich Hessen in der Klimazone des warm-gemäßigten Regenklimas der mittleren Breiten, geprägt durch den ozeanischen Einfluss des Atlantiks. Diese klimatischen Bedingungen führen zu ganzjährig feuchten Winden, die überwiegend aus westlichen Richtungen kommen und den Niederschlag maßgeblich beeinflussen. Die komplexe topografische Beschaffenheit Hessens, charakterisiert durch Erhebungen und Mittelgebirge, erzeugt regional sehr unterschiedliche klimatische Verhältnisse.

Die Jahresmitteltemperatur in Hessen stieg in der Periode 1991–2020, im Vergleich zur Referenzperiode 1961–1990, um 1,1 °C an. Diese Erwärmung hat zu einer Abnahme der Frosttage und einem gleichzeitigen Anstieg der Sommertage, besonders im wärmeren Südwesten, geführt. Regionale Klimaprojektionen für die Mitte und das Ende des 21. Jahrhunderts zeigen, dass bis zum Ende des Jahrhunderts zusätzliche Temperaturerhöhungen von 3 bis 5 °C eintreten könnten (RCP-Szenario 8.5). Eine Auswertung der Klimaprojektionen für Hessen zeigt außerdem, dass sich die Jahresniederschläge insbesondere im Winter erhöhen, während die Sommerniederschläge abnehmen werden (vgl. Tabelle 26). Diese Verschiebung der Niederschlagsverteilung weist auf längere und intensivere Trockenperioden im Sommer hin, welche die Wasserressourcen und damit die Rahmenbedingungen für die landwirtschaftliche Produktion erheblich beeinflussen werden. Die steigenden Temperaturen im Sommerhalbjahr führen wiederum zu zusätzlicher Verdunstung. Dies erhöht letztlich das Wasserdefizit, welches ggf. durch Bewässerungsmaßnahmen ausgeglichen werden muss.

Tabelle 26: Jahreszeitliche Mittelwerte des Niederschlags in Hessen und erwartete Änderung im Klimawandel (RCP 8.5)

Monat	1961–1990	19711–2000 (Referenz)	1991–2020	2031–2060	2071–2100
Frühjahr	191 mm	180 mm	168 mm	+7 %	+10 %
Sommer	222 mm	208 mm	213 mm	-3 %	-11 %
Herbst	188 mm	196 mm	197 mm	+3 %	+3 %
Winter	193 mm	193 mm	195 mm	+10 %	+19 %
Jahr	794 mm	777 mm	773 mm	+4 %	+5 %

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von DWD und HLNUG (2024).

Mit dem Klimawandel zeigen sich auch Veränderungen der Phänologie: infolge der Erwärmung starten Pflanzen früher in die Vegetationsperiode und ihre gesamte Entwicklung ist zunehmend verfrüht. Die Vorverlagerung des Vegetationsbeginns erhöht das Risiko von Spätfrösten, da die Pflanzen in einem verletzlicheren Stadium getroffen werden könnten.

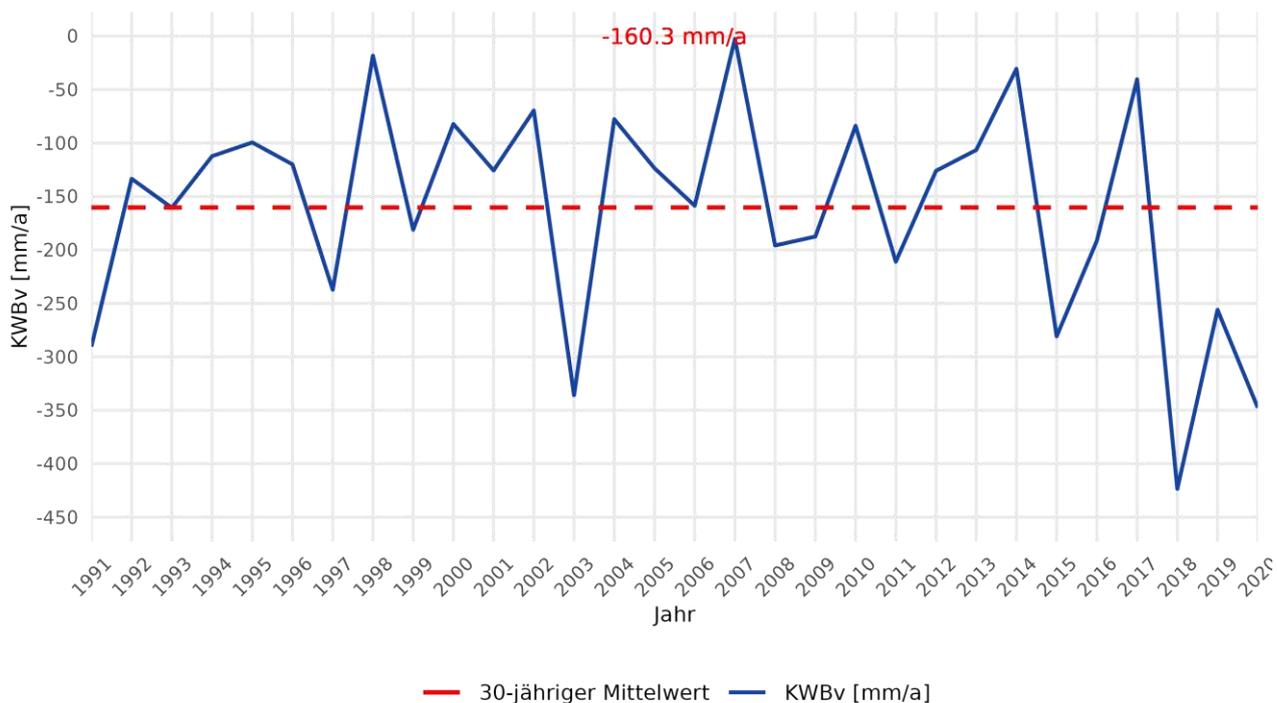
Der Klimawandel bringt daher nicht nur Herausforderungen durch Trockenheit, sondern auch durch veränderte Frostgefahr mit sich. Diese sich ändernden Rahmenbedingungen werden erhebliche Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Bewässerung und Frostschutzmaßnahmen haben. Mit dem Fokus auf die Bewässerung bzw. den Bewässerungsbedarf wird im Folgenden die klimatische Wasserbilanz als Kenngröße herangezogen und analysiert. Anschließend wird eine Analyse der Anzahl der Tage mit Spätfrostisiko dargestellt, die als Klimakenngröße und als wesentlicher Einflussfaktor für die Ableitung von Maßnahmen zum Frostschutz (Frostschutzberechnung) dient.

5.4.1 Klimatische Wasserbilanz der Vegetationsperiode

Die Klimatische Wasserbilanz der Vegetationsperiode (KWBv), als wichtiger agrarmeteorologischer Parameter, beschreibt das Verhältnis zwischen Niederschlag und Verdunstung während der Wachstumszeit von Pflanzen und ist maßgeblich für die Bewertung der Wasserverfügbarkeit im Boden. Vor allem in Regionen, in denen der

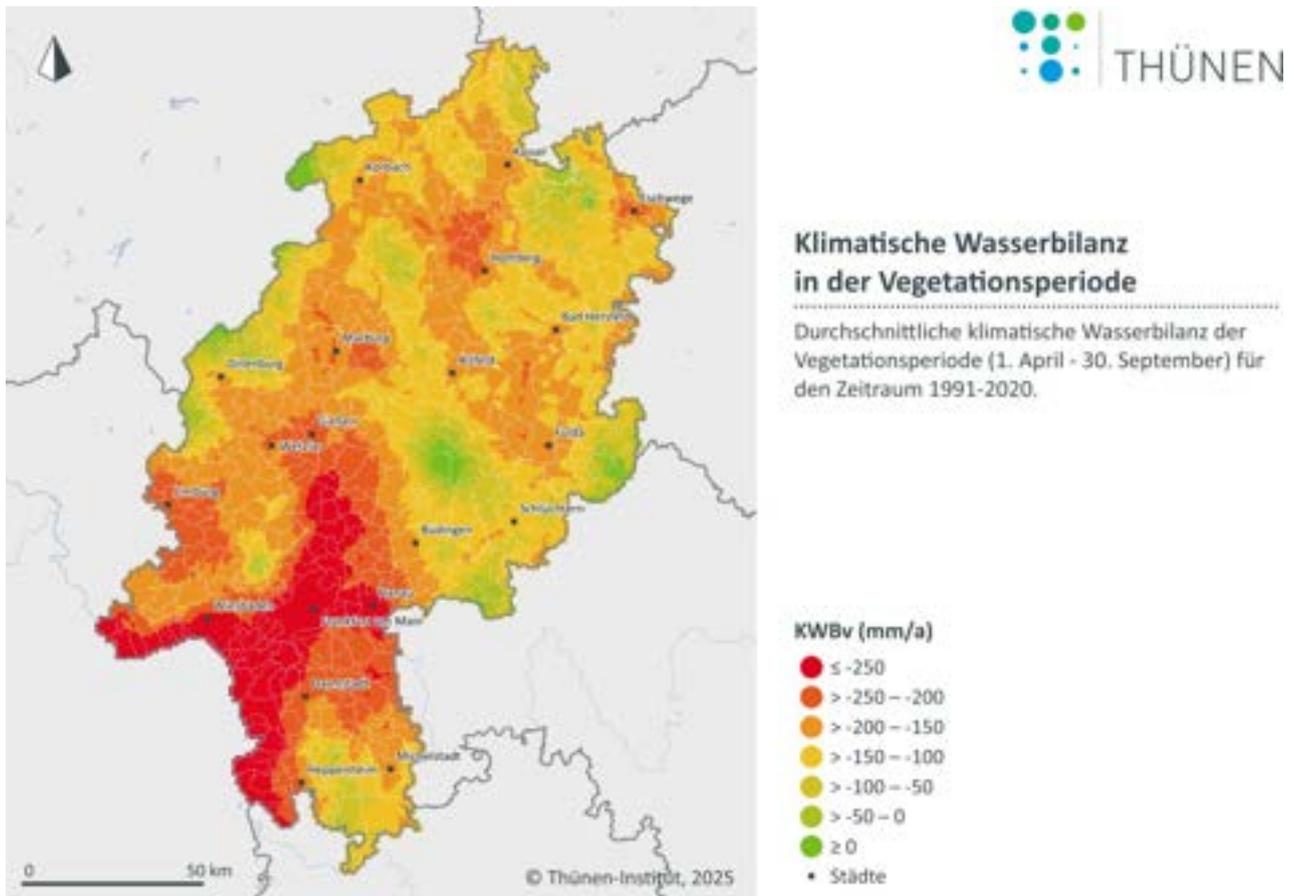
Niederschlag während der Wachstumszeit nicht in ausreichendem Maße fällt oder die Verdunstung besonders hoch ist, kann es zu einem Wassermangel kommen. In ihrer einfachsten Form gibt die KWBv Auskunft darüber, ob die Niederschläge ausreichen, um den Wasserbedarf der Vegetation zu decken. Die mittlere KWBv für die ex-post-Periode von 1991–2020 zeigt im hessenweiten Mittel eine negative Wasserbilanz von -161 mm (vgl. Abbildung 10). Wie die klimatischen Eingangsgrößen variiert der Wert von Jahr zu Jahr, im zeitlichen Verlauf fallen einerseits sehr trockene Jahre (z. B. 2003 und 2018) und andererseits Nassjahre (z. B. 1998, 2007 oder 2014) auf.

Abbildung 10: Entwicklung der mittleren jährlichen klimatischen Wasserbilanz in der Vegetationsperiode im hessenweiten Durchschnitt von 1991 bis 2020



Quelle: Eigene Abbildung auf Grundlage von CDC (2024b, 2023c).

Räumliche Daten zur mittleren KWBv für die ex-post-Periode von 1991–2020 (vgl. Abbildung 11) zeigen flächendeckend Wasserdefizite während der Vegetationsperiode in Hessen. In einigen Höhenlagen ist die KWBv positiv. Besonders in den intensiv landwirtschaftlich genutzten Gebieten von Mittel- bis Südhessen ist die mittlere KWBv mit -250 mm deutlich negativ. Dieses Trockengebiet zieht sich von der Stadt Gießen in südlicher Richtung nach Frankfurt am Main und einerseits weiter gen Osten über Wiesbaden bis zum Rheingau und andererseits südlich weiter zur Landesgrenze nach Baden-Württemberg. Die Vertiefungsregionen Hessisches Ried und Untermainebene (vgl. Abbildung 6) liegen genau in diesen Gebieten, in denen während der Vegetationsperiode mit einer stark negativen Wasserbilanz zu rechnen ist.

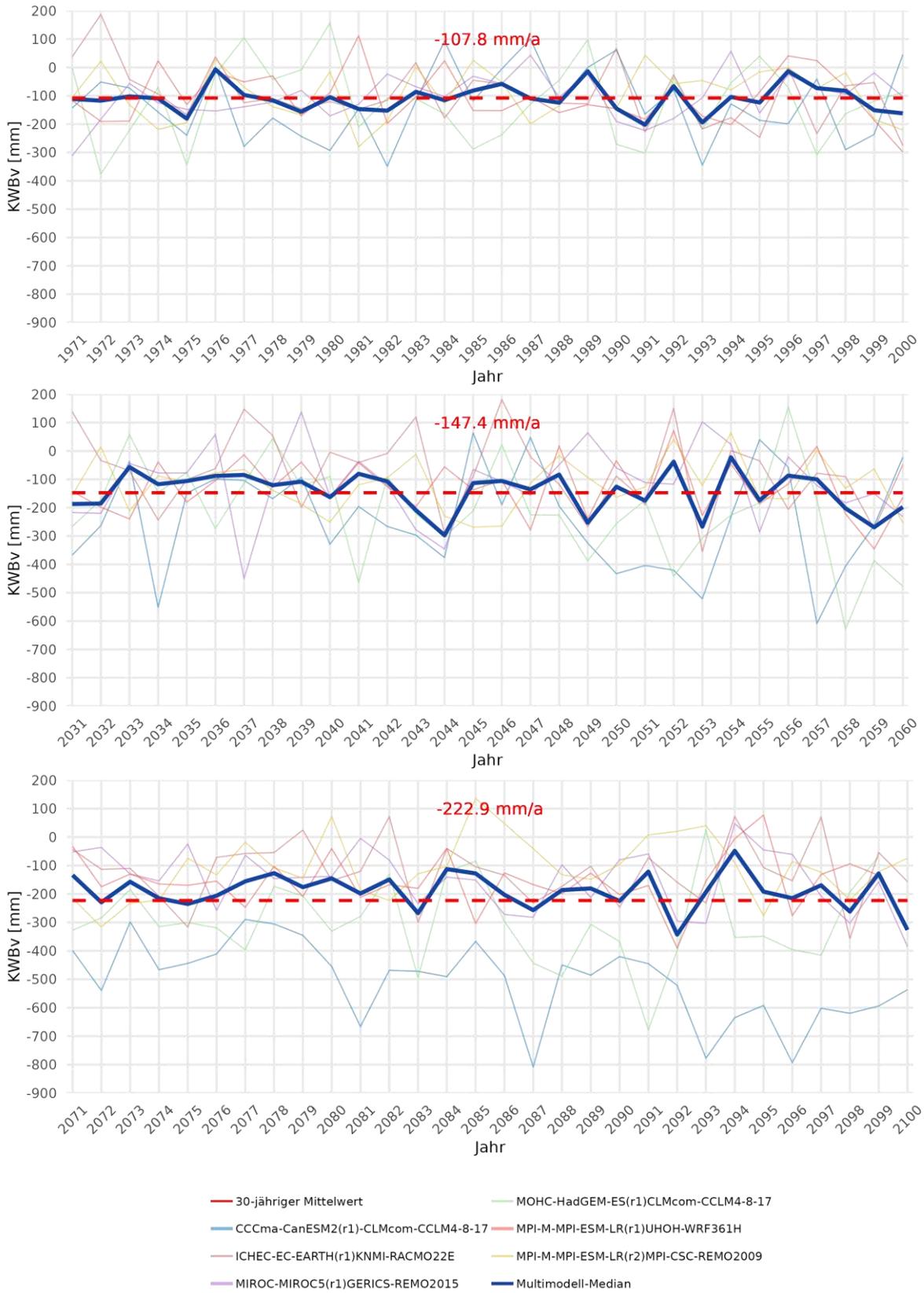
Abbildung 11: Mittlere klimatische Wasserbilanz der Vegetationsperiode für die Jahre 1991–2020 in Hessen

Quelle: Eigene Abbildung auf Grundlage von CDC (2024b, 2023c).

Auf Basis der regionaler Klimaprojektionsdaten für das RCP-Szenario 8.5 (siehe Kapitel 4.3) lässt sich eine weitere Reduzierung der KWBv für die Zukunft in Hessen erkennen (vgl. Abbildung 12). Verglichen mit der Referenzperiode 1971–2000, für die eine durchschnittliche KWBv von -108 mm pro Jahr berechnet wurde, prognostizieren die Klimaprojektionsdaten im Mittel eine Verringerung um etwa 35 % auf -145,6 mm für die nahe Zukunft (2031–2060). Für die ferne Zukunft (2071–2100) wird eine noch deutlichere Reduzierung projiziert, mit einem Rückgang von 106 % – bezogen auf die Referenzperiode – auf -222,9 mm pro Jahr.

Die Änderungen der mittleren KWBv lassen sich zudem räumlich abbilden. Die Analyse der räumlichen Änderungen in der nahen Zukunft zeigen fast flächendeckend in Hessen eine Änderung zwischen -25 und -50 mm/a (vgl. Abbildung 13 – links). Eine stärkere Änderung (-50 bis -75 mm/a) ist im südlichsten Hessen, südöstlich von Heppenheim, sowie auf der Wasserkuppe, südöstlich von Fulda, erkennbar. In der fernen Zukunft sind flächendeckend starke Änderungen (-100 bis -125 mm/a) mit regional sehr starken Änderungen (größer- 125 mm/a) erkennbar (vgl. Abbildung 13 – rechts). Besonders in den Höhenlagen, in denen die KWBv heute vergleichsweise positiv ist, treten besonders starke Änderungen auf. Dennoch sinkt die KWBv auch in den landwirtschaftlich relevanten Gebieten weiter, die schon heute von Trockenheit und hohen Bewässerungsbedarfen geprägt sind.

Abbildung 12: Hessenweite Änderung der mittleren Klimatische Wasserbilanz der Vegetationsperiode im Vergleich der Referenzperiode (1971–2000) zur nahen (2031–2060) und fernen (2071–2100) Zukunft basierend auf Daten des RCP-Szenarios 8.5

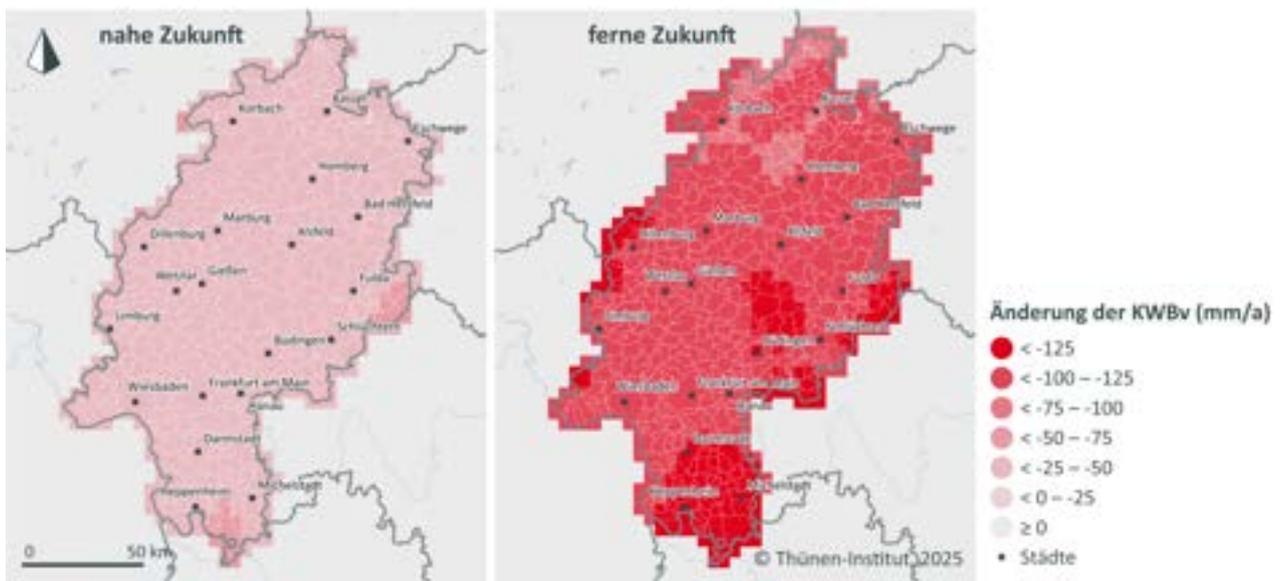


Quelle: Eigene Berechnungen auf Grundlage von DWD (2021e, 2021g).

Abbildung 13: Räumliche Änderung der mittleren Klimatische Wasserbilanz der Vegetationsperiode im Vergleich der Referenzperiode (1971–2000) zur nahen (2031–2060) und fernen (2071–2100) Zukunft in Hessen basierend auf Daten des RCP-Szenarios 8.5

Änderung der Klimatische Wasserbilanz in der Vegetationsperiode

Änderung der klimatischen Wasserbilanz der Vegetationsperiode (1. April - 30. September) von der Referenzperiode (1971-2020) zur nahen (2031-2060) und fernen Zukunft (2071-2100). Basierend auf Klimaprojektionsdaten für das RCP-Szenario 8.5.



Quelle: Eigene Abbildung auf Grundlage von DWD (2021e, 2021g).

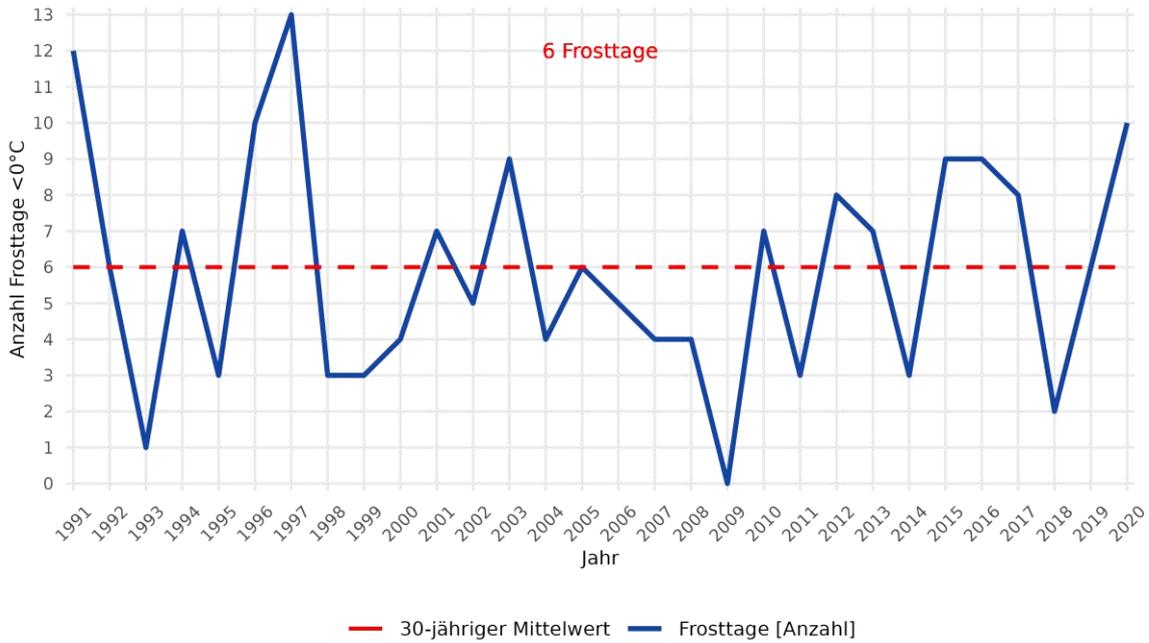
5.4.2 Anzahl der Tage mit Spätfrostrisiko

Ein weiterer wichtiger klimatischer Parameter für die landwirtschaftliche Produktion in Hessen ist das Spätfrostrisiko. Es beschreibt die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Frosttagen nach Frühlingsbeginn, typischerweise im Zeitraum von April bis Mai, wenn einige Kulturpflanzen bereits im generativen Wachstumsstadium sind. Spätfroste können erhebliche Schäden anrichten, da sie empfindliche Pflanzengewebe, Blüten und junge Früchte schädigen oder vernichten können, was zu Ertragseinbußen führt. Insbesondere vor dem Hintergrund der Analyse zum Wasserbedarf für Frostschutzberechnung ist die Analyse des Spätfrostrisikos wichtig. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) hat festgestellt, dass die Häufigkeit von Kaltlufteinbrüchen im Frühling zwar zurückgeht, diese Kälteeinbrüche aber auf Pflanzen treffen, die sich durch den früheren Vegetationsbeginn in frostempfindlichen Stadien befinden (DWD, 2023). Beispielsweise hat sich die Süßkirschenblüte um etwa neun Tage nach vorne verschoben, wodurch das Risiko von Spätfrostereignissen nach Beginn der Blüte gestiegen ist – von 19 % auf 27 % im Schnitt über Deutschland (DWD, 2023).

In einer Analyse der Jahre 1991–2020 wurde die durchschnittliche Anzahl der Tage mit Spätfrostrisiko in Hessen erfasst. Das Spätfrostrisiko wird durch die Anzahl der Tage vom 1. April bis 31. Mai, in denen die Tagesminimumtemperatur $< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegt, beschrieben.

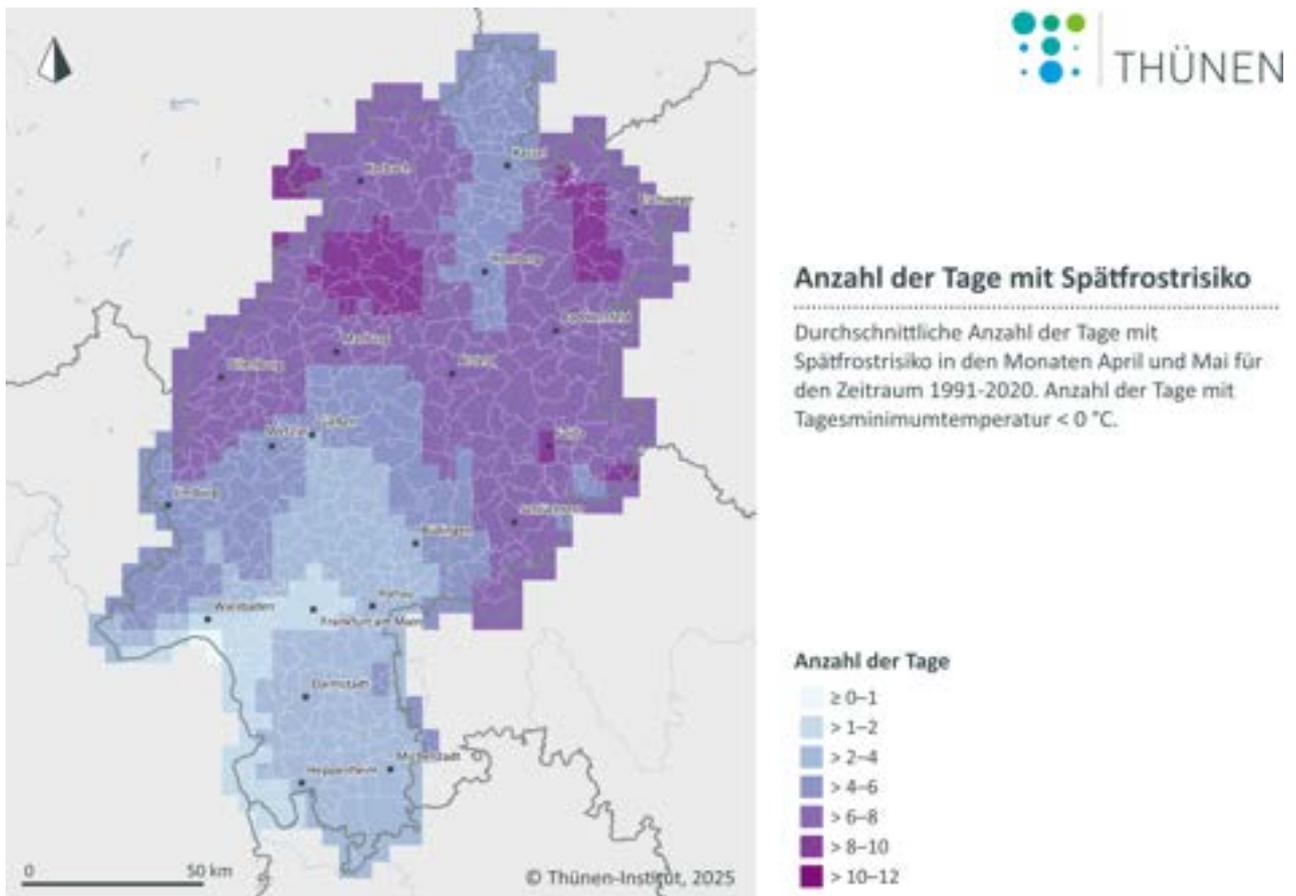
Die Anzahl der Tage schwankt in der ex-post-Periode von Null Tagen im Jahr 2009 bis zu 13 Tagen im Jahr 1997 (vgl. Abbildung 14). Im Mittel gab es sechs Tage mit Spätfrostrisiko pro Jahr. Besonders in Regionen, die aufgrund ihrer geografischen Lage oder topografischen Gegebenheiten anfälliger für späte Frostereignisse sind, ist das Bewusstsein für das Spätfrostrisiko essenziell. Abbildung 15 zeigt die räumliche Verteilung der mittleren Anzahl der Tage mit Spätfrostrisiko in Hessen von 1991–2020. Das Spätfrostrisiko ist besonders in den trockenen und warmen Gebieten Südhessens und in den Vertiefungsregionen gering und nimmt in nördlicher Richtung zu.

Abbildung 14: Entwicklung der mittleren jährlichen Anzahl von Tagen mit Spätfrostisiko im hessenweiten Durchschnitt von 1991 bis 2020



Quelle: Eigene Berechnungen auf Grundlage von CDC (2024c).

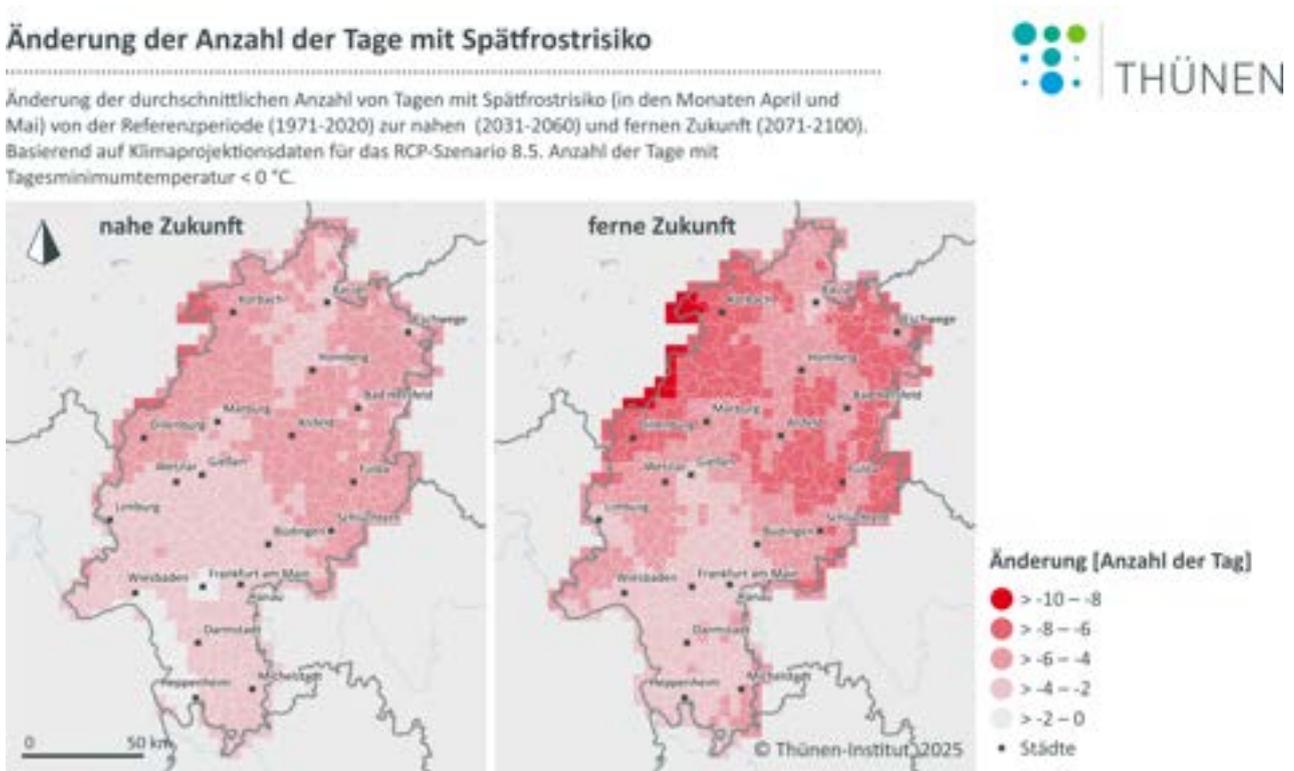
Abbildung 15: Mittlere Anzahl von Tagen mit Spätfrostisiko für die Jahre 1991–2020 in Hessen



Quelle: Eigene Abbildung auf Grundlage von CDC (2024c).

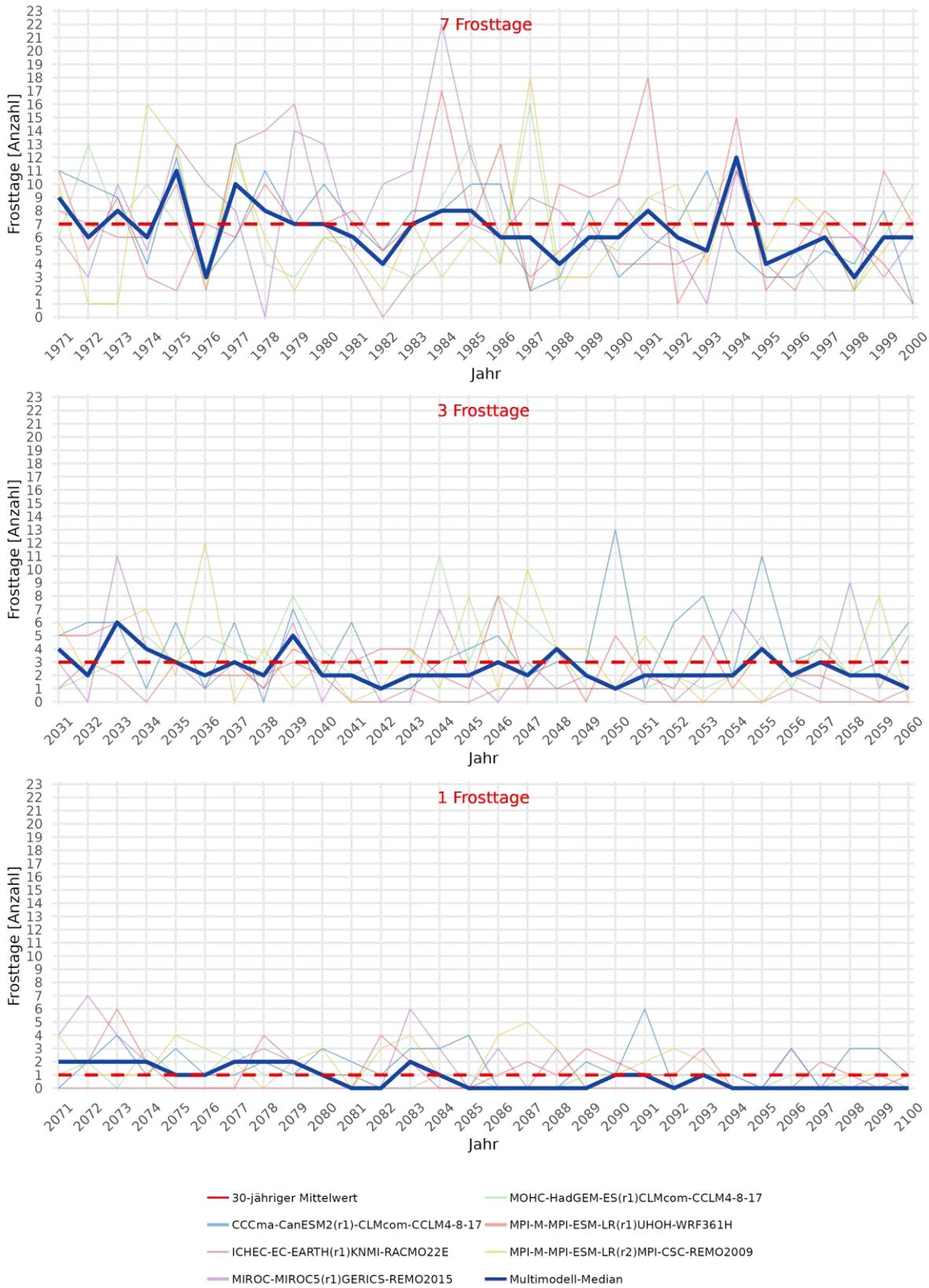
Die Analyse regionaler Klimaprojektionsdaten für das RCP-Szenario 8.5 zeigt, dass die Anzahl der Tage mit Spätfrostisiko in der nahen Zukunft leicht und bis zum Ende des Jahrhunderts erheblich abnimmt (vgl. Abbildung 17). Die räumlichen Veränderungen sind in der nahen Zukunft gering, insbesondere entlang des wärmeren Rheingrabens sind kaum Veränderungen zu erwarten (vgl. Abbildung 16 – links). Die Verringerung der Frosttage nimmt nach Norden hin zu. Für die ferne Zukunft wird ein signifikanter Rückgang der Tage mit Spätfrostisiko prognostiziert (vgl. Abbildung 16 – rechts). In den südhessischen Gebieten, wo häufig Gemüse und Sonderkulturen angebaut werden (vgl. Abbildung 9), ist ein nahezu vollständiger Rückgang des Spätfrostisikos im 30-jährigen Mittel zu erkennen. In den höheren Lagen, etwa an der Grenze zu Nordrhein-Westfalen, wird die Anzahl der Spätfrosttage ebenfalls deutlich zurückgehen. Bei der Interpretation dieser Daten ist zu beachten, dass einige Klimamodelle (vgl. Abbildung 17) auch bis 2100 ein gewisses Spätfrostisiko vorhersagen. Zudem kann die Verfrühung der phänologischen Phasen das Frostisiko potenziell wieder erhöhen.

Abbildung 16: Räumliche Änderung der mittleren Anzahl von Tagen mit Frostisiko im Vergleich der Referenzperiode (1971–2000) zur nahen (2031–2060) und fernen (2071–2100) Zukunft in Hessen basierend auf Daten des RCP-Szenarios 8.5



Quelle: Eigene Abbildung auf Grundlage von DWD (2021f).

Abbildung 17: Hessenweite Entwicklung der mittleren Anzahl von Tagen mit Spätfrostisiko im Vergleich der nahen (2031–2060) und fernen Zukunft (2071–2100) zur Referenzperiode (1971–2000) basierend auf Daten des RCP-Szenarios 8.5



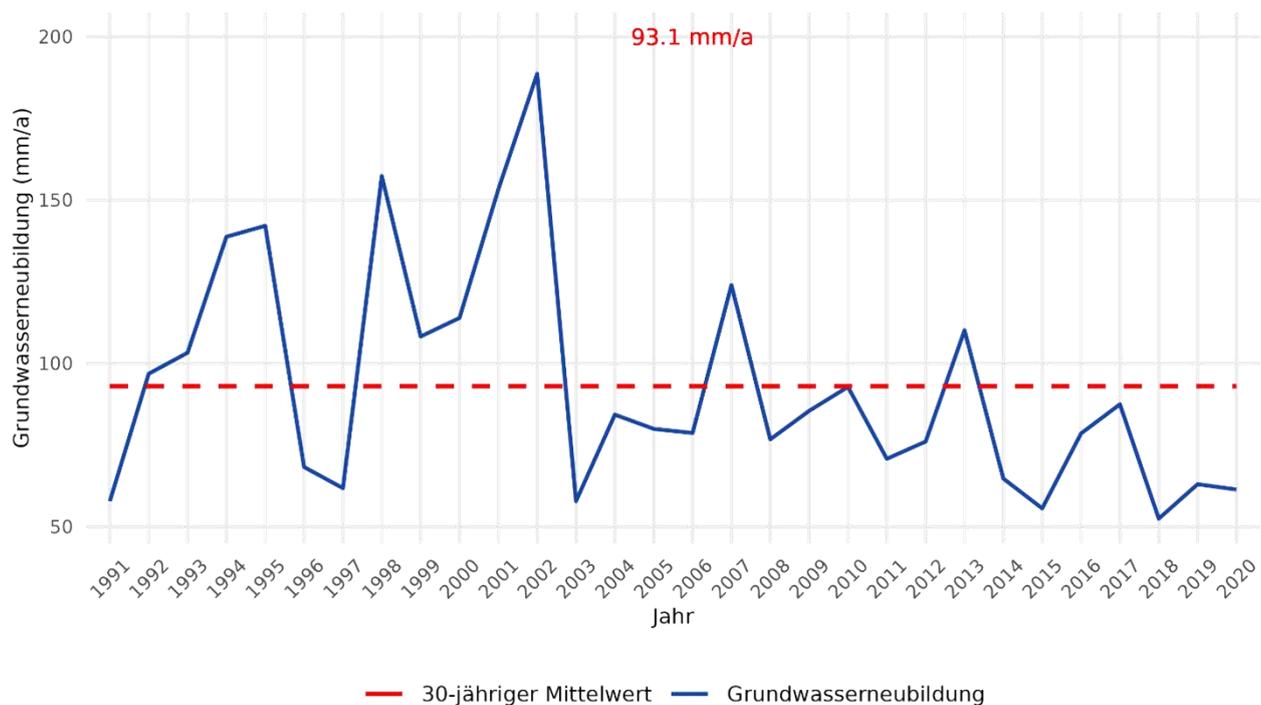
Quelle: Eigene Abbildung auf Grundlage von DWD (2021f).

5.5 Grundwasserneubildung

Grundwasserneubildung erfolgt durch Infiltration von Wasser in den Boden. Bei dem Wasser handelt es sich um Niederschlag, welcher nicht durch Verdunstungsprozesse in die Atmosphäre oder Direktabfluss in Oberflächengewässer gelangt (Fliß et al., 2021). Die Grundwasserneubildung erfolgt überwiegend im Winterhalbjahr, Niederschläge können größtenteils versickern, da weniger Wasser verdunstet oder durch die Vegetation genutzt wird (Hergesell, 2017). Grundwasserneubildungsraten stellen vor allem regional differenziert eine wichtige Grundlage für eine nachhaltige Bewirtschaftung des Grundwassers dar und helfen bei der Abschätzung von nachhaltig nutzbaren Grundwassermengen (Berthold und Hergesell, 2005).

In Hessen liegt die mittlere Grundwasserneubildungsrate über die Jahre 1991–2020 bei 93 mm/a. Wie in Abbildung 18 zu sehen ist, kommt es zwischen den Jahren zu Schwankungen und es ist ein leicht abnehmender Trend sichtbar.

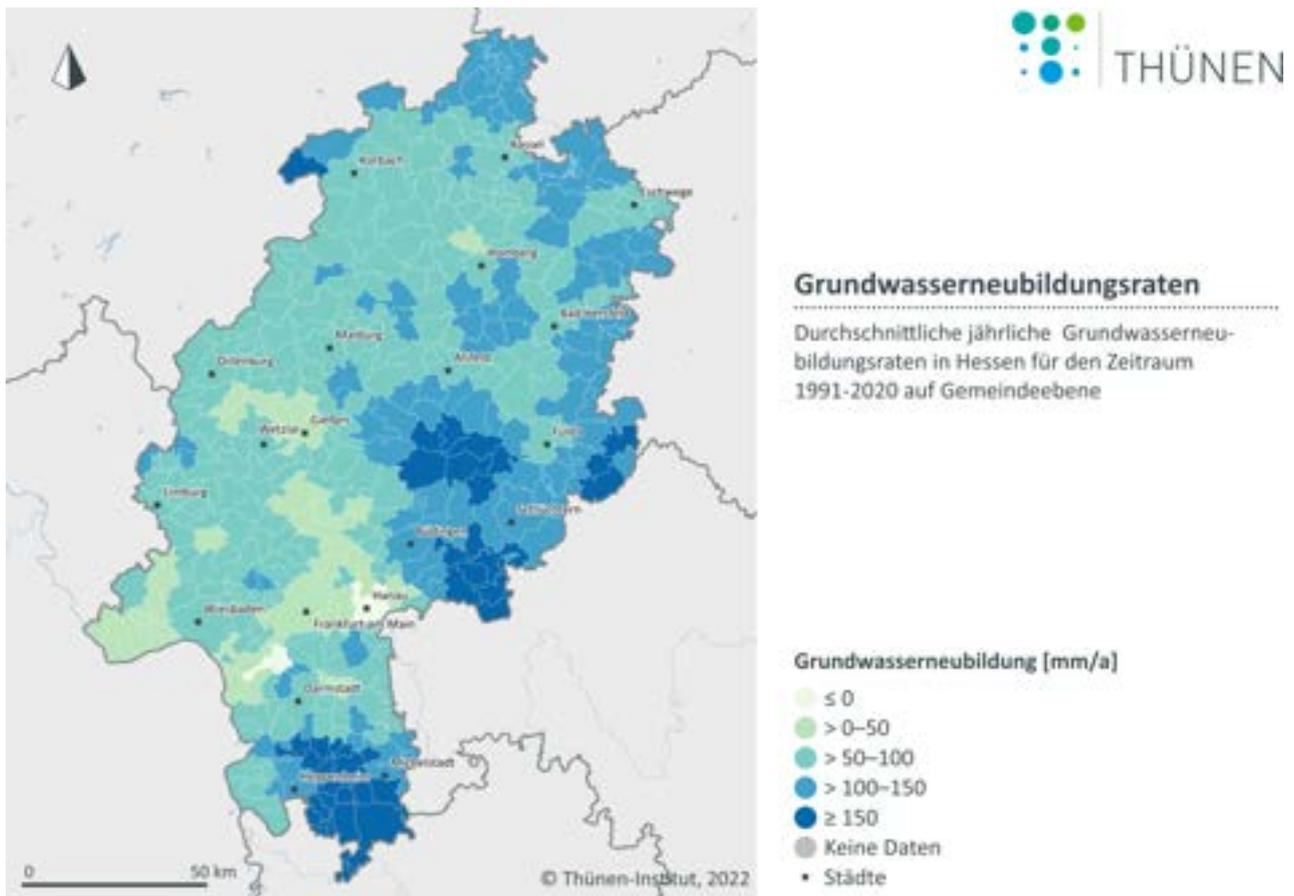
Abbildung 18: Durchschnittliche jährliche Grundwasserneubildungsrate in Hessen (1991–2020)



Quelle: Eigene Abbildung basierend auf HLNUG (2022b).

In Abbildung 19 sind die mittleren Grundwasserneubildungsraten regional differenziert auf Gemeindeebene dargestellt. Die Grundwasserneubildung ist in Regionen mit höheren Lagen wie beispielsweise dem Vogelsberg, der Rhön oder dem Odenwald ausgeprägter. Im Hessischen Ried und der Untermainebene sind die Grundwasserneubildungsraten mit einzelnen Ausnahmen deutlich geringer.

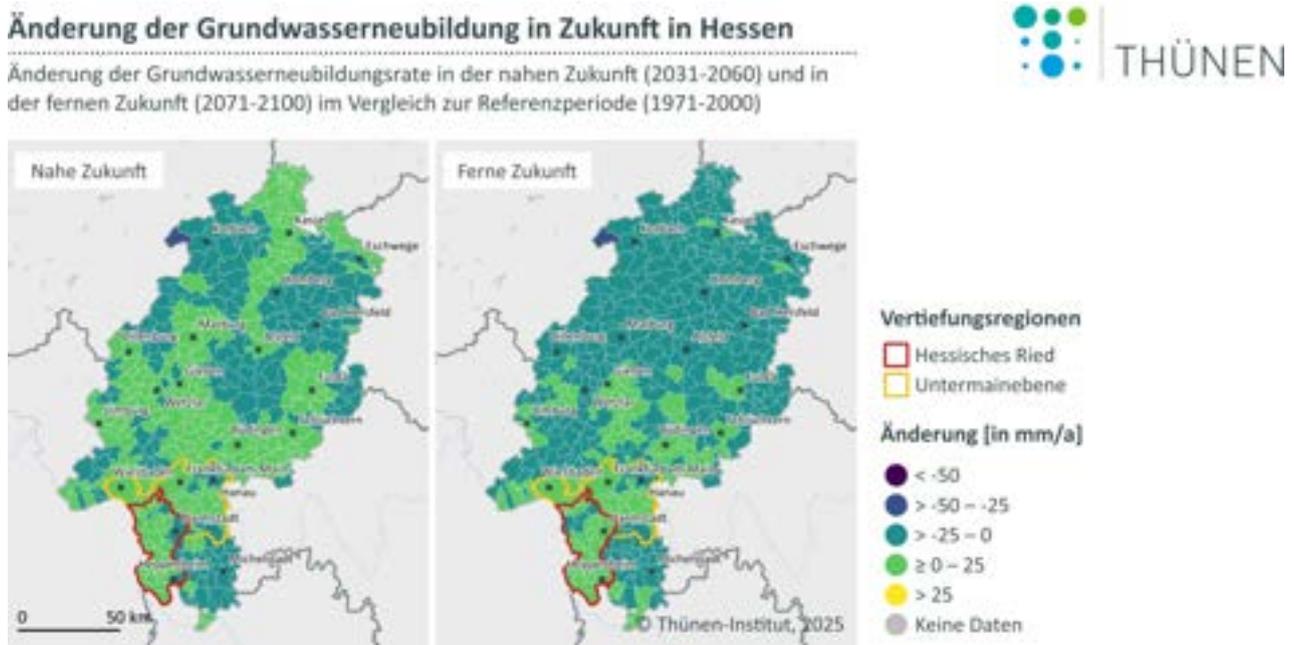
Abbildung 19: Mittlere Grundwasserneubildung für die Jahre 1991–2020 in Hessen



Quelle: Eigene Abbildung basierend auf HLNUG (2022b).

Eine Aussage über die zukünftige Entwicklung der Grundwasserneubildung ist anhand von modellierten Grundwasserneubildungen im Rahmen des KLIWA-Ensemble möglich (Berthold und Hergesell, 2005; KLIWA, 2017; HLNUG, 2022c) (vgl. Kapitel 4.7). Für modellierte Grundwasserneubildungsraten basierend dem RCP-Szenario 8.5 zeigt sich für Hessen im Mittel in der nahen Zukunft keine Veränderung und in der fernen Zukunft eine Veränderung um + 4 mm/a im Vergleich zur Referenzperiode. Auf regionaler Ebene (vgl. Abbildung 20) zeigt sich, dass auch hier die Veränderungen relativ gering ausfallen. In der nahen Zukunft kommt es rund um die Städte Korbach, Homberg und Bad Hersfeld, östlich von Dillenburg sowie im Odenwald, in der Rhön und im Vogelsberg zu leichten Zunahmen. In den restlichen Regionen kommt es zu leichten Abnahmen der Grundwasserneubildung. In der fernen Zukunft nehmen die Regionen mit einer leichten Abnahme der Grundwasserneubildung zu und nur im Hessischen Ried, der Untermainebene und weiteren Regionen von Mittelhessen sind geringfügige Zunahmen im Vergleich zur Referenzperiode sichtbar.

Abbildung 20: Änderung der Grundwasserneubildung in Hessen in der nahen (2031–2060) und fernen Zukunft (2071–2100) im Vergleich der Referenzperiode (1971–2000) basierend auf Daten des RCP-Szenarios 8.5



5.6 Stand der Bewässerung

5.6.1 Hessen

Nur wenige statistische Erhebungen in Deutschland bieten flächendeckende Informationen zur Bewässerung. Informationen zum Stand der Bewässerung in Hessen geben drei statistische Erhebungen: „Landwirtschaftszählung“, „Agrarstrukturerhebung“ und „nicht-öffentliche Wasserversorgung und nicht-öffentliche Abwasserversorgung“, wobei die Daten keine Informationen zur Frostschutzberegnung enthalten. Die Landwirtschaftszählung und die Agrarstrukturerhebung erheben im zehn- bzw. zwei- bis dreijährigen Rhythmus Informationen zur Möglichkeit der Bewässerung und zu bewässerten Flächen (Hessisches Statistisches Landesamt, 2021; DESTATIS, 2014; Hessisches Statistisches Landesamt, 2012; DESTATIS, 2017a). Bei einzelnen Erhebungen werden weitere Informationen wie Wasserherkunft, Bewässerungsverfahren, verbrauchte Wassermenge sowie bewässerte Fläche ausgewählter Kulturen erhoben (Hessisches Statistisches Landesamt, 2012; DESTATIS, 2017a). Die nicht-öffentliche Wasserversorgung und nicht-öffentliche Abwasserversorgung erfasst im dreijährigen Rhythmus u. a. den Wassereinsatz für die Bewässerung oder Beregnung (DESTATIS, 2016).

Weitere Informationen zur Bewässerung im Regierungsbezirk Darmstadt stammen vom Regierungspräsidium Darmstadt (2022). Der Datensatz enthält Informationen zu erteilten Grundwasserentnahmerechten (Beregnungsverbände, Einzelwasserrechte) sowie der Rheinwasserentnahme für Infiltration und Beregnung.

Im Bundesland Hessen gibt es rund 765.000 ha landwirtschaftlich genutzte Fläche, von denen rund 60 % (464.000 ha) als Ackerland genutzt werden (Hessisches Statistisches Landesamt, 2012). Die Bewässerung dieser Flächen hat in den vergangenen Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen. Deutschlandweit werden 2,2 % der landwirtschaftlichen Fläche bewässert und Hessen liegt mit 2,0 % nur knapp unter dem Bundesdurchschnitt (Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2011). Die statistischen Erhebungen unterscheiden zwischen der Möglichkeit zur Bewässerung (MB) und der tatsächlichen Bewässerung (TB), beide Merkmale sind in Tabelle 27

im Vergleich für alle Bundesländer seit 2009 dargestellt. Deutschlandweit haben die Flächen mit Möglichkeit zur Bewässerung und tatsächlicher Bewässerung von 2009 bis 2019 zugenommen. Während der Umfang der Flächen mit Bewässerungsmöglichkeit über den Zeitraum 2009 bis 2019 in fast allen Bundesländern angestiegen ist, ist er in Hessen nahezu unverändert geblieben (32.200 ha) – d. h. es wurden netto keine zusätzlichen Flächen mit Bewässerungsinfrastruktur ausgestattet.

Tabelle 27: Auszug aus der Agrarstatistik: 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>[landwirtschaftlich genutzte Fläche in 1.000 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 (2011a); Spalte (2) Daten aus DESTATIS (2014); Spalte (3) Daten aus DESTATIS (2017b); Spalte (4) Daten aus DESTATIS (2021).

Die Herkunft des Wassers für die Bewässerung in Hessen ist in Tabelle 28 für die Jahre 2009 und 2015 dargestellt. Mit 14.900 ha landwirtschaftlicher Flächen war Grundwasser im Jahr 2015 die flächenmäßig bedeutendste Quelle von Bewässerungswasser, gefolgt von Wasser aus öffentlichen oder privaten Versorgungsnetzen mit 5.200 ha. Eine untergeordnete Rolle spielt die Bewässerung mit Oberflächenwasser (1.200 ha).

Tabelle 28: Bewässerte Flächen nach Herkunft des Wassers in Hessen

Herkunft	(1)	(2)
	2009	2015
	<i>[in 1.000 ha]</i>	
aus öffentlichen oder privaten Versorgungsnetzen	3,0	5,2
Grundwasser (auch Quellwasser und Uferfiltrat)	11,4	14,9
betriebeigenes Oberflächenwasser (z. B. Teiche, Staubecken)	0,1	
betriebsfremdes Oberflächenwasser (z. B. Flüsse, Seen)	0,8	1,2
andere Herkunft (z. B. Brackwasser, aufbereitetes Wasser)	0,4	
insgesamt	15,6	22,4

Quelle: Spalte (1) Daten aus DESTATIS (2011b); Spalte (2) Daten aus DESTATIS (2017a).

In Tabelle 29 ist die Anzahl der Bewässerungseinrichtungen für Beregnungsanlagen (Sprinklerbewässerung) (vgl. Abbildung 2) und Tropfbewässerung (in Bodennähe) nach Herkunft des Wassers dargestellt. Im Jahr 2015 wurden insgesamt 820 Anlagen erfasst, davon sind 75 % Beregnungsanlagen. Im Vergleich werden diese eher mit Grundwasser versorgt, während Tropfbewässerungsanlagen zu ähnlichen Anteilen mit Wasser aus öffentlichen oder privaten Versorgungsnetzen sowie Grundwasser betrieben werden. Seit 2009 hat die Anzahl der Beregnungsanlagen um 50 Anlagen (10 %) abgenommen und die Anzahl der Tropfbewässerungssysteme um 40 Anlagen (25 %) zugenommen.

Tabelle 29: Bewässerungsverfahren nach Herkunft des Wassers in Hessen

Herkunft	(1)		(2)	
	2009		2015	
	Beregnungs-	Tropf-	Beregnungs-	Tropf-
	anlagen	bewässerung	anlagen	bewässerung
	<i>[in 1.000 Anzahl]</i>			
aus öffentlichen oder privaten Versorgungsnetzen	0,13	0,07	0,16	0,08
Grundwasser (auch Quellwasser und Uferfiltrat)	0,46	0,08	0,35	0,07
betriebeigenes Oberflächenwasser (z. B. Teiche, Staubecken)	0,02	0,02		
betriebsfremdes Oberflächenwasser (z. B. Flüsse, Seen)	0,03	0,01		
andere Herkunft (z. B. Brackwasser, aufbereitetes Wasser)	0,02			
insgesamt	0,66	0,17	0,61	0,21

Anm.: Beregnung = Beregnungsanlagen (Sprinklerbewässerung), Tropf = Tropfbewässerung (in Bodennähe, auch Mikrosprinkler).

Quelle: Spalte (1) Daten aus DESTATIS (2011b); Spalte (2) Daten aus DESTATIS (2017a).

Bewässerungsschwerpunkte in Hessen liegen im Regierungsbezirk Darmstadt, besonders in den Landkreisen Groß-Gerau (38,2 % bewässerte Fläche) und Bergstraße (20,9 %) (Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2011). Im Regierungsbezirk Darmstadt liegen sowohl die meisten Betriebe, die über eine Möglichkeit zur Bewässerung verfügen, als auch die größte Beregnungskapazität (vgl. Tabelle 30). Im Vergleich der möglichen mit der tatsächlichen Bewässerung, wird deutlich, dass die vorhandene flächenmäßige Bewässerungskapazität im Regierungsbezirk Darmstadt mit einer Auslastung von knapp über 50 % am stärksten genutzt wird, während die Auslastung in den Regierungsbezirken Gießen und Kassel mit 39 % bzw. 26 % geringer ist.

Tabelle 30: Mögliche und tatsächliche Bewässerung in den Regierungsbezirken 2009 und 2019

Regierungsbezirk	(1) 2009		(2) 2019	
	MB	TB	MB	TB
	<i>[in 1.000 ha]</i>			
Darmstadt	31,1	15,4	43,2	15,9
Gießen	0,6	<0,1	2,7	0,3
Kassel	0,5	<0,1	4,7	0,2
Hessen	32,2	16,4	50,5	16,4

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 Hessisches Statistisches Landesamt (2012) und Spalte (2) Daten aus Hessisches Statistisches Landesamt (2021).

Auch der Verbrauch an Bewässerungswasser und durchschnittlich bewässerter Fläche je Betrieb ist in Hessen im Regierungspräsidium Darmstadt am größten (Tabelle 31). Bewässerung spielte in den Erhebungsjahren also nahezu ausschließlich im Regierungspräsidium Darmstadt eine Rolle.

Tabelle 31: Durchschnittlich bewässerte Fläche pro Betrieb und verbrauchte Wassermenge 2009

Regierungsbezirk	Verbrauchte Wassermenge je Bezirk	Durchschnittlich bewässerte Fläche je Betrieb
	<i>[in 1.000 m³]</i>	<i>[in ha]</i>
Darmstadt	13.995	19
Gießen	94	2
Kassel	29	1
Hessen	14.118	17

Quelle: Daten aus Hessisches Statistisches Landesamt (2012).

5.6.2 Vertiefungsregionen

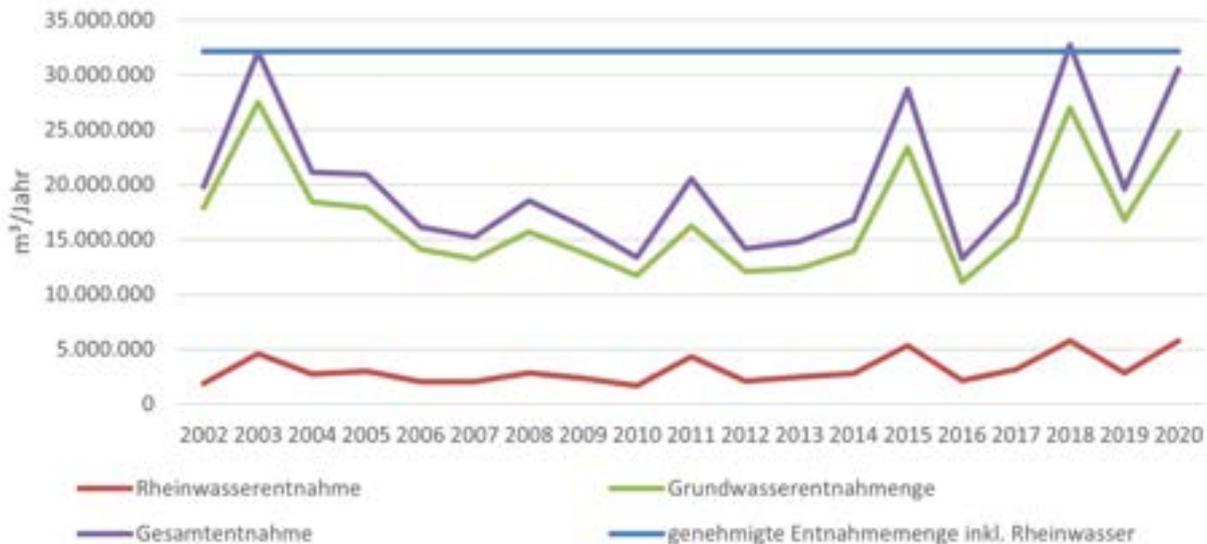
Von der landwirtschaftlichen Fläche im **Hessischen Ried** waren im Jahr 2007 rund 96 % für die Beregnung erschlossen (Berthold, 2010). Vor allem nicht-ortsfeste Beregnungsanlagen (85 %) werden verwendet, während Reihenbewässerungsanlagen (12 %) und ortsfeste Anlagen wie Tropfbewässerungen (3 %) einen deutlich geringeren Anteil ausmachen (HLNUG, 2008). Die tatsächlich beregnete Fläche ist unter anderem aus arbeitstechnischen Gründen deutlich geringer (Berthold, 2010). Die Beregnung findet hauptsächlich in den Abend- und Nachtstunden während der Vegetationsperiode (Ende März bis Anfang Oktober) statt. Die bedeutendsten Kulturen sind Winter- und Sommergetreide mit einem Anteil von 46 % der bewässerten Fläche, gefolgt von Zwiebelgewächsen mit 15 % und Zuckerrüben mit 10 %. Weitere beregnete Kulturen sind Kartoffeln, Mais, Raps, Spargel sowie nachwachsende Rohstoffe mit Flächenanteilen unter 10 % (HLNUG, 2008). Im Hessischen Ried liegt der Anteil von Gemüsekulturen und Erdbeeren über dem landesweiten Anteil von 3–5 % (Berthold, 2010).

Insgesamt existieren im Hessischen Ried Entnahmerechte über knapp 31 Mio. m³ pro Jahr für die Beregnung aus dem Grundwasser. Dabei werden 97 % der Wasserentnahme über Entnahmerechte von Verbänden und nur 3 % über Einzelentnahmerechte geregelt (Regierungspräsidium Darmstadt, 2022). Zudem können über den Wasserverband Hessisches Ried weitere 5 Mio. m³ Rheinwasser aus dem Brauchwasserwerk Biebesheim

bezogen werden. Diese Menge kann zudem um Wasser, welches nicht für die Infiltration benötigt wird, erweitert werden (Wasserverband Hessisches Ried, 2022).

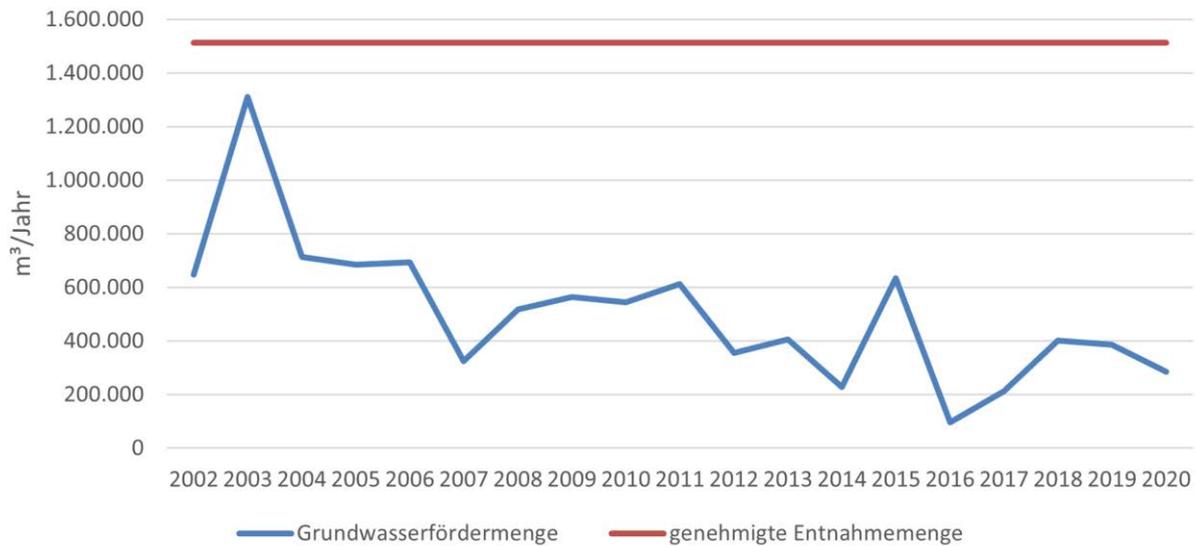
Im Jahr 2020 wurden im Hessischen Ried über 30 Mio. m³ Wasser für die Beregnung verwendet. Das Wasser stammt zu 81 % aus dem Grundwasser, die restlichen 19 % sind Oberflächenwasser aus dem Rhein und werden im Brauchwasserwerk Biebesheim aufbereitet. Über den Zeitraum 2002–2020 zeigt sich eine starke Variation in der tatsächlich genutzten Wassermenge, wie in Abbildung 21 dargestellt. Nur in den Dürre Jahren 2003 und 2018 wurden die genehmigten Entnahmen vollständig ausgereizt.

Abbildung 21: Bewässerung im Hessischen Ried nach Herkunft des Wassers



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Daten aus Regierungspräsidium Darmstadt (2022).

Entsprechend der Wasserrechte dürfen in der **Untermainebene** jährlich bis zu 1,5 Mio. m³ aus dem Grundwasser für die Bewässerung entnommen werden (vgl. Abbildung 22). Die entnommenen Mengen schwanken zwischen 1,3 Mio. m³ (2003) und 97.000 m³ (2016). Die Grundwasserfördermenge der einzelnen Jahre für die Bewässerung in der Untermainebene ergibt sich aus den Entnahmen im Regierungsbezirk Darmstadt, abzüglich der Mengen im Hessischen Ried.

Abbildung 22: Bewässerung in der Untermainebene aus dem Grundwasser

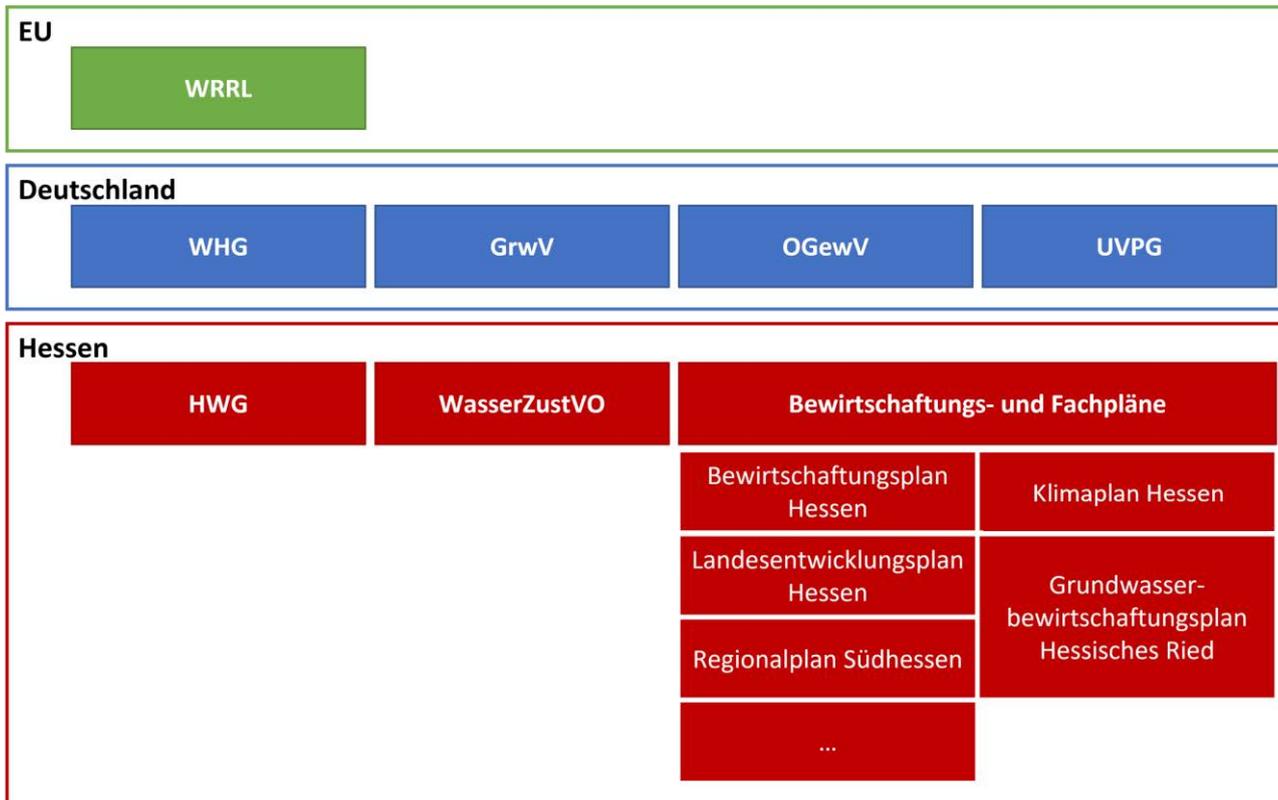
Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Daten aus Regierungspräsidium Darmstadt (2022). Institutioneller Rahmen der Bewässerung in Hessen

5.6.3 Gesetzlicher Rahmen

Der Rechtsrahmen für die Bewässerung wird auf europäischer Ebene durch die Wasserrahmenrichtlinie (2000/60/EG, WRRL) vorgegeben. Das Ziel der WRRL ist der qualitative und quantitative Schutz der Oberflächengewässer und des Grundwassers (BMUV, 2011). Die Umsetzung der WRRL in deutsches Recht erfolgt auf Bundesebene mit dem Wasserhaushaltsgesetz (WHG). Dieses legt fest, dass die Benutzung eines Gewässers, beispielsweise die Wasserentnahme aus oberirdischen Gewässern oder Grundwasser (§ 9 Abs. 2 WHG), grundsätzlich eine Erlaubnis oder Bewilligung benötigt. Zudem wird festgelegt, dass alle erteilten, nicht vorübergehenden Bewilligungen und Erlaubnisse im sogenannten Wasserbuch des Gewässers einzutragen sind (§ 87 WHG). Ergänzt wird das WHG auf Bundesebene durch die Verordnung zum Schutz des Grundwassers (Grundwasserverordnung, GrwV) und die Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung, OGewV). Die beiden Verordnungen legen u. a. Kriterien und Grenzwerte für die Bewertung des Zustands fest (§ 9 GrwV, Anlage 3 GrwV, § 5 OGewV, Anlage 3 OGewV). Bei Wasserentnahmen über 5.000 m³ pro Jahr muss mit einer Vorprüfung festgestellt werden, ob eine Umweltverträglichkeitsprüfung notwendig ist – beziehungsweise ab einer Entnahmemenge von 10 Mio. m³ besteht eine UVP-Pflicht (Anlage 1 UVP-G).

In Hessen sind auf Landesebene das Hessische Wassergesetz (HWG) und die Verordnung über die Zuständigkeit der Wasserbehörden (WasserZustVO) maßgeblich, welche u. a. die Zuständigkeiten der Behörden regeln (Abbildung 23). Die operative Verwaltung erfolgt auf Grundlage von Bewirtschaftungs- und Fachplänen. Der Grundwasserbewirtschaftungsplan Hessisches Ried regelt beispielsweise die wasserrechtliche Zulassung von Grundwasserentnahmen für die Bewässerung oder legt den unteren Grenzgrundwasserstand fest, bei dessen Unterschreitung Maßnahmen zur Grundwasserstandstabilisierung zu treffen sind. Zu den Maßnahmen zählen beispielsweise die Begrenzung von Fördermengen oder auch ein frühzeitiger Ausgleich der Entnahmen durch Infiltration (Regierungspräsidium Darmstadt, 2020).

Abbildung 23: Rechtsrahmen für die Bewässerung auf EU-, Bundes- und Landesebene sowie hessische Fachpläne, die die Bewässerung tangieren



Quelle: Eigene Darstellung.

5.6.4 Akteure

An der landwirtschaftlichen und gartenbaulichen Bewässerung sind verschiedene Akteure beteiligt: Landwirt*innen, Wasser-, Boden- und Beregnungsverbände, staatlich Akteure wie Wasser- und Umweltbehörden (vgl. Abbildung 24). Die größte Gruppe stellen die Landwirt*innen dar, von den rund 15.000 landwirtschaftlichen Betrieben in Hessen verfügen ca. 740 über eine Möglichkeit zur Bewässerung (Hessisches Statistisches Landesamt, 2021). Die Landwirt*innen sind vor allem im südlichen Hessen in Boden- und Wasserverbänden organisiert, von den 43 hessischen Wasser- Bodenverbänden befinden sich dort 31 (Lindenau, 2004). Die landwirtschaftlichen Wasser- und Bodenverbände sind gemäß Wasserverbandsgesetz (WVG) u. a. zuständig (§ 2 WVG) für

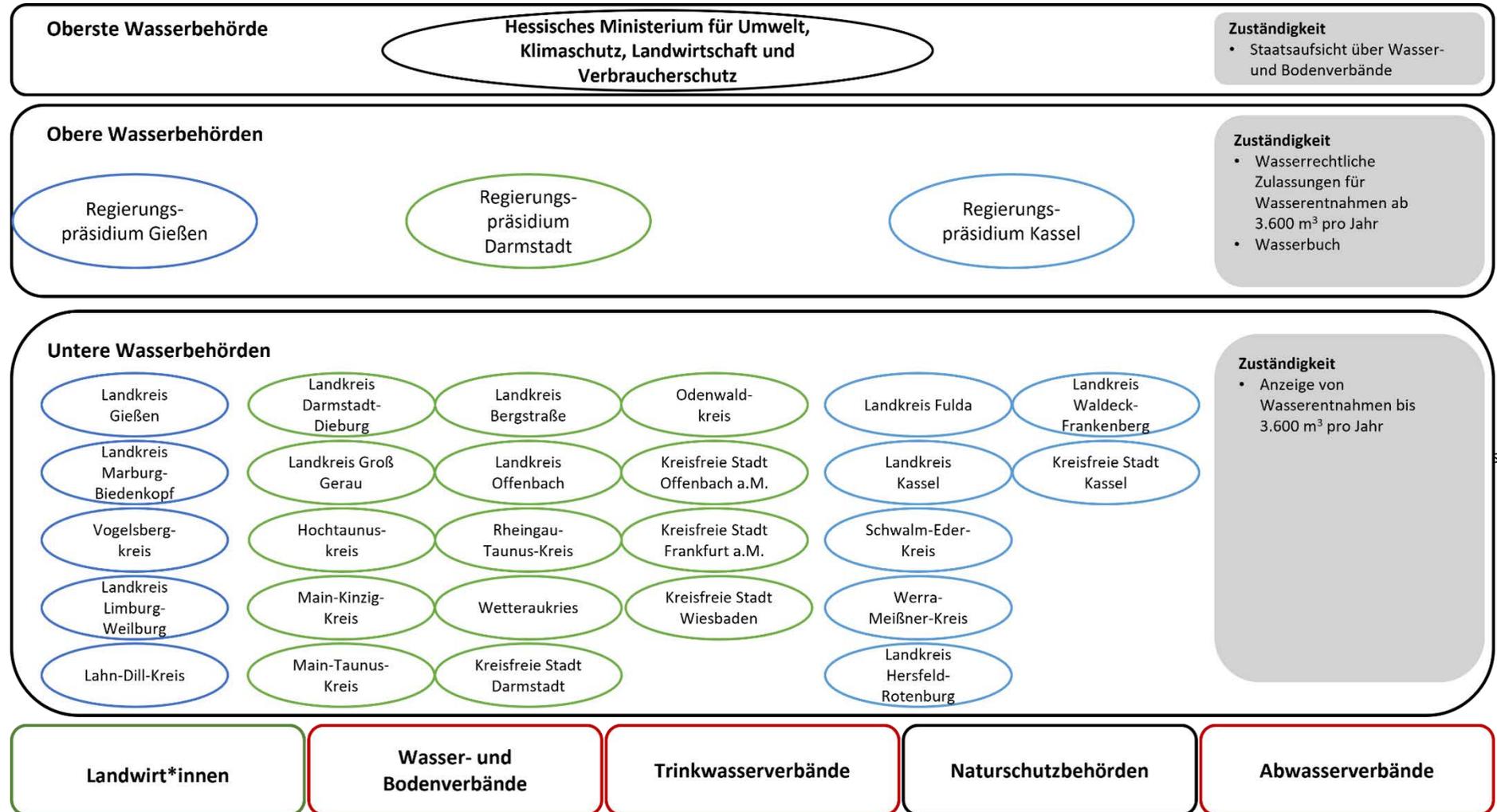
- „6. Verbesserung landwirtschaftlicher sowie sonstiger Flächen einschließlich der Regelung des Bodenwasser- und Bodenlufthaushalts,
- 7. Herstellung, Beschaffung, Betrieb, Unterhaltung und Beseitigung von Beregnungsanlagen sowie von Anlagen zur Be- und Entwässerung,
- 8. technische Maßnahmen zur Bewirtschaftung des Grundwassers und der oberirdischen Gewässer“.

Die Finanzierung der Verbände erfolgt über Verbandsbeiträge (§ 28 ff. WVG). In Hessen übernehmen die Wasser- und Bodenverbände vor allem die Bündelung von Wasserrechten und die Bereitstellung von wasserfördernden Anlagen und Leitungen bis zum Feld. Durch die Bündelung der Wasserrechte muss nicht jede Landwirtin / jeder Landwirt einen eigenen Antrag für eine Wasserentnahme stellen, sondern dies kann gesammelt für die Verbandsgebiete erfolgen. Darüber hinaus sind die Verbände an der Beschaffung des Wassers und der Verteilung der Wassermengen an die landwirtschaftlichen Betriebe beteiligt. Der Beregnungswasserverband Hessisches Ried (WHR-Beregnung) kann z. B. laut Satzung die Verteilung über einen Verteilungsplan regeln, wobei in Falle

knapper Wassermengen eine anteilige Kürzung möglich ist (WHR-Berechnung, 2023). Die hessischen Boden- und Wasserverbände sind in zwei Landesvereinigungen organisiert: den Wasser-, Boden- und Landschaftspflegeverband Hessen (WBL Hessen) und den Landesverband der Wasser- und Bodenverbände in Hessen (LWBV Hessen).

Zukünftig könnten neben Trinkwasserverbänden auch Abwasserverbände zunehmend als weitere Akteure in Erscheinung treten. Mit der Verordnung (EU) 2020/471 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Mai 2020 über Mindestanforderungen an die Wasserwiederverwendung ist eine rechtliche Grundlage für die Verwendung von aufbereitetem Abwasser als alternative Wasserressource für die landwirtschaftliche Bewässerung geschaffen worden.

Abbildung 24: Akteure in Hessen



serung in Hessen

Quelle: Eigene Darstellung.

5.6.5 Wasserrechtliche Zulassung

Für die Wasserentnahme aus oberirdischen Gewässern oder Grundwasser ist eine wasserrechtliche Erlaubnis oder Bewilligung notwendig (§ 9 Abs. 2 WHG, § 8 HWG). Eine Ausnahme stellen Wasserentnahmen bis zu einer Menge von 3.600 m³ pro Jahr durch die Landwirtschaft, die Forstwirtschaft oder den Gartenbau dar, diese Benutzung ist den unteren Wasserbehörden nur anzuzeigen (§ 29 HWG). In Verbandsgebieten von Beregnungsverbänden wie beispielsweise im Hessischen Ried kann es aufgrund der Summenwirkung aller Entnahmen < 3.600 m³ notwendig sein, dass Entnahmen aufgrund des gemeinsamen Einflussbereiches nicht grundsätzlich als erlaubnisfreie Einzelentnahmen betrachtet werden (Regierungspräsidium Darmstadt, 2023).

Für wasserrechtliche Erlaubnisse oder Bewilligungen sind die Antragsunterlagen für die wasserrechtliche Zulassung von Wasserentnahmen in vierfacher, schriftlicher Ausfertigung und in elektronischer Form einzureichen. Ein Antrag setzt sich zusammen aus Antragsschreiben, Erläuterungsbericht, Plänen und notwendigen Angaben für eine Vorprüfung zur Feststellung der Umweltverträglichkeitsprüfungspflicht (UVP-Pflicht) entsprechend des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG). Die Inhalte der einzelnen Teile sind in Tabelle 32 dargestellt. Während des Bewilligungsprozesses ist die Nachforderung zusätzlicher Unterlagen durch die Behörden möglich.

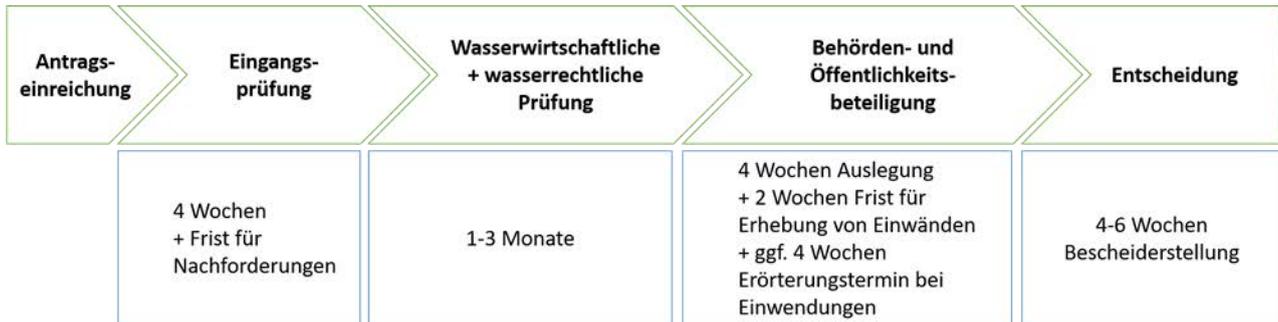
Tabelle 32: Antragsunterlagen für die wasserrechtliche Zulassung von Wasserentnahmen

Antragsteil	Inhalte
Antragsschreiben	<ul style="list-style-type: none"> - Angaben zum Antragsteller - Angabe der beantragten Rechtsform - Verwendungszweck des Wassers - Bezeichnung der betroffenen Grundstücke (Gemarkung, Flur, Flurstück) - Angaben der maximal beantragten Wasserentnahmemenge
Erläuterungsbericht	<ul style="list-style-type: none"> - Ort der Gewinnung - Zweck des gewonnenen Wassers - Höchstmengen - Entnahmezeiten - Tiefe der Entnahme - Bohrprofil des Brunnens - Für die vergangenen 5 Jahre: monatliche Entnahmemengen, Trinkwasser- bzw. Rohrwasseruntersuchungs-analysen, Ergebnisse der monatlichen gemessenen Ruhewasserspiegel und wöchentlich gemessenen Betriebswasserspiegel - Förderzeiten und Informationen zur Pumpensteuerung - Abschätzung des Einflussbereiches der Grundwasserentnahme - Informationen zu naturschutzrelevanten Fragestellungen - Pumpversuchsergebnisse und hydrologische oder sonstige Gutachten, soweit vorhanden - Wasserbedarfsnachweis (Wassersparnachweis und Wasserverlustanalyse)
Pläne	<ul style="list-style-type: none"> - Übersichtsplan - Lage-/ Katasterplanauszug mit Eigentümerverzeichnis - Bauwerkszeichnungen - Auszug aus dem Landschaftsplan der Kommune - Darstellung des Einflussbereichs der Grundwasserentnahme
notwendige Angaben für eine Vorprüfung zur Feststellung der UVP-Pflicht nach Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung bei Entnahmen von	<ul style="list-style-type: none"> - 5.000 m³/a bis weniger als 100.000 m³/a eine standortbezogene Vorprüfung des Einzelfalles, ggf. UVP - über 100.000 m³/a und unter 10 Mio. m³/a eine Allgemeine Vorprüfung des Einzelfalles vorzunehmen, ggf. UVP - über 10 Mio. m³/a UVP-Pflicht

Quelle: Eigene Tabelle nach Regierungspräsidium Gießen; Regierungspräsidium Gießen, 2019.

Bei der wasserrechtlichen Zulassung ist es möglich, das gesamte Verfahren an ein Ingenieurbüro abzugeben, welches die Abstimmung mit den Behörden und die Antragseinreichung übernimmt. Alternativ ist eine eigenständige Erstellung des Antrags möglich. Hierbei ist eine Beratung bei der Genehmigungsbehörde und ggf. eine Vorantragskonferenz mit den beteiligten Fachbehörden in Anspruch zu nehmen. Bei UVP-pflichtigen Vorhaben (z. B. Wasserentnahmen von über 100.000 m³ pro Jahr) wird vor der Antragstellung meist ein sogenannter Scopingtermin zur Erörterung des Umfangs und Inhalts der Vertragsunterlagen durchgeführt. Wie in Abbildung 25 dargestellt, setzt sich der Verfahrensprozess nach der Antragseinreichung aus den Schritten Eingangsprüfung, wasserwirtschaftliche und -rechtliche Prüfung, Behörden- und Öffentlichkeitsbeteiligung und der abschließenden Entscheidung zusammen.

Abbildung 25: Schematische Darstellung des Ablaufs eines wasserrechtlichen Verfahrens im Regierungspräsidium Gießen



Quelle: Eigene Darstellung nach Regierungspräsidium Gießen, 2019.

Für die wasserrechtliche Zulassung fallen Verwaltungskosten an. Die Rechtsgrundlage für diese Kosten sind das Hessische Verwaltungskostengesetz (HVwKostG) und die gültige Verwaltungskostenordnung des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (VwKostO-MUKLV¹). Die Kosten richten sich je nach Wasserquelle gestaffelt nach Entnahmemenge in m³ (Grundwasser) oder bewässerter Fläche in ha (Oberflächenwasser). Zudem können Kosten für Anlagen zur Entnahme oder hydrogeologische Stellungnahmen des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) anfallen (Anlage 1 VwKostO-MUKLV¹). Neben den Verwaltungskosten können weitere Kosten für die Erstellung von hydrologischen oder hydrogeologischen Gutachten oder notwendigen Untersuchungsanalysen entstehen.

Entsprechend der WRRL Art. 9, des WHG § 6a und des Verursacherprinzips ist eine Deckung der Kosten für Wasserdienstleistungen wie die Entnahmen von Grund- und Oberflächenwasser inklusive Kosten, die sich auf Ressourcen und Umwelt beziehen, durch ein Entgelt möglich. Das Entgelt dient als Anreiz zur effizienten Nutzung der Ressource Wasser (Gawel et al., 2011). In dreizehn Bundesländern werden entsprechende Wasserentnahmeentgelte unterschiedlicher Ausgestaltung erhoben, wobei in den Bundesländern Baden-Württemberg, Mecklenburg-Vorpommern, Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz Bewässerung zu forst- oder landwirtschaftlichen Zwecken von den Entgelten ausgenommen sind (vgl. Tabelle 33). Das Bundesland Hessen ist eines von drei Bundesländern, welche auf dieses Entgelt verzichten (HMUKLV, 2022: S. 61). Von 1994 bis 2003 wurde in Hessen eine Grundwasserabgabe zwischen 0,50 bis 1,10 DM pro m³ verlangt (Gawel et al., 2011: S. 104). Derzeit wird in Hessen die Wiedereinführung eines Wasserentnahmeentgeltes diskutiert. Gawel und Köck. Wolfgang (2023) empfehlen zur Deckung der Ressourcen- und Umweltkosten ein solches Entgelt, da kein überzeugendes alternatives Instrument identifiziert werden konnte.

Tabelle 33: Wasserentnahmeentgelt in den Bundesländern

Bundesland	Wasserentnahmeentgelt (Cent/m ³) zur landwirtschaftlichen oder gartenbaulichen Beregnung aus		andere Zwecke (Cent/m ³)	Rechtsgrundlage
	Grundwasser	Oberflächenwasser		
Baden-Württemberg	5,1	- ¹	1–5,1	§§ 103 ff. Wassergesetz Baden-Württemberg (WG BW)
Bayern	-	-	-	
Berlin	31	-	31	§ 13a Berliner Wassergesetz (BWG)
Brandenburg	11,5	- ¹	0,7–9	§§ 40 ff. Brandenburgisches Wassergesetz (BbgWG)
Bremen	0,7	0,8	0,25–6	Bremer Gesetz über die Erhebung einer Wasserentnahmegebühr (BremWEGG)
Hamburg	oberflächennah: 18,53 tiefer: 19,95	jährlich: 285 €/Entnahmestelle ⁴	Grundwasser wie für Landwirtschaft; Oberflächenwasser 0,6, mind. 1060 €/Entnahmestelle	Grundwassergebührengesetz Hamburg (Hmb GruWaG), Oberflächengewässergebührengesetz (ObflGebG), Oberflächengewässergebührenordnung (ObflGebO)
Hessen	-	-		
Mecklenburg-Vorpommern ¹	-	-	2–10	§§ 16 ff. Landeswassergesetz Mecklenburg-Vorpommern (LWaG MV)
Niedersachsen ²	1,6	1,6	0,9–20,4	§§ 21 f. Niedersächsisches Wassergesetz (NWG)
Nordrhein-Westfalen ¹	-	-	0,35–5	§ 1 Wasserentnahmeentgeltgesetz Nordrhein-Westfalen (WasEG NRW)
Rheinland-Pfalz ⁵	6	2,4	0,5–6	§ 2 Landesgesetz über die Erhebung eines Entgelts für die Entnahme von Wasser aus Gewässern (LWEntG RLP)
Saarland	0,91–1,3	-	0,91–15,6	Saarländisches Grundwasserentnahmeentgeltgesetz (GrdWasEntgG SL)
Sachsen	5,6	1,7	0,5–7,6	§§ 91 ff. Sächsisches Wassergesetz (SächsWG)
Sachsen-Anhalt ³	2	0,5	0,25–7	Wasserentnahmeentgeltverordnung für das Land Sachsen-Anhalt (WasEE-VO LSA)
Schleswig-Holstein	3	1	0,1–12	Wasserabgabengesetz des Landes Schleswig-Holstein (LWAG)
Thüringen	-	-	-	

Bemerkung: ¹ Ausnahmen für forst- und landwirtschaftliche Bewässerung, ² keine Erhebung für Frostschutzberegnung, ³ Befreiung für land- oder forstwirtschaftliche Zwecke auf Antrag, ⁴ keine Erhebung für Boden- und Wasserverbände, ⁵ bei Entnahmen durch einen Boden- oder Wasserverband nur 50 %.

Quelle: Eigene Darstellung.

6 Entwicklung der Bewässerung in Hessen – Modellierungsergebnisse 1991–2020

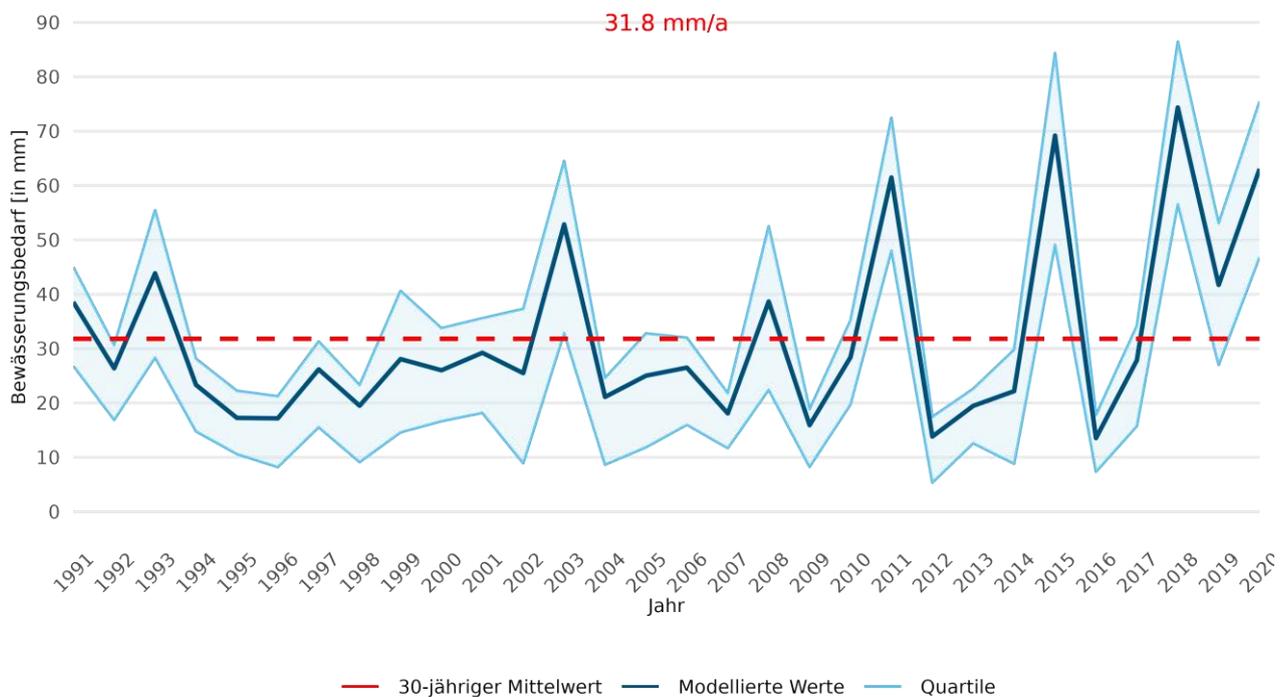
6.1 Bewässerungsbedarf

6.1.1 Potenzieller Bewässerungsbedarf

Der ex-post Zeitraum zeigt die Entwicklung über die Jahre 1991–2020. Anhand der Modellierungsergebnisse wird gezeigt, wie sich der potenzielle Bewässerungsbedarf in Hessen in der Vergangenheit (1) zeitlich entwickelt hat, (2) sich räumlich differenziert und (3) welchen Einfluss die Kulturen auf den regionalen potenziellen Bewässerungsbedarf haben.

Abbildung 26 zeigt den hessenweiten Mittelwert des potenziellen Bewässerungsbedarfs der einzelnen Jahre von 1991 bis 2020. Die modellierten Werte zeigen starke jährliche Schwankungen und Abweichungen vom 30-jährigen Mittelwert. In Einzeljahren können so deutliche Abweichungen auftreten, die sowohl über (z. B. in den Jahren 1993, 2003, 2015 und 2018) als auch unter (z. B. 2002, 2004, 2007 oder 2012) dem Mittel liegen. In ausgewählten Jahren wie dem Dürrejahr 2018 lag der potenzielle Bewässerungsbedarf im hessenweiten Durchschnitt (bezogen auf alle Kulturen) mit 69 mm rund 37 mm über dem langjährigen Mittelwert von 32 mm. Im Gegensatz dazu führen feuchte Jahre (z. B. 2007) zu einem signifikant geringeren potenziellen Bewässerungsbedarf in der hessischen Landwirtschaft. Unabhängig von den beschriebenen Schwankungen zeigt sich ein steigender Trend.

Abbildung 26: Entwicklung des mittleren jährlichen potenziellen Bewässerungsbedarfs im hessenweiten Durchschnitt von 1991 bis 2020

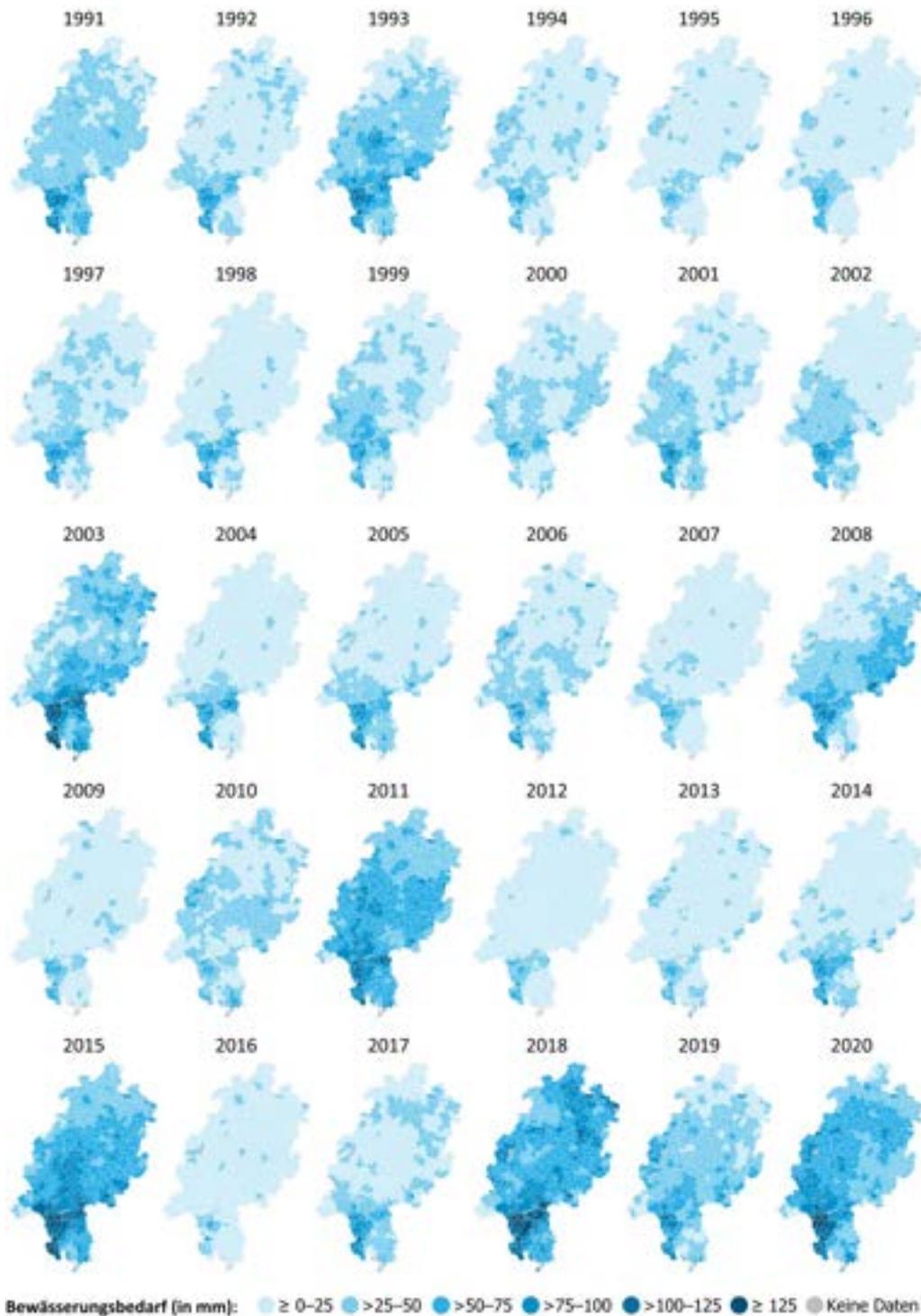


Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 27 zeigt weitergehend den jährlichen potenziellen regionalen Bewässerungsbedarf für alle Gemeinden in Hessen von 1991 bis 2020. Dabei wird deutlich, dass es durch witterungsbedingte Variationen zwischen den

Jahren grundsätzlich zu räumlichen Unterschieden des potenziellen Bewässerungsbedarfs kommt. Zudem wird deutlich, dass sich die sehr hohen Bedarfe in nahezu allen Jahren in Südhessen bündeln. Wie bei der Darstellung der hessenweiten Mittelwerte (vgl. Abbildung 26) fallen im Vergleich aller Jahre ebenfalls die Trockenjahre mit einem grundsätzlich hohen potenziellen Bewässerungsbedarf (dunkelblaue Färbung) auf. Die Kombination aus Klima und einem ausgeprägten Sonderkulturanbau machen Südhessen und das Hessische Ried zu einer intensiven Bewässerungsregion.

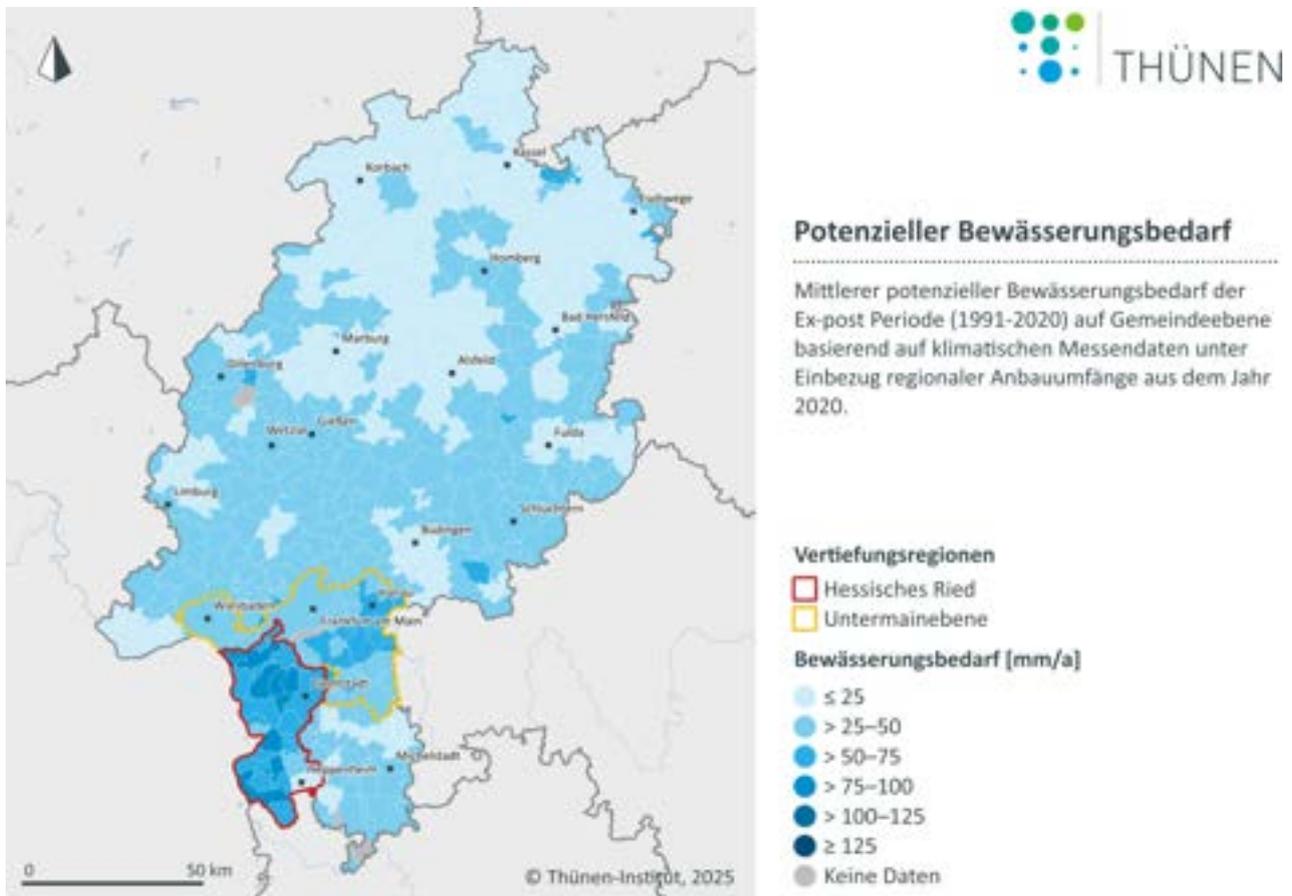
Abbildung 27: Jährlicher Bewässerungsbedarfe der Landwirtschaft in Hessen im ex-post-Zeitraum von 1991 bis 2020



Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 28 stellt den potenziellen regionalen Bewässerungsbedarf (auf Gemeindeebene) als Mittelwert über die 30 Jahre des ex-post-Zeitraums auf Gemeindeebene dar. Dabei sind die realen Anbauumfänge (Anteile der landwirtschaftlich genutzten Fläche je Kultur in Hektar) basierend auf den InVeKoS-Landnutzungsdaten für das Jahr 2020 berücksichtigt.

Abbildung 28: Mittlerer potenzieller Bewässerungsbedarf bezogen auf die landwirtschaftlich genutzte Fläche je Gemeinde auf Grundlage von Klima-Observationsdaten (1991–2020)

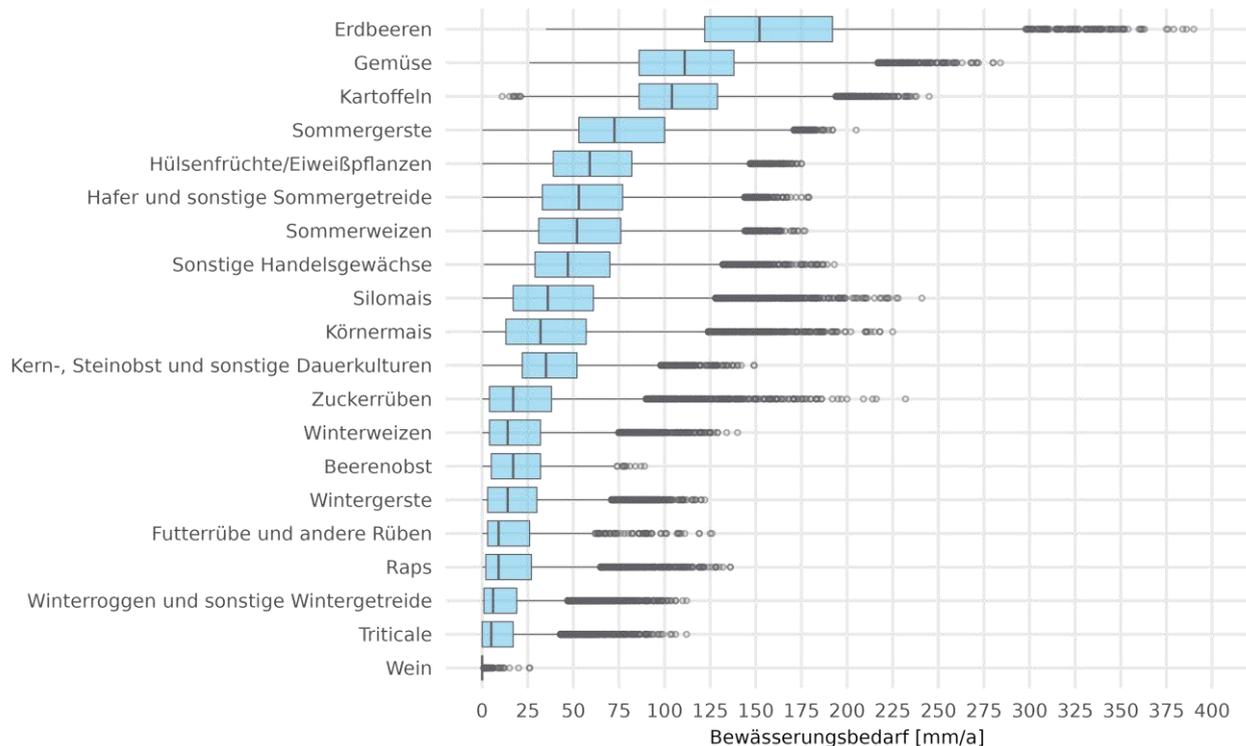


Quelle: Eigene Darstellung.

Während im überwiegenden Teil Nordhessens primär keine (0–25 mm) und geringe (25–50 mm) potenzielle Bewässerungsbedarfe ermittelt wurden, bündeln sich im Südhessen mittlere (75–100 mm) bis hohe (100–125 mm) potenzielle Bewässerungsbedarfe. Dies umfasst vorwiegend die Rhein-Main-Region mit dem Main-Taunus-Kreis, die Landkreise Groß-Gerau, Bergstraße, Offenbach, Darmstadt-Dieburg sowie die kreisfreien Städte Wiesbaden, Frankfurt am Main und Darmstadt. Ein besonderer Fokus liegt im Gebiet südlich der Landeshauptstadt Wiesbaden bis zur Südgrenze des Bundeslandes, der Vertiefungsregion Hessisches Ried (vgl. Abbildung 6), das bekannt ist für eine intensive Bewässerung von landwirtschaftlichen Kulturen.

Die witterungsbedingten Varianzen bestimmen jedoch nicht allein die beschriebenen räumlichen und zeitlichen Unterschiede des potenziellen Bewässerungsbedarfs. Eine große Rolle spielen die angebauten Kulturen, die ihrerseits starke Unterschiede im Wasserbedarf haben. Abbildung 29 zeigt die Verteilung des potenziellen Bewässerungsbedarfs (in mm/a) der einzelnen Kulturen bzw. Kulturaggregate. Die Verteilung beinhaltet die 30 Jahre des ex-post-Zeitraums für alle Gemeinden, in denen die jeweilige Kultur angebaut wird. Kulturen mit einem hohen potenziellen Bewässerungsbedarf sind in Hessen demnach z. B. Sonderkulturen wie Gemüse oder sonstige Handelsgewächse, Hülsenfrüchte, Kartoffeln oder Erdbeeren. Je höher der Anteil von derart bewässerungsbedürftigen Kulturen ist, desto höher ist der potenzielle Bewässerungsbedarf einer Gemeinde.

Abbildung 29: Verteilung (Boxplot) der kulturspezifischen Unterschiede des potenziellen Bewässerungsbedarfs



Anm.: Bezogen auf alle Jahre von 1991 bis 2020 und alle Gemeinden, in denen die jeweilige Kultur 2020 tatsächlich angebaut wurde.

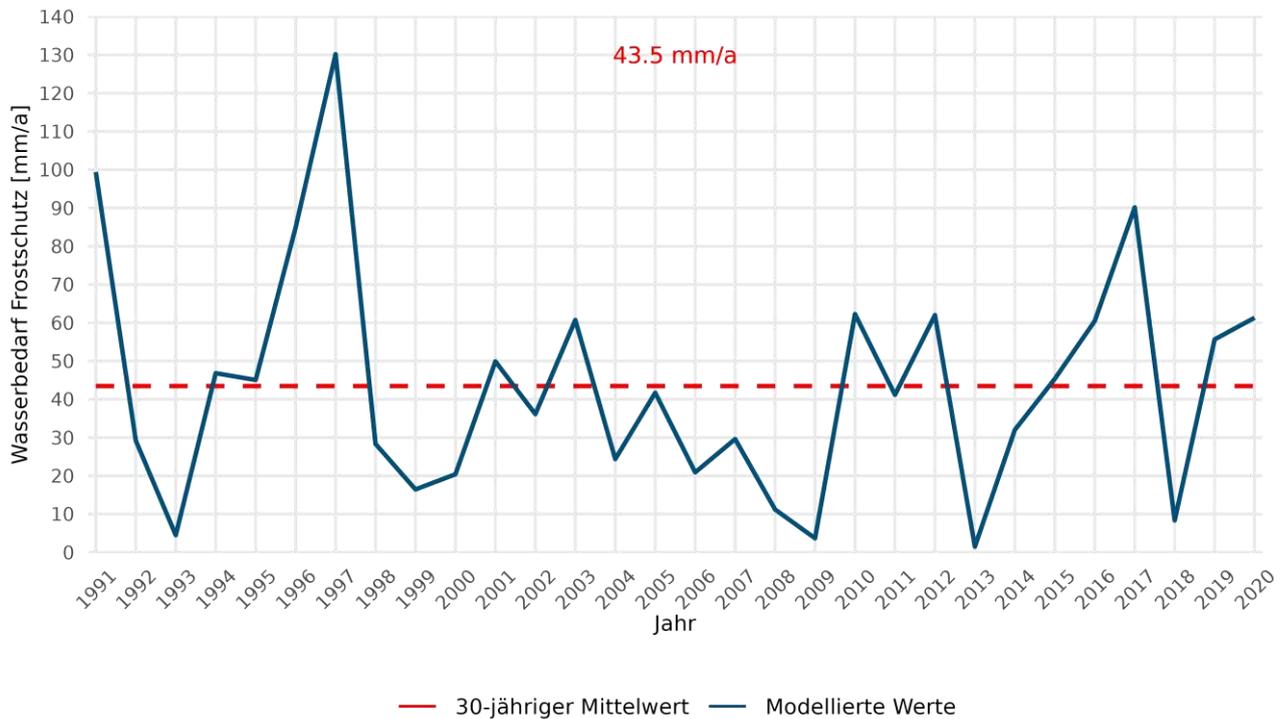
Quelle: Eigene Darstellung.

6.1.2 Potenzieller Wasserbedarf für die Frostschutzberegnung

Die Frostschutzberegnung wird bei der Abschätzung des Wasserbedarfs der Landwirtschaft oftmals vernachlässigt. Insbesondere für Kern-, Stein- und Beerenobst, Wein, Erdbeeren und Frühkartoffeln stellt sie eine existenzielle Maßnahme zur Sicherung der Bestände und zur Reduzierung des Schadfrosttrisikos dar. Aufgrund des Klimawandels kommt es zu einem früheren Beginn der Vegetationsperiode und des Pflanzenwachstums (Janssen et al., 2017). Insbesondere Knospen, Blüten und Früchte von beispielsweise Äpfeln unterliegen damit einem erhöhten Risiko, durch Frost beschädigt zu werden, wodurch es von Ertragsverringerungen bis hin zu vollständigen Ausfällen kommen kann. In Hessen sind vor allem Kartoffeln, Erdbeeren, Beerenobst, Kern- und Steinobst sowie Wein bei der Frostschutzberegnung von Bedeutung.

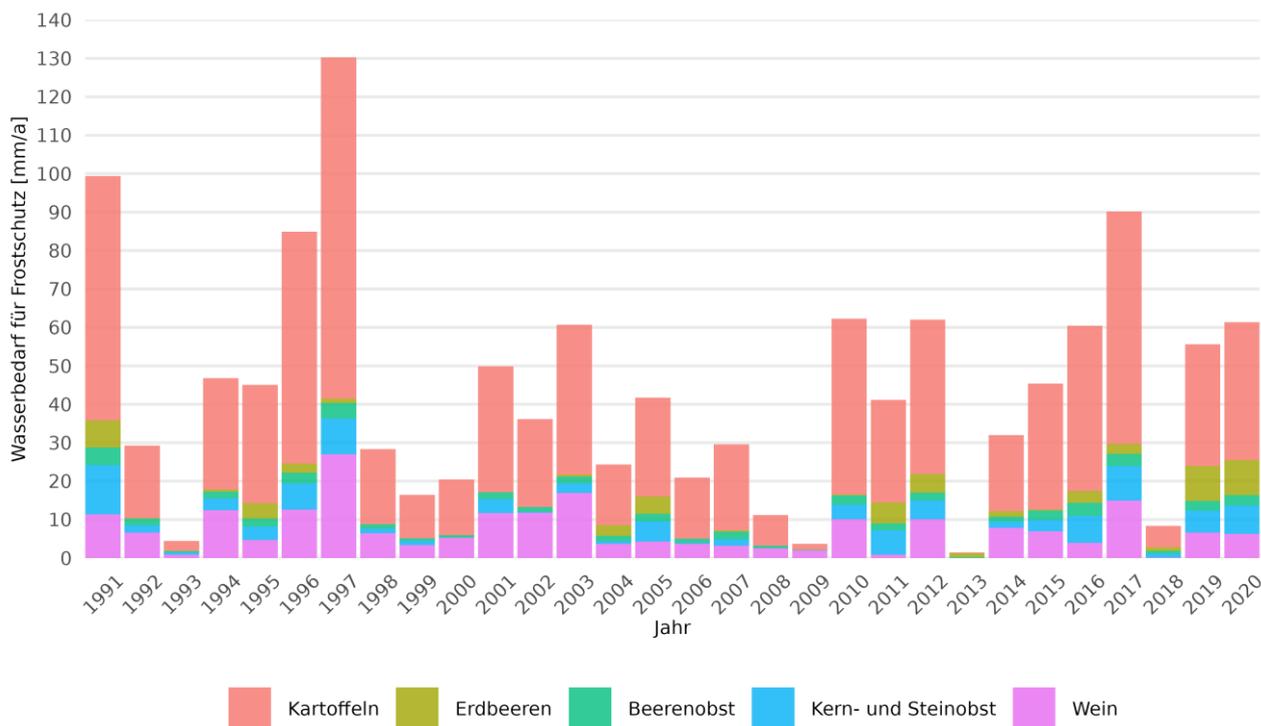
Der durchschnittliche Wasserbedarf für die Frostschutzberegnung der eben genannten Kulturen in Hessen für den Zeitraum 1991–2020 liegt bei 43,5 mm. In den einzelnen Jahren variiert der hessenweite Bedarf zwischen 1 mm (2013) und 130 mm (1997) (vgl. Abbildung 30).

Abbildung 30: Entwicklung des mittleren jährlichen Wasserbedarfs für Frostschutzberechnung im hessenweiten Durchschnitt von 1991 bis 2020



Quelle: Eigene Darstellung.

In Abbildung 31 sind die Bedarfe der einzelnen Kulturen für die Jahre 1991–2020 dargestellt. Den größten Anteil am Wasserbedarf für die Frostschutzberechnung haben die Kulturen Kartoffeln und Wein, gefolgt von Kern- und Steinobst. Erdbeeren und Beerenobst spielen mit einem sehr geringen durchschnittlichen Bedarf eine untergeordnete Rolle.

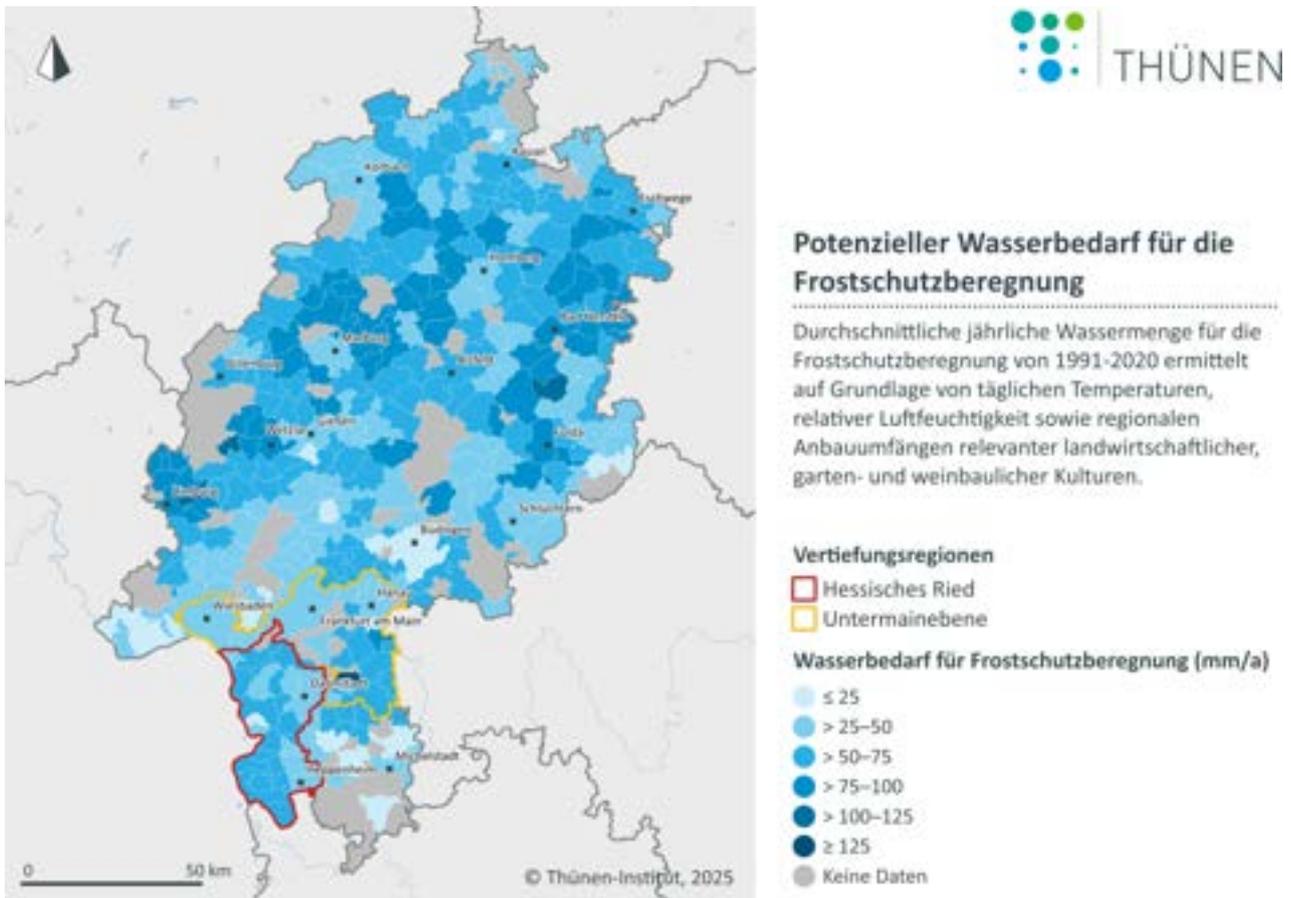
Abbildung 31: Jährlicher Wasserbedarf für die Frostschutzberechnung der einzelnen Kulturen in Hessen (1991–2020)

Quelle: Eigene Darstellung.

Insgesamt lässt sich gegen Ende des Zeitraums 1991–2020 ein leichter Anstieg im Wasserbedarf für die Frostschutzberechnung beobachten. Dies kann durch eine Verfrühung des Vegetationsbeginns bedingt sein, für Süß- und Sauerkirschen hat sich der Blühbeginn von 1961 bis 2005 um zehn Tage nach vorne geschoben und für Birnen sogar um 14 Tage (Chmielewski und Growing, 2013). Auch für die Zukunft wird eine weitere Verfrühung erwartet, wodurch trotz steigender Temperaturen eine Gefährdung beispielsweise zur Blütezeit durch Spätfröste besteht (Streitfert und Grünhage, 2009; Blümel und Chmielewski, 2013).

Neben der zeitlichen Variation sind auch räumliche Unterschiede im Wasserbedarf zu erkennen. In Abbildung 32 ist der durchschnittliche jährliche Wasserbedarf für Frostschutzberechnung über alle relevanten Kulturen auf Gemeindeebene abgebildet. Die regionale Verteilung wird dabei stark von den angebauten Kulturen geprägt (vgl. Abbildung 31). Besonders der Kartoffelanbau prägt die regionale Verteilung in Hessen und führt im Ergebnis zu mittleren (50–100 mm) bis hohen (100–125 mm) Wasserbedarfen vor allem in Nord- und Mittelhessen.

Abbildung 32: Mittlerer potenzieller Wasserbedarf für die Frostschutzberegnung bezogen auf die landwirtschaftlich genutzte Fläche je Gemeinde auf Grundlage von Klima-Observationsdaten (1991–2020)



Quelle: Eigene Darstellung.

6.2 Bewässerungswürdigkeit

6.2.1 Annahmen

Für die Berechnung der Bewässerungswürdigkeit werden einige vereinfachende Annahmen getroffen, um die Komplexität der Berechnungen zu verringern:

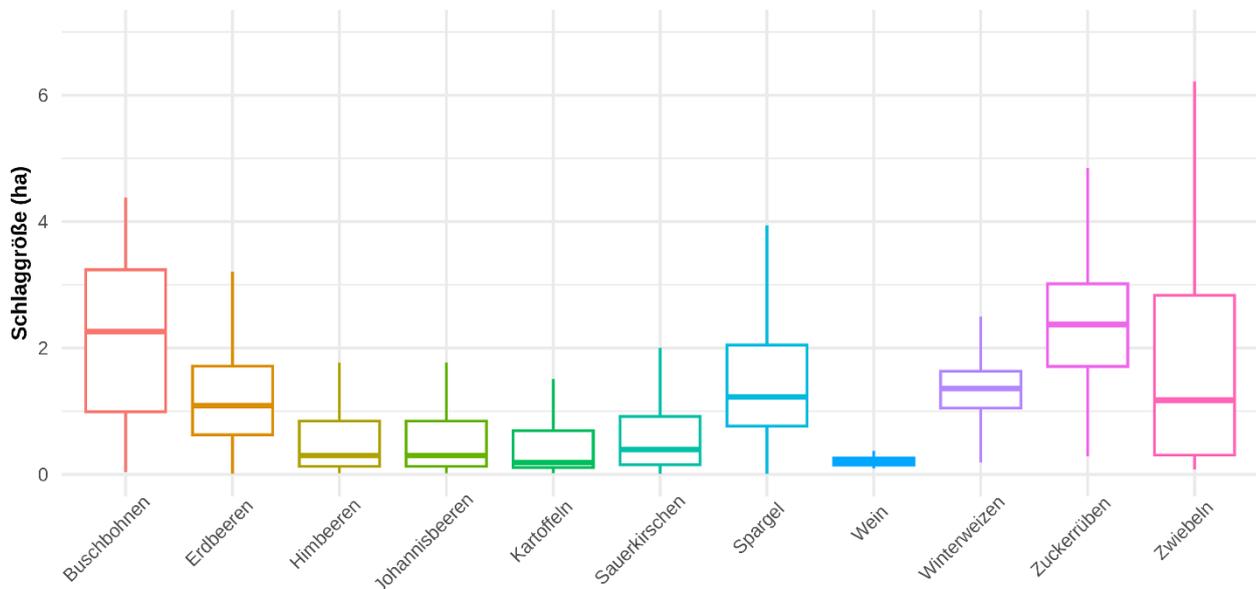
- Die durchschnittliche Entfernung von Hof zum Schlag beträgt 2 km.
- Die Betriebsgröße entspricht der durchschnittlichen Betriebsgröße (ohne Berücksichtigung des Betriebsortes) der Gemeinde.
- Die Schlaggrößen entsprechen den durchschnittlichen Schlaggrößen der Kultur in der jeweiligen Gemeinde.
- Die Wasserzuleitung erfolgt für jedes Feld über einen Kilometer.
- Bei Bezug des Beregnungswassers aus dem Grundwasser wird ein Brunnen pro Betrieb angenommen.
- Bei Bezug des Beregnungswassers aus einem Oberflächengewässer wird ein Bezugspunkt je Betrieb angenommen.
- Bei der Rohrberegnung werde zwei Aufstellungen pro Jahr unterstellt.
- Es werden elektrische Pumpen mit einer Förderleistung von 50 m³ für Grund- und Oberflächenwasser genutzt.
- Die Stromversorgung erfolgt über eine Leitungslänge von einem Kilometer.

- Die Feldgrößen werden in Klassen entsprechend der Auslegung der jeweiligen Bewässerungstechnologie eingeteilt.
- Bei mobilen Beregnungsmaschinen wird ein Hydrant alle 70 m entlang des Felds gebaut.
- Bei Linearberegnungsmaschinen wird die Anzahl der Hydranten pro Schlag durch die Schlauchlänge im Verhältnis zur Feldlänge bestimmt.
- Bei Kreisberegnungsmaschinen wird ein Hydrant in der Feldmitte gebaut.
- Für die Tropfbewässerung und Rohrberegnung wird jeweils ein Hydrant am Feldrand genutzt.
- Es wird ein Stundenlohn von 15 € unterstellt.
- Zwischen der Bewässerungsmenge und dem abgesicherten Ertrag besteht ein kulturspezifischer linearer Zusammenhang in Form der Wasserproduktivität (Albrecht et al., 2001; Schäfer et al., 1991; Fereres und Soriano, 2007).

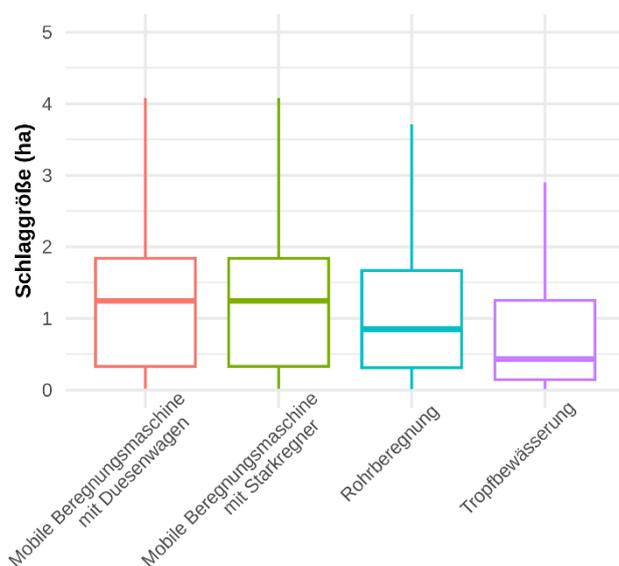
6.2.2 Ergebnisse

Die Betrachtung der Bewässerungswürdigkeit erfolgt über den Zeitraum 2010–2020 für ausgewählte Kulturen bzw. Kulturgruppen, ausgewählte Bewässerungstechnologien und die Wasserherkünfte Grundwasser, Oberflächenwasser und Bezug über einen Verband und basierend auf den modellierten potenziellen bzw. regionalen Bewässerungsbedarfen aus Kapitel 6.1. Für jede Kultur wird die Bewässerungswürdigkeit unter Berücksichtigung der Vollkosten (langfristige Bewässerungswürdigkeit) und der variablen Kosten (kurzfristige Bewässerungswürdigkeit) ermittelt.

Nicht jede Technologie eignet sich für die Bewässerung aller Kulturen, so werden für jede Kultur nur die Technologien dargestellt, die auch in der Praxis genutzt werden. Die Bewässerungstechnologien Linear- und Kreisberegnung werden nicht berücksichtigt, da die Feldgrößen in Hessen für diese Technologien zu kleinstrukturiert sind. Einen Überblick der Kombinationen gibt Tabelle 2. Die Berechnung der Bewässerungswürdigkeit ist basierend auf den durchschnittlichen Strukturen der einzelnen Gemeinden in Hessen erfolgt. Die Strukturen werden charakterisiert durch die durchschnittlichen Schlaggrößen der einzelnen Kulturen basierend auf den InVeKoS-Landnutzungsdaten und als bewässerte Gesamtfläche eines Betriebs werden Informationen aus der Landwirtschaftszählung 2010 verwendet (Hessisches Statistisches Landesamt, 2012). Die kleinräumige Struktur in Hessen zeigt sich auch in der Verteilung der durchschnittlichen Schlaggrößen, welche in Abbildung 33 für die einzelnen Kulturen und in Abbildung 34 für die Bewässerungstechnologien abgebildet ist. Über alle Kulturen liegt die durchschnittliche Schlaggröße bei 1,3 ha, Buschbohnen, Spargel, Winterweizen und Zuckerrüben weisen höhere durchschnittliche Schlaggrößen auf. Die Bewässerungstechnologien weisen unterschiedliche maximal bewässerbare Schlaggrößen auf, diese liegt für die Tropfbewässerung bei 5 ha und bei den anderen Technologien bei bis zu 20 ha.

Abbildung 33: Verteilung der durchschnittlichen Schlaggrößen für die Kulturen

Quelle: Eigene Darstellung.

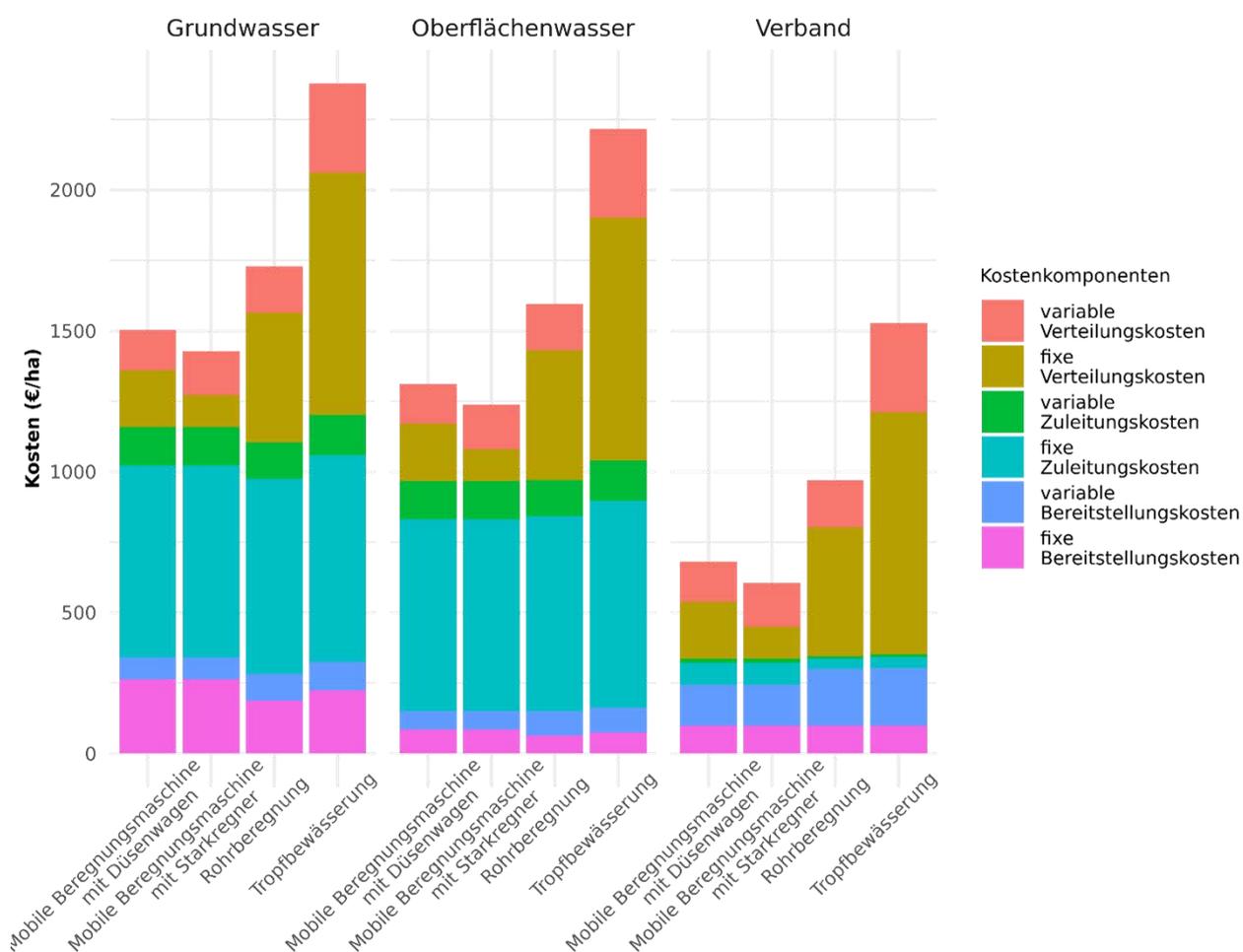
Abbildung 34: Verteilung der durchschnittlichen Schlaggrößen für die Bewässerungstechnologien

Quelle: Eigene Darstellung.

Für Hessen liegen die Spannweite der Bewässerungskosten von 2010 bis 2020 über alle Kulturen, Bewässerungstechnologien und Wasserherkünften zwischen 166 €/ha und 4.680 €/ha, in Abhängigkeit von der Bewässerungsmenge, der Wasserherkunft und der Bewässerungstechnologie. Abbildung 35 zeigt die durchschnittlichen Bewässerungskosten für die verschiedenen Bewässerungstechnologien und die Wasserherkünften. Mobile Beregnungsmaschinen weisen die geringsten Verteilungskosten auf, mit Starkregnern sind Kosten mit 260 €/ha noch geringer als in Kombination mit einem Düsenwagen. Die höchsten Verteilungskosten fallen bei der Tropfbewässerung mit 1.177 €/ha an, wobei die fixen Kosten mit 860 €/ha den größeren Teil ausmachen. Mit Rohrberegnung kostet die Bewässerung 625 €/ha. Die Zuleitungskosten liegen für

den Bezug aus Grundwasser oder Oberflächengewässern bei über 800 €/ha, dabei machen die fixen Kosten mit gut 89 % den größten Teil aus. Bei dem Wasserbezug über einen Verband sind die Zuleitungskosten mit unter 100 €/ha am geringsten, da angenommen wird, dass die Infrastruktur bis zum Feld zum Verband gehört und somit nur Kosten für weitere Hydranten und Leitungen zwischen diesen anfallen. Im Vergleich der Bereitstellungskosten ist Oberflächenwasser am günstigsten und Grundwasser am teuersten. Insgesamt ist die Beregnung mit einer Beregnungsmaschine mit Starkregner über alle Wasserherkünfte am günstigsten und Tropfbewässerung am kostspieligsten.

Abbildung 35: Durchschnittliche Kosten in Abhängigkeit von Bewässerungstechnologie und Wasserherkunft für Hessen (2010–2020)



Quelle: Eigene Berechnungen.

Während die Kosten vor allem von der Struktur und Bewässerungsmenge beeinflusst werden, sind Preis, abgesicherter Ertrag und der sich daraus ergebende abgesicherte Mehrerlös kulturspezifisch, sodass die weitere Betrachtung für die einzelnen Kulturen erfolgt.

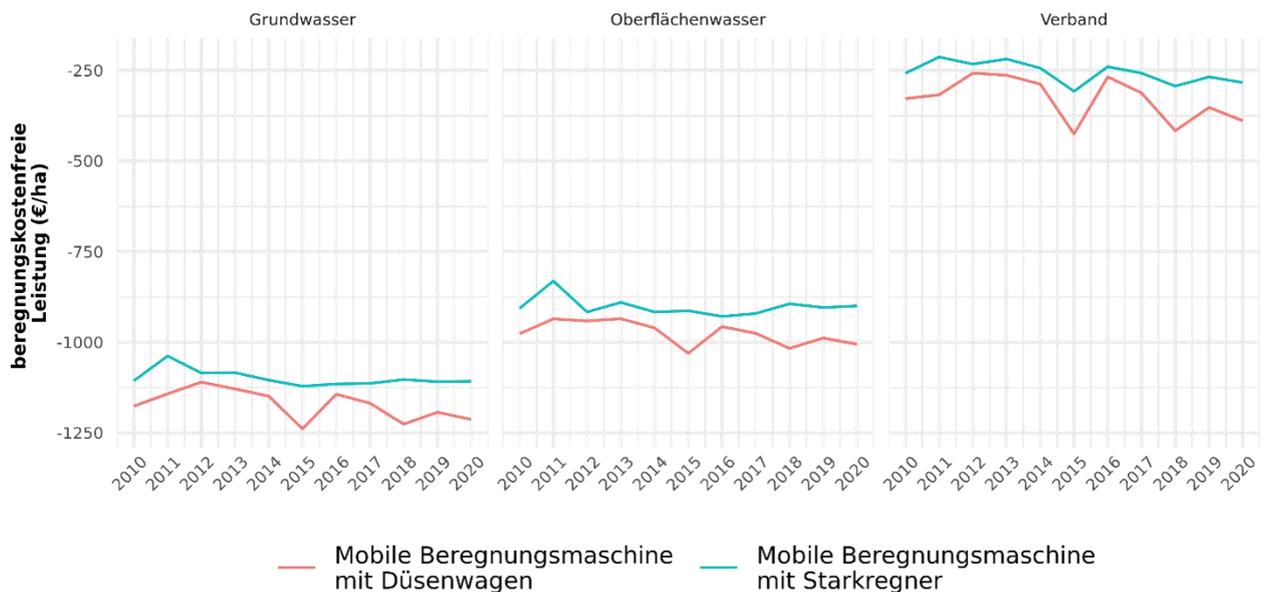
Winterweizen

Der modellierte potenzielle Bewässerungsbedarf für Winterweizen 2010–2020 liegt bei durchschnittlich 49 mm und variiert zwischen 0 und 153 mm. Der durch diese Bewässerungsmenge abgesicherte, geschätzte Mehrertrag

beträgt bis zu 31,5 dt/ha und die Mehrerlöse liegen, unter Berücksichtigung von jährlichen Preisen, zwischen 14,4 €/dt und 22,1 €/dt. Dadurch ergibt sich ein Mehrerlös von durchschnittlich 183 €/ha.

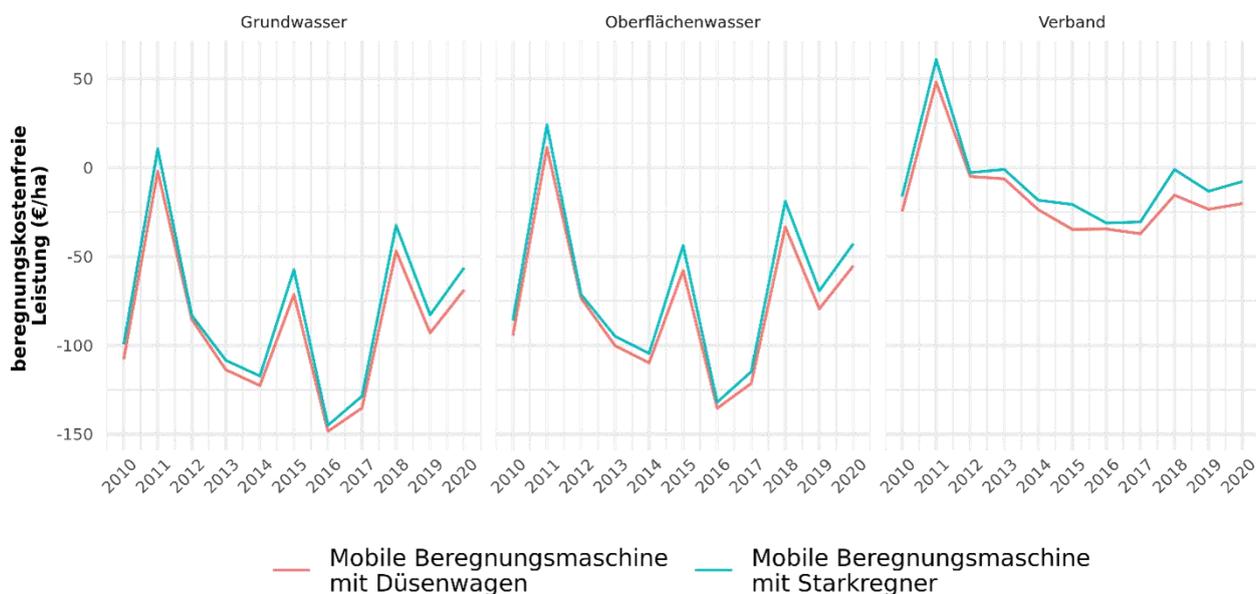
Die Bewässerungswürdigkeit unter Vollkosten für die verschiedenen Wasserherkünfte und Bewässerungstechnologien ist in Abbildung 36 dargestellt. Die Bewässerung von Winterweizen ist in Hessen unter Vollkosten offensichtlich in keinem Fall wirtschaftlich.

Abbildung 36: Durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Winterweizen in Hessen unter Vollkosten (2010–2020)



Quelle: Eigene Berechnungen.

Betrachtet man nur die variablen Kosten, ist die beregungskostenfreie Leistung zwar höher, aber nur selten ist Bewässerung rentabel (vgl. Abbildung 37). Lediglich im Hochpreisjahr 2011 ist sie beim Bezug des Bewässerungswassers über einen Verband positiv.

Abbildung 37: Durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Winterweizen in Hessen unter variablen Kosten (2010–2020)

Ermittelt man die oben gezeigten Verläufe für die beregungskostenfreie Leistung, erhält man einen Eindruck von der regionalen Bewässerungswürdigkeit der einzelnen Kulturen. Diese ist regional unterschiedlich, da wesentliche Kosten- und Erlöspositionen von agrarstrukturellen Gegebenheiten (z. B. Schlaggröße) und vom Standort (z. B. Bewässerungsbedarf, Erträge) abhängen. Insofern ist es naheliegend, dass sich die Wirtschaftlichkeit der Bewässerung einzelner Kulturen räumlich unterscheidet.

In der Abbildung 38 ist unter anderem die kurzfristige Bewässerungswürdigkeit für die Bewässerung mit einer mobilen Beregnungsmaschine mit Starkregner dargestellt. Westlich der Vertiefungsregion Untermainebene, im westlichen Teil des Hessischen Rieds sowie mittig und nördlich im Regierungsbezirk Kassel lassen sich die Gemeinden verorten, in denen die Bewässerung von Winterweizen kurzfristig wirtschaftlich ist.

Beim Vergleich mit der Bewässerung mittels einer mobilen Beregnungsmaschine mit Düsenwagen zeigt sich eine ähnliche räumliche Verteilung der Gemeinden, in denen die Bewässerung von Winterweizen zumindest kurzfristig bewässerungswürdig ist. Es ist nur aufgrund der vergleichsweise hohen fixen Kosten dieser Technologie in weniger Gemeinden eine Bewässerungswürdigkeit von Winterweizen gegeben (vgl. Abbildung 39). Vor allem im Norden des Regierungsbezirks Darmstadt sinkt die variable beregungskostenfreie Leistung in den negativen und unwirtschaftlichen Bereich.

Abbildung 38: Regionale Bewässerungswürdigkeit von Winterweizen unter variablen Kosten bei Bewässerung mit einer mobilen Beregnungsmaschine mit Starkregner

Bewässerungswürdigkeit von Winterweizen

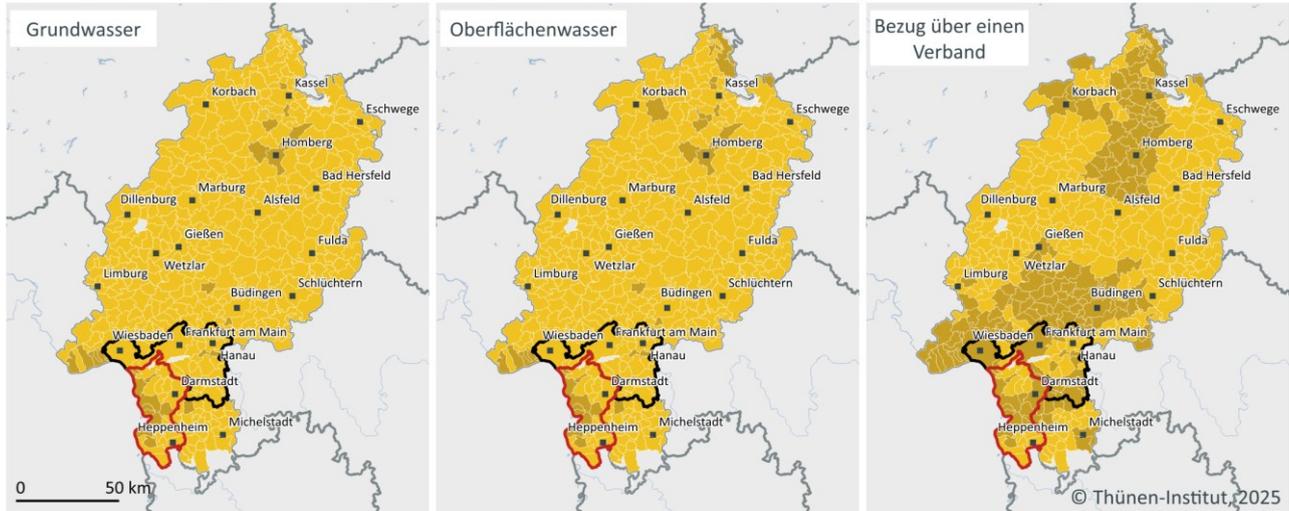


Durchschnittliche Variable Beregnungskostenfreie Leistung für Winterweizen bei der Bewässerung mit einer mobilen Beregnungsmaschine mit Starkregner (2010–2020)

Variable Beregnungskostenfreie Leistung (€/ha)

Vertiefungsregionen

- < 0 ● ≥ 0 - 999 ● > 999 - 1.999 ● > 1.999 - 2.999 ● > 2.999 ● Keine Daten
- Hessisches Ried □ Untermainebene



Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 39: Regionale Bewässerungswürdigkeit von Winterweizen unter variablen Kosten bei Bewässerung mit einer mobilen Beregnungsmaschine mit Düsenwagen

Bewässerungswürdigkeit von Winterweizen

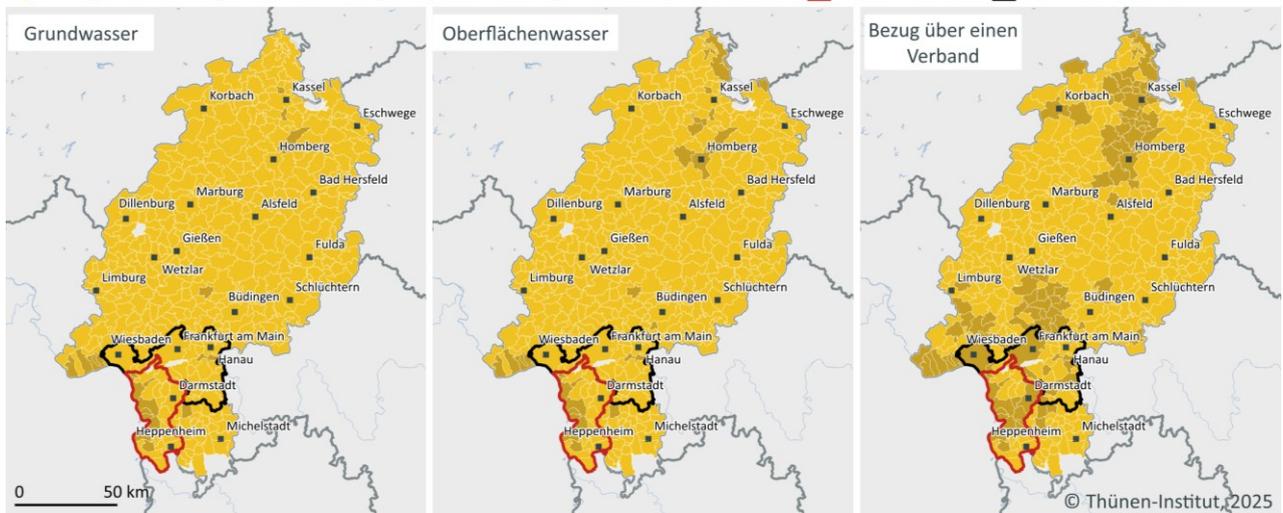


Durchschnittliche Variable Beregnungskostenfreie Leistung für Winterweizen bei der Bewässerung mit einer mobilen Beregnungsmaschine mit Düsenwagen (2010–2020)

Variable Beregnungskostenfreie Leistung (€/ha)

Vertiefungsregionen

- < 0 ● ≥ 0 - 999 ● > 999 - 1.999 ● > 1.999 - 2.999 ● > 2.999 ● Keine Daten
- Hessisches Ried □ Untermainebene



Quelle: Eigene Berechnungen.

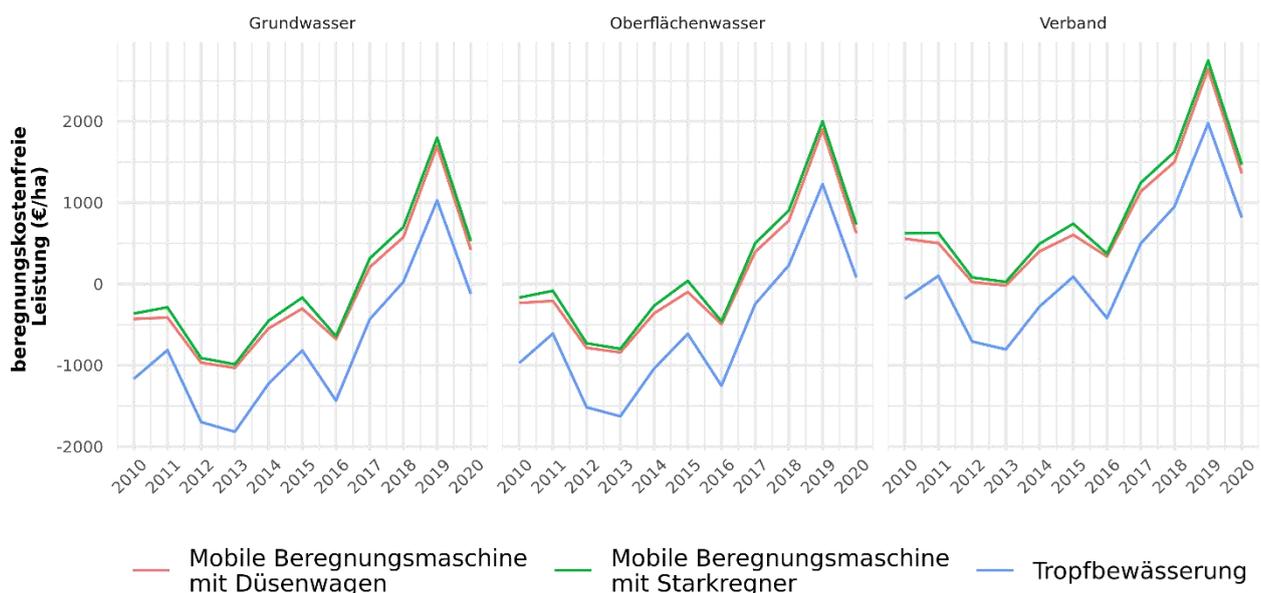
Kartoffeln

Die Bewässerung von Kartoffeln ist wirtschaftlich hingegen deutlich interessanter. Die Bewässerungsmenge für Kartoffeln 2010–2020 liegt bei durchschnittlich 94 mm und variiert zwischen 7 und 188 mm. Der durch diese

Bewässerungsmenge abgesicherte Mehrertrag liegt zwischen 7,6 und 235,7 dt/ha und die Mehrerlöse liegen, unter Berücksichtigung von jährlichen Preisen, zwischen 11,4 €/dt und 31,3 €/dt, wodurch sich ein Mehrerlös von durchschnittlich 1.855 €/ha ergibt.

Die durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Kartoffeln (2010–2020) unter Vollkosten ist in Abbildung 40 dargestellt. Beim Bezug des Wassers über einen Verband und der Bewässerung mit mobilen Beregnungsmaschinen ist die beregnungskostenfreie Leistung über den gesamten betrachteten Zeitraum positiv, nur bei der Bewässerung mit Tropfbewässerung erst ab Mitte der Dekade. Bei der Verwendung von Grund- oder Oberflächenwasser ist eine Bewässerungswürdigkeit erst ab 2017 gegeben. Insgesamt ist von 2016 bis 2019 ein steigender Trend in der Bewässerungswürdigkeit zu erkennen.

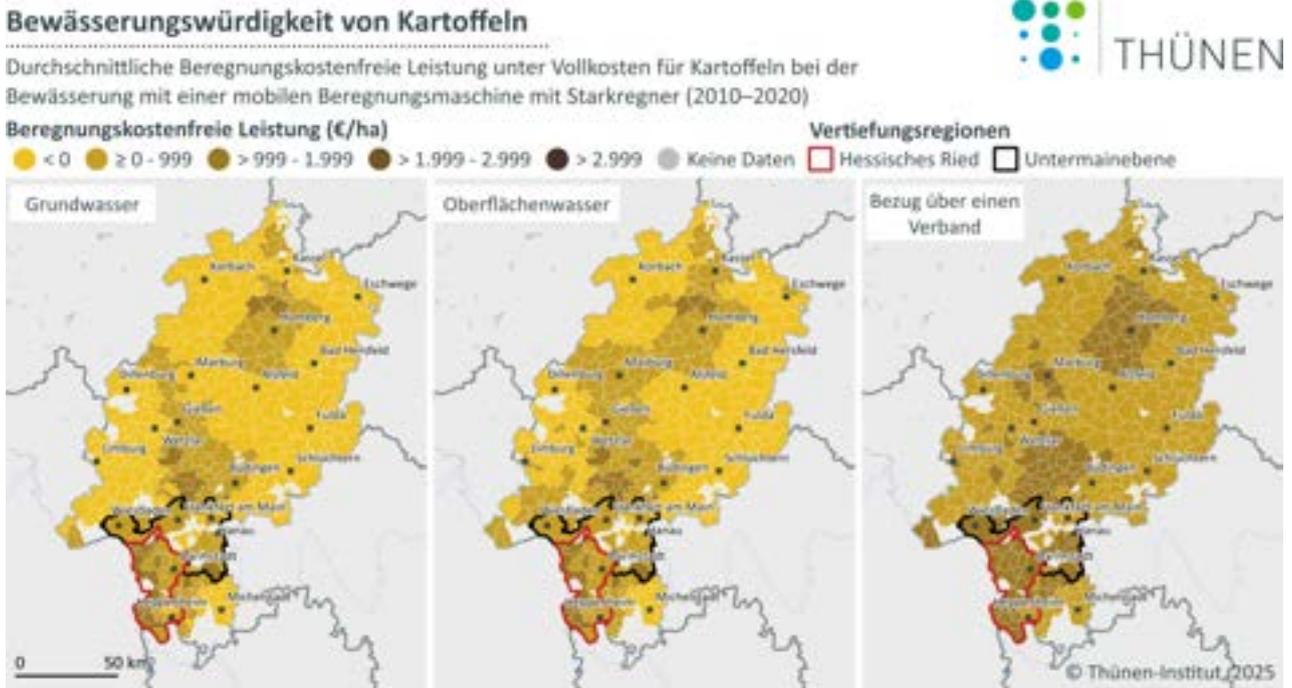
Abbildung 40: Durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Kartoffeln in Hessen unter Vollkosten (2010–2020)



Bei der regionalen Betrachtung der durchschnittlichen langfristigen Bewässerungswürdigkeit auf Gemeindeebene zeigt sich, dass die Bewässerung mit Wasser, welches über einen Verband bezogen wird, in Kombination mit mobilen Beregnungsmaschinen mit Starkregner oder Düsenwagen in allen Gemeinden positiv und damit wirtschaftlich ist (vgl. Abbildung 41 und Abbildung 42). In einigen Gemeinden im Hessischen Ried, nördlich davon und mittig im Regierungsbezirk Kassel erreicht die beregnungskostenfreie Leistung Werte über 999 €/ha. Bei der Bewässerung mittels Tropfbewässerung und Wasserbezug über einen Verband ist die Bewässerung von Kartoffeln in Gemeinden in östlichen und westlichen Bereichen der Regierungsbezirke Kassel und Gießen sowie im Südosten des Regierungsbezirks langfristig nicht wirtschaftlich (vgl. Abbildung 43). Bei der Nutzung von Oberflächen- oder Grundwasser ist die Bewässerung von Kartoffeln mit mobilen Beregnungsmaschinen im Hessischen Ried und der Untermainebene wirtschaftlich, nur bei Tropfbewässerung in mehreren Gemeinden im östlichen und südöstlichen Bereich des Hessischen Rieds und der Untermainebene nicht wirtschaftlich. Weitere bewässerungswürdige Gebiete liegen mittig in den Regierungsbezirken Kassel und Gießen und im nordwestlichen Bereich des Regierungsbezirks Gießen. Bei Oberflächenwasser sind diese Gebiete kleiner als bei Grundwasser und die Nutzung von Tropfbewässerung lässt diese weiterschrumpfen.

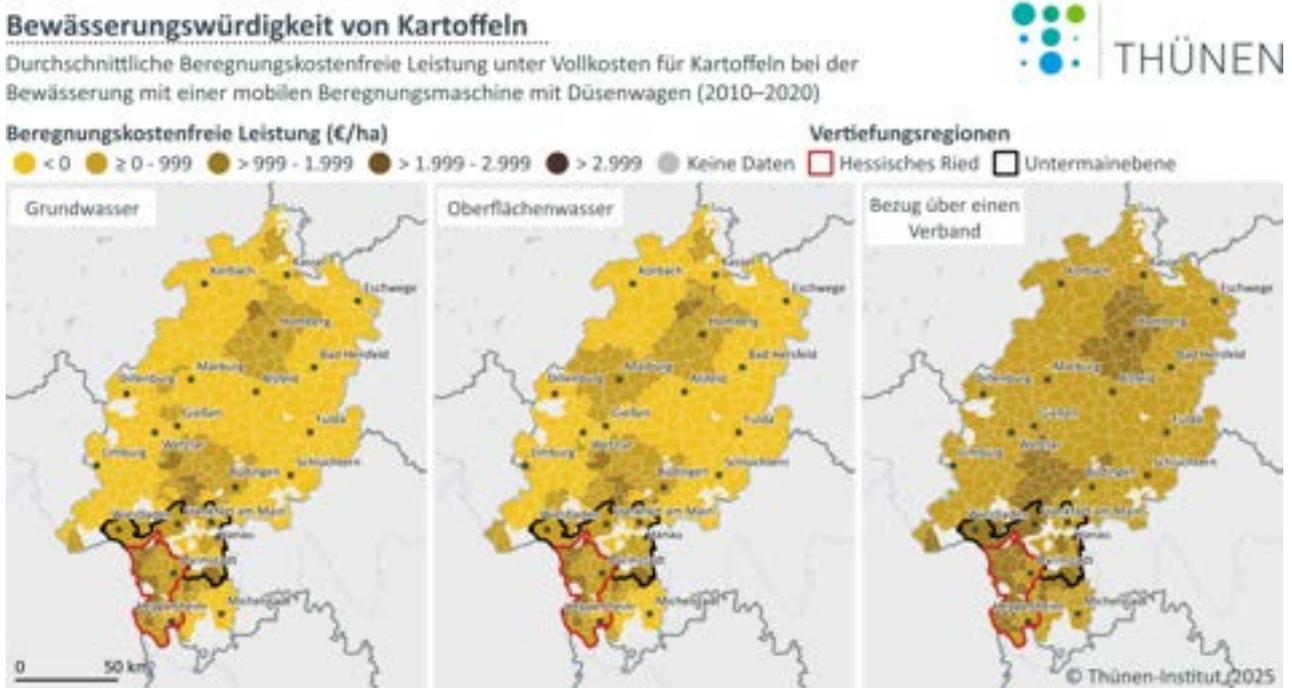
Bei der kurzfristigen Bewässerungswürdigkeit von Kartoffeln unter Betrachtung der variablen beregnungskostenfreien Leistung zeigt sich, dass diese über alle Wasserherkünfte und Bewässerungstechnologien positiv ist (vgl. Abbildung 44). Dies gilt auch auf regionaler Ebene, es unterscheiden sich nur die Höhen der variablen beregnungskostenfreien Leistungen der einzelnen Gemeinden.

Abbildung 41: Bewässerungswürdigkeit von Kartoffeln unter Vollkosten bei Bewässerung mit mobiler Beregnungsmaschine mit Starkregner



Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 42: Bewässerungswürdigkeit von Kartoffeln unter Vollkosten bei Bewässerung mit mobiler Beregnungsmaschine mit Düsenwagen



Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 43: Bewässerungswürdigkeit von Kartoffeln unter Vollkosten bei Bewässerung mit Tropfbewässerung

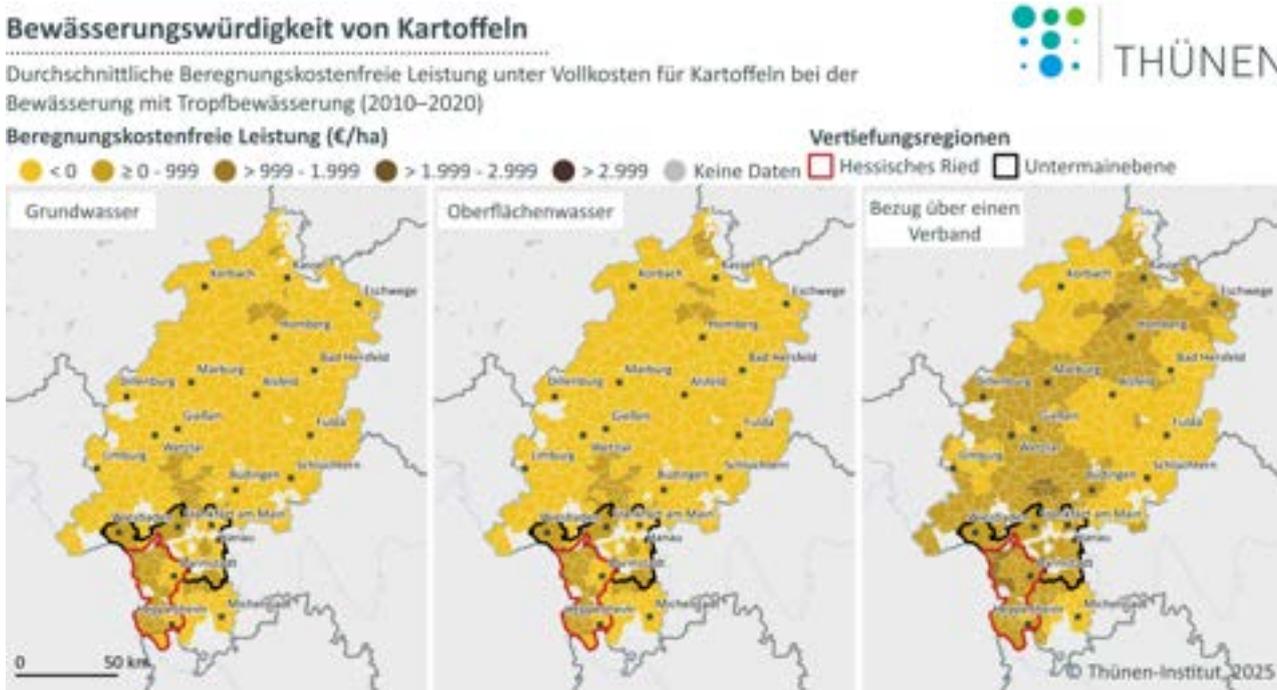
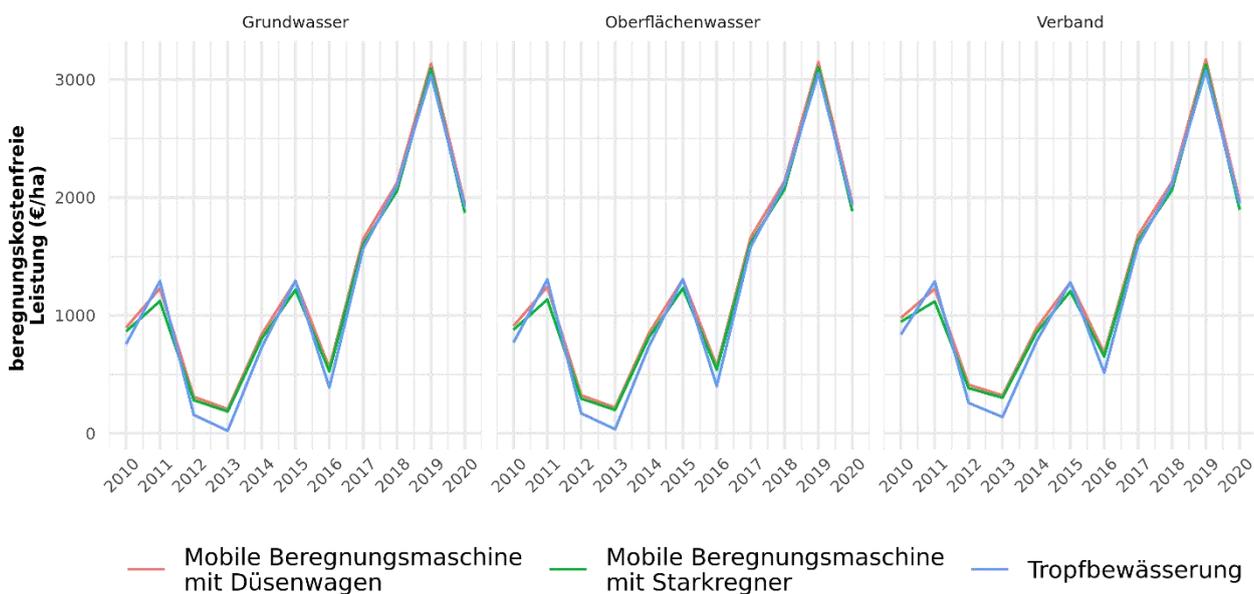


Abbildung 44: Durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Kartoffeln unter variablen Kosten (2010–2020)



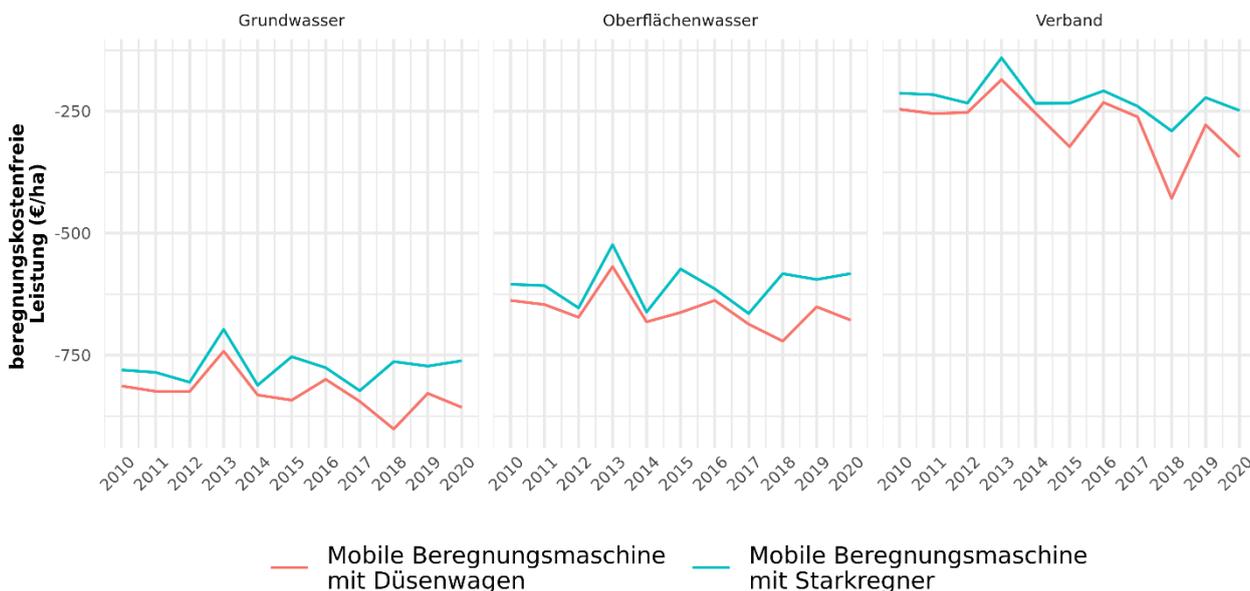
Zuckerrüben

Die Bewässerungsmenge für Zuckerrüben 2010–2020 liegt bei durchschnittlich 35 mm und variiert zwischen 0 mm und 232 mm. Der durch diese Bewässerungsmenge abgesicherte Mehrertrag liegt zwischen 0 und 259,4 dt/ha und die Mehrerlöse liegen, unter Berücksichtigung von jährlichen Preisen, zwischen 2,6 €/dt und 5 €/dt. Daraus ergibt sich ein Mehrerlös von durchschnittlich 752 €/ha.

Die langfristige durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit unter Betrachtung von Vollkosten für Hessen ist bei allen Kombinationen aus Wasserquellen und genutzten Bewässerungstechnologien negativ, wie in Abbildung 45 dargestellt. Im Vergleich der Bewässerungstechnologien fällt das Ergebnis für mobile Beregnungsmaschinen etwas positiver aus, bleibt aber unwirtschaftlich. Bei den Wasserherkünften liefert der Wasserbezug über einen Verband das beste Ergebnis, gefolgt von Oberflächenwasser. In den wirtschaftlichen Bereich schafft es keine der Kombinationen, auch nicht bei der regionalen Betrachtung auf Gemeindeebene.

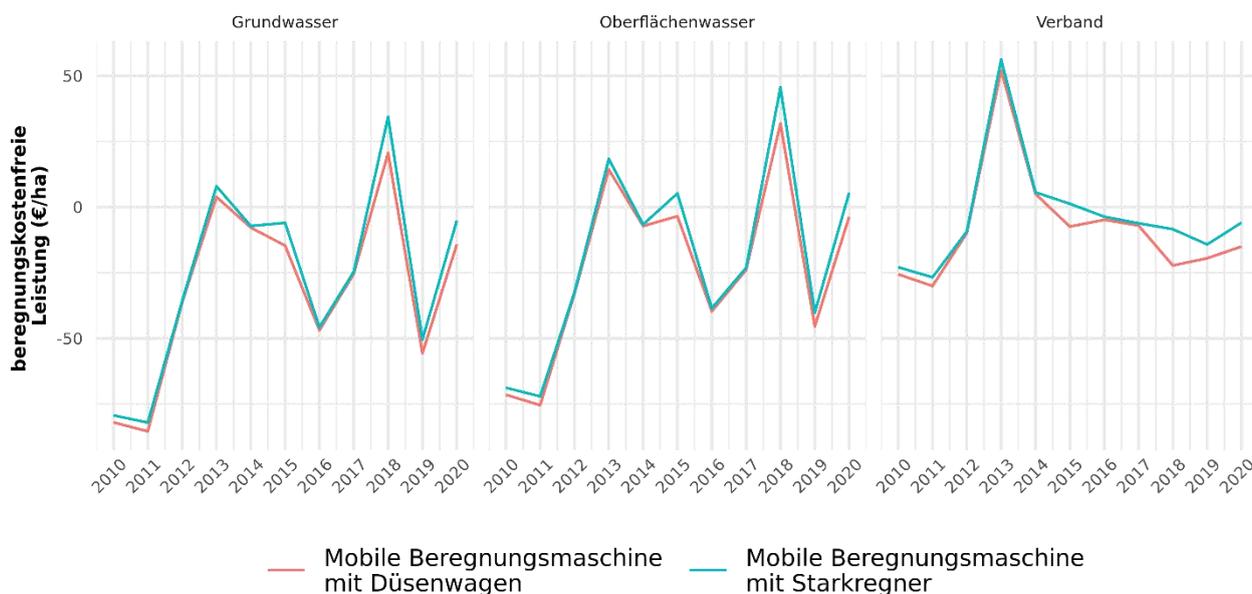
Bei Betrachtung der variablen beregnungskostenfreien Leistung (vgl. Abbildung 46), die eine kurzfristige Aussage zur Wirtschaftlichkeit ermöglicht, ändert sich das Bild und in einzelnen Jahren ist eine Bewässerungswürdigkeit gegeben. Insgesamt schwanken die variablen beregnungskostenfreien Leistungen für Zuckerrüben relativ eng um den Grenzwert von Null, liegen im Durchschnitt aber darunter. Bei einer solchen Nähe zur Wirtschaftlichkeit kann sich in Abhängigkeit von Standort und Betriebsstrukturen eine Bewässerung von Zuckerrüben in der kurzfristigen Betrachtung durchaus lohnen. Dies zeigt sich auch in den regionalen Darstellungen auf Gemeindeebene in Abbildung 47 und Abbildung 48. Für alle Kombinationen von Bewässerungstechnologien und Wasserherkünften gibt es im Hessischen Ried und mittig im Regierungsbezirk Gießen größere Gebiete mit Gemeinden, in denen die Bewässerung von Zuckerrüben kurzfristig wirtschaftlich ist. Zudem gibt es im Regierungsbezirk Gießen weitere Gemeinden mit einer kurzfristigen Bewässerungswürdigkeit, bei der Bewässerung mit einer mobilen Beregnungsmaschine mit Starkregner und Wasserbezug über einen Verband ist die Anzahl der Gemeinden mit einer Bewässerungswürdigkeit für Zuckerrüben deutlich größer.

Abbildung 45: Durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Zuckerrüben in Hessen unter Vollkosten (2010–2020)



Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 46: Durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Zuckerrüben unter variablen Kosten (2010–2020)



Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 47: Regionale Bewässerungswürdigkeit von Zuckerrüben unter variablen Kosten bei Bewässerung mit einer mobilen Beregnungsmaschine mit Starkregner

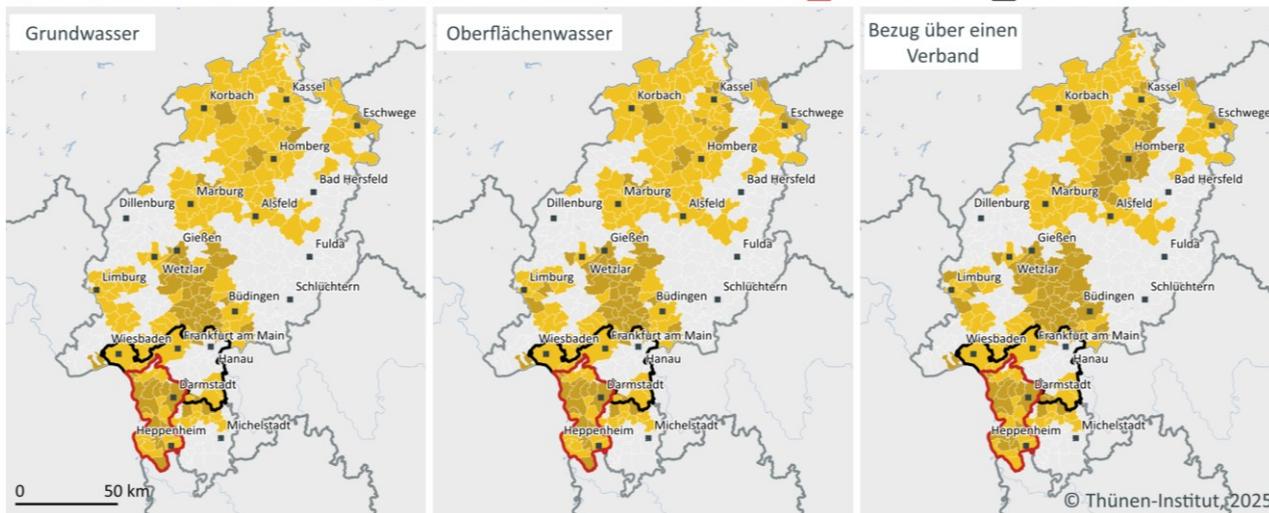
Bewässerungswürdigkeit von Zuckerrüben



Durchschnittliche Variable Beregnungskostenfreie Leistung für Zuckerrüben bei der Bewässerung mit einer mobilen Beregnungsmaschine mit Starkregner (2010–2020)

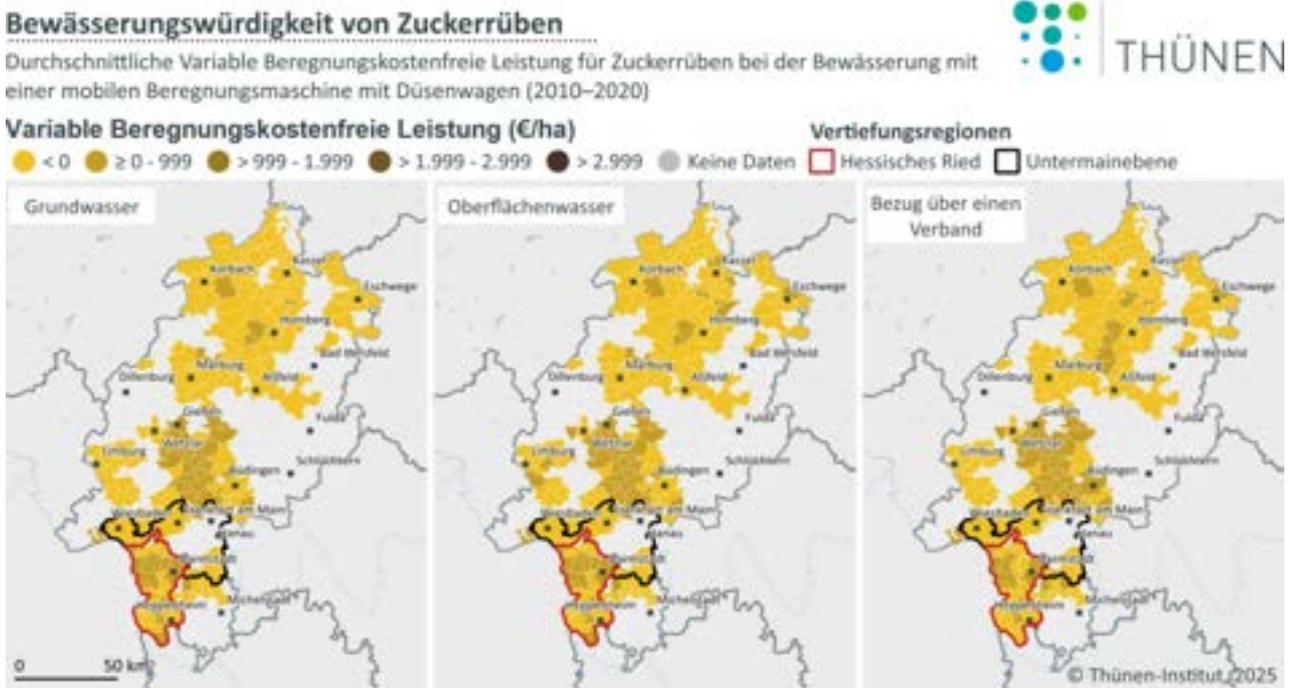
Variable Beregnungskostenfreie Leistung (€/ha)

● < 0
 ● ≥ 0 - 999
 ● > 999 - 1.999
 ● > 1.999 - 2.999
 ● > 2.999
 ● Keine Daten
 Hessisches Ried
 Untermainebene



Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 48: Regionale Bewässerungswürdigkeit von Zuckerrüben unter variablen Kosten bei Bewässerung mit einer mobilen Beregnungsmaschine mit Düsenwagen



Quelle: Eigene Berechnungen.

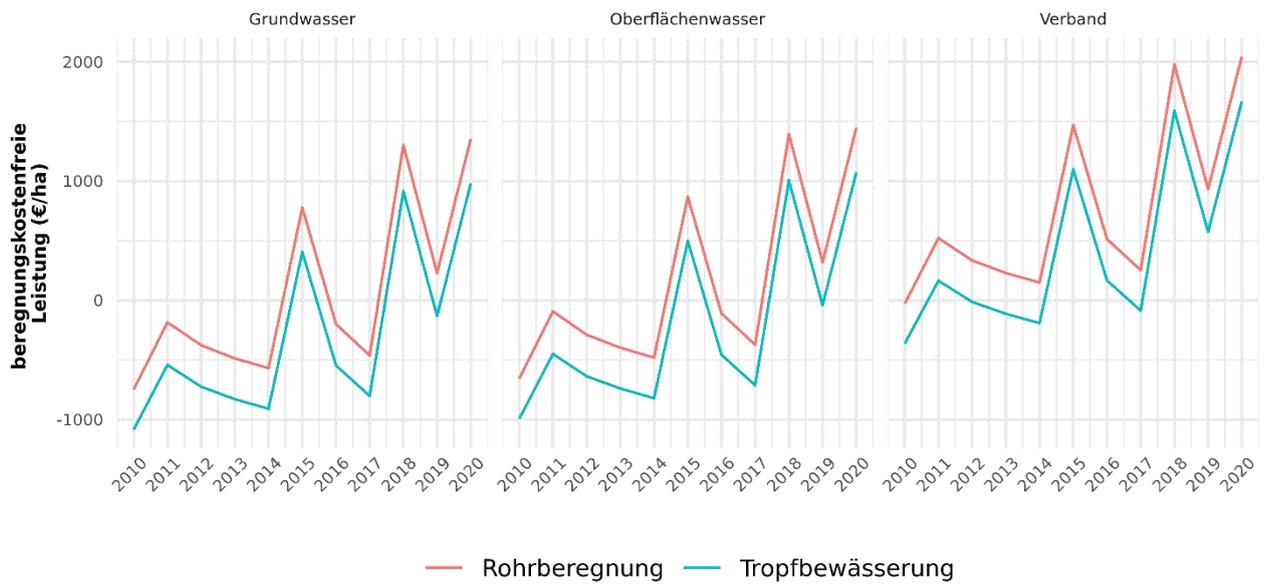
Spargel

Die Bewässerungsmenge für Spargel 2010–2020 liegt bei durchschnittlich 28 mm und variiert zwischen 0 mm und 84 mm. Der durch diese Bewässerungsmenge abgesicherte Mehrertrag liegt zwischen 0 und 10,5 dt/ha und die Mehrerlöse liegen, unter Berücksichtigung von jährlichen Preisen, zwischen 357,9 €/dt und 527,5 €/dt, wodurch sich ein Mehrerlös von durchschnittlich 1.523 €/ha ergibt.

Bei der durchschnittlichen langfristigen Bewässerungswürdigkeit von Spargel in Hessen zeigt sich über den betrachteten Zeitraum ein steigender Trend, wenn auch mit ausgeprägten Schwankungen (vgl. Abbildung 49). Beim Bezug von Bewässerungswasser über einen Verband ist die Bewässerung mit Rohrberegnung in allen Jahren wirtschaftlich und mit Tropfbewässerung ab 2017 und vorher in einzelnen Jahren. Bei Grund- und Oberflächenwasser ist eine Bewässerungswürdigkeit ab 2017 sowohl für Rohrberegnung als auch Tropfbewässerung gegeben. Bei der regionalen Betrachtung auf Gemeindeebene ist die Bewässerungswürdigkeit von Spargel vor allem im Hessischen Ried gegeben (vgl. Abbildung 50 und Abbildung 51). Bei der Rohrberegnung ist Spargel auch in weiteren Gemeinden im Regierungsbezirk Darmstadt bewässerungswürdig, beim Bezug des Wassers über einen Verband auch in weiteren Gemeinden in den Regierungsbezirken Gießen und Kassel.

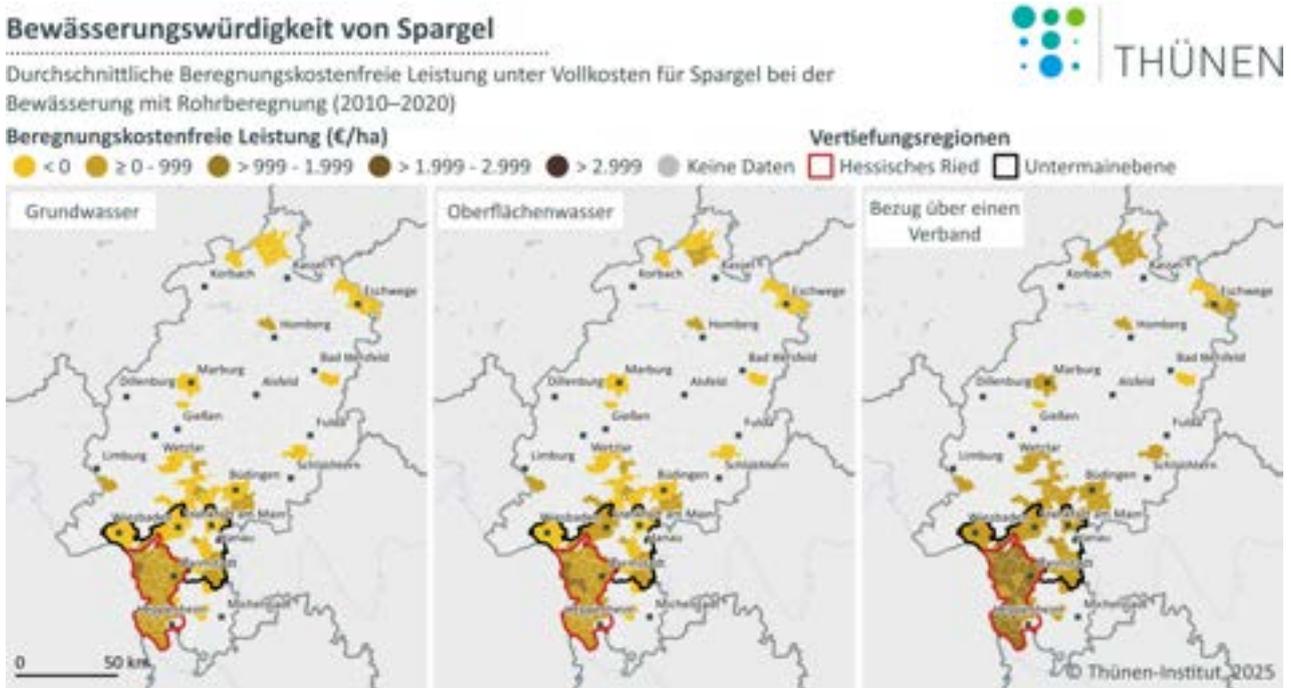
In Abbildung 52 ist die durchschnittliche kurzfristige Bewässerungswürdigkeit von Spargel in Hessen dargestellt. Es zeigt sich, dass die Bewässerung von Spargel ohne Berücksichtigung von fixen Kosten über den gesamten Zeitraum wirtschaftlich ist. Das Bild spiegelt sich auch bei der regionalen Betrachtung wider und die variable beregnungskostenfreie Leistung liegt in sämtlichen Gemeinden für alle Bewässerungstechnologien und Wasserherkünften deutlich über dem Grenzwert von Null.

Abbildung 49: Durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Spargel in Hessen unter Vollkosten (2010–2020)



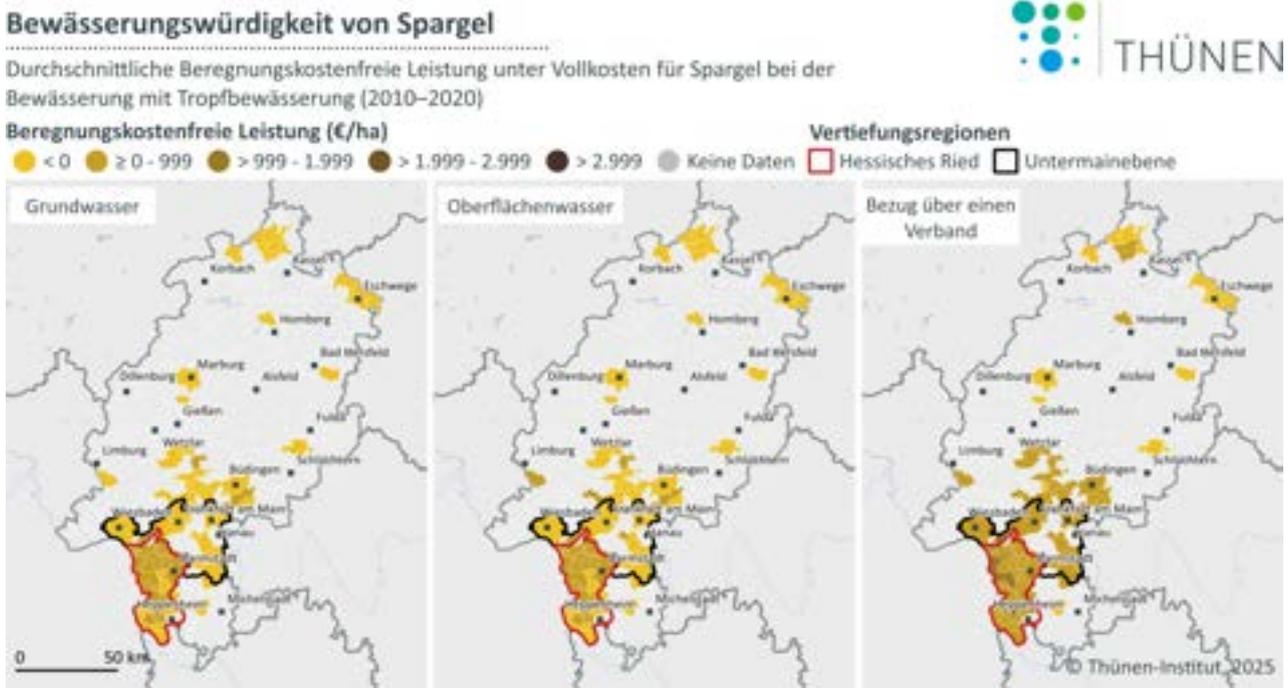
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 50: Regionale Bewässerungswürdigkeit von Spargel unter Vollkosten bei Bewässerung mit Rohrbergnug



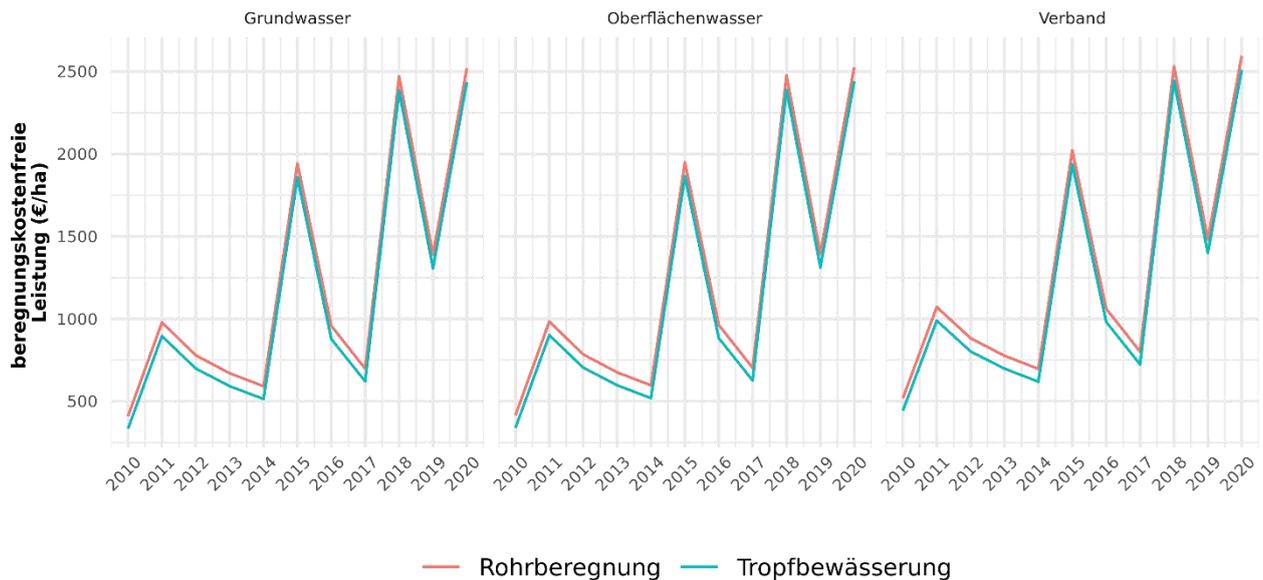
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 51: Regionale Bewässerungswürdigkeit von Spargel unter Vollkosten bei Bewässerung mit Tropfbewässerung



Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 52: Durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Spargel unter variablen Kosten (2010–2020)



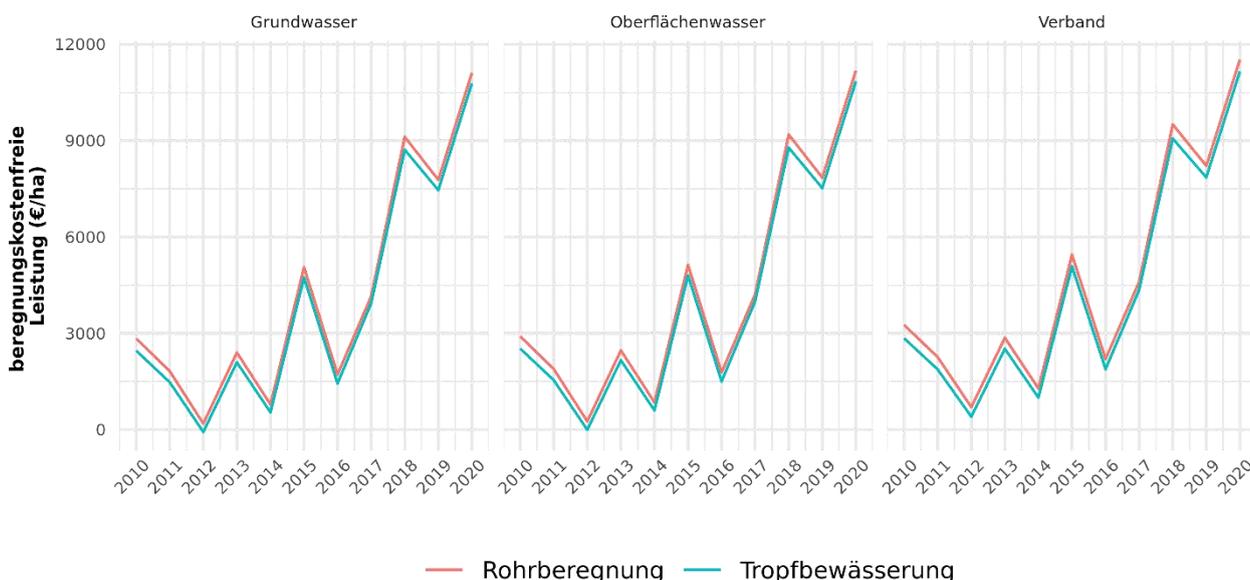
Quelle: Eigene Berechnungen.

Buschbohnen

Die Bewässerungsmenge für Buschbohnen 2010–2020 liegt bei durchschnittlich 97 mm und variiert zwischen 10 mm und 188 mm. Der durch diese Bewässerungsmenge abgesicherte Mehrertrag liegt zwischen 7,6 und 235,7 dt/ha und die Mehrerlöse liegen, unter Berücksichtigung von jährlichen Preisen, zwischen 85,8 €/dt und 271,4 €/dt. Daraus resultiert ein Mehrerlös von durchschnittlich 5.691 €/ha.

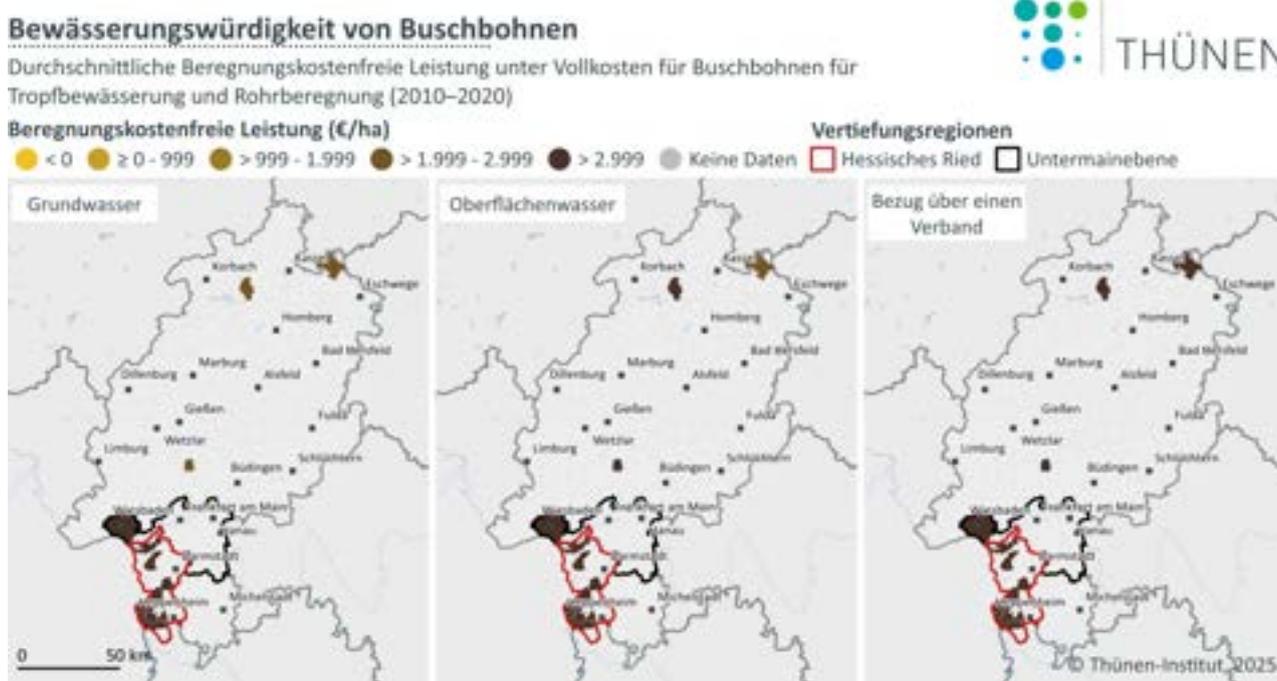
Bei der durchschnittlichen langfristigen Bewässerungswürdigkeit zeigt sich über den betrachteten Zeitraum insgesamt ein steigender Trend, wenn auch mit leichten Schwankungen (vgl. Abbildung 53). Eine Bewässerungswürdigkeit ist in allen Jahren und für beide Bewässerungstechnologien gegeben. Die Rohrberegnung weist eine etwas höhere berechnungskostenfreie Leistung auf als die Tropfbewässerung, was sich durch die höheren fixen Kosten der letzteren erklären lässt. Auch auf regionaler Ebene zeigt sich dieses Bild, die Bewässerung von Buschbohnen ist in allen Gemeinden, in welchen sie angebaut werden, im Durchschnitt wirtschaftlich (vgl. Abbildung 54 und Abbildung 55). Da bereits eine Bewässerungswürdigkeit unter Vollkosten gegeben ist, ist diese auch unter variablen Kosten gegeben. Die variable berechnungskostenfreie Leistung fällt um den Betrag der fixen Kosten, welche bis zu 500 €/ha betragen kann, höher aus. Auch auf regionaler Ebene ist die Bewässerung von Buschbohnen in jeder Gemeinde und in jedem Jahr wirtschaftlich und somit auch im Mittel über 2010–2020.

Abbildung 53: Durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Buschbohnen in Hessen unter Vollkosten (2010–2020)



Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 54: Bewässerungswürdigkeit von Buschbohnen unter Vollkosten und variablen Kosten bei Bewässerung mit Tropfbewässerung oder Rohrberegnung (2010–2020)

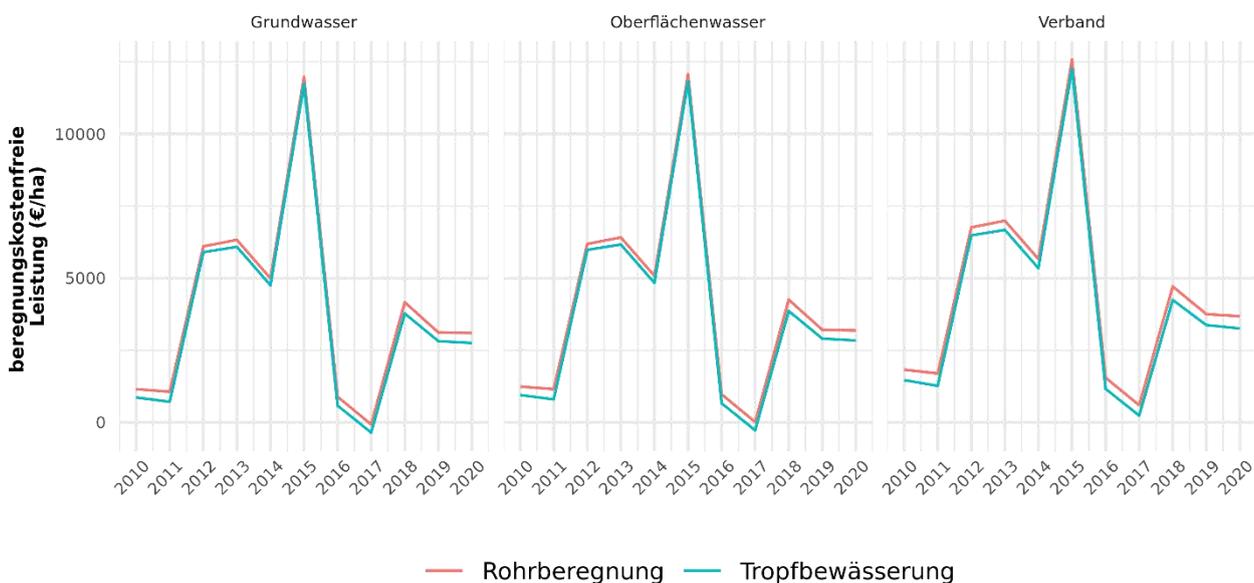


Zwiebeln

Die Bewässerungsmenge für Zwiebeln 2010–2020 liegt bei durchschnittlich 105 mm und variiert zwischen 32 mm und 237 mm. Der durch diese Bewässerungsmenge abgesicherte Mehrertrag liegt zwischen 42,4 und 352 dt/ha und die Mehrerlöse liegen, unter Berücksichtigung von jährlichen Preisen, zwischen 13,9 €/dt und 70,15 €/dt. Es ergibt sich ein Mehrerlös von durchschnittlich 5.588 €/ha.

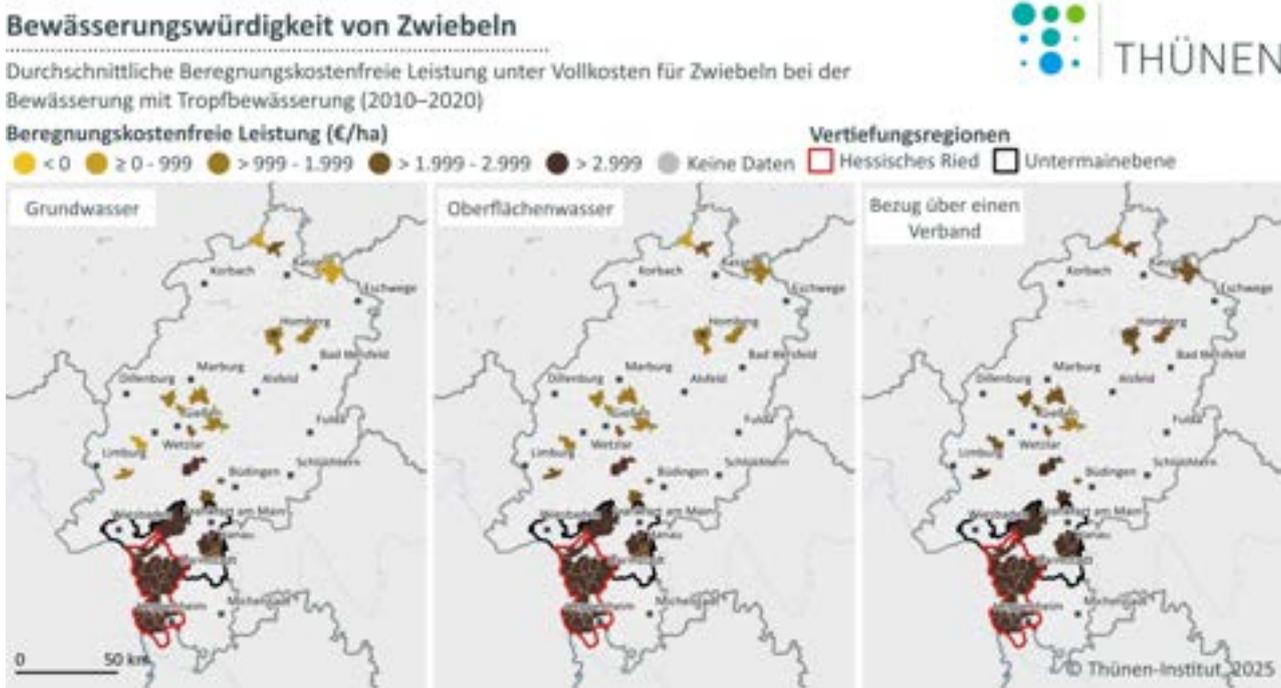
Die langfristige durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Zwiebeln ist positiv. Über den betrachteten Zeitraum ist die Bewässerung von Zwiebeln wirtschaftlich. Nur im Jahr 2017 fällt die beregnungskostenfreie Leistung bei der Tropfbewässerung in Kombination mit Grundwasser oder Oberflächenwasser und Rohrberegnung in Kombination mit Grundwasser auf bis zu -355 €/ha und ist damit nicht wirtschaftlich. Auch bei der regionalen Betrachtung ist die Bewässerung in allen Gemeinden im Durchschnitt wirtschaftlich und dies gilt für alle in der Praxis angewendeten bzw. möglichen Kombinationen, auch Bewässerungstechnologien und Wasserherkünften, wie in Abbildung 56 und Abbildung 57 dargestellt.

Abbildung 55: Durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Zwiebeln in Hessen unter Vollkosten (2010–2020)



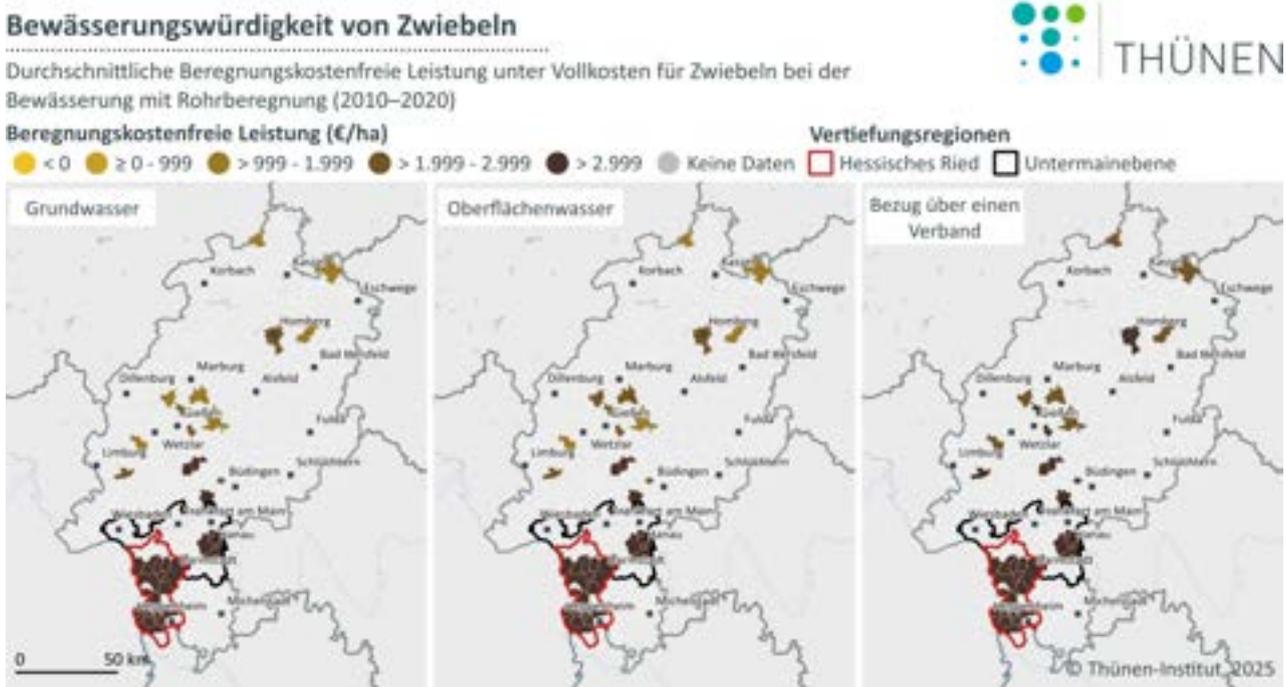
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 56: Regionale Bewässerungswürdigkeit von Zwiebeln unter Vollkosten bei Bewässerung mit Tropfbewässerung



Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 57: Regionale Bewässerungswürdigkeit von Zwiebeln unter Vollkosten bei Bewässerung mit Rohrberegnung



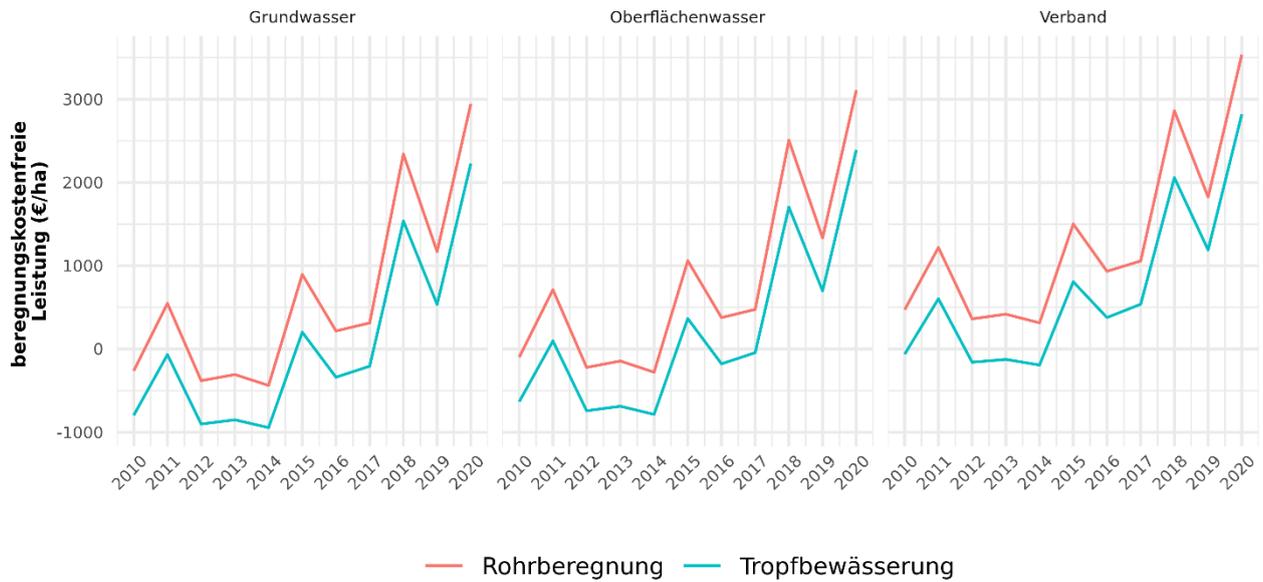
Erdbeeren

Die Bewässerungsmenge für Erdbeeren 2010–2020 liegt bei durchschnittlich 175 mm und variiert zwischen 35 mm und 390 mm. Der durch diese Bewässerungsmenge abgesicherte Mehrertrag liegt zwischen 1,9 und 28,1 dt/ha beziehungsweise zwischen 177,7 €/dt und 317,7 €/dt (unter Berücksichtigung von jährlichen Preisen). Daraus ergibt sich ein Mehrerlös von durchschnittlich 2.566 €/ha.

Die durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Erdbeeren in Hessen, welche in Abbildung 58 dargestellt ist, zeigt über den Untersuchungszeitraum einen steigenden Trend. Ab 2015 ist eine Bewässerungswürdigkeit für die Rohrberegnung und Kombination mit allen drei Wasserherkünften gegeben. Die Bewässerung mit Tropfbewässerung wird beim Bezug des Wassers über einen Verband ebenfalls ab 2015 wirtschaftlich, bei der Nutzung von Grund- oder Oberflächenwasser erst ab 2018 bzw. 2017. Bei der regionalen Betrachtung über den Untersuchungszeitraum zeigt sich in Abbildung 59 und Abbildung 60, dass Erdbeeren beim Bezug von Wasser über einen Verband mit beiden Bewässerungstechnologien mit Ausnahme einzelner Gemeinden bewässerungswürdig sind. Bei der Verwendung von Grund- oder Oberflächenwasser ist die Bewässerungswürdigkeit von Erdbeeren vor allem in den Gemeinden des Hessischen Rieds und der Untermainebene sowie einer zusammenhängenden Region nördlich der Vertiefungsregionen gegeben. Im Nordosten von Hessen gibt es einzelne Gemeinden, in denen eine Bewässerungswürdigkeit gegeben ist.

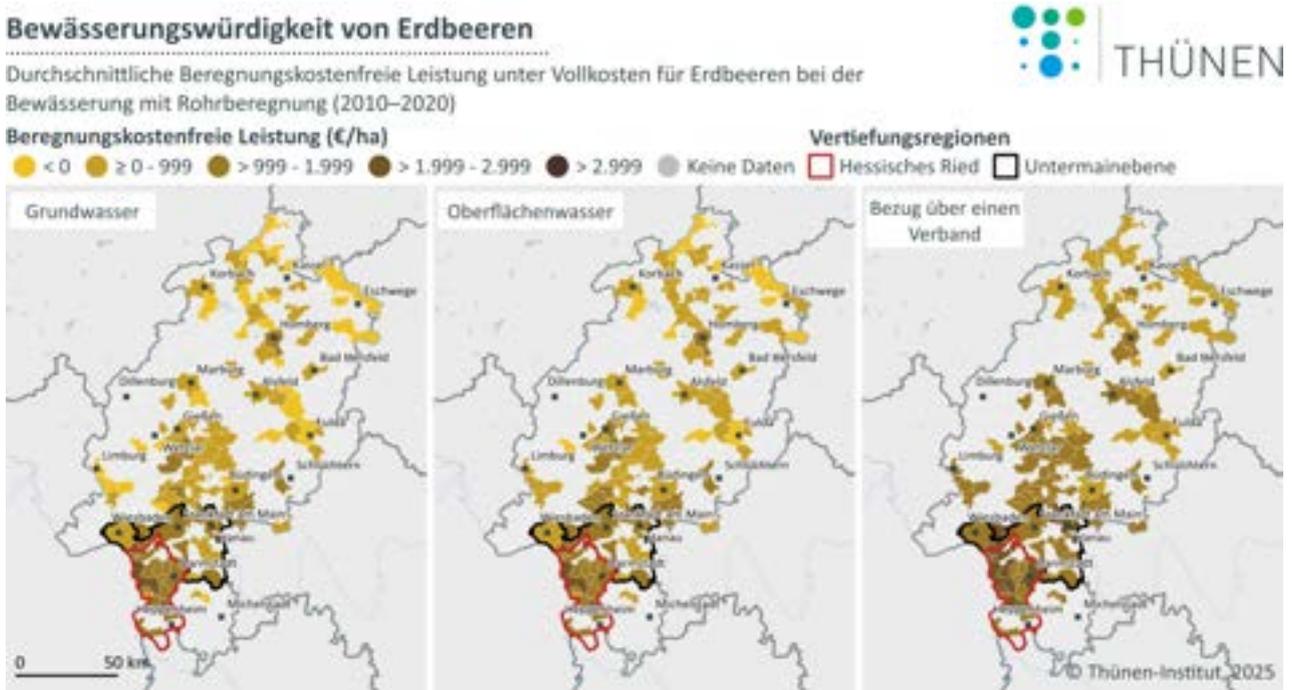
Werden statt der Vollkosten nur die variablen Kosten betrachtet, sind Erdbeeren über den gesamten Untersuchungszeitraum 2010–2020 deutlich bewässerungswürdig, wie in Abbildung 61 dargestellt. Auch bei der regionalen Betrachtung, welche in Abbildung 62 und Abbildung 63 dargestellt ist, sind Erdbeeren in jeder Gemeinde und allen Kombinationen von Bewässerungstechnologien und Wasserherkünften kurzfristig wirtschaftlich.

Abbildung 58: Durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Erdbeeren in Hessen unter Vollkosten (2010–2020)



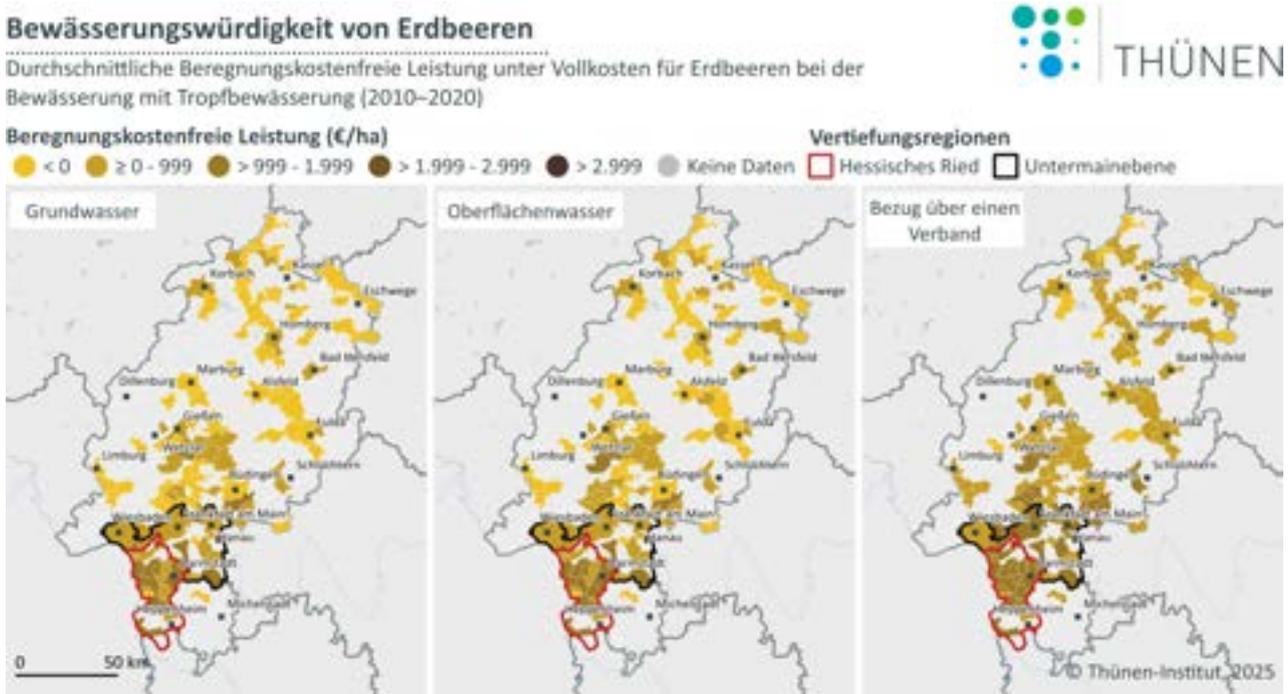
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 59: Regionale Bewässerungswürdigkeit von Erdbeeren unter Vollkosten bei Bewässerung mit Rohrleitung



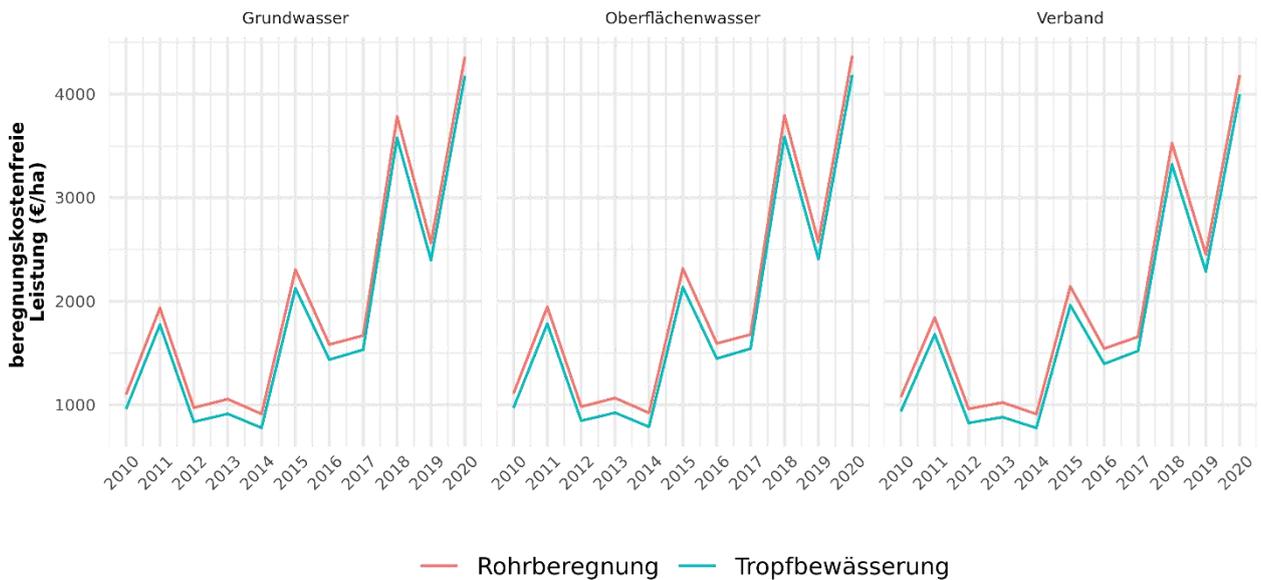
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 60: Regionale Bewässerungswürdigkeit von Erdbeeren unter Vollkosten bei Bewässerung mit Tropfbewässerung



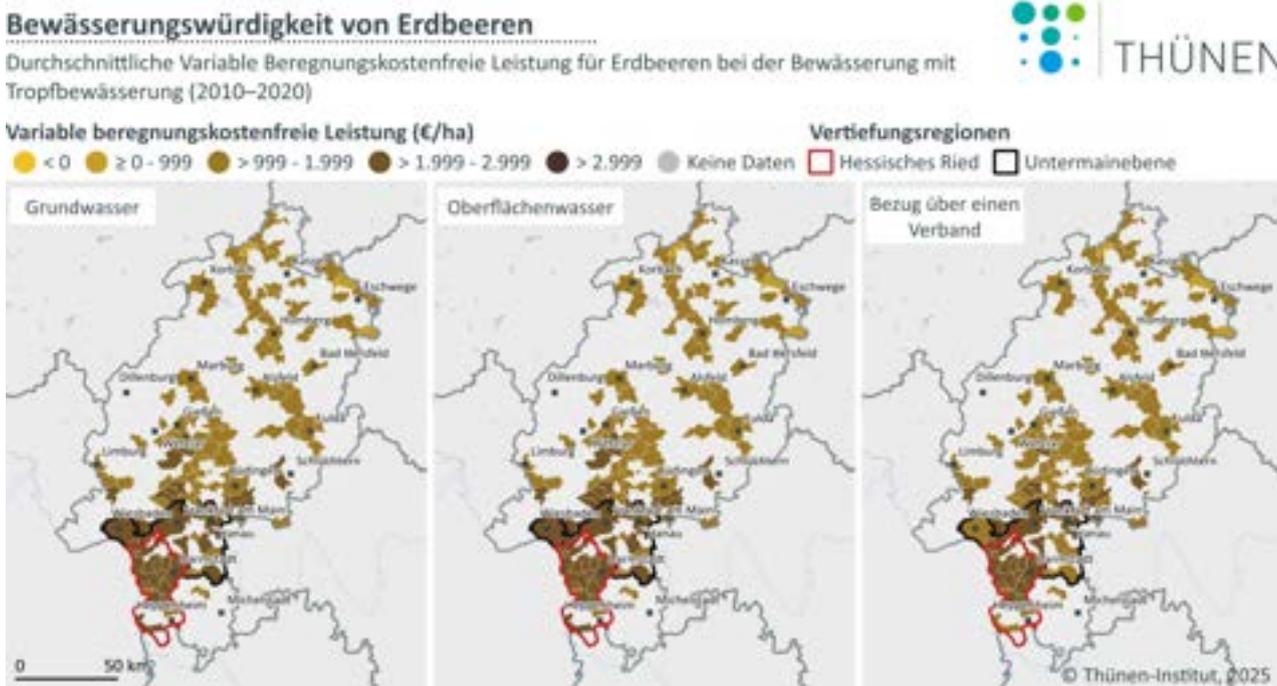
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 61: Durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Erdbeeren unter variablen Kosten (2010–2020)



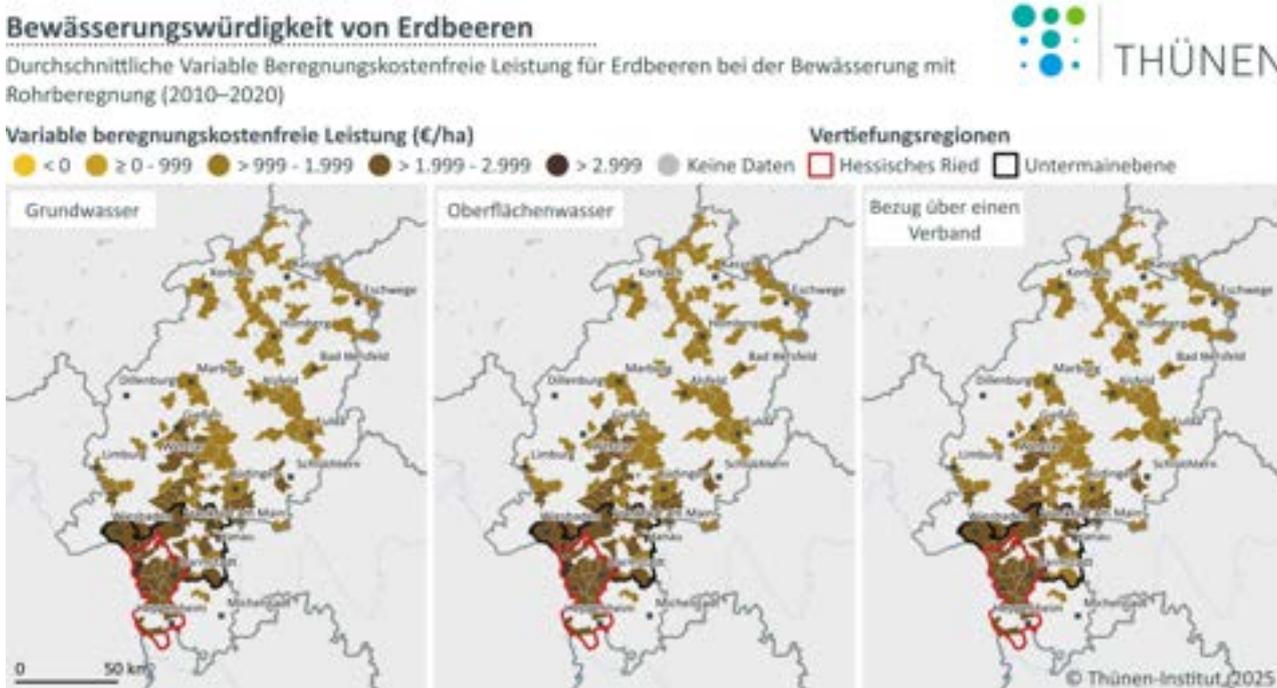
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 62: Regionale Bewässerungswürdigkeit von Erdbeeren unter variablen Kosten bei Bewässerung mit Tropfbewässerung



Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 63: Regionale Bewässerungswürdigkeit von Erdbeeren unter variablen Kosten bei Bewässerung mit Rohrberegnung



Quelle: Eigene Berechnungen.

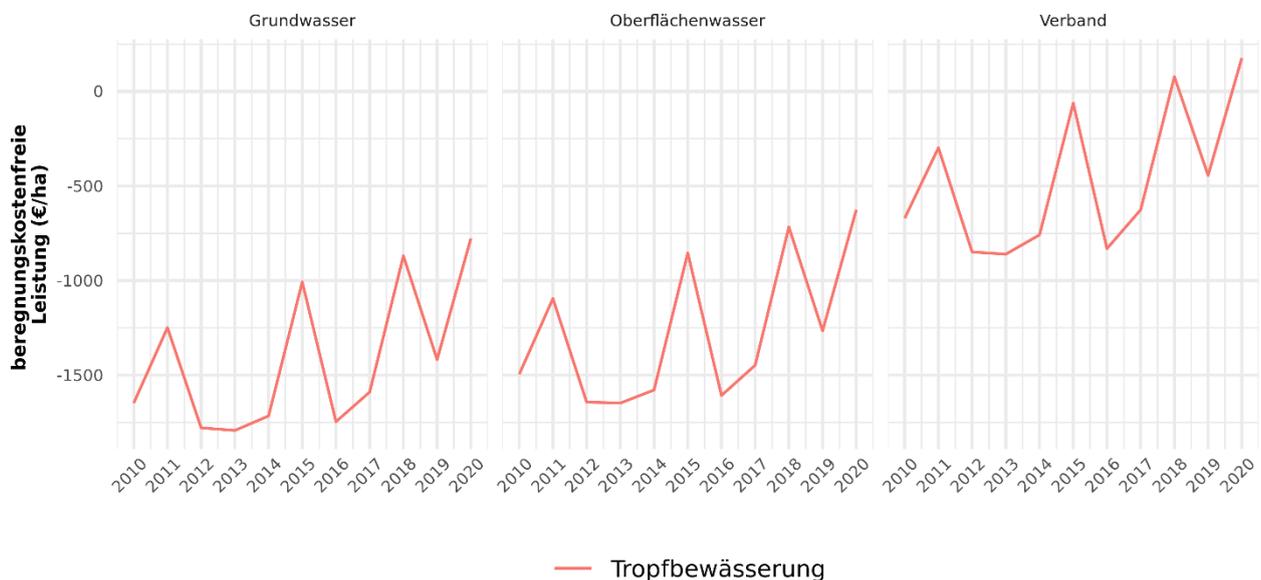
Himbeeren

Die Bewässerungsmenge für Himbeeren 2010–2020 liegt bei durchschnittlich 28 mm und variiert zwischen 0 mm und 98 mm. Der durch diese Bewässerungsmenge abgesicherte Mehrertrag liegt zwischen 0 und 3,8 dt/ha und die Mehrerlöse liegen, unter Berücksichtigung von jährlichen Preisen, zwischen 539,2 €/dt und 846 €/dt. Es resultiert ein Mehrerlös von durchschnittlich 716 €/ha.

Die durchschnittliche langfristige Bewässerungswürdigkeit von Himbeeren in Hessen in Abbildung 64 zeigt, dass eine Bewässerungswürdigkeit nur in den Jahren 2018 und 2020 in Kombination mit Wasserbezug über einen Verband gegeben ist. Auf regionaler Ebene ist eine Bewässerungswürdigkeit in zwei Gemeinden im Hessischen Ried im Durchschnitt über den Untersuchungszeitraum gegeben, wie in Abbildung 65 zu sehen. In einzelnen Jahren ist die berechnungskostenfreie Leistung auch in weiteren Gemeinden positiv.

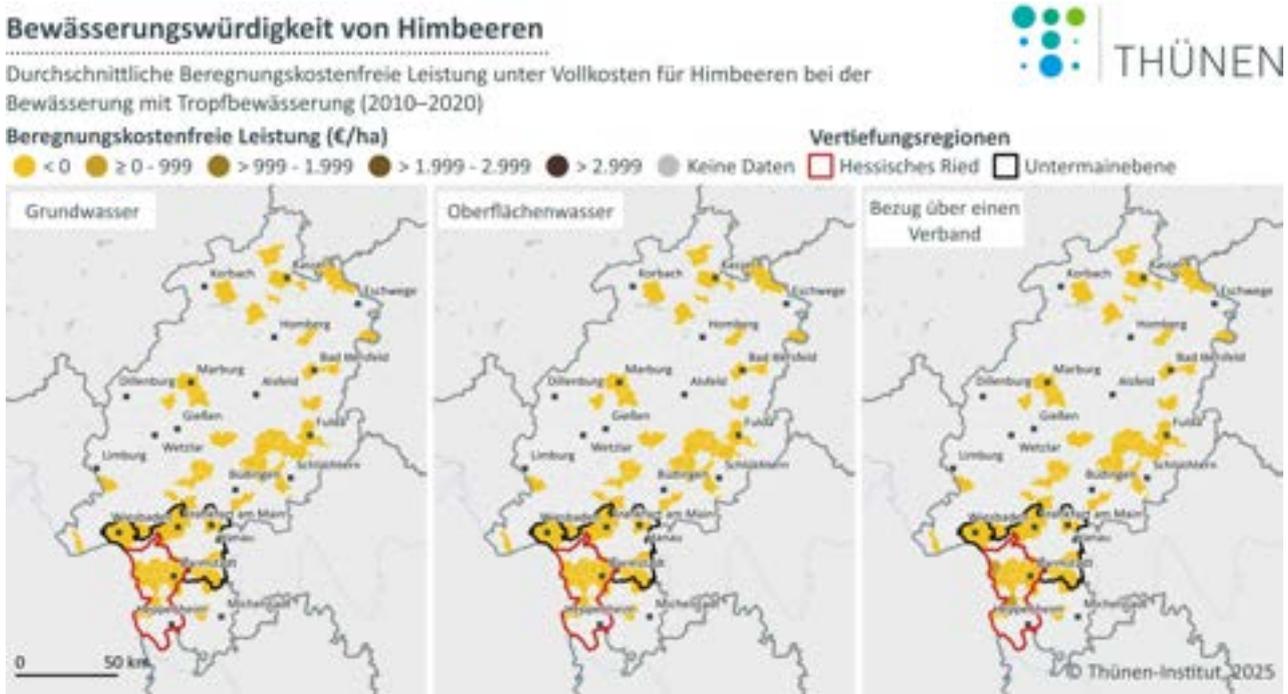
Bei der Betrachtung der durchschnittlichen kurzfristigen Bewässerungswürdigkeit zeigt sich, dass diese für Hessen außer in den Jahren 2012 und 2013 gegeben ist (vgl. Abbildung 66). Auch bei der regionalen Ebene (vgl. Abbildung 67) ist eine Bewässerungswürdigkeit in allen Gemeinden bei allen Wasserherkünften gegeben, nur bei der Verwendung von Grundwasser liegt eine Gemeinde mit einer variablen berechnungskostenfreien Leistung von -11 €/ha über den Untersuchungszeitraum knapp unter der Wirtschaftlichkeitsgrenze.

Abbildung 64: Durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Himbeeren in Hessen unter Vollkosten (2010–2020)



Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 65: Regionale Bewässerungswürdigkeit von Himbeeren unter Vollkosten bei Bewässerung mit Tropfbewässerung



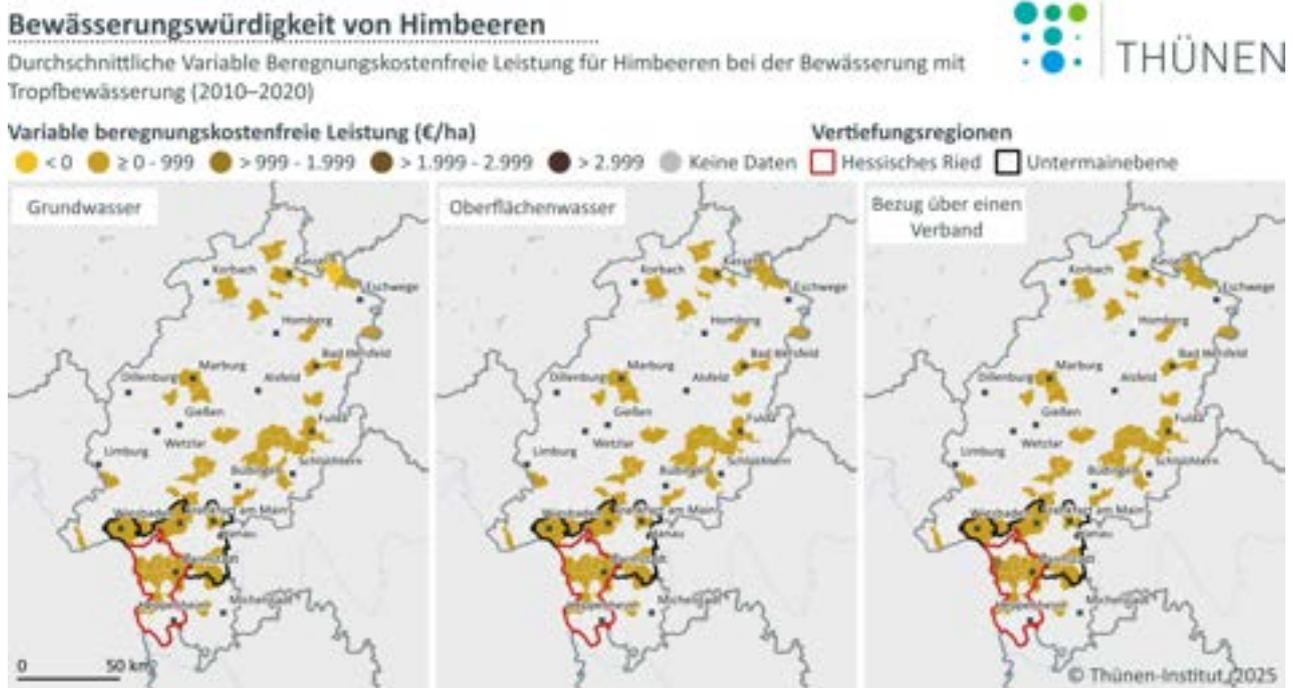
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 66: Durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Himbeeren unter variablen Kosten (2010–2020)



Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 67: Regionale Bewässerungswürdigkeit von Himbeeren unter variablen Kosten bei Bewässerung mit Tropfbewässerung



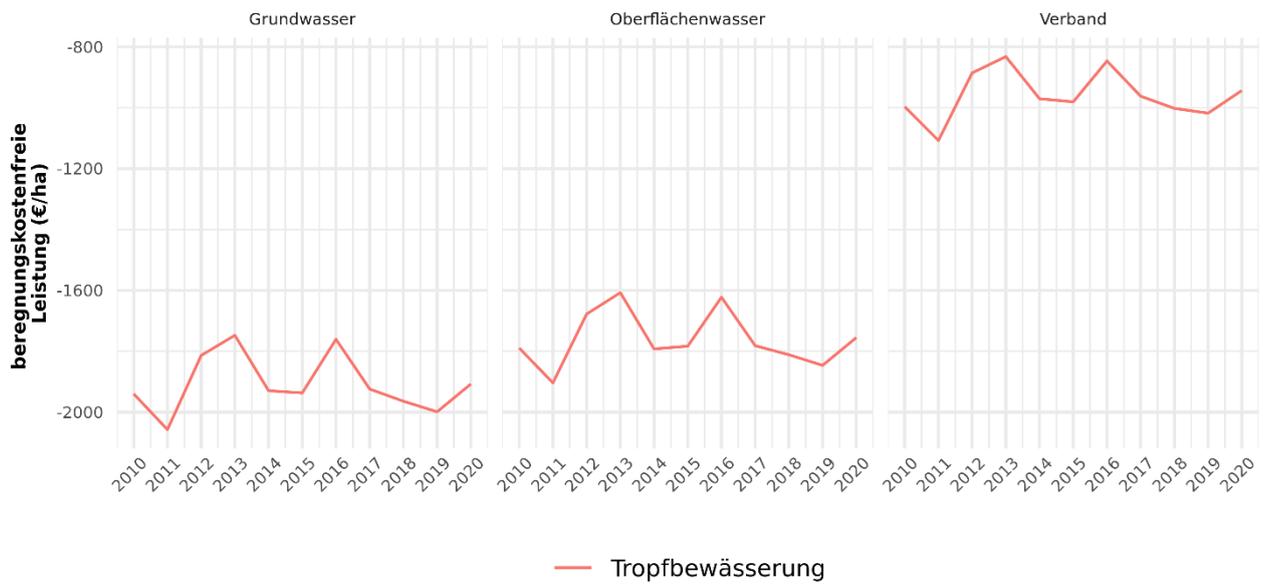
Quelle: Eigene Berechnungen.

Johannisbeeren

Die Bewässerungsmenge für Johannisbeeren 2010–2020 liegt bei durchschnittlich 5 mm und variiert zwischen 0 mm und 26 mm. Der durch diese Bewässerungsmenge abgesicherte Mehrertrag liegt zwischen 0 und 2,9 dt/ha und die Mehrerlöse liegen, unter Berücksichtigung von jährlichen Preisen, zwischen 151,8 €/dt und 278,8 €/dt. Es ergibt sich ein Mehrerlös von durchschnittlich 181 €/ha.

Die durchschnittliche langfristige Bewässerungswürdigkeit von Johannisbeeren in Hessen liegt deutlich unter der Wirtschaftlichkeitsschwelle und somit ist keine Bewässerungswürdigkeit gegeben (vgl. Abbildung 68). Dieses Bild zeigt sich auch bei der regionalen Darstellung in Abbildung 69. In keiner Gemeinde ist die Bewässerung von Johannisbeeren über den Untersuchungszeitraum gegeben. Auch bei der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit unter variablen Kosten ist eine Bewässerungswürdigkeit für Hessen nicht gegeben (vgl. Abbildung 70). Aber in einzelnen Gemeinden im Hessischen Ried sowie im Nordosten von Hessen ist eine kurzfristige Bewässerungswürdigkeit gegeben, wie in Abbildung 71 zu sehen ist.

Abbildung 68: Durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Johannisbeeren in Hessen unter Vollkosten (2010–2020)



Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 69: Regionale Bewässerungswürdigkeit von Johannisbeeren unter Vollkosten bei Bewässerung mit Tropfbewässerung

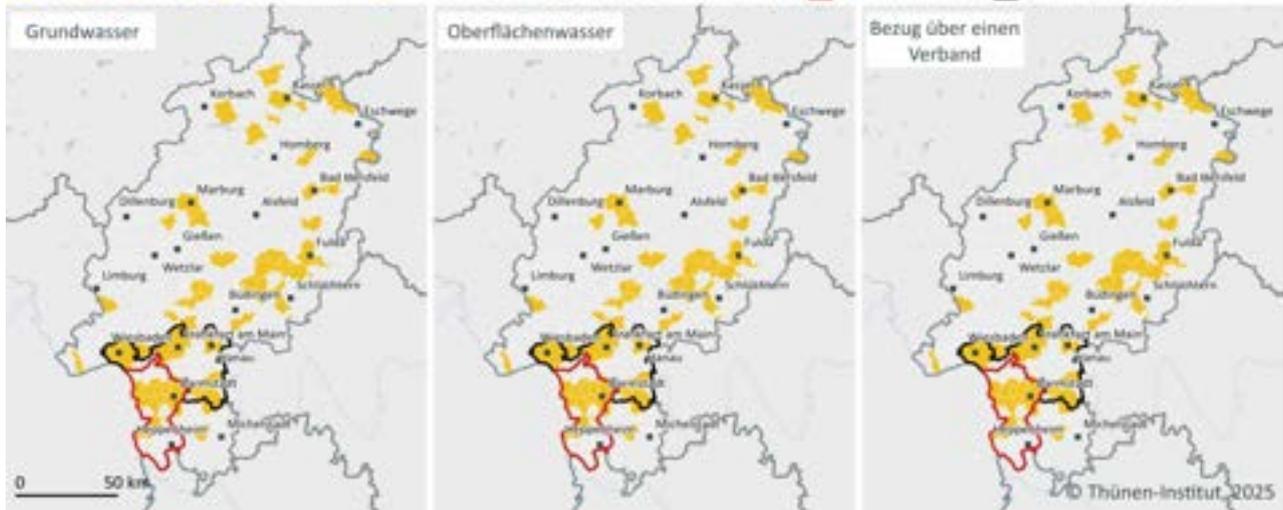
Bewässerungswürdigkeit von Johannisbeeren

Durchschnittliche Beregnungskostenfreie Leistung unter Vollkosten für Johannisbeeren bei der Bewässerung mit Tropfbewässerung (2010–2020)



Beregnungskostenfreie Leistung (€/ha)

● < 0
 ● ≥ 0 - 999
 ● > 999 - 1.999
 ● > 1.999 - 2.999
 ● > 2.999
 ● Keine Daten
 Hessisches Ried
 Unterrainebene



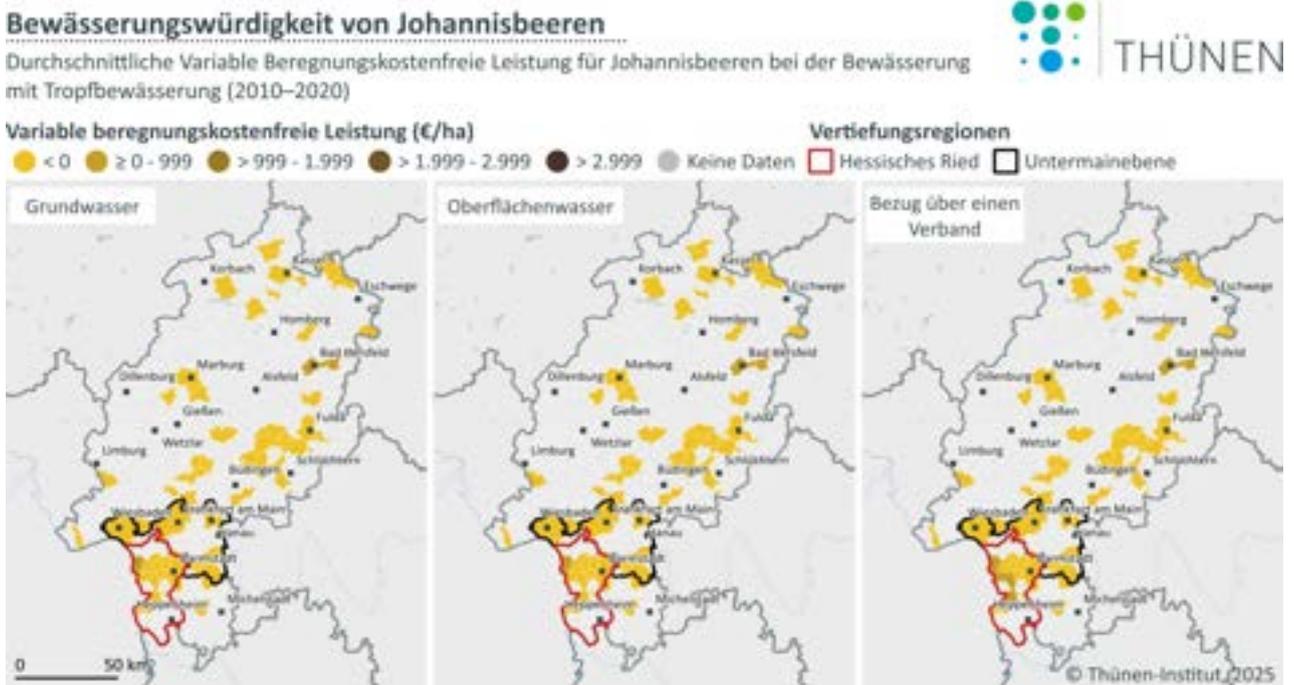
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 70: Durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Johannisbeeren unter variablen Kosten (2010–2020)



Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 71: Regionale Bewässerungswürdigkeit von Johannisbeeren unter variablen Kosten bei Bewässerung mit Tropfbewässerung



Quelle: Eigene Berechnungen.

Wein

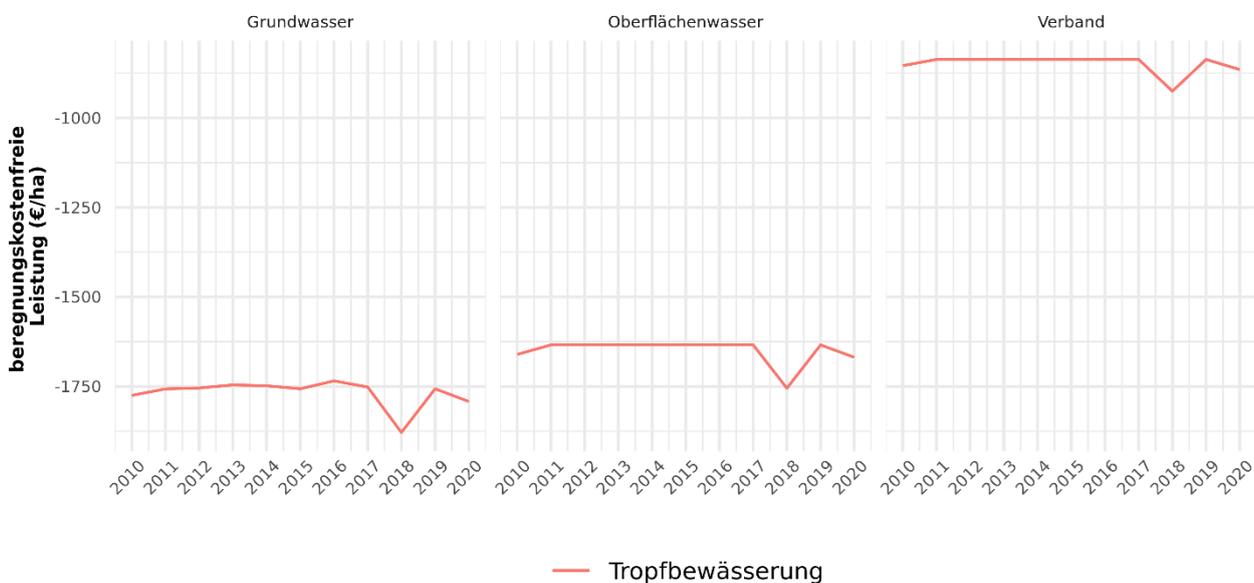
Die Bewässerungsmenge für Wein 2010–2020 liegt bei durchschnittlich 94 mm und variiert zwischen 7 und 188 mm. Der durch diese Bewässerungsmenge abgesicherte Mehrertrag liegt zwischen 0 hl/ha und 3,3 hl/ha und

die Mehrerlöse liegen, unter Berücksichtigung von jährlichen Preisen, zwischen 80 €/hl und 31,3 €/hl. Daraus ergibt sich ein Mehrerlös von durchschnittlich 7 €/ha.

Die Betrachtung der langfristigen durchschnittlichen Bewässerungswürdigkeit von Wein in Hessen zeigt, dass eine Bewässerung in Hessen unter Berücksichtigung der Vollkosten nicht wirtschaftlich ist. Beim Bezug von Wasser über einen Verband fällt die berechnungskostenfreie Leistung zwar weniger negativ aus, aber ist mit -837 €/ha deutlich von der Wirtschaftlichkeitsschwelle von Null entfernt (vgl. Abbildung 72). Auch auf der regionalen Ebene in Abbildung 73 zeigt sich, dass die Bewässerung in den einzelnen Gemeinden im Zeitraum 2010–2020 durchschnittlich nicht wirtschaftlich ist.

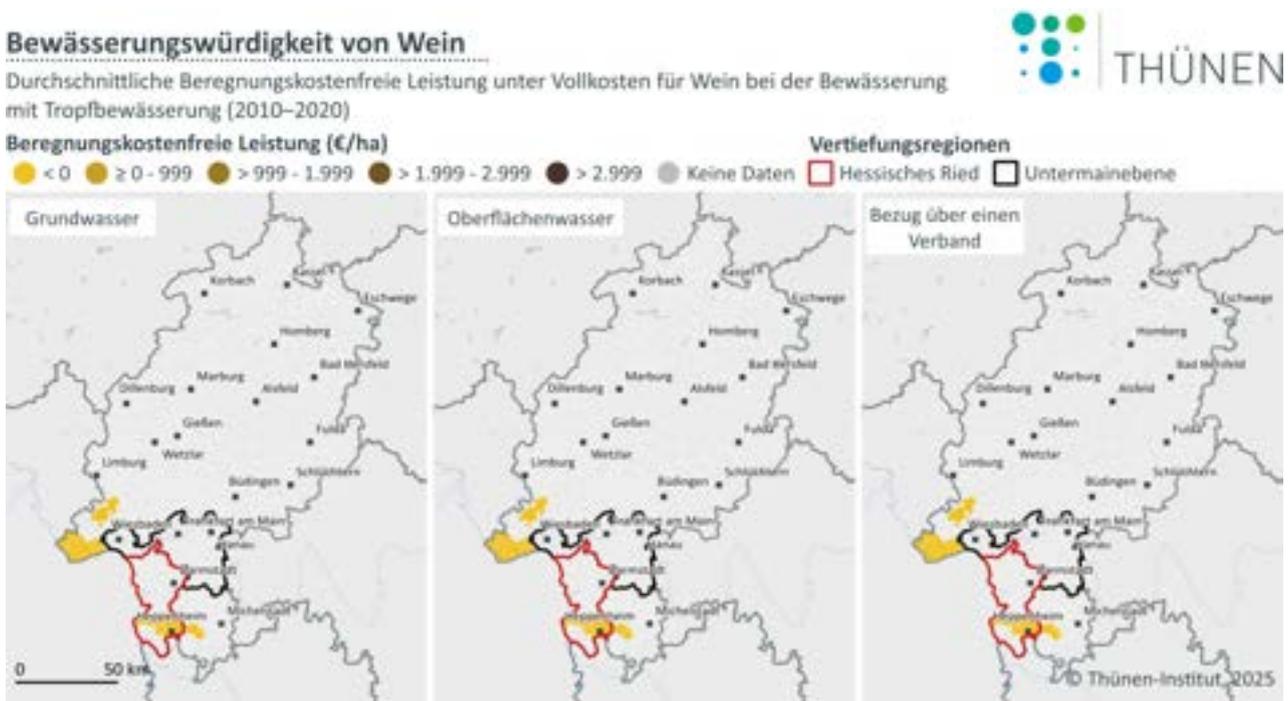
Werden nur die variablen Kosten in Form der kurzfristigen Bewässerungswürdigkeit betrachtet, nähert sich die variable berechnungskostenfreie Leistung dem Grenzwert von Null (vgl. Abbildung 74). Allerdings erfolgt in den Jahren, wo die berechnungskostenfreie Leistung gleich Null ist, keine Berechnung. Somit ist eine Bewässerungswürdigkeit von Wein für Hessen bei variablen Kosten durchschnittlich nicht gegeben. In einzelnen Gemeinden ist eine Bewässerungswürdigkeit aber gegeben, wie in Abbildung 75 zu sehen ist.

Abbildung 72: Durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Wein in Hessen unter Vollkosten (2010–2020)



Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 73: Regionale Bewässerungswürdigkeit von Wein unter Vollkosten bei Bewässerung mit Tropfbewässerung



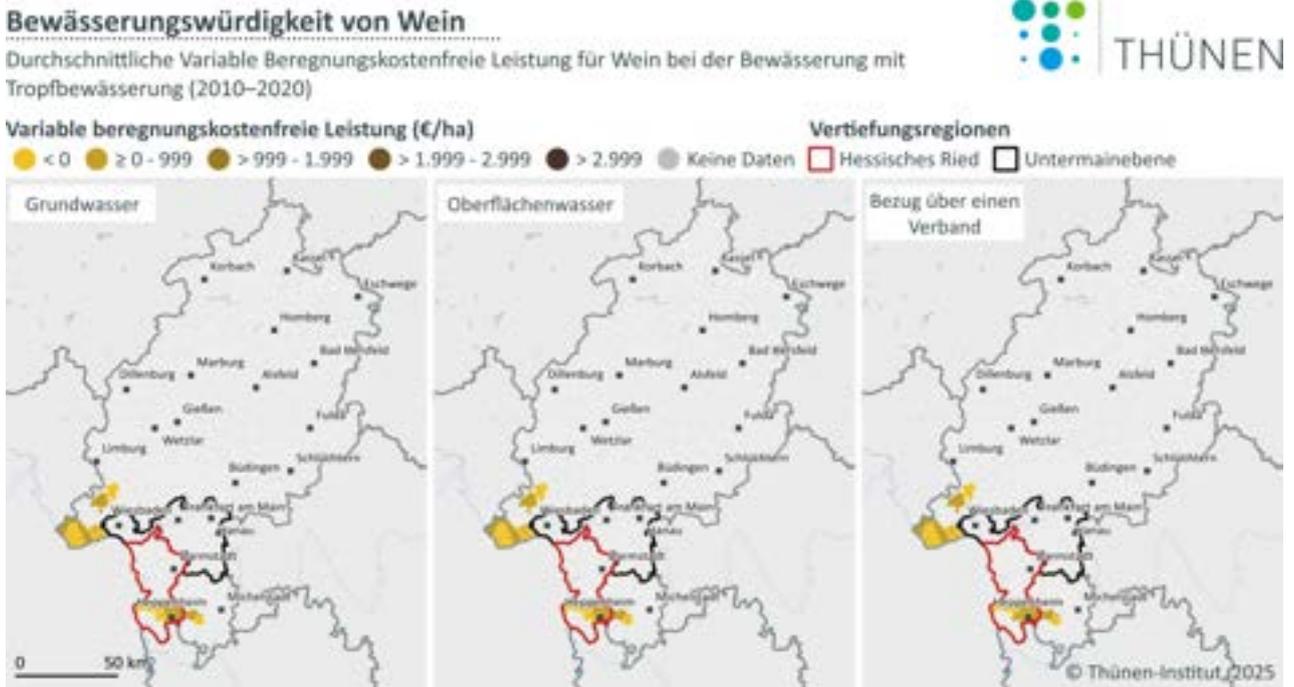
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 74: Durchschnittliche Bewässerungswürdigkeit von Wein unter variablen Kosten (2010–2020)



Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 75: Regionale Bewässerungswürdigkeit von Wein unter variablen Kosten bei Bewässerung mit Tropfbewässerung



Quelle: Eigene Berechnungen.

7 Entwicklungsszenarien und Anpassungsoptionen

In Hessen wird, wie in Kapitel 5.6 beschrieben, vor allem Grundwasser für die landwirtschaftliche Bewässerung genutzt. Seit dem Trockenjahr 2003 haben die Grundwasserneubildungsraten in Hessen abgenommen und weisen nur noch unterdurchschnittliche bis durchschnittliche Werte auf. Bei Vergleich der Grundwasserneubildung von 2003 bis 2019 mit dem 30-jährigen Referenzzeitraum 1971–2000 zeigt sich eine relative Abnahme um 26 % in Hessen, im Dürrejahr 2018 gab es sogar ein Grundwasserneubildungsdefizit von 51 % (Fliß et al., 2021). Modellrechnungen zufolge (WETTREG2010, trocken-warme Projektion) könnte die Grundwasserneubildung in Hessen bis 2070, im Vergleich zum Referenzzeitraum 1981–2010, um bis zu 51 % abnehmen (KLIWA, 2017).

Vor dem Hintergrund wahrscheinlich weiter unter Druck stehender Trinkwasserressourcen und der nachrangigen Priorisierung der landwirtschaftlichen im Vergleich zur öffentlichen Wasserversorgung (Kruse, 2018) wird im folgenden Kapitel das Potenzial alternativer Wasserressourcen in Bezug auf Eignung und mengenmäßige Verfügbarkeit exemplarisch in einer Vertiefungsregion analysiert. Außerdem werden die Stärken und Schwächen verschiedener Organisationsformen im Bereich der Bewässerung im Hinblick auf den steigenden Wasserbedarf und dadurch möglicherweise notwendigen Anpassungen der Bewässerungsinfrastruktur dargestellt.

7.1 Entwicklungsszenarien im Klimawandel

7.1.1 Basisszenario RCP 8.5

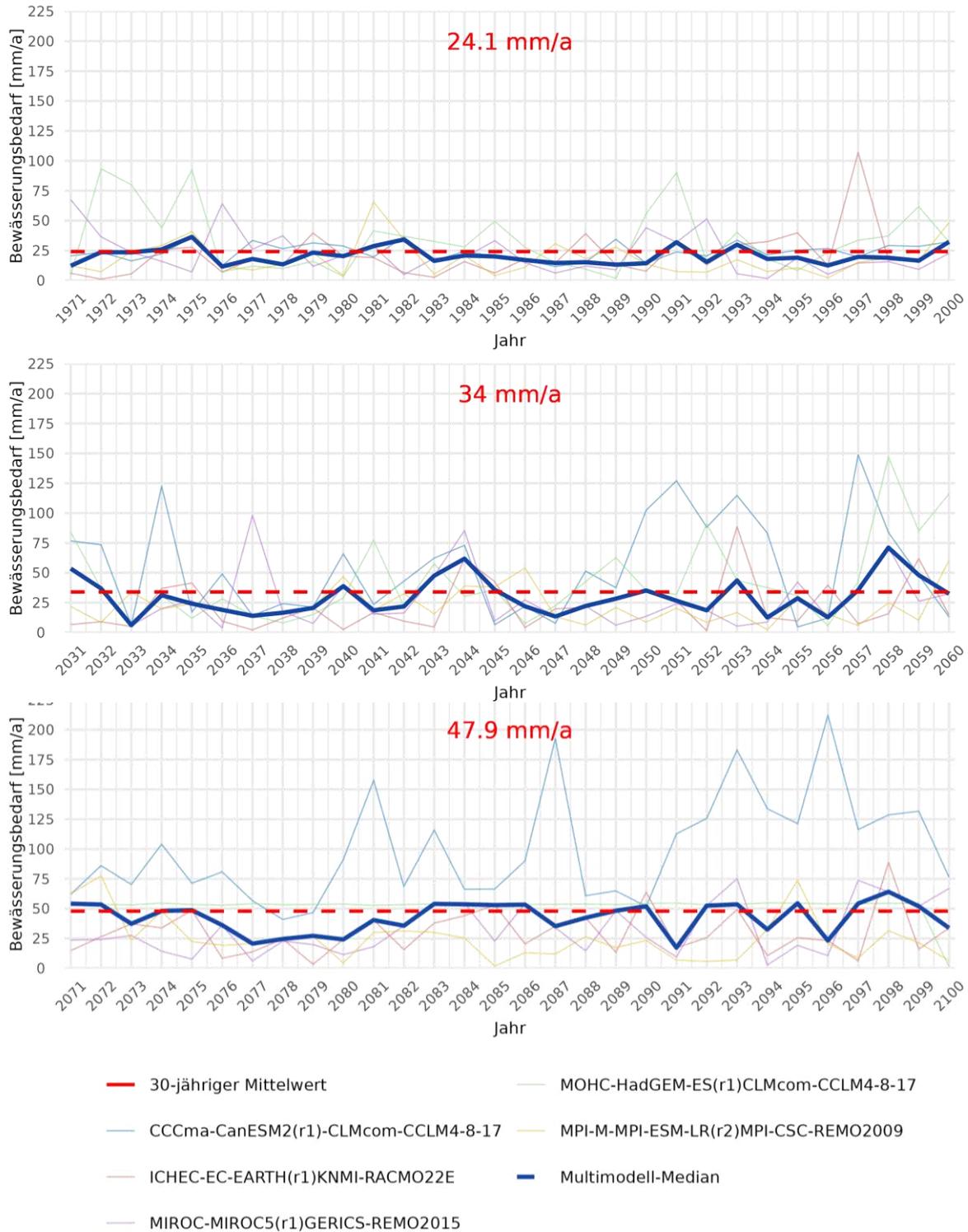
Anhand der ex-ante-Analyse sollen die Ergebnisse des sogenannten „Basisszenarios“ dargestellt werden. Die Modellierung basiert auf den Klimaprojektionsdaten des RCP 8.5-Szenarios (siehe Kapitel 4.3). Das „Weiter-wie-bisher-Szenario“ simuliert eine signifikante globale Erwärmung bis in das Jahr 2100. Um die Bandbreite möglicher zukünftiger Entwicklungen zu berücksichtigen, wird ein Multimodellansatz bzw. eine Ensemble-Betrachtung gewählt. Dabei wird der Median je Zeiteinheit und Raumeinheit (z. B. für ein Jahr und eine Gemeinde) mehrerer Modellläufe berechnet. Die Veränderung der relevanten klimatischen Parameter, die als Eingangsparameter für die Modelle dienen, wird in Kapitel 5.4 dargestellt. Eine Änderung der Landnutzung, die aus den InVeKoS-Daten (siehe Kapitel 4.4) für das Jahr 2020 abgeleitet wurde, wird im Basisszenario nicht berücksichtigt. Ziel des Basisszenarios ist es, die klimawandelinduzierten Änderungen des potenziellen Bewässerungsbedarfs, des Wasserbedarfs für Frostschutzberegnung und der Bewässerungswürdigkeit im hessenweiten Mittel sowie auf Gemeindeebene darzustellen und zu analysieren. Die hessenweite Auswertung der Ergebnisse lässt sich als jährlicher Mittelwert aller Gemeinden für einen bestimmten Zeitraum darstellen. Die Analyse zukünftiger Entwicklungen basiert also auf dem Vergleich der mittleren Änderungen von 30-jährigen Zeiträumen. Die mittleren Änderungen werden durch den Vergleich der Referenzperiode (1971–2000) mit der nahen (2031–2060) und der fernen Zukunft (2071–2100) abgeleitet. Dieses methodische Vorgehen entspricht den „Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten“, die durch ein Bund-Länder-Fachgespräch festgelegt wurden (Linke, 2023).

7.1.1.1 Potenzieller Bewässerungsbedarf

Die jährlichen hessenweiten Mittelwerte des potenziellen Bewässerungsbedarfs für die Referenzperiode sowie die nahe und ferne Zukunft zeigt die Abbildung 76. Die blaue Linie stellt den jährlichen Multimodell-Median dar und die rote, gestrichelte Linie repräsentiert den 30-jährigen Mittelwert des Multimodell-Medians. Der 30-jährige Mittelwert ermöglicht einen Vergleich der Zeiträume. Der potenzielle Bewässerungsbedarf steigt im Vergleich zur Referenzperiode von 24,1 mm/a auf 34,0 mm/a in der nahen Zukunft (2031–2060). Dies entspricht einem Anstieg von 41 %. Bis Ende des Jahrhunderts ist diese Änderung noch stärker. Im Vergleich zur

Referenzperiode liegt der mittlere Bewässerungsbedarf in der fernen Zukunft (2071–2100) bei 47,9 mm/a, was einem Anstieg von 99 % und damit einer Verdopplung entspricht. Je nach Einzelmodell kann der Anstieg des Bewässerungsbedarfs in den Einzeljahren allerdings noch deutlich stärker ausfallen.

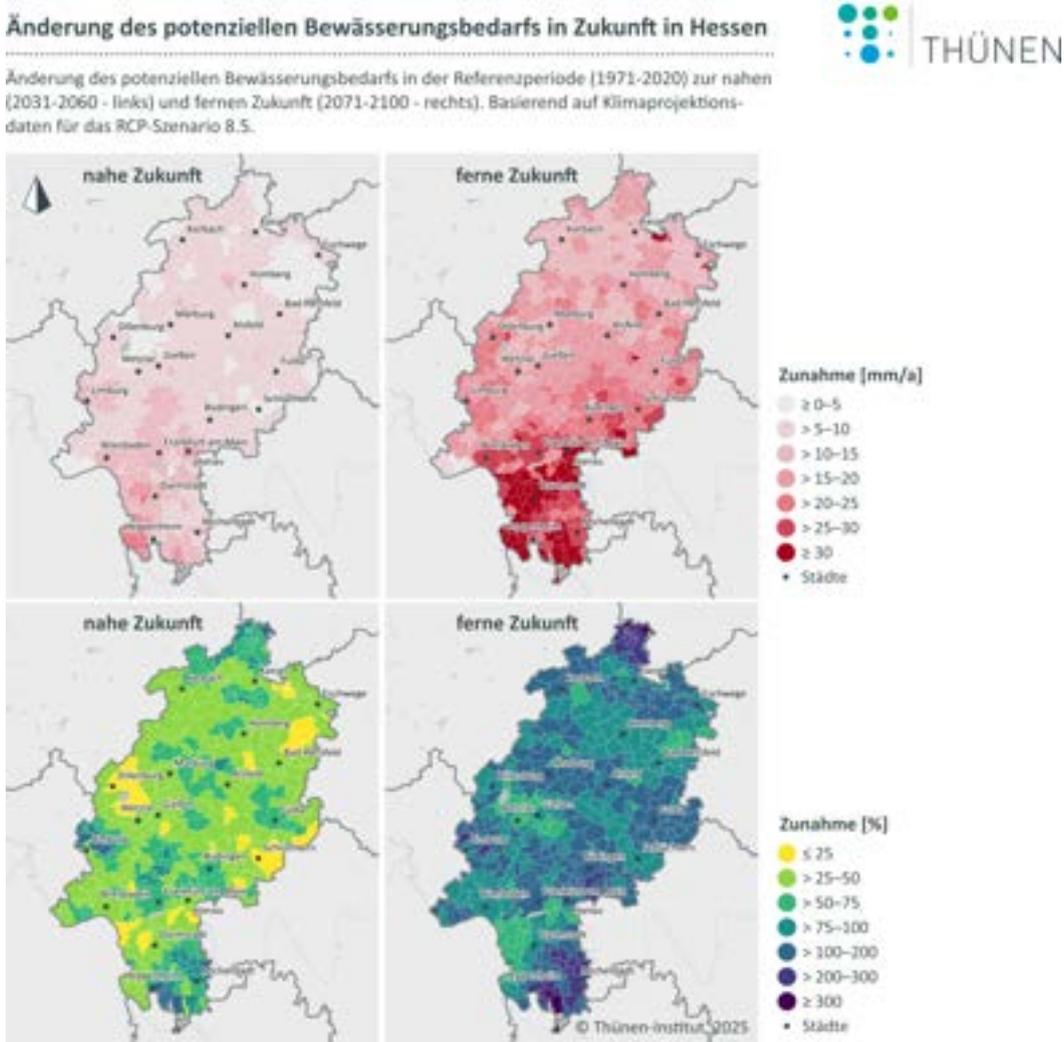
Abbildung 76: Hessenweite Entwicklung des potenziellen Bewässerungsbedarfs im Vergleich der Referenzperiode (1971–2000) zur nahen (2031–2060) und fernen Zukunft (2071–2100) basierend auf Daten des RCP-Szenarios 8.5



Quelle: Eigene Berechnung.

Abbildung 77 stellt die regionalen Änderungen des potenziellen Bewässerungsbedarfs für die nahe (links) und ferne (rechts) Zukunft jeweils als Änderungen in mm/a (oben) sowie als prozentuale Änderungen (unten) dar.

Abbildung 77: Räumliche Änderung des mittleren potenziellen Bewässerungsbedarfs im Vergleich der Referenzperiode (1971–2000) zur nahen (2031–2060) und fernen Zukunft (2071–2100) in Hessen basierend auf Daten des RCP-Szenarios 8.5



Quelle: Eigene Darstellung.

Schon in der nahen Zukunft kommt es in Südhessen, vor allem im Hessischen Ried, zu einem Anstieg von bis zu 25 mm/a. Je nach angebaute Kultur bedeutet das einen (bei z. B. Ackerbaukulturen) bis hin zu drei (z. B. bei Gemüse) zusätzlichen Bewässerungsgängen. Bis Ende des Jahrhunderts zeigen die Modellergebnisse, dass der Bewässerungsbedarf in Hessen flächendeckend zunimmt und gerade in den Vertiefungsregionen mit sehr starken Änderungen (mehr als 30 mm/a) zu rechnen ist (vgl. Abbildung 77 – oben rechts). Die prozentualen Änderungen zeigen in der nahen Zukunft ebenfalls eher geringe Zunahmen, wenngleich bestimmte Regionen, wie z. B. die Gemeinden nördlich der Stadt Kassel, rund um die Stadt Limburg und im südwestlichen Hessen zwischen Darmstadt, Heppenheim und Michelstadt auffallen (vgl. Abbildung 77 – unten links). In diesen Regionen wird eine starke Zunahme (um den Faktor 2–3) in der fernen Zukunft modelliert, wenngleich die absolute Zunahme des Bewässerungsbedarfs mitunter gering ausfällt. In den Regionen existiert zwar vereinzelt Acker-, Gemüse- oder Sonderkulturbau, allerdings sind sie nur wenig für die Bewässerungslandwirtschaft erschlossen (siehe Kapitel 5.6). Neben diesen regional spezifischen, sehr starken Zunahmen des Bewässerungsbedarfs liegt die prozentuale Zunahme in vielen Gemeinden Hessens zwischen 50 und 200 %. Geringe erwartbare Änderungen

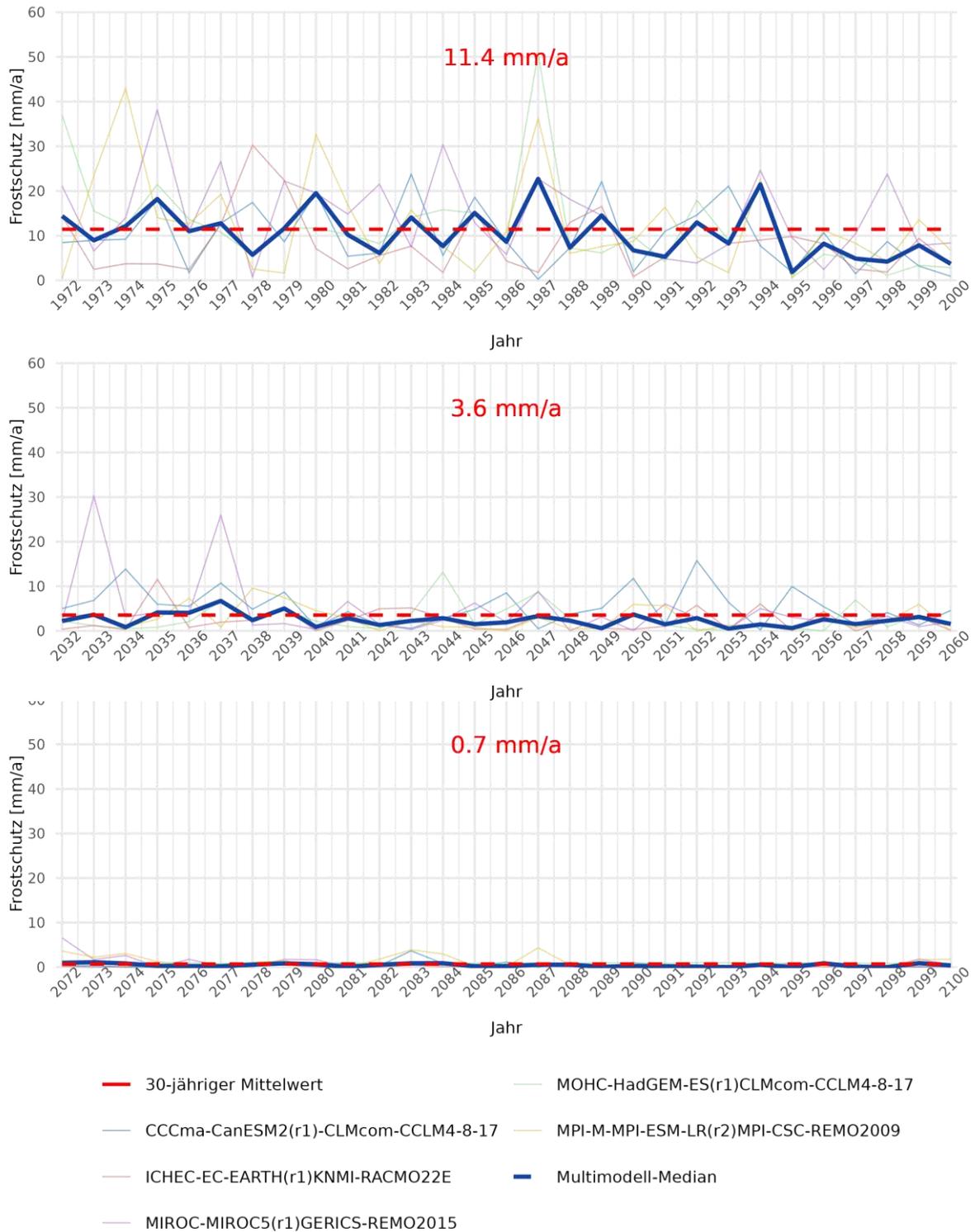
(bis 50 %) in der fernen Zukunft gibt es vereinzelt im Hessischen Ried und im südlichen Teil der Untermainebene, also in den Regionen, in denen die Bewässerung schon heute intensiv ist.

7.1.1.2 Potenzieller Wasserbedarf für Frostschutzberechnung

Die Veränderung des potenziellen Wasserbedarfs für die Frostschutzberechnung ist in Abbildung 78 und Abbildung 79 dargestellt. Im Vergleich zur Referenzperiode reduziert sich der potenzielle Wasserbedarf für die Frostschutzberechnung von 11,4 mm/a auf 3,6 mm/a in der nahen Zukunft (2031–2060), was einem deutlichen Rückgang von 68 % entspricht. Ein weiterer Rückgang zeichnet sich bis zum Ende des Jahrhunderts ab, wobei der durchschnittliche Wasserbedarf für Frostschutz in der fernen Zukunft (2071–2100) auf 0,7 mm/a sinkt, was einer Reduzierung von 94% entspricht.

Obwohl der Mittelwert für Hessen einen fast vollständigen Rückgang des Wasserbedarfs für Frostschutzberechnung darstellt, gibt es jedoch räumliche Unterschiede zwischen den Gemeinden in Hessen. Abbildung 79 zeigt eine regionale Aufschlüsselung dieser Änderungen sowohl in mm/a (oben) als auch prozentual (unten) für die nahe und ferne Zukunft. Schon in der nahen Zukunft sinkt das Spätfrostisiko und damit der Wasserbedarf für die Frostschutzberechnung drastisch. In einigen Gemeinden im westlichen Teil des Landes, z. B. das Gebiet zwischen den Städten Bad Hersfeld und Schlüchtern, ist der Rückgang vergleichsweise gering (0 bis 50 %), wobei auch dort einzelne Gemeinden mit einem Rückgang von bis zum 80 % vorkommen. Im restlichen Teil des Landes wird ein Rückgang von mehr als 80 % modelliert. In einigen Gemeinden (Abbildung 79 – unten links, gelb) ist schon in der nahen Zukunft mit einem kompletten Rückgang der Frostschutzberechnung zu rechnen. Dieser Trend setzt sich bis zum Ende des Jahrhunderts fort. In fast allen hessischen Gemeinden sinkt der Wasserbedarf auf Null, Ausnahmen bilden die in Abbildung 79 hellgrün dargestellten Gemeinden.

Abbildung 78: Hessenweite Entwicklung des potenziellen Wasserbedarfs für die Frostschutzberechnung im Vergleich der Referenzperiode (1971–2000) zur nahen (2031–2060) und fernen Zukunft (2071–2100) basierend auf Daten des RCP-Szenarios 8.5



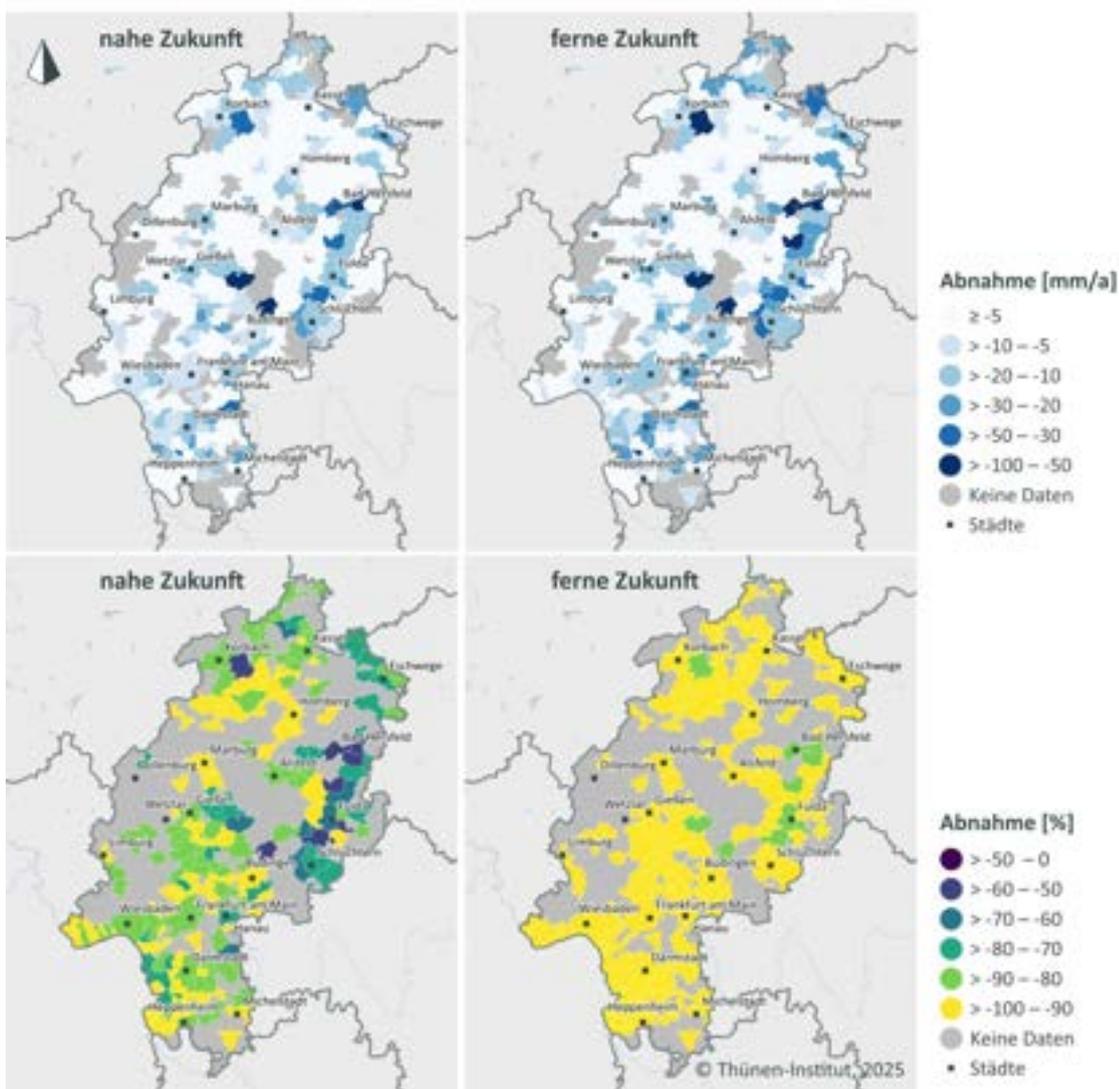
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 79: Räumliche Änderung des mittleren Wasserbedarfs für die Frostschutzberechnung im Vergleich der Referenzperiode (1971–2000) zur nahen (2031–2060) und fernen (2071–2100) Zukunft in Hessen basierend auf Daten des RCP-Szenarios 8.5

Änderung des Wasserbedarfs für Frostschutz in Zukunft in Hessen



Änderung des potenziellen Wasserbedarfs für Frostschutzberechnung in der Referenzperiode (1971-2020) zur nahen (2031-2060 - links) und fernen Zukunft (2071-2100 - rechts). Basierend auf Klimaprojektionsdaten für das RCP-Szenario 8.5.



Quelle: Eigene Darstellung.

7.1.1.3 Bewässerungswürdigkeit

Der Einfluss des Klimawandels auf die Bewässerungswürdigkeit wird durch die modellierten zukünftigen Bewässerungsbedarfe abgebildet. Zudem werden drei Preisszenarien – minimaler, mittlerer und maximaler Preis aus der Zeitperiode 1991–2023 – genutzt, da die Preisentwicklung in der Zukunft unbekannt ist. Einen Überblick über die Preise für die einzelnen Kulturen sind in Tabelle 34 zusammengefasst. Die Bewässerungswürdigkeit wird im Folgenden nur für die Nutzung von Grundwasser dargestellt, da diese durchschnittlich die höchsten Kosten für Bereitstellung und Zuleitung verursacht und mit einem Anteil von 66 % der Bewässerungsmenge die Hauptwasserquelle in Hessen ist (DESTATIS, 2017a). Zudem erfolgt die Darstellung nur exemplarisch für die

Kulturen Winterweizen und Erdbeeren, für die weiteren Kulturen sind die Ergebnisse im Anhang (Abbildung A1 – Abbildung A28) zu finden.

Tabelle 34: Preisszenarien

		Preisszenarien		
		Niedriges	Mittleres	Hohes
Weizen	€/dt	9,6	15,2	32
(Früh-)Kartoffeln	€/dt	6,7	14,4	31,3
Zuckerrüben	€/dt	2,6	4	5,1
Spargel	€/dt	314	410	547
Erdbeeren	€/dt	140	215	318
Buschbohnen	€/dt	40,9	125	281
Zwiebeln	€/dt	8,9	24,4	70,2
Johannisbeeren	€/dt	109	204	292
Himbeeren	€/dt	276	534	882
Wein	€/hl	60	105	140

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf BMEL (v. J.), FAO (2024b) und Regierungspräsidium Darmstadt (2024b).

Winterweizen wird in der Referenzperiode mit 26 mm, in der nahen Zukunft mit 35 mm bewässert und in der fernen Zukunft steigt der potenzielle Bedarf auf 49 mm. Es werden durchschnittlich zwischen 5 dt/ha und 11 dt/ha zusätzlicher Ertrag mit der Bewässerung abgesichert. Unter Berücksichtigung der Vollkosten ist in Hessen in der nahen und fernen Zukunft durchschnittlich keine Bewässerungswürdigkeit für Winterweizen gegeben.

In Abbildung 80 ist die kurzfristige Bewässerungswürdigkeit in Form der variablen berechnungskostenfreien Leistung für die Bewässerung mit einer mobilen Beregnungsmaschine mit Starkregner abgebildet. In den Spalten sind von links nach rechts die Referenzperiode (1971–2000), die nahe (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100) und in den Zeilen von oben nach unten die drei Preisszenarien in der Reihenfolge niedriger, mittlerer und hoher Preis dargestellt. In den einzelnen Abbildungsteilen sind zum einen die Modellergebnisse für die einzelnen Ensemblemitglieder dargestellt und zum anderen der jährliche Multimodell-Median über die Ensemblemitglieder sowie der 30-jährige Mittelwert über den Median. Im Niedrig-Preisszenario ist weder für einzelne Jahre noch Ensemblemitglieder und somit auch nicht im Durchschnitt über die Zeiträume eine kurzfristige Bewässerungswürdigkeit von Winterweizen gegeben. Mit Mittel-Preisszenario ist in der nahen, aber vor allem in der fernen Zukunft in einzelnen Jahren und für einzelne Ensemblemitglieder eine kurzfristige Bewässerungswürdigkeit gegeben. Allerdings liegen auch in diesem Szenario die Mittelwerte mit -110 €/ha in der nahen Zukunft und -102 €/ha in der fernen Zukunft unter der Wirtschaftlichkeitsschwelle. Beim hohen Preisszenario ist in allen drei Zeitperioden in einzelnen Jahren sowohl für einzelne Ensemblemitglieder als auch den Median über die Ensemblemitglieder eine kurzfristige Bewässerungswürdigkeit für Winterweizen gegeben. Der 30-jährige Mittelwert liegt aber nur in der fernen Zukunft mit einer variablen berechnungskostenfreien Leistung von 77 €/ha über der Wirtschaftlichkeitsschwelle, in der nahen Zukunft liegt der 30-jährige Mittelwert mit -11 €/ha knapp darunter.

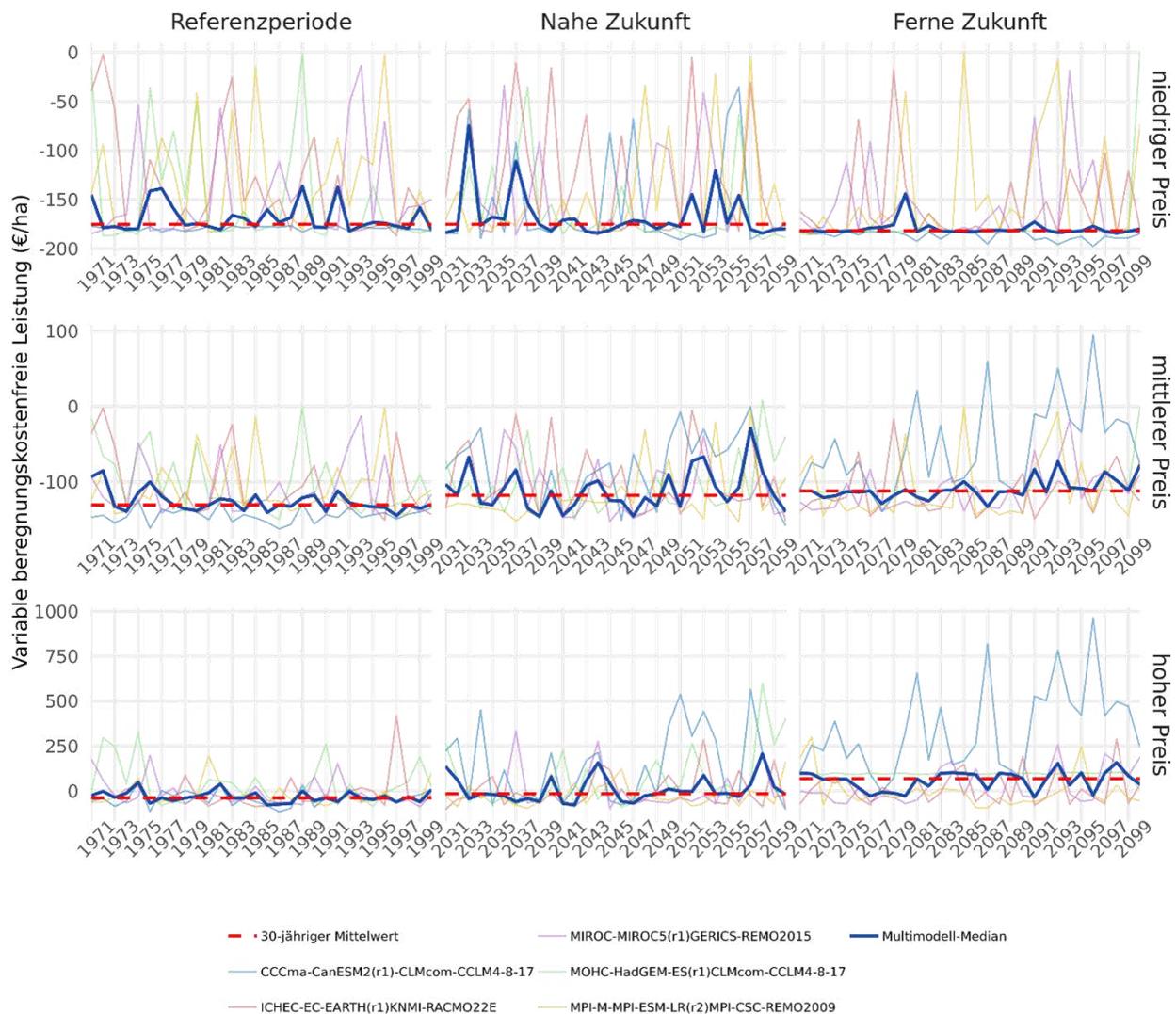
Die Abbildung 81 zeigt für die kurzfristige Bewässerungswürdigkeit bei einer Bewässerung mit einer mobilen Beregnungsmaschine mit Düsenwagen ein ähnliches Verhalten und einen ähnlichen Verlauf über die Zeit, aber die variablen berechnungskostenfreien Leistungen liegen aufgrund von höheren Kosten unter denen der mobilen Beregnungsmaschine mit Starkregner. Die kurzfristige Bewässerungswürdigkeit liegt auch im hohen Preisszenario in der nahen Zukunft mit einem 30-jährigen Mittelwert von -111 €/ha deutlich unter der Wirtschaftlichkeitsschwelle. In der fernen Zukunft ist eine Bewässerungswürdigkeit mit 68 €/ha durchschnittlich gegeben, es gibt aber auch einzelne Jahre, in denen mit variablen berechnungskostenfreien Leistungen von bis zu -100 €/ha bei einzelnen Ensemblemitgliedern keine Bewässerungswürdigkeit vorliegt.

Abbildung 80: Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Winterweizen unter variablen Kosten bei der Bewässerung durch eine mobile Beregnungsmaschine mit Starkregner und Grundwasser



Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 81: Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Winterweizen unter variablen Kosten bei der Bewässerung durch eine mobile Beregnungsmaschine mit Düsenwagen und Grundwasser



Quelle: Eigene Berechnungen.

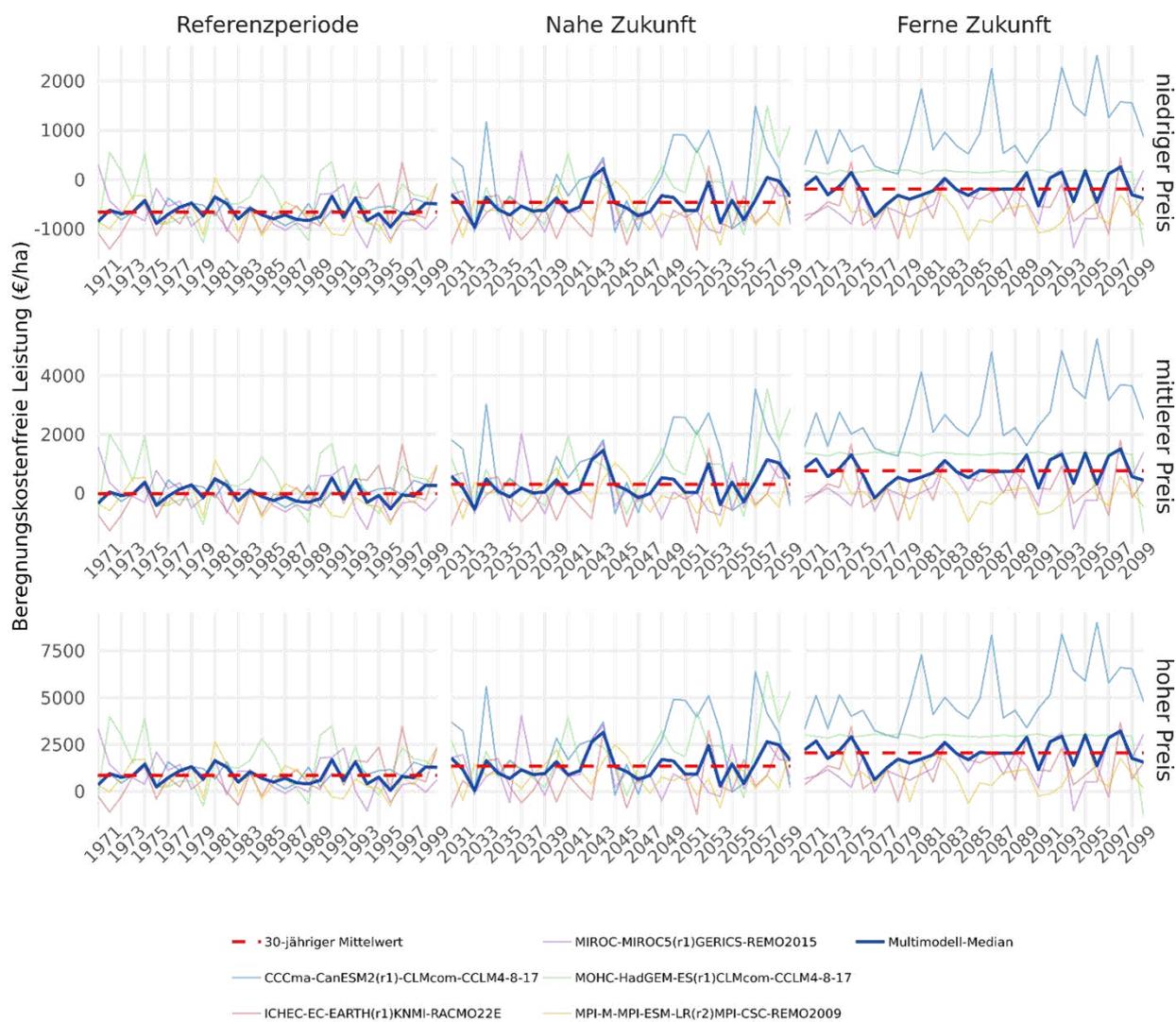
Erdbeeren werden in der Referenzperiode mit 132 mm, in der nahen Zukunft mit 160 mm bewässert und in der fernen Zukunft steigt der potenzielle Bedarf auf 197 mm. Es werden durchschnittlich zwischen 8 dt/ha und 12,6 dt/ha Ertrag mit der Bewässerung abgesichert. Unter Berücksichtigung der Vollkosten ist in Hessen in der nahen und fernen Zukunft durchschnittlich keine Bewässerungswürdigkeit für Erdbeeren gegeben.

Abbildung 82 zeigt die langfristige Bewässerungswürdigkeit von Erdbeeren bei Rohrberegnung und Grundwasser. Über die drei Zeiträume zeigt sich, dass die Bewässerungswürdigkeit über die Zeit für alle drei Preisszenarien zunimmt. Allerdings ist eine Bewässerungswürdigkeit beim Niedrig-Preisszenario nur in der fernen Zukunft für zwei Ensemblemitglieder gegeben und liegt über alle Ensemblemitglieder mit durchschnittlich -191 €/ha unterhalb der Wirtschaftlichkeitsschwelle. Beim mittleren Preisszenario ist in der nahen und fernen Zukunft eine Bewässerungswürdigkeit im Mittel über den Zeitraum gegeben, es gibt aber einzelne Jahre bei zwei der Ensemblemitglieder, in denen die beregnungskostenfreie Leistung den Grenzwert von Null unterschreitet. Im Hochpreis-Szenario gibt es in allen Perioden weiterhin einzelne Jahre ohne Bewässerungswürdigkeit, aber im Mittel ist für die einzelnen Perioden eine Bewässerungswürdigkeit gegeben.

Bei der Tropfbewässerung ist bei Erdbeeren eine Bewässerungswürdigkeit im Niedrigpreis-Szenario im Mittel in keiner der drei Perioden gegeben und im mittleren Preisszenario erst in der fernen Zukunft mit einer durchschnittlichen berechnungskostenfreien Leistung von 116 €/ha (vgl. Abbildung 83). Im Hochpreis-Szenario liegt die durchschnittliche berechnungskostenfreie Leistung mit Werten von 308 €/ha bis 1419 €/ha im wirtschaftlichen Bereich und eine Bewässerungswürdigkeit für Erdbeeren ist gegeben. Weiterhin gibt es einzelne Jahre, in denen die berechnungskostenfreie Leistung für einzelne Ensemblemitglieder negativ ausfällt und keine Bewässerungswürdigkeit gegeben ist.

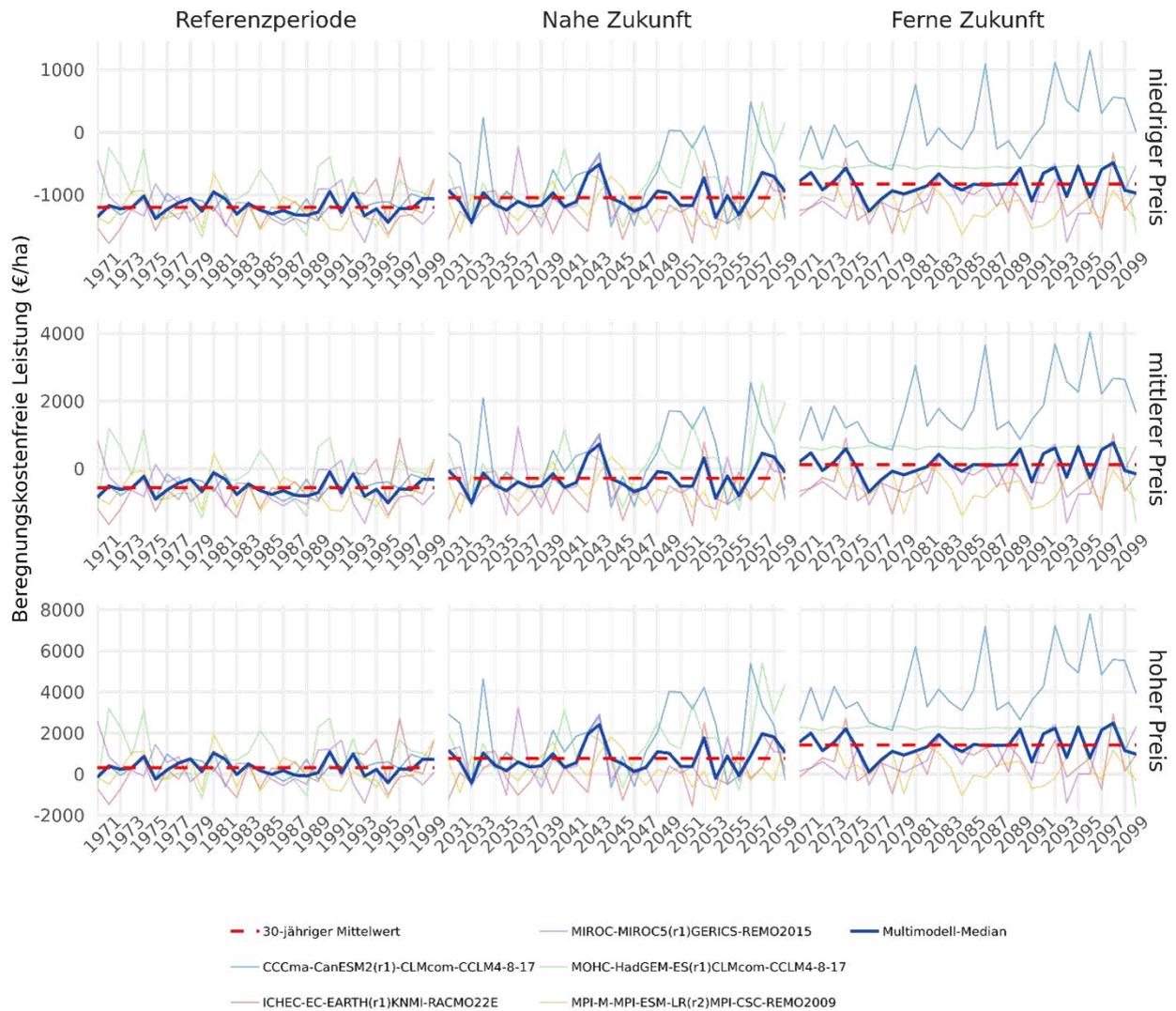
Bei der Betrachtung der kurzfristigen Bewässerungswürdigkeit in Form der variablen berechnungskostenfreien Leistung ist eine Bewässerungswürdigkeit für alle Perioden und Preisszenarien sowohl für Rohrbewässerung als auch Tropfbewässerung gegeben, wie Abbildung 84 und Abbildung 85 zeigen.

Abbildung 82: Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Erdbeeren unter Vollkosten bei Rohrbewässerung und Grundwasser



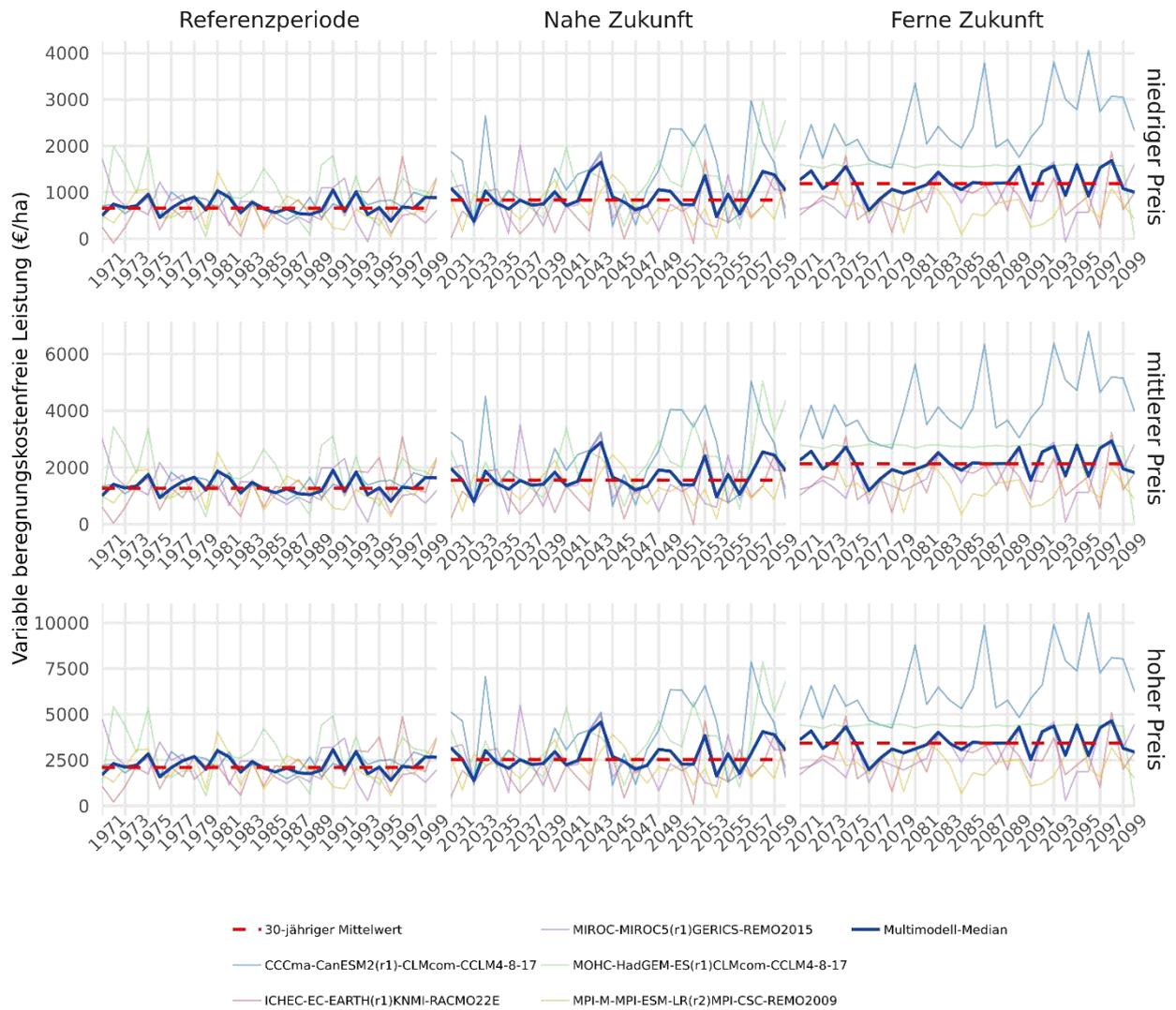
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 83: Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Erdbeeren unter Vollkosten bei Tropfbewässerung und Grundwasser



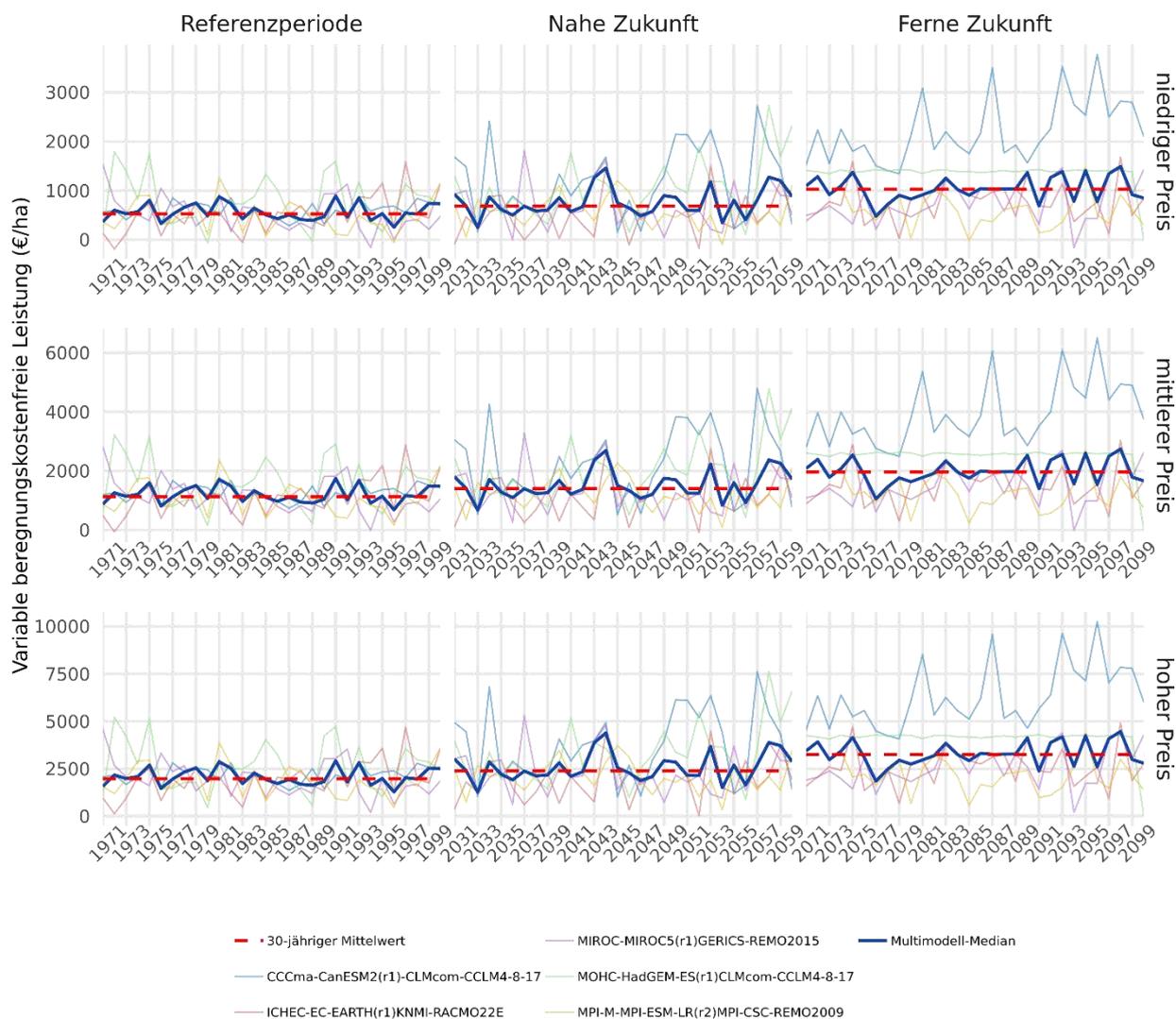
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 84: Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Erdbeeren unter variablen Kosten bei Rohrberegnung und Grundwasser



Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 85: Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Erdbeeren unter variablen Kosten bei Tropfbewässerung und Grundwasser



Quelle: Eigene Berechnungen.

7.1.2 Trockenheitstolerante und wärmebedürftige Kulturen

In Hessen kommt es zukünftig zu einer Zunahme der Temperaturen bei einer Abnahme der Niederschlagsmenge in der Vegetationszeit. Diese Entwicklungen bergen nicht nur Risiken, sondern auch die Chance zum Anbau wärmebedürftigerer oder trockenheitstoleranterer Kulturen, um somit zur Senkung des Anbaurisikos beizutragen (Lotze-Campen et al., 2023). Der Anbau „neuer“ Kulturpflanzen ist aber nur dann sinnvoll, wenn entweder innerbetriebliche Verwertungsmöglichkeiten gegeben sind oder ein Markt dafür existiert bzw. geschaffen wird. Zudem kann bei einigen Kulturen die Anschaffung neuer Technik beispielsweise für die Ernte notwendig sein, was hohe Investitionskosten verursachen kann. In diesem Kapitel werden beispielhaft die Kulturen Sorghum, Sojabohnen und Alfalfa vorgestellt und ihr Bewässerungsbedarf mit dem Bedarf der bisher berücksichtigten Kulturen verglichen.

7.1.2.1 Sorghum

Sorghum ist aufgrund seiner Herkunft aus subtropischen Savannengebieten an trockene und warme Bedingungen angepasst. Durch eine weite und tiefe Wurzelbildung kann Bodenwasser bis in eine Tiefe von 2,5 m genutzt werden, wenn der Boden entsprechend durchwurzelbar ist (LfULG, 2019). Zudem kann Sorghum während einer Trockenperiode in eine Trockenstarre fallen und sein Wachstum unterbrechen. Durch Niederschlag oder Bewässerung erfolgt eine Regeneration und das Wachstum wird wieder aufgenommen (LfULG, 2019; LTZ, 2012). Sorghum kann zur Produktion von Biomasse und Körnern genutzt werden. Bei der Biomasseproduktion braucht Sorghum im Vergleich zu Silomais 30 % weniger Wasser (LTZ, 2012, 2024b). Zudem ist Sorghum kein Wirt für Schädlinge wie den Maiszünsler oder Maisbohrer und für den Anbau sowie die Ernte kann dieselbe Technik wie für Silomais verwendet werden (LfULG, 2019; Siede et al., 2019). Sorghum wird bereits in geringem Maßstab in einigen Bundesländern angebaut. Die Aussaat wird Mitte Mai empfohlen (LLH, 2024), die Ernte erfolgt etwa 130 Tage später (FAO, 2024a).

In Abbildung 86 ist der potenzielle Bewässerungsbedarf von Sorghum (blaue Linie) für die Referenzperiode sowie die nahe und ferne Zukunft dargestellt, die opake Linie stellt den 30-jährigen Mittelwert über die jeweilige Periode dar und die leicht transparente Linie den jährlichen potenziellen Bewässerungsbedarf. In der Referenzperiode hat Sorghum einen durchschnittlichen potenziellen Bewässerungsbedarf von 21 mm/a, in der nahen Zukunft steigt dieser auf 43 mm/a und in der fernen Zukunft liegt er bei durchschnittlich 73 mm/a. Zur Einordnung der Höhe des Bedarfs von Sorghum sind in der Abbildung 86 auch die Bedarfe von Silo- und Körnermais (rote und grüne Linie) dargestellt. Beim Vergleich der Kulturen wird deutlich, dass der kulturspezifische potenzielle Bewässerungsbedarf von Sorghum im Durchschnitt um 24 % bis 56 % geringer ist und somit bei knapper Wasserverfügbarkeit eine Alternative zu Mais sein kann.

Abbildung 86: Potenzieller Bewässerungsbedarf von Sorghum, Silo- und Körnermais im Vergleich der Referenzperiode (1971–2000) zur nahen (2031–2060) und fernen (2071–2100) Zukunft im Hessischen Ried basierend auf Daten des RCP-Szenarios 8.5



Quelle: Eigene Berechnungen.

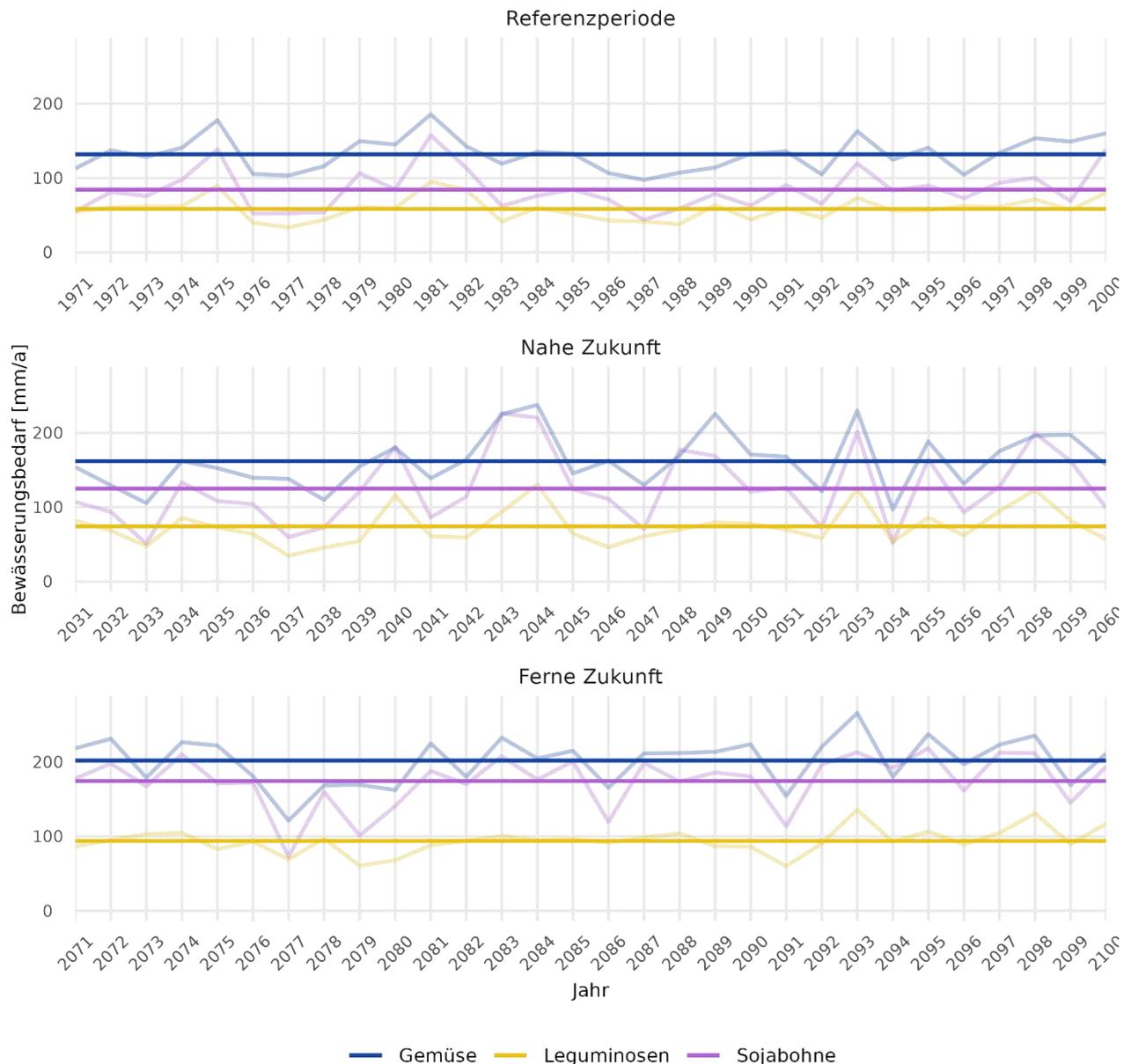
7.1.2.2 Soja

Die Sojabohne ist eine wärmebedürftige, aber im Gegensatz zu Sorghum eine wenig trockenheitstolerante Kultur (LTZ, 2024a). Sie hat weltweit eine hohe Bedeutung als Futter- und Nahrungsmittel. Das Angebot in Deutschland ist noch überwiegend von Importen abhängig, gleichzeitig wächst der Markt für gentechnikfreies Soja aus heimischen Anbau (LTZ, 2018; Wilbois et al., 2014). Durch an die klimatischen Bedingungen in Deutschland angepasste Sorten wird der Sojaanbau zunehmend wettbewerbsfähig (LTZ, 2018). Zudem kann Soja bei den Hessischen Agrarumwelt- und Landschaftspflege-Maßnahmen (HALM 2) auf den Mindestumfang von 10 % großkörniger Leguminosen der Maßnahme Vielfältige Kulturen im Ackerbau angerechnet werden (HMLUWFJH, 2024). Der Krankheitsdruck ist bisher gering, aber bei Ausweitung des Anbaus könnte dieser zunehmen. Es

besteht allerdings eine Fraßgefahr durch Wildtiere (LTZ, 2018). Wie andere Leguminosen geht die Sojabohne eine Symbiose mit Bakterien zur Fixierung von Stickstoff ein. Die spezifischen Bakterien Bradyrhizobien kommen in Deutschland von Natur aus nicht vor und müssen mit dem Saatgut ausgebracht werden (Wilbois et al., 2014). Die Aussaat für den Sojabohnenanbau erfolgt in Deutschland um den 1. Mai (Kühling et al., 2018) und die Ernte erfolgt ca. 140 Tage später (FAO, 2024a).

In Abbildung 87 ist der potenzielle Bewässerungsbedarf von Sojabohnen (lila Linie) im Klimawandel dargestellt, die leicht transparente Linie stellt den jährlichen potenziellen Bewässerungsbedarf dar und die opake Linie den 30-jährigen Mittelwert. Der potenzielle Bewässerungsbedarf der Sojabohne von 84 mm/a in der Referenzperiode verdoppelt sich den Modellanalysen zufolge bis zum Ende des Jahrhunderts. Im Vergleich zum potenziellen Bewässerungsbedarf von anderen Leguminosen, der ebenfalls in der Abbildung 87 dargestellt ist (gelbe Linie), ist der Bedarf von Sojabohnen höher und steigt in den Klimawandelszenarien deutlich stärker an. Bei den anderen Leguminosen wird ein Anstieg um 27 % in der nahen Zukunft und 61 % in der fernen Zukunft im Vergleich zur Referenzperiode erwartet, während der Anstieg bei Sojabohnen bei 48 % bzw. 106 % liegt. Der potenzielle Bewässerungsbedarf von Sojabohnen nähert sich Richtung ferner Zukunft stärker dem potenziellen Bedarf von Gemüsekulturen (blaue Linie), liegt aber noch ca. 14 % darunter. Die Analyse macht deutlich, dass die wärmetolerante Sojabohne sich hinsichtlich des Bewässerungsbedarfs nicht als Alternative zu herkömmlichen Körnerleguminosen empfiehlt.

Abbildung 87: Potenzieller Bewässerungsbedarf von Sojabohne, Gemüsekulturen und Leguminosen im Vergleich der Referenzperiode (1971–2000) zur nahen (2031–2060) und fernen (2071–2100) Zukunft im Hessischen Ried basierend auf Daten des RCP-Szenarios 8.5



Quelle: Eigene Berechnungen.

7.1.2.3 Alfalfa (Luzerne)

Alfalfa oder auch Luzerne (*Medicago sativa*) ist eine mehrjährige eiweißreiche Futterpflanze, die trockenheitstolerant ist und so in den letzten Jahren wieder an Bedeutung gewonnen hat (FAO, 2024a; Köhler, 2024). Durch ihre tiefen Wurzeln, die in eine Tiefe von bis zu 3 m reichen können, ist Alfalfa in der Lage, Trockenperioden zu überstehen. Allerdings sollte nicht auf flachgründigen Böden angebaut werden, um die Wurzelbildung nicht zu begrenzen (Köhler, 2024). Die erste Aussaat wird Anfang April empfohlen (BSA, 2008) und es kann mehrmals im Jahr gemäht werden (FAO, 2024a). Alfalfa kann in Form von Heu, Pellets, Silage oder als Frischfutter genutzt werden (Steduto et al., 2012).

Der potenzielle Bewässerungsbedarf von Alfalfa ist in Abbildung 88 für die Referenzperiode sowie die nahe und ferne Zukunft abgebildet, die opake Linie stellt jeweils den 30-jährigen Mittelwert dar und die leicht transparente Linie den jährlichen potenziellen Bewässerungsbedarf. Alfalfa weist mit einem Bedarf von durchschnittlich 9 mm/a in der Referenzperiode und bis zu 22 mm/a in der Zukunft einen vergleichsweise geringen Bedarf auf. Der potenzielle Bedarf von Silomais liegt um das 4- bis 5-fache höher. Die Trockenmasseproduktion von Alfalfa ist allerdings i. d. R. geringer als die von Silomais.

Abbildung 88: Potenzieller Bewässerungsbedarf von Alfalfa, Silomais und Leguminosen im Vergleich der Referenzperiode (1971–2000) zur nahen (2031–2060) und fernen (2071–2100) Zukunft im Hessischen Ried basierend auf Daten des RCP-Szenarios 8.5



Quelle: Eigene Berechnungen.

Anmerkung: bei Leguminosen handelt es sich um Körnerleguminosen.

7.1.3 Bewässerungsmanagement: Defizitbewässerung

In diesem Entwicklungsszenario wird ein verändertes Bewässerungsmanagement in Form einer absoluten Defizitbewässerung dargestellt. Bei einer Defizitbewässerung handelt es sich um eine Bewässerung unterhalb der Evapotranspirationsansprüche der Kulturen. Dabei werden (leichte) Ertrags- und Qualitätseinbußen in Kauf genommen. Die bisherigen Bewässerungsschwellen, welche bereits eher in den Bereich Defizitbewässerung fallen, werden auf ein absolutes Minimum gesenkt. Die neuen Werte orientieren sich an der Literatur sowie an Daten zu Bewässerungsversuchen (Müller et al., 2020b; Paschold, 2010; Butz, 2018; LTZ, 2015; Laber, 2015; LWK Niedersachsen, 2023) und die Schwellen werden um 5–15 %-Punkte gesenkt. Von der Senkung der Bewässerungsschwellen ausgenommen sind die Kulturen und Kulturaggregate Beerenobst, Wein sowie Kern- und Steinobst und sonstige Dauerkulturen; für diese konnten bei der Recherche keine niedrigeren Schwellen ermittelt werden.

Tabelle 35 zeigt die Veränderung des durchschnittlichen potenziellen Bewässerungsbedarfs in der nahen und fernen Zukunft bei Standard- und Defizitbewässerung. Bei der Standardbewässerung liegt der Anstieg des potenziellen Bedarfs im Vergleich zur Referenzperiode in der nahen Zukunft bei 13 mm und in der fernen Zukunft bei 20 mm. Die Zunahmen schwanken kulturspezifisch zwischen 3 mm und 50 mm. Bei der Defizitbewässerung fallen die durchschnittlichen Zunahmen etwas geringer aus, in der nahen Zukunft liegt der Anstieg bei 11 mm und bei 20 mm in der fernen Zukunft. Bei den verschiedenen Kulturen liegt die Zunahme zwischen 2 mm und 42 mm.

Tabelle 35: Vergleich der Veränderung der potenziellen Bewässerungsbedarfe (in mm/a) in der nahen (2031–2060) und fernen Zukunft (2071–2100) zur Referenzperiode (1971–2000) bei Standard- und Defizitbewässerung im Hessischen Ried

Kulturaggregate	Standardbewässerung		Defizitbewässerung	
	Nahe Zukunft	Ferne Zukunft	Nahe Zukunft	Ferne Zukunft
Winterweizen	10	13	8	11
Wintergerste	7	5	7	4
Winterroggen und sonstige Wintergetreide	8	17	7	14
Sommerweizen	17	26	17	26
Sommergerste	18	26	15	20
Hafer und sonstige Sommergetreide	16	27	16	27
Triticale	7	14	6	11
Raps	8	3	6	3
Silomais	14	28	12	23
Körnermais	13	26	11	21
Hülsenfrüchte/Eiweißpflanzen	15	26	13	22
Futtermübe und andere Rüben	7	12	2	2
Kartoffeln	20	30	16	24
Zuckerrüben	10	20	4	9
Gemüse	15	43	13	32
Erdbeeren	26	45	25	41
sonstige Handelsgewächse	16	50	16	42

Quelle: Eigene Berechnungen.

7.1.4 Bewässerungstechnologien

Die Bewässerung im Hessischen Ried ist zu 85 % durch mobile Beregnungsmaschinen geprägt, Reihenregner und Tropfbewässerung spielen eine untergeordnete Rolle (HLNUG, 2008). Linear- und Kreisberegnungsanlagen spielen aufgrund der kleinräumigen Feldstrukturen keine Rolle. Die Technologien unterscheiden sich hinsichtlich der Wasserverteilungseffizienz. Diese beschreibt den Anteil des ausgebrachten Wassers, das von der Pflanze im Wurzelraum genutzt werden kann (Irmak et al., 2011). Mobile Beregnungsmaschinen und Reihenregner weisen eine geringe Effizienz auf, während Tropfbewässerung die höchste Effizienz zugeordnet wird. Neben der Verteilungseffizienz unterscheiden sich die Techniken auch in weiteren Eigenschaften, unter anderem in ihrer Eignung im Einsatz der verschiedenen Kulturen (vgl. Tabelle 2).

Für die verschiedenen Technologien wurde der potenzielle Bewässerungsbedarf für die einzelnen Kulturen modelliert, um so die Auswirkungen der Effizienzunterschiede auf den potenziellen Bewässerungsbedarf im Klimawandel darzustellen. Die Ergebnisse werden für die Kulturen Kartoffeln, Gemüse und für die Referenzperiode (1971–2000), die nahe (2031–2060) und die ferne Zukunft (2071–100) dargestellt, für weitere Kulturen finden sich die Ergebnisse im Anhang in Tabelle A5 bis Tabelle A17.

Für Kartoffeln sind die potenziellen Bewässerungsbedarfe in Abhängigkeit von der genutzten Technologie in Tabelle 36 dargestellt. Im Vergleich der Technologien ist der potentielle Bewässerungsbedarf für die mobile Beregnungsmaschine mit Düsenwagen über alle Perioden geringer als bei der Bewässerung mit einer mobilen Beregnungsmaschine mit Starkregner. Im Vergleich zum Starkregner liegt der Bedarf um 42 % niedriger. Die Zunahme über die Perioden liegt bei beiden mobilen Beregnungsmaschinen im Bereich von 28-29 %.

Tabelle 36: Potenzieller Bewässerungsbedarf für Kartoffeln im Hessischen Ried im Technologievergleich

	Referenzperiode	Nahe Zukunft	Ferne Zukunft
Mobile Beregnungsmaschine mit Starkregner [mm / a]	218	260	282
Mobile Beregnungsmaschine mit Düsenwagen [mm / a]	126	150	162

Quelle: Eigene Berechnungen.

Bei der Bewässerung von Gemüse ist der potenzielle Bewässerungsbedarf bei einer Rohrberegnung in allen Perioden am höchsten (Tabelle 37). Der potenzielle Bedarf der Tropfbewässerung liegt etwa 24 % unter dem potenziellen Bedarf der Rohrbewässerung. Auch die Zunahme über die Perioden ist bei der Tropfbewässerung mit 68 mm wieder am geringsten, aber liegt prozentual um gut 3 % höher als bei der Rohrberegnung.

Tabelle 37: Potenzieller Bewässerungsbedarf für Gemüse im Hessischen Ried im Technologievergleich

	Referenzperiode	Nahe Zukunft	Ferne Zukunft
Tropfbewässerung [mm / a]	186	212	254
Rohrberegnung [mm / a]	249	281	331

Quelle: Eigene Berechnungen.

7.2 Alternative Wasserressourcen

In dieser Studie werden Oberflächenwasser, aufbereitetes Abwasser und Regenwasser als alternative Wasserressourcen zum Grundwasser, welches in Hessen die dominierende Wasserquelle ist (vgl. Tabelle 28 und Tabelle 29), betrachtet. Bei Oberflächenwasser handelt es sich um Wasser aus an der Erdoberfläche stehenden oder fließenden Gewässern, mit Ausnahme des Grundwassers. Regenwasser ist definiert als Niederschlag, bevor dieser ein Oberflächengewässer erreicht. Aufbereitetes Abwasser umfasst kommunales Abwasser, das gemäß den Anforderungen der Richtlinie 91/271/EWG (Richtlinie über die Behandlung von kommunalem Abwasser)

behandelt wurde und in einer Aufbereitungseinrichtung gemäß Anhang I Abschnitt 2 der Verordnung (EU) 2020/741 weiterbehandelt wurde.

Bei allen Wasserressourcen sind die Qualitätskriterien für Bewässerungswasser (wie in Kapitel 2.2 dargestellt) einzuhalten, wenn damit bewässert werden soll. Dem Grundwasser wird allgemein eine gute bis sehr gute Qualität im Hinblick auf dessen Eignung zur Bewässerung zugesprochen (Pfleger 2009). Während Wasser aus stehenden Gewässern meist eine für die Bewässerung ausreichende Qualität aufweist, besteht bei Wasser aus fließenden Gewässern die Gefahr von Verunreinigungen, z. B. durch Einleitung von Kläranlagenabfluss oder andere Eintragungen. Die Qualität von Regenwasser ist für gewöhnlich gut, ist aber abhängig vom Abflussmaterial und dessen Verschmutzungsgrad (Schwaller et al., 2020). Bei aufbereitetem Abwasser sind die Aufbereitungsstufe und verwendeten Aufbereitungsverfahren ausschlaggebend für die Qualität.

7.2.1 Oberflächenwasser

Entnahmen aus Oberflächengewässern unterliegen den Grundsätzen zur Gewässerbewirtschaftung des WHG. Diese besagen, dass es durch die Entnahmen zu keiner Einschränkung/Schädigung der Funktions- und Leistungsfähigkeit des Gewässers kommen darf. Die natürlichen und schadlosen Abflussverhältnisse müssen erhalten und nachteilige Hochwasserfolgen vermieden werden (§ 6 WHG). Zudem sind Entnahmen nur zulässig, wenn die, für das Gewässer und andere verbundene Gewässer, notwendige Abflussmenge zur Erhaltung der Funktionalität nicht gefährdet wird (§ 33 WHG).

Die Entnahme von Wasser aus Oberflächengewässern bedarf einer Erlaubnis oder Bewilligung gemäß § 8 WHG durch die zuständige Wasserbehörde – in Hessen das jeweilige Regierungspräsidium – und ggf. eine Umweltverträglichkeitsprüfung. Entnahmeverbote oder Einschränkungen der Verbote bei niedrigen Abflüssen oder Wasserständen werden im Erlaubnisbescheid oder über gesonderte Anordnungen geregelt. Allgemeine Entnahmeverbote für die Bevölkerung gelten dagegen nicht für die zugelassenen Benutzungen (Regierungspräsidium Darmstadt, 2024a).

Bei der Festlegung von Entnahmemengen und -raten muss berücksichtigt werden, dass v. a. in trockenen Monaten keine negativen Auswirkungen für die Umwelt auftreten. Die potenzielle Entnahmerate ergibt sich aus dem Gesamtabfluss und dem ökologischen Mindestabfluss. Der Gesamtabfluss ist durch durchschnittliche Monatsabflüsse abbildbar, während der ökologische Mindestfluss mittels biologischer hydraulischer Analysen und mittleren Niedrigabflüssen ermittelt wird (Michel und Sourell, 2014). In Hessen legt der Erlass „Regelung zur Ermittlung der Mindestwasserführung in Ausleitungsstrecken hessischer Fließgewässer“⁵ für Entnahmen ohne Wiedereinleitung, zu denen auch Entnahmen für die Bewässerung und Frostschutzberegnung zählen, fest, dass die einzelnen Entnahmemengen $0,2 \times \text{MNQ}$ nicht überschreiten dürfen. Zudem darf an nahe beieinanderliegenden Entnahmestellen nicht zeitgleich entnommen werden, und wenn der Abfluss unter den MNQ fällt, ist ebenfalls keine Entnahme möglich. Durch saisonale Schwankungen im Abfluss ist es möglich, dass zu einigen Zeitpunkten kein Wasser entnommen werden kann. In diesem Fall sollte eine (Zwischen-)Speicherung in Betracht gezogen werden.

Qualität von Oberflächenwasser in Hessen

Für die Bewertung der qualitativen Eignung als Bewässerungswasser sollten sowohl mikrobiologische als auch chemische Parameter herangezogen werden, wie die Qualitätsanforderungen an Bewässerungswasser zeigen (siehe Kapitel 2.2). In Hessen erfolgt nur eine Überwachung von chemischen Parametern zur Erfüllung der WRRL, wobei nicht alle Parameter kontinuierlich an allen Messstellen erfasst werden.

⁵ Regelung zur Ermittlung der Mindestwasserführung in Ausleitungsstrecken hessischer Fließgewässer, StAnz. 2023, 267. <https://www.rv.hessenrecht.hessen.de/bshe/document/VVHE-VVHE000019532>

In Tabelle 38 sind die mittleren Messwerte für verschiedene chemische Qualitätsparameter in 2023 für ausgewählte Fließgewässer dargestellt. Die Grenzwerte für Eisen werden an verschiedenen Messstellen überschritten. Diese Überschreitung des Grenzwertes von Eisen stellt aber vor allem ein technisches Problem dar, da sie zur Verstopfung von Tropfbewässerungssystemen führen kann. Wird das Bewässerungswasser vor der Nutzung gespeichert, kann sich unter guter Belüftung das Eisen absetzen und Verstopfungen der Tropfschläuche vorgebeugt werden (Mayer, 2006).

Bei den Messstellen an der Werra werden die Grenzwerte für Chlorid, Natrium, Sulfat und elektrische Leitfähigkeit überschritten. Diese Parameter sind alle Indikatoren für die Salzhaltigkeit des Wassers. Die Werra eignet sich somit nicht als Wasserquelle für die Beregnung und entnommenes Wasser muss ggf. mit weniger salzhaltigem Wasser verdünnt werden. Erklären lassen sich die hohen Konzentrationen durch die Kaliindustrie entlang der Werra; diese nutzt die Werra und Ulster als Vorfluter für Salzabwässer (Regierungspräsidium Kassel, 2007).

Tabelle 38: Exemplarische Darstellung der Fließgewässerwasserqualität (2023)

Messstelle	BSB ₅ (mg/l)	Chlorid (mg/l)	Eisen (mg/l)	Natrium (mg/l)	Nitrat (mg/l)	Sulfat (mg/l)	Elektrische Leitfähigkeit (mS/m)
Landgraben Lorsch 786	-	70,00	0,58	39,07	1,37	27,88	61,58
Landgraben Trebur Brücke L3012 109	-	207,33	0,21	137,26	1,61	113,63	135,75
Main Bischofsheim Messstation linkes Ufer 131	-	50,85	0,40	33,06	3,73	73,12	60,43
Main Bischofsheim Messstation rechtes Ufer 130	1,53	53,27	0,24	34,84	3,60	74,81	56,56
Main Frankfurt Nied Messstation 133	-	42,66	0,33	27,57	3,54	73,90	62,08
Main Seligenstadt Flusskilometer 67 6 links 134	-	39,83	0,31	26,46	3,60	69,97	61,92
Schwarzbach Hattersheim am Main Okriftel 204	-	47,17	0,36	31,33	3,90	13,66	40,83
Schwarzbach Hofheim am Taunus 205	-	36,92	0,33	24,28	3,30	0,00	35,58
Schwarzbach Trebur Astheim Messstation 115	2,04	139,44	0,28	91,43	2,89	90,27	104,78
Schwarzbach Wiesbaden 900	-	11,04	0,40	8,58	2,08	17,68	31,83
Schwarzen Bach Guxhagen 350	-	34,33	0,41	19,98	2,42	48,05	44,92
Schwarzer Graben Heringen 902	-	27,88	0,27	15,94	8,44	44,21	41,63
Werbe Waldeck Nieder Werbe 282	-	40,36	0,16	19,43	6,32	33,47	68,36
Werra Heringen Widdershausen 271	-	974,17	0,18	398,67	3,18	317,42	388,17
Werra Witzhausen Bickershausen Messstation 269	2,12	666,52	0,30	293,87	3,11	308,90	317,78
Wesnitz Biblis Wattenheim – Mündung Halbmaasgraben 107	-	82,21	0,28	47,98	3,74	24,22	63,17
Wesnitz Birke 106	-	23,67	0,38	15,33	3,26	11,69	36,92
Grenzwerte¹	10	250/500	0,2	100	300	120	200/300

Anm.: - = keine Messung erfolgt. ¹Bei den Parametern Natrium, Sulfat und Nitrat gelten die Grenzwerte für salzempfindliche Pflanzen, bei Chlorid und elektrischer Leitfähigkeit gilt erster Wert für salzempfindliche Pflanzen und der Wert nach dem Schrägstrich für salzunempfindliche Pflanzen.

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf HLNUG (2024b), Mayer (2006) und Pflieger (2009).

Beispiele zur Verwendung von Oberflächenwasser für die Beregnung

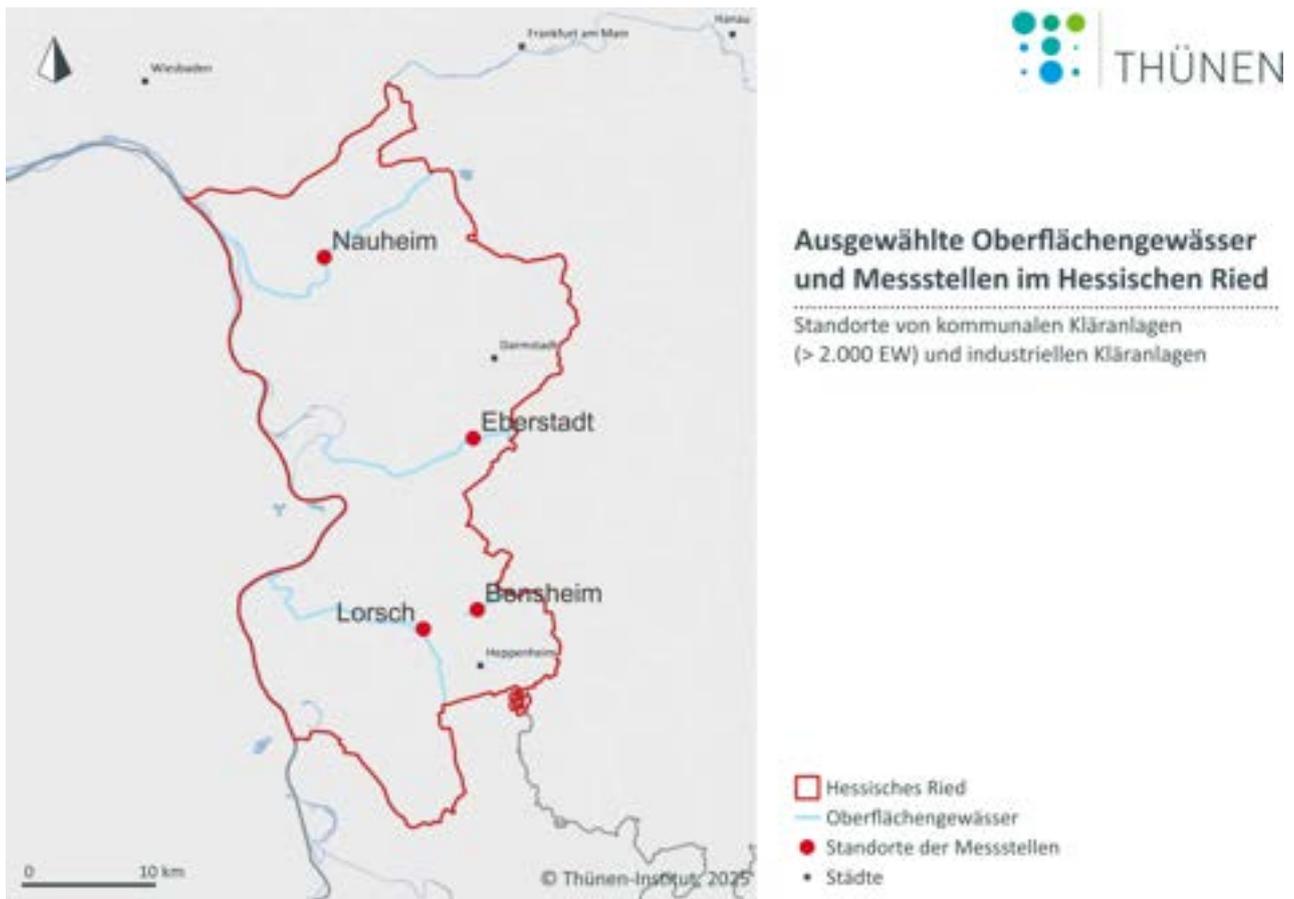
In Hessen werden vom Beregnungswasserverband Hessisches Ried (WHR-Beregnung) jährlich bereits 5 Mio. m³ Wasser aus dem Rhein entnommen und nach Aufbereitung über ein Verteilungsnetz von 290 km für die Bewässerung von 5.400 ha landwirtschaftlicher Fläche zur Verfügung gestellt. Für die Infiltration und somit zur Grundwasseranreicherung werden weitere 38 Mio. m³ Rheinwasser aufbereitet (Seis et al., 2016). Die Aufbereitung erfolgt kombiniert aus chemischen, physikalischen und mikrobiologischen Prozessen und die so erreicht hohe Qualität, die nahezu Trinkwasserqualitätsansprüche erfüllt, ermöglicht eine uneingeschränkte Verwendung des Wassers für die Bewässerung – auch für die Bewässerung von für den Rohverzehr vorgesehene Kulturen (Wasserverband Hessisches Ried, 2021).

Ein weiteres Beispiel für verbandliche Entnahme und zur Verfügungstellung von Oberflächenwasser ist der Beregnungsverband Vorderpfalz in Rheinlandpfalz. Dort wird aus einem Altrheinarm Wasser entnommen und über ein 600 km langes Verteilungsnetz für die Bewässerung von 5.400 ha landwirtschaftlicher Fläche genutzt. Der Bau mit Kosten von 100 Mio. DM wurde 1980 zu 90 % aus Fördergeldern der EU und des Landes Rheinland-Pfalz finanziert. 2010 erfolgte die Finanzierung von 9 Mio. € zu 50 % durch das Land Rheinland-Pfalz, zu 30 % durch den Verband und zu 20 % durch die Landwirt*innen des Verbandes (Seis et al., 2016).

Quantifizierung des Potenzials im Hessischen Ried

Die Quantifizierung des Potenzials von Oberflächenwasser für die Bewässerung wird exemplarisch für die vier Oberflächengewässer Schwarzbach, Lauter, Modau und Weschnitz im Hessischen Ried durchgeführt. Bei diesen Fließgewässern handelt es sich um Gewässer 2. Ordnung (HWG § 2 und Anlage 2) und der tägliche Durchfluss wird jeweils an einer Messstation ermittelt. Die ausgewählten Gewässer und die zugehörigen Messstationen sind in Abbildung 89 dargestellt, wichtige hydrologische Kennwerte in Tabelle 39.

Abbildung 89: Ausgewählte Oberflächengewässer und Messstellen im Hessischen Ried



Quelle: Eigene Darstellung.

Die Gewässer weisen einen täglichen durchschnittlichen Durchfluss (MQ) zwischen 0,28 und 3,2 m³/Sekunde auf, wobei der Lauter an der Messstelle Bensheim den geringsten Durchfluss und die Weschnitz an der Messstelle Lorsch den höchsten Durchfluss aufweisen. Unter Berücksichtigung des Erlasses „Regelung zur Ermittlung der Mindestwasserführung in Ausleitungstrecken hessischer Fließgewässer“ und dem jeweiligen MNQ lassen sich die maximal möglichen täglichen Entnahmemengen pro Entnahmerecht, wenn keine weitere Entnahme innerhalb kurzer Entfernung erfolgt, bestimmen. Aus dem Schwarzbach können bis zu 3.283 m³ pro Tag, aus der Lauter 1.728 m³ pro Tag und aus der Modau 4.665 m³ pro Tag entnommen werden. Die Weschnitz birgt mit einer möglichen Entnahmemenge von 19.353 m³ pro Tag das größte Potenzial.

Tabelle 39: Hydrologische Kennwerte zu den ausgewählten Oberflächengewässer

		Schwarzbach	Lauter	Modau	Weschnitz
Messstellennummer		23980353	23950104	23960709	23942300
Messstellenname		Nauheim	Bensheim	Eberstadt	Lorsch
Einzugsgebiet	km ²	134,60	26,30	90,60	382,80
MNQ	m ³ /Sek	0,19	0,1	0,27	1,12
MQ	m ³ /Sek	0,6	0,28	0,77	3,2
MHQ	m ³ /Sek	2,21	3,67	10,2	25
HHQ	m ³ /Sek	5	10,6	22	48,7
Erlaubte Entnahmemenge	m ³ /Sek	0,038	0,02	0,054	0,224
Erlaubte Entnahmemenge	m ³ /Tag	3.283,2	1.728	4.665,6	19.353,6

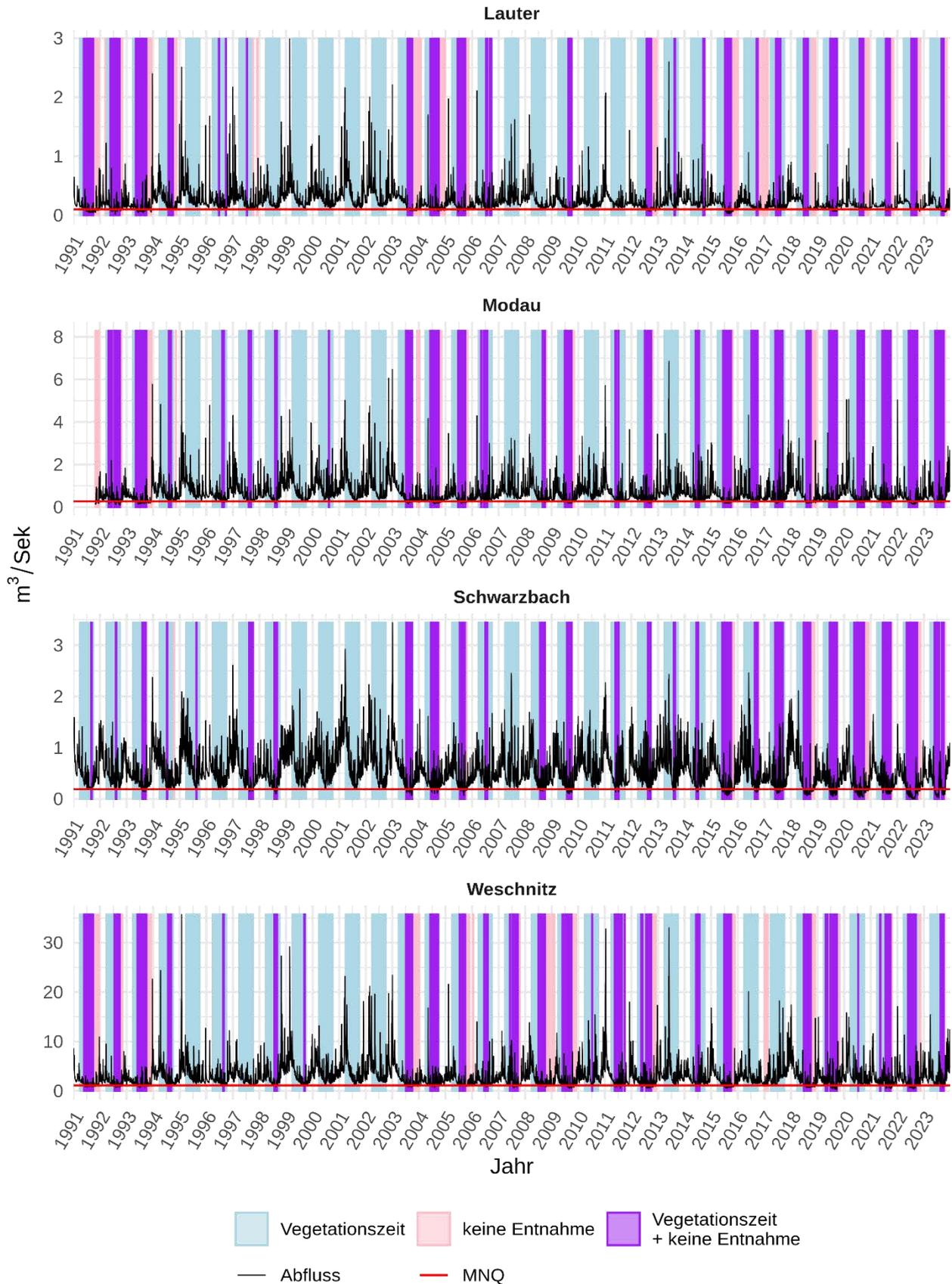
Anm.: MNQ = Mittlerer Niedrigwasserabschluss; MQ = Mittlerer Abfluss; MHQ = Mittlerer Hochwasserabfluss; höchster Hochwasserabfluss

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf HLNUG (2024a).

In Abbildung 90 ist der tägliche Durchfluss sowie der MNQ von Schwarzbach, Lauter, Modau und Weschnitz von 1991 bis 2024 abgebildet. Zudem sind die Vegetationszeiträume, zu denen eine Bewässerung notwendig sein kann, hellblau gekennzeichnet. Zeiträume, in denen der MNQ unterschritten wird und somit keine Wasserentnahme möglich ist, sind rot gekennzeichnet, und kommt es zu einer Überschneidung von Vegetationszeit und keiner Entnahme, sind die Zeiträume lila hinterlegt. Es ist für alle vier Oberflächengewässer zu sehen, dass es Jahre gibt, in denen es zu keiner Einschränkung der Entnahmen kommt wie in beispielsweise 2001 und 2002. Gleichzeitig ist auch erkennbar, dass in den meisten Jahren phasenweise keine Entnahmen innerhalb der Vegetationszeit möglich sind. Gegen Ende des betrachteten Zeitraums kommen die Entnahmeeinschränkungen im Vegetationszeitraum nahezu jährlich vor und werden teilweise auch länger. Dies zeigen auch Abbildung 91 und Abbildung 92, welche den Anteil des Jahres bzw. des Vegetationszeitraums darstellen, in dem keine Entnahme möglich ist, sowie die maximale Länge der Periode ohne Entnahmemöglichkeit darstellen.

Durchschnittlich sind an 35 bis 46 Tagen bezogen auf das gesamte Jahr und an 29 bis 34 Tagen während der Vegetationszeit keine Entnahmen möglich. Dies entspricht bis zu 13 % des gesamten Jahres und bis zu 19 % des Vegetationszeitraums. In besonders trockenen Jahren wie beispielsweise 2015 und 2018 kommt es zu Einschränkungen in bis zu 44 % des gesamten Jahres und bis zu 69 % des Vegetationszeitraums. Eine Einschränkung der Entnahme an einzelnen Tagen ist weniger problematisch als Einschränkungen der Entnahmen über einen längeren Zeitraum, durchschnittlich sind die Entnahmen an zwölf bis 15 aufeinanderfolgenden Tagen im gesamten Jahr und an zehn bis 13 aufeinanderfolgenden Tagen während des Vegetationszeitraums eingeschränkt. Solche Perioden ohne Wasserentnahmemöglichkeit können ohne weitere Wasserquelle oder Speichermöglichkeit insbesondere beim Anbau von Gemüsekulturen zu Problemen führen.

Abbildung 90: Täglicher Durchfluss der Oberflächengewässer von 1991 bis 2023

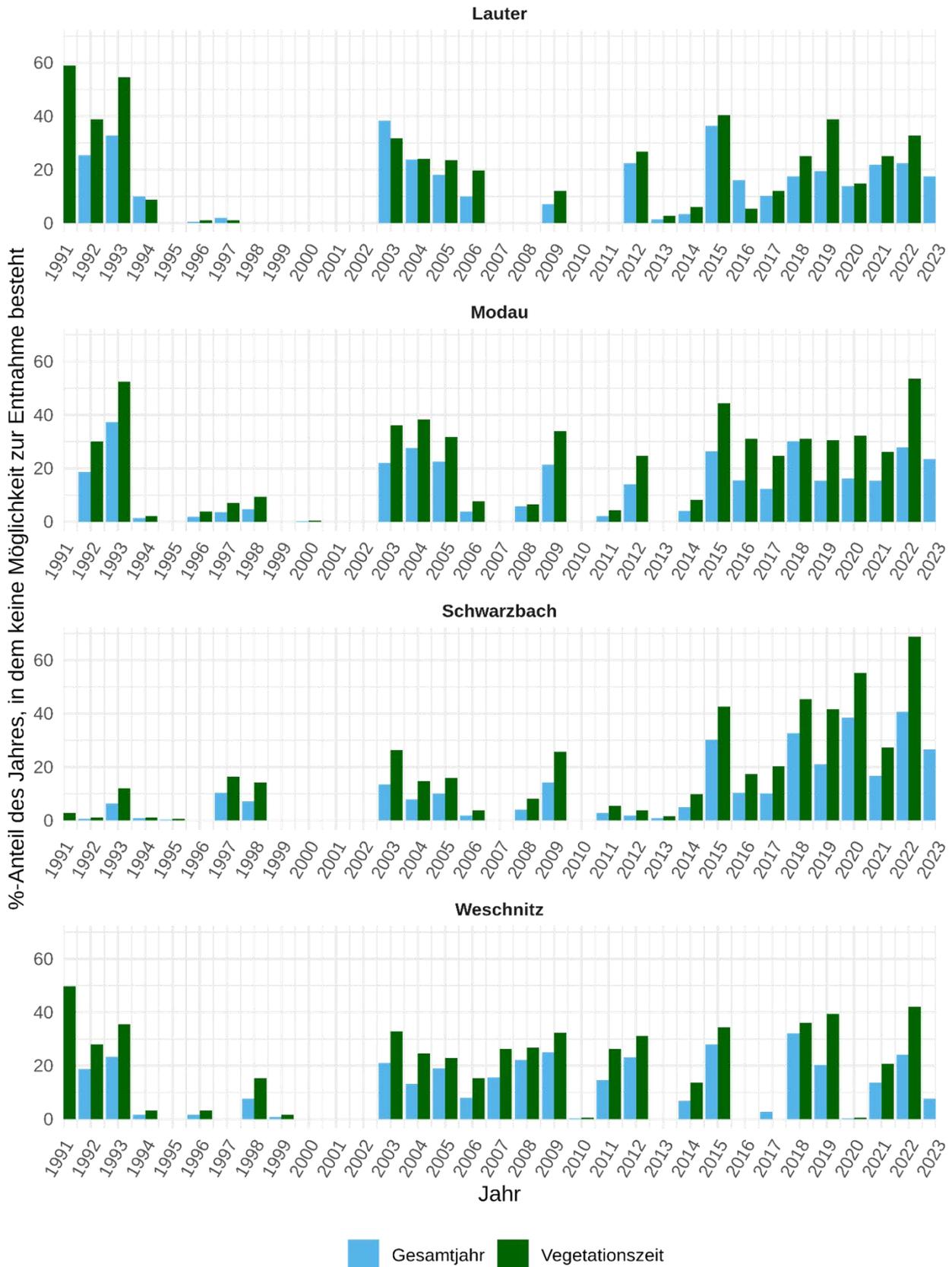


Quelle: Eigene Abbildung basierend auf HLNUG (2024a).

Die Summe der täglichen Entnahmemengen mit einer Entnahmedauer von 24 Stunden unter Berücksichtigung von Tagen ohne Entnahmemöglichkeit, ergeben theoretische mittlere Potenziale zwischen 557.107 m³ (Lauter) und 6.262.535 m³ (Weschnitz) für ein gesamtes Jahr. Für den Vegetationszeitraum liegen die mittleren Potenziale zwischen 269.165 m³ (Lauter) und 2.952.069 m³ (Weschnitz). Die Entwicklungen der theoretischen Potenziale von 1911 bis 2023 sind in Abbildung 93 dargestellt. Dabei ist aber zu beachten, dass es weitere Wasserentnahmen am Oberflächengewässer geben kann. Zum einen wird dies einen Einfluss auf den Durchfluss haben und diesen verringern. Zum anderen kann bei weiteren Entnahmen in geringer Distanz das Entnahmezeitfenster begrenzt werden, wodurch sich die Entnahmemenge entsprechend verringern wird.

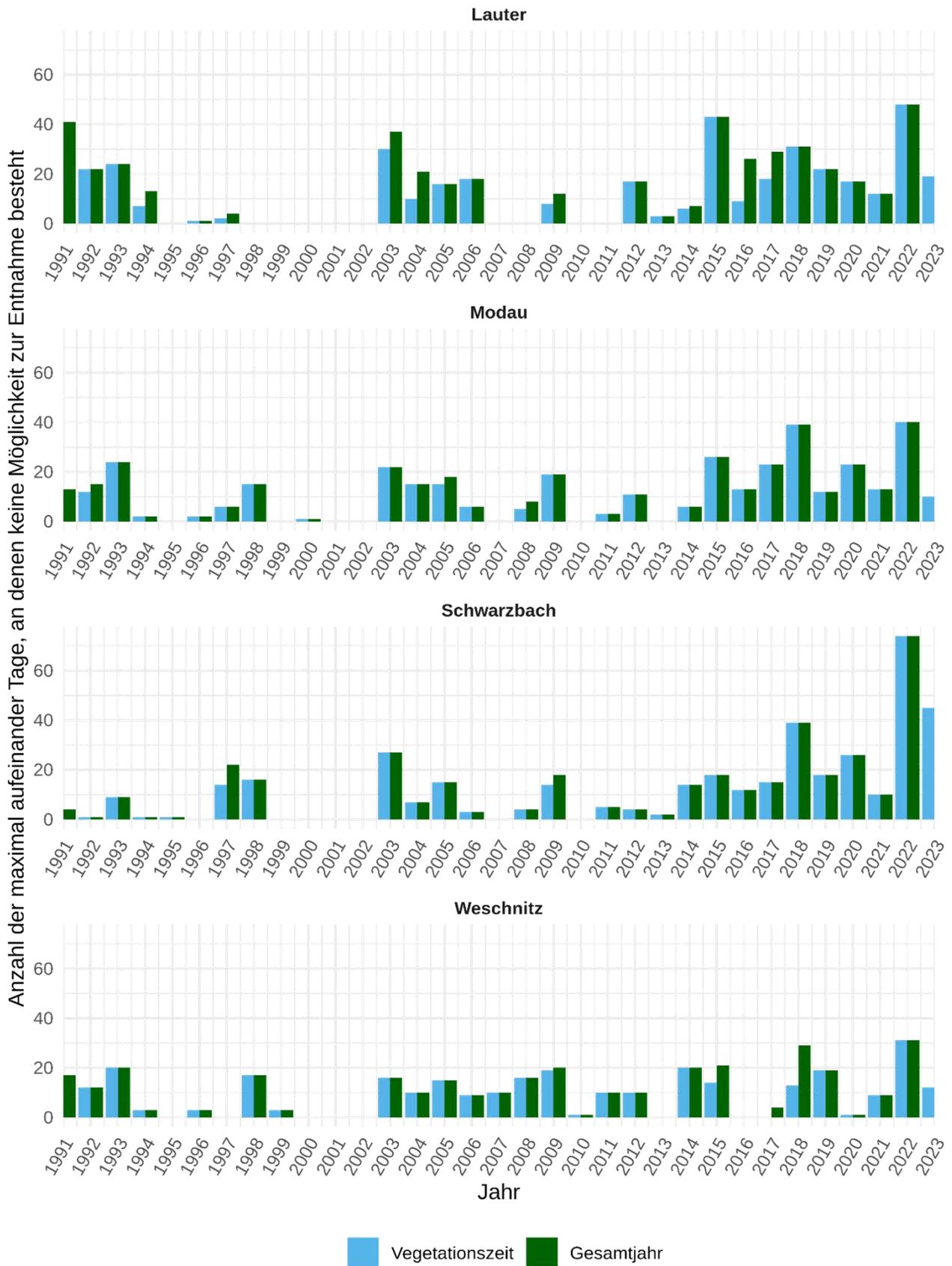
Durch Berücksichtigung der mittleren potenziellen Bewässerungsbedarfe von den Gemeinden der Messstationen lassen sich die potenziell bewässerbaren Flächen bei einer Entnahmedauer von 24 Stunden berechnen, welche in Tabelle 40 dargestellt sind. Mit dem Wasser aus den Oberflächengewässern würden sich zwischen 993 ha (Schwarzbach) und 6.253 ha (Weschnitz) in der Vegetationszeit bewässern lassen. Wird das gesamte Jahr betrachtet, könnte jeweils mehr als das doppelte der Fläche in der Vegetationszeit bewässert werden. Allerdings ist dabei zu berücksichtigen, dass eine Zwischenspeicherung des außerhalb der Vegetationszeit entnommenen Oberflächenwassers notwendig wäre, um das Wasser entsprechend in der Vegetationszeit nutzen zu können. Das Verhältnis des durchschnittlichen theoretischen Potentials der Oberflächengewässer zu den derzeitigen Entnahmemengen für Bewässerung im Hessischen Ried, zeigt, dass das theoretische Potenzial von Oberflächenwasser für das gesamte Jahr durchschnittlich etwa der 4,4-fachen im Hessischen Ried für die Bewässerung entnommenen Wassermenge im Zeitraum 2002–2020 entspricht. Das durchschnittliche theoretische Potenzial in der Vegetationszeit entspricht dem 1,6-fachen der im Hessischen Ried für die Bewässerung entnommenen Wassermenge, allerdings gibt es auch Jahre, in denen das theoretische Potenzial unter der im Hessischen Ried entnommenen Menge liegt – beispielsweise in den Jahren 2018 bis 2020.

Abbildung 91: Prozentualer Anteil des Jahres bzw. Vegetationszeitraums, in dem keine Entnahme von Wasser möglich ist



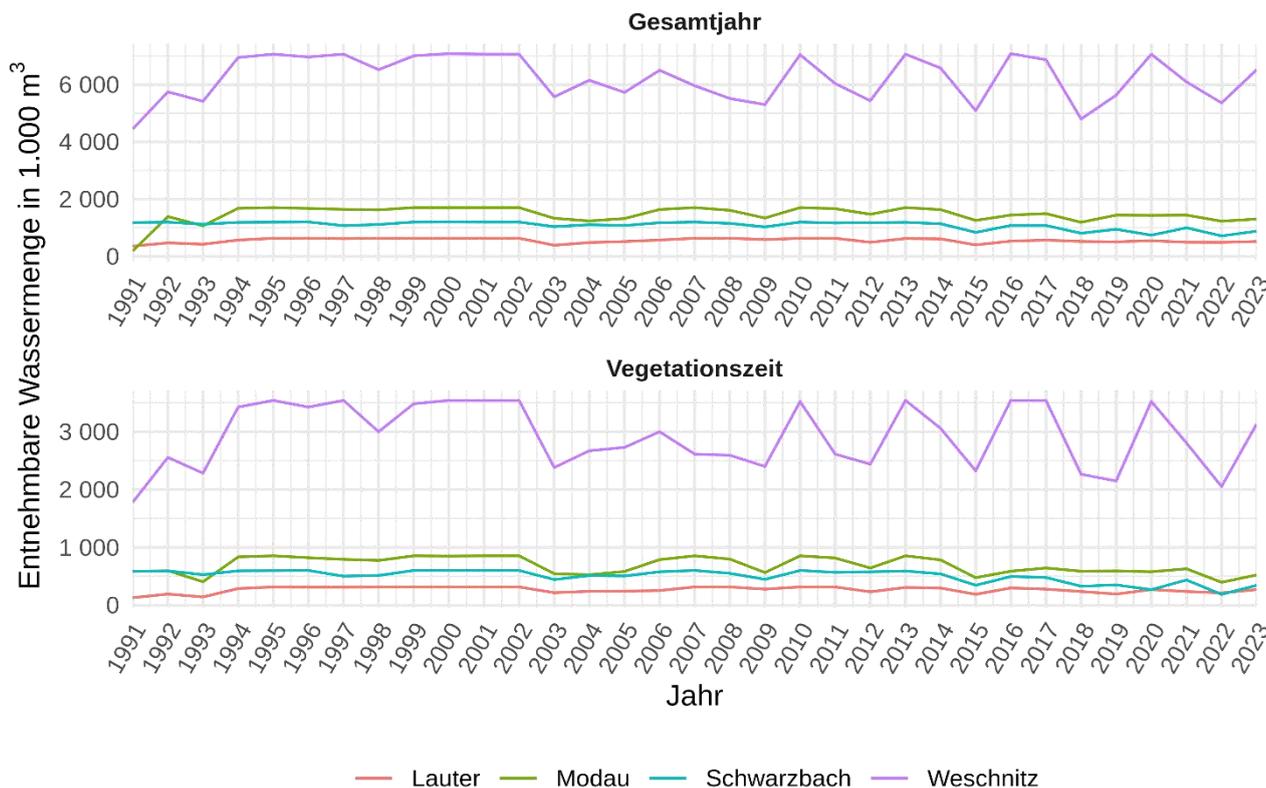
Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 92: Jährliche Anzahl an aufeinanderfolgenden Tagen ohne Entnahmemöglichkeit



Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 93: Jährlich entnehmbare Wassermengen aus den Oberflächengewässern



Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle 40: Mit dem entnommenen Oberflächenwasser potenziell bewässerbare Flächen (in ha)

	Entnehmbare Wassermenge		Durchschnittlicher Bewässerungsbedarf	Bewässerbare Flächen	
	Gesamtjahr	Vegetationszeit		Gesamtjahr	Vegetationszeit
	m ³	m ³	m ³ /ha	ha	ha
Lauter	557.107	269.165	339	2.208	1.082
Modau	1.479.462	709.332	608	2.937	1.422
Schwarzbach	1.106.548	523.561	681	2.075	993
Weschnitz	6.261.535	2.952.069	605	13.089	6.253

Quelle: Eigene Berechnungen.

7.2.2 Regenwasser

Regenwasser kann von Dächern, anderen versiegelten Flächen, aus Drainagen oder Trennsystemen der Kanalisation gesammelt und für die Bewässerung genutzt werden. Da die Menge an verfügbarem Bewässerungswasser durch die Niederschlagshäufigkeit und -menge begrenzt ist, ergibt sich die Notwendigkeit einer Wasserspeicherung (Liuzzo et al., 2016).

Aus qualitativer Sicht eignet sich Regenwasser allgemein für die Bewässerung, da es natriumarm sowie nahezu pH-neutral und relativ weich ist. Es gilt auch als relativ unverschmutzt, allerdings hängt dies stark vom Abflussmaterial ab. Durch unterschiedliche Dachmaterialien, Umweltbedingungen und atmosphärische Verschmutzung kann es aber zu starken Qualitätsunterschieden kommen. Eine nicht-repräsentative Untersuchung von Wasser aus Regenrückhaltebecken im Raum Schweinfurt von Schwaller et al. (2020) zeigt zum

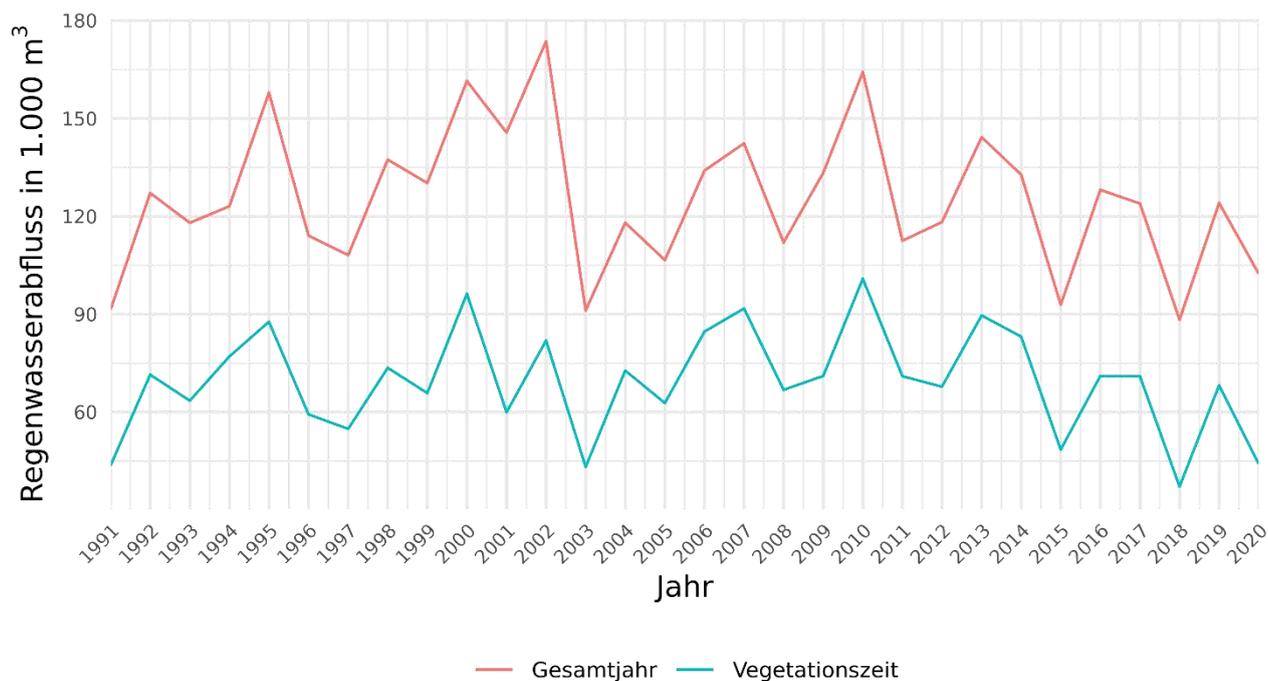
einen eine Belastung mit Schwer- und Leichtmetallen (z. B. Aluminium, Zink, Blei). Diese kann durch Erosion des Materials von Ablauflächen und Abtragung durch das abfließende Regenwasser entstehen. Zum anderen konnte auch eine Belastung mit coliformen Keimen festgestellt werden. Diese Verunreinigung kann durch Verschmutzung der Ablauflächen und von offenen Becken durch Fäkalien von Vögeln und anderen Tieren entstehen. Zudem sind auch Belastungen durch organische Spurenstoffe möglich, diese kommen vor allem aufgrund von falsch angeschlossenen Abwasserkanälen zustande. Zudem sind auch Verunreinigungen durch Weichmacher, Insektizide, Biozide, Fungizide und Herbizide, aber auch Abgase möglich (Schwaller et al., 2020).

Das Arbeitsblatt DWA-A 102-2/BWK-A 3-2 teilt Flächen nach Typ und Nutzung in drei Belastungskategorien ein (DWA, 2020). Die Kategorie I umfasst gering belastetes Niederschlagswasser, welches ohne Behandlung in Oberflächengewässer eingeleitet werden kann. In diese Kategorie fallen unter anderem Dachflächen, so lange weniger als 20 % der Dachfläche aus Materialien bestehen, die signifikante Belastungen mit gewässerschädlichen Substanzen hervorrufen können. In die Belastungskategorie II werden neben anderen Flächen Dachflächen mit einem Anteil von 20 bis 70 % an Materialien, die zu gewässerschädigenden Belastungen führen können, sowie landwirtschaftliche Hofflächen von Betrieben ohne Viehhaltung oder solchen, die nicht zu einer Beeinträchtigung der Qualität des Niederschlagswasser führen, gezählt. Die Belastungskategorie III umfasst Dachflächen mit einem Anteil von mehr als 70 % an gewässerschädigenden Materialien sowie landwirtschaftliche Hofflächen, die nicht in Kategorie II fallen. Niederschlagsabflüsse der Kategorien II und III sollten nicht ohne Behandlung in Oberflächengewässer eingeleitet werden (DWA, 2020). Aus dieser Einteilung lässt sich ableiten, dass die Belastungskategorien II und III nur bedingt für die Bewässerung geeignet sind bzw. eine Behandlung des gesammelten Wassers notwendig sein wird, um die Qualitätsanforderungen an Bewässerungswasser (siehe Kapitel 2.3) zu erfüllen. Aber auch bei gesammeltem Niederschlagswasser von Flächen der Kategorie I sollte die Qualität bei der Verwendung als Bewässerungswasser regelmäßig überprüft werden.

Regenwasser lässt sich beispielsweise von betrieblichen Dachflächen oder über Trennsysteme, bei denen Niederschlagswasser getrennt von Abwasser in einem separaten Kanal abgeleitet wird, sammeln. In Hessen besteht das Kanalsystem zu 17 % bezogen auf die Kanalsystemlänge aus einem Trennsystem mit separatem Kanal für Niederschlagswasser. Angeschlossen an die separaten Kanäle sind 561 Regenrückhaltebecken und 22 Regenklärsysteme (HMUKLV, 2023a). Regenwasser aus diesem System ließe sich für die Bewässerung nutzen, dabei ist aber die Lage des Trennsystems von Bedeutung. Denn eine Nutzung des Regenwassers ist nur möglich, wenn es in der Nähe eines Nutzungsortes für die Bewässerung anfällt, da andernfalls die Kosten für den Transport zum Einsatzort eine Nutzung unwirtschaftlich machen könnten. Zudem lässt sich in urbanen Räumen anfallendes Regenwasser auch für die Bewässerung von Parks und Sportplätzen nutzen. Aus diesem Grund werden für die Quantifizierung des Potenzials nur Regenwasserabflüsse von Dachflächen landwirtschaftlicher Betriebe berücksichtigt, da bei diesen die Nähe zum Einsatzort gegeben ist.

Quantifizierung des Potenzials im Hessischen Ried

Bei der Quantifizierung des mengenmäßigen Potenzials von Regenwasserabflüssen von landwirtschaftlichen Dachflächen können im Hessischen Ried 236.872 m² Dachflächen berücksichtigt werden. Von den Dachflächen fließen 1991–2020 durchschnittlich 530,6 l/m² ab, woraus sich ein theoretisches durchschnittliches Potenzial von 125.259 m³ über das gesamte Jahr im Hessischen Ried ergibt. In der Vegetationszeit liegt der Abfluss bei durchschnittlich 292,5 l/m² und es ergibt sich ein geringeres theoretisches Potenzial von 69.368 m³. Zwischen den Jahren gibt es starke Schwankungen im mengenmäßigen Potenzial zwischen 88.313 m³ (2018) und 173.682 m³ (2002), wie in Abbildung 94 dargestellt ist. Diese Schwankungen beruhen auf unterschiedlichen Niederschlagsmengen, da die Dachfläche über alle Jahre als konstant betrachtet wird. Besonders auffallend sind die trockenen Jahre 2003, 2018 und 2020, während die Jahre 1995, 2002 und 2010 eher nasse Jahre sind.

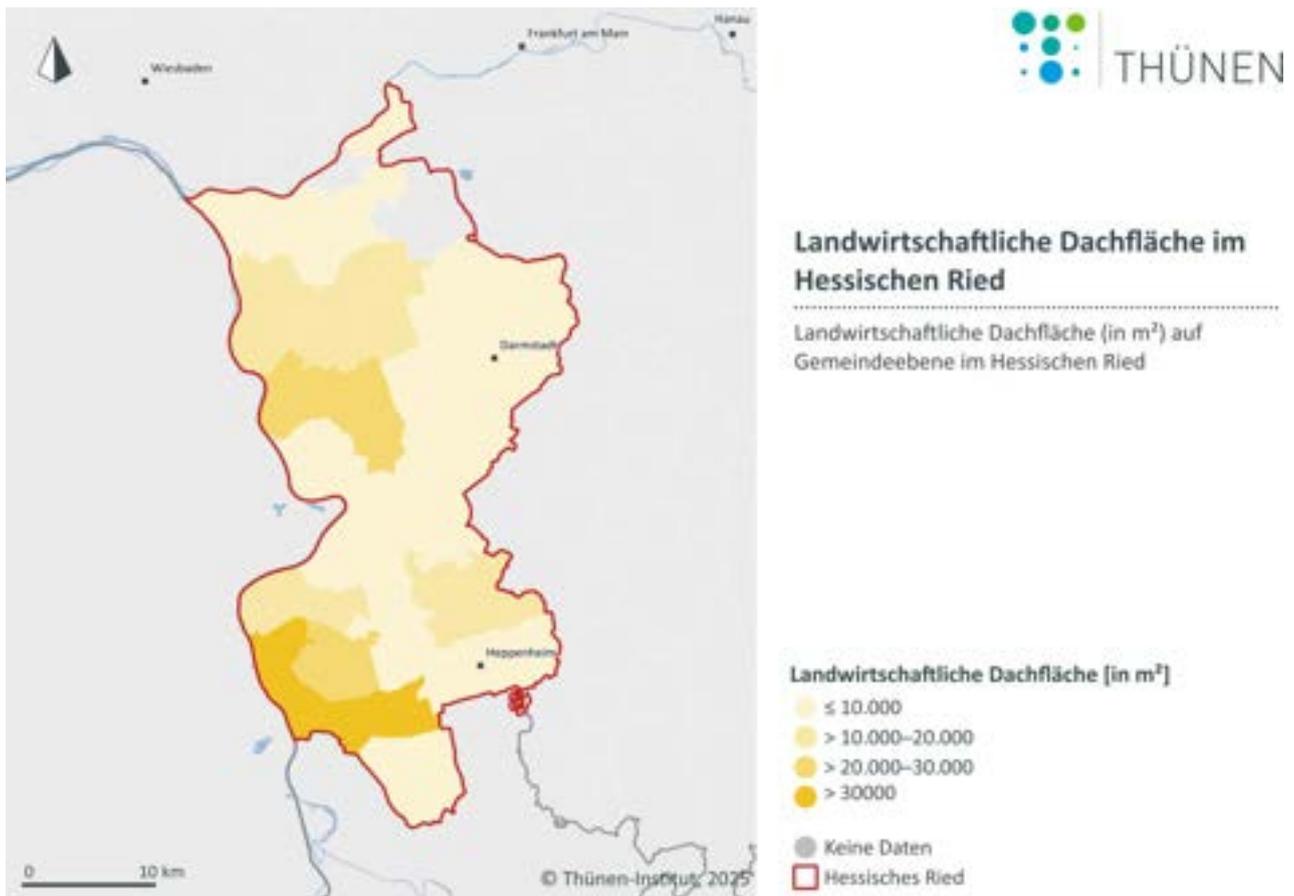
Abbildung 94: Regenwasserabflüsse von landwirtschaftlichen Dachflächen im Hessischen Ried (1991–2020)

Quelle: Eigene Berechnungen.

Das theoretische Potenzial lässt sich in Relation setzen zu den Rhein- und Grundwasserentnahmemengen im Hessischen Ried. Dabei zeigt sich, dass das theoretische Potenzial relativ gering ist. Das gesammelte Regenwasser macht über das gesamte Jahr durchschnittlich 0,7 % der entnommenen Wassermenge von 20.157.638 m³ aus, über den Vegetationszeitraum gesammeltes Regenwasser macht nur 0,4 % der im Hessischen Ried entnommenen Bewässerungswassermenge aus.

Neben den zeitlichen Schwankungen gibt es auch räumliche Unterschiede sowohl in der landwirtschaftlichen Dachfläche in einer Region als auch in den sich aus dem Niederschlag ergebenden Abflüssen. Einen Überblick zu den regionalen Unterschieden bei den landwirtschaftlichen Dachflächen auf Gemeindeebene gibt die Abbildung 95. Die größte landwirtschaftliche Dachfläche weist die Gemeinde Lampertheim mit 33.125 m² auf, während es in der Gemeinde Zwingenberg nur 164 m² landwirtschaftliche Dachfläche gibt. Gründe für diese Unterschiede sind die Gemeindegrößen und die landwirtschaftliche Prägung der Gemeinde.

Abbildung 95: Landwirtschaftliche Dachflächen im Hessischen Ried

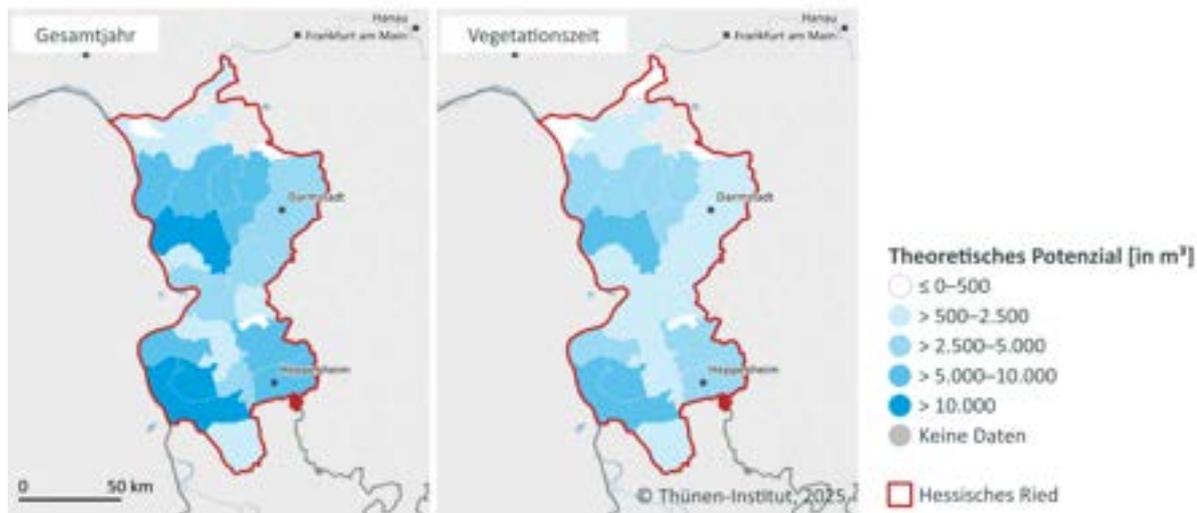


Quelle: Eigene Darstellung.

Neben dem Umfang der Dachflächen variieren auch deren Abflüsse in Abhängigkeit von den Niederschlagsmengen: In der Gemeinde Darmstadt sind die Abflüsse im Zeitraum 1991–2020 mit durchschnittlich 600,8 l/m² im gesamten Jahr am höchsten. Über den Vegetationszeitraum in den Jahren 1991–2020 ist die Gemeinde Bensheim Spitzenreiter mit durchschnittlichen Abflüssen von 317,6 l/m². Die geringsten durchschnittlichen Abflüsse treten sowohl über das gesamte Jahr als auch über den Vegetationszeitraum mit 476 l/m² und 260,9 l/m² in der Gemeinde Ginsheim-Gustavburg auf (vgl. Tabelle A18 im Anhang). Das durchschnittliche theoretische Potenzial von Regenwasser von 1991–2020 ist in Abbildung 96 für das gesamte Jahr (linke Seite) und für die Vegetationszeit (rechte Seite) auf Gemeindeebene dargestellt. Die zeitlichen Variationen auf Gemeindeebene sind in Abbildung A29 im Anhang dargestellt.

Abbildung 96: Theoretisches Potenzial von Regenwasser für die Bewässerung im Hessischen Ried**Theoretisches Potenzial von Regenwasserabfluss von landwirtschaftlichen Dachflächen**

Durchschnittliches theoretisches Potenzial von Regenwasserabfluss von landwirtschaftlichen Fachflächen für die Bewässerung auf Gemeindeebene im Hessischen Ried (1991-2020)



Quelle: Eigene Abbildung.

Das theoretische Potenzial von Regenwasser für die Bewässerung kann dem modellierten Bewässerungsbedarf auf Gemeindeebene gegenübergestellt werden und so kann die mit dem gesammelten Dachabfluss bewässerbare landwirtschaftliche Fläche bestimmt werden. Durchschnittlich können im Zeitraum 1991–2020 zwischen 0,2 ha (Bischofsheim) und 63,4 ha (Heppenheim) bewässert werden, wenn das Regenwasser des gesamten Jahres von den landwirtschaftlichen Dachflächen genutzt wird und die Bewässerung bis zur vollen Höhe des potenziellen Bewässerungsbedarfs erfolgt. Mit dieser Nutzung geht allerdings eine Zwischenspeicherung der Regenwasserabflüsse außerhalb der Vegetationszeit einher. Werden nur die Regenwasserabflüsse aus der Vegetationszeit genutzt, sind zwischen 0,1 ha (Bischofsheim) und 34,9 ha (Heppenheim) bewässerbar. Das Verhältnis des theoretischen Potenzials von Regenwasserabfluss und den derzeitigen Entnahmemengen für Bewässerung im Hessischen Ried, zeigt, dass das theoretische Potenzial von Regenwasser für das gesamte Jahr durchschnittlich etwa 0,08 % der 2002–2020 im Hessischen Ried für die Bewässerung entnommenen Wassermenge entspricht. Das durchschnittliche theoretische Potenzial in der Vegetationszeit entspricht 0,05 % der im Hessischen Ried für die Bewässerung entnommenen Wassermenge.

Aus dieser Analyse wird ersichtlich, dass hypothetisch von Dach- und Hofflächen gesammeltes Regenwasser höchstens lokal als alternative Wasserquellen in Frage kommen mag, eine flächendeckende Erschließung aber mitnichten ausreicht, um eine echte Alternative zur Bewässerung mit Grundwasser darzustellen.

7.2.3 Aufbereitetes Abwasser

Bei aufbereitetem Abwasser handelt es sich um weitergehend aufbereitetes Wasser aus kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen. Bei unzureichender Aufbereitung besteht eine Expositionsgefahr für Umwelt und Menschen über verschiedene Pfade. Der Boden kann durch eine zu hohe Salzkonzentration des Bewässerungswassers versalzen und so geschädigt werden. Ebenso kann eine Akkumulation von Schwermetallen im Boden erfolgen, wenn das Wasser mit solchen belastet ist. Schwermetalle und Salze können je nach Empfindlichkeit auch bei Pflanzen zu Schädigungen führen, genau wie das Halbmetall Bor. Für die menschliche Gesundheit können zudem Parasiten und Pathogene eine Gefahr darstellen, wenn Menschen direkt mit

belastetem Bewässerungswasser oder Rückständen auf rohverzehrt, verunreinigten Lebensmitteln in Kontakt kommen. Eine weitere Gefahr ist die Belastung von Grundwasser mit Nitrat oder organischen Spurenstoffe, wenn diese durch Versickerung ins Grundwasser getragen werden (Seis et al., 2016).

Diese möglichen Expositionspfade führen dazu, dass bei der Wiederverwendung von aufbereitetem Abwasser eine Vielzahl von rechtlichen Vorgaben berücksichtigt werden müssen. In Abbildung 97 sind die rechtlichen Rahmenbedingungen auf EU-Ebene dargestellt. Die Vorgaben lassen sich grob in die Unterbereiche „Verbraucher- und Gesundheitsschutz“ und „Umweltrecht“ aufteilen. Im Umweltrecht lassen sich die Vorgaben noch in die Bereiche „Boden“ und „Wasser“ teilen, bei zweiterem gilt relativ neu seit Juni 2023 die Verordnung zur Wasserwiederverwendung (VO 2020/471/EU) und die entsprechende Leitlinie (2022/C 298/01). Die bestehenden Verordnungen und Gesetze dienen zum einen als Anhaltspunkt für die Ableitung von Mindestansprüchen an aufbereitetes Abwasser und zum anderen dienen die enthaltenen Grenzwerte als Maß der Schutzbedürftigkeit des jeweils zu schützenden Gutes (Seis et al., 2016).

Abbildung 97: Rechtliche Rahmenbedingungen auf EU-Ebene

Verbraucher- und Gesundheitsschutz		Umweltrecht	
VO Lebensmittelrecht 178/2002/EG	VO Lebensmittelhygiene 852/2004/EG	Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EG	Trinkwasserrichtlinie 98/83/EG
VO Vorschriften für die Futtermittelhygiene 183/2005/EG	VO Höchstgehalte an Pestizidrückständen in oder auf Lebens- und Futtermitteln 396/2005/EG	Grundwasser-Richtlinie 2006/118/EG geändert durch 2014/80/EU	VO Wasserwiederverwendung 2020/741/EU
VO mikrobiologische Kriterien 2073/2005/EG	Gesundheit von Tieren VO 1069/2009/EG und VO 142/2011/EU	Kommunalabwasserrichtlinie 91/271/EWG	Wasserwiederverwendungsleitlinie (2022/C 298/01)
VO Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln 1881/2006/EG		Nitrat-Richtlinie 91/676/EWG	Klärschlammrichtlinie 86/278/EWG

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Seis et al. (2016).

Die Umsetzung in deutsches Recht ist in Abbildung 98 dargestellt. Für die Verordnung 2020/471/EU zur Wasserwiederverwendung gibt es allerdings derzeit noch keine Umsetzung in deutsches Recht, wodurch die europäischen Vorgaben unmittelbar gelten. Gemäß Art. 2 der Verordnung 2020/471/EU sind die Mitgliedstaaten nicht zur Wasserwiederverwendung in der Landwirtschaft verpflichtet, sondern können dies aufgrund verschiedener Kriterien wie Druck auf die und Zustand der Grundwasser- oder Oberflächenwasserkörper ablehnen.

Abbildung 98: Rechtliche Rahmenbedingungen auf Bundesebene

Verbraucher- und Gesundheitsschutz	Umweltrecht	
Trinkwasserverordnung (TrinkwV)	Wasserhaushaltsgesetz (WHG)	Oberflächengewässerverordnung (OGewV)
Rückstands-Höchstmengenverordnung (RHMV)	Abwasserverordnung (AbwV)	Grundwasserverordnung (GwV)
Badegewässerverordnungen	Düngegesetz (DüG)	Bundes-Bodenschutzgesetz und -verordnung (BBodSchG/ BBodSchV)
Produkthaftungsgesetz	Düngeverordnung (DüV)	

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Seis et al. (2016).

In der Verordnung VO 2020/471/EU werden vier Güteklassen mit unterschiedlichen Einsatzbereichen abgeleitet. Die Güteklasse gibt an, für welche Kulturpflanzen und in Kombination mit welchen Bewässerungsmethoden das aufbereitete Abwasser genutzt werden darf. Die Klassifizierung in die Güteklassen erfolgt basierend auf Grenzwerten für *Escherichia Coli*, biochemischen Sauerstoffbedarf (BSB₅⁶), gesamte suspendierte Feststoffe (Total suspended solids, TSS), Trübung (Nephelometric Turbidity Unit, NTU) sowie Legionellen und intestinalen Nematoden. Die Details sind in Tabelle 41 dargestellt.

⁶ BSB₅ ist der zum biologischen Abbau innerhalb von 5 Tagen bei 20 °C aller im Abwasser befindlichen biologisch abbaubaren Schadstoffe notwendige biochemischen Sauerstoffbedarf.

Tabelle 41: Güteklassen von aufbereitetem Wasser – Einsatzbereich und Anforderungen

	Güteklasse des aufbereiteten Wassers				
	A	B	C	D	
Kategorie der Kulturpflanzen	<ul style="list-style-type: none"> alle roh verzehrten Nahrungsmittelpflanzen, deren essbarer Teil unmittelbar mit dem aufbereiteten Wasser in Kontakt kommt roh verzehrte Hackfrüchte 	<ul style="list-style-type: none"> roh verzehrte Nahrungsmittelpflanzen, deren essbarer Teil über dem Boden erzeugt wird und nicht unmittelbar mit dem aufbereiteten Wasser in Kontakt kommt verarbeitete Nahrungsmittelpflanzen und Non-Food-Kulturen, einschließlich Futterkulturen für milch- oder fleischerzeugende Tiere 	<ul style="list-style-type: none"> Industrie- und Energiepflanzen aus Saatgut gewonnene Pflanzen 		
Bewässerungsmethode	alle	alle	<ul style="list-style-type: none"> Tropfbewässerung andere Bewässerungsmethode bei Vermeidung von unmittelbarem Kontakt mit dem essbaren Teil der Pflanze 	alle	
Zielvorgabe für die Technik	Zweitbehandlung, Filtration und Desinfektion	Zweitbehandlung und Desinfektion	Zweitbehandlung und Desinfektion	Zweitbehandlung und Desinfektion	
Qualitätsanforderungen	E. coli (Anzahl/100 ml)	≤ 10	≤ 100	≤ 1.000	≤ 10.000
	BSB₅ (mg/l)	≤ 10	25 mg/1 02 Gemäß Richtlinie 91/271/EWG (Anhang I Tabelle 1)		
	TSS (mg/l)	≤ 10	125 mg/1 02 Gemäß Richtlinie 91/271/EWG (Anhang I Tabelle 1)		
	Trübung (NTU)	≤ 5	-	-	-
	Sonstige	Legionella spp.: < 1.000 KBE/l, wenn das Risiko der Aerosolbildung besteht intestinale Nematoden (Eier von Helminthen): ≤ 1 Ei/Liter für die Bewässerung von Weideflächen oder Futterpflanzen			
Mindesthäufigkeit der Routineüberwachung	E. coli	einmal pro Woche	einmal pro Woche	zweimal pro Monat	zweimal pro Monat
	BSB₅	einmal pro Woche	gemäß Richtlinie 91/271/EWG (Anhang I Abschnitt D)		
	TSS	einmal pro Woche	gemäß Richtlinie 91/271/EWG (Anhang I Abschnitt D)		
	Trübung	kontinuierlich	-	-	-
	Legionella spp.	zweimal pro Monat (falls zutreffend)			
	intestinale Nematoden (falls zutreffend)	zweimal pro Monat oder wie vom Betreiber der Aufbereitungseinrichtung nach Anzahl der im einlaufenden Abwasser befindlichen Eier festgelegt wird			

Quelle: Verordnung (EU) 2020/741.

Das Bundesamt für Risikobewertung (BfR) hat sich auch mit der Wiederverwendung von aufbereitetem Abwasser für die landwirtschaftliche Bewässerung in Bezug auf Protozoen, virale und bakterielle Krankheitserreger beschäftigt, aufgrund fehlender Daten konnte aber noch keine abschließende Bewertung erfolgen. Gemeinsam mit dem Julius Kühn-Institut und dem Max Rubner-Institut werden ähnliche Einschränkungen wie in der Verordnung (EU) 2020/741 empfohlen (Bundesinstitut für Risikobewertung, 2020, 2022a, 2022b):

- für Pflanzen oder hydroponische Kulturen, die für den Rohverzehr vorgesehen sind, nur Bewässerungswasser mit einer mit Trinkwasser vergleichbaren Qualität;
- Verzicht auf die Verwendung von aufbereitetem Abwasser bei Pflanzen mit bodennah oder im Boden wachsenden Teilen für den Rohverzehr;
- bei Obstbäumen und Weinbergen keine Beregnungstechnik, bei der die Früchte in direkten Kontakt mit dem aufbereiteten Abwasser kommen können;
- bei Qualitätskategorie B nur Verteilung mittels überirdischer oder unterirdischer Tropfbewässerung;
- bei Qualitätskategorie C nur Bewässerung von Kulturen, die nicht roh verzehrt werden.

Nach der Abwasserklärung in der kommunalen Kläranlage ist für gewöhnlich in Abhängigkeit vom Nutzungsziel eine weitergehende Behandlung des Abwassers notwendig. In Tabelle 42 sind die Verfahren und ihre Eignung in Bezug auf verschiedene Stoffe und Mikroben dargestellt, meist werden verschiedene Verfahren miteinander kombiniert. Neben der verfahrenstechnischen Eignung spielen auch die Kosten eine Rolle bei der Auswahl der angemessenen Weiterbehandlung.

Kosten für aufbereitetes Abwasser

Vorläufige Kostenabschätzungen für die Verfahrensanpassungen von Kläranlagen aus einer Machbarkeitsstudie für die Schweinfurter Trockenplatte zeigen, dass die Kosten pro m³ mit der steigenden Anlagenkapazität (230.000–10.000.000 m³) sinken. Ultrafiltration ist mit spezifischen Jahreskosten zwischen 0,09 und 0,45 €/m³ das teuerste Verfahren, gefolgt von Pulveraktivkohle (PAK) mit 0,07–0,28 €/m³ und Ozonung mit 0,05–0,23 €/m³. UV-Desinfektion ist mit 0,03–0,09 €/m³ das günstigste Verfahren. Je nach Kombination der Verfahren und Anlagenkapazität ergeben sich spezifische Jahreskosten von 0,14 €/m³ (UF, Ozon bei einer Kapazität von 10.000.000 m³) und 0,82 €/m³ (PAK, UF, UV bei einer Kapazität von 230.000 m³) (Schwaller et al., 2020).

Eine Machbarkeitsstudie zur Verwendung von weitergehend aufbereitetem Abwasser für das Hessische Ried schätzt die Brutto-Jahreskosten für die weitergehende Aufbereitung (Speicherung, Desinfektion, Pumpwerk) auf 0,3–0,4 €/m³. Dazu können weitere 0,1–0,4 €/m³ für Transport und Verteilung und eine eventuell notwendige Ultrafiltration, für welche die Kosten nicht weiter beziffert werden, kommen. So ergeben sich Gesamtkosten zwischen 0,4 und 0,8 €/m³ in Abhängigkeit von den Rahmenbedingungen. Bei den Kosten von 0,4 bis 0,5 €/m³ für die Spurenstoffelimination, also der vierten Reinigungsstufe, wird angenommen, dass diese auf die Abwassergebühr umgelegt werden und nicht für die Bewässerung anfallen (Ebert et al., 2019).

Tabelle 42: Verfahren zur weitergehenden Abwasserbehandlung

		UV	Ozonung	Chlorung	Membranverfahren				Schnell- sandfilter	Fällung/ Flockung	Mikro- sieb	Schönungs- teich	Bio- filter	Aktiv- kohle
					MF	UF	NF	RO						
Hygiene	Viren	x	x	x	(x)	(x)	x	x	(x)	(x)		(x)		
	Bakterien	x	x	x	x	x	x	x	(x)			(x)		
	Protozoen	x	x		x	x	x	x	(x)	(x)		(x)		
	Helmintheneier				x	x	x	x	(x)		(x)	(x)		
Nährstoffe (N, P)					(x)	(x)		x	(x)	x	(x)	x	x	
Schwermetalle								x		x				
organische Mikroverunreinigungen			x				x	x					x	x
Ionen (Salze)							x	x						

Anm.: x = Eignung, (x) = eingeschränkte Eignung.

Quelle: Eigene Darstellung nach Seis et al. (2016).

Fallbeispiele

In Deutschland gibt es derzeit ein Beispiel für die Verwendung von aufbereitetem Abwasser: die Abwasserverregnung im Raum Braunschweig. Dort werden jährlich ca. 10 Mio. m³ Abwasser für die Beregnung von Getreide, Energiepflanzen, Zuckerrüben und Kartoffeln verwendet. Das Wasser wird mit mobilen Beregnungsmaschinen auf 2.700 ha verteilt (Seis et al., 2016). Die Beregnung erfolgt durch den Abwasserverband Braunschweig und es fallen jährliche Kosten zwischen 80 und 110 €/ha an (Abwasserverband Braunschweig, 2020). Weitere 10 Mio. m³ Wasser werden auf einer Fläche von 275 ha verrieselt (Seis et al., 2016).

Im Ausland wird aufbereitetes Abwasser teilweise schon seit einigen Jahren stark genutzt, Beispiele hierfür sind Israel und Zypern. In beiden Fällen handelt es sich um eher wasserarme Regionen mit hohem Bewässerungsbedarf. In Israel werden 85 % des Abwassers für die Landwirtschaft aufbereitet und wiederverwendet. Der nationale Wasserversorger MEKORO verfügt über 3.000 Anlagen zur Gewinnung, Versorgung und Aufbereitung von Wasser. Die Wasserverteilung erfolgt über Leitungssystem mit einer Länge von 13.000 km. Die Wasseraufbereitungsanlage Shafdan kann bis zu 150 Mio. m³ Wasser aufbereiten, mit denen alle landwirtschaftlichen Kulturen ohne Einschränkung bewässert werden können (Berger und Kiperwas, 2021; MEKOROT, 2022). In Zypern wird ca. 15 % des Wasserbedarfs von 160 Mio. m³ für die landwirtschaftliche Bewässerung über aufbereitetes Abwasser gedeckt. Es wird zur Bewässerung von Feldfrüchten und Grünland verwendet (Fatta-Kassinos und Karaolia, 2020a, 2020b).

Quantifizierung des Potenzials im Hessischen Ried

Im Hessischen Ried liegen 29 kommunale Kläranlagen (>2.000 EW), deren Standorte in Abbildung 99 dargestellt sind. Die Kläranlagen behandeln 2008–2020 jährlich durchschnittlich insgesamt 59.234.094 m³. Die Abwassermengen der einzelnen Anlagen liegen zwischen 207.031 m³/Jahr und 1.4438.667 m³/Jahr. Die einzelnen Jahresabwassermengen der Kläranlagen für die Jahre 2008, 2010, 2012, 2014, 2016, 2018 und 2020 sind in Tabelle A20 im Anhang dargestellt. Alle Kläranlagen verfügen mindestens über die Reinigungsstufen „biologische Reinigung“, „Phosphorelimination“, „Nitrifikation“ und „Denitrifikation“, einige der Anlagen besitzen zusätzlich noch eine mechanische Reinigung (HMUKLV, 2023a). Für eine Wiederverwendung des gereinigten Abwassers sind ggf. weitere Reinigungsstufen notwendig, um den hygienischen Anforderungen zu genügen.

Das durchschnittliche theoretische Potenzial für die Wasserwiederverwendung auf Gemeindeebene ist in Abbildung 100 dargestellt, die linke Seite zeigt das Potenzial für das gesamte Jahr und die rechte Seite für die Vegetationszeit. Das höchste Potenzial gibt es in den Gemeinden Darmstadt mit über 10.000.000 m³ pro Jahr, gefolgt von den Gemeinden Rüsselsheim am Main und Bensheim mit Abwassermengen von durchschnittlich über 5.000.000 m³ pro Jahr. In den Gemeinden Groß-Rohrheim, Viernheim, Einhausen, Biebesheim am Rhein, Erzhausen, Bischofsheim und Raunheim sowie den kreisfreien Städten Zwingenberg und Kelsterbach ist kein Potenzial vorhanden, da dort keine kommunalen Kläranlagen (> 2.000 EW) vorhanden sind. Das Verhältnis des theoretischen Potenzials von aufbereitetem Abwasser und den derzeitigen Entnahmemengen für Bewässerung im Hessischen Ried zeigt, dass das theoretische Potenzial von aufbereitetem Abwasser für das gesamte Jahr um das etwa Dreifache so hoch ist wie die 2008–2020 durchschnittlich im Hessischen Ried für die Bewässerung entnommene Wassermenge. Für das theoretische Potenzial der Vegetationszeit ergibt sich ein Faktor von 1,7 im Vergleich zur entnommenen Wassermenge, allerdings liegt der Faktor 2018 und 2020 nur bei ca. 0,9.

Das theoretische Potenzial von aufbereitetem Abwasser für die Bewässerung kann dem durchschnittlichen potenziellen Bewässerungsbedarf auf Gemeindeebene gegenübergestellt werden und so kann die mit aufbereitetem Abwasser potenziell bewässerbare landwirtschaftliche Fläche bestimmt werden. Durchschnittlich könnten mit dem im gesamten Jahr anfallenden aufbereiteten Abwasser potenziell 150.719 ha und somit die 3,5-fache landwirtschaftliche Fläche im Hessischen Ried bewässert werden. Mit dem während der Vegetationszeit anfallenden aufbereiteten Abwasser könnten immer noch 75.359 ha bewässert werden – und somit die 1,8-fache landwirtschaftliche Fläche des Hessischen Rieds.

Bei den dargestellten theoretischen Potenzialen von aufbereitetem Abwasser für die Bewässerung ist zu berücksichtigen, dass bei der Wasserwiederverwendung die Mindestwasserführung von Einleitgewässern nicht beeinträchtigt werden darf, sonst soll keine Genehmigung erteilt werden (BMUV, 2022). Für eine Beurteilung, bei welchen Kläranlagen die Mindestwasserführung des Einleitgewässers ein Problem sein könnte, sind weitergehende Analysen und Einzelfallbetrachtungen notwendig. Die dargestellten theoretischen Potenziale werden die durch aufbereitetes Abwasser zur Verfügung stehenden tatsächlichen Wassermengen überschätzen.

Zudem wird es voraussichtlich Sperrzonen geben, in denen eine Bewässerung mit aufbereitetem Abwasser ausgeschlossen ist. Zu diesen Zonen werden laut Referentenwurf des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) zum dritten Gesetz zur Änderung des Wasserhaushaltsgesetzes Trinkwasserschutz- und Heilquellenschutzgebiete der Schutzzonen I und II zählen (BMUV, 2022). Die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) und der Deutsche Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) fordern zusätzlich den Schutz der Schutzzone III dieser Gebiete (DVGW, 2024; DWA, 2024). In Abbildung 101 sind die Schutzzonen I bis III der Wasserschutzgebiete im Hessischen Ried dargestellt. Auf den dunkelroten Flächen wäre entsprechend des Referentenwurfs des BMUV keine Bewässerung mit aufbereitetem Abwasser möglich, die hellroten Flächen wären bei der Berücksichtigung der Stellungnahmen von DWA (2024) und DVGW (2024) zusätzlich ausgeschlossen. Durch den Ausschluss der Schutzzonen I bis III würden etwa 33 % der landwirtschaftlich, garten- und weinbaulich genutzten Fläche nicht mit aufbereitetem Abwasser bewässert werden dürfen, bei Beschränkung auf Schutzzonen I und II nur 3 %.

Abbildung 99: Standorte von Kläranlagen im Hessischen Ried



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf HLNUG (2024b).

Abbildung 100: Theoretisches Potenzial der Wasserwiederverwendung für die Bewässerung auf Gemeindeebene (2008–2020)

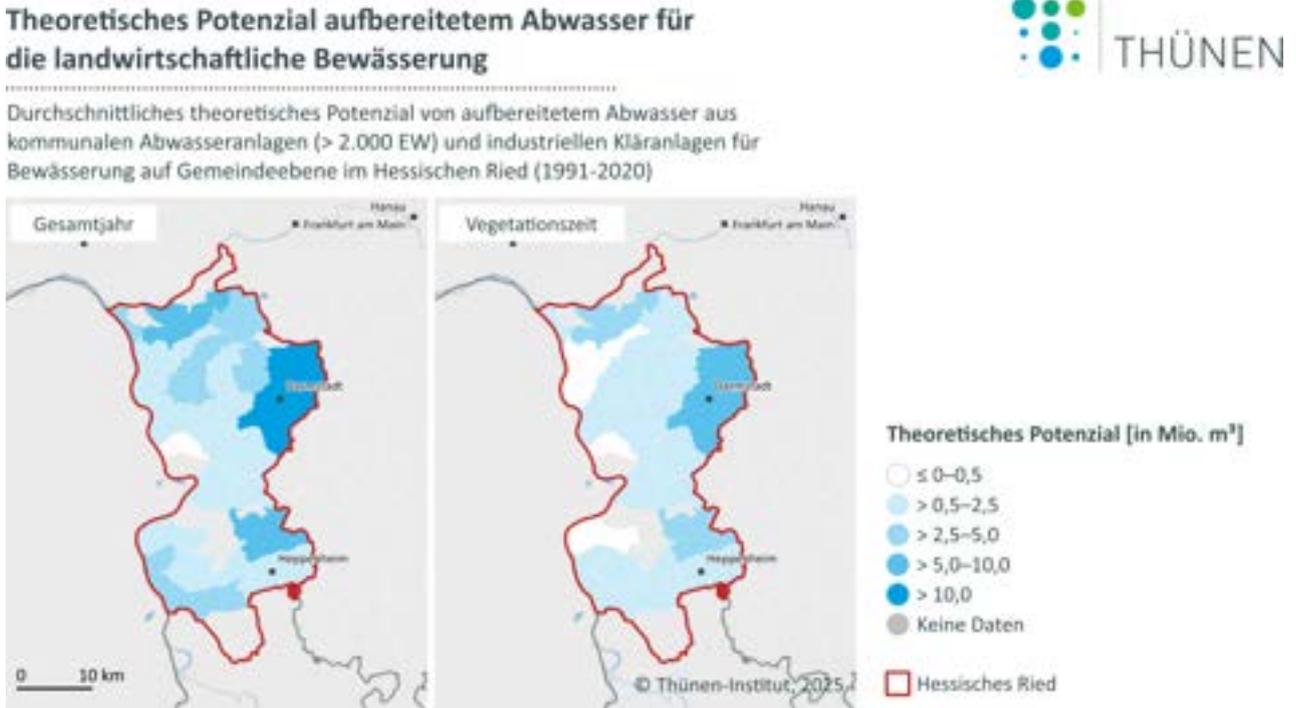
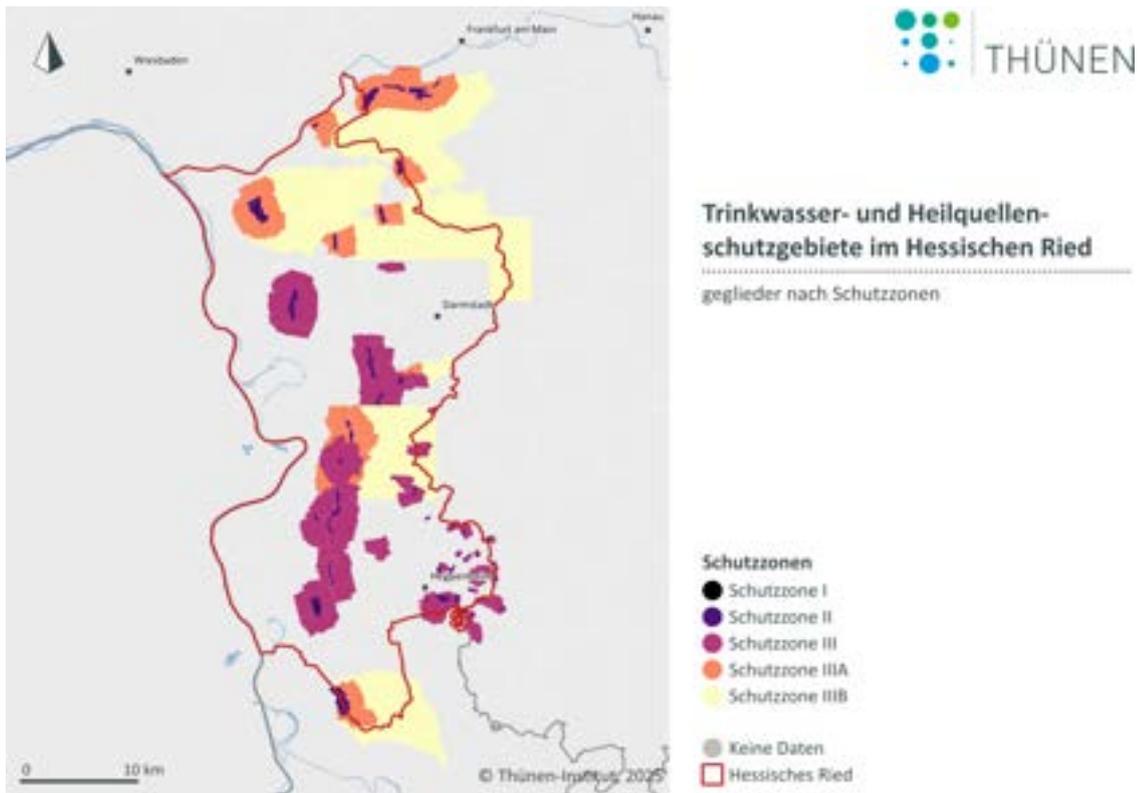


Abbildung 101: Trinkwasser- und Heilquellenschutzgebiete im Hessischen Ried



7.2.4 Speicherung

Da alle alternativen Wasserressourcen eine gewisse Saisonalität und Unsicherheit in der Verfügbarkeit aufweisen, kann Zwischenspeicherung eine Option zur Erhöhung der Zuverlässigkeit der Wasserverfügbarkeit sein. Die Speichermöglichkeiten lassen sich grob in die Arten „oberirdische Speicher“, „unterirdische Speicher“ und „natürliche Speicher“ aufteilen. Eine Übersicht über verschiedene Speicher, deren Art sowie Vor- und Nachteile sind in Tabelle 43 dargestellt. Aufgrund der dargestellten Eigenschaften eignen sich vor allem Speicherbecken, die den Ansprüchen in Bezug zum Speichervolumen und der möglichen Speicherdauer genügen und gut umsetzbar sind. Talsperren weisen ebenfalls eine sehr gute Eignung auf, sind aber für einzelne Landwirt*innen nicht umsetzbar. In einem Zusammenschluss mit weiteren Wassernutzern sieht die Umsetzbarkeit von Talsperren vorteilhafter aus, allerdings kann es zu Wassernutzungskonflikten kommen – insbesondere in trockenen Jahren. Auch Regenrückhaltebecken sind theoretisch eine Option für die landwirtschaftliche Wasserspeicherung, allerdings kann es hier zu Zielkonflikten mit dem Hochwasserschutz kommen. Versickerungsanlagen weisen je nach Ausführung eine sehr gute Umsetzbarkeit auf, ihre Eignung im speichertechnischen Bereich ist allerdings begrenzt (Ebers et al., 2023).

Tabelle 43: Übersicht über Wasserspeicheroptionen

Speicheroption	Art	Vorteile	Nachteile
Speicherbecken	oberirdisch	hohes Speichervolumen, lange Speicherdauer	Flächenbedarf
Talsperre	oberirdisch	hohes Speichervolumen, lange Speicherdauer	hoher Flächenbedarf, hohe Kosten
Himmelsteich	oberirdisch		geringes Speichervolumen, kurze Speicherdauer
Wasserturm	oberirdisch	lange Speicherdauer, geländeunabhängig, keine Umwelteinflüsse	Einschnitt ins Landschaftsbild
Tank	oberirdisch	lange Speicherdauer, geländeunabhängig, keine Umwelteinflüsse	geringes Speichervolumen
Regenrückhaltebecken	oberirdisch	geringer Flächenbedarf, variable Größe	kurze Speicherdauer, Hochwasserschutz als primäre Aufgabe
Hochwasser-rückhaltebecken	oberirdisch		Hochwasserschutz als primäre Aufgabe
Hochwasserpolder	oberirdisch		hoher Flächenbedarf, kurze Speicherdauer, Hochwasserschutz als primäre Aufgabe
Zisternen	unterirdisch	lange Speicherdauer	geringe Speichermenge
Regenrückhaltebecken	unterirdisch	geringer Flächenbedarf	hohe Kosten, kurze Speicherdauer, technische Umsetzbarkeit
Regenüberlaufbecken	unterirdisch		geringes Speichervolumen, kurze Speicherdauer
Grabenstauverfahren	natürlich		geringes Speichervolumen, kurze Speicherdauer
Versickerungsanlagen – Infiltrationsgräben	natürlich		Befahrbarkeit, Filterwirkung, geringes Speichervolumen, kurze Speicherdauer
Versickerungsanlagen – Rigolen	natürlich		Filterwirkung, geringes Speichervolumen, kurze Speicherdauer
Versickerungsanlagen – Schacht	natürlich		Flächenbedarf, Filterwirkung, geringes Speichervolumen, kurze Speicherdauer
Versickerungsanlagen – Mulden	natürlich	Flächenbedarf, Filterwirkung	Aufwand/Kosten, kurze Speicherdauer
Versickerungsanlagen – Becken	natürlich	Flächenbedarf, Filterwirkung	
Versickerungsanlagen – Rohr	natürlich		Flächenbedarf, Filterwirkung, geringes Speichervolumen
Versickerungsanlagen – Flächen	natürlich	Flächenbedarf, Filterwirkung	Aufwand/Kosten
Grundwasserstaudamm	natürlich	hohes Speichervolumen, lange Speicherdauer	hohe Kosten

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Ebers et al. (2023).

Fallbeispiele

Mit der Speicherung von Wasser gehen Kosten einher. Diese fallen als Investitionskosten für Genehmigung und Bau und als Betriebskosten an. Die Höhe der Kosten ist einzelfallspezifisch und u. a. von Größe und Art des Speichers sowie den Standortgegebenheiten abhängig. In Niedersachsen gibt es im Landkreis Uelzen ein

Speicherbecken mit einem Volumen von 750.000 m³, welches mit Prozesswasser aus einer Zuckerfabrik gespeist wird. Die Finanzierung der Investitionskosten von 5 Mio. € erfolgte zu 30 % über EU-Fördermittel und zu 70 % durch die Verbandsmitglieder (Seis und Lesjean, 2015).

Im hessischen Wallnau existiert zur Tropfbewässerung von 40 ha Erdbeeren ein Speicherbecken mit einem Volumen von 10.000 m³. Das Speicherbecken wird aus Grundwasser, Niederschlag und Oberflächenwasser aus dem Wickerbach gespeist und hatte einen Investitionsbedarf von mehr als 250.000 € (Landpartie.de, 2022).

7.2.5 Gesamteinschätzung

Insgesamt zeigt sich bei den alternativen Wasserressourcen ein großes theoretisches Potenzial für die Bewässerung, vor allem bei Oberflächenwasser und aufbereitetem Abwasser. Eine Sammlung von Regenwasser auf landwirtschaftlichen Hofflächen scheint aufgrund der geringen möglichen Wassermenge keine Option für eine flächendeckende Umsetzung zu sein. Allerdings ist zu beachten, dass sich zum einen die Potenziale der einzelnen alternativen Wasserressourcen nicht einfach aufsummieren lassen. Einige Oberflächengewässer wie beispielsweise die Weschnitz werden nicht unerheblich durch die Einleitung von geklärtem Abwasser gespeist, wodurch eine Wiederverwendung von gereinigtem Abwasser das Potenzial von Oberflächenwasser verringern kann. Ähnliches gilt für gesammeltes Niederschlagswasser, welches sonst über Mischkanalisation in Kläranlagen oder bei Trennkanalisationen in Oberflächengewässer gelangen würden. Zum anderen gibt es neben der Bewässerung weitere mögliche Nachfrager nach den alternativen Wasserressourcen wie die Industrie oder die urbane Bewässerung von Parks oder Sportplätzen. Zudem sind die Wasserressourcen durch Saisonalität geprägt und Wasserangebot und -nachfrage stimmen zeitlich nicht immer überein. So kann es sein, dass eine Zwischenspeicherung notwendig ist. Dies verursacht Kosten und kann dazu führen, dass die Nutzung einer alternativen Wasserressource für die Bewässerung nicht wirtschaftlich ist.

7.3 Einzel- und überbetriebliche Fördermöglichkeiten

Es gibt verschiedene mögliche Fördergegenstände, um die Bewässerung und deren Effizienz in der einzel- und überbetrieblichen Förderung zu berücksichtigen. Zur Verbesserung der Effizienz der Bewässerung können zum einen wassersparende Techniken wie Tropfbewässerung oder Düsenwagen sowie der Ersatz von veralteten Leitungen, die möglicherweise Leckagen aufweisen, gefördert werden. Zum anderen kann auch energiesparende Technik wie der Ersatz von veralteten Pumpen oder von falsch dimensionierten Leitungen oder der Aufbau energieeffizienterer Ringleitungen gefördert werden. Eine Ergänzung zur Förderung von Technik, die zur Einsparung von Wasser führen soll, ist die Förderung von Beratungsangeboten zu anderen wassersparenden Produktionsverfahren wie Kultur- und Sortenwahl, Anbauweisen und Bodenbearbeitung (Gömann et al., 2015). Bei der Förderung von effizienteren Techniken muss es nicht zwangsläufig zu einer Senkung der Bewässerungsmenge kommen. Stattdessen kann auch das Jevons-Paradoxon auftreten, bei dem es statt zu einer Senkung zu einer Steigerung der Bewässerungsmenge kommt, da die landwirtschaftlichen, garten- und weinbaulichen Betriebe ihr Verhalten durch die wassereffizienteren Technologien anpassen. So kann es zu einer Ausweitung von bewässerten Flächen, einer Veränderung des Anbauprogramms hin zu höherpreisigen, wasserintensiveren Kulturen oder zu einer verstärkten Bewässerung von bereits bewässerten Kulturen kommen, um Ertrag oder Qualität zu steigern (Sears et al., 2018).

Zur Sicherstellung der Wasserverfügbarkeit sind die Förderung von Wasserspeichern oder alternativen Wasserressourcen wie aufbereitetes Ab- oder Prozesswasser möglich. Diese beiden Möglichkeiten bieten sich sowohl im Rahmen einzel- als auch überbetrieblicher Förderung an. Im überbetrieblichen Bereich ist auch eine Förderung von beispielsweise Boden- und Wasserverbänden denkbar. Durch die Bündelung von Wasserrechten in den Verbänden anstatt vielen Einzelrechten könnten die Wasserbehörden bei der Antragstellung und gegebenenfalls bei der Abrechnung der Wasserentnahmeentgelte – wenn in Hessen ein solches Entgelt wieder eingeführt werden sollte – entlastet werden.

Die Förderung dieser Gegenstände kann an Voraussetzungen gekoppelt werden, um beispielsweise das Jevons-Paradoxon bei der Förderung von effizienteren Techniken zu vermeiden. Mögliche Voraussetzungen sind die Kombination der Bewässerung mit digitalen Wasseruhren für eine zuverlässige Mengenerfassung oder eine Kombination mit existierenden Wasserrechten. Auch eine Begrenzung der Förderung auf Regionen mit einer negativen klimatischen Wasserbilanz in der Vegetationsperiode ist denkbar, sodass die Förderung nur in vom Klimawandel betroffenen Regionen stattfindet. Die Festlegung, dass durch die Förderung absolut nicht mehr Fläche auf dem Betrieb bewässert werden darf, ist eine weitere denkbare Voraussetzung.

Für die Förderung gibt es in Deutschland drei miteinander kombinierbare Optionen für die Finanzierung: Gemeinsame Agrarpolitik (GAP), Gemeinschaftsaufgabe „Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes“ (GAK) und Ländermittel.

Die Förderung der GAP teilt sich in zwei Säulen. Die 1. Säule umfasst Direktzahlungen wie beispielsweise die Einkommensgrundunterstützung und Ökoregelungen sowie Sektorprogramme (früher gemeinsame Marktorganisation). Die Finanzierung erfolgt über die Europäischen Garantiefonds für die Landwirtschaft (EGFL). Die 2. Säule enthält Förderprogramme zur nachhaltigen und umweltschonenden Bewirtschaftung in Form von tier- und flächenbezogenen Interventionen sowie Investitionen im investiven Bereich (BMEL, 2023b).

Die GAK soll die Land- und Forstwirtschaft sowie die ländliche Entwicklung unterstützen und zur Verbesserung des Küsten- und Hochwasserschutzes beitragen. Ziele im Bereich der Landwirtschaft sind dabei die Gewährleistung der Zukunfts- und Wettbewerbsfähigkeit und Ausrichtung auf zukünftige Anforderungen bei gleichzeitiger Sicherstellung von Umwelt- und Ressourcenschonung (BMEL, 2023a). Im Rahmenplan für den Zeitraum 2023–2026 setzen sich die Fördergrundsätze aus neun Förderbereichen und sieben Sonderrahmenplänen zusammen. Für die Bewässerung sind Förderbereiche 2 (Förderung landwirtschaftlicher Unternehmen) und 7 (Wasserwirtschaftliche Maßnahmen) von Bedeutung. Im Rahmen des Förderbereichs 2.A Einzelbetriebliche Förderung sind über die Maßnahme 1.0 Agrarinvestitionsförderungsprogramm (AFP) Investitionen in Bewässerungsanlagen möglich. Voraussetzung für die Förderung ist die Erreichung einer Wassereinsparung von mindestens 15 % bzw. bei Erstinvestitionen die Anschaffung von wassersparender Technik unter Berücksichtigung der Verordnung (EU) Nr. 1305/2013 Art. 5 oder der Verordnung (EU) 2021/2115 Art. 74. Investitionen für Anlagen zur Frostschtzberegnung sind nur für Sonderkulturen förderfähig. Das Investitionsvolumen kann zwischen 20.000 € und 5 Mio. € liegen, wovon bis zu 30 % gefördert werden können.

Im Förderbereich 7 können mit der Maßnahme 2.0 andere wasserwirtschaftliche Maßnahmen – u. a. sowohl überbetriebliche Einrichtungen zur Entnahme, Speicherung und Zuleitung von Beregnungswasser als auch überbetriebliche Anlagen zur Wasserspeicherung, Grundwasseranhebung und Pumpanlagen zur Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Wasserressourcen – gefördert werden. Erstere Anlagen dürfen nur gefördert werden, wenn eine negative Wasserbilanz im Vegetationszeitraum von April bis September im langjährigen Mittel vorliegt. Die möglichen Zuwendungsempfänger sind begrenzt auf die Länder, sonstige Körperschaften des öffentlichen Rechts und Unterhaltspflichtige an Gewässern. Es können bis zu 70 % der förderfähigen Ausgaben gefördert werden. Die Förderung dieser beiden Arten von Anlagen war allerdings nur bis zum 31.12.2023 möglich (BMEL, 2023c).

Stand der Förderung in Hessen

Über die Richtlinie „Einzelbetriebliches Förderungsprogramm Landwirtschaft“ (RL-EFP) vom 17. Juli 2023 ist die Förderung von Bewässerungsanlagen mit bis zu 30 % der zuwendungsfähigen Ausgaben für die Investition möglich. Voraussetzung für die Förderung ist die Erreichung von Wassereinsparungen durch die Technik und dass die Technik Vorgaben der Verordnung (EU) 2022/2472 Art. 14 Abs. 6 f.) wie die Installation einer Wasseruhr erfüllt. Bei der RL-EFP handelt es sich um eine kombinierte Finanzierung aus ELRP und GAK, die Förderung von Investitionen erfolgt in Hessen vollständig aus Mitteln der GAK (Förderbereich 2A Maßnahme 1.0) und nicht über die Intervention EL-0403 „Einzelbetriebliche produktive Investitionen in landwirtschaftlichen Unternehmen

(Art. 73)“ des aktuellen GAP-Strategieplans (HMUKLV, 2023b). Weitere Fördermöglichkeiten im Bereich der Bewässerung existieren zurzeit nicht.

Nationale Förderbeispiele

In anderen Bundesländern existieren verschiedene Förderrichtlinien und -programme im Bereich der Bewässerung. Die Angebote lassen sich in zwei Kategorien aufteilen: einzelbetrieblich und überbetrieblich. Einzelbetriebliche Angebote gibt es im Bundesland Sachsen, hier wurden bis 2020 umweltschonende Techniken und Tropfbewässerungen in Obst- und Hopfenanlagen gefördert (SMEKU, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e, 2020f). In der neuen Förderperiode seit 2023 werden neben wassereinsparenden Techniken auch Regenwassersammelanlagen gefördert. Die überbetriebliche Förderung beschäftigt sich vor allem mit der Förderung von Möglichkeiten zur Wasserentnahme und -speicherung sowie von überbetrieblichen Zuleitungen und Pumptanlagen. Vielfach ist die Förderung an existierende Wasserrechte, Mengenerfassung über Wasseruhren und eine negative Wasserbilanz in der Vegetationsperiode als Voraussetzung für die Förderung geknüpft. Die Finanzierung der Förderung erfolgt vor allem im Rahmen der GAK und aus Landesmitteln, aber auch im Rahmen der ELER. Über zweiteres werden eher einzelbetriebliche Förderungen finanziert (vgl. Tabelle 44 und Tabelle 45). Die einzelbetrieblichen Förderungen werden als Anteilsfinanzierung mit einer Basisförderung von bis zu 25 % des Investitionsvolumens unterstützt, bei den überbetrieblichen Förderungen werden bis zu 90 % der Ausgaben gefördert. Die Zuwendungshöchstbeträge sind auf 0,5 Mio. € (Niedersachsen) bis 10 Mio. € (Bayern) begrenzt. In Tabelle 44 bis Tabelle 51 sind einige Beispiele für einzelbetriebliche und überbetriebliche Förderung von Bewässerung dargestellt.

Tabelle 44: Förderrichtlinie Landwirtschaft, Investition, Existenzgründung (RL LIW/2014)

Bundesland	Sachsen
Zeitraum	2014–2020
Finanzierung	ELER
Gegenstand	<ul style="list-style-type: none"> • umweltschonende oder innovative Spezialtechnik • Schutzeinrichtungen in Weinbau- und Obstbauanlagen • Tropfbewässerungsanlagen in Obst- und Hopfenanlagen
Zuwendungsempfänger	natürliche Personen, Personengesellschaften und juristische Personen, Träger eines landwirtschaftlichen Unternehmens
Voraussetzungen	<ul style="list-style-type: none"> • Wasserzähler und Genehmigungen der zuständigen Behörde (z. B. aufbereitetes Abwasser) • bestehende Anlagen: Wassereinsparpotenzial von mindestens 15 %
Art und Höhe der Zuwendungen	<ul style="list-style-type: none"> • Anteilfinanzierung von 25 % des förderfähigen Investitionsvolumens (Basisförderung) • Zuschlag von 10 Prozentpunkten für Betriebe des Obst-, und Weinbaus, von 5 Prozentpunkten für Betriebe, die nachweislich nach einem anerkannten ökologischen Standard wirtschaften oder ihr Vorhaben im benachteiligten Gebiet umsetzen, 20 Prozentpunkten für Vorhaben im Rahmen von EIP AGRI • Bagatellgrenze von 20.000 €, maximal förderfähiges Investitionsvolumen von 5 Mio. € und maximale Förderung 65 % der förderfähigen Gesamtausgaben
Förderfähige Technik	<ul style="list-style-type: none"> • Gartenbau, Obstbau- und Hopfenanlagen, Sonderkulturen, Pflanzenbau, Weinbau: Anschaffung umweltschonender Spezialtechnik: ressourcenschonende Beregnungs-/Bewässerungsanlagen, insbesondere Tropfbewässerung, Linear- und Kreisberegnungsmaschinen, Rohrtrommel-Schlauchberegnung mit Düsenwagen (inkl. Pumpen für Wasserbereitstellung und Zuleitungen, bei mobilen Anlagen) • Obstbau- und Hopfenanlagen: Errichtung von Tropfbewässerungsanlagen einschließlich baulicher Investitionen zur Bereitstellung von Beregnungswasser (mindestens 5 Jahre Nutzbarkeit der vorhandenen Baumobstanlage) • Sonderkulturen Pflanzenbau, Weinbau: bauliche Investitionen für ressourcenschonende Beregnungs-/Bewässerungsverfahren (inkl. Pumpen für Wasserbereitstellung und Zuleitungen, bei mobilen Anlagen); Investition zur Verbesserung einer bereits bestehenden Anlage oder eines Teils der Bewässerungs-/Beregnungsinfrastruktur nur bei Verbesserung der Energieeffizienz gegenüber der bestehenden Anlage oder dem Bau eines Speicherbeckens ; Investition bei Nettovergrößerung der bisher bewässerten Fläche nur, wenn Grundwasserentnahmestelle außerhalb eines als schlecht eingestuftes Grundwasserkörpers + Vorlage einer wasserrechtlichen Erlaubnis

Quelle: SMEKU, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e, 2020f).

Tabelle 45: Förderrichtlinie Landwirtschaft, Investition, Existenzgründung 2023–2027

Bundesland	Sachsen
Zeitraum	2023–2027
Finanzierung	ELER
Gegenstand	Investitionen in die Wettbewerbsfähigkeit von landwirtschaftlichen Unternehmen: Beregnungs-, Bewässerungs- und Regenwassersammelanlagen
Zuwendungsempfänger	natürliche Personen, Personengesellschaften und juristische Personen, Träger eines landwirtschaftlichen Unternehmens
Voraussetzungen	<ul style="list-style-type: none"> • Wasserzähler und Genehmigungen der zuständigen Behörde (z. B. aufbereitetes Abwasser) • bestehende Anlagen: Wassereinsparpotenzial von mindestens 15 %
Art und Höhe der Zuwendungen	<ul style="list-style-type: none"> • Anteilfinanzierung von 25 % des förderfähigen Investitionsvolumens (Basisförderung) • Zuschlag von 10 Prozentpunkten für Betriebe des Garten-, Obst-, und Weinbaus, von 5 Prozentpunkten für Betriebe, die nachweislich nach einem anerkannten ökologischen Standard wirtschaften oder ihr Vorhaben im benachteiligten Gebiet umsetzen, 20 Prozentpunkten für Vorhaben im Rahmen von EIP AGRI • Bagatellgrenze von 20.000 €, maximal förderfähiges Investitionsvolumen von 5 Mio. € und maximale Förderung 65 % der förderfähigen Gesamtausgaben

Quelle: SMEKU (2023).

Tabelle 46: Aktionsplan Bewässerung

Bundesland	Bayern
Zeitraum	seit 2018
Finanzierung	GAK, Landesmittel
Gegenstand	<ul style="list-style-type: none"> • Wasserfassungen und sonstige Anlagen für die Entnahme von Wasser. • Beileitungen aus größeren Gewässern. • Wasserspeicher für Niederschlags- und Oberflächenwasser und von Wasserspeicher zur Vermeidung von Entnahmespitzen von Grundwasser inkl. erforderlicher Filteranlagen • überbetriebliche Versorgungsleitungen auf Ebene der Infrastruktur und Pumpen. • Wasserzähler (kontinuierliche Datenfernübertragung wenigstens an Hauptleitungen). • erforderliche Pegelanlagen oder Messeinrichtungen • Steuerungselemente für die Infrastruktur, Datenfernübertragung • Untersuchungen zu Stoffströmen und relevanten biologischen Qualitätskomponenten in Gewässern
Zuwendungsempfänger	öffentliche Gebietskörperschaften (Städte, Gemeinden und deren Zweckverbände) sowie Wasser- und Bodenverbände
Voraussetzungen	Bewässerungsgebiete mit einem hohen Anteil an Sonderkulturen oder Weinbau
Art und Höhe der Zuwendungen	<ul style="list-style-type: none"> • Anteilfinanzierung von 50 % • Zuwendungshöchstbetrag 10 Mio. €

Quelle: StMUV (2020); Bayerische Staatsregierung (2018).

Tabelle 47: Bewässerungsrichtlinie Nordrhein-Westfalen

Bundesland	Nordrhein-Westfalen
Zeitraum	seit 2019
Finanzierung	GAK
Gegenstand	<ul style="list-style-type: none"> • Investitionen zum Neubau und Erweiterung überbetrieblicher Einrichtungen zur Entnahme, Speicherung und Zuleitung von Wasser sowie für Anlagen zur Grundwasseranhebung und Pumpanlagen für Bewässerungszwecke in Gartenbau und Landwirtschaft bis zur Übergabestelle an das jeweilige einzelbetriebliche Bewässerungsnetz • Kosten für Planung, Beratung und Genehmigungen
Zuwendungsempfänger	Körperschaften des öffentlichen Rechts einschließlich Gemeinden und Gemeindeverbänden und Wasser- und Bodenverbände
Voraussetzungen	<ul style="list-style-type: none"> • Vorliegen einer Wirtschaftlichkeitsberechnung • Region mit im langfristigen Mittel April bis September negativen klimatischen Wasserbilanz
Art und Höhe der Zuwendungen	<ul style="list-style-type: none"> • Projektförderung mit Anteilsfinanzierung (bis zu 70 % der nach Abzug von Beiträgen Dritter anfallenden zuwendungsfähigen Ausgaben betragen) • 20.000 € Bagatellgrenze, Maximale Bemessungsgrundlage 3.000.000 €, Zuwendungshöchstbetrag 2.100.000 €

Quelle: MULNV NRW, 2019; LWK NRW, 2019).

Tabelle 48: Förderprogramm Gemeinschaftliche Bewässerungsinfrastruktur Baden-Württemberg

Bundesland	Baden-Württemberg
Zeitraum	seit 2021
Finanzierung	GAK, Landesmittel
Gegenstand	<ul style="list-style-type: none"> • Investitionen zum Neubau und zur Erweiterung von bestehenden überbetrieblichen Einrichtungen zur Entnahme, Speicherung und Zuleitung von Wasser • Investitionen für Anlagen zur Grundwassergewinnung und Pumpanlagen zur Bewässerung und Frostschutzberegnung bis zur Übergabestelle an das jeweilige einzelbetriebliche Bewässerungsnetz, einschließlich wasserrechtlich erforderlicher Messeinrichtungen • konzeptionelle Vorarbeiten und Erhebungen im Zusammenhang mit den genannten Maßnahmen
Zuwendungsempfänger	Körperschaften des öffentlichen Rechts, öffentlich-rechtlich organisierte Boden- und Wasserverbände
Voraussetzungen	<ul style="list-style-type: none"> • Region mit im langjährigen Mittel von April bis September negativen klimatischen Wasserbilanz bei Infrastrukturmaßnahmen zur reinen Bewässerung bei Trockenheit • Wirtschaftlichkeitsberechnung
Art und Höhe der Zuwendungen	<ul style="list-style-type: none"> • Anteilsfinanzierung (bis zu 50 % bei Investitionen in die Infrastruktur, bis zu 70 % bei Vorarbeiten zum Aufbau gemeinschaftlicher Bewässerungsinfrastruktur) • Bagatellgrenze von 20.000 €, Maximale Bemessungsgrundlage 3.000.000 €, Zuwendungshöchstbetrag 1.500.000 €

Quelle: MLR B-W (2021).

Tabelle 49: Zuwendungen für wasserwirtschaftliche Maßnahmen (Förderrichtlinien der Wasserwirtschaftsverwaltung) Rheinland-Pfalz

Bundesland	Rheinland-Pfalz
Zeitraum	seit 2021
Finanzierung	GAK, Landesmittel (Wasserentnahmeentgelt, Abwasserabgabe)
Gegenstand	Maßnahmen zur Verbesserung der ökologischen Ausrichtung von überbetrieblichen Gemeinschaftsanlagen zur Frostschutzberegnung oder anfeuchtenden Beregnung (insbesondere Anlagen zur Rückhaltung, Entnahme, Speicherung und Zuleitung von Wasser mit dem Ziel einer wasser- und energieeffizienten Feldberegnung und zur Grundwasseranreicherung)
Zuwendungsempfänger	Körperschaft, Anstalt des öffentlichen Rechts
Voraussetzungen	<ul style="list-style-type: none"> • für neue Anlagen: digitale Mengenerfassung und witterungsgesteuerte Beregnungstechniken • Wirtschaftlichkeitsberechnung • Region mit im langjährigen Mittel von April bis September negativen klimatischen Wasserbilanz • Wasserrechtliche Zulassungen
Art und Höhe der Zuwendungen	<ul style="list-style-type: none"> • Anteilsfinanzierung von bis zu 50 % als Zuschuss

Quelle: MKUEM RLP (2021)

Tabelle 50: Förderrichtlinie Klimafolgenanpassung Wasserwirtschaft

Bundesland	Niedersachsen
Zeitraum	seit 2022
Finanzierung	Landesmittel
Gegenstand	<ul style="list-style-type: none"> • Grundlagenarbeit zum Umgang mit der Ressource Wasser unter Berücksichtigung der durch den Klimawandel zu erwartenden Veränderungen • Erstellung von Konzepten, Machbarkeitsstudien und Planungen zur Nutzung von Gewässern oder zum Schutz der Wasserressourcen • Umsetzung von Konzepten zur Wasserbewirtschaftung durch Investitionen zur Anpassung der Wasserbewirtschaftung an den Klimawandel
Zuwendungsempfänger	Kommunale Gebietskörperschaften, Körperschaften und Anstalten des öffentlichen Rechts, Juristische Personen, denen die öffentliche Wasserversorgung, Trinkwassergewinnung oder Abwasserentsorgung obliegt, Zusammenschlüsse der vorgenannten Institutionen und/oder Unternehmen
Voraussetzungen	<ul style="list-style-type: none"> • je nach Maßnahmenart ein Mindestpunktziel von 60 oder 100 Punkten
Art und Höhe der Zuwendungen	<ul style="list-style-type: none"> • Anteilfinanzierung als nicht rückzahlbarer Zuschuss zwischen 50 % und 90 % der zuwendungsfähigen Gesamtausgaben • Bagatellgrenze 10.000–25.000 €, maximale Förderung 300.000–500.000 €

Quelle: NMUEK (2022)

Tabelle 51: Förderung nachhaltiger wasserwirtschaftlicher Vorhaben

Bundesland	Mecklenburg-Vorpommern
Zeitraum	2016–2023
Finanzierung	ELER, GAK
Gegenstand	investive Vorhaben zum Neubau und zur Erweiterung von Wasser sparenden Einrichtungen der überbetrieblichen Bewässerungsregulierung
Zuwendungsempfänger	juristische Personen des öffentlichen Rechts, natürliche und juristische Personen des Privatrechts
Voraussetzungen	<ul style="list-style-type: none"> dauerhafte Nutzungsrecht an den Einrichtungen und Anlagen gesichert Wirtschaftlichkeit durch eine Wirtschaftlichkeitsberechnung belegt im langjährigen Mittel der Monate April bis September negative Wasserbilanz in der betroffenen Region
Art und Höhe der Zuwendungen	<ul style="list-style-type: none"> Projektförderung als Anteilsfinanzierung bis zu 70 % der zuwendungsfähigen Ausgaben

Quelle: MLUV M-V (2016)

7.4 Anpassung der Organisationsstrukturen

Zur Organisation der Bewässerung stehen neben einzelbetrieblichen Strukturen auch überbetriebliche Strukturen mit horizontaler Kooperation (auf Ebene der landwirtschaftlichen Betriebe) und/oder mit vertikalen Kooperationen (auf vor- und nachgelagerter Ebene) zur Verfügung. Kooperationen von zwei oder mehr landwirtschaftlichen Betrieben oder anderen Partnern können auf schriftlichen Verträgen basieren oder als Verbände oder Genossenschaften organisiert sein. Vertragliche Kooperationen auf horizontaler Ebene werden als strategische Allianzen bezeichnet und sind meist auf einen bestimmten Geschäftsbereich bezogen (Kraege, 1997: S. 70). Auf vertikaler Ebene handelt es sich bei dieser Form der Kooperationen um strategische Wertschöpfungspartnerschaften, die ebenfalls auf einen Geschäftsbereich bezogen sind (Kraege, 1997: S. 73). Überbetriebliche Strukturen können vor allem auf horizontaler Ebene bei Investitionen zur Senkung der Verfahrenskosten und Vermeidung von Liquiditätsprobleme durch Verteilung der Kapitalintensität führen. Zudem können Fixkostendegression und Skaleneffekte ausgenutzt werden (Schwaller et al., 2020). Strategische Wertschöpfungspartnerschaften haben nicht unbedingt Kostengründe im Fokus, sondern werden oft aufgrund von Kompetenzen gebildet (Kraege, 1997: S. 73). Durch den Klimawandel in Hessen ist eine Ausweitung der Bewässerung möglich, wodurch es zu einem Anstieg der Wasserrechtsanträge kommen kann. Eine Bündelung der Anträge über Beregnungsverbände, wie sie vor allem im südlichen Hessen mit 31 Verbänden bereits stark praktiziert wird, führt zur Entlastung der Wasserbehörden (Lindenau, 2004). Beregnungsverbände als Körperschaften des öffentlichen Rechts haben im Vergleich zu anderen Zusammenschlüssen wie Interessengemeinschaften den Vorteil einer besseren Förderbarkeit z. B. von gemeinschaftlichen Anlagen (Gronimus, 2024)

Durch den steigenden Wasserbedarf kann die Nutzung von alternativen Wasserressourcen neben dem Grundwasser notwendig werden. Die alternativen Wasserressourcen Regen- und Oberflächenwasser weisen Schwankungen im Angebot auf, wodurch eine Speicherung des Wassers zur Sicherstellung der Wasserverfügbarkeit in der Bewässerungssaison notwendig wird. Der Bau und Betrieb von Wasserspeichern über strategische Allianzen oder Verbandsstrukturen hat im Vergleich zur einzelbetrieblichen Ausführung Kostenvorteile (Schwaller et al., 2020).

Bei der Nutzung von aufbereitetem Abwasser ist eine Umsetzung als strategische Wertschöpfungspartnerschaft mit einem Abwasserverband oder Kläranlagenbetreiber sinnvoll, um Kompetenzen besser zu nutzen. Eine andere Möglichkeit, vor allem wenn mehrere landwirtschaftliche Betriebe aufbereitetes Wasser von einer Kläranlage beziehen, ist die Aufnahme der Abwasserverbände als Mitglied in die Boden- und Wasserverbände. Dies ist eine

sinnvolle Möglichkeit, sodass Aufgaben und besondere Anforderungen in den Satzungen festgelegt werden können (Ebert et al., 2019).

Des Weiteren können bei der Planung von Projekten im Bereich der alternativen Wasserressourcen und Speicherung, v. a. bei Projekten zu aufbereitetem Abwasser, Stakeholder-Prozesse eine sinnvolle Unterstützung sein. Bei diesen Prozessen werden schon in frühen Planungsphasen alle betroffenen Akteure, aber auch die Öffentlichkeit und Behörden eingebunden. So können die Interessen und Bedenken von allen Seiten abgestimmt, eine breitere Akzeptanz erzielt und Konflikte vermieden werden (Schwaller et al., 2020).

8 Literaturverzeichnis

- Abwasserverband Braunschweig (2020) Fact Sheet Lighthouse Project: Wastewater Association for Water Reclamation in Braunschweig, zu finden in <https://suwanu-europe.eu/wp-content/uploads/2020/01/3.Factsheet_Braunschweig.pdf> [zitiert am 15.1.2024]
- Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden (2005) Bodenkundliche Kartieranleitung: Mit 103 Tabellen und 31 Listen, 5., verbesserte und erweiterte Auflage. Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele und Obermiller), 438 p
- ALB [Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und Landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e.V.] (ed) (2020) Bewässerungs-App: Ein webbasiertes Entscheidungssystem für bedarfsgerechtes Bewässern, 1. Aufl., zu finden in <<https://www.alb-bayern.de/media/files/0004/bb.bef1-bew-sserungs-app-20200706h.pdf>> [zitiert am 15.1.2024]
- ALB [Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und Landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e.V.] (2024) Hilfemenü zur Einzelgaben-App, zu finden in <https://www.alb-bayern.de/Print/Bewaesserung/Steuerungsmodelle/Infos/berechnung-bewaesserung-bodenwasser_InformationenEinzelgaben.html> [zitiert am 15.1.2024]
- Albrecht M, Stöpel R, Pflieger I, Nußbaum G (2001) Informationen zur Bewässerung im Freiland, hg. v. Fachverband für Feldberechnung Berechnungsring Thüringen e. V., 2. Auflage
- Battermann HW, Theuvsen L (2009) Feldberechnung in Nordost-Niedersachsen: Regionale Bedeutung und Auswirkungen differenzierter Wasserentnahmeerlaubnisse: Feldberechnung in Nordost-Niedersachsen: Regionale Bedeutung und Auswirkungen differenzierter Wasserentnahmeerlaubnisse. Endbericht, zu finden in <<https://www.lwk-niedersachsen.de/services/download.cfm?pmofile=393>> [zitiert am 2.10.2014]
- Bayerische Staatsregierung (2018) Richtlinien für Zuwendungen zu wasserwirtschaftlichen Vorhaben
- BBodSchV (2021) Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung, zu finden in <https://www.gesetze-im-internet.de/bbodschv_2023/BBodSchV.pdf> [zitiert am 31.1.2024]
- Beck M, Troidl T, Hageneder F, Kirchner S (2021) Bodensensormessung und Datenaufzeichnung: Entscheidungshilfe zur Bewässerungssteuerung, 1. Aufl. Beratungsblatt, zu finden in <www.alb-bayern.de/bef12> [zitiert am 15.1.2024]
- Belau T, Fröba N (2009) Investitionen und Verfahrenskosten für die Feldbewässerung - Ergebnisse der KTBL-Arbeitsgruppe "Feldbewässerung". Landbauforschung(Sonderheft 328):69-72
- Berger D, Kiperwas HR (2021) The Success Story of Israel: Fact Sheet 1 - Water demand and supply: facts and figures, zu finden in <https://suwanu-europe.eu/wp-content/uploads/2021/05/FS1_FactSheet_Israel_Water-demand.pdf> [zitiert am 15.1.2024]
- Bernhardt JJ, Rolfes L, Henseler M, Kreins P (2022) Ermittlung des regionalen Bewässerungsbedarfs für die Landwirtschaft in Bayern, hg. v. Johann Heinrich von Thünen-Institut (TI). Thünen Report, zu finden in <https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn065033.pdf> [zitiert am 13.7.2022]
- Berthold G (2010) Klimawandel und Zusatzwasserbedarf im Hessischen Ried. In: Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (ed) Jahresbericht 2009 des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie. Wiesbaden: pp 63-71
- Berthold G, Hergesell M (2005) Flächendifferenzierte Untersuchungen zu möglichen Auswirkungen einer Klimaänderung auf die Grundwasserneubildung in Hessen: Abschlussbericht für den Bereich Grundwasser, zu finden in <<https://www.hlnug.de/static/klimawandel/inklim/dokumente/endberichte/grundwasserneubildung.pdf>>
- BFN [Bundesamt für Naturschutz] (2021) Naturräumliche Gliederung nach Ssymank 1994: Bereitgestellt als WFS-Datensatz, zu finden in <<https://geodienste.bfn.de/ogc/wfs/gliederungen?SERVICE=WFS&REQUEST=GetCapabilities>>
- 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]
- BKG [Bundesamt für Kartografie und Geodäsie] (2018) Digitales Geländemodell Gitterweite 200 m (DGM200), zu finden in <<https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/digitales-gelandemodell-gitterweite-200-m-dgm200.html>>
- BKG [Bundesamt für Kartografie und Geodäsie] (2022) Verwaltungsgebiete 1:2.500.000 (VG250) georeferenzierte Daten im shape-Format: Stand 31.12.2022, zu finden in <<https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/digitale-geodaten/verwaltungsgebiete/verwaltungsgebiete-1-2-500-000-stand-31-12-vg2500-12-31.html>>
- Blümel K, Chmielewski F-M (2013) Klimawandel in Hessen: Chancen, Risiken und Kosten für den Obst- und Weinbau (CHARIKO), hg. v. Humboldt-Universität zu Berlin, zu finden in <https://www.agrar.hu-berlin.de/de/institut/departments/dntw/agrarmet/research/fp/Endbericht_2013_HU_Berlin_lang.pdf>
- BMEL [Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft] (v. J.) Vom Erzeuger erzielte Durchschnittspreise, zu finden in <<https://www.bmel-statistik.de/archiv/statistisches-jahrbuch>>
- BMEL [Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft] (2023a) Gemeinschaftsaufgabe "Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes", zu finden in <<https://www.bmel.de/DE/themen/laendliche-regionen/foerderung-des-laendlichen-raumes/gemeinschaftsaufgabe-agrarstruktur-kuestenschutz/gak.html>> [zitiert am 8.1.2024]
- BMEL [Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft] (2023b) Grundzüge der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) und ihrer Umsetzung in Deutschland, zu finden in <<https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/eu-agrarpolitik-und-foerderung/gap/gap-nationale-umsetzung.html>> [zitiert am 8.1.2024]
- BMEL [Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft] (2023c) Rahmenplan der Gemeinschaftsaufgabe "Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes" 2023-2026, zu finden in <https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/gak-rahmenplan-2023-2026.pdf?__blob=publicationFile&v=4>
- BMUV [Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz] (ed) (2022) Regierungsentwurf Nationale Wasserstrategie: Entwurf vom 25.11.2022, zu finden in <https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Binnengewasser/nationale_wasserstrategie_bundesregierung_bf.pdf> [zitiert am 12.1.2023]
- BMUV [Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz] (2011) Die Europäische Wasserrahmenrichtlinie und ihre Umsetzung in Deutschland, zu finden in <<https://www.bmu.de/WS1915>> [zitiert am 31.1.2024]
- BSA [Bundessortenamt] (ed) (2008) Richtlinien für die Durchführung von landwirtschaftlichen Wertprüfungen und Sortenversuchen: Gräser- und Kleearten einschließlich Luzerne, Esparsette, zu finden in <https://www.bundessortenamt.de/bsa/media/Files/RILI_4_18_Graeser_Klee_200804.pdf> [zitiert am 6.11.2024]
- Bundesinstitut für Risikobewertung (2020) Aufbereitete Abwässer: Bakterielle Krankheitserreger auf frischem Obst und Gemüse vermeiden: Stellungnahme Nr. 021/2020 des BfR vom 20. April 2020
- Bundesinstitut für Risikobewertung (2022a) Aufbereitete Abwässer: Protozoen auf pflanzlichen Lebensmitteln vermeiden: Stellungnahme Nr. 021/2022 des BfR vom 27. Juli 2022
- Bundesinstitut für Risikobewertung (2022b) Aufbereitete Abwässer: Virale Krankheitserreger auf pflanzlichen Lebensmitteln vermeiden: Stellungnahme Nr. 019/2022 des BfR vom 7. Juli 2022
- Butz A (2018) Einfluss von Bewässerung auf Ertrag und Ertragsstabilität bei Ackerbaukulturen. Landinfo(4):50-52
- CDC [DWD Climate Data Center] (2023a) Eintrittsdaten verschiedener Entwicklungsstadien landwirtschaftlicher Kulturpflanzen von der Bestellung bis zur Ernte (Jahresmelder, historisch) von 1951-2020 für Deutschland: Version: v009, zu finden in <https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/phenology/annual_reporters/crops/historical/BESCHREIBUNG_obsgermany_phenology_annual_reporters_crops_historical_de.pdf>
- CDC [DWD Climate Data Center] (2023b) Jährliche Raster des Vegetationsbeginns in Deutschland von 1992-2020, zu finden in <https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/annual/vegetation_begin/BESCHREIBUNG_gridsgermany_annual_vegetation_begin_de.pdf>

- CDC [DWD Climate Data Center] (2023c) Tägliche Raster der FAO Grasreferenzverdunstung: Version v1.0, zu finden in https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/daily/evaporation_fao/
- CDC [DWD Climate Data Center] (2024a) Raster der mittleren täglichen relativen Luftfeuchte in % für Deutschland - HYRAS-DE-HURS: Version v5.0, zu finden in https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/daily/hyras_de/humidity/BESCHREIBUNG_GRD_DEU_P1D_RH_HYRAS_DE_de.pdf
- CDC [DWD Climate Data Center] (2024b) Raster der Tagessumme des Niederschlags in mm für Deutschland - HYRAS-DE-PRE: Version v5.0, zu finden in https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/daily/hyras_de/precipitation/BESCHREIBUNG_GRD_DEU_P1D_RR_HYRAS-DE_de.pdf
- CDC [DWD Climate Data Center] (2024c) Raster der Tagestiefsttemperatur in °C für Deutschland - HYRAS-DE-TASMIN: Version v5.0, zu finden in https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/daily/hyras_de/air_temperature_min/BESCHREIBUNG_GRD_DEU_P1D_T2M_N_HYRAS_DE_de.pdf
- Chmielewski F-M, Growing F (2013) Klimawandel und Obstbau. *Promet - meteorologische Fortbildung* 38(1/2):32-41
- DESTATIS [Statistisches Bundesamt] (2011a) 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] (2011b) Bodenbearbeitung, Bewässerung, Landschaftselemente: Erhebung über landwirtschaftliche Produktionsmethoden (ELPM) Heft 5, zu finden in https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Produktionsmethoden/Publikationen/Downloads-Produktionsmethoden/bodenbearbeitung-bewaesserung-2032805109005.xlsx?__blob=publicationFile
- DESTATIS [Statistisches Bundesamt] (2014) Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Bewässerung in landwirtschaftlichen Betrieben / Agrarstrukturerhebung: Agrarstrukturerhebung 2013, zu finden in https://www.statistischebibliothek.de/mir/servlets/MCRFileNodeServlet/DEHeft_derivate_00026891/5411205139004.pdf [zitiert am 25.1.2022]
- DESTATIS [Statistisches Bundesamt] (2017a) Bewässerung in landwirtschaftlichen Betrieben/Agrarstrukturerhebung 2016, zu finden in https://www.statistischebibliothek.de/mir/servlets/MCRFileNodeServlet/DEHeft_derivate_00063043/5411205169005_korr14082017.xlsx
- DESTATIS [Statistisches Bundesamt] (2017b) Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Bewässerung in landwirtschaftlichen Betrieben / Agrarstrukturerhebung.: Agrarstrukturerhebung 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]
- DIN 19650 (1999) Hygienische Belange von Bewässerungswasser
- DIN 19655 (2008) Bewässerung- Aufgaben, Grundlagen, Planung und Verfahren
- Drastig K, Prochnow A, Brunsch R (2010) Wassermanagement in der Landwirtschaft: Diskussionspapier 3. 02/2010, hg. v. Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften
- Duden C, Nacke C, Offermann F (2024) German yield and area data for 11 crops from 1979 to 2021 at a harmonized spatial resolution of 397 districts. *Sci Data* 11(1):95. doi: 10.1038/s41597-024-02951-8

- DVGW [Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.] (2024) Stellungnahme vom 22. März 2024 zum Entwurf eines Dritten Gesetzes zur Änderung des Wasserhaushaltsgesetzes zur Ergänzung und Durchführung der Verordnung (EU) 2020/741 über Mindestanforderungen an die Wiederverwendung kommunalen Abwassers für die landwirtschaftliche Bewässerung, zu finden in <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/verein/aktuelles/stellungnahmen/dvgw-stellungnahme-whg-aenderung-wasserwiederverwendung.pdf>
- DWA [Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.] (2019) Merkblatt DWA-M 590: Grundsätze und Richtwerte zur Beurteilung von Anträgen zur Entnahme von Wasser für die Bewässerung, hg. v. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), 1. Auflage. DWA-Regelwerk
- DWA [Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.] (2020) Arbeitsblatt DWA-A 102-2/BWK-A 3-2: Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer – Teil 2: Emissionsbezogene Bewertungen und Regelungen, 2. Auflage, Stand: korrigierte Fassung August 2022. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall e.V. (DWA), 95 p. DWA-Regelwerk A 102-2/BWK-A 3-2
- DWA [Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.] (2022) Merkblatt DWA-M 102-4/BWK-M 3-4: Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer. Teil 4, Wasserhaushaltsbilanz für die Bewirtschaftung des Niederschlagswassers, 1. Auflage. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall, 50 p. DWA-Regelwerk DWA-M 102-4/BWK-M 3-4
- DWA [Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.] (2024) Stellungnahme zum Referentenentwurf eines dritten Gesetzes zur Änderung des Wasserhaushaltsgesetzes vom 28.02.2024, zu finden in https://de.dwa.de/files/_media/content/01_DIE_DWA/Politikinformationen/Stellungnahmen/DWA_Stellungnahme_WHG_Wasserreue.pdf
- DWD [Deutscher Wetterdienst] (2021a) Mittlere relative Luftfeuchte aus dem DWD-Kernensemble. Regionalisierte Klimaprojektionsdaten für die Jahre 1990-2100
- DWD [Deutscher Wetterdienst] (2021b) Niederschlag. Interpolierte Messwerte für die Jahre 1961-2021
- DWD [Deutscher Wetterdienst] (2021c) Niederschlagsdaten aus dem DWD-Kernensemble. Regionalisierte Klimaprojektionsdaten für die Jahre 1970-2100
- DWD [Deutscher Wetterdienst] (2021d) Tagestiefsttemperatur aus dem DWD-Kernensemble. Regionalisierte Klimaprojektionsdaten für die Jahre 1970-2100
- DWD [Deutscher Wetterdienst] (2021e) Tägliche Raster der FAO Grasreferenzverdunstung für die Jahre 1970-2100: Am 21.06.2021 übermittelt im Rahmen einer Kooperationsvereinbarung zwischen den Bundesbehörden vom Deutschen Wetterdienst an das Johann Heinrich von Thünen-Institut.
- DWD [Deutscher Wetterdienst] (2021f) Tägliche Raster der minimalen Lufttemperatur für die Jahre 1991-2020: Am 21.06.2021 übermittelt im Rahmen einer Kooperationsvereinbarung zwischen den Bundesbehörden vom Deutschen Wetterdienst an das Johann Heinrich von Thünen-Institut.
- DWD [Deutscher Wetterdienst] (2021g) Tägliche Raster des Niederschlags von 1961-2020: Am 21.06.2021 übermittelt im Rahmen einer Kooperationsvereinbarung zwischen den Bundesbehörden vom Deutschen Wetterdienst an das Johann Heinrich von Thünen-Institut.
- DWD [Deutscher Wetterdienst] (2021h) Verdunstungswerte nach FAO56-Grasreferenzverdunstung aus dem DWD-Kernensemble. Regionalisierte Klimaprojektionsdaten für die Jahre 1990-2050
- DWD [Deutscher Wetterdienst] (2022) Datensätze auf der Basis der RCP-Szenarien, zu finden in https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimaprojektionen/fuer_deutschland/fuer_dtld_rcp-datensatz_node.html [zitiert am 12.4.2022]
- DWD [Deutscher Wetterdienst] (2023) DWD untersucht Pflanzenentwicklung im Frühjahr: Globale Erwärmung – bringt sie ein höheres Risiko für Spätfrostschäden?, zu finden in https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2023/20230412_pm_spaetfrostschaden_news.html
- DWD [Deutscher Wetterdienst] (2024) agrowetter Beregnung, zu finden in https://www.dwd.de/DE/leistungen/agrowetter_beregnung/agrobereg.html

- DWD [Deutscher Wetterdienst], HLNUG [Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie] (2024) Klimareport Hessen: Das Klima in Hessen - gestern, heute und in der Zukunft, 76 p, zu finden in <https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/klima/Klimareport_Hessen_2024.pdf>
- Ebers N, Stupak N, Hüttel S, Woelfert M, Müller-Thomy H (2023) Potenzialabschätzung von technischen Wasserspeicheroptionen, Bewässerungsansätzen und ihrer Umsetzbarkeit. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen Institut, 58 p. Thünen Working Paper 227
- Ebert B, Günkel-Lange T, Parniske J, Schramm E (2019) Weitergehend aufbereitetes kommunales Abwasser als alternative Wasserressource im Hessischen Ried: Eine Hypowave-Fallstudie, Fraunhofer IGB, zu finden in <https://www.hypowave.de/fileadmin/user_upload/Ergebnisse/Broschueren/1908_BR-ubt_hypowave-03_de_hi.pdf>
- Engel N, May K, Müller U (2013) Beregnungssteuerung mit BOWAB, zu finden in <https://www.lbeg.niedersachsen.de/download/81861/Poster_BOWAB.pdf> [zitiert am 15.1.2024]
- Engel N, Müller U, Schäfer W (2012) BOWAB – Ein Mehrschicht-Bodenwasserhaushaltsmodell. In: Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (ed) Klimawandel und Bodenwasserhaushalt. Hannover: pp 85-98
- Erlt G, Bug J, Elbracht J, Engel N, Herrmann F (2019) Grundwasserneubildung von Niedersachsen und Bremen. Berechnungen mit dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA18, hg. v. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG). Geoberichte, zu finden in <https://dx.doi.org/10.48476/geober_36_2019>
- Europäische Kommission (2024) Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem (InVeKoS), zu finden in <https://agriculture.ec.europa.eu/common-agricultural-policy/financing-cap/assurance-and-audit/managing-payments_de>
- Evans RG, LaRue J, Stone KC, King BA (2013) Adoption of site-specific variable rate sprinkler irrigation systems. *Irrig Sci* 31(4):871-887. doi: 10.1007/s00271-012-0365-x
- Expert*innen Hessen (2023) Expert*innengespräch mit Vertreter*innen des Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen (LLH) und des Regierungspräsidiums Darmstadt am 23.06.2023
- FAO [Food and Agriculture Organization of the United Nations] (2024a) Crop Water Information, zu finden in <<https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/en/>>
- FAO [Food and Agriculture Organization of the United Nations] (2024b) Producer Prices, zu finden in <<https://www.fao.org/faostat/en/#data/PP>> [zitiert am 1.3.2024]
- Farooq M, Hussain M, Wahid A, Siddique KHM (2012) Drought Stress in Plants: An Overview. In: Aroca R (ed) Plant responses to drought stress: From morphological to molecular features. Berlin, Heidelberg: Springer: pp 1-33
- Fatta-Kassinou D, Karaolia P (2020a) The Success Story of Cyprus: Fact Sheet 1 - Water demand and supply: facts and figures, zu finden in <https://suwanu-europe.eu/wp-content/uploads/2020/01/FS1_FactSheet_Cyprus_Water-demand.pdf> [zitiert am 15.1.2024]
- Fatta-Kassinou D, Karaolia P (2020b) The Success Story of Cyprus: Fact Sheet 2 - Wastewater treatment and reuse, zu finden in <https://suwanu-europe.eu/wp-content/uploads/2020/01/FS2_FactSheet_Cyprus_Wastewater.pdf> [zitiert am 15.1.2024]
- Fereres E, Soriano MA (2007) Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *J Exp Bot* 58(2):147-159. doi: 10.1093/jxb/erl165
- Fliß R, Baumeister C, Gudera T, Hergesell M, Kopp B, Neumann J, Posselt M (2021) Auswirkungen des Klimawandels auf das Grundwasser und die Wasserversorgung in Süddeutschland. *Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie* 26(1):33-45. doi: 10.1007/s00767-021-00477-z
- Fortmann J, Grimm C (2017) Schadenspotentiale und Schäden in der Landwirtschaft durch Überflutungsereignisse mit Salzwasser. *Die Küste*(85):5-44, zu finden in <<https://izw.baw.de/publikationen/die-kueste/0/k085102.pdf>>
- Fricke E (2006) Energiekosten der Feldberegnung – was kostet Beregnung zur Zeit? Mitgliederversammlung FVF
- Fricke E (2014) Wirtschaftlichkeit: Nutzen und Kosten der Bewässerung. In: Michel R, Sourell H (eds) *Bewässerung in der Landwirtschaft*. Clenze: Erling: pp 111-118
- Fricke E (2018) Effiziente Bewässerungstechnik und -steuerung - Stand und Trends. In: Schimmelpfennig S, Anter J, Heidecke C, Lange S, Röttchen K, Bittner F (eds) *Bewässerung in der Landwirtschaft: Tagungsband zur Fachtagung am 11./12.09.2017 in Suderburg*. Braunschweig: pp 65-76

- Fröba N, Belau T (2018) Betriebswirtschaftliche Eckdaten zur landwirtschaftlichen Bewässerung. In: Schimmelpfennig S, Anter J, Heidecke C, Lange S, Röttchen K, Bittner F (eds) Bewässerung in der Landwirtschaft: Tagungsband zur Fachtagung am 11./12.09.2017 in Suderburg. Braunschweig: pp 103-112
- Gawel E, Köck. Wolfgang (2023) Internalisierung von Umwelt- und Ressourcenkosten gemäß Vorgaben des Zukunftsplans Wasser, zu finden in <https://umwelt.hessen.de/sites/umwelt.hessen.de/files/2023-11/gutachten_urk_langfassung.pdf> [zitiert am 15.1.2024]
- Gawel E, Löck W, Kern K, Möckel S, Holländer R, Fälsch M, Völkner T (2011) Weiterentwicklung von Abwasserabgabe und Wasserentnahmeentgelten zu einer umfassenden Wassernutzungsabgabe, hg. v. Umweltbundesamt (UBA)
- Gömann H, Bender A, Bolte A, Dirksmeyer W, Englert H, Feil J-H, Frühauf C, Hauschild M, Kregel S, Lilienthal H, Löpmeier F-J, Müller J, Mußhoff O, Natkhin M, Offermann F, Seidel P, Schmidt M, Seintsch B, Steidl J, Strohm K, Zimmer Y (2015) Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen: Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Thünen Report, zu finden in <https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn055248.pdf> [zitiert am 12.1.2023]
- Gramm M (2014) Untersuchungen zu pflanzenbaulichen Anpassungsstrategien an den klimabedingten Trockenstress und deren Wirtschaftlichkeit unter Nutzung wassersparender Verfahren der Bewässerung und Beregnung, hg. v. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG). Schriftenreihe des LfULG
- Gronimus S (2024) Organisationsmöglichkeiten einer überbetrieblichen Wasserversorgung. Berlin. Herausforderung Wasserverfügbarkeit und Anpassungsoptionen im Gartenbau am 18. und 19. Juni 2024, zu finden in <https://www.ktmlandingpage.bmel.de/fileadmin/SITE_MASTER/content/KTM-Veranstaltungen/Wassergartenbau/Mediathek/12_Gronimus.pdf>
- Haaren J von, Haaren M von (2014) Planung von Beregnungssystemen zur Anpassung an den Klimawandel: Konzept zur ökonomischen und ökologischen Bewertung verschiedener Beregnungssysteme, hg. v. Landwirtschaftskammer Niedersachsen (LWK)
- Hemming J, van Os E, Balendonck J (2009) Intelligent bewässern im Gartenbau: Forschungstrends in den Niederlanden. Landbauforschung(Sonderheft 328):81-87
- Herbst M, Frühauf C (2018) Wird das Wasser knapp? Wasserbedarf und -verfügbarkeit heute und in Zukunft. In: Schimmelpfennig S, Anter J, Heidecke C, Lange S, Röttchen K, Bittner F (eds) Bewässerung in der Landwirtschaft: Tagungsband zur Fachtagung am 11./12.09.2017 in Suderburg. Braunschweig: pp 1-10
- Hergesell M (2017) Auswirkungen der Trockenperiode 2016–2017 auf das Grundwasser, hg. v. Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG). Jahresbericht, zu finden in <https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/das_hlnug/jahresberichte/2017/jb_2017_063_W4.pdf>
- Hessischer Bauernverband e. V. (2024) Hessens Regionen: Karte. Hessischer Bauernverband e. V., zu finden in <<https://www.hessens-bauern.de/hessens-regionen-karte/regionen>>
- Hessisches Statistisches Landesamt (2012) Landwirtschaftszählung 2010: Bewässerung C IV 10/10 - 10, zu finden in <https://www.statistischebibliothek.de/mir/servlets/MCRFileNodeServlet/HEHeft_derivate_00006537/CIV10_10_10_a.pdf>
- Hessisches Statistisches Landesamt (2021) Landwirtschaftszählung 2020: Bewässerung in den landwirtschaftlichen Betrieben C IV 10 - 10/20, zu finden in <https://statistik.hessen.de/sites/statistik.hessen.de/files/CIV10_10_20.pdf>
- HGU [Hochschule Geisenheim] (2024) BLE-Projekt "GSEHEN", zu finden in <<https://www.hs-geisenheim.de/gemuesebau/bewaesserung/ble-gsehen/>> [zitiert am 15.1.2024]
- HLBG [Hessisches Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation] (2024) Objektartenkataloge zur GeoInfoDok: ALKIS ® in Hessen Version 4.0 (ALKIS ® OK - HE V4.0), zu finden in <https://hvbh.hessen.de/sites/hvbh.hessen.de/files/2024-01/objektartenkataloge_zur_geoinfodok-bf.pdf> [zitiert am 14.11.2024]
- HLNUG [Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie] (ed) (2008) Klimafolgen in der Wasserwirtschaft (Grundwasser): Sicherstellen der landwirtschaftlichen Produktion mit Zusatzwasserbedarf bei veränderten klimatischen Bedingungen - Maßnahmen für ein nachhaltiges Grundwassermanagement sowie Anbauempfehlungen für die landwirtschaftliche Produktion im Hessischen Ried
- HLNUG [Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie] (2022a) Bodenflächendaten 1:50.000 Hessen (BFD50) als Geodaten und Sachdatenbank: Bereitgestellt am Juni 2022, zu finden in <<https://www.hlnug.de/themen/boden/information/bodenflaechenkataster-und-kartenwerke/bfd50>>

- HLNUG [Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie] (2022b) Jahressummen der Grundwasserneubildung in Hessen 1951-2020
- HLNUG [Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie] (2022c) Monatssummen der Grundwasserneubildung in Hessen 1960-2100 aus dem KLIWA-Ensemble
- HLNUG [Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie] (2022d) Gewässernetz 1:25.000, zu finden in <https://geodienste-umwelt.hessen.de/inspire/Gewaessernetz_Hessen/Gewaessernetz_DLM25__epsg25832.zip> [zitiert am 14.11.2024]
- HLNUG [Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie] (2023) Grundwasserbeschaffenheitsbericht 2022. Grundwasser in Hessen, zu finden in <https://www.hlnug.de/fileadmin/shop/publikationen/wasser/grundwasser/Grundwasserbeschaffenheitsbericht%202022_bf.pdf>
- HLNUG [Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie] (2024a) Durchflussdaten aus dem WISKIWEB, zu finden in <<https://www.hlnug.de/static/pegel/wiskiweb3/webpublic/#/overview/Durchfluss>>
- HLNUG [Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie] (2024b) Messdatenportal, zu finden in <<https://www.hlnug.de/messwerte/datenportal>>
- HLNUG [Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie] (2024c) Trinkwasser- und Heilquellenschutzgebiete (ALK), zu finden in <https://geodienste-umwelt.hessen.de/inspire/Bewirtschaftungsgebiete_Hessen/TWS_HQS_ALK__epsg25832.zip> [zitiert am 28.10.2024]
- HLNUG [Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie] (2024d) Umweltindikatoren Hessen: Grundwasserneubildung, zu finden in <<https://www.hlnug.de/themen/uatlas/umweltindikatoren-hessen/grundwasserneubildung>>
- HLNUG [Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie] (2024e) Wasserschutzgebiete, zu finden in <<https://www.hlnug.de/themen/wasser/wasserschutzgebiete>>
- HMLUWFJH [Hessische Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt, Weinbau, Forsten, Jagd und Heimat] (2024) Hessisches Programm für Agrarumwelt- und Landschaftspflege-Maßnahmen HALM 2, zu finden in <https://landwirtschaft.hessen.de/sites/landwirtschaft.hessen.de/files/2024-02/halm_2-richtlinien_unterschrieben_0.pdf> [zitiert am 6.11.2024]
- HMUKLV [Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz] (2020) Landnutzungsinformationen 2020 aus der InVeKoS-Datenbank
- HMUKLV [Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz] (ed) (2022) Zukunftsplan Wasser: Wasserwirtschaftlicher Fachplan Hessen, zu finden in <Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz>
- HMUKLV [Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz] (ed) (2023a) Beseitigung von kommunalen Abwässern in Hessen: Lagebericht 2022, zu finden in <https://umwelt.hessen.de/sites/umwelt.hessen.de/files/2023-08/lagebericht_hessen_2022_-_beseitigung_von_kommunalen_abwaessern_in_hessen.pdf> [zitiert am 9.1.2024]
- HMUKLV [Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz] (2023b) Richtlinien Einzelbetriebliches Förderungsprogramm Landwirtschaft (RL-EFP), zu finden in <https://umwelt.hessen.de/sites/umwelt.hessen.de/files/2023-07/richtlinien_efp_vom_17._juli_2023.pdf>
- Hochschule Geisenheim, LWK Niedersachsen [Landwirtschaftskammer Niedersachsen], LLH [Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen] (eds) (2017) Effiziente Bewässerung im Gemüsebau: Modellvorhaben "Demonstrationsbetriebe zur Effizienzsteigerung der Bewässerungstechnik und des Bewässerungsmanagements im Freilandgemüsebau", zu finden in <https://www.hs-geisenheim.de/fileadmin/redaktion/FORSCHUNG/Institut_fuer_Gemuesebau/Ueberblick_Institut_fuer_Gemuesebau/BLE_Modellvorhaben/BLE_EffizienteBewaesseungGemuesebau_2017_05_11.pdf> [zitiert am 11.1.2024]
- HSL [Hessisches Statistisches Landesamt] (v. J.a) Die Gemüseerhebung in Hessen: Kennziffer: C I 3 mit CII
- HSL [Hessisches Statistisches Landesamt] (v. J.b) Die Weinmosternte in Hessen: Kennziffer: C II 4
- HSL [Hessisches Statistisches Landesamt] (v. J.c) Erhebung über den Anbau von Strauchbeeren: Kennziffer: C I 9 mit C II

- HSL [Hessisches Statistisches Landesamt] (2022a) Nichtöffentliche Wasserversorgung und Abwasserentsorgung in Hessen 2019. Statistische Berichte, zu finden in <https://statistik.hessen.de/sites/statistik.hessen.de/files/2022-06/qi2_3j19.pdf>
- HSL [Hessisches Statistisches Landesamt] (2022b) Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserentsorgung in Hessen 2019. Statistische Berichte, zu finden in <https://statistik.hessen.de/sites/statistik.hessen.de/files/2022-06/qi1_3j19.pdf>
- HVVG [Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation] (2024) Zweidimensionale Gebäude Amtliche Hausumringe Deutschland (HU-DE), zu finden in <<https://hvbg.hessen.de/liegenschaftskataster/amtliche-hausumringe-deutschland>> [zitiert am 14.11.2024]
- Irmak S, Odhiambo LO, Kranz WL, Eisenhauer DE (2011) Irrigation Efficiency and Uniformity, and Crop Water Use Efficiency. Biological Systems Engineering: Papers and Publications, zu finden in <<https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1455&context=biosysengfacpub>> [zitiert am 29.7.2024]
- Irripart24 (2022) Welche Wasserpumpe für die landwirtschaftliche Beregnung? Irripart24, zu finden in <https://www.irripart24.eu/blog/welche-wasserpumpe-fuer-die-landwirtschaftliche-beregnung/#Verbrennungsmotoren_Kreiselpumpen_%E2%80%93_Klassiker_in_der_landwirtschaftlichen_Bewaesserung>
- Janssen W, Meinert T, Frühauf C (2017) Klimatische Rahmenbedingungen und beobachtete Veränderungen. In: Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (ed) Agrarmeteorologie. Bonn: pp 7-22
- KLIWA [Arbeitskreis Klimaveränderung und Wasserwirtschaft] (2017) Entwicklung von Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen (1951-2015). Sonnefeld: Louis Hofmann Druck- und Verlagshaus, 102 p. KLIWA-Berichte Heft 21
- Köhler B (2024) Anbauhinweise zu Luzerne – eine trockenheitstolerante Futterpflanze. Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen (LLH), zu finden in <<https://llh.hessen.de/pflanze/gruenland-und-futterbau/futterbau/feldfutter/anbauhinweise-zu-luzerne-einer-trockenheitstoleranten-futterpflanze/>>
- Kraege R (1997) Controlling strategischer Unternehmungsk Kooperationen: Aufgaben, Instrumente und Gestaltungsempfehlungen. Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 1996. München: Hampp, 329 p. Schriften zum Management 9, zu finden in <<http://hdl.handle.net/10419/116849>>
- 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
- Kruse S (2018) Rechtliche Aspekte und Konflikte landwirtschaftlicher Wassernutzung. In: Schimmelpfennig S, Anter J, Heidecke C, Lange S, Röttchen K, Bittner F (eds) Bewässerung in der Landwirtschaft: Tagungsband zur Fachtagung am 11./12.09.2017 in Suderburg. Braunschweig: pp 59-64
- KTBL (2013) Freilandbewässerung: Betriebs- und arbeitswirtschaftliche Kalkulationen, 1. Ausg. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. KTBL-Datensammlung
- KTBL [Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.] (2014) Technik der Freilandbewässerung, zu finden in <https://www.ktbl.de/fileadmin/user_upload/Artikel/Gartenbau/Freilandbewaesserung/Technik_Freilandbewaesserung.pdf>
- KTBL [Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.] (2018) Faustzahlen für die Landwirtschaft, 15. Auflage. Darmstadt, 1385 p
- KTBL [Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.] (2022) MaKost – Maschinenkosten und Reparaturkosten, zu finden in <<https://daten.ktbl.de/makost/>> [zitiert am 1.12.2022]
- KTBL [Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.] (2023) KTBL-Feldarbeitsrechner, zu finden in <<https://daten.ktbl.de/feldarbeit/entry.html>>
- Kühling I, Hüsing B, Bome N, Trautz D (2018) Soybeans in high latitudes: effects of Bradyrhizobium inoculation in Northwest Germany and southern West Siberia. Org. Agr. 8(2):159-171. doi: 10.1007/s13165-017-0181-y

- Laber H (2015) Bewässerungs- und Sorteneffekte bei Feldgemüse: Untersuchungen zur Bewässerungssteuerung und zur Wechselwirkung zwischen Bewässerung und Sorte bei verschiedenen Feldgemüsearten vor dem Hintergrund des zu erwartenden Klimawandels in Sachsen, hg. v. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG). Schriftenreihe des LfULG
- Lamm FR (2002) Advantages and disadvantages of subsurface drip irrigation. International Meeting on Advances in Drip/Micro Irrigation, Puerto de La Cruz, Tenerife, Canary Islands, December 2-5, 2002:1-13, zu finden in <<https://www.academia.edu/download/36203172/ADofSDI.pdf>> [zitiert am 11.1.2024]
- Landpartie.de (2022) Größter Regenwasserspeicher Hessens steht auf Pauls Bauernhof, zu finden in <<https://landpartie.de/aktuell/Neuigkeiten/groesster-regenwasserspeicher-hessens-steht-auf-pauls-bauernhof/45/>> [zitiert am 15.1.2024]
- Létourneau G, Caron J (2019) Irrigation Management Scale and Water Application Method to Improve Yield and Water Productivity of Field-Grown Strawberries. *Agronomy* 9(6):286. doi: 10.3390/agronomy9060286
- LfL [Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft] (ed) (2008) Bewässerung im Ackerbau und in gärtnerischen Freilandkulturen, 1. Aufl. LfL-Information
- LfULG [Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie] (2019) Sorghum: Anbaualternative für Trockenstandorte, zu finden in <<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/32860/documents/50094>> [zitiert am 6.11.2024]
- Lindenau G (2004) Beregnung optimieren, Kosten sparen, Liquidität sichern. In: Hessisches Dienstleistungszentrum für Landwirtschaft, Gartenbau und Naturschutz (ed) Hessischer Beregnungstag 2004: Ressourcenschonender Bewässerungseinsatz in der Praxis: pp 58-63
- Linke C (2023) Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamolldaten: Erstellt durch das Bund-Länder-Fachgespräch "Interpretation regionaler Klimamolldaten" (Stand: März 2023), zu finden in <<https://lfu.brandenburg.de/sixcms/media.php/9/Leitlinien-Klimamolldaten.pdf>>
- Liuzzo L, Notaro V, Freni G (2016) A Reliability Analysis of a Rainfall Harvesting System in Southern Italy. *Water* 8(1):18. doi: 10.3390/w8010018
- LLH [Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen] (2024) Sorghumhirse [zitiert am 6.11.2024]
- Lotze-Campen H, Conradt T, Ewert F, Frühauf C, Gömann H, Michaelis P, Lüttger A, Nendel C, Weigel H-J (2023) Klimawirkungen und Anpassung in der Landwirtschaft. In: Brasseur G, Jacob D, Schuck-Zöller S (eds) Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven, 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum: pp 237-247
- LTZ [Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg] (2012) Sorghumhirsens zur Biogasnutzung als Alternative bzw. Ergänzung zum Energiemaisanbau, zu finden in <https://ltz.landwirtschaft-bw.de/site/pbs-bw-mlr-root/get/documents_E1955085560/MLR.LEL/PB5Documents/ltz_ka/Arbeitsfelder/Nachwachsende%20Rohstoffe/Kulturinformationen/SudangrasZuckerhirse_DL/Sorghumhirsens%20zur%20Biogasnutzung%20als%20Alternative%20bzw.%20Erg%3%A4nzung%20zum%20Energiemaisanbau.pdf> [zitiert am 6.11.2024]
- LTZ [Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg] (2015) Produktionstechnische Versuche 2014 Vorläufige Versuchsergebnisse: Wassereffizienz und Beregnungswürdigkeit versch. Kulturen und Sorten (V09-03). Feldversuchswesen Ackerbau, zu finden in <https://ltz.landwirtschaft-bw.de/site/pbs-bw-mlr-root/get/documents_E-486910989/MLR.LEL/PB5Documents/ltz_ka/Arbeitsfelder/Pflanzenbau/Bew%3%A4sserung_DL/Bew%3%A4sserungErgebnisse/Bew%3%A4sserungVerschKulturen_DL/V09-03%20Kurzinformatio%202014.pdf> [zitiert am 6.11.2014]
- LTZ [Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg] (ed) (2018) Wertschöpfung durch heimische Sojabohnen: Wertschöpfung durch heimische Sojabohnen Leitfaden für Anbau und Verwertung von gentechnikfreien Futtersojabohnen aus konventionellem Anbau, zu finden in <https://ltz.landwirtschaft-bw.de/site/pbs-bw-mlr-root/get/documents_E1542598807/MLR.LEL/PB5Documents/ltz_ka/Kulturpflanzen/Ackerbau/K%3%B6rnerleguminosen/Sojabohne/Leitfaden%20Anbau%20%26%20Verwertung-%20Soja/Wertsch%3%B6pfung%20durch%20heimische%20Sojabohnen.pdf> [zitiert am 6.11.2024]
- LTZ [Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg] (2024a) Sojabohne, zu finden in <<https://ltz.landwirtschaft-bw.de/Lfr/Kulturpflanzen/Sojabohne>> [zitiert am 6.11.2024]
- LTZ [Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg] (2024b) Versuchsbericht Landessortenversuche Körnersorghum 2023 konventionelles Sortiment, zu finden in <<https://ltz.landwirtschaft-bw.de/site/pbs-bw->

- mlr-root/get/documents_E-819347962/MLR.LEL/PB5Documents/ltz_ka/Arbeitsfelder/Pflanzenbau/Sorten/K%C3%B6rnernsorghum_DL/Versuchsbericht%20Sorghum%202023.pdf> [zitiert am 6.11.2024]
- Lüttger A, Dittmann B, Sourell H (2005) Leitfaden zur Berechnung landwirtschaftlicher Kulturen: Schriftenreihe des Landesamtes für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flurneuordnung Abteilung Landwirtschaft und Gartenbau. Reihe Landwirtschaft, Band 6 (2005) Heft VII, hg. v. Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (MLUV)
- LWK Niedersachsen [Landwirtschaftskammer Niedersachsen] (ed) (2017) Leitlinien der ordnungsgemässen Landwirtschaft, zu finden in <https://www.bodenwelten.de/sites/default/files/leitlinien_landwirtschaft_2017.pdf> [zitiert am 14.1.2024]
- LWK Niedersachsen [Landwirtschaftskammer Niedersachsen] (2023) Versuchsdaten zu Bewässerungsversuchen in Niedersachsen 2006-2021
- LWK NRW [Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen] (2019) Bewässerungsrichtlinie Nordrhein-Westfalen 2019
- Mayer N (2006) Sicherung der Langlebigkeit von Tropfbewässerungssystemen. Oppenheim. Bewässerungsseminar, zu finden in <[https://www.dlr.rlp.de/Internet/global/themen.nsf/0/a9708fb0740f324dc125734b00476828/\\$FILE/Mayer.pdf](https://www.dlr.rlp.de/Internet/global/themen.nsf/0/a9708fb0740f324dc125734b00476828/$FILE/Mayer.pdf)> [zitiert am 10.1.2024]
- Meier U (2018) Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen: BBCH Monografie
- MEKOROT (2022) ESG Report 2020-2019, zu finden in <https://www.mekorot-int.com/wp-content/uploads/2022/04/Mekorot_CSR_Anglit_mungash.pdf> [zitiert am 15.1.2024]
- Michel R, Sourell H (eds) (2014) Bewässerung in der Landwirtschaft. Clenze: Erling, 176 S. Themenbibliothek Pflanzenproduktion
- MKUEM RLP [Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität Rheinland-Pfalz] (2021) Zuwendungen für wasserwirtschaftliche Maßnahmen (Förderrichtlinien der Wasserwirtschaftsverwaltung – FöRiWWV
- MLR B-W [Ministeriums für Ernährung, Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg] (2021) Verwaltungsvorschrift des Ministeriums für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz zur Förderung gemeinschaftlicher Bewässerungsinfrastruktur zur Bewässerung und Frostschutzberechnung (VwV Gemeinschaftliche Bewässerungsinfrastruktur)
- MLUV M-V [Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz] (2016) Richtlinie zur Förderung nachhaltiger wasserwirtschaftlicher Vorhaben (WasserFöRL M-V)
- Müller M, Demmel M, Sander G (2020a) 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]
- Müller M, Ebertseder F (2020) Boden und Verteiltechnik bezogene Kennzahlen: Fachliche Grundlagen der Bewässerungs-App - Teil 2 -. Freising: Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und Landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e.V. (ALB), Beratungsblatt bef3, zu finden in <https://www.alb-bayern.de/De/Bewaesserung/BewaesserungsforumBayern/Ergebnisse/porenvolumen-nfk-saugspannung_bef3.html> [zitiert am 11.5.2021]
- Müller M, Zinkernagel J, Kleber J, Fricke E, Beck M, Göttl M (2020b) Kulturbezogene Kennzahlen: Fachliche Grundlagen zur Bewässerungs-App - Teil 1 -. Freising: Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und Landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e.V. (ALB), Beratungsblatt bef2, zu finden in <https://www.alb-bayern.de/De/Bewaesserung/BewaesserungsforumBayern/Ergebnisse/kc-werte-berechnungsschwelle_bef2.html> [zitiert am 11.5.2021]
- MULNV NRW [Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen] (2019) Richtlinie über die Gewährung von Zuwendungen zum Neubau und zur Erweiterung überbetrieblicher Einrichtungen zur Entnahme, Speicherung und Zuleitung von Wasser sowie für Grundwasseranhebung und Pumpenanlagen für Bewässerungszwecke in Gartenbau und Landwirtschaft (Bewässerungsrichtlinie). Ministerialblatt (MBL. NRW.)(6):139-158
- (2016) Nichtöffentliche Wasserversorgung und nichtöffentliche Abwasserentsorgung. Statistisches Bundesamt (DESTATIS), Fachserie 19 Reihe 2.2, zu finden in <<https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft->

Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Publikationen/Downloads-Wasserwirtschaft/wasser-abwasser-nichtoeffentlich-2190220169004.pdf?__blob=publicationFile> [zitiert am 24.1.2022]

- NMUEK [Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz] (2022) Richtlinie über die Gewährung von Zuwendungen zur Förderung von Vorhaben zur strategischen Neuausrichtung des Wassermengenmanagements und des klimafolgenorientierten Ausbaus von Infrastrukturen der Wasserversorgung und -nutzung (FörderRL Klimafolgenanpassung Wasserwirtschaft). Nds. MBl:492 [zitiert am 25.8.2022]
- Ortega-Farias S, Meza SE, López-Olivari R, Araya-Alman M, Carrasco-Benavides M (2022) Effects of four irrigation regimes on yield, fruit quality, plant water status, and water productivity in a furrow-irrigated red raspberry orchard. *Agricultural Water Management* 273:107885. doi: 10.1016/j.agwat.2022.107885
- Paschold P-J (2010) *Bewässerung im Gartenbau*. Stuttgart: ULMER
- Pfleger I (2009) Bewässerungswasserqualität – Hygienische und chemische Belange. 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: pp 49-59
- Pfleger I, Rößler U, Michel H, Knoblauch S, Nußbaum G, Werner A, Krumbein M, Penzler R (2010) Untersuchungsergebnisse zur Bewässerung in Thüringen, hg. v. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. Schriftenreihe "Landwirtschaft und Landschaftspflege in Thüringen", zu finden in <<https://www.tll.de/www/daten/publikationen/schriftenreihe/h2ot1110.pdf>>
- Piccinni G, Ko J, Marek T, Howell T (2009) Determination of growth-stage-specific crop coefficients (KC) of maize and sorghum. *Agricultural Water Management* 96(12):1698-1704. doi: 10.1016/j.agwat.2009.06.024
- Regierungspräsidium Darmstadt (2020) Grundwasserbewirtschaftungsplan Hessisches Ried, zu finden in <https://rp-darmstadt.hessen.de/sites/rp-darmstadt.hessen.de/files/2022-04/grundwasserbewirtschaftungsplan_hessisches_ried_stand_2020.pdf>
- Regierungspräsidium Darmstadt (2022) Datenabfrage zur Bewässerung
- Regierungspräsidium Darmstadt (2023) Zulassung von Grundwasserentnahmen, zu finden in <<https://rp-darmstadt.hessen.de/umwelt-und-energie/gewaesser-und-bodenschutz/grundwasser-und-wasserversorgung/grundwasserentnahmen>> [zitiert am 15.1.2024]
- Regierungspräsidium Darmstadt (2024a) Bau, Betrieb und Unterhaltung von Wasserversorgungsanlagen [zitiert am 9.1.2024]
- Regierungspräsidium Darmstadt (2024b) Entwicklung der Most- und Fassweinepreise ab 2004
- Regierungspräsidium Gießen (ed) Merkblatt: Antragsunterlagen für die wasserrechtliche Zulassung von grundwasserentnahmen, zu finden in <https://rp-giessen.hessen.de/sites/rp-giessen.hessen.de/files/2022-01/2019_05_09_merkblatt_antragsunterlagen_zulassungen_2019_04_08_bf_0.pdf>
- Regierungspräsidium Gießen (ed) (2019) Verfahrensbuch über die wasserrechtlichen Verfahren zur Erteilung einer Erlaubnis, Gehobenen Erlaubnis oder Bewilligung: Grundwasserentnahme, zu finden in <https://rp-giessen.hessen.de/sites/rp-giessen.hessen.de/files/2022-01/2019_04_30_verfbuch_grundwasserentnahme_stand_2019_03_bf_1.pdf>
- Regierungspräsidium Kassel (2007) Pilotprojekt Werra-Salzabwasser: Endbericht, zu finden in <https://flussgebiete.hessen.de/fileadmin/dokumente/2_umsetzung/pilotprojekt_werra_endbericht_endf.pdf> [zitiert am 15.1.2024]
- Renger M, Strebel O (1982) Beregnungsbedürftigkeit 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]
- Riedel A (2017) Möglichkeiten der Beregnungssteuerung, zu finden in <<https://www.lbeg.niedersachsen.de/download/120384>> [zitiert am 15.1.2024]
- Rolbiecki R, Sadan H, Rolbiecki S, Jagosz B, Szczepanek M, Figas A, Atilgan A, Pal-Fam F, Pańka D (2022) Effect of Subsurface Drip Fertigation with Nitrogen on the Yield of Asparagus Grown for the Green Spears on a Light Soil in Central Poland. *Agronomy* 12(2):241. doi: 10.3390/agronomy12020241
- Roth D, Werner D (2000) Bewässerung. In: Blume H-P, Stahr K, Fischer W, Guggenberger G, Horn R, Frede H-G, Felix-Henningsen P (eds) *Handbuch der Bodenkunde*. Weinheim: Wiley-VCH: pp 1-50

- Schäfer W, Hartmann H, Sourell H, Sener S (1991) Feldversuche zur Ermittlung der Wasser- Ertragsbeziehung von Kartoffeln beim Einsatz verschiedener Bewässerungsverfahren in der Westtürkei. *Landbauforschung Völknerode* : FAL agricultural research 41(1):15-20, zu finden in <https://www.openagrar.de/receive/timport_mods_00031991>
- Schmidt N, Zinkernagel J (2019) Klimafolgen für die Bewässerung von Freilandgemüse am Beispiel von Zwiebeln unter Berücksichtigung von Anbauregionen und Klimamodellen. In: Rentenbank (ed) Herausforderung Klimawandel: Auswirkungen auf die Landwirtschaft und Anpassungsstrategien 35. Frankfurt am Main: pp 75-102
- Schnelle F (1963) Frostschutz im Pflanzenbau: Die meteorologischen und biologischen Grundlagen der Frostschadensverhütung. Quellenwerk über den Nachtfrost, seine Entstehung, Vorhersage und Abwehr. Bayerischer Landwirtschaftsverlag 1
- Schwaller CJ, Helmreich B, Gerdes H, Drewes JE (2020) Forschungsvorhaben „Nutzwasser – Gewinnung und Einsatzmöglichkeiten am Beispiel der Schweinfurter Trockenplatte“: Abschlussbericht, zu finden in <https://www.wwa-kg.bayern.de/abwasser/nutzwasser/doc/projekt_nutzwasser_abschlussbericht_barrierefrei.pdf>
- Sears L, Caparelli J, Lee C, Pan D, Strandberg G, Vuu L, Lin Lawell C-Y (2018) Jevons' Paradox and Efficient Irrigation Technology. *Sustainability* 10(5):1590. doi: 10.3390/su10051590
- Seis W, Lesjan B, Maaßen S, Balla D, Hochstrat R, Düppenbecker B (2016) Rahmenbedingungen für die umweltgerechte Nutzung von behandeltem Abwasser zur landwirtschaftlichen Bewässerung: Abschlussbericht, hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Texte
- Seis W, Lesjean B (2015) Infrastruktur und Organisation. UFOPLAN-Abschlussworkshop, zu finden in <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/365/dokumente/infrastruktur_und_organisation.pdf> [zitiert am 15.1.2024]
- Siede R, Staub B, Windpassinger S (2019) Biogasfruchtfolgen mit Hirsen – insektenfreundliche Alternativen zu Mais?, zu finden in <<https://ilh.hessen.de/umwelt/biorohstoffnutzung/nachwachsende-rohstoffe/pflanzenbiogaserzeugung/biogasfruchtfolgen-mit-hirsen-insektenfreundliche-alternativen-zu-mais/>> [zitiert am 6.11.2024]
- SMEKU [Sächsisches Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft] (2020a) Merkblatt für Investitionen im für Sonderkulturen (Heil- und Gewürzpflanzen), nachwachsende Rohstoffe und Freilandgemüseanbau incl. Erdbeeren, Kartoffeln
- SMEKU [Sächsisches Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft] (2020b) Merkblatt für Investitionen im Gartenbau
- SMEKU [Sächsisches Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft] (2020c) Merkblatt für Investitionen im Obstbau- und Hopfenanlagen
- SMEKU [Sächsisches Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft] (2020d) Merkblatt für Investitionen im Pflanzenbau
- SMEKU [Sächsisches Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft] (2020e) Merkblatt für Investitionen im Weinbau
- SMEKU [Sächsisches Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft] (2020f) Richtlinie »Landwirtschaft, Innovation, Wissenstransfer« (LIW/2014) Teil B II. 1. Investitionen in landwirtschaftliche Betriebe einschließlich Garten- und Weinbau
- SMEKU [Sächsisches Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft] (2023) Förderrichtlinie Landwirtschaft, Investition, Existenzgründung. SächsABL.:902
- SMUL [Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft] (ed) (2014) Anpassungsmaßnahmen des sächsischen Pflanzenbaus an den Klimawandel, 1. Aufl., zu finden in <<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/11449/documents/29474>> [zitiert am 15.1.2024]
- Snyder RL, Melo-Abreu JP de, Matulich S (2005) Frost protection: Fundamentals, practice, and economics. Rome, 223 s. FAO Environmental and natural resources service series 10:1
- Sourell H (2009) Bewässerungstechnik: Wasserverteilung mit Blick in die Zukunft, Freilandberegnung. *Landbauforschung(Sonderheft 328)*
- Sourell H, Belau T, Fröba N (2010) Investitionen und Verfahrenskosten für die Feldbewässerung. *Landtechnik* 65(3):189-193. doi: 10.15150/LT.2010.483

- Sourell H, Thörmann H-H (2010) Kapitalbedarf und Verfahrenskosten der Beregnung. In: Sourell H (ed) Feldeberegnung IV. Rendsburg: RKL: pp 594-601
- Spohrer K (2019) Bewässerung. In: Köller K, Hensel O (eds) Verfahrenstechnik in der Pflanzenproduktion. [S.l.]: ULMER: pp 157-174
- Ssymank A (1994) Neue Anforderungen im europäischen Naturschutz - Das Schutzgebietssystem Natura 2000 und die "FFH-Richtlinie" der EU. Natur und Landschaft 69 (9):395-406
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder (2011) Agrarstrukturen in Deutschland - Einheit in Vielfalt: Regionale Ergebnisse der Landwirtschaftszählung 2010, zu finden in <<https://www.statistikportal.de/de/veroeffentlichungen/landwirtschaftszaehlung-2010>>
- Steduto P, Hsiao TC, Fereres E, Raes D (2012) Crop yield response to water. Rome: Food and Agriculture Organization of The United Nations, 500 p. FAO irrigation and drainage paper 66, zu finden in <<http://www.fao.org/docrep/016/i2800e/i2800e00.htm>>
- StMUV [Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz] (2020) Förderprogramm nach Nr. 2.4 RZWas 2018 Investitionsmaßnahmen für Bewässerungsinfrastruktur für 1) Landwirtschaftliche Sonderkulturen, den Gartenbau und für den 2) Weinbau
- Streitfert A, Grünhage L (2009) Klimawandel und Pflanzenphänologie in Hessen: INKLIM 2012 Baustein II plus, zu finden in <https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/klima/inklim_plus/berichte/phaenologie.pdf>
- Stull R (2011) Wet-Bulb Temperature from Relative Humidity and Air Temperature. Journal of Applied Meteorology and Climatology 50(11):2267-2269. doi: 10.1175/JAMC-D-11-0143.1
- Teichert A (2009) Freiland Tropfbewässerung im Gemüsebau und weiteren gärtnerischen Kulturen. Landbauforschung(Sonderheft 328):33-36
- Thörmann H-H, Nolting K, Kraft M, Sourell H (2012) Möglichkeiten von Precision Irrigation. In: Aqarius: Dem Wasser kluge Wege ebnen! Projektbericht: S. 100-116
- Thörmann H-H, Sourell H (2011) Wassereffizienz weiter verbessern. Land und Forst 164(17):34-37
- UBA [Umweltbundesamt] (2024) Daten zum Kommunalen Abwasser 2008 – 2020, zu finden in <https://kommunales-abwasser.de/modal_downloads2020.html> [zitiert am 28.10.2024]
- Wasserverband Hessisches Ried (2021) Grundwasserbewirtschaftung im Hessischen Ried: Nachhaltige Wassergewinnung – sichere landwirtschaftliche Produktion, zu finden in <https://www.whr-infiltration.de/fileadmin/user_upload/WHR/aufgaben/WHR-Broschu%CC%88re__05-2021_.pdf> [zitiert am 10.1.2024]
- Wasserverband Hessisches Ried (2022) Beregnung für 5.400 ha Agrarfläche, zu finden in <<https://www.whr-infiltration.de/aufgaben/beregnung>> [zitiert am 1.9.2022]
- WBL Hessen (2023) Expertegespräch mit Herrn Roth vom WBL Hessen am 18.04.2023
- WHR-Beregnung [Beregnungswasserverband Hessisches Ried] (2023) Konsolidierte Fassung der Satzung des „Beregnungswasserverbandes Hessisches Ried (WHR-Beregnung)“, zu finden in <https://www.whr-beregnung.de/fileadmin/user_upload/WHR-Beregnung/20230821_konsolidierte_Satzung_WHR_Beregnung.pdf> [zitiert am 15.1.2024]
- Wilbois K-P, Spiegel A-K, Asam L, Balko, Christiane, Becker, Heiko, Berset E, Butz A, Haase T, Habekuß A, Hahn V, Heß J, Horneburg B, Hüsing B, Kohlbrecher M, Littmann C, Messmer M, Miersch M, Mindermann A, Nußbaumer H, Ordon F, Recknagel J, Schulz H, Spory K, Trautz D, Unsleber J, Vergara M, Vogel R, Vogt-Kaute W, Wedemeier-Kremer B, Zimmer S, Zurheide T (2014) Ausweitung des Sojaanbaus in Deutschland durch züchterische Ausweitung des Sojaanbaus in Deutschland durch züchterische Anpassung sowie pflanzenbauliche und verarbeitungstechnische Optimierung, hg. v. Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL), zu finden in <<https://orgprints.dk/id/eprint/28484/1/28484-11NA001-008-fibl-wilbois-2014-sojaanbau.pdf>>
- Witte T de (2018) Wirtschaftlichkeit der Feldebewässerung. In: Schimmelpfennig S, Anter J, Heidecke C, Lange S, Röttchen K, Bittner F (eds) Bewässerung in der Landwirtschaft: Tagungsband zur Fachtagung am 11./12.09.2017 in Suderburg. Braunschweig: pp 113-124
- Zinkernagel J, Kleber J, Artelt B, Mayer N (2022) Geisenheimer Bewässerungssteuerung 2022 mit kc-Werten für FAO56-Grasreferenzverdunstung. 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_Grasreferenzverdunstung_2022.pdf> [zitiert am 5.1.2023]

Anhang

Verzeichnis der Abbildungen im Anhang

Abbildung A1:	Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Buschbohnen unter Vollkosten bei Tropfbewässerung und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)	176
Abbildung A2:	Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Buschbohnen unter Vollkosten bei Rohrberegnung und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)	177
Abbildung A3:	Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Himbeeren unter Vollkosten bei Tropfbewässerung und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)	178
Abbildung A4:	Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Johannisbeeren unter Vollkosten bei Tropfbewässerung und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)	179
Abbildung A5:	Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Kartoffeln unter Vollkosten bei Bewässerung mit einer mobilen Beregnungsmaschine mit Düsenwagen und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)	180
Abbildung A6:	Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Kartoffeln unter Vollkosten bei Bewässerung mit einer mobilen Beregnungsmaschine mit Starkregner und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)	181
Abbildung A7:	Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Kartoffeln unter Vollkosten bei Tropfbewässerung und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)	182
Abbildung A8:	Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Spargel unter Vollkosten bei Rohrberegnung und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)	183
Abbildung A9:	Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Spargel unter Vollkosten bei Tropfbewässerung und Grundwasser für Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)	184
Abbildung A10:	Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Wein unter Vollkosten bei Tropfbewässerung und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)	185
Abbildung A11:	Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Zuckerrüben unter Vollkosten bei der Bewässerung durch eine mobile Beregnungsmaschine mit Düsenwgaen und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)	186
Abbildung A12:	Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Zuckerrüben unter Vollkosten bei der Bewässerung durch eine mobile Beregnungsmaschine mit Starkregner und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)	187

Abbildung A13:	Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Zwiebeln unter Vollkosten bei Rohrberegnung und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)	188
Abbildung A14:	Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Zwiebeln unter Vollkosten bei Tropfbewässerung und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)	189
Abbildung A15:	Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Buschbohnen unter variablen Kosten bei Tropfbewässerung und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)	190
Abbildung A16:	Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Buschbohnen unter variablen Kosten bei Rohrberegnung und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)	191
Abbildung A17:	Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Himbeeren unter variablen Kosten bei Tropfbewässerung und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)	192
Abbildung A18:	Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Johannisbeeren unter variablen Kosten bei Tropfbewässerung und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)	193
Abbildung A19:	Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Kartoffeln unter variablen Kosten bei der Bewässerung durch eine mobile Beregnungsmaschine mit Starkregner und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)	194
Abbildung A20:	Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Kartoffeln unter variablen Kosten bei der Bewässerung durch eine mobile Beregnungsmaschine mit Düsenwagen und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)	195
Abbildung A21:	Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Kartoffeln unter variablen Kosten bei Tropfbewässerung und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)	196
Abbildung A22:	Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Spargel unter variablen Kosten bei Tropfbewässerung und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)	197
Abbildung A23:	Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Spargel unter variablen Kosten bei Rohrberegnung und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)	198
Abbildung A24:	Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Wein unter variablen Kosten bei Tropfbewässerung und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)	199
Abbildung A25:	Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Zuckerrüben unter variablen Kosten bei der Bewässerung durch eine mobile Beregnungsmaschine mit Düsenwagen und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)	200

Abbildung A26:	Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Zuckerrübe unter variablen Kosten bei der Bewässerung durch eine mobile Beregnungsmaschine mit Starkregner und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)	201
Abbildung A27:	Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Zwiebeln unter variablen Kosten bei Tropfbewässerung und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)	202
Abbildung A28:	Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Zwiebeln unter variablen Kosten bei Rohrberegnung und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)	203
Abbildung A29:	Jährliche Regenwasserabflüsse von landwirtschaftlichen Dachflächen im Hessischen Ried auf Gemeindeebene (1991–2020)	208

Verzeichnis der Tabellen im Anhang

Tabelle A1:	Auflistung der Gemeinden des Hessischen Rieds	171
Tabelle A2:	Auflistung der Gemeinden der Untermainebene	172
Tabelle A3:	Einteilung der Nutzcodes aus den InVeKoS-Daten (2020) für Hessen zu Kulturaggregaten	173
Tabelle A4:	Kritische Temperaturen für die Frostschutzberegnung	174
Tabelle A5:	Potenzieller Bewässerungsbedarf für Winterweizen im Hessischen Ried im Technologievergleich	203
Tabelle A6:	Potenzieller Bewässerungsbedarf für Wintergerste im Hessischen Ried im Technologievergleich	204
Tabelle A7:	Potenzieller Bewässerungsbedarf für Winterrgoggen, Triticale und sonstige Wintergetreide im Hessischen Ried im Technologievergleich	204
Tabelle A8:	Potenzieller Bewässerungsbedarf für Sommerweizen im Hessischen Ried im Technologievergleich	204
Tabelle A9:	Potenzieller Bewässerungsbedarf für Sommergerste im Hessischen Ried im Technologievergleich	204
Tabelle A10:	Potenzieller Bewässerungsbedarf für Hafer und sonstige Sommergetreide im Hessischen Ried im Technologievergleich	204
Tabelle A11:	Potenzieller Bewässerungsbedarf für Raps im Hessischen Ried im Technologievergleich	205
Tabelle A12:	Potenzieller Bewässerungsbedarf für Silomais im Hessischen Ried im Technologievergleich	205
Tabelle A13:	Potenzieller Bewässerungsbedarf für Körnermais im Hessischen Ried im Technologievergleich	205
Tabelle A14:	Potenzieller Bewässerungsbedarf für Hülsenfrüchte/Eiweißpflanzen im Hessischen Ried im Technologievergleich	205

Tabelle A15:	Potenzieller Bewässerungsbedarf für Futterrübe und andere Rüben im Hessischen Ried im Technologievergleich.....	205
Tabelle A16:	Potenzieller Bewässerungsbedarf für Zuckerrüben im Hessischen Ried im Technologievergleich	206
Tabelle A17:	Potenzieller Bewässerungsbedarf für Erdbeeren im Hessischen Ried im Technologievergleich	206
Tabelle A18:	Dachflächen und durchschnittlicher Regenwasserabfluss auf Gemeindeebene im Hessischen Ried (1991–2020)	207
Tabelle A19:	Jährlich entnehmbare Wassermengen aus den Oberflächengewässern (in 1.000 m ³) bei 24 Stunden Entnahmedauer pro Entnahmetag	210
Tabelle A20:	Überblick der kommunalen Kläranlagen (> 2.000 EW)	211
Tabelle A21:	Theoretisches Potenzial von Wasserwiederverwendung und Bewässerungsbedarf auf Gemeindeebene im Hessischen Ried (1991–2020) (in 1.000 m ³)	212

Tabelle A1: Auflistung der Gemeinden des Hessischen Rieds

AGS	Name	BEZ
06411000	Darmstadt	Stadt
06431002	Bensheim	Stadt
06431003	Biblis	Gemeinde
06431005	Bürstadt	Stadt
06431006	Einhausen	Gemeinde
06431010	Groß-Rohrheim	Gemeinde
06431011	Heppenheim (Bergstraße)	Stadt
06431013	Lampertheim	Stadt
06431016	Lorsch	Stadt
06431020	Viernheim	Stadt
06431022	Zwingenberg	Stadt
06432001	Alsbach-Hähnlein	Gemeinde
06432003	Bickenbach	Gemeinde
06432006	Erzhausen	Gemeinde
06432008	Griesheim	Stadt
06432018	Pfungstadt	Stadt
06432023	Weiterstadt	Stadt
06433001	Biebesheim am Rhein	Gemeinde
06433002	Bischofsheim	Gemeinde
06433003	Büttelborn	Gemeinde
06433004	Gernsheim	Stadt
06433005	Ginsheim-Gustavsburg	Stadt
06433006	Groß-Gerau	Stadt
06433007	Kelsterbach	Stadt
06433008	Mörfelden-Walldorf	Stadt
06433009	Nauheim	Gemeinde
06433010	Raunheim	Stadt
06433011	Riedstadt	Stadt
06433012	Rüsselsheim am Main	Stadt
06433013	Stockstadt am Rhein	Gemeinde
06433014	Trebur	Gemeinde
06433010	Raunheim	Stadt

Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle A2: Auflistung der Gemeinden der Untermainebene

AGS	Name	BEZ
06412000	Frankfurt am Main	Stadt
06413000	Offenbach am Main	Stadt
06414000	Wiesbaden	Stadt
06432002	Babenhausen	Stadt
06432004	Dieburg	Stadt
06432005	Eppertshausen	Gemeinde
06432010	Groß-Umstadt	Stadt
06432011	Groß-Zimmern	Gemeinde
06432015	Münster	Gemeinde
06432020	Roßdorf	Gemeinde
06432021	Schaafheim	Gemeinde
06435006	Bruchköbel	Stadt
06435007	Erlensee	Stadt
06435011	Großkrotzenburg	Gemeinde
06435014	Hanau	Stadt
06435019	Maintal	Stadt
06435023	Rodenbach	Gemeinde
06436004	Flörsheim am Main	Stadt
06436005	Hattersheim am Main	Stadt
06436006	Hochheim am Main	Stadt
06438001	Dietzenbach	Stadt
06438002	Dreieich	Stadt
06438003	Egelsbach	Gemeinde
06438004	Hainburg	Gemeinde
06438005	Heusenstamm	Stadt
06438006	Langen (Hessen)	Stadt
06438007	Mainhausen	Gemeinde
06438008	Mühlheim am Main	Stadt
06438009	Neu-Isenburg	Stadt
06438010	Obertshausen	Stadt
06438011	Rodgau	Stadt
06438012	Rödermark	Stadt
06438013	Seligenstadt	Stadt

Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle A3: Einteilung der Nutzcodes aus den InVeKoS-Daten (2020) für Hessen zu Kulturaggregaten

Aggregat	Aggregatbenennung	Zugeordnete Nutzcodes (InVeKoS)
1	Winterweizen	Winterhartweizen/Durum; Winterweichweizen
2	Wintergerste	Wintergerste
3	Winterroggen und sonstige Wintergetreide	Winter-Dinkel; Winter-Emmer/-Einkorn; Winterroggen, Winter-Waldstaudenroggen; Wintermenggetreide; Winterhafer
4	Sommerweizen	Sommerhartweizen/Durum; Sommerweichweizen
5	Sommergerste	Sommergerste
6	Hafer und sonstige Sommergetreide	Sommer-Emmer/-Einkorn; Sommer-Dinkel; Sommerroggen, Sommer-Waldstaudenroggen; Sommermenggetreide; Rispenhirse; Buchweizen; Mohren-/Zuckerhirse (ohne Sudangras); Kolbenhirse; Amarant, Fuchsschwanz; Quinoa
7	Triticale	Wintertriticale; Sommertriticale
8	Raps	Winterraps, Sommerraps
9	Silomais	Silomais (als Hauptfutter)
10	Körnermais	Mais (ohne Silomais)
11	Hülsenfrüchte/ Eiweißpflanzen	Erbsen (Markerbse, Schalerbse, Futtererbse, Peluschke); Platterbse; Ackerbohne/Puffbohne/Pferdebohne/Dicke Bohne; Wicken (Pannonische Wicke, Zottelwicke, Saatwicke); Lupinen (Süßlupine, weiße Lupine, blaue/schmalblättrige Lupine, gelbe Lupine, Anden-Lupine); Erbsen/Bohnen; Gemenge Leguminosen/Getreide; Linsen
12	Futterrübe und andere Rüben	Futterrübe/Runkelrübe; Kohlrübe; Steckrübe
13	Kartoffeln	Stärkekartoffeln; Kartoffeln
14	Zuckerrüben	Zuckerrüben
15	Gemüse	Topinambur; Süßkartoffeln; Gemüse; Gemüse-Kreuzblütler ,Brauner Senf/Sareptasenf; Echte Brunnenkresse; Garten-Senfrauke, Rucola; Gartenkresse; Gartenrettiche (Weiße/rote Rettiche, schwarzer Winterrettich, Ölrettich, Radieschen)Weißer Senf, Gelber Senf; Steckrübe, Kohlrübe; Gemüse-Nachtschattengewächse; Tomaten; Paprika, Chilli, Peperoni; Gemüse-Kürbisgewächse; Zuckermelone; Riesenkürbis (Riesenkürbis, Hokkaidokürbis); Gartenkürbis (Gartenkürbis, Steirischer Kürbis, Zucchini, Spaghettikürbis, Zierkürbis); Möhre (Möhre/Karotte, Futtermöhre); Feldsalat/Ackersalat/ Rapunzel; Lattich (Garten-Salat/Lattich, Lollo Rosso, Romana-Salat/Römischer Salat); Spinat; Mangold, Rote Beete/Rote Rübe; Sellerie (Knollen-Sellerie, Bleich-Sellerie, Stangen-Sellerie); Ampfer (Wiesen-Sauerampfer); Pastinaken; Zichorien/Wegwarten (Chicoree, Radiccio, krausblättrige Endivie, ganzblättrige Endivie, Zichorie); Kichererbsen; Fenchel (Gemüsefenchel, Körnerfenchel); Gemüsekohl (Kopfkohl, Wirsing, Rot-/Weißkohl, Spitzkohl, Grünkohl, Kohlrabi, Markstammkohl, Blumenkohl, Romanesco, Brokkoli, Rosenkohl, Zierkohl); Gurke (Salatgurke, Einleggurke); Lauch (Speise-Zwiebel, Schalotte, Lauch, Knoblauch, Schnittlauch, Winterheckenzwiebel, Bärlauch); Gartenbohne (Gartenbohne/Buschbohne/Stangenbohne, Feuerbohne/Prunkbohne)
16	Erdbeeren	Erdbeeren
17	sonstige Handelsgewächse	Winterrübsen (Rübsen, Rübsamen, Rübsaat); Sommerrübsen (Rübsen, Rübsamen, Rübsaat); Sonnenblumen; Sojabohnen; Lein, Flachs; Meerkohl/Krambe; Leindotter; Küchenkräuter/Heil- und Gewürzpflanzen; Dill, Gurkenkraut; Kerbel (Kerbel/echter Kerbel, Wiesenkerbel); Anis; Kümmel; Schwarzkümmel (Echter Schwarzkümmel, Jungfer im Grünen); Koriander; Petersilie; Salbei (Küchen-/Heilsalbei, Buntschopf-Salbei); Oregano (Echter Majoran, Oregano/Dost/Wilder Majoran); Lavendel (Echter Lavendel, Speik-Lavendel, Hybrid-Lavendel); Thymian; Melisse (Zitronenmelisse);

Aggregat	Aggregatbenennung	Zugeordnete Nutzcodes (InVeKoS)
		Minzen (Pfefferminze, Grüne Minze); Wermut, Estragon, Beifuß; Ringelblumen (Garten-Ringelblume); Sonnenhut (Schmalblättriger Sonnenhut, Purpur-Sonnenhut); Wegerich (Spitzwegerich); Kamillen (Echte Kamille); Schafgarben (Gelbe Schafgarbe); Baldrian (Echter Baldrian); Echtes Johanniskraut/Hyperikum; Mariendistel; Löwenzahn; Engelwurz (Arznei-Engelwurz, Echter Engelwurz); Malven (Wilde Malve); Hanf; Rollrasen, Vegetationsmatten für Dachbegrünung; Mohn (Schlafmohn, Backmohn); Färberdistel; Brennnesseln (Große Brennnessel); Spargel
18	Beerenobst	Beerenobst, z. B. Johannis-, Stachel-, Himbeeren
19	Kern-, Steinobst und sonstige Dauerkulturen	Kern- und Steinobst (Artenrein, über 100 Bäume je ha); sonstige Obstanlagen z. B. Holunder, Sanddorn; Pfirsiche; Haselnüsse; Walnüsse; Baumschulen, nicht für Beerenobst; Rhabarber; Hopfen; Artischocke; Rosen (Baumschulen), Schnittrosen; Trüffel; Weintrauben
20	Wein	Rebland; Rebschulfläche; Unterlagsreblfläche; Tafeltrauben

Quelle: Eigene Darstellung.

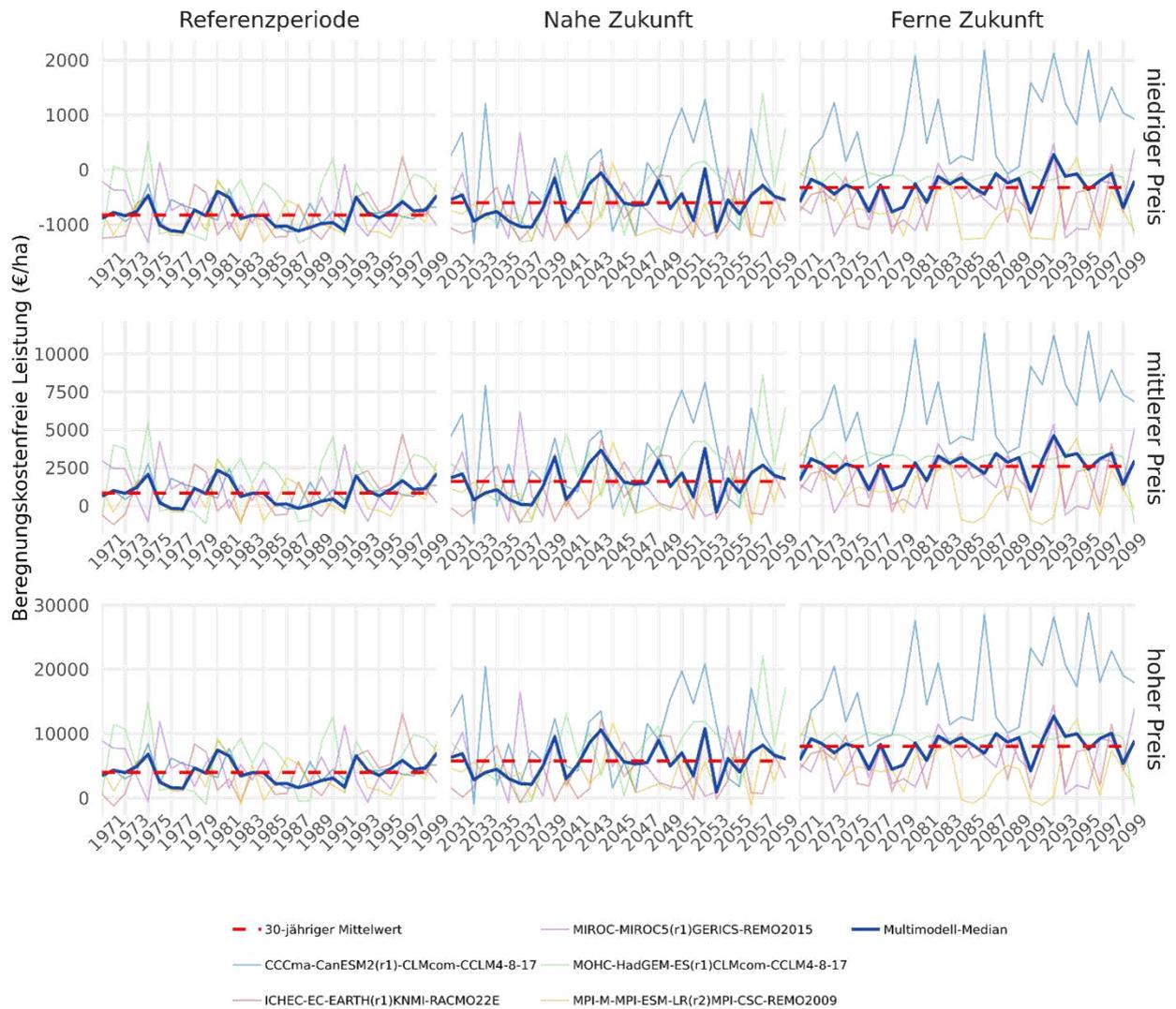
Tabelle A4: Kritische Temperaturen für die Frostschutzberechnung

Kultur	Name	BBCH-Stadium	kritische Temperaturen	Frostschutz notwendig?	Quelle
APFA	Apfel	53	-7	ja	RP Gießen Pflanzenschutzdienst (2020)
APFA	Apfel	60	-0.5	ja	RP Gießen Pflanzenschutzdienst (2020)
APFA	Apfel	65	0	ja	RP Gießen Pflanzenschutzdienst (2020)
APFA	Apfel	69	-1.7	ja	RP Gießen Pflanzenschutzdienst (2020)
APFA	Apfel	87	-	nein	RP Gießen Pflanzenschutzdienst (2020)
APFA	Apfel	95	-	nein	RP Gießen Pflanzenschutzdienst (2020)
BIRA	Birne	60	-3.2	ja	RP Gießen Pflanzenschutzdienst (2020)
BIRA	Birne	65	-2.7	ja	RP Gießen Pflanzenschutzdienst (2020)
BIRA	Birne	69	-2.7	ja	RP Gießen Pflanzenschutzdienst (2020)
BIRA	Birne	87	-	nein	RP Gießen Pflanzenschutzdienst (2020)
KIRA	Süßkirsche	60	-2.8	ja	RP Gießen Pflanzenschutzdienst (2020)
KIRA	Süßkirsche	65	-2.4	ja	RP Gießen Pflanzenschutzdienst (2020)
KIRA	Süßkirsche	69	-2.2	ja	RP Gießen Pflanzenschutzdienst (2020)
KIRA	Süßkirsche	87	-1	ja	RP Gießen Pflanzenschutzdienst (2020)
KIRA	Süßkirsche	95	-	nein	RP Gießen Pflanzenschutzdienst (2020)
SKIR	Sauerkirsche	60	-2.8	ja	RP Gießen Pflanzenschutzdienst (2020)

Kultur	Name	BBCH-Stadium	kritische Temperaturen	Frostschutz notwendig?	Quelle
SKIR	Sauerkirsche	65	-2.4	ja	RP Gießen Pflanzenschutzdienst (2020)
SKIR	Sauerkirsche	69	-2.2	ja	RP Gießen Pflanzenschutzdienst (2020)
SKIR	Sauerkirsche	87	-1	ja	RP Gießen Pflanzenschutzdienst (2020)
JOHR	Johannisbeere	61	-0.5	ja	Paschold (2010)
JOHR	Johannisbeere	85	-0.5	ja	Paschold (2010)
STAC	Stachelbeere	9	-	nein	Paschold (2010)
STAC	Stachelbeere	11	-	nein	Paschold (2010)
STAC	Stachelbeere	60	-0.5	ja	Paschold (2010)
STAC	Stachelbeere	87	-1	ja	Paschold (2010)
WINF, WINS	Wein	0	-	nein	Snyder et al. (2005), Evans et al. (2019)
WINF, WINS	Wein	7	-2	ja	Snyder et al. (2005), Evans et al. (2019)
WINF, WINS	Wein	11	-2	ja	Snyder et al. (2005), Evans et al. (2019)
WINF, WINS	Wein	60	-2	ja	Snyder et al. (2005), Evans et al. (2019)
WINF, WINS	Wein	65	-2	ja	Snyder et al. (2005), Evans et al. (2019)
WINF, WINS	Wein	69	-2	ja	Snyder et al. (2005), Evans et al. (2019)
WINF, WINS	Wein	81	-1.4	ja	Snyder et al. (2005), Evans et al. (2019)
WINF, WINS	Wein	89	-1.4	ja	Snyder et al. (2005), Evans et al. (2019)
WINF, WINS	Wein	92	-	nein	Snyder et al. (2005), Evans et al. (2019)
WINF, WINS	Wein	95	-	nein	Snyder et al. (2005), Evans et al. (2019)
ERDB	Erdbeeren	61	-0.5	ja	Miranda et al. (2019)
ERDB	Erdbeeren	81	-2.2	ja	Miranda et al. (2019)
FKVK, FKNV	Kartoffeln	3	-2	ja	Snyder et al. (2005)
FKVK, FKNV	Kartoffeln	9	-2	ja	Snyder et al. (2005)
FKVK, FKNV	Kartoffeln	35	-2	ja	Snyder et al. (2005)
FKVK, FKNV	Kartoffeln	60	-0.5	ja	Snyder et al. (2005)
FKVK, FKNV	Kartoffeln	99	-0.8	ja	Snyder et al. (2005)

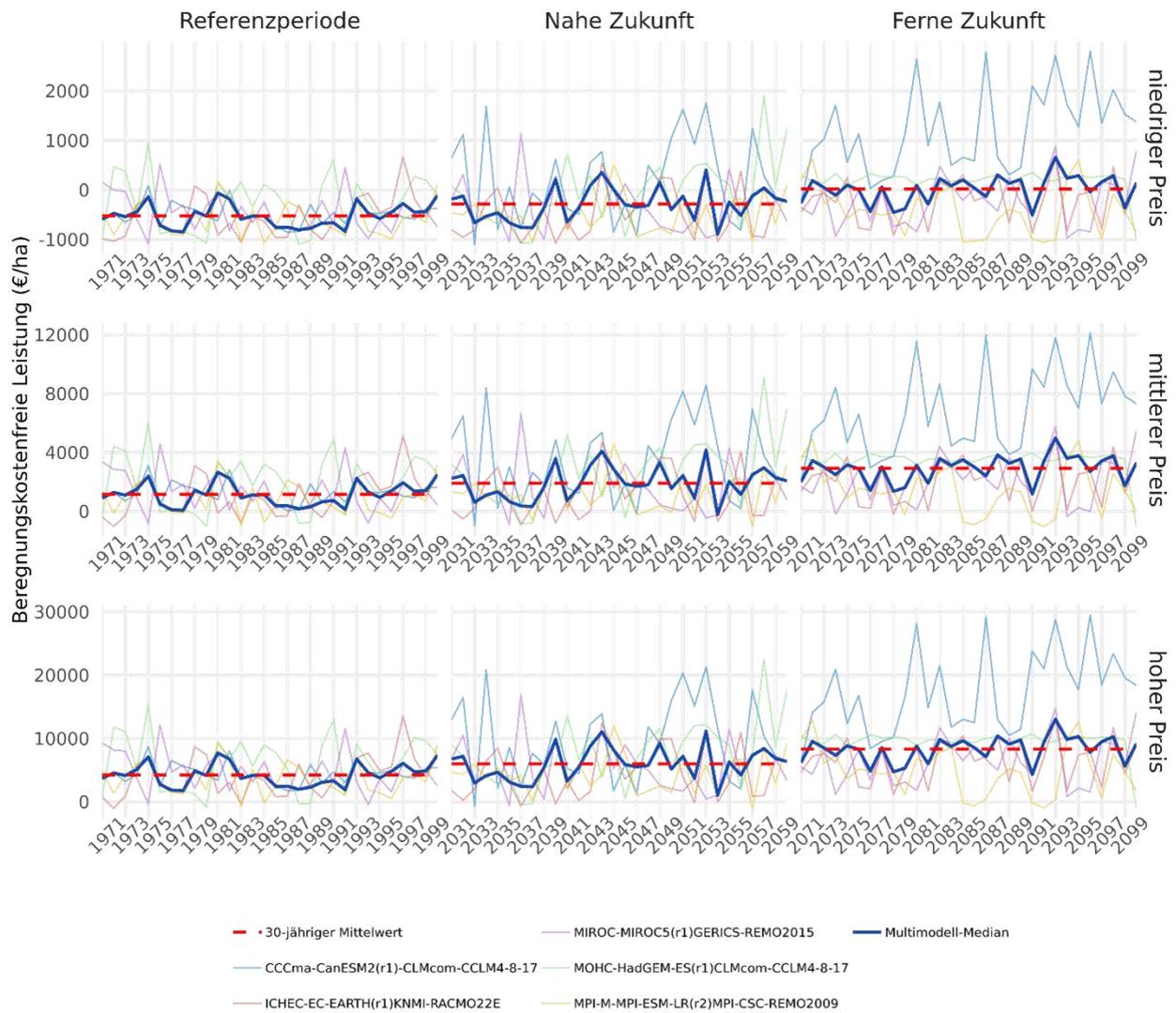
Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung A1: Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Buschbohnen unter Vollkosten bei Tropfbewässerung und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)



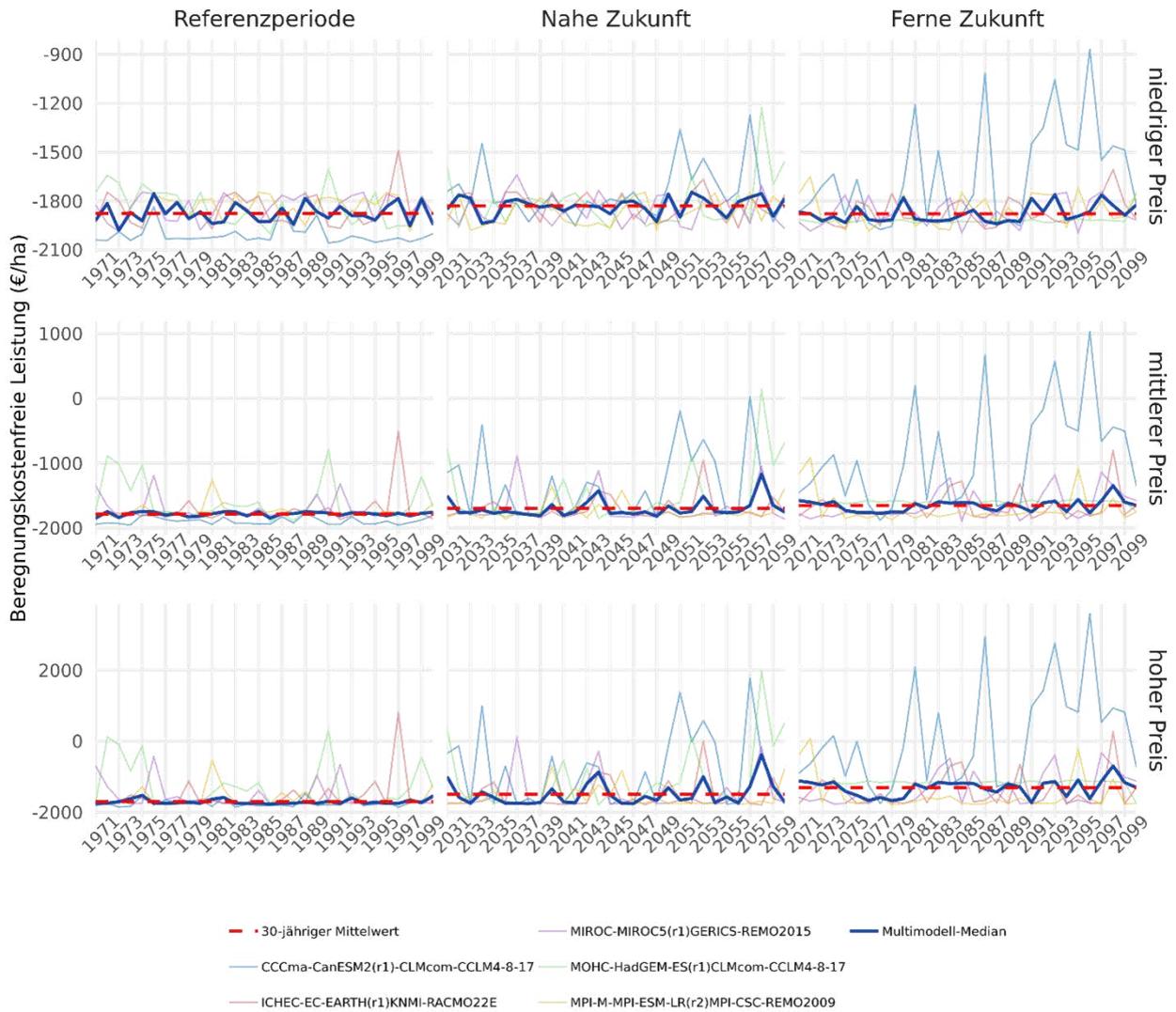
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung A2: Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Buschbohnen unter Vollkosten bei Rohrberegnung und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)



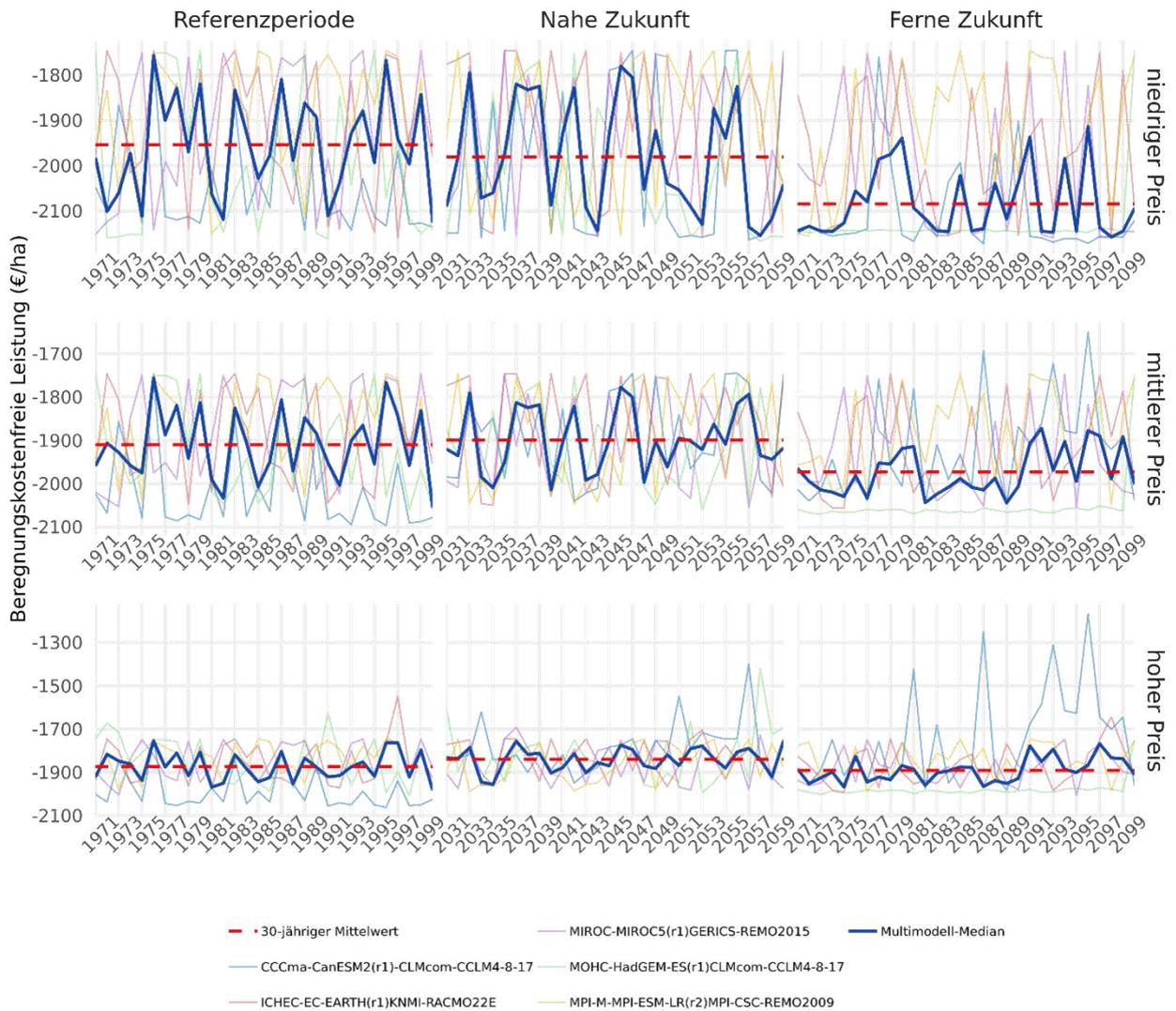
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung A3: Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Himbeeren unter Vollkosten bei Tropfbewässerung und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)



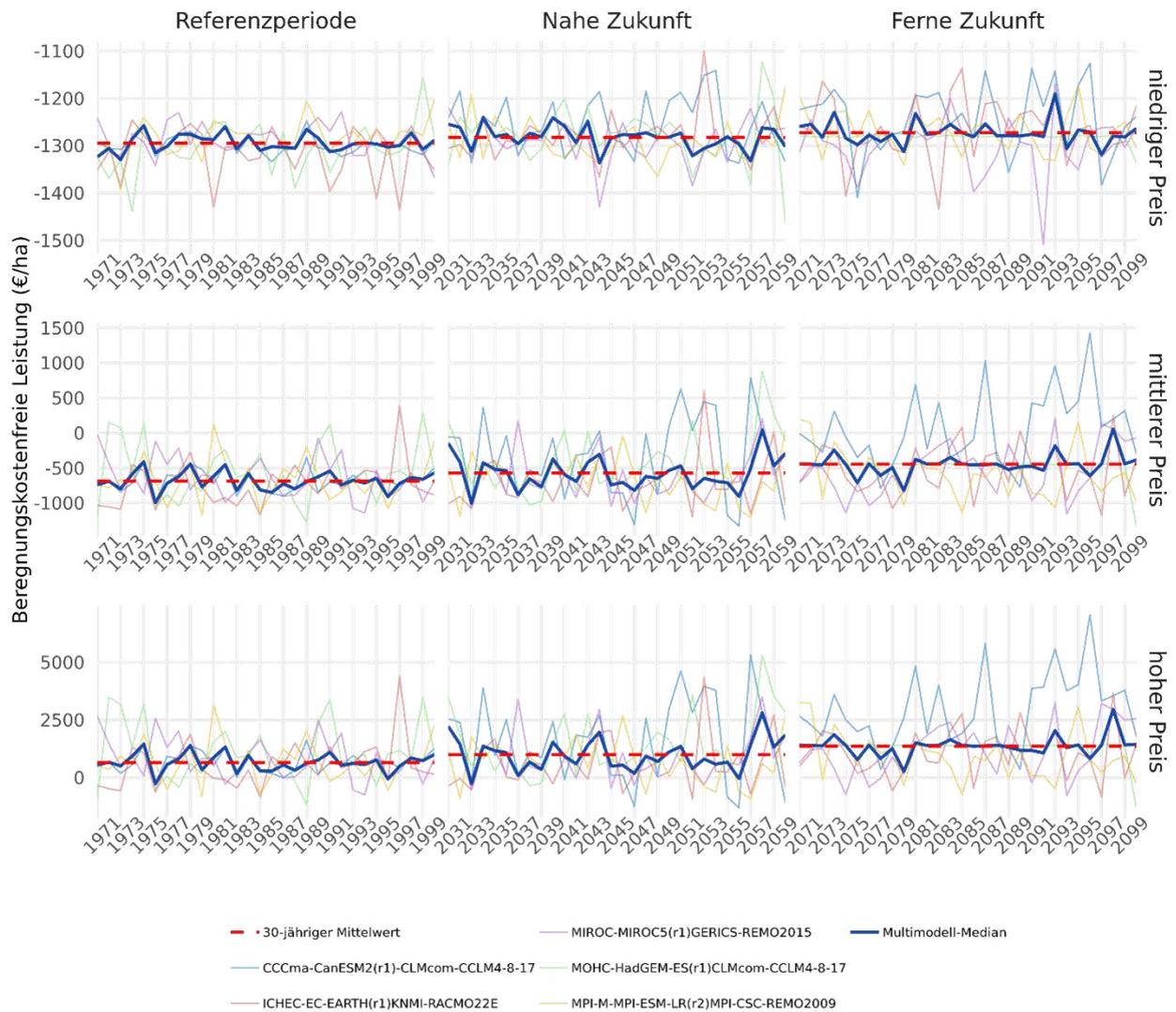
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung A4: Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Johannisbeeren unter Vollkosten bei Tropfbewässerung und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)



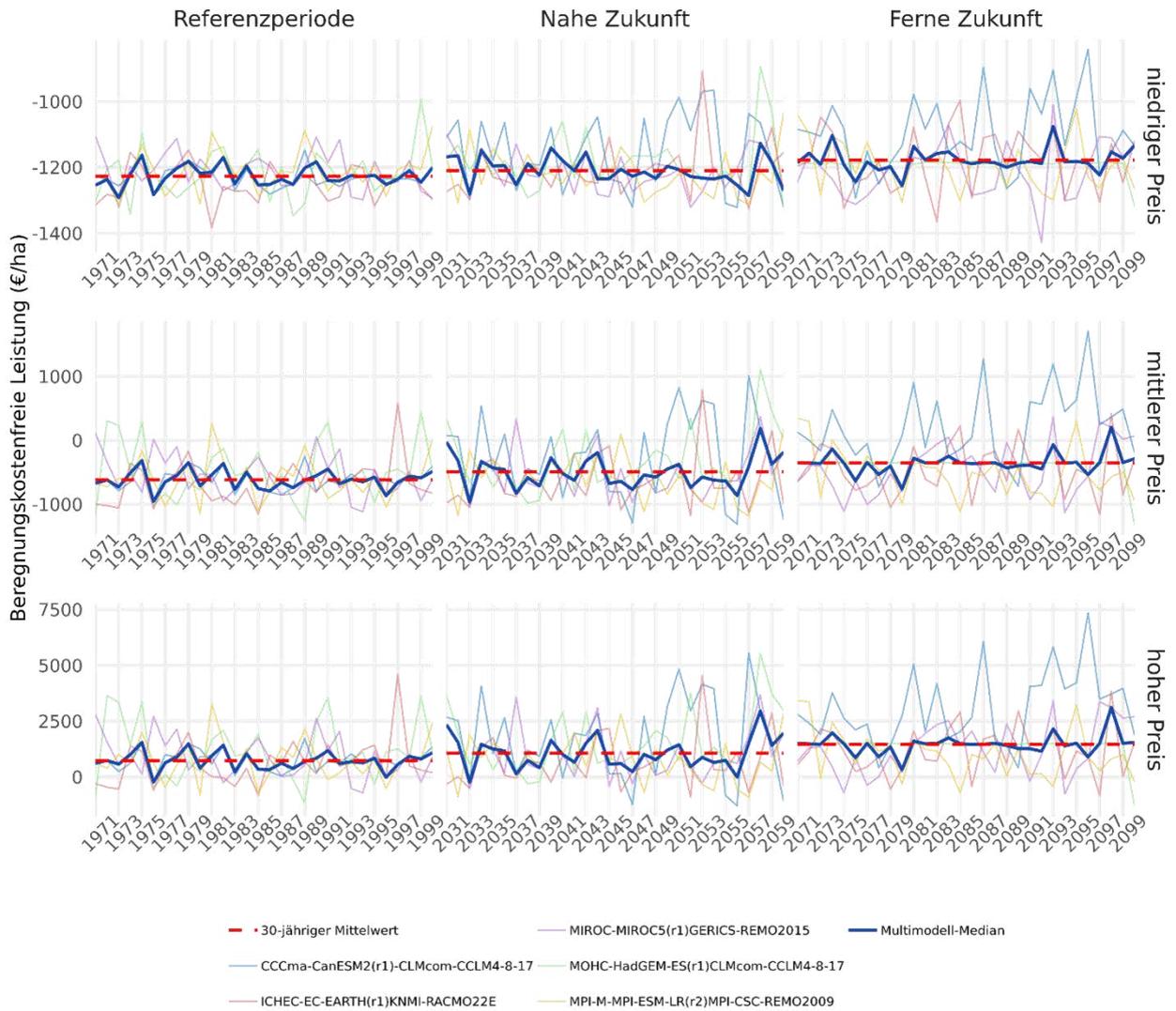
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung A5: Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Kartoffeln unter Vollkosten bei Bewässerung mit einer mobilen Beregnungsmaschine mit Düsenwagen und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)



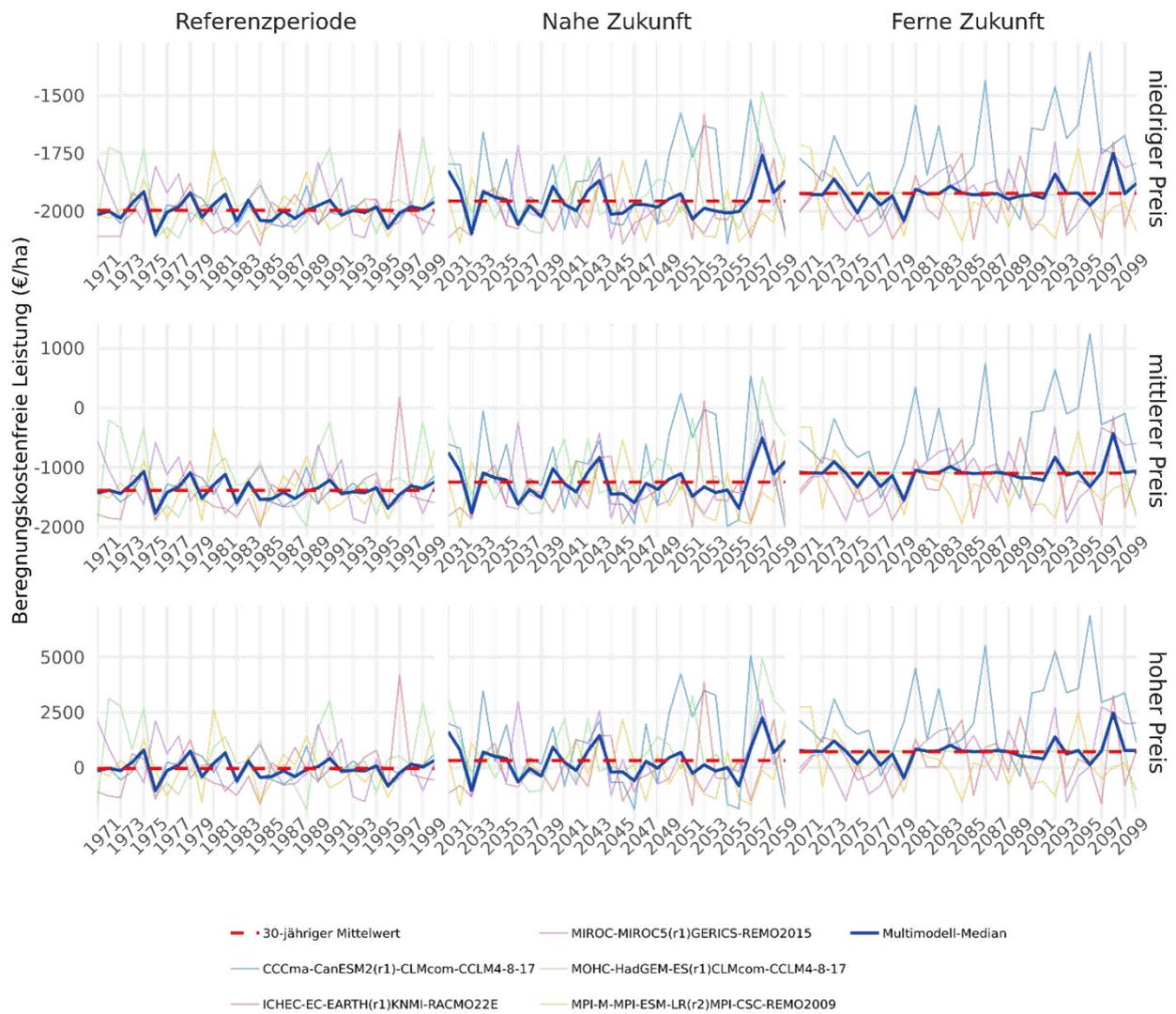
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung A6: Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Kartoffeln unter Vollkosten bei Bewässerung mit einer mobilen Beregnungsmaschine mit Starkregner und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)



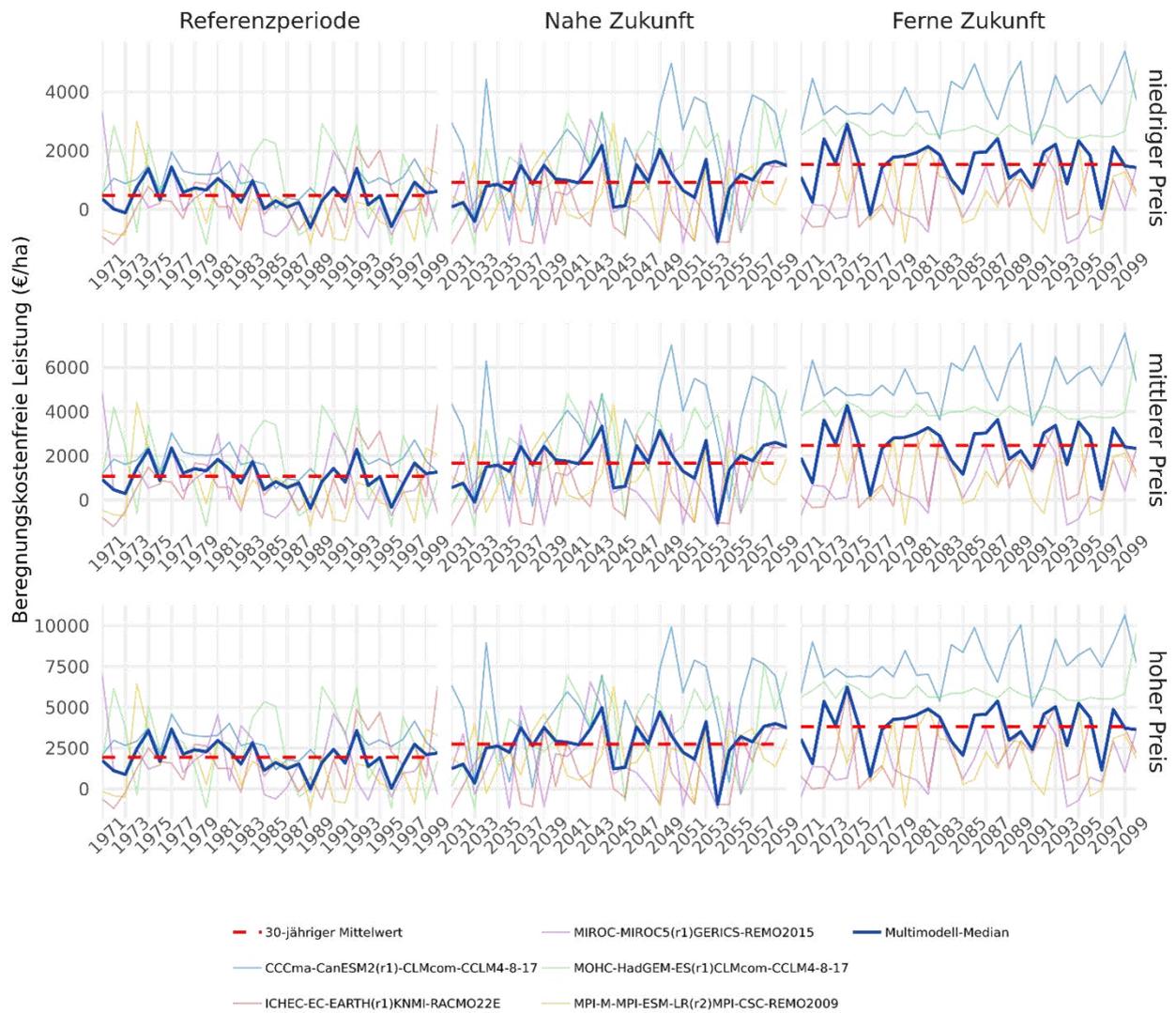
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung A7: Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Kartoffeln unter Vollkosten bei Tropfbewässerung und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)



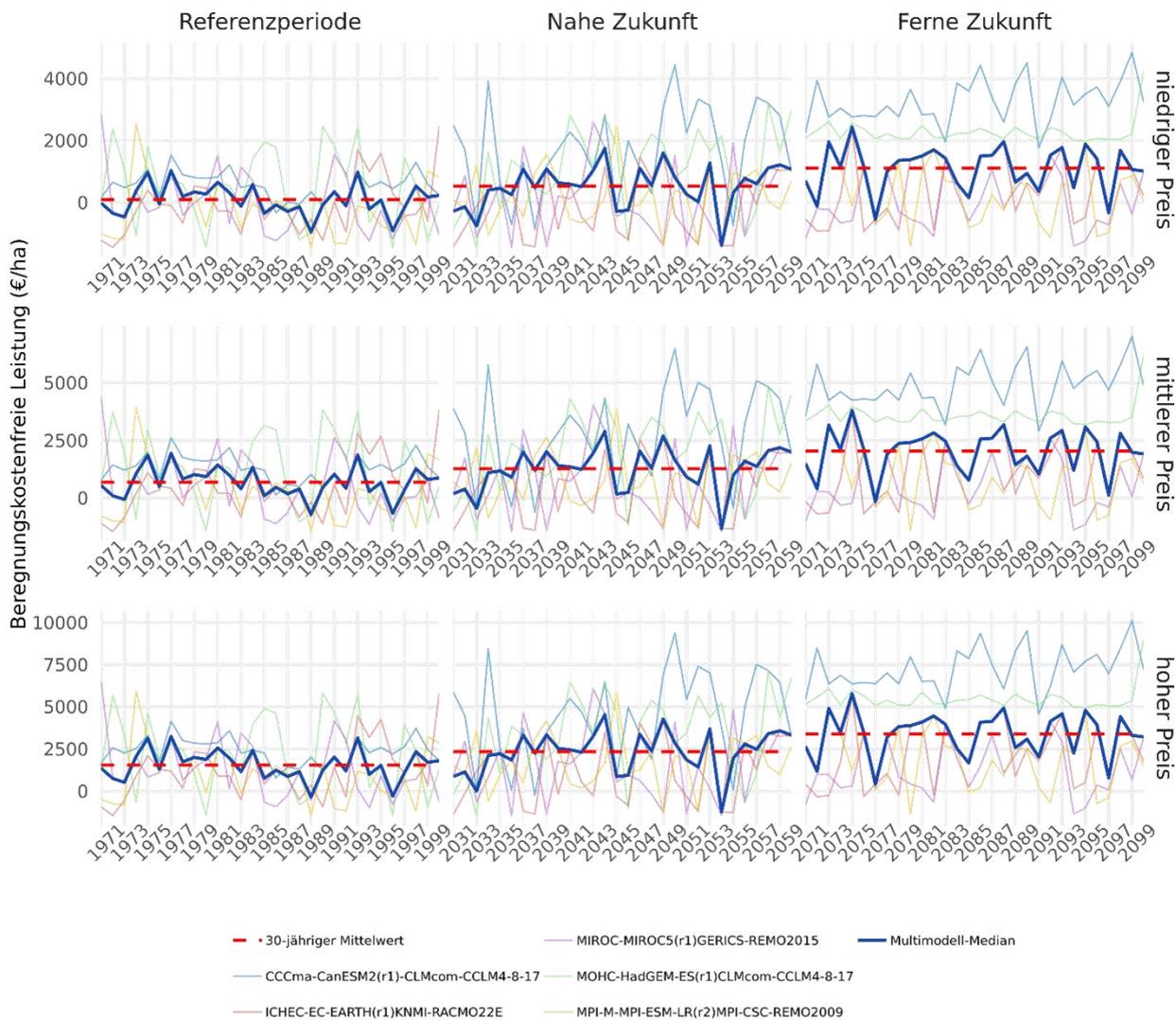
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung A8: Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Spargel unter Vollkosten bei Rohrberegnung und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)



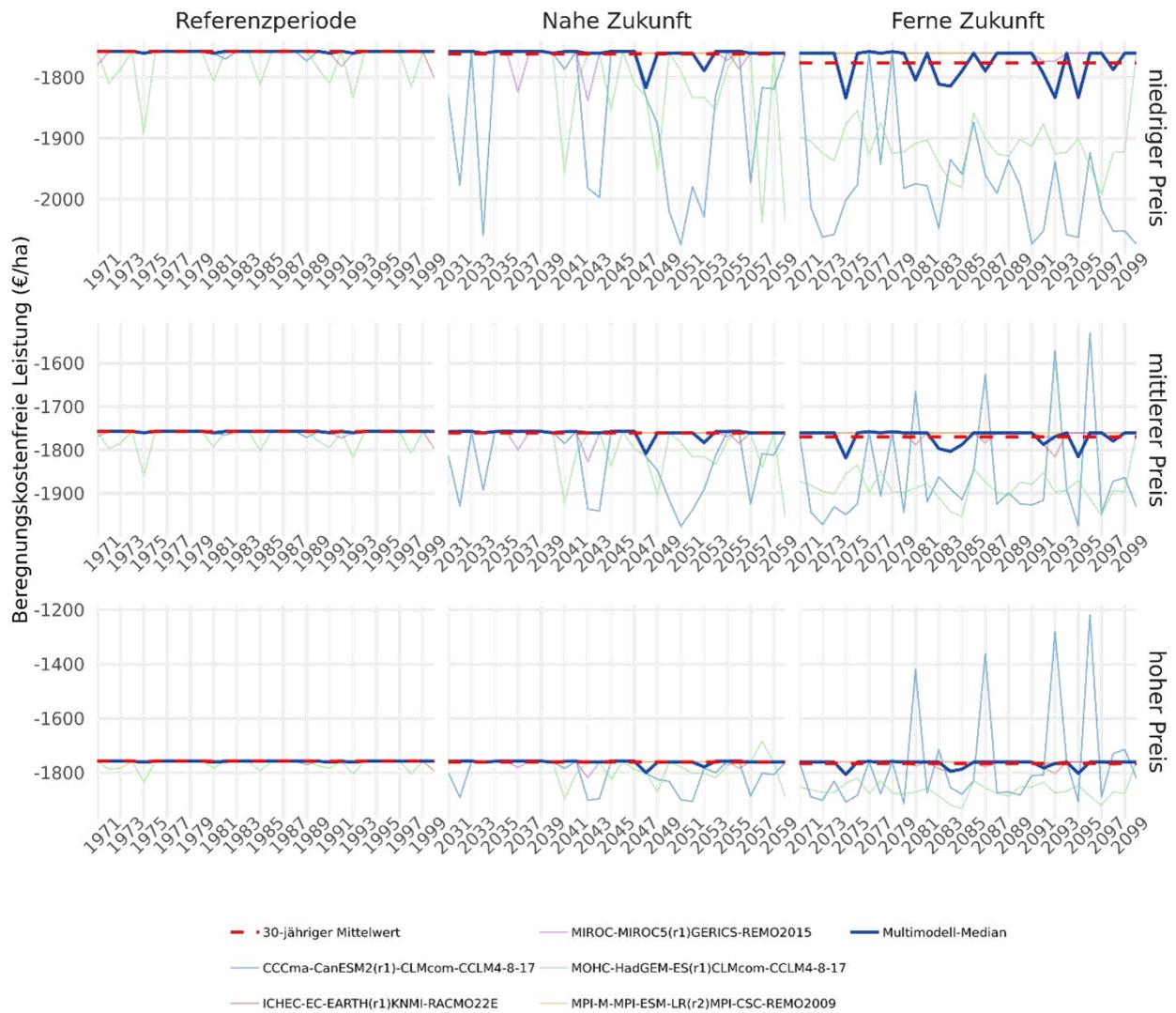
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung A9: Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Spargel unter Vollkosten bei Tropfbewässerung und Grundwasser für Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)



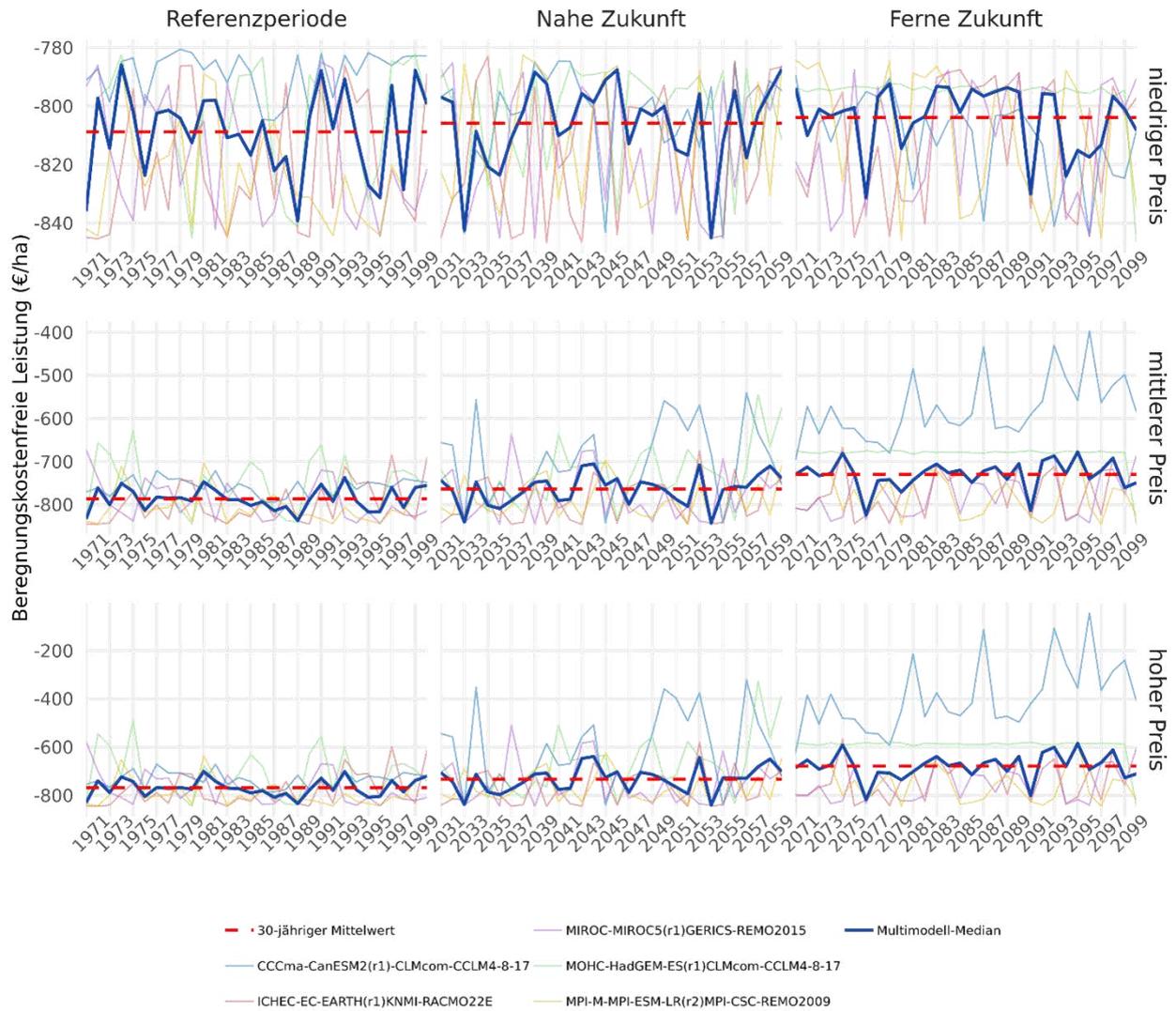
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung A10: Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Wein unter Vollkosten bei Tropfbewässerung und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)



Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung A11: Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Zuckerrüben unter Vollkosten bei der Bewässerung durch eine mobile Beregnungsmaschine mit Düsenwgaen und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)



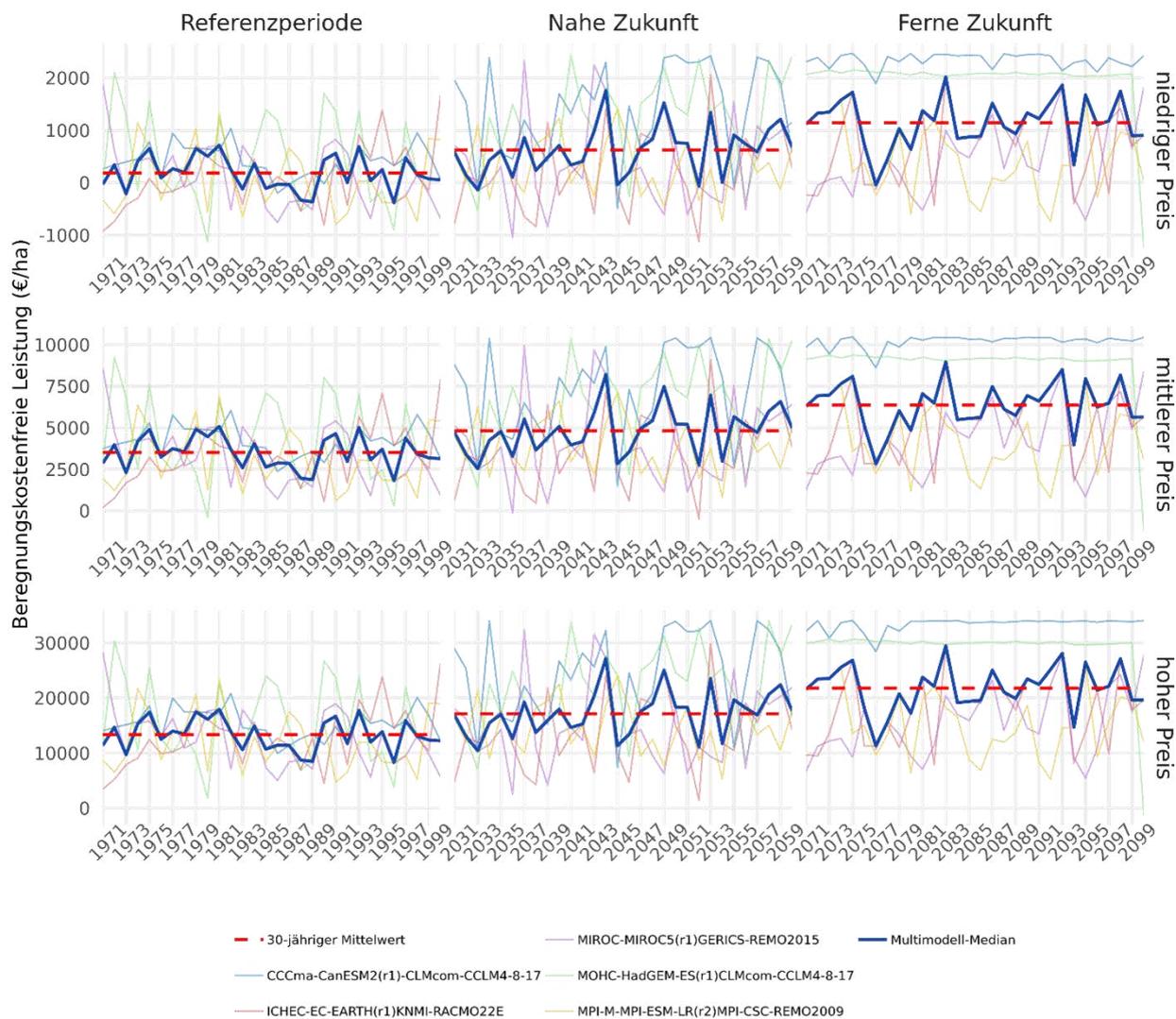
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung A12: Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Zuckerrüben unter Vollkosten bei der Bewässerung durch eine mobile Beregnungsmaschine mit Starkregner und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)



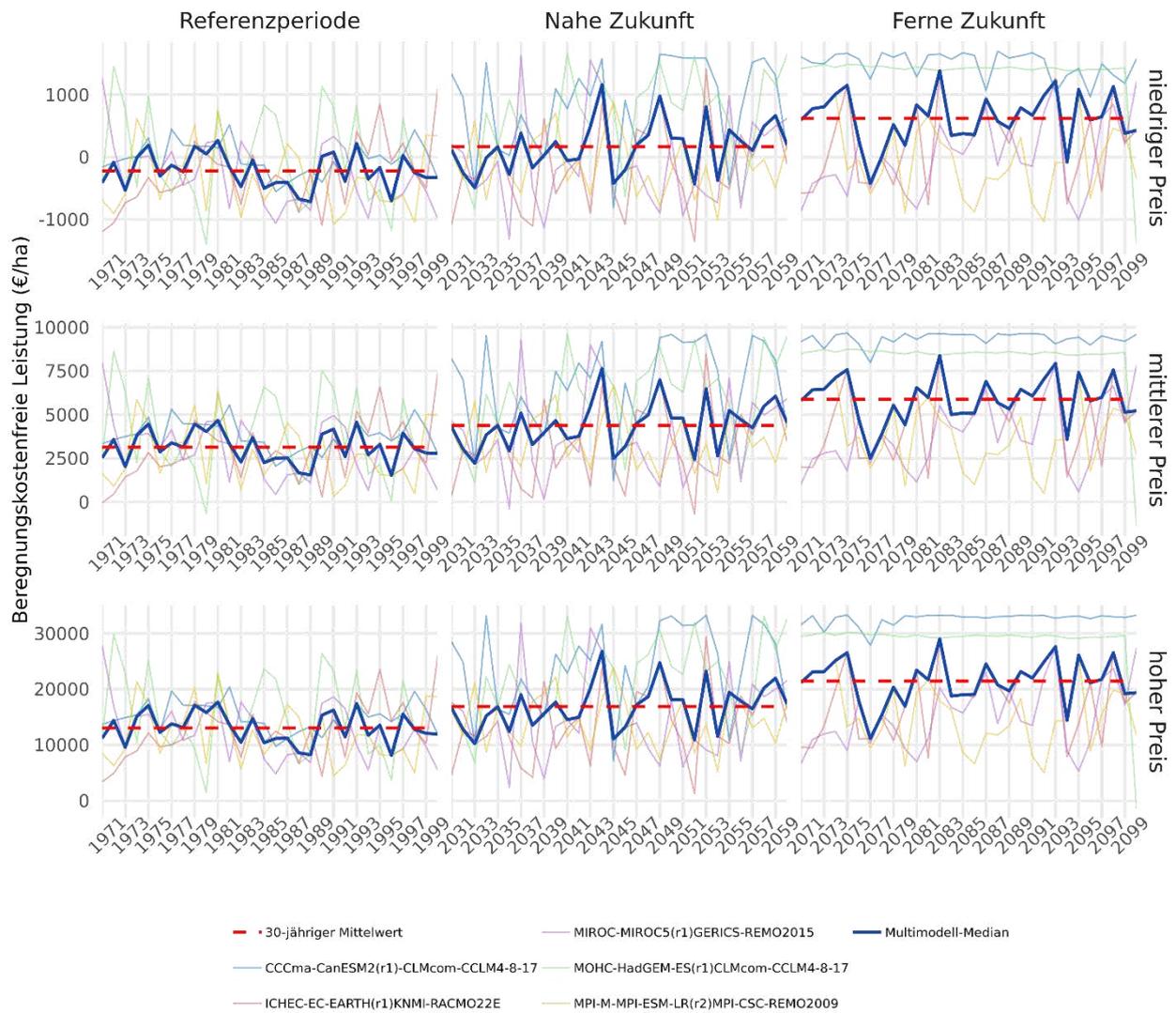
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung A13: Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Zwiebeln unter Vollkosten bei Rohrberegnung und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)



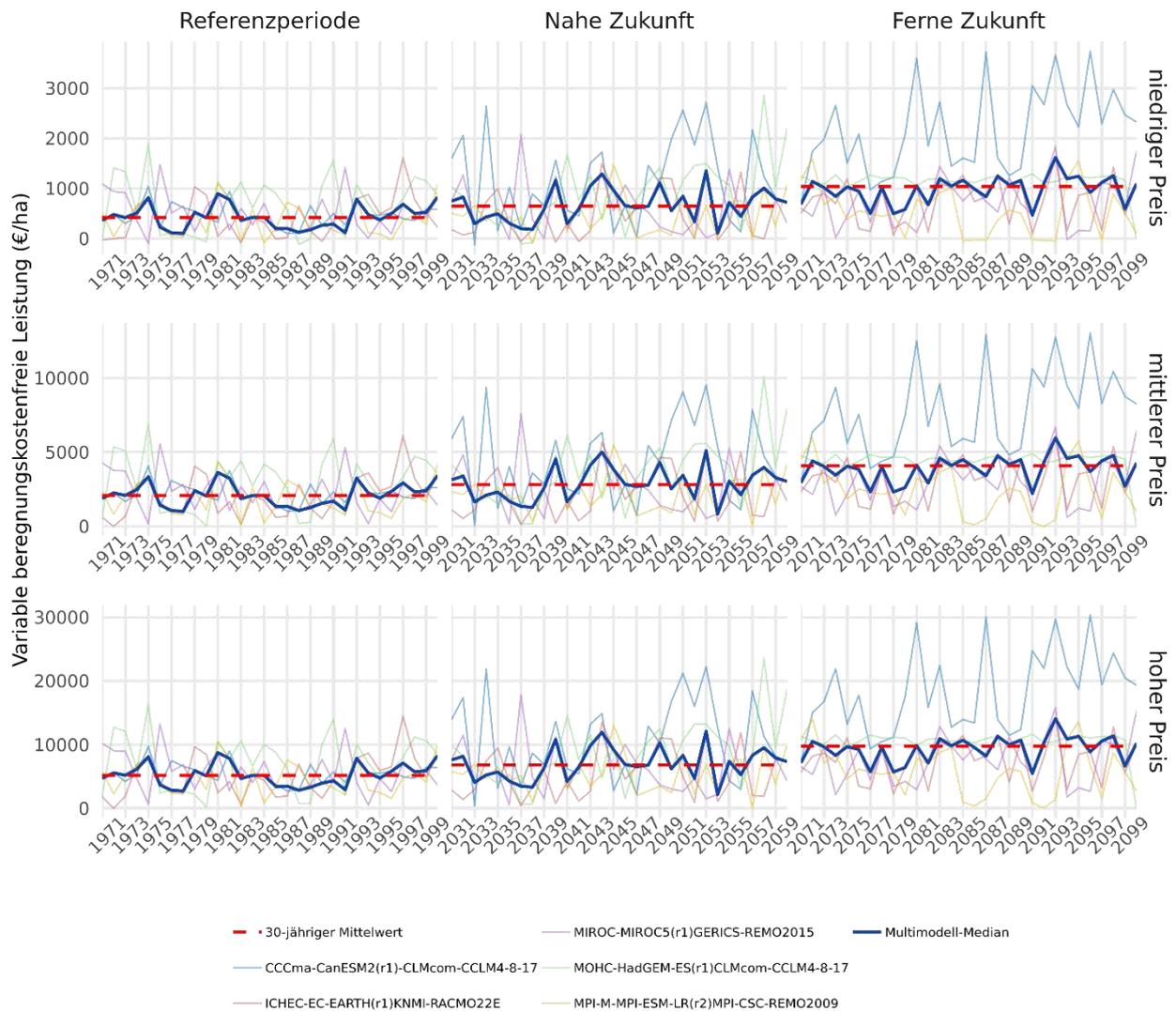
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung A14: Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Zwiebeln unter Vollkosten bei Tropfbewässerung und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)



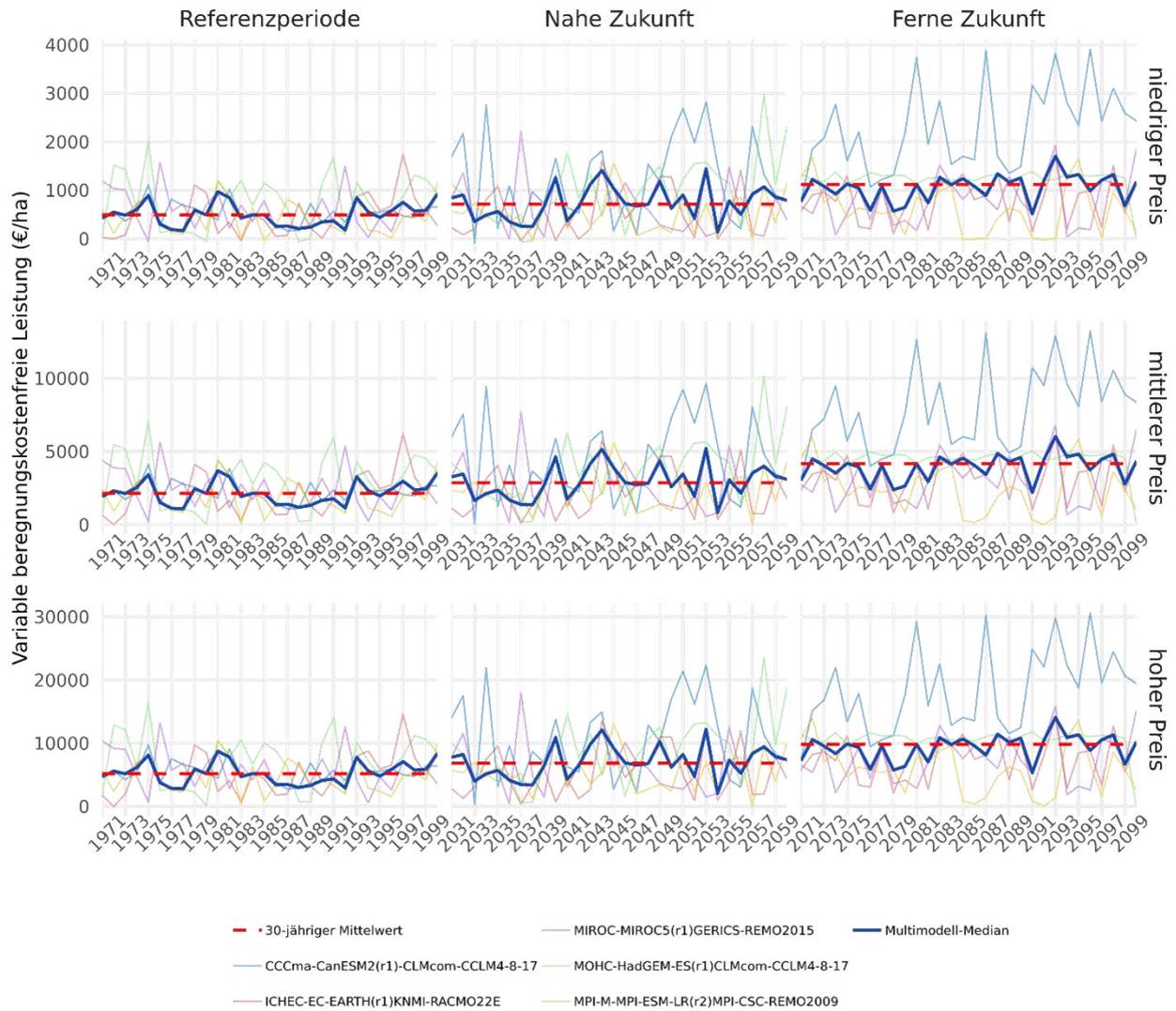
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung A15: Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Buschbohnen unter variablen Kosten bei Tropfbewässerung und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)



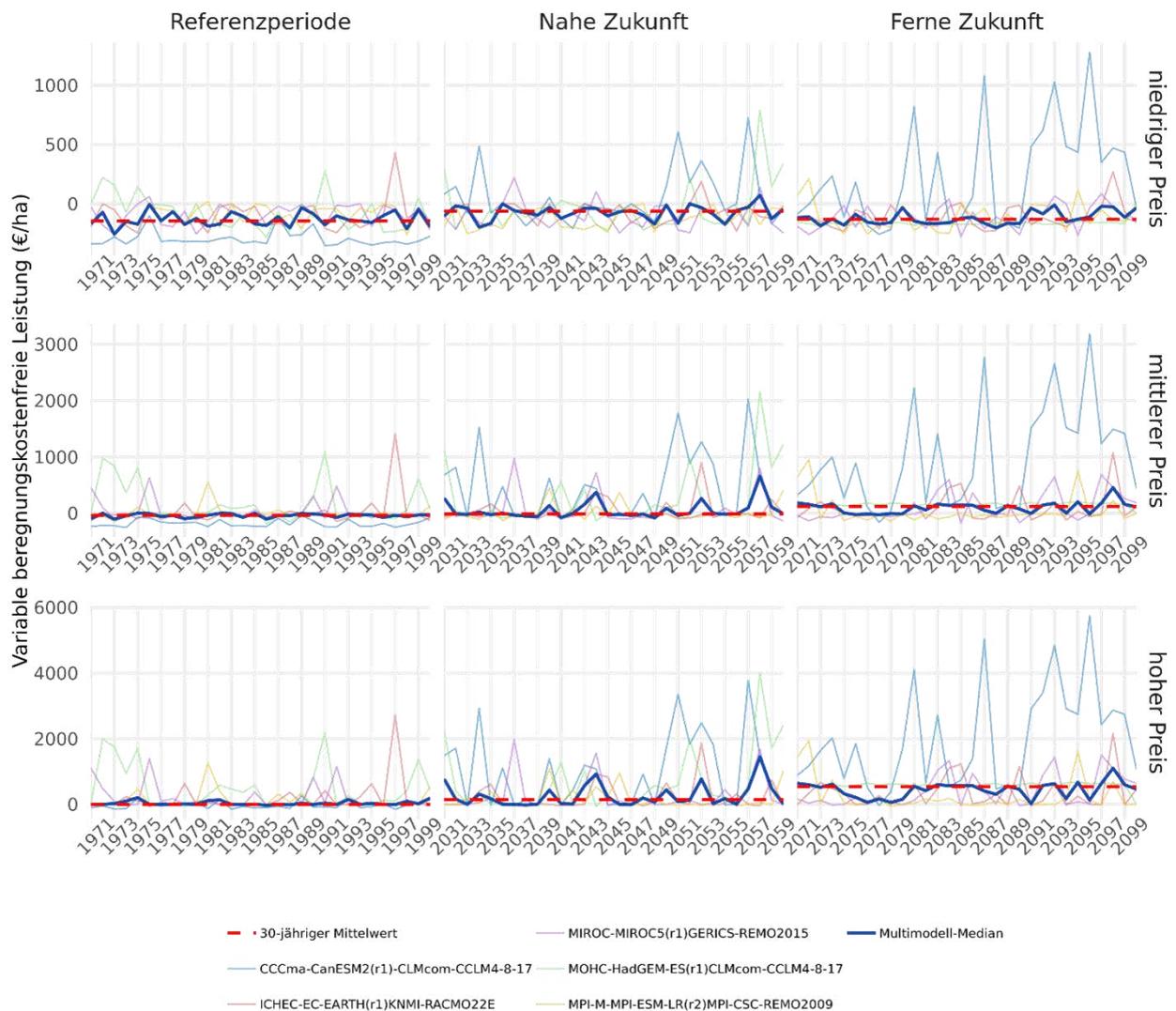
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung A16: Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Buschbohnen unter variablen Kosten bei Rohrberegnung und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)



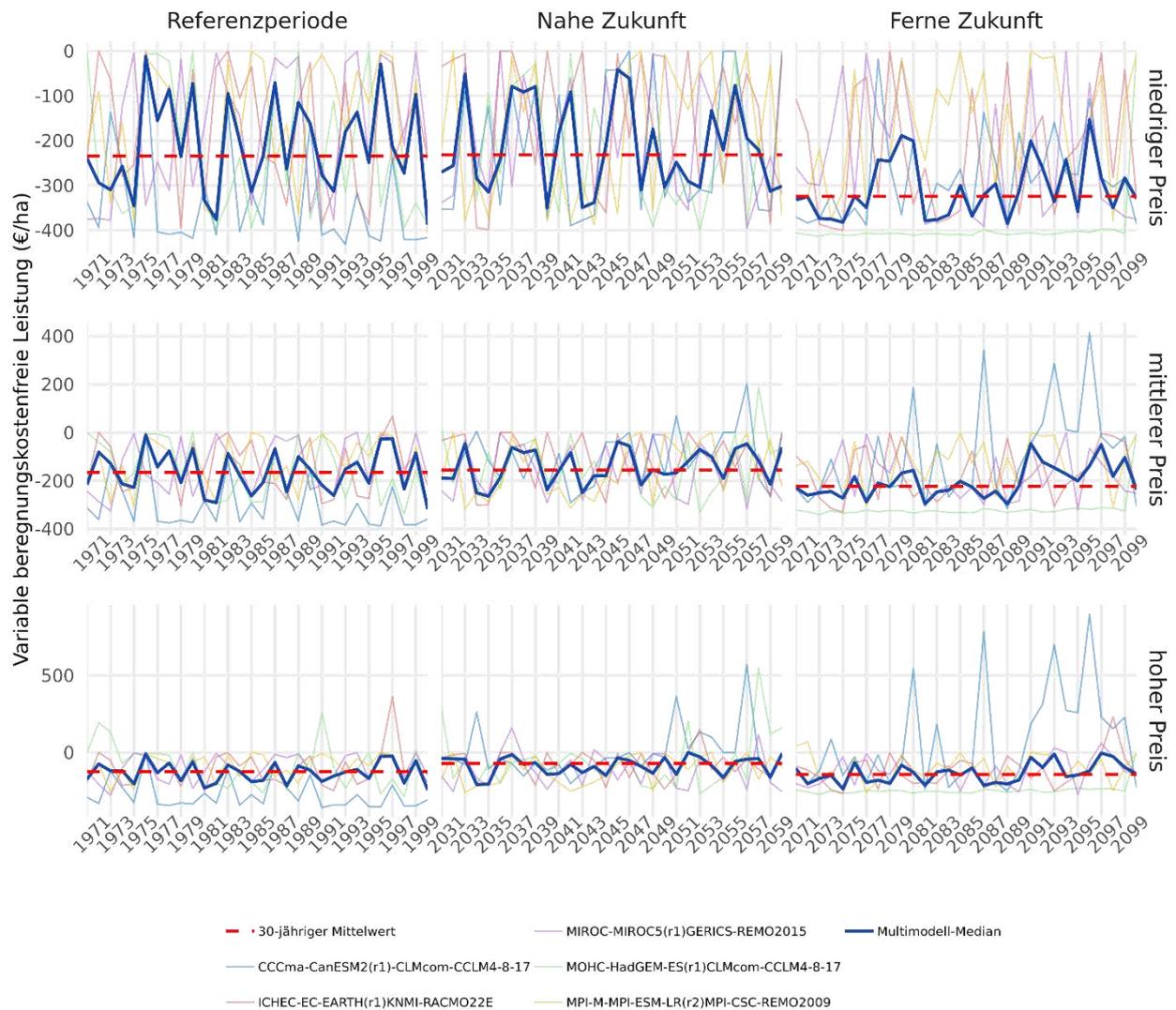
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung A17: Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Himbeeren unter variablen Kosten bei Tropfbewässerung und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)



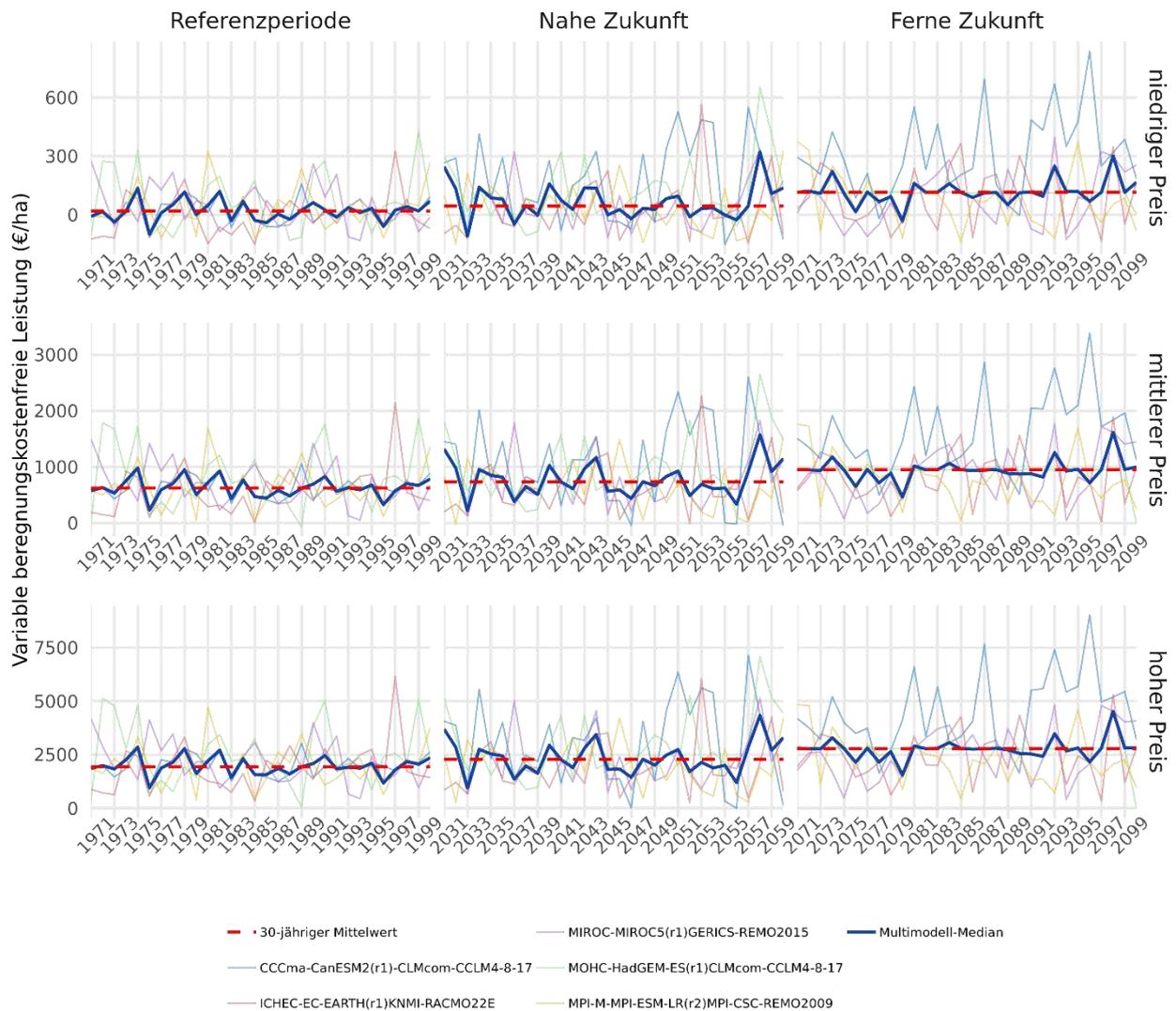
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung A18: Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Johannisbeeren unter variablen Kosten bei Tropfbewässerung und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)



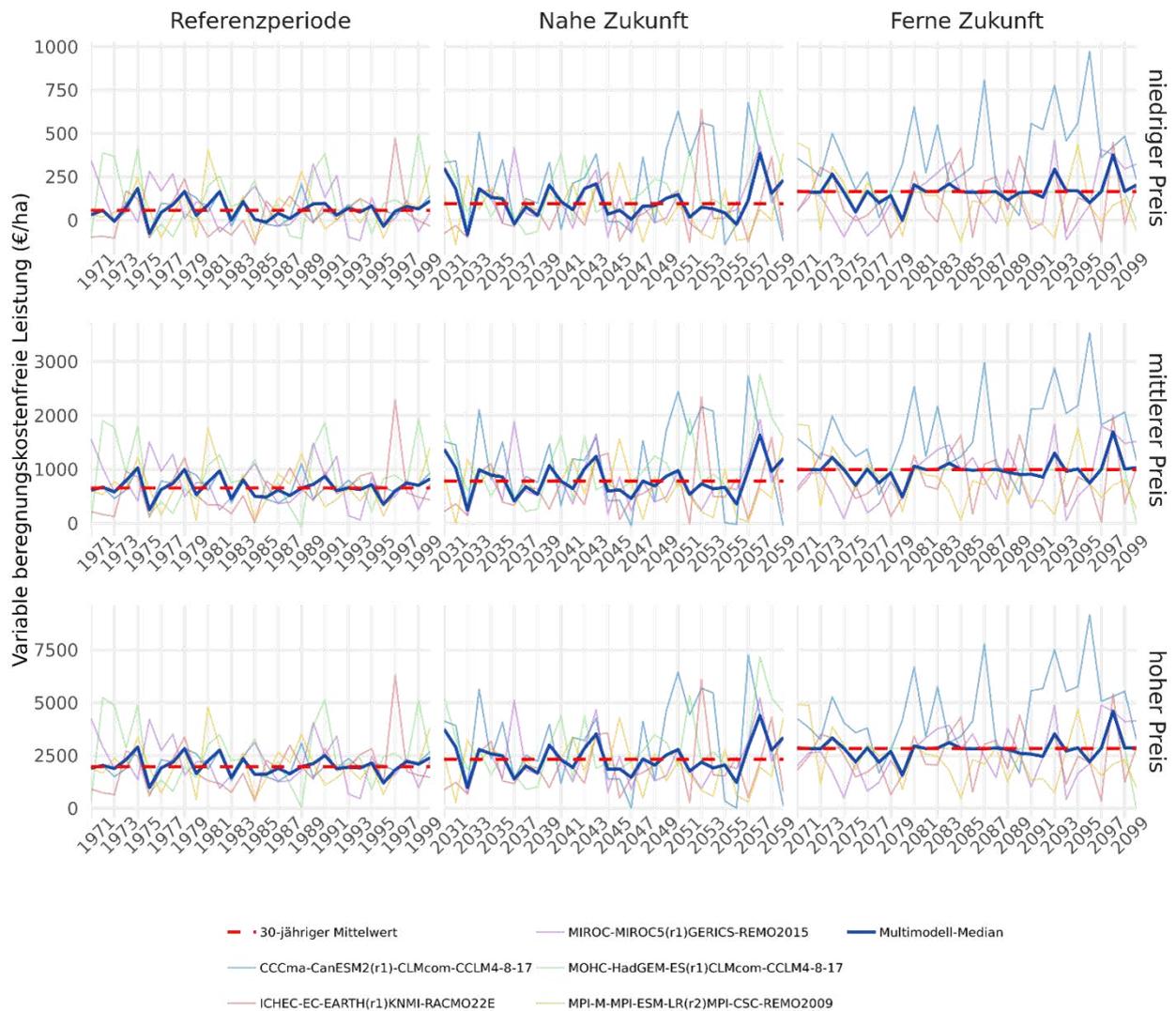
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung A19: Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Kartoffeln unter variablen Kosten bei der Bewässerung durch eine mobile Beregnungsmaschine mit Starkregner und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)



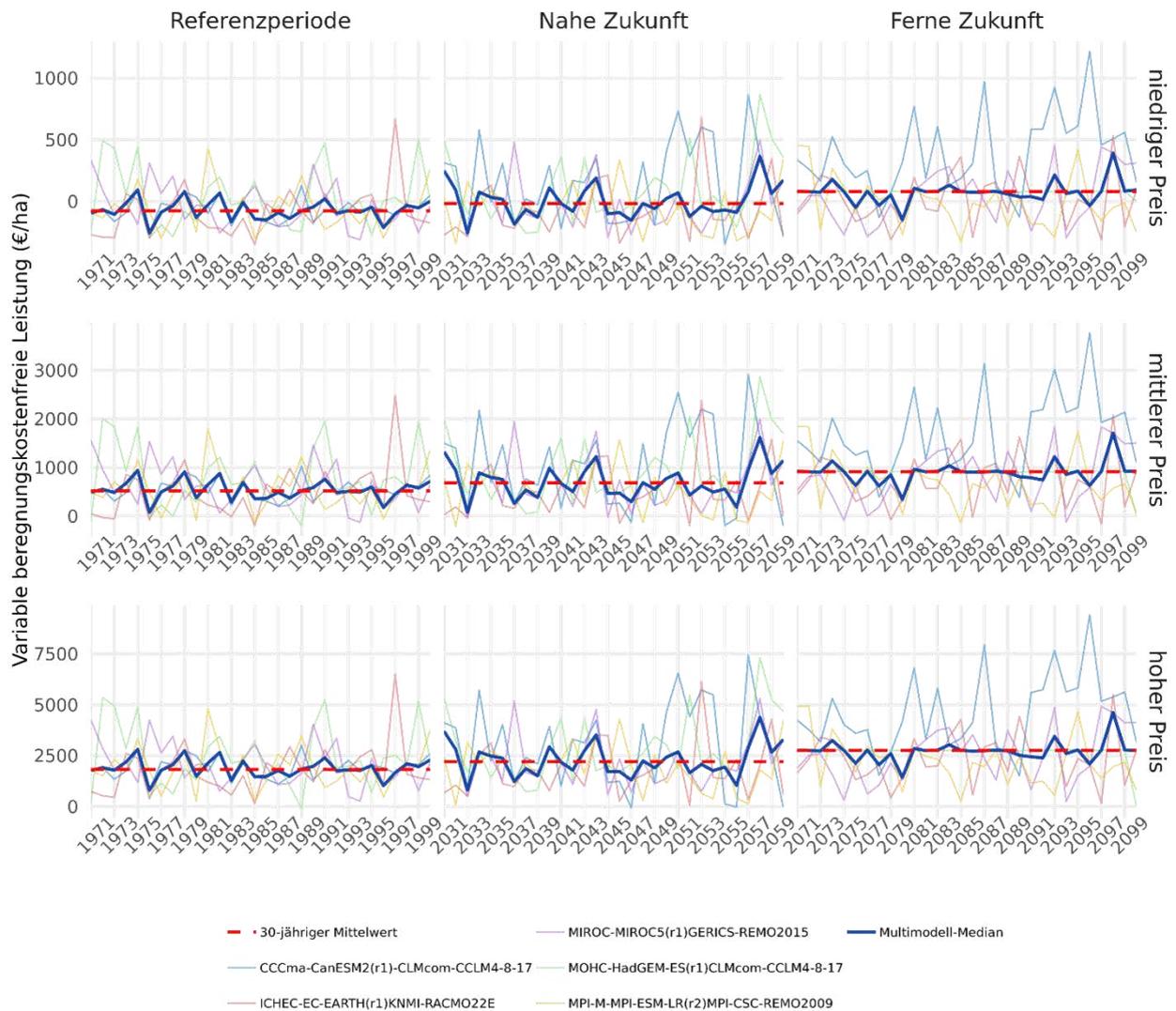
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung A20: Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Kartoffeln unter variablen Kosten bei der Bewässerung durch eine mobile Beregnungsmaschine mit Düsenwagen und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)



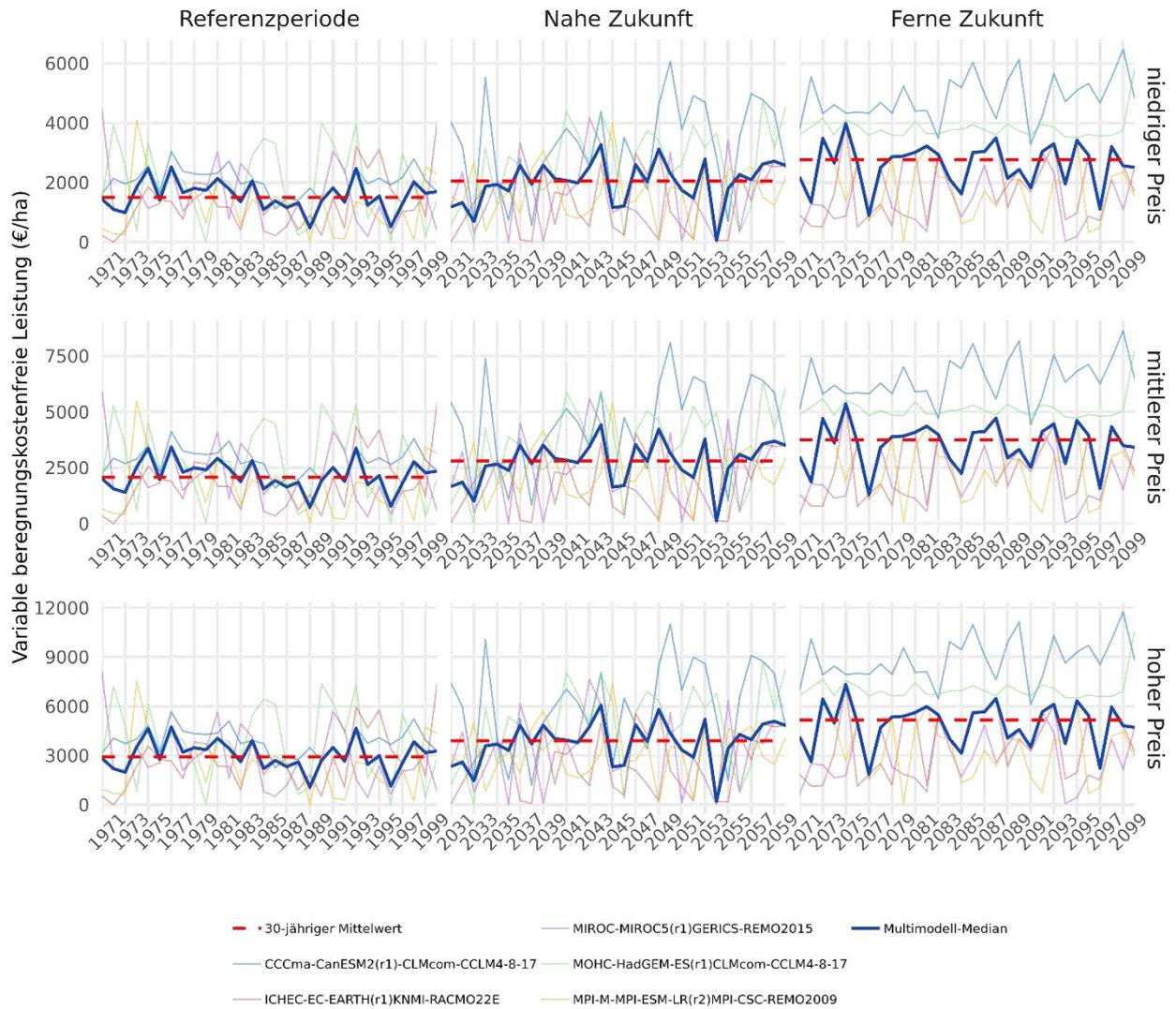
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung A21: Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Kartoffeln unter variablen Kosten bei Tropfbewässerung und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)



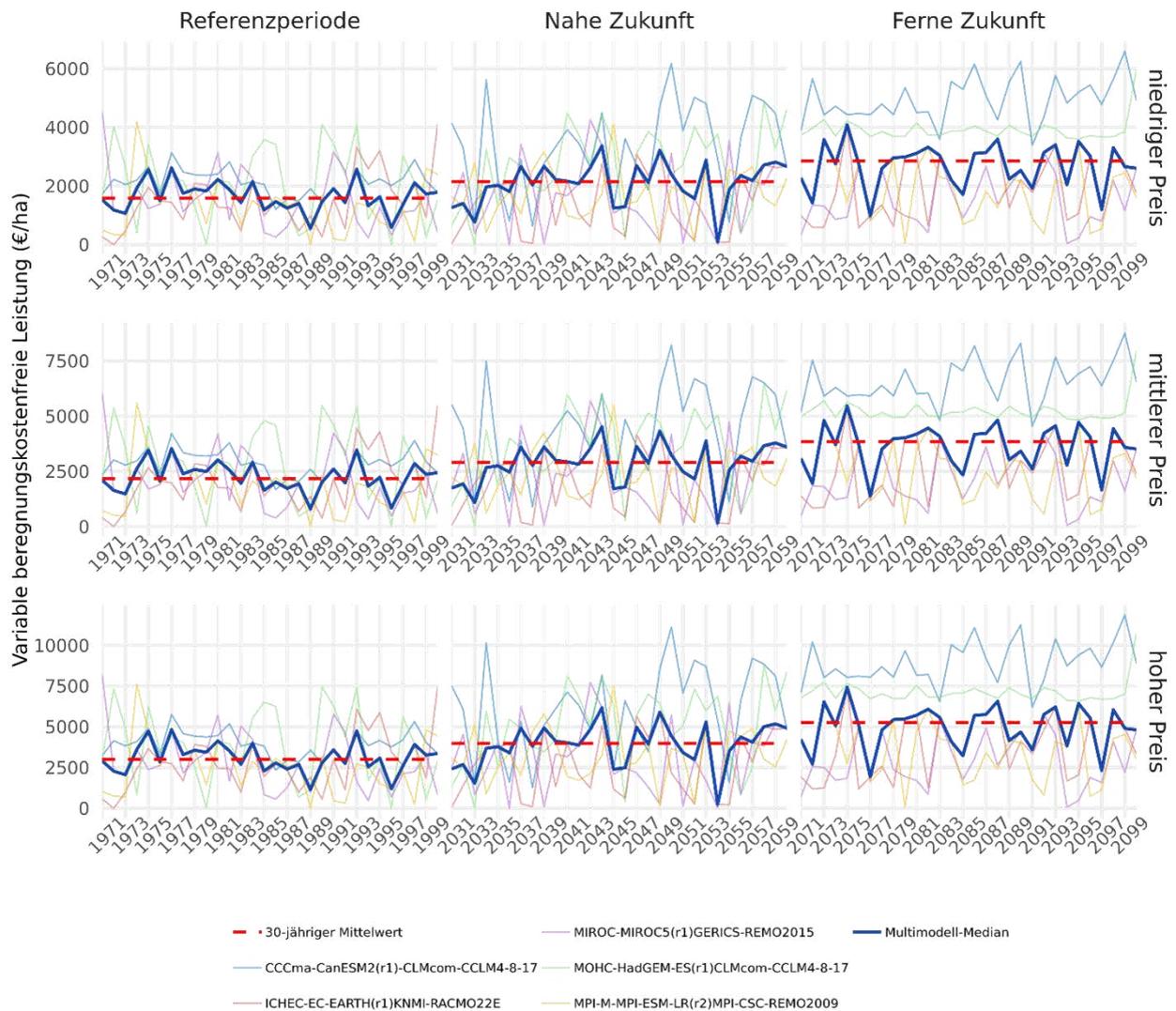
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung A22: Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Spargel unter variablen Kosten bei Tropfbewässerung und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)



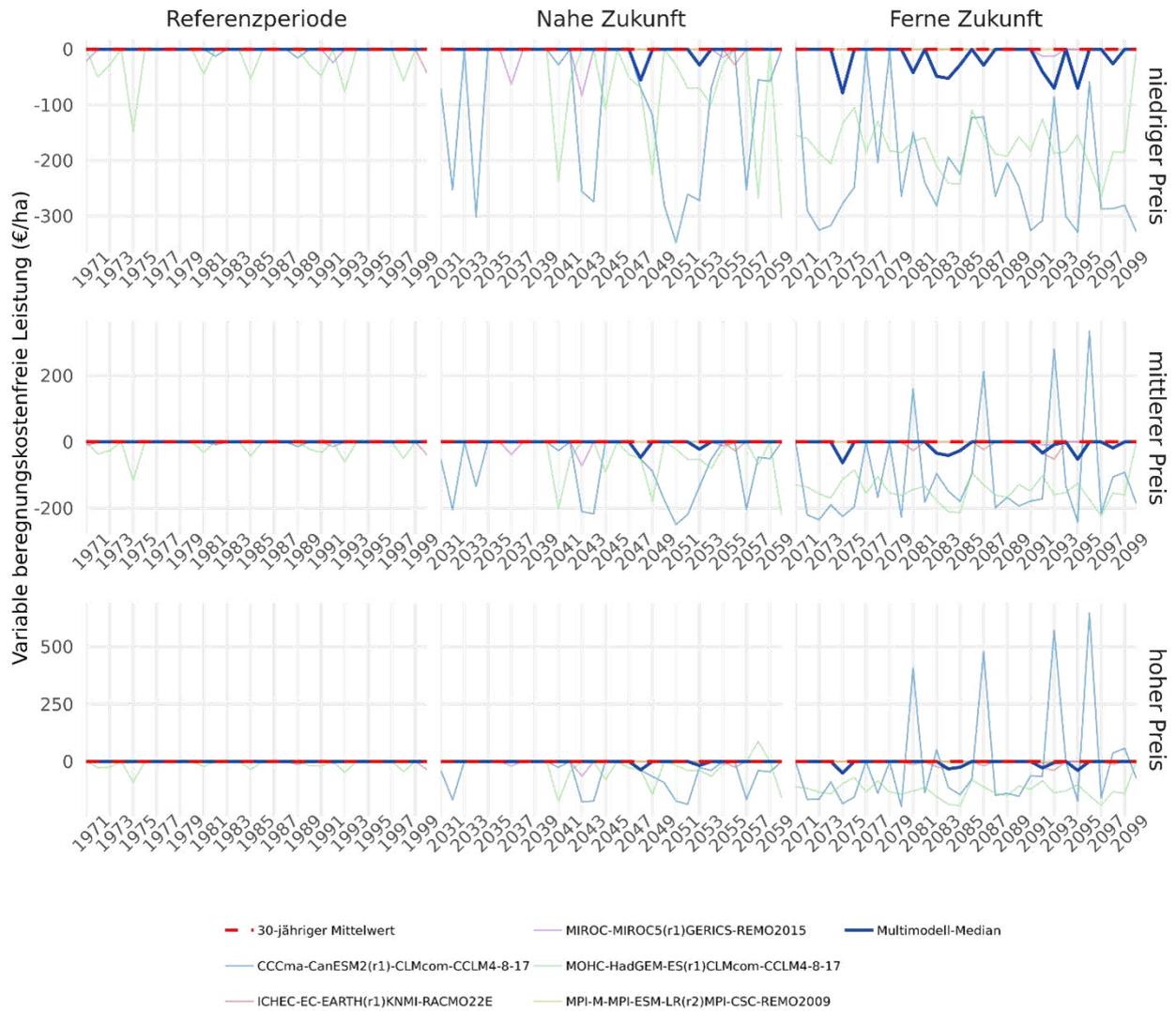
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung A23: Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Spargel unter variablen Kosten bei Rohrberegnung und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)



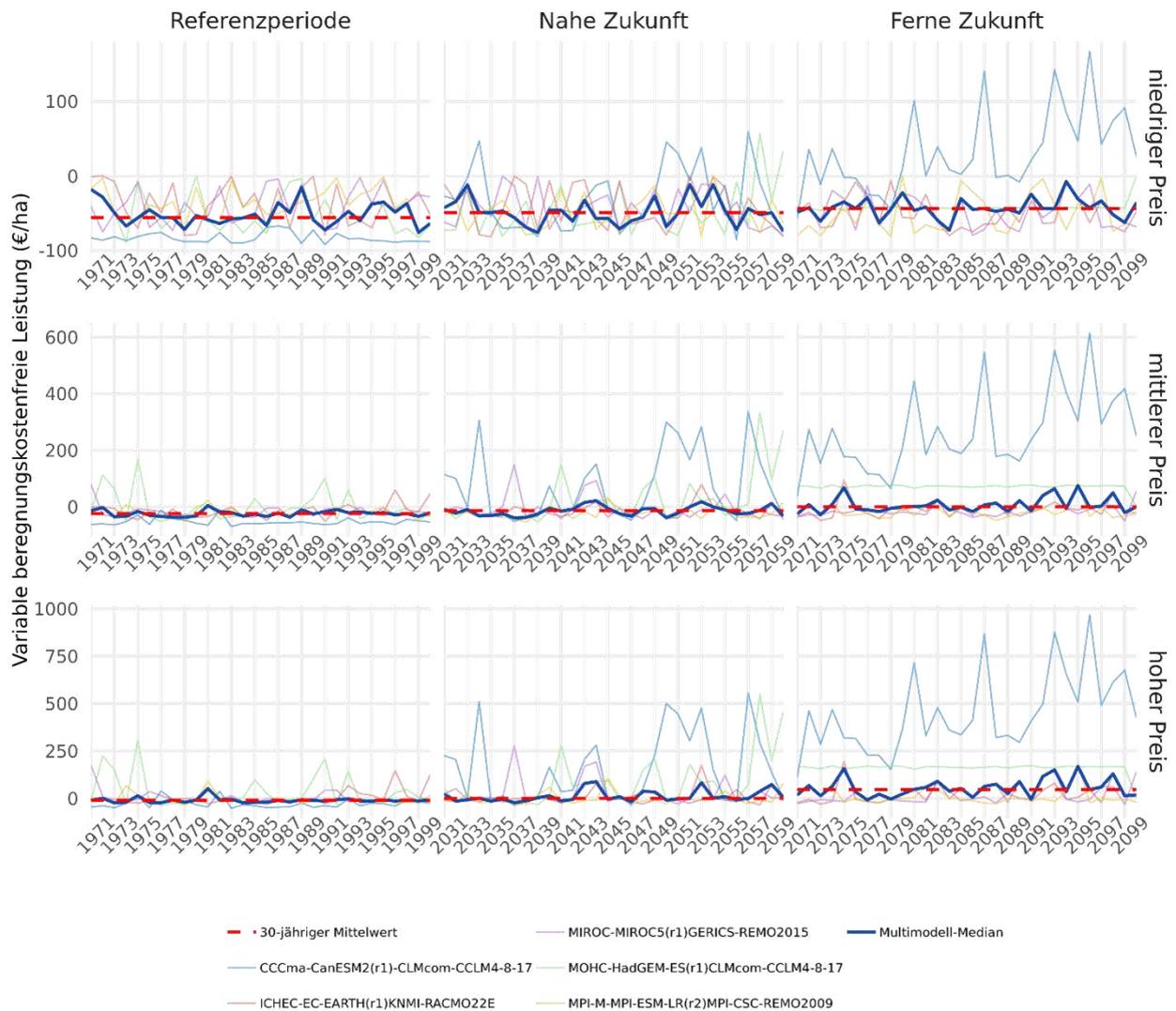
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung A24: Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Wein unter variablen Kosten bei Tropfbewässerung und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)



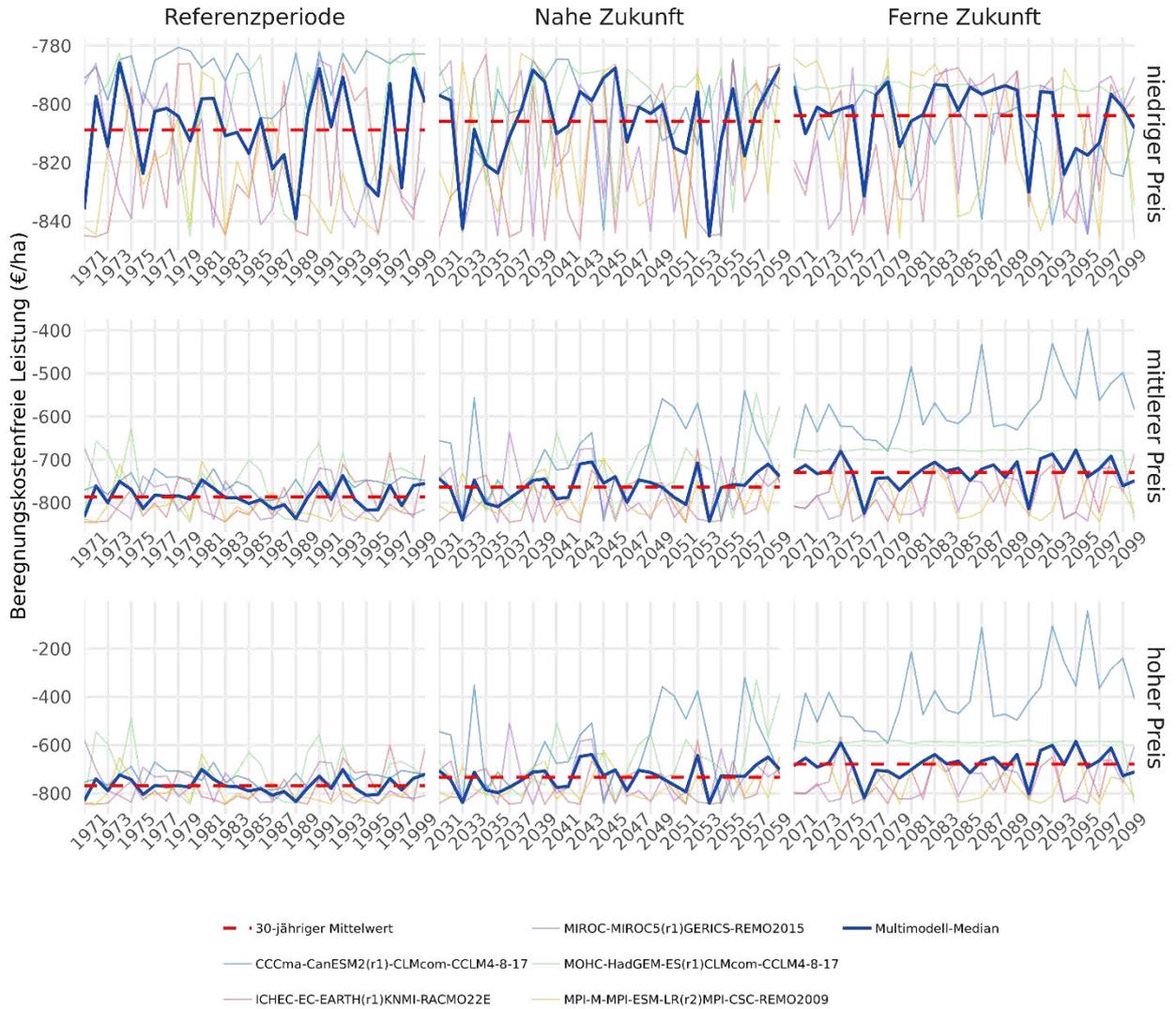
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung A25: Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Zuckerrüben unter variablen Kosten bei der Bewässerung durch eine mobile Beregnungsmaschine mit Düsenwagen und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)



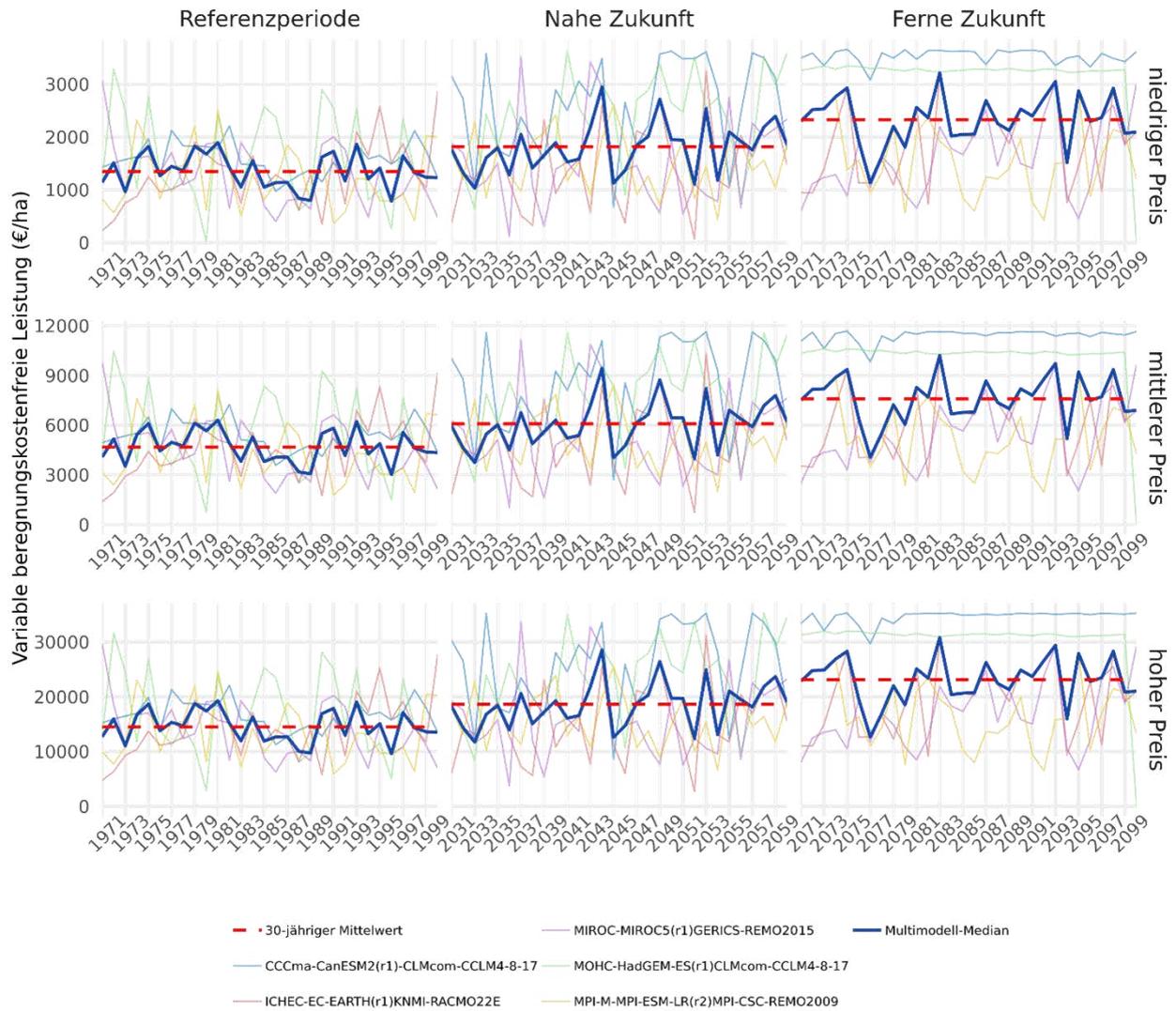
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung A26: Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Zuckerrübe unter variablen Kosten bei der Bewässerung durch eine mobile Beregnungsmaschine mit Starkregner und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)



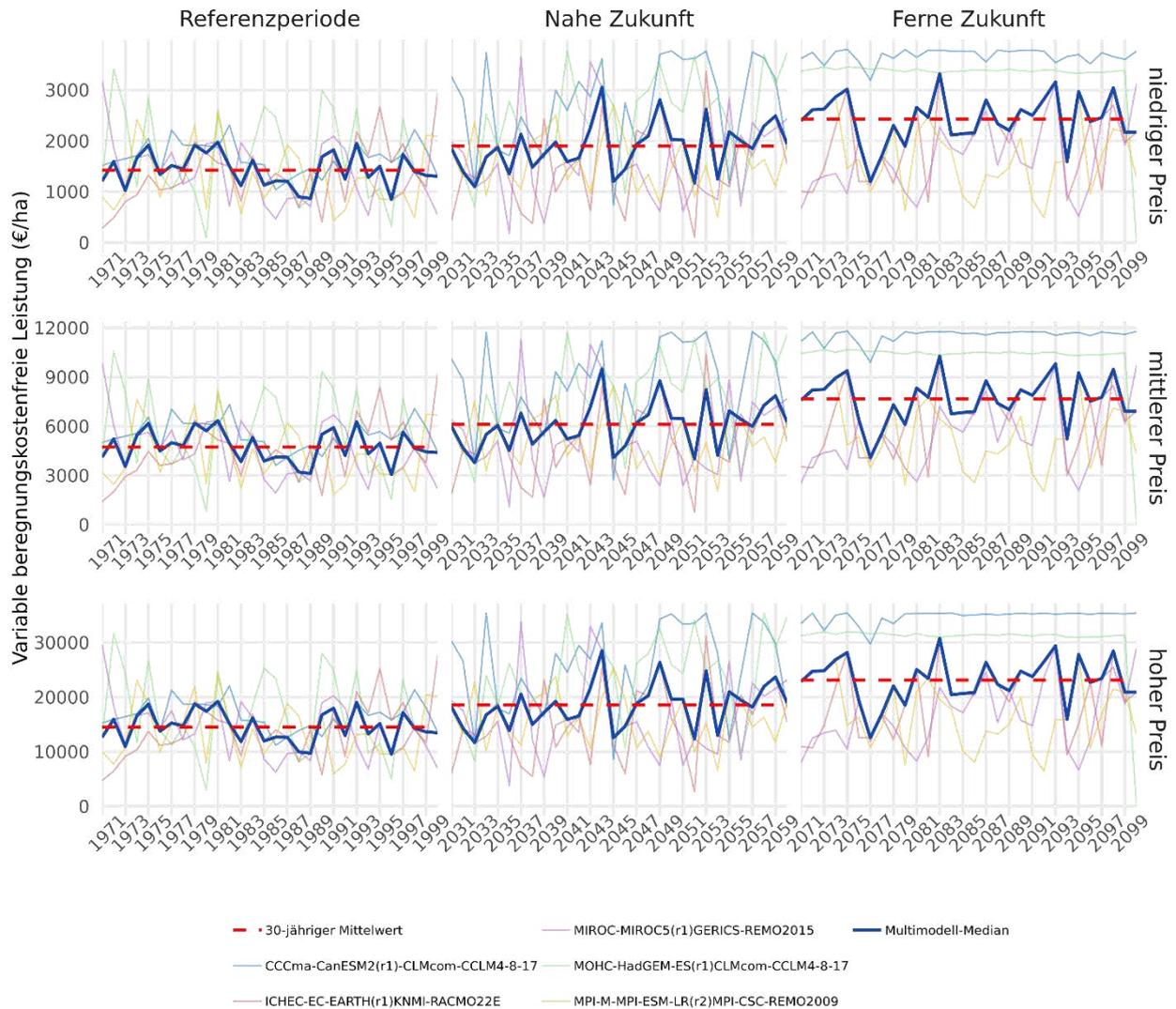
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung A27: Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Zwiebeln unter variablen Kosten bei Tropfbewässerung und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)



Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung A28: Ex-ante-Bewässerungswürdigkeit von Zwiebeln unter variablen Kosten bei Rohrberegnung und Grundwasser für die Referenzperiode (1971–2000), nahe Zukunft (2031–2060) und ferne Zukunft (2071–2100)



Quelle: Eigene Berechnungen.

Tabelle A5: Potenzieller Bewässerungsbedarf für Winterweizen im Hessischen Ried im Technologievergleich

	Referenzperiode	Nahe Zukunft	Ferne Zukunft
Mobile Beregnungsmaschine mit Starkregner	36	56	64
Mobile Beregnungsmaschine mit Düsenwagen	22	33	37

Quelle: Eigene Berechnungen.

Tabelle A6: Potenzieller Bewässerungsbedarf für Wintergerste im Hessischen Ried im Technologievergleich

	Referenzperiode	Nahe Zukunft	Ferne Zukunft
Mobile Beregnungsmaschine mit Starkregner	34	50	45
Mobile Beregnungsmaschine mit Düsenwagen	20	29	26

Quelle: Eigene Berechnungen.

Tabelle A7: Potenzieller Bewässerungsbedarf für Winterroggen, Triticale und sonstige Wintergetreide im Hessischen Ried im Technologievergleich

	Referenzperiode	Nahe Zukunft	Ferne Zukunft
Mobile Beregnungsmaschine mit Starkregner	37	54	71
Mobile Beregnungsmaschine mit Düsenwagen	24	34	44

Quelle: Eigene Berechnungen.

Tabelle A8: Potenzieller Bewässerungsbedarf für Sommerweizen im Hessischen Ried im Technologievergleich

	Referenzperiode	Nahe Zukunft	Ferne Zukunft
Mobile Beregnungsmaschine mit Starkregner	104	140	163
Mobile Beregnungsmaschine mit Düsenwagen	63	83	94

Quelle: Eigene Berechnungen.

Tabelle A9: Potenzieller Bewässerungsbedarf für Sommergerste im Hessischen Ried im Technologievergleich

	Referenzperiode	Nahe Zukunft	Ferne Zukunft
Mobile Beregnungsmaschine mit Starkregner	155	192	211
Mobile Beregnungsmaschine mit Düsenwagen	92	113	124

Quelle: Eigene Berechnungen.

Tabelle A10: Potenzieller Bewässerungsbedarf für Hafer und sonstige Sommergetreide im Hessischen Ried im Technologievergleich

	Referenzperiode	Nahe Zukunft	Ferne Zukunft
Mobile Beregnungsmaschine mit Starkregner	98	130	152
Mobile Beregnungsmaschine mit Düsenwagen	61	79	93

Quelle: Eigene Berechnungen.

Tabelle A11: Potenzieller Bewässerungsbedarf für Raps im Hessischen Ried im Technologievergleich

	Referenzperiode	Nahe Zukunft	Ferne Zukunft
Mobile Beregnungsmaschine mit Starkregner	37	54	44
Mobile Beregnungsmaschine mit Düsenwagen	21	31	26

Quelle: Eigene Berechnungen.

Tabelle A12: Potenzieller Bewässerungsbedarf für Silomais im Hessischen Ried im Technologievergleich

	Referenzperiode	Nahe Zukunft	Ferne Zukunft
Mobile Beregnungsmaschine mit Starkregner	87	117	146
Mobile Beregnungsmaschine mit Düsenwagen	52	69	85

Quelle: Eigene Berechnungen.

Tabelle A13: Potenzieller Bewässerungsbedarf für Körnermais im Hessischen Ried im Technologievergleich

	Referenzperiode	Nahe Zukunft	Ferne Zukunft
Mobile Beregnungsmaschine mit Starkregner	75	102	129
Mobile Beregnungsmaschine mit Düsenwagen	46	62	77

Quelle: Eigene Berechnungen.

Tabelle A14: Potenzieller Bewässerungsbedarf für Hülsenfrüchte/Eiweißpflanzen im Hessischen Ried im Technologievergleich

	Referenzperiode	Nahe Zukunft	Ferne Zukunft
Mobile Beregnungsmaschine mit Starkregner	113	145	167
Mobile Beregnungsmaschine mit Düsenwagen	68	87	99

Quelle: Eigene Berechnungen.

Tabelle A15: Potenzieller Bewässerungsbedarf für Futterrübe und andere Rüben im Hessischen Ried im Technologievergleich

	Referenzperiode	Nahe Zukunft	Ferne Zukunft
Mobile Beregnungsmaschine mit Starkregner	19	33	45
Mobile Beregnungsmaschine mit Düsenwagen	11	18	25

Quelle: Eigene Berechnungen.

Tabelle A16: Potenzieller Bewässerungsbedarf für Zuckerrüben im Hessischen Ried im Technologievergleich

	Referenzperiode	Nahe Zukunft	Ferne Zukunft
Mobile Beregnungsmaschine mit Starkregner	58	78	101
Mobile Beregnungsmaschine mit Düsenwagen	33	45	57

Quelle: Eigene Berechnungen.

Tabelle A17: Potenzieller Bewässerungsbedarf für Erdbeeren im Hessischen Ried im Technologievergleich

	Referenzperiode	Nahe Zukunft	Ferne Zukunft
Rohrberegnung	310	367	409
Tropfbewässerung	232	275	306

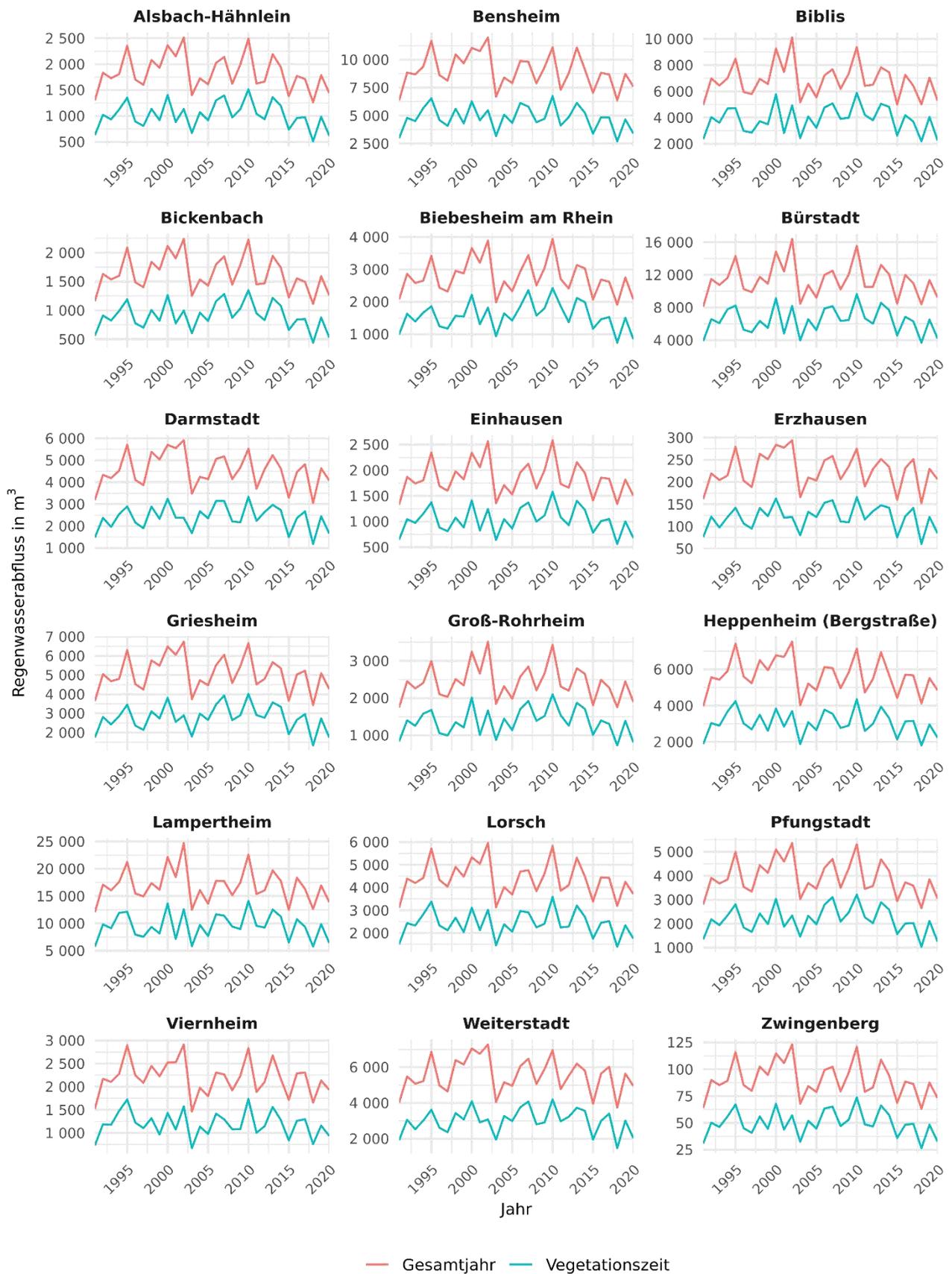
Quelle: Eigene Berechnungen.

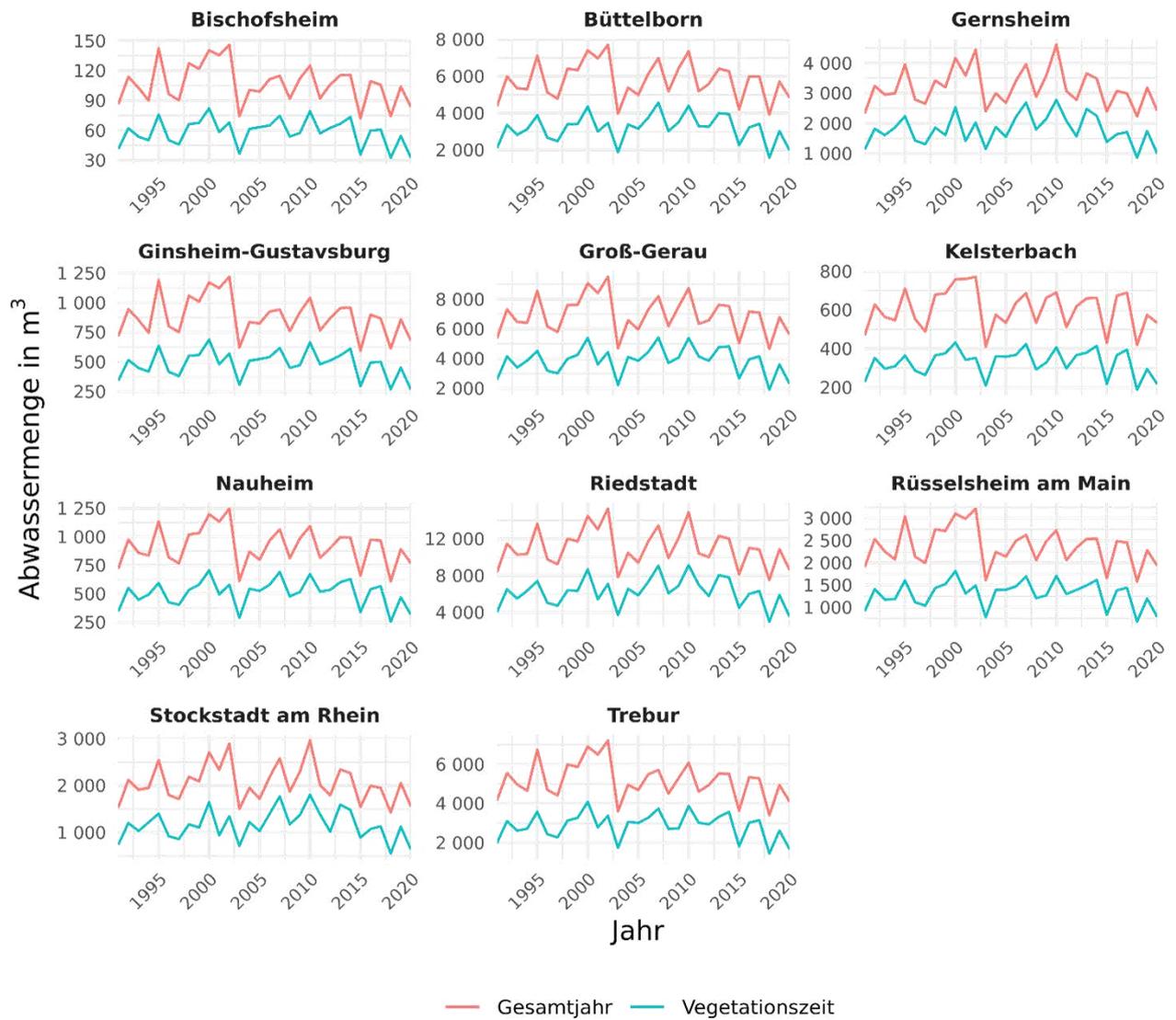
Tabelle A18: Dachflächen und durchschnittlicher Regenwasserabfluss auf Gemeindeebene im Hessischen Ried (1991–2020)

AGS	Gemeinde	Dachflächen m ²	Abfluss		Gesamtabfluss	
			Gesamtjahr l/m ²	Vegetationszeit l/m ²	Gesamtjahr m ³	Vegetationszeit m ³
06411000	Darmstadt	7.568,5	600,8	315,5	4.546,8	2.388,0
06431002	Bensheim	15.107,3	596,5	317,6	9.010,9	4.798,6
06431003	Biblis	13.652,0	501,0	283,5	6.839,7	3.870,4
06431005	Bürstadt	21.974,8	516,0	291,1	11.338,1	6.397,1
06431006	Einhausen	3.422,4	538,8	301,4	1.843,9	1.031,4
06431010	Groß- Rohrheim	4.705,5	515,6	291,8	2.426,3	1.373,1
06431011	Heppenheim (Bergstraße)	9.747,3	580,9	311,8	5.662,2	3.038,9
06431013	Lampertheim	33.125,5	509,1	287,1	16.862,6	9.511,0
06431016	Lorsch	7.951,7	552,1	304,3	4.389,9	2.419,6
06431020	Viernheim	3.877,5	563,9	306,0	2.186,4	1.186,7
06431022	Zwingenberg	164,3	550,6	303,8	90,4	49,9
06432001	Alsbach- Hähnlein	3.347,4	549,3	304,2	1.838,9	1.018,2
06432003	Bickenbach	2.980,6	547,6	303,7	1.632,2	905,2
06432006	Erzhausen	398,3	567,3	302,1	225,9	120,3
06432008	Griesheim	9.175,1	552,3	302,5	5.067,4	2.775,8
06432018	Pfungstadt	7.121,2	551,5	304,2	3.927,4	2.166,3
06432023	Weiterstadt	9.972,2	557,8	300,9	5.562,5	3.000,7
06433001	Biebesheim am Rhein	5.427,1	510,7	289,3	2.771,7	1.569,8
06433002	Bischofsheim	222,1	480,2	262,5	106,6	58,3
06433003	Büttelborn	11.010,0	524,9	290,0	5.778,7	3.192,7
06433004	Gernsheim	5.970,4	533,3	300,1	3.183,8	1.791,9
06433005	Ginsheim- Gustavsburg	1.856,3	476,0	260,9	883,7	484,4
06433006	Groß-Gerau	13.875,6	499,3	278,2	6.927,7	3.859,8
06433007	Kelsterbach	1.168,7	516,7	281,6	603,9	329,1
06433009	Nauheim	1.848,9	496,2	274,4	917,5	507,3
06433011	Riedstadt	21.614,2	510,5	286,5	11.035,0	6.191,7
06433012	Rüsselsheim am Main	4.842,1	488,6	268,3	2.365,8	1.299,3
06433013	Stockstadt am Rhein	3.975,1	518,2	292,9	2.060,1	1.164,2
06433014	Trebur	10.770,7	480,3	266,3	5.173,1	2.868,0

Quelle: Eigene Berechnung.

Abbildung A29: Jährliche Regenwasserabflüsse von landwirtschaftlichen Dachflächen im Hessischen Ried auf Gemeindeebene (1991–2020)





Quelle: Eigene Berechnung.

Tabelle A19: Jährlich entnehmbare Wassermengen aus den Oberflächengewässern (in 1.000 m³) bei 24 Stunden Entnahmedauer pro Entnahmetag

Jahr	Gesamtjahr				Vegetationszeit			
	Schwarzbach	Lauter	Modau	Weschnitz	Schwarzbach	Lauter	Modau	Weschnitz
1991	1.182	356	-	4.451	584	130	-	1.781
1992	1.195	472	1.390	5.748	594	194	597	2.555
1993	1.123	423	1.068	5.419	529	143	406	2.284
1994	1.189	569	1.680	6.948	594	289	835	3.426
1995	1.195	631	1.703	7.064	598	316	854	3.542
1996	1.202	629	1.675	6.967	601	313	821	3.426
1997	1.074	619	1.642	7.064	502	313	793	3.542
1998	1.113	631	1.624	6.522	515	316	774	3.000
1999	1.198	631	1.703	7.006	601	316	854	3.484
2000	1.202	632	1.703	7.083	601	316	849	3.542
2001	1.198	631	1.703	7.064	601	316	854	3.542
2002	1.198	631	1.703	7.064	601	316	854	3.542
2003	1.037	389	1.330	5.574	443	216	546	2.380
2004	1.106	482	1.236	6.154	512	240	527	2.671
2005	1.077	517	1.320	5.729	506	242	583	2.729
2006	1.175	569	1.638	6.503	578	254	788	3.000
2007	1.198	631	1.703	5.961	601	316	854	2.613
2008	1.152	632	1.610	5.516	552	316	798	2.593
2009	1.028	586	1.339	5.303	447	278	565	2.400
2010	1.198	631	1.703	7.045	601	316	854	3.522
2011	1.166	631	1.666	6.038	568	316	816	2.613
2012	1.179	491	1.470	5.438	578	232	644	2.439
2013	1.189	622	1.703	7.064	591	308	854	3.542
2014	1.139	610	1.633	6.580	542	297	784	3.058
2015	837	401	1.255	5.090	345	188	476	2.322
2016	1.077	530	1.442	7.083	496	299	588	3.542
2017	1.077	567	1.493	6.871	479	278	644	3.542
2018	808	520	1.190	4.800	328	237	588	2.264
2019	946	508	1.442	5.632	351	194	593	2.148
2020	739	544	1.432	7.064	269	270	579	3.522
Mittelwert	1.107	557	1.479	6.262	524	269	709	2.952

Quelle: Eigene Berechnungen.

Tabelle A20: Überblick der kommunalen Kläranlagen (> 2.000 EW)

Kläranlage	Ausbau- größe	Reinigungs- stufe	jährliche Abwassermenge (in 1.000 m ³)						
			2008	2011	2012	2014	2016	2018	2020
Alsbach- Hähnlein / Alsbach	25.000	b/n/d/p	1.536,1	1.860,7	1.460,7	1.426,8	1.489,5	1.419,6	1.420,8
Bensheim	90.000	m/b/n/d/p	5.237,4	5.612,9	5.109,6	5.160,7	5.307,4	4.723,1	4.866,4
Biblis	19.970	b/n/d/p	821,6	1.148,1	1.006,6	1.013,9	1.010,3	879,9	1.023,3
Bickenbach	32.000		1.847,6	2.011,1	1.799,4	1.805,6	1.824,3	1.780,3	1.869,2
Bürstadt	27.000	m/b/n/d/p	1.122,7	1.277,5	1.203,7	1.200,6	1.329,5	1.117,2	1.243,2
Büttelborn	19.800	b/n/d/p	1.283,0	1.653,6	1.307,3	1.426,2	1.601,5	1.386,3	1.174,6
Darmstadt	240.000	m/b/n/d/p	12.762,7	14.438,7	12.343,2	12.899,5	13.453,1	12.287,2	11.904,0
Darmstadt / Eberstadt	50.000	m/b/n/d/p	2.062,9	2.181,1	2.047,1	1.991,7	2.084,3	1.838,7	1.930,5
Gernsheim	18.000	m/b/n/d/p	925,0	1.059,9	996,5	1.024,2	1.059,8	1.066,0	940,1
Gernsheim, Merck ZABA (Industrie-KLA)	-	b/n/d/p	-	-	-	2.632,6	2.552,7	2.282,5	2.128,5
Ginsheim- Gustavsburg	32.500	m/b/n/d/p	2.491,7	2.748,3	2.573,1	2.762,2	3.170,1	2.815,1	2.413,8
Griesheim	50.000	m/b/n/d/p	1.747,4	1.970,1	1.882,5	1.819,1	1.958,9	1.698,4	1.901,0
Gross-Gerau	45.000	m/b/n/d/p	2.013,7	3.620,5	2.763,0	2.801,0	3.127,0	2.845,0	2.434,2
Heppenheim (Bergstraße)	80.000	m/b/n/d/p	2.180,7	2.304,8	2.089,0	2.131,4	2.105,9	2.043,0	2.133,4
Lampertheim	33.000	m/b/n/d/p	2.280,8	2.324,9	2.182,3	2.353,1	2.489,6	2.023,8	2.035,0
Lampertheim / Hofheim	8.000	m/b/n/d/p	496,8	529,0	475,6	467,9	316,4	497,3	418,6
Lorsch	18.000	m/b/n/d/p	888,5	1.083,4	1.077,2	1.354,8	1.150,0	1.037,4	1.066,3
Mörfelden- Walldorf / Mörfelden	48.000	m/b/n/d/p	2.972,5	2.962,2	2.819,3	2.884,5	3.085,4	2.699,4	2.776,5
Nauheim	14.000	m/b/n/d/p	881,0	823,9	722,9	948,3	942,7	747,6	698,0
Pfungstadt	45.000	m/b/n/d/p	1.448,8	1.553,3	1.587,5	1.435,0	1.478,7	1.301,7	1.421,0
Pfungstadt / Eschollbrücken	8.000	m/b/n/d/p	516,2	542,7	538,4	530,1	516,3	424,2	444,7
Raunheim	98.000	m/b/n/d/p	4.664,2	4.834,4	4.696,4	5.281,7	5.565,0	5.088,6	5.073,0
Riedstadt / Wolfskehlen	31.000	m/b/n/d/p	1.404,3	1.548,1	1.480,6	1.491,0	1.608,7	1.391,1	1.450,8
Rüsselsheim / Bauschheim	15.000	m/b/n/d/p	616,3	666,1	647,2	668,1	726,1	586,3	529,9
Stockstadt	7.000	b/n/d/p	406,6	444,7	445,2	428,7	445,6	355,2	403,2
Trebur	9.000	b/n/d/p	508,0	538,2	489,8	505,0	561,2	475,6	470,9
Trebur / Geinsheim	5.500	b/n/d/p	207,0	246,5	326,5	289,6	322,3	279,5	260,5
Weiterstadt	30.000	m/b/n/d/p	1.876,7	2.158,4	2.005,4	2.014,5	2.105,2	1.946,9	1.896,2
Weiterstadt / Gräfenhausen	11.000	b/n/d/p	442,0	612,5	506,1	583,2	601,1	488,0	486,9

Anmerkung: Reinigungsstufen: m = mechanische Reinigung, b = biologische Reinigung; n = Nitrifikation, d = Denitrifikation; p = Phosphorelimination.

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf HMUKLV (2023) und UBA (2024).

Tabelle A21: Theoretisches Potenzial von Wasserwiederverwendung und Bewässerungsbedarf auf Gemeindeebene im Hessischen Ried (1991–2020) (in 1.000 m³)

AGS	Name	Mittlere Abwassermenge			Mittlerer Bewässerungs- bedarf	Differenz		
		100 %	80 %	60 %		100 %	80 %	60 %
06411000	Darmstadt	14.889	8.934	11.911	623	14.267	8.311	11.289
06431002	Bensheim	5.145	3087	4.116	326	4.819	2.761	3.790
06431003	Biblis	986	592	789	925	61	-333	-136
06431005	Bürstadt	1.213	728	971	595	618	133	376
06431011	Heppenheim (Bergstraße)	2.141	1.285	1.713	156	1.986	1.129	1.557
06431013	Lampertheim	2.699	1.619	2.159	1229	1.470	390	930
06431016	Lorsch	1.094	656	875	336	758	321	540
06432001	Alsbach-Hähnlein	1.516	910	1.213	407	1.109	503	806
06432003	Bickenbach	1.848	1.109	1.479	172	1.676	937	1.306
06432008	Griesheim	1.854	1.112	1.483	508	1.346	604	975
06432018	Pfungstadt	1.963	1.178	1.570	700	1.262	477	870
06432023	Weiterstadt	2.532	1.519	2.025	1235	1.297	285	791
06433003	Büttelborn	1.405	843	1.124	1102	303	-259	22
06433004	Gernsheim	3.409	2.046	2.727	1061	2.348	984	1.666
06433005	Ginsheim- Gustavsburg	2.711	1.626	2.168	153	2.558	1.473	2.015
06433006	Groß-Gerau	2.801	1.680	2.240	1395	1.406	286	846
06433008	Mörfelden-Walldorf	2.886	1.731	2.309	142	2.743	1.589	2.166
06433009	Nauheim	823	494	659	183	640	311	476
06433011	Riedstadt	1.482	889	1.186	1836	-354	-947	-651
06433012	Rüsselsheim am Main	5.663	3.398	4.531	503	5.160	2.895	4.027
06433013	Stockstadt am Rhein	418	251	335	166	252	85	169
06433014	Trebur	783	470	626	1521	-738	-1.051	-894

Quelle: Eigene Darstellung.



Johann Heinrich von Thünen-Institut
Institut für Lebensverhältnisse in ländlichen Räumen
Bundesallee 64
38116 Braunschweig
Germany

lv@thuenen.de
www.thuenen.de