

Ebers, Niklas; Stupak, Nataliya; Hüttel, Silke; Woelfert, Mats; Müller-Thomy, Hannes

Working Paper

Potenzialabschätzung von technischen Wasserspeicheroptionen, Bewässerungsansätzen und ihrer Umsetzbarkeit

Thünen Working Paper, No. 227

Provided in Cooperation with:

Johann Heinrich von Thünen Institute, Federal Research Institute for Rural Areas, Forestry and Fisheries

Suggested Citation: Ebers, Niklas; Stupak, Nataliya; Hüttel, Silke; Woelfert, Mats; Müller-Thomy, Hannes (2023) : Potenzialabschätzung von technischen Wasserspeicheroptionen, Bewässerungsansätzen und ihrer Umsetzbarkeit, Thünen Working Paper, No. 227, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig,
<https://doi.org/10.3220/WP1700732748000>

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/283571>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

Potenzialabschätzung von technischen Wasser- speicheroptionen, Bewässerungsansätzen und ihrer Umsetzbarkeit

**Niklas Ebers, Nataliya Stupak, Silke Hüttel, Mats Woelfert,
Hannes Müller-Thomy**

Thünen Working Paper 227

Niklas Ebers, Nataliya Stupak, Mats Woelfert

Thünen-Institut, Stabsstelle Klima und Boden



Silke Hüttel

Georg-August-Universität Göttingen, Department für Agrarökonomie und Rurale Entwicklung

Silke Hüttel dankt der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des SFB 1502 DETECT, Project-ID 450058266 – SFB 1502.



Hannes Müller-Thomy

Technische Universität Braunschweig, Leichtweiß-Institut für Wasserbau

Thünen Working Paper 227

Braunschweig/Germany, November 2023

Zusammenfassung

Im Pflanzenbau stellt die Bewässerung eine der wirksamsten Maßnahmen dar, um die Ertragsverluste infolge von Trockenheits- und Dürreereignissen zu vermeiden oder zu minimieren. Durch ein begrenztes Wasserdargebot besteht die Herausforderung, die Wasserverfügbarkeit für die Bewässerung zu erhöhen, ohne die Interessenkonflikte mit anderen wassernutzenden Sektoren zu verschärfen. Im Kontext des sich ändernden Niederschlagsmusters können in Deutschland Wasserspeicherbecken einen Teil der Lösung für die landwirtschaftlichen Betriebe darstellen. Der Kerngedanke ist es, Wasserspeicherbecken in den Herbst- und Wintermonaten entweder bei zunehmenden Dauerregen- oder Starkregenereignissen bzw. mit Entnahmen aus Oberflächengewässern bei hohem Abfluss zu füllen, und das gespeicherte Wasser bei Trockenheit für die Bewässerung zu nutzen. Neben der Steigerung des Wasserdargebots können durch diese technische Lösung die Zuverlässigkeit der Wasserverfügbarkeit für Betriebe verbessert sowie die Interessenkonflikte um die Nutzung von Grund- und Oberflächenwasser entschärft werden.

Dieses Working Paper wurde auf der Grundlage einer ausführlichen Literaturrecherche mit dem Ziel erstellt, die Potenziale verschiedener technischer Wasserspeicher und Bewässerungsansätze und ihrer Umsetzbarkeit im Bereich landwirtschaftliches Wassermanagement zu ermitteln und eine Orientierung für das Verbundprojekt LAWAMAD – Landwirtschaftliches Wassermanagement in Deutschland zu geben. Im ersten Schritt geben wir einen ausführlichen Überblick über mögliche technische Optionen der Wasserspeicherung sowie über die Kriterien, welche bei ihrer Auswahl eine Rolle spielen. Anschließend wird die Umsetzbarkeit dieser Optionen für die deutsche Landwirtschaft bewertet, wobei sich die vier Optionen Speicherbecken, Regenrückhaltebecken, Versickerungsanlagen und Talsperren als geeignet erweisen.

Die Auswahl von Wasserspeicherungsoption sowie die Entscheidung bzgl. ihrer technischen Ausführung stehen unter anderem im Zusammenhang mit vorhandenen oder geplanten Bewässerungsverfahren sowie mit den betrieblichen Strategien zur Bewässerungsoptimierung. Entsprechend bieten wir im zweiten Schritt eine Übersicht über die verfügbaren Bewässerungsverfahren und ihrer Vor- und Nachteile sowie über die Chancen und Risiken der Bewässerung in Deutschland aus agronomischer und wirtschaftlicher Perspektive. Im letzten Schritt unserer Literaturrecherche geben wir den aktuellen Stand der wissenschaftlichen Diskussion zu den Barrieren für die betrieblichen Investitionen in Bewässerungs- und Wasserspeicherungstechnologien aus drei theoretischen Perspektiven wieder.

Schlüsselwörter: Klimaanpassung, Wassermanagement, Wasserspeicherbecken, Bewässerungsverfahren, Chancen und Risiken, Investitionen in Bewässerungs- und Wasserspeicherungstechnologien, Barriere.

Abstract

Irrigation is one of the most effective measures to avoid or reduce yield losses caused by droughts. When water resources are limited, the main challenge relates to the issue of increasing water availability for crop production without causing or exacerbating conflicts of interest with other water-consuming sectors. Considering the already observed change of rainfall patterns in Germany, water storage reservoirs could be part of the solution to agricultural producers. Such reservoirs can be filled in autumn or winter months either with surface water runoff in case of persistent or heavy precipitations, or with abstractions from surface waters when water levels and discharges are high. The stored water can then be used for irrigation in case of spring or summer droughts, thus improving water availability and increasing the reliability of water provision for agricultural producers as well as reducing the conflicts of interest regarding groundwater extractions.

This working paper presents the results of a comprehensive literature review carried out in order to identify research needs in the field of agricultural water management and to provide orientation for the research project LAWAMAD – Agricultural Water Management in Germany. In the first step the available technical water storage options and the criteria which are of importance when deciding on their implementation are reviewed. Subsequently, the feasibility of these options for German agriculture is being discussed and the four most suitable ones – water storage basin, rainwater retention basin, infiltration facility and dams are identified.

The choice of a technical water storage option and the decision about its size and volume depends among other things with the already available or envisioned irrigation infrastructure and farm strategies to optimize irrigation. Respectively, we discuss the existent irrigation methods, their advantages and disadvantages, as well as chances and risks of irrigation from the agronomic and the economic efficiency perspectives. In the final step of our literature review we provide an overview of the current state of scientific discussion on the barriers to investments in irrigation and water storage infrastructure from three theoretical perspectives.

Key words: climate adaptation, water management, water storage reservoirs, irrigation methods, chances and risks, investments in irrigation and water storage technologies, barriers.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	ii
Abstract	iii
Abbildungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	v
Abkürzungsverzeichnis	vi
1 Hintergrund	1
1.1 Wasserbezogene Auswirkungen des Klimawandels	1
1.2 Bewässerung in Deutschland	3
1.3 Ziele und Ansatz des Working Papers	5
2 Technische Optionen zur Speicherung von Wasser	7
2.1 Oberirdische Speicheroptionen	7
2.2 Unterirdische Speicheroptionen	11
2.3 Boden und Grundwasser als natürlicher Speicher	12
2.4 Umsetzbarkeit der Wasserspeicheroptionen für die deutsche Landwirtschaft	14
2.4.1 Merkmale der Speicheroptionen aus naturräumlicher und technischer Sicht.....	14
2.4.2 Ausschlusskriterien	16
2.4.3 Umsetzbare Speicheroptionen für die deutsche Landwirtschaft	17
3 Bewässerungsverfahren: Stand der Technologie, betriebliche Potenziale, Chancen und Risiken	21
3.1 Bewässerungsverfahren.....	21
3.2 Chancen und Risiken der Bewässerung von Feldkulturen in der deutschen Landwirtschaft	24
4 Betriebliche Investitionen in Bewässerungs- und Wasserspeicherungstechnologien	31
4.1 Perspektive der landwirtschaftlichen Anpassung an den Klimawandel	31
4.2 Perspektive der Technologieadoption	34
4.3 Investitionstheoretische Perspektive.....	35
5 Fazit und Ausblick	37
6 Literaturverzeichnis	38
CRedit Author Statement	48
Anhang	49

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Veränderung der jährlichen Niederschlagsmenge für die Klimaszenarien RCP8.5 und RCP4.5 beim Vergleich von 2071-2100 zu 1971-2000 für das Kernensemble des DWDs	1
Abbildung 2	Veränderung der Niederschlagsmenge im Sommer für die Klimaszenarien RCP8.5 und RCP4.5 beim Vergleich von 2071-2100 zu 1971-2000 für das Kernensemble des DWDs	2
Abbildung 3:	Veränderung der klimatischen Wasserbilanz im Sommer beim Vergleich von 2071-2100 zu 1971-2000 für das Kernensemble des DWDs für das RCP8.5-Szenario.....	3
Abbildung 4:	Verteilung landwirtschaftlicher Betriebe mit der Möglichkeit zur Bewässerung und der mit Bewässerungsinfrastruktur ausgestatteten landwirtschaftlichen Fläche ¹ nach Bundesländern ² in 2019	4
Abbildung 5:	Landwirtschaftliche Fläche mit Möglichkeit zur Bewässerung ¹ in 2009 und 2019 nach Bundesländern ²	4
Abbildung 6:	Umfang der in 2009 bewässerten landwirtschaftlichen Fläche nach Kulturen, ha	5
Abbildung 7:	Konstruktionstypen von Speicherbecken	8
Abbildung 8:	Bewässerungsverfahren in der Landwirtschaft: Stand der Technik	21

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Erkennungsmerkmale oberirdische Speicheroptionen	7
Tabelle 2:	Erkennungsmerkmale unterirdische Speicheroptionen	11
Tabelle 3:	Vergleich verschiedener Ausprägungen von Versickerungsanlagen von ‚sehr hoch‘ (++) bis ‚sehr gering‘ (--)	14
Tabelle 4:	Merkmalsübersicht der verschiedenen technischen Speicheroptionen	15
Tabelle 5:	Technische Eignung und Umsetzbarkeit der in Frage kommender Speicheroptionen als Wasserspeicher in der deutschen Landwirtschaft (sehr gut = ++, sehr schlecht = --).....	20
Tabelle 6:	Vor- und Nachteile Bewässerungsverfahren: Stand der Technik	23
Tabelle 7:	Mehrertrag der Ackerkulturen durch Bewässerung.....	26
Tabelle 8:	Qualitätsmerkmale der Hauptackerkulturen Deutschlands	27
Tabelle 9:	Faktoren, die die Wirtschaftlichkeit beeinflussen und die im Zusammenhang stehenden Risiken	28

Abkürzungsverzeichnis

A	Abfluss
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
DWD	Deutscher Wetterdienst
FAO	Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen
GW	Grundwasser
HRB	Hochwasserrückhaltebecken
HW	Hochwasser
IPCC	Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen
LAWA	Bund/Länder Arbeitsgemeinschaft Wasser
N	Niederschlag
RCP	Repräsentativer Konzentrationspfad (<i>Engl.</i> : Representativ Concentration Pathways)
RRB	Regenrückhaltebecken
SWW	Siedlungswasserwirtschaft
TKG	Tausendkörnergewicht

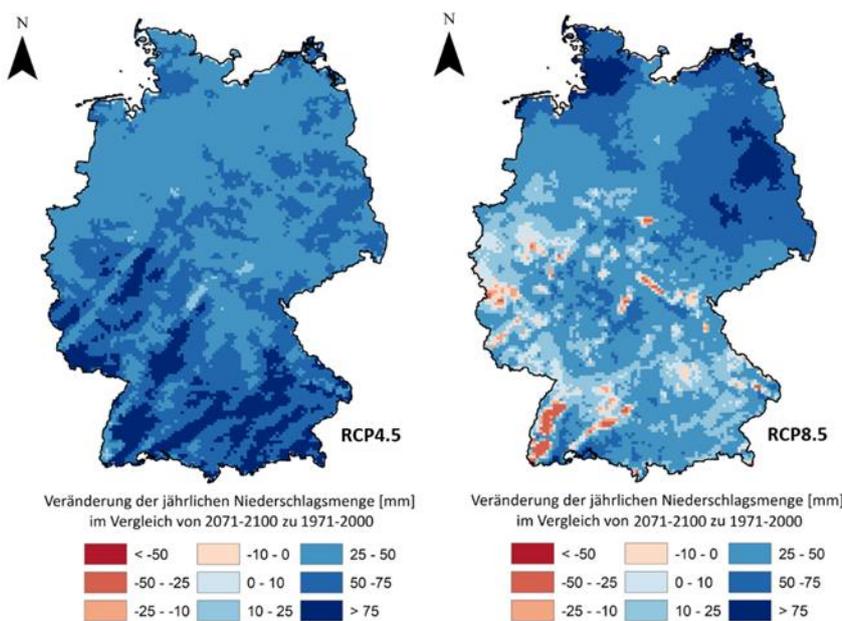
1 Hintergrund

1.1 Wasserbezogene Auswirkungen des Klimawandels

Die Landwirtschaft liefert durch die Produktion von Lebens- und Futtermitteln einen essentiellen Teil für die Ernährungssicherheit der Menschheit. Mit voranschreitendem Klimawandel können sich jedoch für die Nahrungsmittelproduktion entscheidende Umweltfaktoren (Gomez-Zavaglia et al. 2020) verändern. Bis zum Ende dieses Jahrhunderts wird die globale Durchschnittstemperatur unter moderaten Szenarien um 2,1 °C bis 3,5 °C im Vergleich zum vorindustriellen Niveau steigen (IPCC 2021a). Der zu beobachtende Temperaturanstieg führt zu einer Zunahme der Verdunstung und damit zu einem höheren Wasserbedarf der zu kultivierenden Pflanzen. Neben der Temperatur können sich auch Niederschlagsmenge und -muster verändern (Konapala et al. 2020; IPCC 2021). Zusätzlich nimmt die Anzahl an Extremwetterereignissen wie Stürmen, Überflutungen, Dürreperioden und Hitzewellen zu (IPCC 2022; Swain et al. 2020). Auf globaler Ebene haben Kummru et al. (2021) ermittelt, dass bis 2100 die Nahrungsmittelproduktion zunehmend in den Gebieten stattfinden wird, in denen infolge des Klimawandels kein gesicherter Anbau mehr möglich sein wird. Für die Ernährungssicherheit werden daher die Regionen wichtiger, in denen mittels Anpassungsmaßnahmen eine relative Stabilität der Erträge im Kontext des Klimawandels erreicht werden kann oder die klimawandelbedingten Chancen zur Steigerung der Produktivität ausgenutzt werden können.

Der Anstieg der Durchschnittstemperatur, die Änderung des Niederschlagsmusters sowie die Zunahme von Extremwetterereignissen mit negativen Folgen für landwirtschaftliche Erträge sind auch in Deutschland zu erwarten bzw. bereits zu beobachten. Die Entwicklung der Niederschlagshöhe in Deutschland ist mit hoher Unsicherheit verbunden. Laut Klimaprojektionen des Deutschen Wetterdienst (DWD) können die jährlichen Niederschlagsmengen in Deutschland bis Ende des 21. Jahrhunderts sowohl unter dem Klimaszenario „Kein Klimaschutz“ (RCP8.5) als auch unter dem Klimaszenario „Begrenzter Klimaschutz“ (RCP4.5) unverändert bleiben oder sogar zunehmen (siehe Abbildung 1).

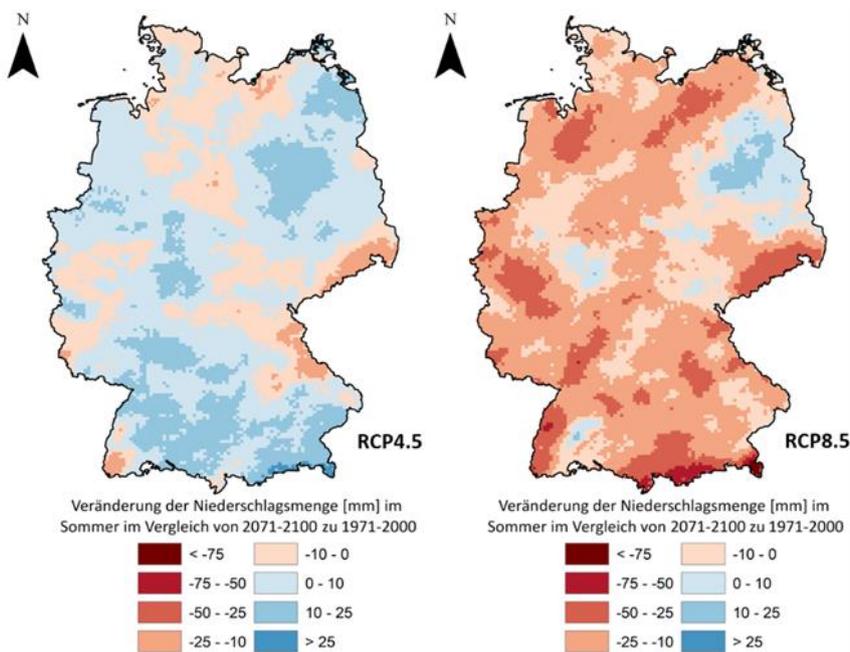
Abbildung 1: Veränderung der jährlichen Niederschlagsmenge für die Klimaszenarien RCP8.5 und RCP4.5 beim Vergleich von 2071-2100 zu 1971-2000 für das Kernensembel des DWDs



Quelle: eigene Darstellung auf der Grundlage von DWD-Daten.

Auch wenn Deutschland ein wasserreiches Land bleibt, nehmen Landbewirtschaftler in einigen Regionen Deutschlands bereits heute zunehmende und aus pflanzenbaulicher Perspektive ungünstige Veränderung des Niederschlagsmusters wahr (Kunz et al. 2017). Laut dem Deutschen Wetterdienst (DWD) kann der Jahresniederschlag in einigen Regionen zunehmen, andere Regionen können dagegen im Durchschnitt niederschlagsärmer werden (DWD 2022). Die zwischenjährliche Umverteilung bezieht sich auf die Wechsel der Jahre mit Hochwasser- und Dürreereignissen. Jahreszeitlich wird der Niederschlag in den Herbst- und Wintermonaten zunehmen. Die Entwicklung des Sommerniederschlags ist weniger eindeutig: im RCP8.5-Szenario ist langfristig mit Niederschlagsmangel im Großteil Deutschlands zu rechnen; im RCP4.5-Szenario kann der Sommerniederschlag regional leicht zu- oder abnehmen (siehe Abbildung 2).

Abbildung 2 Veränderung der Niederschlagsmenge im Sommer für die Klimaszenarien RCP8.5 und RCP4.5 beim Vergleich von 2071-2100 zu 1971-2000 für das Kernensemble des DWDs

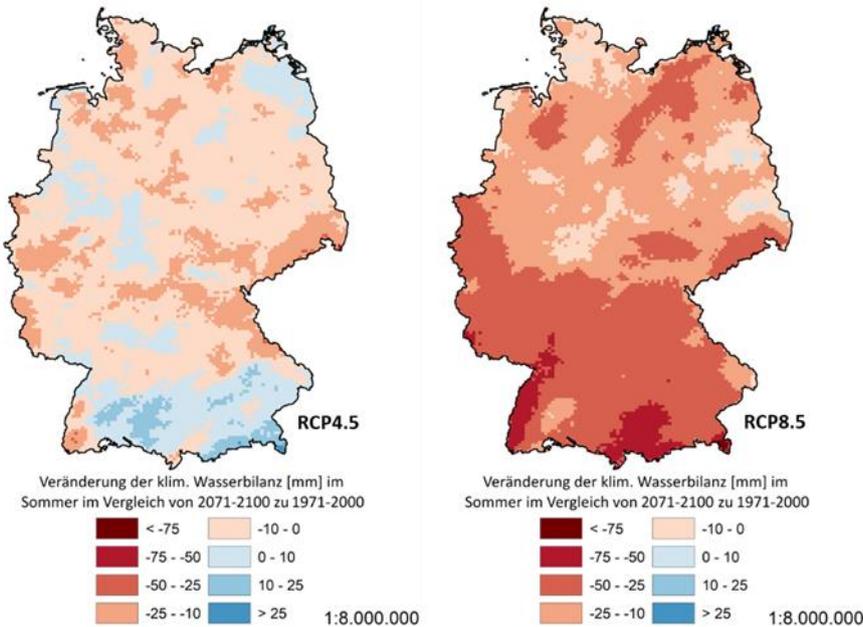


Quelle: eigene Darstellung auf der Grundlage von DWD-Daten.

Der Einfluss des Klimawandels auf Wasserhaushalt und Wasserverfügbarkeit für Kulturpflanzen kann mittels der klimatischen Wasserbilanz ermittelt werden, die als Differenz des Niederschlags und der Grasreferenzverdunstung berechnet wird. Die zunehmende Verdunstung – vor allem in der Vegetationsperiode – infolge der steigenden Temperaturen führt dazu, dass eine großflächige negative Änderung der klimatischen Wasserbilanz erwartet werden kann. Für den Vergleich der Referenzperiode (1971-2000) zur fernen Zukunft (2071-2100) kann eine negative Entwicklung der klimatischen Wasserbilanz im Sommer in vielen Regionen Deutschlands sowohl für das RCP8.5-Szenario als auch für das RCP4.5-Szenario möglich sein (siehe Abbildung 3). Dies impliziert ein erhöhtes Trockenheitsrisiko und einen zunehmenden Wasserbedarf für den Pflanzenbau.

Neben dem Temperaturanstieg und der Änderung des Niederschlagsmusters können zukünftig die wasserbezogenen Extremwetterereignisse – z. B. Starkregen, Hochwasser, Trockenheit und Dürre – in Deutschland öfter und mit höherer Intensivität auftreten. Darunter zeigen vor allem die Frühjahrs- und Sommertrockenheitsereignisse statistisch signifikante negative Ertragseffekte (Söder et al. 2022). Das Ausmaß ihrer möglichen Konsequenzen für den landwirtschaftlichen Sektor Deutschlands ist durch die Dürresommer 2018 und 2019 deutlich geworden.

Abbildung 3: Veränderung der klimatischen Wasserbilanz im Sommer beim Vergleich von 2071-2100 zu 1971-2000 für das Kernensemble des DWDs für das RCP8.5-Szenario.



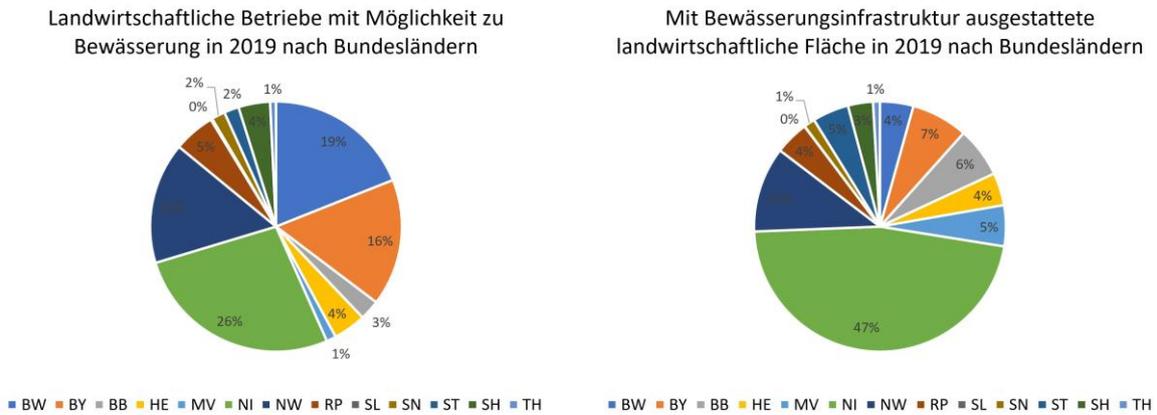
Quelle: eigene Darstellung auf der Grundlage von DWD-Daten. Zur Berechnung der Wasserbilanz wurde die Grasreferenzverdunstung nach FAO verwendet.

Die Vorhersagen zu den zukünftigen klimatischen Veränderungen unterscheiden sich stark je nach Klimaszenario und sind grundsätzlich mit hoher Unsicherheit verbunden. Nichtsdestotrotz ist eine Anpassung des deutschen Pflanzenbaus erforderlich, um den Trockenheits- und Dürreerisiken, welche auch im Fall des moderaten Emissionsszenario 4.5 auftreten können, entgegenzuwirken sowie die Produktivität zu erhalten und zur Ernährungssicherung beizutragen. Unter einer Anpassung versteht man die Reaktion einer Gesellschaft und wirtschaftlicher Akteure auf große Schocks (Zilberman et al. 2012). Im Pflanzenbau stellt die Bewässerung eine der wirksamsten Maßnahmen dar, um die Ertragsverluste infolge der Trockenheits- und Dürreereignisse zu vermeiden oder zu minimieren. Eine der wesentlichen Aspekte dabei ist die Frage, wie die Verfügbarkeit an Bewässerungswasser erhöht werden kann, ohne die Interessenkonflikte um begrenzte Wasserressourcen mit anderen wassernutzenden Sektoren zu verschärfen (LAWA 2022). In Hinsicht auf die sich ändernden Niederschlagsmuster können Wasserspeicher einen Teil der Lösung für die landwirtschaftlichen Betriebe darstellen. Wenn diese z. B. bei den in Herbst- und Wintermonaten zunehmenden Dauerregen- oder Starkregenereignissen gefüllt werden, kann das zwischengespeicherte Wasser bei Frühjahrs- und/oder Sommertrockenheit zur Bewässerung verwendet werden. Neben der Erhöhung der Wasserverfügbarkeit für Bewässerung können durch diese technische Lösung auch die Zuverlässigkeit der Wasserverfügbarkeit für die Betriebe verbessert sowie die Interessenkonflikte um Nutzung von Grund- und Oberflächenwasser entschärft werden.

1.2 Bewässerung in Deutschland

Der bisherige Bewässerungsumfang in Deutschland ist im globalen Vergleich ziemlich niedrig. Laut der letzten Landwirtschaftszählung wurden in 2019 nur 4,2 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche mit Bewässerungsinfrastruktur ausgestattet und 6,8 % der Betriebe hatten die Möglichkeit, einen Teil ihrer Fläche zu bewässern (DESTATIS 2021). Die bewässerte Fläche und die bewässernden Betriebe sind ungleichmäßig über die Bundesländer verteilt (siehe Abbildung 4). Insbesondere sticht das Bundesland Niedersachsen hervor, das über 47% der gesamten Fläche verfügt, die in Deutschland bewässert werden kann.

Abbildung 4: Verteilung landwirtschaftlicher Betriebe mit der Möglichkeit zur Bewässerung und der mit Bewässerungsinfrastruktur ausgestatteten landwirtschaftlichen Fläche¹ nach Bundesländern² in 2019

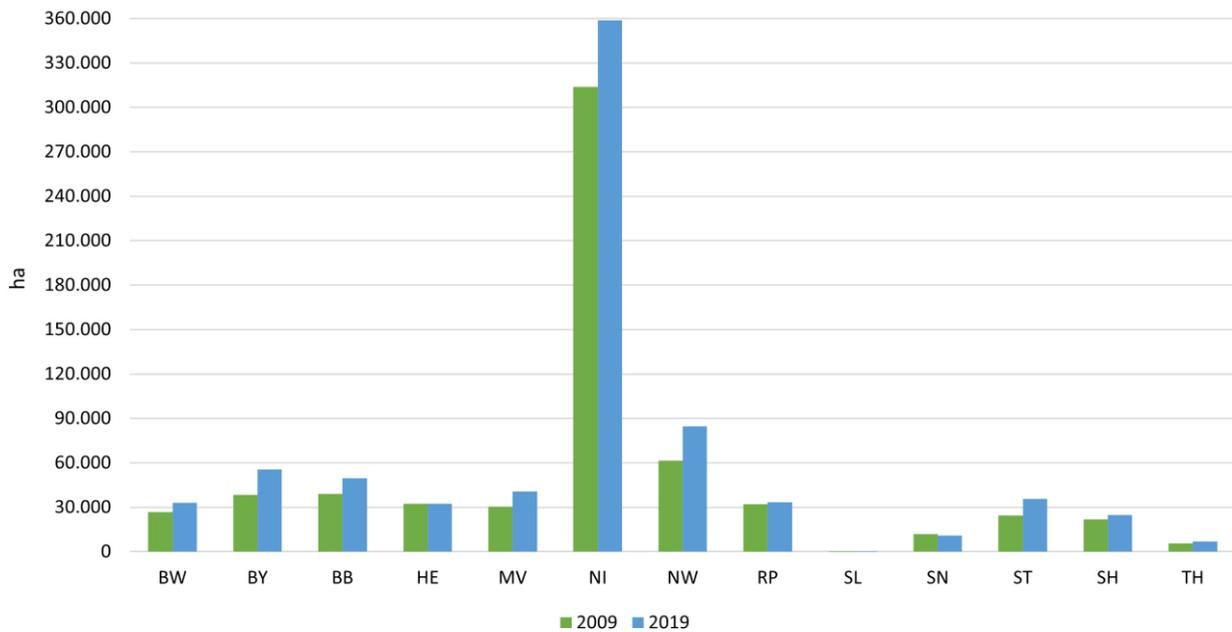


¹ Ohne Frostschutzberegnung sowie ohne Kulturen unter hohen begehbaren Schutzabdeckungen (einschl. Gewächshäuser); ² ohne Bundesländer Berlin, Bremen und Hamburg.

Quelle: DESTATIS (2021).

Der Vergleich von Ergebnissen der Landwirtschaftszählungen 2010 und 2020 weist auf die Zunahme der mit Bewässerungsinfrastruktur ausgestatteten landwirtschaftlichen Fläche in allen Bundesländern außer Sachsen hin (DESTATIS 2011, 2021) (siehe Abbildung 5).

Abbildung 5: Landwirtschaftliche Fläche mit Möglichkeit zur Bewässerung¹ in 2009 und 2019 nach Bundesländern²

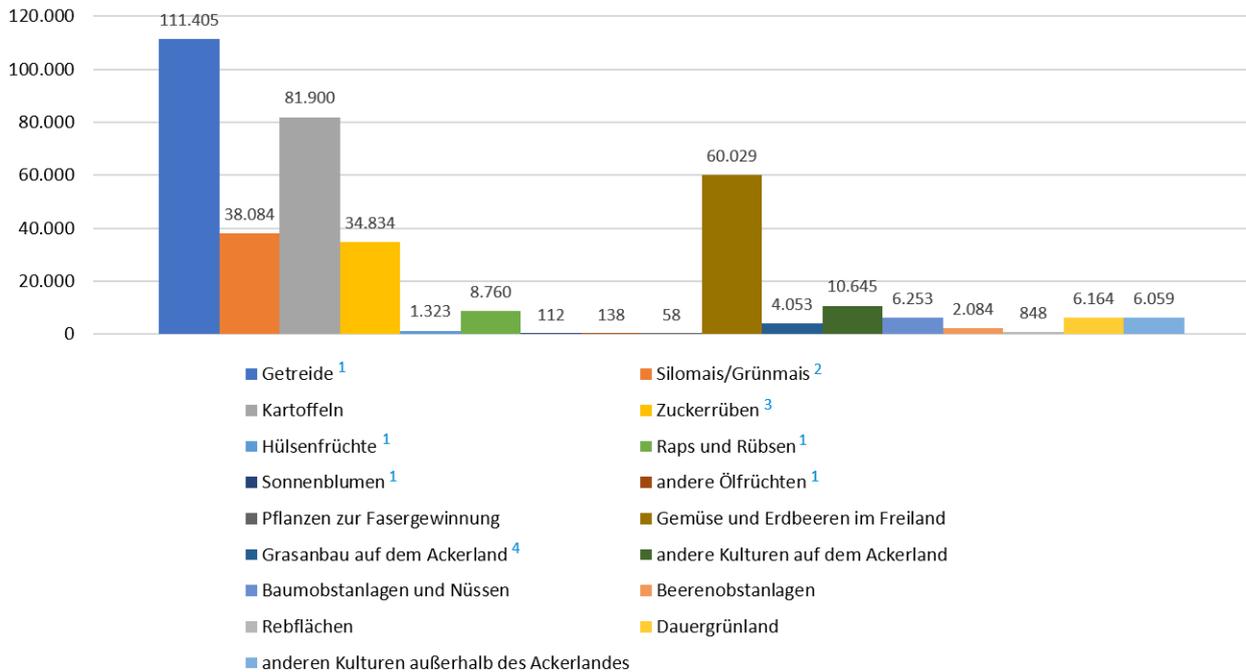


¹ Ohne Frostschutzberegnung sowie ohne Kulturen unter hohen begehbaren Schutzabdeckungen (einschl. Gewächshäuser); ² ohne Bundesländer Berlin, Bremen und Hamburg.

Quelle: DESTATIS (2011, 2021).

Laut DESTATIS (2011) werden deutschlandweit in erster Linie die Freilandflächen für Getreide, Kartoffeln sowie Gemüse und Erdbeeren bewässert (siehe Abbildung 6).

Abbildung 6: Umfang der in 2009 bewässerten landwirtschaftlichen Fläche nach Kulturen¹, ha



¹ einschließlich Saatguterzeugung; ² einschließlich Lieschkolbenschrot; ³ ohne Saatguterzeugung; ⁴ einschließlich Mischungen mit überwiegendem Grasanteil.

Quelle: DESTATIS (2011, 2021).

Bewässerung von Getreide, Silomais und Zuckerrüben ist überwiegend in Niedersachsen zu beobachten und ist in anderen Bundesländern nicht verbreitet. Es ist anzunehmen, dass die Auswahl der Kulturen, die zu bewässern sind, in erster Linie durch die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens bestimmt wird (siehe Kapitel 3.2). Für die Jahre nach 2010 fehlen die Informationen zu den bewässerten Kulturen. Es ist aber anzunehmen, dass die Zunahme der landwirtschaftlichen Fläche mit Möglichkeit zur Bewässerung im Zeitraum 2009-2019 für die bewässerungswürdigen Kulturen (Kartoffeln, Gemüse, Erdbeeren) erfolgte.

1.3 Ziele und Ansatz des Working Papers

Dieses Working Paper hat das Ziel, den Forschungsbedarf im Bereich landwirtschaftliches Wassermanagement zu ermitteln und die Orientierung für das Verbundprojekt LAWAMAD – Landwirtschaftliches Wassermanagement in Deutschland zu geben.

Auf der Grundlage einer ausführlichen Literaturrecherche:

- (1) geben wir im Kapitel 2 einen umfassenden Überblick über die vorhandenen technischen Optionen der Wasserspeicherung sowie über die Kriterien, welche bei ihrer Auswahl eine Rolle spielen. Anschließend wird die Umsetzbarkeit dieser Optionen für die deutsche Landwirtschaft bewertet.
- (2) bieten wir im Kapitel 3 eine Übersicht über die verfügbaren Bewässerungsverfahren und ihre Vor- und Nachteile sowie über die Chancen und Risiken der Bewässerung in Deutschland aus agronomischer und wirtschaftlicher Perspektive, da die Auswahl von Wasserspeicherungsoption sowie die Entscheidung bzgl.

ihrer technischen Ausführung im Zusammenhang mit vorhandenen oder geplanten Bewässerungsverfahren sowie mit den betrieblichen Strategien zur Bewässerungsoptimierung stehen.

- (3) skizzieren wir im Kapitel 4 den aktuellen Stand der wissenschaftlichen Diskussion zu den Barrieren für die betrieblichen Investitionen in Bewässerungs- und Wasserspeicherungstechnologien aus drei theoretischen Perspektiven.

Anhand dieser Literaturübersicht wird im Kapitel 5 der zukünftige Forschungsbedarf abgeleitet.

2 Technische Optionen zur Speicherung von Wasser

Die verschiedenen Verfahren und Anlagentypen zur Wasserspeicherung können in oberirdische (Kapitel 2.1) und unterirdische Optionen (Kapitel 2.2) unterteilt werden. Existente Speicheroptionen, die von vornherein für die deutsche Landwirtschaft ausgeschlossen werden können, sind der Vollständigkeit halber im Anhang 1 aufgeführt.

2.1 Oberirdische Speicheroptionen

Die verschiedenen oberirdischen Speicheroptionen und ihre Erkennungsmerkmale sind in Tabelle 1 aufgeführt. Eine weitere ausführliche Beschreibung der einzelnen Optionen ist in den nachfolgenden Abschnitten geben.

Tabelle 1: Erkennungsmerkmale oberirdische Speicheroptionen

Oberirdische Speicheroptionen	Wasserspeicherung		Wasserherkunft	Lage		Hauptfunktion
	Primär	Sekundär		zentral	dezentral	
Speicherbecken	x		N,A,GW	x	x	Speicherung
Talsperre	x		A	x		Speicherung
Himmelsteich	x		N,GW		x	Speicherung
Wasserturm	x		SWW	x		Speicherung
Tank	x		N		x	Speicherung
Regenrückhaltebecken		x	N		x	N-Retention
Hochwasserrückhaltebecken		x	A	x		HW-Schutz
Hochwasserpolder		x	A		x	HW-Schutz

N=Niederschlag, A=Abfluss, GW=Grundwasser, SWW=Siedlungswasserwirtschaft, HW=Hochwasser

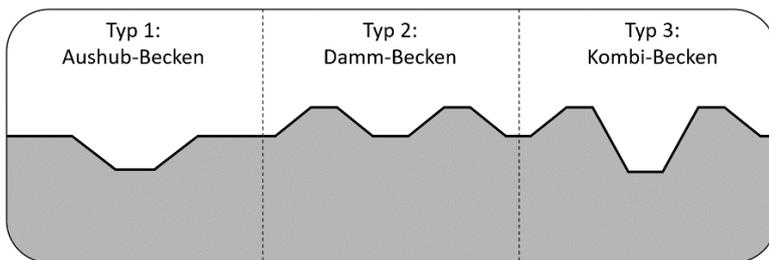
Quelle: eigene Darstellung.

Speicherbecken

Speicherbecken sind künstlich angelegte Becken mit dem primären Ziel der Wasserspeicherung über einen längeren Zeitraum. Sie existieren in verschiedenen Größen und Formen. Das gespeicherte Wasser kann aus verschiedenen Quellen stammen. Mögliche Herkünfte sind gesammeltes Regenwasser, umgeleitetes Oberflächenwasser oder gefördertes Grundwasser. Die meisten Speicherbecken sind Erd-, Folien-, Asphalt- oder Betonbecken. Genutzt werden Speicherbecken überall dort, wo viel Wasser benötigt wird, aber der natürliche Wasserspeicher nicht zur Überbrückung trockener Phasen ausreicht. Auch finden Speicherbecken Anwendung in Bereichen, in denen Abwasser anfällt und zwischengespeichert werden muss. Einsatzorte sind daher hauptsächlich die Industrie, Landwirtschaft und der Energiesektor (Flögl 2012). In der Landwirtschaft werden sie unter anderem als Wasserspeicher für die Bewässerung in Trockenperioden und für die Frostberegnung verwendet.

Es existieren drei verschiedene Konstruktionstypen von Speicherbecken (siehe Abbildung 2). Typ 1 beschreibt Becken, für die ein Aushub erfolgen muss. Dabei fallen große Mengen an Erde an, die beseitigt werden müssen. Bei Böden mit einer hohen Wasserleitfähigkeit muss das Becken z. B. mit Folie ausgelegt werden, um die Versickerung zu minimieren. Für Typ 2 werden Dämme oberflächlich errichtet und somit ein Becken erzeugt. Dieser Typ eignet sich an Standorten, an denen im Untergrund bodennah Festgestein ansteht und das Ausheben eines Beckens daher aufwändig ist. Typ 3 kombiniert beide Ansätze (combination storage). Hier wird die ausgehobene Erde als Wall aufgeschüttet. Dieser Konstruktionstyp erweist sich in der Umsetzung und Nutzung am effizientesten (Shortt et al. 2016).

Abbildung 7: Konstruktionstypen von Speicherbecken



Quelle: nach Shortt et al. (2016).

Neben dem Konstruktionstyp ist für den Bau von Speicherbecken auch die Lage und Größe von Bedeutung. Bezüglich der Lage gibt es zwei Möglichkeiten. Der Bau des Speicherbeckens erfolgt in der Nähe der Wasserquelle. Das Wasser kann dadurch direkt gespeichert werden, muss aber über längere Wege zur bewässerten Fläche gepumpt/transportiert werden. Alternativ kann der Bau des Beckens an der beabsichtigten Einsatzstelle erfolgen, wodurch kurze Wege für die spätere Nutzung des Wassers entstehen. Hierbei entsteht der Aufwand bei der Füllung des Speicherbeckens. Die Speichergröße ist von mehreren Faktoren abhängig, u. a. die Fläche der zu bewässernden Kulturen, die Kulturart, die Häufigkeit der Bewässerung und wie oft der Speicher wieder aufgefüllt werden kann.

Probleme der Wasserspeicherung in Speicherbecken sind Wasserverluste durch Verdunstung (Evaporation) und die Versickerung von Wasser (Martínez-Granados et al. 2011). Gegen die Versickerung von Wasser hilft eine gute Abdichtung des Beckens. Dies kann durch undurchlässige Folien oder Böden mit hohen Tonanteilen, welche geringe Infiltrationsraten aufweisen, erreicht werden. Um der Evaporation entgegen zu wirken, kann auf natürliche Maßnahmen wie eine Bedeckung durch Seerosen oder künstliche Methoden wie schwarze Kugeln zurückgegriffen werden. Eine weitere Möglichkeit der Verdunstungsminimierung ist die Installation von schwimmenden Photovoltaik-Anlagen. Neben der Reduktion der Verdunstungsrate spielt hierbei die Energiegewinnung eine zusätzliche Rolle. In naturnahen Speicherbecken sollte die Gewässergüte beobachtet werden, um eine Eutrophierung des Gewässers zu verhindern. Auch ein starker Sedimenteintrag durch Oberflächenabfluss und ein damit zusammenhängendes Abnehmen des Speichervolumens kann ein Problem darstellen.

Talsperren

Talsperren sind die größten künstlichen Wasserspeicher der Welt. Ihre Hauptaufgabe ist die Wasserspeicherung zur Trinkwasser- und Energiegewinnung, der Hochwasserschutz stellt eine untergeordnete Aufgabe dar. Gleichzeitig können diese Anlagen auch als Naherholungsgebiete dienen. Durch ein großes Sperrbauwerk in einem Tal wird Wasser eines durchfließenden Flusses im gesamten Tal angestaut.

Die Stauanlagen können Wasser auch über einen längeren Zeitraum speichern, gleichzeitig aber z. B. den Hochwasserschutz aufrechterhalten. Dadurch ist ein überjähriger Wasserausgleich möglich. Ein optimierter

Bewirtschaftungsplan ist wichtig, um Risiken durch Hochwasser zu minimieren, gleichzeitig jedoch ausreichend Wassermengen zu speichern.

Himmelsteich

Himmelsteiche sind Wasserspeicher, die nicht durch Oberflächenwasser gespeist werden, sondern nur über Niederschlags- und Grundwasser (TLUBN 2007). Sie besitzen daher keine stetige Wasserversorgung (Ballmann et al. 2017). Himmelsteiche stehen im Ausgleich zwischen Niederschlags- bzw. Grundwasserzufluss und Verdunstung. In trockenen Phasen können sie schnell an Stauhöhe verlieren und trocken fallen (ANL 1995). Der Wasserstand kann also jahreszeitlich stark variieren. Aus diesem Grund stellen Himmelsteiche keine zuverlässigen Wasserspeicher dar. Auf künstliche Weise entstehen Himmelsteiche z. B. durch die Ansammlung von Wasser in ehemaligen Kiesgruben oder Tagebaue. Genutzt werden sie z. B. zur Fischezucht von Jungfischen oder als Viehtränken in der Landwirtschaft.

Wasserturm

Wassertürme sind Hochbehälter zur Speicherung von Wasser. Historisch stellen sie eine der ersten Formen der städtischen Wasserversorgung da (Schmidt 2019). Mit Hilfe von Pumpen wird Wasser über mehrere Meter in die Höhe gepumpt und im Turm gespeichert. Durch die potenzielle Energie des gespeicherten Wassers kann dieses ohne zusätzlichen Energieaufwand aus dem Behälter ins Versorgungsnetz gespeist werden. Aufgrund der verbrauchernahen Lage ergeben sich geringe Energieverluste und dementsprechend günstige Druckverhältnisse (Gujer 2002). Damit sind Wassertürme häufig ein wichtiger Bestandteil der Siedlungswasserwirtschaft. Aufgrund der vertikalen Speicherdimensionierung kann die Grundfläche schmal gehalten werden. Dadurch eignet sich diese Art der Wasserspeicherung auch in Lagen, in denen topographisch bedingt, Speicher mit einer großen Grundfläche keinen Platz finden (Gujer 2002).

Tanks

Tanks sind Behältnisse, in denen eine direkte Wasserspeicherung erfolgt. Sie können aus unterschiedlichen Materialien bestehen und verschiedener Größe sein. Es existieren mobile Varianten wie Blasen- oder Falttanks sowie stationäre Tanks aus Stahl, Wellblech oder Kunststoff. Ein großer Vorteil der Wasserspeicherung in geschlossenen Behältnissen wie Tanks ist die geringe Verdunstungsrate. Durch die Abschirmung des Wassers vor jeglichen Umwelteinflüssen kann diese minimiert werden. So verändert sich auch in trockenen Perioden die Menge des gespeicherten Wassers nicht. Tanks können als dezentrale oder zentrale Speicheroption verwendet werden.

Besonders häufig ist der Einsatz von Tanks zur Regenwasserspeicherung (*Engl.*: rainwater harvesting) (Campisano und Modica 2012). Dabei wird der Niederschlagsabfluss von Oberflächen (meist Dächern) aufgefangen und gespeichert. Das Tankvolumen ist variabel und kann von einer Regentonne im Garten bis hin zu großen Tanks reichen, die das Niederschlagswasser von mehreren Scheunen- oder Hallendächern speichern. In der Landwirtschaft ist das Sammeln von Niederschlagswasser vor allem im Gewächshausanbau zu finden (Singh et al. 2019). Die großen Dächer der Gewächshäuser bilden eine ideale Fläche zum Auffangen und Sammeln von Niederschlag.

Regenrückhaltebecken

Regenrückhaltebecken (RRB) dienen der Zwischenspeicherung und gedrosselten Abgabe von Wasser nach Niederschlagsereignissen. Ziel ist die Minderung von Abflussspitzen und die damit verbundene Minderung des

Hochwasserrisikos (LLUR 2012). RRB bestehen aus einem Retentionsbecken (Speichervolumen) und einer Drosseleinrichtung (Auslauf). Der Regenabfluss wird ungedrosselt in das RRB geleitet. Aufgrund des geringeren Ausflusses aus dem Becken (gesteuert durch die Drosseleinheit) wird das Wasser im Becken gestaut (LFU 2005). Zuflüsse in RRB sind z. B. Entwässerungsgräben, ablaufendes Niederschlagswasser von versiegelnden Flächen sowie oberflächiger Abfluss. Die Speicherdauer des gestauten Wassers richtet sich nach Volumen des Beckens und Steuerung der Drosseleinrichtung.

RRB können sowohl mit Dauerstau als auch mit temporärem Einstau betrieben werden. Das generelle Bestreben ist die schnelle Entleerung des Speicherraums, damit beim nächsten Niederschlagsereignis wieder ausreichend Wasser zurückgehalten werden kann. Die Bauart von RRB ist sehr unterschiedlich und reicht von Betonbecken zu naturnahen Teichen (LLUR 2012). Die Bemessung von Regenrückhalteanlagen erfolgt z. B. nach DWA-A 117 „Bemessung von Regenrückhalteanlagen“. Häufig sind RRB in Wohngebieten und an Autobahnausfahrten zu finden. Da sie nicht zur Behandlung des Niederschlags dienen, benötigen sie laut Wasserhaushaltsgesetz keine Genehmigung.

Eine besondere Form der RRB sind Regenklärbecken (LLUR 2012). Neben der Retention von Wasser stellt der Rückhalt von Schmutzstoffen durch Absetzen eine weitere Aufgabe dar, damit diese nicht in den Vorfluter gelangen.

Hochwasserrückhaltebecken

Hochwasserrückhaltebecken (HRB) verfolgen ebenfalls das Ziel der Verringerung von Abflussspitzen zum Schutz vor Hochwasser im Unterlauf (Maniak 2010). HRB befinden sich im Vergleich zu RRB direkt im Fließgewässerlauf. Dabei wird eine naturnahe Gestaltung des Speicherraums angestrebt. Bei Hochwasser wird über ein Sperrbauwerk im Fließgewässer der Abfluss gedrosselt und dadurch das Wasser gestaut. Das führt zu einem Anstieg des Wasserstands im HRB oder einer bewussten Überflutung von Wiesen, Auen und landwirtschaftlichen Flächen. Das Speichervolumen kann bei diesen Anlagen sehr groß sein. Die Speicherdauer fällt dagegen eher kurz aus. Überflutete Flächen sollen so schnell wie möglich wieder trockengelegt werden, damit diese wieder bewirtschaftet werden können. Außerdem muss der Retentionsraum für das nächste Hochwasserereignis wieder freigegeben werden (LUBW 2007).

Hochwasserpolder

Hochwasserpolder sind eingedeichte Retentionsräume oder Becken in der Nähe von Fließgewässern, die bei Hochwasser geflutet werden (Geller und Hupfer 2012). Kommt es nach Niederschlagsereignissen zu einem Überschreiten festgelegter Abflussgrenzwerte, wird Wasser in die Polder eingeleitet, um den Hochwasserscheitel der Flutwelle zu kappen (Patt und Jüpner 2020). Bei den Retentionsräumen kann es sich z. B. um eingedeichte Becken oder Landschaftsausschnitte handeln, deren Flutung im Hochwasserfall akzeptabel ist. Über Ein- und Auslaufbauwerke werden Zu- und Abfluss in den Polder reguliert. Der Wasserstand kann also bewusst reguliert werden (ähnlich wie bei HRB). Der Unterschied besteht in der aktiven Umleitung des Wassers aus dem Fließgewässer in den Polder.

Das Wasser in den Poldern kann über mehrere Tage bis Wochen gespeichert werden. Da es sich aber auch um eine Maßnahme des Hochwasserschutzes handelt, ist das Ziel, den Retentionsraum so schnell wie möglich wieder zu leeren. Das gilt vor allem dann, wenn als Retentionsraum Agrarflächen überflutet wurden.

2.2 Unterirdische Speicheroptionen

Die verschiedenen unterirdischen Speicheroptionen und ihre Erkennungsmerkmale sind in Tabelle 2 aufgeführt. Eine weitere ausführliche Beschreibung der einzelnen Optionen ist in den nachfolgenden Abschnitten geben

Tabelle 2: Erkennungsmerkmale unterirdische Speicheroptionen

Unterirdische Speicheroptionen	Wasserspeicherung		Wasserherkunft	Lage		Hauptfunktion
	Primär	Sekundär		zentral	dezentral	
Zisternen	x		N	x	x	Speicherung
Regenrückhaltebecken		x	N	x		N-Retention
Regenüberlaufbecken		x	SWW		x	N-Retention

N=Niederschlag, SWW=Siedlungswasserwirtschaft

Quelle: eigene Darstellung.

Zisternen und Tanks

Zisternen sind unterirdische Speicherbehälter und Tanks mit einer langen Historie. So wurden z. B. schon in der Stein- und Bronzezeit erste Zisternen erbaut und auch im Römischen Reich wurden viele Zisternen zur Speicherung von Süßwasser errichtet. Hauptsächlich wird Regenwasser in Zisternen gesammelt (Anwendung beim rainwater harvesting). Sie können aus unterschiedlichen Materialien bestehen und verschiedene Speichervolumina aufweisen. Da das Wasser unterirdisch gespeichert wird, ist es vor Evaporation geschützt. Vorzufinden sind Zisternen in Regionen mit schwer zugänglichen Wasserreserven, in denen unregelmäßige Niederschläge auftreten und Trockenperioden überstanden werden müssen. Hier kann Grundwasser nur schwer gefördert werden. Wasser muss daher über einen alternativen Weg gespeichert und verfügbar gemacht werden.

Regenrückhaltebecken

Regenrückhaltebecken (RRB) werden in Städten auch unterirdisch errichtet, um Platz zu sparen. Es handelt sich dabei um große Kammern oder Räume, die bei Niederschlag geflutet werden (Eichinger und Schwarz 2005). Vor allem in Bereichen mit hohem Versiegelungsgrad ist diese Art der RRB wichtig, um große Wassermengen zwischenspeichern. Während die Kammern geflutet werden, wird die vorhandene Luft über Lüftungsschächte an die Erdoberfläche geleitet, damit kein Überdruck in den Kammern entsteht. Nach Niederschlagsereignissen ist wie bei oberirdischen RRB eine schnelle Leerung des Stauraums wichtig, um wieder Speicherplatz für nachfolgende Niederschlagsereignisse zu schaffen.

Regenüberlaufbecken

Ein Regenüberlaufbecken ist ein Kanalisationsbauwerk zur Zwischenspeicherung von Wasser bei Niederschlagsereignissen. Es kann als kleines unterirdisches RRB betrachtet werden und erfüllt die gleichen Funktionen. Der Zufluss ins Regenüberlaufbecken kommt aus dem Kanalnetz und wird über eine Drosseleinheit aus dem Becken geleitet. Da der Zufluss bei Niederschlagsereignissen größer ist als der Abfluss erfolgt ein Einstau. Ist das Speichervolumen des Überlaufbeckens ausgeschöpft, wird zuströmendes Wasser über einen Überlauf in den Vorfluter geleitet. Da das gespeicherte Wasser aus der Kanalisation stammt, ist die Wasserqualität für die

spätere Nutzung entscheidend. Bei Mischsystemen, wie sie häufig in Deutschland zu finden sind, wird Braunwasser zwischengespeichert. Aufgrund der Qualität des Braunwassers kann dieses z. B. nicht als Bewässerungswasser in der Landwirtschaft genutzt werden.

Eine besondere Form des Regenüberlaufbeckens ist der Stauraumkanal (Amiblu 2023). Das Prinzip ist ähnlich zum Regenüberlaufbecken, jedoch gibt es kein gesondertes Überlaufbecken, in dem das Wasser zwischengespeichert wird. Stattdessen wird ein Rohr mit größerem Durchmesser eingebaut, welches als Speicherraum genutzt wird. Der Wasserstau findet also direkt im Rohr statt.

2.3 Boden und Grundwasser als natürlicher Speicher

Der Boden als Gesamtheit aus ungesättigter und gesättigter Zone (Grundwasser) ist der größte natürliche Wasserspeicher der Welt. Ein Ansatz aus technischer Sicht ist daher, den Boden zur Speicherung von Wasser für die Bewässerung in der Landwirtschaft zu verwenden. Durch verschiedene Typen von Versickerungsanlagen und Methoden kann der Bodenwasserhaushalt positiv beeinflusst werden. Dadurch steht den Pflanzen im Boden mehr Wasser zur Verfügung und eine Bewässerung muss erst nach längeren Trockenperioden erfolgen. Auch kann sich eine Erhöhung des Bodenwasserhaushalts positiv auf die Grundwasserneubildung auswirken. Eine erhöhte Grundwasserneubildungsrate kann zu einer erhöhten Grundwasserentnahme für die Bewässerung führen.

Bei Starkregenereignissen kann eine schnelle Sättigung des Oberbodens oder ein Infiltrationsstau einsetzen, in beiden Fällen kommt es zu Oberflächenabfluss. Das Zufließen dieses Oberflächenabflusses in das Fließgewässer gilt es zu unterbinden, eine zeitverzögerte Infiltration in den Boden und somit dem Grundwasser ist anzustreben. Dafür existiert eine Vielzahl an Verfahren und Anlagen.

Grabenstauverfahren

Beim Grabenstauverfahren werden Gräben (z. B. Entwässerungsgräben) entlang der Agrarfläche eingestaut (Vischer und Huber 1993). Dafür wird je nach Größe des Grabens ein kleines Wehr oder Schütz eingebaut. Bei Niederschlagsereignissen fließt das überschüssige Wasser von der Agrarfläche in den Graben und wird gestaut. Der Wasserstau erfolgt dabei ausschließlich im Graben. Das gestaute Wasser wird gespeichert und infiltriert zeitverzögert in das Grundwasser. Das Grabenstauverfahren eignet sich besonders gut im flachen Gelände bei einem nahen Grundwasserspiegel (Vischer und Huber 1993). Falls der Graben die Speicherung einer großen Wassermenge ermöglicht und die Infiltrationsrate des Bodens gering ist, kann eine Bewässerung direkt aus dem Bewässerungsgraben erfolgen. In diesem Fall fungiert der Graben als Speicheranlage.

Versickerungsanlagen

Für die Versickerung von Wasser haben sich verschiedene Anlagentypen durchgesetzt (siehe Tabelle 3). Eine Vielzahl stammt aus dem urbanen Bereich und dient der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung. Aufgrund des hohen Versiegelungsgrades in städtischen Bereichen ist die Versickerung von Niederschlagswasser ein wichtiges Werkzeug der Regenwasserbewirtschaftung. Im Folgenden werden die verschiedenen Ausprägungen der Versickerungsanlagen kurz beschrieben.

Infiltrationsgräben / Sickerschlitzzgräben

Infiltrationsgräben werden häufig im urbanen Raum eingesetzt, um Niederschlagswasser aufzufangen (Chahar et al. 2012). Es handelt sich dabei um mit Kies oder Steinen gefüllte Gräben, welche den Regenabfluss speichern können. Das Wasser versickert langsam in den Boden, der Infiltrationsgraben wird geleert und das Grundwasser

angereichert. Bei einer Nutzung dieses Systems in der Landwirtschaft ist darauf zu achten, dass Schluff- und Tonpartikel sich über längere Zeit im Infiltrationsgraben absetzen können und dieser somit an Speichervolumen verliert (susdrain). In einem vorgeschalteten Sedimentationsbecken oder Ackerrandstreifen müssen diese Partikel also zunächst aus dem Oberflächenabfluss entfernt werden.

Rigolenversickerung

Die Rigolenversickerung verfolgt eine ähnliche Herangehensweise wie die Infiltrationsgräben. Allerdings befindet sich der Speicherkörper, welcher ebenfalls mit Kies und Steinen gefüllt ist, unterhalb der Erdoberfläche. Das Niederschlagswasser wird durch ein Rohr dem Rigolenkörper zugeführt (Eichinger und Schwarz 2005). Anwendung findet die Rigolenversickerung bei Böden mit geringen Infiltrationsraten und einem geringen Platzangebot für Retentionsanlagen.

Schachtversickerung

Bei der Schachtversickerung wird das Niederschlagswasser in einem Schacht gesammelt und zunächst gespeichert. Über die Wände und den Boden versickert das Wasser anschließend langsam in den Boden und reichert hier das Grundwasser an. Um die Infiltrationsrate zu erhöhen ist der Schacht von außen mit Kies umgeben. Schachtversickerungsanlagen sind auch in Kombination mit Rigolen zu finden (Schacht-Rigolenversickerung) (DWA 2005).

Muldenversickerung

Bei der Muldenversickerung wird überschüssiger Niederschlag in eine meist begrünte Mulde zur Versickerung geleitet (Eichinger und Schwarz 2005). Die Größe der Mulde ist abhängig von der verfügbaren Fläche, des angestrebten Speichervolumens und der Infiltrationsrate des Bodens. Bei Trockenheit fällt die Mulde trocken. Die maximale Einstauhöhe sollte 30 cm betragen. Das Wasser sollte nach wenigen Tagen komplett versickert sein (DWA 2005).

Ein besonderer Fall ist die Mulden-Rigolen-Versickerung, die häufig Anwendung findet. Bei dieser Variante wird unter der Mulde eine Rigole installiert. Dadurch versickert das Wasser aus der Mulde zunächst in die Rigole und wird dadurch zusätzlich gereinigt. Gleichzeitig erhöht sich das Speichervolumen und es kann mehr Wasser zurückgehalten werden. Vor allem im urbanen Bereich wird dieses System häufig verwendet (DWA 2005).

Beckenversickerung

Die Beckenversickerung stellt die zentrale Form der Muldenversickerung da. Prinzipiell sind beide Verfahren identisch. Oberflächenwasser wird in einem Becken gespeichert und versickert anschließend in den Untergrund (LAU 2005). Im Idealfall befindet sich unter dem Versickerungsbecken eine Kiesschicht, um die Infiltrationsrate zu erhöhen. Das Volumen eines Versickerungsbeckens ist deutlich größer als das einer Mulde. Die Einstauhöhe im Versickerungsbecken ist meistens größer als 0,5 m.

Rohrversickerung

Bei der Rohrversickerung wird das Wasser durch perforierte, in einem Kiesbett liegende Rohre geleitet. Dadurch ist eine freie Infiltration des Wasser in den Untergrund möglich (DWA 2005). Um das Speichervolumen zu vergrößern, wird die Rohrversickerung oftmals in Kombination mit Rigolen als Rohr-Rigolen-Versickerung verwendet.

Flächenversickerung

Bei der Flächenversickerung wird Wasser von versiegelten Flächen zur Versickerung auf eine Fläche geleitet (Eichinger und Schwarz 2005). Im urbanen Bereich sind das meistens Grünanlagen und Rasenflächen. Aber auch in der Landwirtschaft kommt die Flächenversickerung zum Einsatz, z. B. wenn überschüssiges Wasser auf Feldern zur Anregung der Grundwasserneubildung verregnet wird.

Weitere Informationen zu den einzelnen Versickerungsverfahren und die Dimensionierung der Anlagen finden sich im DWA Arbeitsblatt 138 wieder (DWA 2005). Zur Übersicht sind in Tabelle 3 die verschiedenen Ausprägungen der Versickerungsanlagen zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 3: Vergleich verschiedener Ausprägungen von Versickerungsanlagen von ‚sehr hoch‘ (++) bis ‚sehr gering‘ (--)

Versickerungsanlage	kf-Wert Oberfläche	Filterwirkung	Flächenbedarf	Aufwand/Kosten
Infiltrationsgräben	-	-	+	+
Rigolenversickerung	-	-	+/-	+
Schachtversickerung	+/-	--	--	++
Muldenversickerung	+	++	+	-
Beckenversickerung	+	++	++	+
Rohrversickerung	-	--	-	+
Flächenversickerung	++	++	++	--

Quelle: eigene Darstellung nach (Geiger und Dreiseitl 1995).

Grundwasserstaudamm

Grundwasserstaudämme (*Engl.*: sub surface dams) sind technische Bauwerke zum Aufstauen des Grundwassers. Sie heben den Grundwasserspiegel oberstrom an und erhöhen damit das Speichervolumen des Aquifers (Raju et al. 2006). Gestaut werden kann nur oberflächennahes Grundwasser. Die Konstruktionstypen sind Spundwände aus Stahl, Beton oder Erdwälle. Sobald die hydraulische Leitfähigkeit des Damms geringer ist als die des Grundwasserleiters, wird Wasser gestaut. Das gestaute Wasser kann z. B. für die Bewässerung in der Landwirtschaft verwendet werden.

2.4 Umsetzbarkeit der Wasserspeicheroptionen für die deutsche Landwirtschaft

2.4.1 Merkmale der Speicheroptionen aus naturräumlicher und technischer Sicht

Die Merkmale der technischen Speicheroptionen sind in Tabelle 4 aufgeführt. Die verschiedenen Versickerungsanlagen und Methoden wurden für eine bessere Übersicht teilweise zusammengefasst. Zunächst werden die Speicheroptionen auf ihre naturräumlichen Merkmale bewertet. Dazu zählt der Platzbedarf der einzelnen Anlagen und wie flach bzw. steil das Gelände sein muss, damit diese umgesetzt werden können. Einige Optionen lassen sich nur in flachem oder steilem Gelände gut verwirklichen (z. B. Hochwasserpolder).

Tabelle 4: Merkmalsübersicht der verschiedenen technischen Speicheroptionen

Speicheroptionen	Gelände ¹		Platzbedarf ²			Speicherdauer ³			Speichervolumen ⁴			Ø-Kosten im Vergleich ⁵		
	flach	steil	groß	mittel	klein	lang	mittel	kurz	hoch	mittel	gering	teuer	mittel	günstig
Speicherbecken	X	X	X	X	X	X	(X)		X				X	
Talsperre	X	X	X	X		X			X			X		
Himmelsteich	X				X		(X)	X		X				X
Wasserturm	X	X			X	X			X				X	
Tank	X	X			X	X			X		X			X
Regenrückhaltebecken	(X)	X		(X)	X			X	X				X	
Hochwasserrückhaltebecken	X	X		X	(X)			X	X				X	
Hochwasserpolder	X		X	X	X			X	X				X	
Zisternen	X				X	X				X			X	
Regenrückhaltebecken	X				X			X	X				X	
Regenüberlaufbecken	X				X			X	X				X	
Grabenstauverfahren	X				X			X		X				X
Rigolen/Infiltrationsgraben	X				X			X			(X)		X	
Mulden-/Beckenversickerung	X			(X)	X			X		X			X	
Schacht-/Rohnversickerung	X				X			X		X			X	
Grundwasserstaudamm	X	X			X			X	X					X

¹ flach = Gefälle < 5 %, steil = Gefälle > 5 %

² groß = Fläche > 100.000 m², mittel = Fläche 1000 bis 100.000 m², klein = Fläche < 1000 m²

³ lang = mehrere Monate, mittel = Wochen bis wenige Monate, kurz = Tage bis wenige Wochen

⁴ hoch = Volumen > 250.000 m³, mittel = Volumen 1500 bis 250.000 m³, gering = Volumen < 1500 m³

⁵ teuer = Kosten > 1.000.000 €, mittel = Kosten 100.000 bis 1.000.000 €, günstig = Kosten < 100.000

Quelle: eigene Darstellung.

Tanks und Wassertürme hingegen sind geländeunabhängig und können fast überall unter gegebenen Voraussetzungen errichtet werden. Die unterirdischen Speicheroptionen und Versickerungsanlagen werden eher im flachen Gelände angewandt, da sie größtenteils für den urbanen Raum entwickelt wurden und daher nur selten in Bereichen mit hoher Steigung errichtet werden. Beim Platzbedarf unterscheiden sich die oberirdischen Speicheroptionen von den übrigen. Der Platzbedarf für Talsperren und Hochwasserpolder ist am größten. Wenig Platz benötigen Tanks und Versickerungsanlagen. Speicherbecken, Regenrückhaltebecken und die Beckenversickerung haben einen mittleren Platzbedarf, können aber auch kleiner geplant werden.

Aus technischer Sicht stellen die Speicherdauer und das Speichervolumen die wichtigsten Merkmale dar. In den Versickerungsanlagen und den Anlagen des Hochwasserschutzes ist die Speicherdauer am kürzesten (wenige Stunden bis Tage). Das Ziel bei den Versickerungsanlagen ist die Speicherung im Boden, nicht in den Anlagen. Wie viel Wasser durch den Einsatz dieser Anlagen im Boden gespeichert werden kann, ist abhängig vom Bodentyp und damit des Bodenwasserhaushaltes. Bei Optionen mit Hochwasserschutz als primärem Ziel, ist die Speicherdauer begrenzt, da diese Anlagen nach Hochwasserereignissen schnellst möglich geleert werden müssen. Dennoch bieten diese Optionen Ansätze zur Wasserspeicherung in der Landschaft. Als angepasste Option könnten sie daher dennoch als Wasserspeicher umgesetzt werden. In Talsperren und Speicherbecken kann Wasser über mehrere Monate bzw. Jahre gespeichert werden. Einflussfaktoren auf das Speichervolumen sind die Verdunstung und die Versickerung, die zu einer Abnahme des gespeicherten Wasservolumens führt. Die Speicherdauer in Tanks und Zisternen ist am längsten, da das Wasser hier unabhängig von jeglichen Umwelteinflüssen gespeichert werden kann.

Das Speichervolumen gibt an, wie groß die Menge an speicherbarem Wasser ist. In Talsperren ist das Speichervolumen am größten. Sie können mehrere Millionen Kubikmeter Wasser speichern. Weltweit können die größten Talsperren sogar tausende Kubikkilometer fassen. Auch Grundwasserstaudämme und Speicherbecken können große Speichervolumen von bis zu einer Millionen Kubikmeter besitzen. Aber auch hier ist das Volumen von der Größe abhängig. So gibt es Speicherbecken, die nur das Wasser von wenigen Dächern sammeln und dementsprechend kleiner bemessen sind als Regenrückhaltebecken oder große Zisternen. Nur wenig Wasser können hingegen die genannten Versickerungsanlagen speichern, da diese im urbanen Bereich häufig nur für einen kleinen räumlichen Maßstab dimensioniert werden.

Als letztes Merkmal werden die Kosten der einzelnen Optionen verglichen. Die Kosten variieren stark und sind vom Volumen und der Größe der Speicheroption abhängig. Je größer das Speichervolumen der Speicheroption ist, desto höher sind die Kosten. Besonders teuer sind Talsperren, bedingt durch die sehr hohen Planungs-, Bau- und Unterhaltungskosten. Speicherbecken haben im Vergleich eher mittlere Kosten, können aber je nach Bauart und Größe auch relativ günstig sein. Die unterirdischen Speicheroptionen haben im Vergleich eher hohe Kosten, da besonders die Baukosten sehr hoch sind. Tanks stellen die günstigste Variante dar, wenn es um eine oberirdische Speicherung von Wasser geht.

2.4.2 Ausschlusskriterien

Um die verschiedenen Optionen auf ihre Umsetzbarkeit für die deutsche Landwirtschaft zu untersuchen, werden zunächst einige Ausschlusskriterien aufgestellt. Das erste Ausschlusskriterium stellt die Größe bzw. der Platzbedarf der jeweiligen Option dar. Freie Flächen sind nur begrenzt vorhanden, zumal hierfür oft bewirtschaftete Fläche für die Umsetzung einer Speicheroption aufgegeben werden müssen. Daher ist der Platzbedarf ein wichtiges wirtschaftliches und planerisches Kriterium. Neben dem Platzbedarf ist auch das Wasserspeichervermögen für die Umsetzung relevant. Dabei ist entscheidend, ob die ausgewählte Option überhaupt den benötigten Wasserbedarf der bewässerten Agrarflächen decken kann. Dafür muss anhand klimatischer Daten die Auswirkungen von Trockenperioden ermittelt werden, um die benötigte Bewässerungsmenge zu ermitteln. In einem Vergleich zwischen Bedarf und speicherbarem Volumen zeigt sich, welche Speicheroptionen aufgrund ihrer geringen Volumina bei der Betrachtung herausfallen. Falls das

Speichervolumen für einen potentiellen Einsatz in der Landwirtschaft zu gering ist, kann es als Option auch a priori ausgeschlossen werden.

Ein weiteres Ausschlusskriterium stellen die Kosten dar, welche zwischen den einzelnen Optionen stark variieren und mit der Größe der Anlage zusammenhängen. Einige Optionen sind sehr teuer und daher für einzelne Landwirte nicht umsetzbar. Neben den Kosten ist die technische Umsetzbarkeit der Speicheroptionen ein Ausschlusskriterium. Hier wird berücksichtigt, wie die einzelnen Optionen aufgebaut sind und welche Auswirkungen dies für die Bewirtschaftung der Felder hat. In diesem Zusammenhang wird auch der Einschnitt in die Landschaft beachtet. Dabei wird betrachtet, wie stark das Landschaftsbild durch die Umsetzung der Speicheroption verändert wird.

2.4.3 Umsetzbare Speicheroptionen für die deutsche Landwirtschaft

Anhand der aufgestellten Kriterien wird die Umsetzbarkeit der einzelnen Optionen für die deutsche Landwirtschaft diskutiert.

Speicherbecken sind eine technische Option, bei der die Wasserspeicherung primär im Fokus steht. Sie können unterschiedlicher Größe geplant werden und zentral sowie dezentral eingesetzt werden. Da ihre Hauptaufgabe die Wasserspeicherung ist, können große Wassermengen über lange Zeiträume gespeichert werden. Die einzigen Verluste können durch Verdunstung und Versickerung entstehen. Ein Nachteil von Speicherbecken ist der Platzbedarf. Dieser kann je nach Speichervolumen und Beckentiefe sehr groß werden. Für die benötigten Flächen müssen oft landwirtschaftlich genutzte Flächen aufgegeben werden. Damit hängen wirtschaftliche Einbußen zusammen. Die Herkunft des Wassers und die Größe des verfügbaren Wasserdargebots muss ebenfalls kritisch analysiert werden.

Talsperren besitzen das größte Speichervolumen und die längste Speicherdauer (überjährlich), gleichzeitig ist ihr Platzbedarf enorm groß und sie können aufgrund der topographischen Anforderungen nicht überall errichtet werden. Gleichzeitig sind die Planungs- und Baukosten extrem hoch. Für einen einzelnen Landwirt, der Wasser für die Bewässerung speichern möchte, sind sie daher keine Option. Interessant werden Talsperren erst, wenn es zu großen Zusammenschlüssen kommt und weitere Bereiche von einem Bau profitieren, wie Energiegewinnung, Trinkwasserversorgung und Hochwasserschutz. Für die Bewässerung wird ein konstanter Abfluss in den Unterlauf bereitgestellt, sodass Landwirte unterhalb der Talsperre im Sommer ihr Bewässerungswasser aus dem Fließgewässer entnehmen können. Je nach Größe der Talsperre kann somit eine Vielzahl an Landwirten versorgt werden. Problematisch wird es in trockenen Jahren, in denen das Speichervolumen der Sperre im Winter nicht gefüllt wurde. Hier können im Sommer mehrere Interessensgruppen um das Wasser konkurrieren. Diese Wassernutzungskonflikte stehen der Verfügbarkeit an Bewässerungswasser und der Selbstbestimmung der Landwirte gegenüber. Speichern Landwirte hingegen Bewässerungswasser auf betriebseigenen Flächen, haben sie auch bei Wasserknappheit das alleinige Bestimmungsrecht über das Wasser.

Himmelsteiche sind Speicher, die sich auf natürliche Weise mit Niederschlagswasser und Grundwasser füllen. Da das gespeicherte Wasservolumen in Trockenphasen durch Evaporation schnell sinkt und sich der Speicher bei ausbleibenden Niederschlägen nicht wieder füllt, ist diese Art der Speicherung nicht verlässlich. Damit stellt diese Option als Wasserspeicheroption für die deutsche Landwirtschaft keine verlässliche Lösung dar.

Wassertürme und Hochbehälter sind besonders häufig in Städten vorzufinden. Wasser kann über längere Zeit gespeichert werden, gleichzeitig von Umwelteinflüssen, wie der Verdunstung unbeeinflusst. Die Kosten liegen höher als bei den Speicherbecken und auch das speicherbare Volumen ist geringer. Gleichzeitig entsteht bei der Speicherung ein zusätzlicher Aufwand, da das Wasser zur Speicherung nach oben gepumpt werden muss. Dieser Nachteil verliert aber dadurch an Bedeutung, dass das Wasser beim Auslassen aus dem Behälter ohne Energieaufwand fließt. Ein Kriterium, das hier eine Rolle spielt, ist der Einschnitt in das Landschaftsbild.

Angenommen, Landwirte in trockenen Regionen würden mehrere Wassertürme und Hochbehälter zur Speicherung von Bewässerungswasser errichten, könnte dies das Landschaftsbild stark verändern.

Tanks verfügen wie Hochbehälter über eine lange Speicherdauer, da auch hier das Wasser ohne Umwelteinflüsse gespeichert werden kann. Sie können sehr gut dezentral eingesetzt werden und ihre Kosten sind vergleichsweise eher gering. Das Speichervolumen von Tanks ist jedoch kleiner und um genügend Wasser zu speichern sind mehrere Tanks notwendig. Mit der Anzahl benötigter Tanks steigen die Kosten entsprechend. Eine Umsetzbarkeit für die Landwirtschaft ist also gegeben, wenn ein geringes Volumen an Bewässerungswasser benötigt wird.

Die Hauptaufgabe von Regenrückhaltebecken (RRB) ist das kurzfristige Speichern von Niederschlagswasser. Da RRB als kleine dezentrale oder größere zentrale Becken geplant werden können, variieren die Kosten. Aufgrund der unterschiedlichen Größe lassen sie sich ideal an die jeweiligen Bewässerungsbedürfnisse anpassen. Das größte Problem stellt die kurze Speicherdauer dar (relativ kurz, wenige Tage). Das liegt daran, dass konstant Wasser aus dem RRB geleitet wird, damit dieses bei nachfolgenden Niederschlagsereignissen wieder ausreichend Wasser zurückhalten kann. Für eine langfristige Wasserspeicherung ist dies nicht ausreichend. Auch die Errichtung von RRB mit einem konstanten Wasserstau stellen keine Lösungsmöglichkeiten dar, da das gespeicherte Volumen im Vergleich zum Beckenvolumen eher gering ist. Eine Möglichkeit wäre es, RRB derart umzusetzen, dass der Aspekt des Hochwasserschutzes eine Sekundärfunktion darstellt. So könnte Wasser auch über einen längeren Zeitraum gespeichert werden. Die Art und Weise der Bewirtschaftung eines RRB lässt auf das Speicherpotential schließen. Eine Umsetzung als Wasserspeicher ist damit möglich. Der Unterschied zu anderen technischen Speicheroptionen, wie Speicherbecken und Himmelsteich würde in der Sekundärfunktion des Hochwasserschutzes liegen, die bei den genannten Optionen keine relevante Funktion darstellt.

Hochwasserrückhaltebecken (HRB) sind häufig ein wichtiger Bestandteil des Hochwasserschutzes. Da sie in Fließgewässern errichtet werden, ist ihr Einsatz in der Landwirtschaft limitiert. Die kurze Speicherdauer von wenigen Tagen/Wochen kann je nach Bewässerungsstrategie problematisch werden. Der größte Nachteil als Wasserspeicher ist somit der Hochwasserschutz als primäre Aufgabe des HRB. Damit sind sie als Wasserspeicher für die Landwirtschaft nicht umsetzbar.

Hochwasserpolder sind wie die Hochwasserrückhaltebecken räumlich an Fließgewässer gebunden und dienen primär dem Hochwasserschutz. Sie sind eher im flachen Gelände zu finden und benötigen viel Platz. Je nach Ausführung der Polder ist die Speicherdauer relativ kurz. Besonders, wenn der Polder aus bewirtschafteten Nutzflächen besteht. Besteht der Polder hingegen aus errichteten Becken, kann das Wasser auch über längere Zeit gespeichert werden. Die primäre Funktion des Hochwasserschutzes steht dem Speichern des Wassers jedoch entgegen.

Zisternen müssen im Vergleich zu den anderen unterirdischen Wasserspeicheroptionen (Regenrückhaltebecken und Regenüberlaufbecken) nicht an die Kanalisation angeschlossen werden. Sie sammeln und speichern Niederschlagswasser dezentral. Die Speicherdauer ist sehr lang und kann mehrere Jahre betragen, da das Wasser vor Verdunstung geschützt ist. Die Umsetzbarkeit hängt mit der Größe und dem benötigten Speichervolumen zusammen. Geht es darum, genügend Wasser zu speichern, um in Trockenphasen große Flächen zu bewässern, lassen sich Zisternen als Speicheroptionen nicht umsetzen.

Unterirdische Regenrückhaltebecken bieten große Speichervolumina. Die technische Umsetzung und der Bau dieser Anlagen unter landwirtschaftlichen Flächen sind schwer zu realisieren. Die Kosten wären für diese Option der Speicherung sehr hoch. Außerdem müsste das Regenrückhaltebecken an das Kanalisationsnetz angeschlossen werden, damit genug Wasser gesammelt werden kann. Unter diesen Voraussetzungen ist eine wirtschaftliche und technische Umsetzung nicht möglich. Bei den Regenüberlaufbecken verhält es sich ähnlich. Sie müssen ebenfalls an das Kanalisationsnetz angeschlossen werden und verfügen nur über kleine Speichervolumina. Im urbanen Raum sind sie gute Zwischenspeicher, um Niederschlagsereignisse aufzufangen. Aber auch hier ist eine Umsetzbarkeit für die Landwirtschaft nicht realisierbar.

Den ungesättigten Bereich des Bodens oder das Grundwasser als Speicher zu verwenden hat den Vorteil, dass hierbei ein natürlicher, vorhandener Speicher genutzt wird. Das Speichervolumen hängt von den Bodeneigenschaften ab. Ist das Wasser im Boden gespeichert, steht es nicht direkt für die Bewässerung zur Verfügung, sondern den Pflanzen direkt über den Bodenwasserhaushalt. Wie effektiv diese Verfahren gegenüber einer Bewässerung sind, hängt ab von der Bodenbeschaffenheit, den angebauten Kulturen und davon ab, wie gut die Pflanzen das im Boden gespeicherte Wasser erreichen können. Die verschiedenen Versickerungsoptionen können somit dazu beitragen, dass der Boden zu Beginn der Trockenphasen einen höheren Wassergehalt besitzt und somit die Bewässerung erst zu einem späteren Zeitpunkt einsetzt. Außerdem können mit Hilfe dieser Optionen Oberflächenabflussereignisse nach Starkregen aufgefangen werden und das Wasser so in der Landschaft gehalten werden. Das Grabenstauverfahren ist die günstigste Alternative, da vorhandene Entwässerungsgräben verwendet werden. Weil dieses Verfahren jedoch an grundwassernahe Standorte und hohe Infiltrationsraten geknüpft ist, kann es nicht überall in der Landwirtschaft umgesetzt werden.

Bei Rigolen und Infiltrationsgräben erweist sich die technische Umsetzbarkeit als nachteilig. Das liegt an ihrem Konstruktionsaufbau. Schwere Fahrzeuge können diese nicht befahren, da diese durch die Auflast zerstört werden können. Flächen, auf denen Rigolen umgesetzt werden, dürfen nur mit leichten Fahrzeugen bearbeitet werden. Eine Umsetzbarkeit auf großen Teilen der landwirtschaftlichen Flächen ist daher nicht möglich. An Feldrändern stellen sie jedoch eine gute Möglichkeit dar, um Wasser in der Landschaft zu halten. Die Mulden- oder Beckenversickerung sind kostengünstige Versickerungsoptionen. Die Umsetzbarkeit ist aber stark auf Flächen mit hohen Infiltrationsraten begrenzt. Bei der Beckenversickerung spielt auch der Platzbedarf eine Rolle, da der Bereich des Beckens nicht bewirtschaftet werden kann. Schacht- und Rohrversickerung sind teurer, dafür sind diese weniger abhängig von den umliegenden Infiltrationseigenschaften des Bodens. Allerdings besteht auch hier die Gefahr des Zusammenbrechens bei Befahrung mit schweren Fahrzeugen. Vor einer Umsetzung muss dies geprüft werden.

Grundwasserstaudämme können ein großes Speichervolumen im Boden erzeugen. Das gespeicherte Wasser kann über einen langen Zeitraum gespeichert werden, doch die Konstruktionskosten dafür sind sehr hoch. Außerdem stellen sie indirekt einen starken Einschnitt in die Landschaft dar, da sie die Grundwasserströmung unterbrechen und somit das Grundwasser hinter dem Damm beeinflussen. Der sich damit verändernde Bodenwasserhaushalt kann die abstromig gelegene Flora wesentlich verändern. Eine zusätzliche Limitation ist der Grundwasserleiter, welcher eine hohe Fließgeschwindigkeit und Porosität aufweisen muss. Daher ist diese Option nicht für alle landwirtschaftlichen Flächen umsetzbar.

Zusammenfassend stellen Speicherbecken die beste Wasserspeicheroption für einzelne Landwirte dar (siehe Tabelle 5). Hier ist neben einer relativ guten Umsetzbarkeit auch die speichertechnische Eignung gegeben. Es kann genügend Bewässerungswasser über einen längeren Zeitraum gespeichert werden. Regenrückhaltebecken lassen sich ebenfalls gut umsetzen, bei der technischen Eignung als Wasserspeicher muss ihre Aufgabe des Hochwasserschutzes jedoch berücksichtigt werden. Die kürzere Speicherdauer im Vergleich Speicherbecken sorgt für die etwas schlechtere Eignung. Talsperren hingegen sind Großprojekte die zwar aus speichertechnischer Betrachtung eine gute Lösung darstellen, für einzelne Landwirte aber keine Option sind. Tanks und Zisternen hingegen sind eine Lösungsoption die auch von einzelnen Landwirten schnell umgesetzt werden können und sich hauptsächlich für das Sammeln von Niederschlagswasser eignen. In diesem Bereich sollten sie auch eingesetzt werden, wenn große Dachflächen oder versiegelte Oberflächen vorhanden sind. Das Wasser, das hier gespeichert werden kann, reicht wahrscheinlich nicht für eine ausreichende Bewässerung aus. Es bildet dennoch eine erste Grundlage für ein verbessertes Wassermanagement in der Landwirtschaft.

Bei bestimmten Sonderkulturen können die Versickerungsanlagen und -verfahren die Bewässerung in Trockenperioden ersetzen. Für den Einsatz bei Kulturen, wie Kartoffeln oder Weizen, sind sie technisch schwer umzusetzen. Zusätzlich gibt es einige Einschränkungen, daher ist die technische Eignung als Wasserspeicher nur in Sonderfällen gegeben. Hauptsächlich eignen sich Mulden und Versickerungsbecken für eine

landwirtschaftliche Nutzung. Um den Boden als zusätzlichen Wasserspeicher zu berücksichtigen, können Kombinationen verschiedener Speicheroptionen eingesetzt werden. Wird ein Speicherbecken mit nachgeschalteter Versickerungsanlage errichtet, kann überschüssiges Wasser bei Starkregenereignissen, das nicht gespeichert werden kann, versickern. Dadurch kann das überschüssige Wasser trotz gefülltem Speicher in der Landschaft gehalten werden. Das wirkt sich positiv auf den Bodenwasserhaushalt aus und es muss erst zu einem späteren Zeitpunkt mit der Bewässerung begonnen werden.

Tabelle 5: Technische Eignung und Umsetzbarkeit der in Frage kommender Speicheroptionen als Wasserspeicher in der deutschen Landwirtschaft (sehr gut = ++, sehr schlecht = --)

Speicheroption	Speichertechnische Eignung	Umsetzbarkeit
Speicherbecken	++	+
Regenrückhaltebecken*	+	+
Versickerungsanlage	-	++
Talsperre	++	-

*primäre Nutzung HW-Schutz

Quelle: eigene Darstellung.

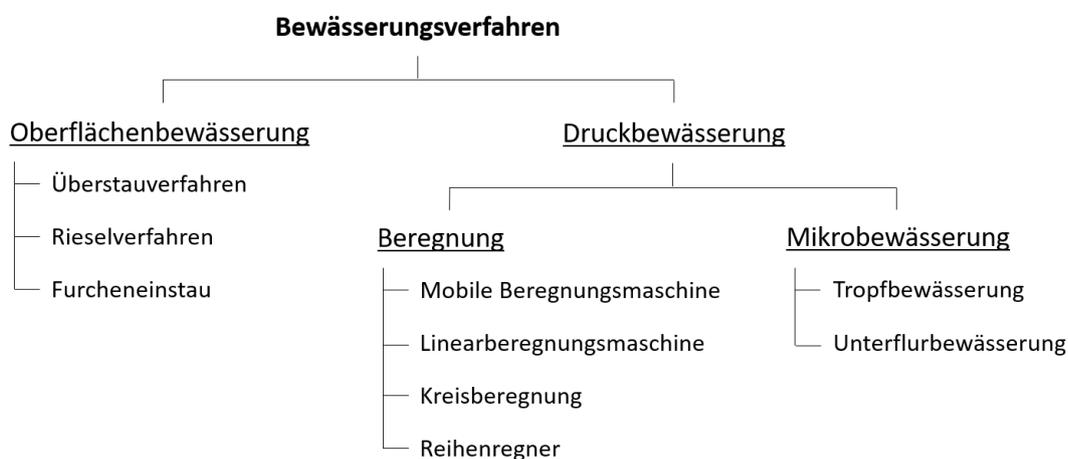
3 Bewässerungsverfahren: Stand der Technologie, betriebliche Potenziale, Chancen und Risiken

Ein Wasserspeicher zur Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen ist Bestandteil des betrieblichen Bewässerungssystems. Die Auswahl der konkreten Wasserspeicherungsoption sowie die Entscheidung bzgl. ihrer technischen Ausführung steht unter anderem im Zusammenhang mit vorhandenen oder geplanten Bewässerungsverfahren sowie mit den betrieblichen Strategien zur Bewässerungsoptimierung. Kapitel 3.1 bietet daher eine Übersicht über mögliche Bewässerungsverfahren und -systeme, die derzeit landwirtschaftlichen Betrieben zur Verfügung stehen. Dabei werden die Vor- und Nachteile aus agronomischer, arbeitswirtschaftlicher und ökonomischer Sicht betrachtet. Im Kapitel 3.2 werden die Chancen und Risiken der Bewässerung im Allgemeinen sowie im Zusammenhang mit konkreten Bewässerungsverfahren und Systemen bewertet. Da in der Regel ökonomische Anreize von großer Bedeutung hinsichtlich der Akzeptanz von Technologien im Allgemeinen und Bewässerungssystemen im Besonderen sind, liegt der Schwerpunkt auf der Wirtschaftlichkeit der Bewässerung und auf ihren Bestimmungsfaktoren.

3.1 Bewässerungsverfahren

Primär wird technisch zwischen Oberflächenbewässerung und Druckbewässerung unterschieden (siehe Abbildung 7). Bei der Oberflächenbewässerung wird das Wasser zunächst oberflächlich gestaut und dann über ein errichtetes Verteilungssystem (z. B. Kanäle) in die Fläche gebracht (Brouwer et al. 1988). Unter Druckbewässerung wird das Wasser über ein Rohrsystem zum Feld gepumpt, wo der Restdruck genutzt wird um das Wasser zu verteilen.

Abbildung 8: Bewässerungsverfahren in der Landwirtschaft: Stand der Technik



Quelle: auf Grundlage von KTBL (2014), Brouwer et al. (1988), Fricke (2018) und Gramm (2014).

Zur Druckbewässerung gehören sowohl Beregnung als auch Mikrobewässerung. Die Beregnung orientiert sich am natürlichen Niederschlag, indem das durch Rohre und Schläuche gepumpte Wasser auf die Kulturen versprüht bzw. verregnet wird. Mittels mobiler Beregnungsmaschinen kann ein Bewässerungsstandort innerhalb eines Betriebes gewechselt werden, sofern die Flächen über einen Anschluss an das Zuleitungssystem verfügen. Eine solche Maschine kann je nach ihrer Ausstattung bis zu 11 m nutzbarer Wurfweite und bis zu 65 m nutzbarer Arbeitsbreite erreichen (KTBL 2014). Linear- und Kreisberegnungsmaschinen sind teilortsfeste Anlagen, die vor allem für die Großflächenbewässerung geeignet sind (Fricke 2018). Eine Linearberegnungsmaschine kann eine Baubreite von 75 bis 1200 m haben und beregnet rechteckige Felder durch die kontinuierliche

Vorwärtsbewegung (KTBL 2014). Eine Kreisberechnungsmaschine kann eine Fläche von 16-87 ha im Radius bis zu 500 m berechnen (KTBL 2014). Mikrobewässerung hingegen ist ein Verfahren, in dem ein kleinerer Bereich nah an der Pflanze bedarfsgerecht bewässert werden kann. Diese kann sowohl durch ein an der Oberfläche (Tropfbewässerung) als auch unterhalb der Bodenoberfläche (Unterflurbewässerung) verlegtes Rohr- oder Schlauchsystem realisiert werden. Bei der Tropfbewässerung wird das Rohr- oder Schlauchsystem für die Kulturzeit fest verlegt; nach der Ernte muss das System zur weiteren Bodenbearbeitung wieder abgebaut werden (KTBL 2014). Bei Unterflurbewässerung handelt es sich um eine feste Installation. Um das Risiko ihrer Beschädigung durch Bodenbearbeitungsmaßnahmen zu reduzieren, wird das Rohr bzw. Schlauchsystem üblicherweise unterhalb der Bodenbearbeitungszone implementiert (Lamm 2002).

Jedes technische Bewässerungsverfahren hat Vor- und Nachteile; diese sind in Tabelle 6 zusammengefasst. So ist die Oberflächenbewässerung zwar mit niedrigem technischen Aufwand verbunden, benötigt aber vergleichsweise hohe Wassermengen und kann zu erheblichen Wasserverlusten durch Evaporation führen (Nikolaou et al. 2020). Druckbewässerungssysteme hingegen sind im Vergleich zur Oberflächenbewässerung grundsätzlich durch höhere Wassernutzungseffizienz – definiert als Verhältnis zwischen dem in der Wurzelzone der Pflanze zurückgehaltenen Wasser und der Gesamtmenge des aufgebrauchten Wassers (Evans und Sadler 2008) – charakterisiert. Einschätzungen von Nikolaou et al. (2020) zufolge liegt die Wassernutzungseffizienz bei der Beregnung zwischen 50-70% und bei Mikrobewässerung etwas höher, zwischen 80-90%. Weitere Aspekte, in denen sich die Bewässerungsverfahren unterscheiden, sind Einsatzflexibilität, Energiebedarf, Effektivität bei der Wasserverteilung sowie Kostenstrukturen (insb. Investitions- und Betriebskosten, vgl. Kapitel 3.2).

Der Energiebedarf beim Druckbewässerungssystem ist grundsätzlich höher als bei der Oberflächenbewässerung, da bei dieser die Schwerkraft für die Wasserzuleitung genutzt wird (Brouwer et al. 1988). Untersuchungen der Landwirtschaftskammer Niedersachsen zeigen, dass Kreis- und Linearberegnungsmaschinen und die Mikrobewässerung eine höhere Energieeffizienz aufweisen und dabei einen geringeren Arbeitsaufwand erfordern im Vergleich zu mobilen Beregnungsmaschinen (Fricke 2018). Die Wasserverteilung bei Wind wird bei allen Druckbewässerungsverfahren, außer mobilen Beregnungsmaschinen mit Großflächenverteiler, als gut eingeschätzt (ibid). Mehrere Studien berichten dabei über die Vorteile der Mikrobewässerung, da eine an den Wasserbedarf der Kulturen angepasste Wasserverteilung möglich ist, die eine bessere Düngebedarfsplanung und Applikation ermöglicht (Lamm 2002; Fricke 2018; Namara et al. 2007).

Mobile Beregnungsmaschinen weisen eine sehr hohe Flexibilität bei der Flächenbewirtschaftung auf und ermöglichen Fruchtfolgen mit bewässerten und nicht bewässerten Kulturen. Bei Kreis- und Linearberegnungsmaschinen sowie bei Tropfbewässerung ist hingegen eine Aufnahme bewässerungswürdiger Kulturen in eine Fruchtfolge limitiert. Bei der Unterflurbewässerung ist die Art des Wurzelsystems einer Pflanze der limitierende Faktor: um das Beschädigungsrisiko durch Bodenbearbeitung zu minimieren, werden die Schläuche bei diesen Verfahren in einer Tiefe von 30-40 cm verlegt (Fricke 2018). Somit ist die Unterflurbewässerung für die Kulturen mit Flachwurzeln nicht geeignet (Lamm 2002), was wiederum die betriebliche Flexibilität einschränkt. Auch Unterschiede in den Reihenbreiten und -abständen zwischen verschiedenen bewässerungswürdigen Kulturen können den Einsatz von Unterflurbewässerung limitieren.

Der größte Anteil der bewässerten landwirtschaftlichen Fläche weltweit – überwiegend in Entwicklungsländern – scheint mittels Oberflächenbewässerung mit Wasser versorgt zu werden (Nikolaou et al. 2020). Als Hauptgründe dafür werden niedrige Investitionskosten und eine einfache Umsetzung genannt (Brouwer et al. 1988; Nikolaou et al. 2020). In Deutschland werden ausschließlich verschiedene Druckbewässerungsverfahren eingesetzt. Neben den Investitionskosten und der Umsetzbarkeit sind auch natürliche Gegebenheiten (Bodentyp, Wasserverfügbarkeit, Gefälle Windstärke usw.) und angebaute Kulturen bei der Entscheidung landwirtschaftlicher Betriebe bzgl. des Bewässerungsverfahrens von Bedeutung. Unter Klimawandelbedingungen kann vor allem die Wasserverfügbarkeit ein limitierender Faktor werden, der bei der Auswahl des Bewässerungsverfahrens stärker zu berücksichtigen ist.

Tabelle 6: Vor- und Nachteile Bewässerungsverfahren: Stand der Technik

Bewässerungsverfahren	Vorteile	Nachteile
Oberflächenbewässerung	- niedriger technischer Aufwand (Nikolaou et al. 2020)	- große Wassermengen erforderlich (Brouwer et al. 1988) - niedrige Wassernutzungseffizienz (Brouwer et al. 1988, Nikolaou et al. 2020)
Mobile Beregnungsmaschine	- hohe Flexibilität und Mobilität (Gramm 2014, Fricke 2018) - hohe Wassernutzungseffizienz (50-70%) (Nikolaou et al. 2020)	- hoher Energiebedarf (Sourell 2014, Gramm 2014, Fricke 2018) - ggf. hoher Arbeitsaufwand (Sourell 2014) - ggf. schlechte Wasserverteilung bei Wind (Brouwer et al. 1988, Gramm 2014, Fricke 2018)
Linearberegnungsmaschine	- hohe Wassernutzungseffizienz (Sourell 2014) - gute Wasserverteilung (Gramm 2014, Fricke 2018) - geringer Energieaufwand (Gramm 2014, Fricke 2018) - geringer Arbeitsaufwand bei Beregnung (Gramm 2014)	- Flächengröße und Struktur (Sourell 2014, Gramm 2014) - Gestaltung einer bewässerungswürdigen Fruchtfolge ist problematisch (Sourell 2014) - hohe Anschaffungskosten (Gramm 2014) - hohe Anforderungen an Wasserqualität (Gramm 2014)
Kreisberegnungsmaschine	- hohe Wassernutzungseffizienz (Sourell 2014) - gute Wasserverteilung (Sourell 2014, Gramm 2014, Fricke 2018) - geringer Energieaufwand (Gramm 2014, Fricke 2018) - geringer Arbeitsaufwand bei Beregnung (Gramm 2014)	- Flächengröße und Struktur (Sourell 2014, Gramm 2014, Fricke 2018) - das Folgen bewässerungswürdiger Kulturen in einer Fruchtfolge ist problematisch (Sourell 2014) - hohe Anschaffungskosten (Gramm 2014) - hoher Auf- und Abbauaufwand (Gramm 2014) - hohe Anforderungen an Wasserqualität (Gramm 2014)
Tropfbewässerung	- sehr hohe Wassernutzungseffizienz (80-90%) (Nikolaou et al. 2020) - geringer Verdunstungsverlust (Sourell 2014) - exakte und an die Pflanze angepasste Wasserverteilung (Sourell 2014, Fricke 2018) - geringer Energiebedarf für Wassertransport (Sourell 2014, Gramm 2014, Nikolaou et al. 2020) - Bewässerung in Kombination mit Düngung möglich (Sourell 2014, Gramm 2014)	- hoher Material- und Arbeitseinsatz (Sourell 2014, Gramm 2014, Fricke 2018, Lamm 2002) - hohe Investitionskosten (Sourell 2014, Lamm 2002) - hohe Anforderungen an Wasserqualität (Gramm 2014)
Unterflurbewässerung	- höchste Wassernutzungseffizienz (Lamm 2002) - kein Verdunstungsverlust (Lamm & Camp 2007) - exakte und an die Pflanze angepasste Wasserverteilung (Lamm 2002, Sourell 2014, Fricke 2018, Nikolaou et al. 2020) - geringer Energiebedarf für Wassertransport (Lamm 2002, Lamm & Camp 2007, Sourell 2014, Gramm 2014) - Bewässerung in Kombination mit Düngung möglich (Lamm 2002, Lamm & Camp 2007) - geringer Arbeitsaufwand (Lamm & Camp 2007, Lamm 2002)	- nicht für Anbau von Kulturen mit unterschiedlichen Reihenbreiten und -abständen geeignet (Lamm 2002) - hohe Investitionskosten (Lamm 2002) - Herausforderung beim Feststellen und Beseitigen von Leckagen (Lamm 2002)

Quelle: Brouwer et al. (1988), Lamm (2002), Lamm und Camp (2007), Gramm (2014), Sourell (2014), Fricke (2018), Nikolaou et al.

Betriebliche, technologische, produktionstechnische und agronomische Maßnahmen können die für die Bewässerung benötigte Wassermenge beeinflussen, unabhängig vom gewählten technischen Verfahren. So kann ein gezieltes Monitoring der verbrauchten Wassermenge, z. B. mittels Wasserzähler, regelmäßige Wartung der Bewässerungsinfrastruktur zur Vermeidung von Leckagen, gezielte Planung des kulturspezifischen Bewässerungszeitpunkts und des Bewässerungsbedarfs, zur wassersparenden Bewässerung beitragen.

Produktionstechnische Maßnahmen umfassen Ansätze zur Defizitbewässerung, z. B. anhaltende Defizitbewässerung [engl.: sustained deficit irrigation], Wachstumsphasen basierte Defizitbewässerung [engl.: stage-based deficit irrigation], Trocknung eines Teils des Wurzelbereichs [engl.: partial root zone drying] oder ergänzende Bewässerung [engl.: supplemental irrigation] (Nikolaou et al. 2020). Dabei werden die Menge und die Dauer der Wasserapplikation knapp unterhalb des Bedarfs der Kultur (English 1990) bzw. unterhalb der Evapotranspiration (Nikolaou et al. 2020) gehalten. Vor allem in ariden und semiariden Regionen, wo Wasserverfügbarkeit ein limitierender Faktor für die landwirtschaftliche Produktion ist, wird Defizitbewässerung praktiziert. In ihrer Metaanalyse zur Auswirkung der Defizitbewässerung auf Wasserproduktivität ermitteln Zwart und Bastiaanssen (2004), dass mittels Defizitbewässerung der Anbau von Weizen, Reis und Mais erhalten werden kann, mit gleichzeitiger Einsparung von 28-40% des Beregnungswassers. Die Voraussetzungen dafür sind sehr lokal und stehen im Zusammenhang mit dem Standort, dem lokalen Klima und der Bodenfruchtbarkeit (ibid.). Auch Reben und Obstbäume können sich unter bestimmten Voraussetzungen gut an die Defizitbewässerung anpassen (Ruiz-Sanchez et al. 2010). Für einige Kulturen z. B. Baumwolle (Zwart und Bastiaanssen 2004) oder Gemüse (Costa et al. 2007) scheinen die Vorteile der Defizitbewässerung nicht offensichtlich positiv. Eine erfolgreiche Umsetzung von Defizitbewässerung erfordert von Betrieben insbesondere umfassendes Wissen über die Empfindlichkeit der angebauten Kulturen zu Wasserdefizit in unterschiedlichen phänologischen Phasen (Geerts und Raes 2009; Costa et al. 2007; Ruiz-Sanchez et al. 2010) und geht daher mit hohen Lern- und Informationskosten einher.

Eine Reihe von pflanzenbaulichen Maßnahmen und Anbausystemen, z. B. eine reduzierte Bodenbearbeitung, angepasste Fruchtfolgen, Anbau trockenheitsresistenter Kulturen und Sorten, Zwischenfruchtanbau, Mischkultur oder Agroforstsysteme können die Wasserrückhaltefunktion der Böden sowie die Wassernutzungseffizienz von Kulturpflanzen verbessern und sich somit positiv auf den Bewässerungsbedarf auswirken. Entsprechend wird zwischen den Maßnahmen unterschieden, die (i) unproduktive Wasserverluste minimieren und (ii) bessere Wasserausnutzung durch Pflanzen fördern (Grocholl 2014). Die erste Kategorie umfasst Maßnahmen wie Bodenbedeckung mit Mulch oder durch dichtere Pflanzenbestände sowie Lockerung der Bodenoberfläche zur besseren Infiltration. Die Maßnahmen zur Minderung des Oberflächenabflusses sind nur dann effektiv, „wenn entweder ein aktueller Wasserbedarf besteht oder das Wasser im Boden gespeichert werden kann“ (Grocholl 2014).

Die Wasserspeicherkapazität der Böden wird in erster Linie durch den Bodentyp bestimmt. Diese ist bei schweren und fruchtbaren Böden im Vergleich zu leichten sandigen Böden höher. Vermeidung von Bodenverdichtung und Umsetzung von Maßnahmen zur Verbesserung der Bodenstruktur und Erhöhung des Humusgehalts – u. a. reduzierte Bodenbearbeitung und Einbringung von organischem Dünger und Biokohle – können sich positiv auf die Wasserrückhaltefunktion des Bodens auswirken (Basso et al. 2013; Grocholl 2014; Atkinson 2018). Die bessere Wasserausnutzung durch Kulturpflanzen kann unter anderem durch Sortenwahl sowie die Maßnahmen zur Förderung von Durchwurzelungstiefe und Intensität zum Teil gesteuert werden (Grocholl 2014).

Die tatsächlichen wasserbezogenen Effekte der oben skizzierten Maßnahmen, zum Ersetzen der Bewässerung, scheinen begrenzt zu sein (Garré et al. 2022). Die Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen setzt allerdings voraus, dass Oberflächenwasser oder Grundwasser in einer Region in ausreichender Menge zur Verfügung stehen. Sollte dies in der Vegetationsperiode nicht der Fall sein, kann über eine Zwischenspeicherung von Wasser nachgedacht und diese mit dem jeweiligen Bewässerungsverfahren und ggf. agronomischen Ansätzen kombiniert werden.

3.2 Chancen und Risiken der Bewässerung von Feldkulturen in der deutschen Landwirtschaft

Die positiven Auswirkungen der Bewässerung auf Ertragshöhe und Stabilität sowie Qualität der Hauptkulturen in Deutschland sind in den wissenschaftlichen Publikationen und in der Fachliteratur bereits mehrfach

dokumentiert. Für die im deutschen Ackerbau wichtigen Anbaukulturen weisen internationale Veröffentlichungen Mehrertrag von Kartoffeln (Ahmadi et al. 2010), Weizen (Sun et al. 2006; Torrion und Stougaard 2017; Oweis et al. 1998) und Mais (Ko und Piccinni 2009; Abd El-Wahed und Ali 2013) infolge der Bewässerung auf. Ähnlich zu den internationalen Veröffentlichungen haben die Bewässerungsversuche in fünf Bundesländern Deutschlands ebenfalls den Mehrertrag der Hauptackerkulturen sowohl bei Defizitbewässerung als auch bei optimaler Bewässerung nachgewiesen (siehe Tabelle 7). Dabei haben vor allem Kartoffeln und Sommergerste mit höchstem Mehrertrag auf optimale Bewässerung reagiert (Pfleger et al. 2010; Lüttger et al. 2005; Fricke 2022; LTZ Augustenberg 2014). Der höchste Mehrertrag infolge der Defizitbewässerung wurde bei Winterweizen und Sommergerste erfasst (Fricke 2022; LTZ Augustenberg 2014). Im Fall des Biomassemais wurden die Mehrerträge in Trockenjahren beobachtet (Pfleger et al. 2010). Im Durchschnitt war der Mehrertrag bei dieser Kultur niedriger als bei anderen untersuchten Kulturen. In Bezug auf die Zusatzwasserausnutzung, wurde insbesondere bei Kartoffeln und Zuckerrüben das effektive Verwertung des Zusatzwassers beobachtet (Lüttger et al. 2005; Fricke 2022; Pfleger et al. 2010) effektiv verwertet wurde. Silomais und Winterraps haben dagegen die niedrigste Zusatzwasserausnutzung in den Versuchen gezeigt, was die Würdigkeit ihrer Bewässerung beeinträchtigt.

In Bezug auf die Qualität landwirtschaftlicher Produkte werden eher positive Auswirkungen der Bewässerung erwartet (Lüttger et al. 2005). In diesem Bereich scheint es aber nur wenige Versuche in Deutschland zu geben (Fricke 2022; Pfleger et al. 2010; LTZ Augustenberg 2014). Die Ergebnisse dieser Versuche zeigen, dass im Gegensatz zu den Ertragseffekten die Effekte von Bewässerung auf die Qualitätsmerkmale der Ackerkulturen (siehe Tabelle 8) weniger eindeutig sind.

Als wichtige Rahmenbedingungen, welche die tatsächliche Höhe des Mehrertrags bestimmen, werden auf Basis von Feldversuchen die Wetterbedingungen (insb. Regenmenge und Verteilung der Niederschläge) im Versuchsjahr (Pfleger et al. 2010), die Bodenqualität (Fricke 2014) und die angebauten Sorten (Pfleger et al. 2010) genannt. Fricke (2014) kommt dabei zur Schlussfolgerung, dass die Ertragswirkung der Bewässerung mit der Wasserspeicherfähigkeit des Bodens (Bodenpunkten) und mit den Niederschlagsmengen in der Vegetationsperiode negativ korreliert ist. Weiterhin kann der Mehrertrag infolge der Bewässerungsmaßnahmen durch mögliche positive Wechselwirkungen innerhalb der pflanzenbaulichen (Saattermin, Saatedichte, Nährstoffversorgung und Pflanzenschutz) und bodenbewirtschaftenden Maßnahmen (Bodenbearbeitung, Bodenbedeckung, Düngung) beeinflusst werden (Grocholl 2014).

Im Fall des Kartoffelanbaus wurde ein generell positiver Einfluss der Bewässerungsmaßnahmen auf die Größe der Knollen festgestellt (Pfleger et al. 2010; Fricke 2014). Laut Pfleger et al. (2010) ist dieser Effekt vor allem auf das „ausgeglichene und hohe Bodenwasserbereitstellungsvermögen zurückzuführen“. Weiterhin wurde in den Versuchen mit Kartoffelbewässerung geringerer Schorfbefall und Eisenfleckigkeit infolge der Bewässerungsmaßnahmen beobachtet (Fricke 2014). Bezüglich des Stärkegehalts der Kartoffeln wurde eine Steigerung infolge der Bewässerung – insbesondere in trockenen Jahren – durch Fricke (2014) nachgewiesen; die Feldversuche von Pfleger et al. (2010) in 2004-2006 konnten dagegen keinen Einfluss der Bewässerung auf den Stärkegehalt feststellen.

Tabelle 7: Mehrertrag der Ackerkulturen durch Bewässerung

Bundesland	Erträge der Hauptackerkulturen ¹																													
	Kartoffeln				Zuckerrüben				Winterweizen				Sommergerste				Wintergerste				Winterraps				Biomassemais					
	UB dt/ha	RB dt/ha	MER %	OB dt/ha	UB dt/ha	RB dt/ha	MER %	OB dt/ha	UB dt/ha	RB dt/ha	MER %	OB dt/ha	UB dt/ha	RB dt/ha	MER %	OB dt/ha	UB dt/ha	RB dt/ha	MER %	OB dt/ha	UB dt/ha	RB dt/ha	MER %	OB dt/ha	UB ² dt/ha	RB ² dt/ha	MER %	OB ² dt/ha		
Baden- Württemberg	-	-	-	-	-	-	-	-	57	76	32	78	36	55	75	37	78	29	77	82	7	85	10	27	28	1	28	4	-	-
Brandenburg	380	-	-	526	38	517	-	630	18	58	-	68	17	43	-	65	34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Niedersachsen	566	696	23	725	28	756	867	15	908	17	61	83	36	88	44	53	70	32	63	75	19	84	25	42	46	10	45	7	190	210
Sachsen	350	-	-	425	21	520	-	625	17	65	-	80	23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	380	-
Thüringen langjährige Versuche ³	412	-	-	587	42	524	-	679	23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Thüringen kurzfristige Versuche ⁴	455	504	11	560	23	574	-	725	21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	152	-

UB = unbewässert; RB = reduzierte Bewässerung; MER = Mehrertrag eduzierte Bewässerung; OB = optimale Bewässerung; MEO = Mehrertrag optimale Bewässerung

¹ Mittelwert über die Versuchsjahre

² Trockenmasseertrag

³ 1994-2008 für Kartoffeln, 1994-2006 für Zuckerrüben

⁴ 2004-2006 für Kartoffeln und Zuckerrüben, 2003-2007 für Biomassemais

Quelle: LTZ Augustenberg (2014) und Schittenhelm et al. (2009) für Baden-Württemberg, Lüttiger et al. (2005) für Brandenburg, Fricke (2014) und Fricke (2022) für Niedersachsen, Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft (2014) für Sachsen, Pfleger et al. (2010) für Thüringen.

Im Fall des Zuckerrübenanbaus wurde bei den Versuchen 2004-2006 in Thüringen zwar ein höherer bereinigter Zuckerertrag erzielt, dieser ist aber dem Mehrertrag der Zuckerrüben zuzuschreiben, da für diesen Versuchszeitraum keine statistisch gesicherten Effekte der Bewässerung auf Zuckergehalt nachgewiesen werden konnten (Pfleger et al. 2010). Die durch Fricke (2014) zusammengefassten Versuchsergebnisse zur Bewässerung in Niedersachsen dokumentieren einen erhöhten Zuckergehalt und geringere Ausbeuteverluste¹ infolge der Beregnungsmaßnahmen.

Tabelle 8: Qualitätsmerkmale der Hauptackerkulturen Deutschlands

Ackerkultur	Kartoffeln	Zuckerrüben	Winterweizen Wintergerste	Sommergerste	Winterraps	Biomassemais
Qualitätsmerkmale	Stärkegehalt Größe der Knollen Niedriger Schorfbefall Niedrige Eisenfläckigkeit	Zuckergehalt Ausbeuteverluste	Kornausbildung TKG	Kornausbildung TKG Eiweißgehalte Vollgerstenanteile Malzextraktgehalte	Ölgehalt TKG	Energiegehalt

TKG = Tausendkorngewicht

Quelle: Pfleger et al. (2010), Fricke (2014), LTZ Augustenberg (2014).

Bei den drei Getreidearten – Weizen, Sommergerste und Wintergerste – haben die Versuche in Baden-Württemberg ein höheres Tausendkorngewicht sowie einen niedrigeren Proteingehalt bei den bewässerten im Vergleich zu den nicht bewässerten Kulturen gezeigt (LTZ Augustenberg 2014). Vor allem für den niedrigeren Proteingehalt bei der Sommergerste ist Bewässerung aus der Sicht von Fricke (2022) unverzichtbar.

Neben den möglichen positiven Effekten auf Erträge und Qualität landwirtschaftlicher Produkte bietet die Bewässerung weitere Chancen für landwirtschaftliche Betriebe:

- bessere Ausnutzung der Nährstoffe, vor allem im Kontext der Düngemittelverordnung und zur Absicherung der dritten Gabe des Stickstoffs z. B. beim Weizen zur Erhöhung der Qualität (Fricke 2022), verbunden mit einem erheblichen Kosteneinsparpotenzial vor dem Hintergrund steigender Düngepreise
- mögliche Anpassung des Spektrums angebauter Kulturen, hin zu bewässerungswürdigeren Kulturen (Fricke 2014), verbunden mit einem höheren ökonomischen Potenzial
- Absicherung der Ertragsmengen, die zum einen die Möglichkeit des Einstiegs in den Vertragsanbau eröffnet (Fricke 2014), zum anderen die kontinuierliche Funktions- und Leistungsfähigkeit vom Ackerbau abhängiger Betriebszweige – z. B. Biogasanlagen – gestattet und damit das betriebliche Verlustrisiko deutlich reduzieren kann.

Auch wenn die Bewässerung viele Chancen bietet, so ist sie auch mit mehreren Risiken verbunden. In erster Linie gilt dies im Zusammenhang mit der Rentabilität der Investitionen in das Bewässerungssystem – auch betriebliche Bewässerungsanlage genannt, die aus Infrastruktur, Maschinen, Know-How und evtl. Wasserspeicher besteht. Bisherige Veröffentlichungen zur Wirtschaftlichkeit der Bewässerungsanlagen betonen, dass diese nur dann erreicht werden kann, wenn infolge der Bewässerung erzielter Mehrerlös langfristig höher ist als die Bewässerungskosten (Lüttger et al. 2005; SMUL 2014; Fricke 2014; Gramm 2014). Deckungsbeiträge werden oft als Indikatoren für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit genutzt. Da alle zur Rentabilität beitragenden Faktoren

¹ Der Ausbeuteverlust bezieht sich auf die Differenz zwischen dem theoretischem und tatsächlichem gewinnbarem Zuckergehalt.

in der Zukunft mit Unsicherheit behaftet sind, können diese zu wesentlichen Verlustrisiken beitragen (vgl. schematische Darstellung in Tabelle 9).

Tabelle 9: Faktoren, die die Wirtschaftlichkeit beeinflussen und die im Zusammenhang stehenden Risiken

Ermittlung des Deckungsbeitrags		Risiken
Mehrerlös x Preis	Mehrertrag	Entwicklung der Preise für landwirtschaftliche Produkte Vermarktungspotenzial der bewässerten Ackerkulturen
-		
Variable Kosten	Wasser	Entwicklung der Energiepreise
	Energie	
	Arbeitsleistung	Einführung bzw. Entwicklung der Wasserpreise
	Reparaturen	Einführung bzw. Entwicklung der Wasserentnahmegebühren
= Variable Berechnungskostenfreieleistung (Deckungsbeitrag I)		
-		
Fixe Kosten	Zinsen	Tatsächliche Niederschlagsmengen in der Vegetationsperiode im Nutzungszeitraum
	Versicherungen	Änderung der physischen und institutionellen Wasserverfügbarkeit
	Wartung	Änderung in der Anzahl der Wassernutzern außerhalb des landwirtschaftlichen Sektors bzw. ihres Wasserbedarfs Änderung in der Anzahl der bewässernden Betrieben
= Berechnungskostenfreieleistung (Deckungsbeitrag II bzw. III)		

Der Mehrerlös infolge der Bewässerung hängt von den angebauten und bewässerten Kulturen und den Marktpreisen ab. Alle bisherigen Veröffentlichungen nennen Kartoffeln als bisher bewässerungswürdigste Ackerkultur, zum einen wegen der Höhe des Mehrertrags infolge der Bewässerung und zum anderen angesichts der bisher relativ hohen Preise (Fricke 2014, 2022; LTZ Augustenberg 2014; SMUL 2014; Gramm 2014). Andere untersuchte Ackerkulturen wurden bisher als weniger bewässerungswürdig betrachtet, da die Deckung der gesamten Bewässerungskosten mit Mehrerlösen sehr stark von den Preisen der jeweiligen Kulturen abhängt. So zeigten die Getreidekulturen und Zuckerrüben in den bisherigen Berechnungen eine positive variable berechnungskostenfreie Leistung (Fricke 2014, 2022; SMUL 2014); die Deckung der fixen Kosten war nicht immer möglich. Die berechnungskostenfreie Leistung bei optimaler Bewässerung war bisher am niedrigsten bei Silomais, Raps und Zuckerrüben in Niedersachsen (Fricke 2014, 2022) und vom Silomais und Zuckerrüben in Sachsen (SMUL 2014). Dies impliziert, dass eine Investition in die Bewässerungsinfrastruktur, z. B. bei einer Getreide-Mais-Fruchtfolge bisher nicht wirtschaftlich war und die Bewässerung der Kulturen, die nur eine variable berechnungskostenfreie Leistung erzielen, sich nur dann lohnt, wenn sie in der Fruchtfolge mit einer bewässerungswürdigen Kultur – z. B. Kartoffeln – angebaut werden (SMUL 2014; Fricke 2014). Fricke (2014) fasst zusammen, dass bei der betrieblichen Entscheidung bzgl. der Investitionen in eine Bewässerungsanlage die gesamte Fruchtfolge angeschaut werden soll, um sicher zu stellen, „dass für jede Kultur die variablen Kosten gedeckt sind und eine positive berechnungskostenfreie Leistung erreicht wird“. Eine Absicherung von zukünftigen Erträgen und Qualität landwirtschaftlicher Produkte gegen Ausfälle bei Trockenheits- und Dürreereignissen ist ein wichtiger Faktor bei Investitionsentscheidungen in Bewässerungssysteme. Sie kann insbesondere für die Betriebe interessant sein, die durch Vertragsanbau deutlich höheren Verlusten bei Dürreereignissen ausgesetzt und/oder auf höherwertige, aber wassersensible Produkte wie etwa Zuckerrüben oder Kartoffeln, spezialisiert sind.

Die Entwicklung der Marktpreise kann die Bewässerungswürdigkeit einzelner Kulturen stark beeinflussen, so dass die Bewässerung der Kulturen mit bisher niedriger Bewässerungswürdigkeit an Bedeutung gewinnen kann oder andersherum. Dank der Preissprünge für Getreide in 2022 ist die Bewässerung des Winterweizens und der Sommer- und Wintergerste in Niedersachsen deutlich bewässerungswürdiger als im Vergleich zu den Vorjahren geworden (Gödeke und Riedel 2022). Um die Wirtschaftlichkeit der Bewässerung zu erhöhen, haben

ackerbauliche Betriebe die Möglichkeit, sich (zum Teil) auf die Produktion bewässerungswürdiger Kulturen umzustellen. Ob und in welchem Umfang die Umstellung möglich ist, hängt von der ursprünglichen betriebswirtschaftlichen Ausrichtung und ggf. Abhängigkeit weiterer Betriebszweige vom Ackerbau ab.

Neben den Erlösen wird die Wirtschaftlichkeit der Bewässerungsmaßnahmen auch durch die Bewässerungskosten beeinflusst. Die Höhe der variablen (kulturspezifischen) Kosten hängt von der eingesetzten Bewässerungstechnologie ab. So sind die variablen Kosten bei der Tropfbewässerung am höchsten (de Witte 2018; Gramm 2014; Bröhl und Lorenz 2012), vor allem wegen der hohen Arbeits- und Maschinenkosten für den Auf- und Abbau der Tropfschläuche (de Witte 2018; Gramm 2014). In der Zusammensetzung der variablen Kosten bei der Kreisberegnung sowie bei der Bewässerung mit mobilen Beregnungsmaschinen stellen die Energiekosten die bedeutsamste Kostenposition dar (Gramm 2014; Fricke 2014). Im Vergleich der mit Strom und Diesel angetriebenen Pumpen hat der Elektroantrieb deutliche Vorteile „hinsichtlich der Energiekosten, der Arbeitswirtschaft, der Wartung, der Steuerung und der Umweltbeeinflussung des Elektroantriebes“ (Fricke 2014). Die Hauptrisiken im Zusammenhang mit den variablen Bewässerungskosten bestehen bei der Entwicklung der Energiepreise, z. B. kann im Kontext des Ukraine-Kriegs ein Dieselantrieb bei der Bewässerungsanlage die variablen Kosten der Bewässerung signifikant in die Höhe treiben und die Wirtschaftlichkeit der Bewässerungsmaßnahmen beeinträchtigen. Weitere Risiken umfassen mögliche Einführung bzw. Änderung der Wasserentnahmegebühren sowie eine Preissteigerung für Energie zum Wassertransport.

Die Höhe der fixen Kosten der Bewässerung hängen in erster Linie von der ausgewählten Bewässerungstechnologie ab. Wie im Fall der variablen Kosten sind diese bei der Tropfbewässerung am höchsten, geprägt durch hohe Kapitalkosten für die Tropfschläuche (de Witte 2018; Gramm 2014). Die geringsten Kapitalkosten wurden bisher für die Kreisberegnung ermittelt (Gramm 2014). Der Anteil der fixen Bewässerungskosten in den gesamten kulturspezifischen Bewässerungskosten hängt u. a. vom Umfang der Bewässerung ab: „[e]ine Steigerung des Nutzungsumfangs führt zu einer Kostendegression, weil sich die Fixkosten auf eine größere Menge erbrachter Leistungen verteilen“ (Gramm 2014). Die Nebeneffekte solcher Degression von fixen Kosten sind steigende variable Kosten proportional zum steigenden Bewässerungsumfang sowie der sogenannte Rebound-Effekt in Bezug auf die Wassernutzung. Der Rebound-Effekt – auch *irrigation paradox* oder *Jevon's paradox* – bezieht sich auf das Phänomen, dass der Wasserverbrauch durch steigende Effizienz der Bewässerung nicht reduziert wird und sogar zunehmen kann (Grafton et al. 2018; Sears et al. 2018). Neben der betrieblichen Strategie, die fixen Kosten der Bewässerung pro Hektar zu reduzieren, kann dieser Effekt auch infolge der betrieblichen Umstellung auf effizientere und wassersparsamere Bewässerungsverfahren (Grafton et al. 2018; Sears et al. 2018; Rodríguez-Díaz et al. 2011; Berbel et al. 2015) entstehen, wenn diese (i) eine Bewässerungsintensivierung von Kulturen mit starker Mehrertrag-Response auf Wasserzugabe, (ii) eine Umstellung auf den Anbau höherwertiger, wasserintensiver Kulturen oder (iii) eine Erweiterung der bewässerten Fläche mit sich zieht.

Neben der Art der Bewässerungstechnik bestimmen auch die Zusammensetzung und die Merkmale einzelner Infrastrukturbestandteile (Anzahl und Leistung der Wasserpumpen; Anzahl, Länge und Durchmesser von Wasserrohren; Anzahl und Tiefe von Brunnen bzw. Anzahl und Volumina von Wasserspeichern) die Höhe der fixen Bewässerungskosten. Diese hängen wiederum von der bereits zuvor diskutierten Größe der Bewässerungsfläche, von den im Betrieb zur Verfügung stehenden Wassermengen, hydrogeologischen Gegebenheiten und der Wasserherkunft ab. Der Brunnenbau und die Wasserentnahmen aus dem Grundwasser scheinen die flexibelste Option, in Hinsicht auf Standort der Wasserquelle, zu sein, die das Einsparen von Kapitalkosten in Bezug auf erforderliche Leistung der Wasserpumpen und Wasserzuleitung ermöglicht. Die Tiefe der Brunnen, der genaue Standort und entsprechende Kapitalkosten hängen von den hydrogeologischen Gegebenheiten ab. Bei Wasserentnahmen aus Oberflächengewässern können die Brunnenbaukosten erspart werden, dagegen steigen die Kapitalkosten für die Wasserzuleitung proportional zum Abstand der zu bewässerten Fläche von der Wasserquelle. Das gleiche gilt für die Wasserspeicher, deren Bau zusätzlich sehr hohen Investitionsbedarf aufweist.

Die Hauptrisiken für die mögliche Veränderung der Kostenstruktur kann im Zusammenhang mit der zukünftigen Entwicklung der physischen und institutionellen Wasserverfügbarkeit und Wassernachfrage stehen. Grundsätzlich wird sich die Investition in eine Bewässerungsinfrastruktur nicht lohnen, wenn die zukünftigen Niederschlagsmengen im Abschreibungszeitraum ausreichend für die Deckung des Wasserbedarfs angebauter Ackerkulturen sind. Im Fall der Bewässerung mit den Entnahmen aus dem Grundwasser sowie aus Oberflächengewässern spielt sowohl der physische (Wasserstand) als auch institutionelle (Entnahmeerlaubnis) Wasserverfügbarkeit eine Rolle. Die institutionelle Wasserverfügbarkeit basiert zwar zum großen Teil auf dem physischen Dargebot, hängt aber auch von den Wassernutzungsinteressen anderer Akteure sowohl außerhalb als auch innerhalb des landwirtschaftlichen Sektors ab. Bei sinkendem Wasserdargebot infolge von Trockenheitsereignissen sowie bei zunehmenden Interessenkonflikten um die Nutzung der begrenzten Wasserressourcen steigt das Risiko der Kürzung oder Umverteilung von Entnahmeerlaubnissen, was wiederum die Rentabilität von Investitionen in die Bewässerungsinfrastruktur beeinträchtigt.

Der Bau von Wasserspeicherbecken bietet eine Lösung für landwirtschaftliche Betriebe, die einerseits die Wasserverfügbarkeit absichern und andererseits zur Entschärfung der Interessenkonflikte mit Wassernutzer*innen aus anderen Sektoren (z. B. Interessenkonflikte um Grundwasser zwischen Landwirtschaft und Trinkwasserversorgung in einem trockenen Sommer) beitragen kann. Allerdings geht dieses mit einem erhöhten Investitionsbedarf einher. Hinzu kommt, dass im Fall eines Wasserspeichers das Risiko der Interessenkonflikte zwischen landwirtschaftlichen Betrieben zunehmen kann: sollten mehrere Betriebe ein Interesse am Bau eines Wasserspeicherbeckens haben, kann der Wasserbedarf für das Füllen mehrerer Becken das regionale physische und institutionelle Wasserdargebot – sowohl in Form des Niederschlags als auch des Abflusses in umliegenden Fließgewässern im Winterhalbjahr – überschreiten. Als eine mögliche Lösung kommt hier der Einsatz von wassersparenden Bewässerungsansätzen, z. B. Defizitbewässerung, in Frage. Diese gehen allerdings mit möglichen Implikationen für Erträge und Qualität landwirtschaftlicher Produkte einher. Weitere Option stellen digitale Lösungen wie etwa eine sensorbasierte Bewässerungssteuerung dar. Diese ermöglichen eine auf den Wasserbedarf der Pflanzen optimierte Steuerung des Bewässerungszeitpunkts sowie der Wassergabe, was sich positiv auf die Gesamtmenge des für die Bewässerung verbrauchten Wassers auswirken kann.

4 Betriebliche Investitionen in Bewässerungs- und Wasserspeicherungstechnologien

Reaktionen landwirtschaftlicher Betriebe auf Trends zunehmender Trockenheits- und Dürreereignisse aufgrund des Klimawandels stehen einerseits im Zusammenhang mit der Investition in Bewässerungssysteme (Chatzopoulos und Lippert 2016; Bigelow und Zhang 2018) und andererseits mit der Erweiterung des Bewässerungssystems in der Fläche sowie der Einführung (Adoption) von neuen Bewässerungs- (Schuck et al. 2005) und Wasserspeicherungstechnologien. Die Adoption der beiden Technologien impliziert signifikante Investitionen für die Betriebe.

Dieses Kapitel hat das Ziel, anhand der Literaturrecherche die Investitionen in Bewässerungssysteme, ihre Erweiterung in der Fläche sowie Einführung von Wasserspeicherungstechnologien aus der Perspektive der landwirtschaftlichen Anpassung zum Klimawandel (Kapitel 4.1), aus der Perspektive der Technologieübernahme (Kapitel 4.2) sowie aus investitionstheoretischer Perspektive (Kapitel 4.3) zu betrachten. Ein besonderer Fokus liegt dabei an der Diskussion der Barrieren für die Beschaffung, den Ausbau oder die Verbesserung der Bewässerungsinfrastruktur und -technologien sowie für den Bau eines Wasserspeicherbeckens. Weiterhin sollen mögliche Gründe für die beobachtete Zurückhaltung landwirtschaftlicher Betriebe hinsichtlich der Anpassung an den Klimawandel durch Investitionen in Bewässerungssysteme diskutiert werden.

4.1 Perspektive der landwirtschaftlichen Anpassung an den Klimawandel

Der Begriff Anpassung bezeichnet die Response der Akteure – in unserem Fall landwirtschaftlicher Betriebe – auf die signifikanten Umweltänderungen oder Wetterereignisse – in unserem Fall Trockenheit und Dürre in der Vegetationsperiode. Je nach Maß der Response wird in der wissenschaftlichen Literatur zwischen der inkrementellen und transformativen Anpassung (Park et al. 2012) unterschieden. Für Anpassungen innerhalb des landwirtschaftlichen Sektors schlagen einige Autoren weitere zusätzliche Anpassungsformen vor, z. B. systemische Anpassung (Rickards und Howden 2012) oder Übergangsanpassung (Hadarits et al. 2017).

Unter der inkrementellen Anpassung werden eher kurzfristige und kleinere Handlungen (Park et al. 2012; Rickards und Howden 2012; Hadarits et al. 2017) oder ihre Weiterführung und Ausbau verstanden, um die negativen Auswirkungen der Klimavariabilität und Extremwetterereignisse zu mindern oder die möglichen Vorteile besser auszunutzen (Kates et al. 2012). Diese Anpassungsform umfasst in erster Linie Anpassungen im Kulturanbau (Challinor et al. 2014) wie z. B. Änderung der Kultursorten und Aussaattermine und des Managements von Nährstoffen und Ernterückstände (Challinor et al. 2014; Rickards und Howden 2012). Für die Betriebe impliziert die inkrementelle Anpassung, etwas mehr davon zu tun, was bereits getan wird, um mit Klimavariabilität oder Klimaextremen umzugehen (Kates et al. 2012).

Als systemische Anpassung betrachten Rickards und Howden (2012) und Challinor et al. (2014) die Umstellung landwirtschaftlicher Betriebe auf den Anbau neuer z. B. trockenheitsresistenter Kulturarten, Anbaudiversifizierung und andere Formen des Risikomanagements oder Integration der Beweidung in die Nutzung landwirtschaftlicher Flächen. Die Einführung von Agroforstsystemen wäre demnach auch ein Beispiel systemischer Anpassung.

Pelling (2012) und Hadarits et al. (2017) schlagen Übergangsanpassung als eine intermediäre Anpassungsform zwischen inkrementeller und transformativer Anpassung vor. Im Vergleich zur inkrementellen Anpassung legt diese Form größeren Fokus auf Governance-Aspekten, greift aber zu kurz, um als eine transformative Anpassung betrachtet zu werden (Pelling 2012). Auf der Grundlage der Ergebnisse ihrer empirischen Fallstudie schlagen Hadarits et al. (2017) die Gründung oder Änderung der Rolle von Bewässerungsverwaltungsbezirken oder Einführung von Wassermärkten als Beispiele der Übergangsanpassung vor.

Obwohl transformative Anpassung in der Landwirtschaft von mehreren Autoren als erforderlich betont wird, gibt es keine einheitliche Definition dieses Begriffs, dessen Anwendung fallspezifisch und subjektiv zu sein scheint. Grundsätzlich wird erwartet, dass transformative Anpassung groß angelegte innovative Handlungen erfordert, um die Anfälligkeit zu Klimarisiken zu reduzieren (Jakku et al. 2016). In Bezug auf landwirtschaftliche Produktion werden in der wissenschaftlichen Literatur die folgenden Beispiele einer transformativen Anpassung gegeben:

- Übergang vom bewässerten Anbau zum Trockenfeldbau (Challinor et al. 2014);
- Verlegung der landwirtschaftlichen Produktion aus einer Region (Hadarits et al. 2017; Challinor et al. 2014; Vermeulen et al. 2018);
- Wechsel vom Hirtennomadismus zum bewässerten Ackerbau (Vermeulen et al. 2018; Rickards und Howden 2012);
- Einführung neuer Produkte wie Ökosystemleistungen (Rickards und Howden 2012);
- Wechsel von Beweidung zu Stallkonzepten (Vermeulen et al. 2018);
- Wechsel vom Reisanbau zu Aquakultur (Vermeulen et al. 2018);
- Wechsel vom Ackerbau zu Staudenpflanzen (Vermeulen et al. 2018).

Anpassung der Bewässerung – d. h. Änderungen in ihrer Anwendung, Intensität und Häufigkeit – wird von einigen Autoren (Rickards und Howden 2012; Challinor et al. 2014; Hadarits et al. 2017) als inkrementell gesehen. Dabei ist anzumerken, dass in den jeweiligen Fallstudien sowohl die Bewässerungsinfrastruktur als auch die Wassernutzungsrechte vorhanden waren, so dass aus der betrieblichen Perspektive nur standort- und kulturspezifische Änderungen der Bewässerungsintensität und/oder -häufigkeit erforderlich waren, die – sollten sie nicht im Zusammenhang mit Einführung neuer Technologien wie sensorbasierte Bewässerungssteuerung stehen – durchaus als inkrementelle Anpassung betrachtet werden können.

Aus der Sicht der von Rickards und Howden (2012) vorgeschlagenen Kriterien der Dimension des Wandels kann sowohl die Einführung von Bewässerung als auch die Investitionen in Wasserspeicherung als transformative Anpassung betrachtet werden, da diese tiefgreifende Änderungen innerhalb eines Betriebs hervorrufen, die den ganzen Betrieb betreffen, substanzielle Effekte (z. B. auf Erträge) erzielen können und im Fall eines Wasserspeichers und Bewässerungssystems wie Unterflurwässerung nur eingeschränkt reversibel sind. Auch Panda (2018) ist der Meinung, dass ein Wechsel von regenabhängiger Landwirtschaft zur Bewässerungslandwirtschaft, der grundsätzlich eine systemische Anpassung darstellt, im Fall großflächiger Einführung und/oder zusätzlicher Investitionen in langfristige Wasserspeicherungs- und -umverteilungsinfrastruktur als transformative Anpassung betrachtet werden kann.

Die Diskussion um die Anpassungsbarrieren ist eine der Schwerpunkte in der wissenschaftlichen Literatur zur Klimaanpassung, insbesondere seit ihrer Berücksichtigung im vierten Sachstandsbericht des Weltklimarates (Barnett et al. 2015). Grundsätzlich werden Anpassungsbarrieren als Faktoren verstanden, die Anpassung beeinträchtigen oder verhindern, die aber überwunden oder beseitigt werden können (Barnett et al. 2015; Eisenack et al. 2014; Biesbroek et al. 2013; Moser und Ekstrom 2010; Clarke et al. 2016), wodurch sie sich von Anpassungsgrenzen unterscheiden (Eisenack et al. 2014; Moser und Ekstrom 2010).

Da die meisten Erkenntnisse über die Anpassungsbarrieren über Fallstudien gewonnen wurden (Biesbroek et al. 2013; Eisenack et al. 2014), gab es im letzten Jahrzehnt mehrere Versuche und Ansätze, diese Erkenntnisse zu systematisieren und eine Klassifikation der Anpassungsbarrieren zu erarbeiten. In erster Linie wird auf die sozialen und biophysikalischen Dimensionen von Anpassungsbarrieren (Biesbroek et al. 2011; Klein et al. 2014; Clarke et al. 2016; Howden et al. 2007) hingewiesen, wobei jede dieser Dimensionen weitere Kategorien von Barrieren mit jeweils mehreren kontextspezifischen Barrieren umfasst. Die sozialen Anpassungsbarrieren sind besonderes vage definiert und können ein breites Spektrum weiterer Kategorien umfassen wie – je nach Autor – institutionelle, kulturelle, finanzielle, ökonomische, politische, Akzeptanz- und Wissensbarrieren. Einige

Autoren betrachten finanzielle und ökonomische Faktoren (Klein et al. 2014; Howden et al. 2007) als auch institutionelle und Governance bezogene Hindernisse (Barnett et al. 2015; Lee et al. 2023; Oberlack 2017; Clarke et al. 2016) als eigenständige Kategorien von Anpassungsbarrieren.

In Bezug auf die Art der Anpassung wird behauptet, dass sich die Barrieren bei der inkrementellen und bei der transformativen Anpassung unterscheiden (Moser und Ekstrom 2010; Clarke et al. 2016), insbesondere in Bezug auf das *Maß der Einflussnahme* solcher Faktoren wie z. B. Investitionshöhe, Unsicherheits- und Risikograd, Vielzahl der beteiligten Akteure u. ä. (Fedele et al. 2019).

Bei Betrachtung der Anpassungsbarriere für die Anschaffung neuer oder die Erweiterung bestehender Bewässerungssysteme ist davon auszugehen, dass diese vor allem durch finanzielle und biophysikalische Faktoren verhindert werden können. Die finanziellen Faktoren beziehen sich auf Investitionsbedarf, der zum einen mit der zu bewässernden Fläche und den zu bewässernden Kulturen und zum anderen mit der Bewässerungstechnologie im Zusammenhang steht. Die biophysischen Faktoren umfassen in erster Linie die Wasserverfügbarkeit für Bewässerung. Hier ist anzumerken, dass Wasserverfügbarkeit nicht nur eine biophysikalische, sondern auch eine institutionelle Dimension haben kann, die sich auf Wassernutzungsrechte bezieht. Im letzteren Fall ist entsprechend auch mit institutionellen Anpassungsbarrieren zu rechnen. Institutionelle und Governance-Barrieren können auch im Fall einer gemeinsamen Nutzung der Bewässerungsinfrastruktur oder einer Wasserquelle durch mehrere Betriebe von Bedeutung sein.

Die Rolle der Anpassungsbarrieren in Bezug auf Informationszugang und Akzeptanz ist im Fall der Anschaffung oder Erweiterung der Bewässerungssysteme eher als niedrig einzuschätzen, da die Bewässerung eine übliche und bekannte Anpassungsmaßnahme gegen Trockenheitsereignisse darstellt, deren Umsetzung keine Änderung der Einstellungen und Werten sowie Verbesserung der Akzeptanz seitens Landwirt*innen als auch Öffentlichkeit erfordert. Die Unsicherheiten bzgl. des Auftretens der Trockenheitsereignisse oder der Auswirkungen der Maßnahmen können auch als relativ niedrige Barriere eingeschätzt werden, da die bestehenden betrieblichen Erfahrungen mit trockenen Sommern oft ausreichend für eine positive reaktive Investitionsentscheidung sind. Insbesondere wurde in der wissenschaftlichen Literatur nachgewiesen, dass die Erfahrungen mit Extremwetterereignissen (Reilly und Schimmelpfennig 2000) oder die Wahrnehmung ihres Risikos (Reilly und Schimmelpfennig 2000; Li et al. 2017) das Anpassungsverhalten der Landwirt*innen fördern können. Gleichzeitig ist nicht auszuschließen, dass Verfahrens- und systematische Fehler bei der Verarbeitung und Interpretation der Informationen die Anpassung hemmen können (Stupak et al. 2019).

Die betriebliche Entscheidung, in ein Wasserspeicherbecken zu investieren, kann im Vergleich zur Bewässerung durch wesentlich mehr Faktoren sowie ihre stärkere Ausprägung gehemmt werden. So erfordert der Bau eines Wasserspeicherbeckens vergleichsweise höhere Investitionen und steht mit größeren Unsicherheiten in Verbindung als eine Beschaffung von Bewässerungsinfrastruktur. Institutionelle Faktoren beziehen sich nicht nur auf Wassernutzungsrechte, sondern auch auf das Regelsystem in Bezug auf Landnutzung und Landversiegelung, Genehmigung eines Bauwerks, ökologische und technische Anforderungen usw. Da noch nicht alle diese Aspekte durch das bestehende Regelsystem reguliert sein können, impliziert die betriebliche Umsetzung einer Wasserspeicherungsanlage auch institutionelle Anpassungen. Die Akzeptanzbarrieren können im Fall eines Wasserspeichers auch ausgeprägter sein als im Fall der Beschaffung und Erweiterung der Bewässerungsinfrastruktur. Einigen Landwirt*innen kann die erforderliche Teilversiegelung landwirtschaftlicher Fläche schwerfallen und sogar im Widerspruch zu ihrer Identität und ihrem Wertesystem stehen. Akzeptanz seitens der Öffentlichkeit kann eine noch größere Barriere darstellen, wie die Proteste gegen ein Wasserspeicherprojekt in Frankreich gezeigt haben (DER SPIEGEL 2022).

4.2 Perspektive der Technologieadoption

Zilberman et al. (2012) folgend erfordern Anpassungen von Unternehmen und landwirtschaftlichen Betrieben an den Klimawandel bzw. an die Folgen des Klimawandels (Adaptation) wie etwa längere Dürperioden in der Vegetationszeit unter anderem die Einführung neuer Technologien (Adoption). In der Literatur wird Innovation (auch Adoption oder Einführung neuer Technologie) als Änderung des/der durch einen wirtschaftlichen Akteur genutzten Verfahrens oder Technologie verstanden (Zilberman et al. 2012). Unter anderem umfasst Innovation neue Produktionsprozesse, Substitution der Produktionsmittel und Effizienzsteigerung durch Reorganisation der Produktion (Kline und Rosenberg 1986). Die Einführung, Adoption und Akzeptanz neuer Technologien ist ein breites Feld, das sowohl aus Sicht der Wirtschaftswissenschaften als auch Sozialwissenschaften betrachtet werden kann. Dabei wird in der Regel nach Adoption auf individueller Ebene und gesellschaftlicher Akzeptanz oder Akzeptanz in einem Organisationskontext differenziert.

Der Innovationsprozess verläuft über mehrere Phasen – von Erfindung zu Adoption (Kline und Rosenberg 1986). Bei der Anschaffung und Erweiterung der Bewässerungsinfrastruktur, Einführung neuer – z. B. wassernutzungseffizienter oder digitaler sensorgestützter – Bewässerungstechnologien sowie beim Bau eines Wasserspeicherbeckens geht es um die Adoptionsphase, die eine besondere Forschungsaufmerksamkeit in Bezug auf die Gründe und Barrieren für die Adoption oder Akzeptanz neuer Technologien gewonnen hat.

Die für die soziologische und psychologische Forschung entwickelte Theorie des Überlegten Handelns (Ajzen und Fishbein 2002) und Theorie des Geplanten Verhaltens (Ajzen 1985) haben eine breite Anwendung in der Forschung der Technologieadoption gefunden (Taherdoost 2018). Basierend auf der Letzteren wurden solche Ansätze wie ‚Technology Acceptance Model‘ (TAM) (Davis 1989) sowie seine Variationen und Zusammenführungen mit anderen Ansätzen (TAM2, TAM3) (Venkatesh und Davis 2000; Venkatesh et al. 2003; Wixom und Todd 2005) erarbeitet. Der ‚Diffusion of Innovations‘ Ansatz nutzt ebenfalls Erkenntnisse aus Soziologie und Psychologie, um zu ermitteln, wer und warum früher oder später eine Technologie übernimmt. Für einen Überblick der Modelle und Ansätze zur Technologieakzeptanz bzw. Technologieadoption siehe Li (2010), Marangunić und Granić (2015), Koul und Eydgahi (2017) and Taherdoost (2018).

Die oben erwähnten Ansätze und Modelle haben oft den Fokus auf der Verbreitung von Informationstechnologien und erklären ihre Übernahme bzw. Nichtübernahme überwiegend mittels kognitiver und sozialer Faktoren, die für die Technologieadoption sowohl fördernd als auch hindernd sein können. Diese umfassen u. a. Merkmale von Einzelpersonen, ihre eingeworbenen Überzeugungen und Fähigkeiten, wahrgenommene Nützlichkeit und Umsetzbarkeit der Technologie, Einstellungen einer Person zu Technologie und eigenem Verhalten, soziales Umfeld und Kommunikation, Einstellungen und Meinungen anderer Personen u. ä.

Bezugnehmend auf die Innovationen in der Landwirtschaft sowie Adoption neuer Bewässerungstechnologien und die damit verbundenen Investitionsentscheidungen legen eine theoretische Fundierung aus der Wirtschaftspsychologie und den Sozialwissenschaften nahe. Mehrere Studien betonen die Rolle üblicher wirtschaftlicher und struktureller Faktoren für die Innovationen im landwirtschaftlichen Sektor (Roco et al. 2016; Martínez-García et al. 2015; Prokopy et al. 2008). In ihrer Metastudie ermitteln Schulz und Börner (2021) den Zusammenhang zwischen der Einflussnahme einzelner Faktoren und den Merkmalen einer Innovation. So sind z. B. Kreditzugang, Betriebsgröße und Beratungsverfügbarkeit für die jeweils kapital-, land- und knowhow-intensiven Innovationen von Bedeutung. Diese Erkenntnisse sind entsprechend für die Investitionen in den Bau eines Wasserspeicherbeckens, in die Anschaffung oder Erweiterung von Bewässerungsinfrastruktur und in die innovative Bewässerungstechnologien wie digitale sensorgestützte Bewässerung von Relevanz.

Die Bedeutung von kognitiven und sozialen Faktoren scheint größer für die Adoption von Informationstechnologien zu sein. Z. B. ermitteln Canavari et al. (2021) die Einflussnahme von sozialen Normen, wahrgenommenen Nutzen und Umsetzbarkeit einer Technologie auf die Adoption von variabler Bewässerung (*Engl.*: variable rate irrigation technology). Hüttel et al. (2022) kommen zum Ergebnis, dass soziale Normen der

bedeutsamste Faktor bei der Adoption des IT-gestützten Präzisionsackerbaus sind. In Bezug auf Adoption ökologisch-nachhaltiger landwirtschaftlicher Praktiken schlagen Dessart et al. (2019) vor, die in der wissenschaftlichen Literatur ermittelten Verhaltensfaktoren, die landwirtschaftliche Innovationen fördern oder hemmen, drei Kategorien zuzuordnen: dispositionale, soziale und kognitive Faktoren.

Pierpaoli et al. (2013) schlagen vor, zwischen den ex-ante und ex-post Bewertungen von Innovationen zu unterscheiden und aus dieser Perspektive die Anwendung unterschiedlicher Verhaltensmodelle zu betrachten. Die Ergebnisse ihrer Literaturrecherche suggerieren, dass die ex-ante Studien zur Technologieadoption eher die Vorhersagemodelle wie die Theorie des geplanten Verhaltens und die ex-post Studien eher die nutzenbezogenen Modelle anwenden.

Welches Modell die Adoption und Akzeptanz einer bestimmten Technologie plausibler erklären könnte, hängt unter anderem vom einführenden Sektor – gewinnorientierend oder gemeinnützig – ab, sowie von der Technologie selbst (Sunding und Zilberman 2001). Um Akzeptanzbarrieren überwinden zu können, ist es erforderlich, das individuelle Entscheidungsverhalten im jeweiligen Technologiesystem sowie im sozialen Umfeld zu verstehen und die Kerndeterminanten für eine positive Adoptionsentscheidung zu kennen. Wichtig dabei erscheint zudem eine kombinierte Betrachtung von Wirtschaftlichkeits- und Verhaltensaspekten. Sofern eine Technologie sehr teuer ist und geringe ökonomische Anreize oder Potenziale bietet, wird sie ohne anreizschaffende Politik kaum eine Chance auf Akzeptanz haben. Allerdings gibt es eine Vielzahl an neueren Trends im Bereich der digitalen, sensor- und entscheidungsunterstützenden agronomischen Technologien mit hohem und verbessertem Potenzial aus ökonomischer und ressourceneffizienter Sicht, u. a. auch die sensorgestützte Defizitbewässerung, deren Adoptionsraten immer noch gering sind (Evans et al. 2013; Canavari et al. 2021). Das Verständnis von Verhaltensaspekten bei der Entscheidung ist daher von besonderer Relevanz, da diese neben der Förderung auch durch informationspolitische und weiterer Maßnahmen wie etwa der Netzwerketablierung (Hüttel et al. 2022) gezielt und kosteneffizient seitens der öffentlichen Hand adressiert werden können, um Einsatzbarrieren dieser Technologien zu verringern.

Nicht zuletzt ist die Rolle der biophysischen und institutionellen Faktoren bei Innovationen zu erwähnen. Zum Beispiel fördern die Wassermangelerfahrungen die Adoption von Maßnahmen zur Erhöhung bzw. zum Erhalt der Bodenfeuchte (Ding et al. 2009) sowie von effizienteren Bewässerungssystemen (Schuck et al. 2005) und ggf. Wasserspeicherung. Einen ähnlichen Effekt können auch Wasserrechte haben. Ihre Bedeutung wurde bisher überwiegend in Bezug auf die Verringerung des Rebound-Effekts der Bewässerung dargestellt (Berbel et al. 2015; Li und Zhao 2018; Grafton et al. 2018). Die mögliche Auswirkung der Wasserrechte und anderer institutioneller Faktoren auf Adoption wassereffizienter oder Wasserspeicherungstechnologien ist weniger untersucht.

4.3 Investitionstheoretische Perspektive

Aus beiden zuvor diskutierten Perspektiven stellen Investitionen in Bewässerungssysteme (mit und ohne Wasserspeichertechnologie) eine fundamentale Anpassung der betrieblichen Struktur dar, die mit erheblichen Investitionskosten verbunden und nur teilweise reversibel ist. Neben der Bewässerungsinfrastruktur sind maschinelle Erweiterungen, ggfs. eine Investition in Wasserspeicher sowie eine Re-Organisation der betrieblichen Arbeitsprozesse notwendig, die jeweils mit Kosten verbunden sind. Bewässerungssysteme ermöglichen die Reduzierung von Trockenstress der Pflanzen und tragen somit zur Sicherung und Stabilisierung der Erntemengen und Qualitäten bei, was sich wiederum positiv auf die Erlösstruktur auswirkt. Allerdings ist zum Zeitpunkt der Investition das zukünftige Ausmaß von Dürreperioden und die tatsächlichen Erlöszuwächse netto der Bewässerungskosten mit Unsicherheit behaftet. Diese Investitionen müssen unter Unsicherheit bezüglich der Entwicklung des Klimas und der wirtschaftlichen Lage entschieden und durchgeführt werden, die erheblich die zukünftigen Rückflüsse der landwirtschaftlichen Erzeugung und deren Streuung beeinflussen (Antle und Capalbo 2010; Reilly und Schimmelpfennig 2000). Auch existiert eine wissenschaftliche Unsicherheit inwiefern graduelle Veränderungen des Klimas zu einer höheren Frequenz von extremen Wetterereignissen wie etwa

Dürreperioden führen. Landwirtschaftliche Betriebe bzw. investierende Personen müssen somit Erwartungen über zukünftige Entwicklungen bilden. Vor Tätigung der Investition ist somit abzuwägen, inwiefern agronomischen Maßnahmen (siehe Kapitel 3.1) ohne größere Investitionen suffizient sind, um den Wasserbedarf der Pflanzen bei längeren und intensiveren Trockenheitsperioden zu decken (erwartete Rückflüsse ohne Investition) gegenüber den erwarteten Erträgen unter Beregnung und zusätzliche Kosten für Wasser, Arbeit und Unterhaltung der Maschinen (erwartete Rückflüsse mit Investition in Bewässerungssysteme).

Das bedeutet, dass für die Entscheidung die Einschätzung der Unsicherheit der Rückflüsse, u. a. durch die Unsicherheit der zukünftigen Wetterereignisse (Heumesser et al. 2012), Kosten und Erträge, sowie die Möglichkeit eines flexiblen Investitionszeitpunktes relevant sind, z. B. um neuen Information zu berücksichtigen (Carey und Zilberman 2002; Seo et al. 2008).

Vor diesem Hintergrund können derartige Anpassungsinvestitionen als reale Option interpretiert werden (Dixit und Pindyck 1994; Regan et al. 2015). Die Kernidee dieses Ansatzes ist es, dass Investitions- bzw. Anpassungsoptionen existieren, die durch Unsicherheit zukünftiger Rückflüsse, teilweise nicht reversible Investitionskosten und Flexibilität bezüglich des Zeitpunkts der Durchführung der Investition charakterisiert sind. Somit weisen Anpassungsoptionen Parallelen zu einer Finanzoption auf, die an sich einen Wert besitzt, der bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt werden muss. Im Vergleich zum klassischen Kapitalwertkriterium, nach dem eine Investition durchgeführt werden sollte, sofern die Rückflüsse die Investitionskosten überschreiben, wird auf Basis der Realloptionsargumentation ein deutlich höherer Rückfluss verlangt, um die Investition auszulösen. Diese Erhöhung wird durch die Kosten und die stochastische Struktur der Rückflüsse wie etwa deren Unsicherheit bestimmt. Allerdings besteht für Bewirtschaftende die Möglichkeit, über die Zeit zu lernen, was wiederum zu einer Zurückhaltung bei Anpassungsinvestitionen beitragen kann (Quiggin 2008; IPCC 2021). In der Konsequenz kann also Abwarten optimal sein und wird oftmals mit Zurückhaltung trotz starker Markt- und Klimasignale interpretiert, im englischen bekannt unter ‚adaptation reluctance‘ (Ginbo et al. 2021).

Simulationsstudien zur Quantifizierung des Optionswertes, die somit die Relevanz der teilweisen Reversibilität der Investitionskosten und der stochastischen Struktur der Rückflüsse belegen, finden sich mit spezifischem Fokus auf Bewasserungsinvestitionen bei Carey und Zilberman (2002), Seo et al. (2008) und Heumesser et al. (2012).

Bei den Entscheidungen über den Bau eines Wasserspeicherbeckens können die oben diskutierten Hemmnisse in Bezug auf die Höhe der Investitionskosten, Reversibilität sowie zukünftige klimabezogene Unsicherheiten noch größer sein. Bisher gibt es nach unserer Kenntnis keine Studien, die Investitionsentscheidungen einzelner Betriebe in Wasserspeicherbecken untersuchen.

5 Fazit und Ausblick

Die Verfügbarkeit der Ressource Wasser für die deutsche Landwirtschaft wird sich infolge des Klimawandels mit hoher Wahrscheinlichkeit ändern. Zum einen ist mit regionaler, saisonaler und zwischenjähriger Umverteilung des Niederschlags zu rechnen, was zukünftig – je nach Klimaszenario – die Niederschlagsmengen in der Vegetationsperiode negativ beeinflussen kann (siehe Abbildung 1). Auch bei bisher ausreichendem Niederschlag kann die klimatische Wasserbilanz in den Sommermonaten infolge der zunehmenden Temperatur und dadurch steigender Evapotranspiration negativ ausfallen. Entsprechend ist in den meisten Regionen Deutschlands zukünftig mit einem zunehmenden Wasserbedarf im Pflanzenbau zu rechnen. Dieser Bedarf kann nicht immer über agronomische Maßnahmen und/oder Wasserentnahmen für Bewässerung gedeckt werden: die Auswirkungen der ersteren sowie die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der letzteren sind begrenzt und stark standortabhängig.

In diesem Kontext und unter der Annahme, dass Bewässerung zukünftig an Bedeutung gewinnen wird, diskutiert das Working Paper die verschiedenen Möglichkeiten zur Erhöhung der Wasserverfügbarkeit in der Landwirtschaft. Im ersten Teil des Papers sind technische Wasserspeicherungsoptionen und ihre Umsetzbarkeit in der Landwirtschaft diskutiert. Da solche Wasserspeicher nur in Kombination mit Bewässerungsinfrastruktur genutzt werden können, werden darauffolgend auch die Bewässerungsverfahren mit ihren Vor- und Nachteilen kurz dargestellt.

Die Übersicht der Chancen und Risiken der Bewässerung stellt die möglichen Grundlagen der betrieblichen Entscheidungen über die Anschaffung oder die Erweiterung der Bewässerungsinfrastruktur sowie den Bau eines Wasserspeicherbeckens dar. Diese Investitionsentscheidungen werden daher aus Perspektive der Anpassung an den Klimawandel, der Technologieübernahme sowie aus investitionstheoretischer Perspektive diskutiert, mit dem Ziel, die Barrieren zur Adoption der Bewässerungs- und Wasserspeicherungstechnologien zu ermitteln.

Der größte Teil der Literatur zur Anpassungs-, Adoptions- und Investitionsbarrieren betrachtet eine Anpassungsmaßnahme oder Adoption einer Technologie. Dieses Working Paper verdeutlicht an mehreren Stellen einerseits die Wechselwirkungen zwischen den agronomischen Maßnahmen zur Erhöhung der Wasserverfügbarkeit im Boden, dem Bewässerungsverfahren, dem Bewässerungs- und Wasserspeicherungsbedarf und andererseits die möglichen Trade-offs zwischen verschiedenen Investitionen. Z. B. kann die Umsetzung der agronomischen Maßnahmen und Anwendung von wassereffizienten Bewässerungsverfahren den Bewässerungs- und Wasserspeicherungsbedarf eines Betriebes reduzieren. Dies impliziert Entscheidungen über Investitionen – und ihrer Höhe – in Bewässerungs- vs. Wasserspeicherungstechnologien.

Diese Wechselwirkungen und Trade-offs erfordern den Übergang des betrieblichen, aber auch politischen Denkens vom Bewässerungs- zum Wassermanagement, in dem ein Maßnahmenportfolio statt einzelner Maßnahmen zu berücksichtigen ist (Weltin et al. 2021). Dies erhöht die Komplexität der betrieblichen Investitionsentscheidungen, die weiterhin durch klimabezogene, wirtschaftliche und institutionelle Unsicherheiten verstärkt wird.

Die Herausforderung der zukünftigen Forschung im Bereich des landwirtschaftlichen Wassermanagements besteht darin, die betrieblichen Investitionsentscheidungen und ihre Treiber zu verstehen sowie förderpolitische Empfehlungen zu erarbeiten, sowie die landwirtschaftlichen Betriebe bei der Gestaltung und Umsetzung vom Maßnahmenportfolio zur effizienten und schonenden Wassernutzung und zum Erhalt der landwirtschaftlichen Produktion zu unterstützen. Eine der dringenden Aufgaben dabei ist es, für den Entscheidungsprozess sowohl auf der betrieblichen als auch der behördlichen Ebene eine solide Datengrundlage in Bezug auf die bestehende und die zukünftige Wasserverfügbarkeit sowie den Wasserbedarf zu schaffen.

6 Literaturverzeichnis

- Abd El-Wahed, M. H.; Ali, E. A. (2013): Effect of irrigation systems, amounts of irrigation water and mulching on corn yield, water use efficiency and net profit. In: *Agricultural Water Management* 120, S. 64–71. DOI: 10.1016/j.agwat.2012.06.017.
- Ahmadi, Seyed Hamid; Andersen, Mathias N.; Plauborg, Finn; Poulsen, Rolf T.; Jensen, Christian R.; Sepaskhah, Ali Reza; Hansen, Søren (2010): Effects of irrigation strategies and soils on field grown potatoes: Yield and water productivity. In: *Agricultural Water Management* 97 (11), S. 1923–1930. DOI: 10.1016/j.agwat.2010.07.007.
- Ajzen, Icek (1985): From Intentions to Actions: A Theory of Planned Behavior. In: Julius Kuhl und Jürgen Beckmann (Hg.): *Action Control*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 11–39.
- Ajzen, Icek; Fishbein, Martin (2002): *Understanding attitudes and predicting social behavior*. Upper Saddle River, N.J.: Prentice-Hall.
- Amiblu (2023): *Sichere Stauraumssysteme aus GFK für Regen- und Abwasser. Maßgeschneiderte Lösungen für Hochwasser- und Umweltschutz*. Hg. v. Amiblu Holding GmbH (Online Broschüre). Online verfügbar unter <https://www.amiblu.com/wp-content/uploads/Amiblu-GFK-Stauraumssysteme.pdf>, zuletzt geprüft am 08.08.2023.
- ANL (1995): *Landschaftspflegekonzept Bayern, Bd.II.7 Teiche*. Hg. v. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege. Online verfügbar unter https://www.anl.bayern.de/publikationen/landschaftspflegekonzept/doc/lp07_teiche_1995_01_grundinformationen.pdf, zuletzt geprüft am 22.07.2021.
- Antle, J. M.; Capalbo, S. M. (2010): Adaptation of Agricultural and Food Systems to Climate Change: An Economic and Policy Perspective. In: *Applied Economic Perspectives and Policy* 32 (3), S. 386–416. DOI: 10.1093/aep/32.3.386.
- Atkinson, C. J. (2018): How good is the evidence that soil-applied biochar improves water-holding capacity? In: *Soil Use Manage* 34 (2), S. 177–186. DOI: 10.1111/sum.12413.
- Ballmann, Helmut; Bärtsch, Susanne; Böhm, Anke; Franke, Johannes; Füllner, Gert; Hausmann, Andrea et al. (2017): *Klimawandel und Teichwirtschaft. Auswirkungen des Klimawandels auf die Perspektiven in der sächsischen Teichwirtschaft*. Hg. v. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. o.O. Online verfügbar unter <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/28070>, zuletzt geprüft am 22.07.2021.
- Barnett, Jon; Evans, Louisa S.; Gross, Catherine; Kiem, Anthony S.; Kingsford, Richard T.; Palutikof, Jean P. et al. (2015): From barriers to limits to climate change adaptation: path dependency and the speed of change. In: *E&S* 20 (3). DOI: 10.5751/ES-07698-200305.
- Basso, Andres S.; Miguez, Fernando E.; Laird, David A.; Horton, Robert; Westgate, Mark (2013): Assessing potential of biochar for increasing water-holding capacity of sandy soils. In: *GCB Bioenergy* 5 (2), S. 132–143. DOI: 10.1111/gcbb.12026.
- Berbel, Julio; Gutiérrez-Martín, Carlos; Rodríguez-Díaz, Juan A.; Camacho, Emilio; Montesinos, Pilar (2015): Literature Review on Rebound Effect of Water Saving Measures and Analysis of a Spanish Case Study. In: *Water Resour Manage* 29 (3), S. 663–678. DOI: 10.1007/s11269-014-0839-0.
- Biesbroek, G. Robbert; Klostermann, Judith E. M.; Termeer, Catrien J. A. M.; Kabat, Pavel (2013): On the nature of barriers to climate change adaptation. In: *Regional Environmental Change* 13 (5), S. 1119–1129. DOI: 10.1007/s10113-013-0421-y.

- Biesbroek, Robbert; Klostermann, Judith; Termeer, Catrien; Kabat, Pavel (2011): Barriers to climate change adaptation in the Netherlands. In: *Clim Law* 2 (2), S. 181–199. DOI: 10.1163/CL-2011-033.
- Bigelow, Daniel P.; Zhang, Hongliang (2018): Supplemental irrigation water rights and climate change adaptation. In: *Ecological Economics* 154, S. 156–167. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2018.07.015.
- Brühl, Eberhard; Lorenz, Marco (2012): Anpassungsstrategien für den regionalen Pflanzenbau. REGKLAM - Entwicklung und Erprobung eines Integrierten Regionalen Klimaanpassungsprogramms für die Modellregion Dresden, Ergebnisbericht TP 3.3.1. REGKLAM. Hg. v. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG). Nossen. Online verfügbar unter http://www.regklam.de/fileadmin/Daten_Redaktion/Publikationen/Ergebnisberichte/P3.3.1e_Bewaessering_LfULG_EB.pdf, zuletzt geprüft am 16.12.2022.
- Brouwer, C.; Prins, K.; Kay, M.; Heibloem, M. (1988): Irrigation water management: irrigation methods. Hg. v. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy (Training manual, 5). Online verfügbar unter <https://www.fao.org/3/s8684e/s8684e00.htm>, zuletzt geprüft am 30.06.2022.
- Campisano, Alberto; Modica, Carlo (2012): Optimal sizing of storage tanks for domestic rainwater harvesting in Sicily. In: *Resources, Conservation and Recycling* (63), S. 9–16. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344912000535>, zuletzt geprüft am 27.07.2021.
- Canavari, Maurizio; Medici, Marco; Wongprawmas, Rungsaran; Xhakollari, Vilma; Russo, Silvia (2021): A Path Model of the Intention to Adopt Variable Rate Irrigation in Northeast Italy. In: *Sustainability* 13 (4), S. 1879. DOI: 10.3390/su13041879.
- Carey, Janis M.; Zilberman, David (2002): A Model of Investment under Uncertainty: Modern Irrigation Technology and Emerging Markets in Water. In: *Am J Agric Econ* 84 (1), S. 171–183. DOI: 10.1111/1467-8276.00251.
- Chahar, Bhagu Ram; Graillot, Didier; Gaur, Shishir (2012): Storm-water management through Infiltration trenches. In: *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, American Society of Civil Engineers* 138 (3), S. 274–281.
- Challinor, A. J.; Watson, J.; Lobell, D. B.; Howden, S. M.; Smith, D. R.; Chhetri, N. (2014): A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. In: *Nature Clim Change* 4 (4), S. 287–291. DOI: 10.1038/nclimate2153.
- Chatzopoulos, Thomas; Lippert, Christian (2016): Endogenous farm-type selection, endogenous irrigation, and spatial effects in Ricardian models of climate change. In: *Eur Rev Agric Econ* 43 (2), S. 217–235. DOI: 10.1093/erae/jbv014.
- Clarke, Darren; Murphy, Conor; Lorenzoni, Irene (2016): Barriers to Transformative Adaptation: Responses to Flood Risk in Ireland. In: *J. of Extr. Even.* 03 (02), S. 1650010. DOI: 10.1142/S234573761650010X.
- Costa, J. Miguel; Ortuño, Maria F.; Chaves, M. Manuela (2007): Deficit Irrigation as a Strategy to Save Water: Physiology and Potential Application to Horticulture. In: *Journal of Integrative Plant Biology* 49 (10), S. 1421–1434. DOI: 10.1111/j.1672-9072.2007.00556.x.
- Davis, Fred D. (1989): Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology. In: *MIS Quarterly* 13 (3), S. 319. DOI: 10.2307/249008.
- de Witte, Thomas (2018): Wirtschaftlichkeit der Feldbewässerung. In: Sonja Schimmelpfennig, Jano Anter, Claudia Heidecke, Stefan Lange, Klaus Röttcher und Florian Bittner (Hg.): *Bewässerung in der Landwirtschaft - Tagungsband zur Fachtagung am 11./12.09.2017 in Suderburg*. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut (Thünen Working Paper, 85), S. 113–123.
- DER SPIEGEL (2022): Proteste in Frankreich. Polizei spricht von mehr als 60 verletzten Gendarmen bei Demo gegen »Mega-Wasserbecken«. Online verfügbar unter <https://www.spiegel.de/ausland/frankreich-polizei-spricht-von->

mehr-als-60-verletzten-gendarmen-bei-demo-gegen-mega-wasserbecken-a-557116f6-3604-409a-ad50-eea38199881d, zuletzt aktualisiert am 30.10.2022, zuletzt geprüft am 09.02.2023.

Dessart, François J.; Barreiro-Hurlé, Jesús; van Bavel, René (2019): Behavioural factors affecting the adoption of sustainable farming practices: a policy-oriented review. In: *Eur Rev Agric Econ* 46 (3), S. 417–471. DOI: 10.1093/erae/jbz019.

DESTATIS (2011): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Bodenbearbeitung, Bewässerung, Landschaftselemente/Erhebung über landwirtschaftliche Produktionsmethoden (ELPM). Statistisches Bundesamt. Wiesbaden (Fachserie 3, Heft 5). Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Produktionsmethoden/Publikationen/Downloads-Produktionsmethoden/bodenbearbeitung-bewaesserung-2032805109004.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 30.06.2022.

DESTATIS (2021): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Bewässerung in landwirtschaftlichen Betrieben/Landwirtschaftszählung. Statistisches Bundesamt (Fachserie 3). Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Landwirtschaftliche-Betriebe/Publikationen/Downloads-Landwirtschaftliche-Betriebe/bewaesserung-5411205209004.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 30.06.2022.

Ding, Ya; Schoengold, Karina; Tadesse, Tsegaye (2009): The Impact of Weather Extremes on Agricultural Production Methods: Does Drought Increase Adoption of Conservation Tillage Practices? In: *Journal of Agricultural and Resource Economics* 34 (4), S. 395–411. DOI: 10.22004/ag.econ.57631.

Dixit, Avinash K.; Pindyck, Robert S. (1994): Investment under uncertainty. Princeton, New Jersey, Chichester, West Sussex: Princeton University Press. Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/gbv/detail.action?docID=827817>.

DWA (2005): Arbeitsblatt DWA-A 138 Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser. Stand: April 2005. Hennef: DWA (DWA-Regelwerk, A 138).

DWD (2022): Deutscher Klimaatlas. Hg. v. Deutscher Wetterdienst. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaatlas/klimaatlas_node.html, zuletzt geprüft am 23.06.2022.

Eichinger, Joachim; Schwarz, Thomas (2005): Regenwasser versickern – Gebühren sparen. Hg. v. Münchner Stadtentwässerung. München. Online verfügbar unter <https://docplayer.org/17446887-Regenwasser-versickern-gebuehren-sparen-informationen-zu-planung-und-bau-von-versickerungsanlagen-in-muenchen.html>, zuletzt geprüft am 03.08.2021.

Eisenack, Klaus; Moser, Susanne C.; Hoffmann, Esther; Klein, Richard J. T.; Oberlack, Christoph; Pechan, Anna et al. (2014): Explaining and overcoming barriers to climate change adaptation. In: *Nature Clim Change* 4 (10), S. 867–872. DOI: 10.1038/nclimate2350.

English, M. 1990 (1990): Deficit Irrigation. I: Analytical Framework. In: *J. Irrig. Drain Eng.* 116 (3), S. 399–412. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(1990)116:3(399).

Evans, Robert G.; LaRue, Jake; Stone, Kenneth C.; King, Bradley A. (2013): Adoption of site-specific variable rate sprinkler irrigation systems. In: *Irrig Sci* 31 (4), S. 871–887. DOI: 10.1007/s00271-012-0365-x.

Evans, Robert G.; Sadler, E. John (2008): Methods and technologies to improve efficiency of water use. In: *Water Resour. Res.* 44 (7). DOI: 10.1029/2007WR006200.

- Fedele, Giacomo; Donatti, Camila I.; Harvey, Celia A.; Hannah, Lee; Hole, David G. (2019): Transformative adaptation to climate change for sustainable social-ecological systems. In: *Environmental science & policy* 101, S. 116–125. DOI: 10.1016/j.envsci.2019.07.001.
- Flögl, Werner (2012): Weltdeklaration Speicherbecken. In: *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* (64), S. 490–492.
- Fricke, Ekkehard (2014): Wirtschaftlichkeit - Nutzen und Kosten der Bewässerung. In: Michel Rickmann und Heinz Sourell (Hg.): *Bewässerung in der Landwirtschaft*. Clenze: Agrimedia (Themenbibliothek Pflanzenproduktion), S. 111–118.
- Fricke, Ekkehard (2018): Effiziente Bewässerungstechnik und -steuerung – Stand und Trends. In: Sonja Schimmelpfennig, Jano Anter, Claudia Heidecke, Stefan Lange, Klaus Röttcher und Florian Bittner (Hg.): *Bewässerung in der Landwirtschaft - Tagungsband zur Fachtagung am 11./12.09.2017 in Suderburg*. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut (Thünen Working Paper, 85), S. 65–76.
- Fricke, Ekkehard (2022): Einstieg in die Bewässerung – was ist zu beachten? Hg. v. Landwirtschaftskammer Niedersachsen. Online verfügbar unter https://www.lwk-niedersachsen.de/lwk/news/39063_Einstieg_in_die_Bew%C3%A4sserung_%E2%80%93_was_ist_zu_beachten, zuletzt geprüft am 30.08.2022.
- Garré, Sarah; Blanchy, G.; Jarvis, Nick; Larsbo, Mats; Meurer, Katharina H.E.; Lewan, Elisabet et al. (2022): Climasoma: Climate change adaptation through soil and crop management: synthesis and ways forward : Deliverable WP5.D1 : CLIMASOMA final report. Hg. v. Institute for Agricultural and Fisheries Research (ILVO). PPO/PRI AGRO Multifunctioneel Landgebruik. Online verfügbar unter <https://edepot.wur.nl/586993>, zuletzt geprüft am 16.11.2023.
- Geerts, Sam; Raes, Dirk (2009): Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. In: *Agricultural Water Management* 96 (9), S. 1275–1284. DOI: 10.1016/j.agwat.2009.04.009.
- Geiger, Wolfgang F.; Dreiseitl, Herbert (1995): *Neue Wege für das Regenwasser. Handbuch zum Rückhalt und zur Versickerung von Regenwasser in Baugebieten*. München: Oldenbourg.
- Geller, W.; Hupfer, Michael (2012): *Seeökosysteme I: Verbreitung, Entstehung und die physikalisch-chemische Struktur von Seen*. Handbuch Angewandte Limnologie. Weinheim: Wiley-VCH (29. Erg.Lfg. 5/12).
- Ginbo, Tsegaye; Di Corato, Luca; Hoffmann, Ruben (2021): Investing in climate change adaptation and mitigation: A methodological review of real-options studies. In: *Ambio* 50 (1), S. 229–241. DOI: 10.1007/s13280-020-01342-8.
- Gödeke, Henning; Riedel, Angela (2022): *Wirtschaftlich berechnen in unruhigen Zeiten*. Hg. v. Landwirtschaftskammer Niedersachsen. Hannover. Online verfügbar unter https://www.lwk-niedersachsen.de/lwk/news/39282_Wirtschaftlich_berechnen_in_unruhigen_Zeiten, zuletzt aktualisiert am 05.05.2022, zuletzt geprüft am 16.12.2022.
- Gomez-Zavaglia, A.; Mejuto, J. C.; Simal-Gandara, J. (2020): Mitigation of emerging implications of climate change on food production systems. In: *Food research international (Ottawa, Ont.)* 134, S. 109256. DOI: 10.1016/j.foodres.2020.109256.
- Grafton, R. Q.; Williams, J.; Perry, C. J.; Molle, F.; Ringler, C.; Steduto, P. et al. (2018): The paradox of irrigation efficiency. In: *Science (New York, N.Y.)* 361 (6404), S. 748–750. DOI: 10.1126/science.aat9314.
- Gramm, Marina (2014): *Bewässerung in Sachsen*. Hg. v. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG). Dresden, Deutschland (Schriftenreihe des LfULG, 17/2014).

- Grocholl, Jürgen (2014): Wirkung landwirtschaftlicher Anpassungsmaßnahmen auf Bodenwassereffizienz und Pflanzenwasserversorgung. In: Michel Rickmann und Heinz Sourell (Hg.): *Bewässerung in der Landwirtschaft*. Clenze: Agrimedia (Themenbibliothek Pflanzenproduktion), S. 59–64.
- Gujer, Willi (2002): *Siedlungswasserwirtschaft*. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg.
- Hadarits, Monica; Pittman, Jeremy; Corkal, Darrell; Hill, Harvey; Bruce, Kristin; Howard, Allan (2017): The interplay between incremental, transitional, and transformational adaptation: a case study of Canadian agriculture. In: *Regional Environmental Change* 17 (5), S. 1515–1525. DOI: 10.1007/s10113-017-1111-y.
- Heumesser, Christine; Fuss, Sabine; Szolgayová, Jana; Strauss, Franziska; Schmid, Erwin (2012): Investment in Irrigation Systems under Precipitation Uncertainty. In: *Water Resour Manage* 26 (11), S. 3113–3137. DOI: 10.1007/s11269-012-0053-x.
- Howden, S. Mark; Soussana, Jean-François; Tubiello, Francesco N.; Chhetri, Netra; Dunlop, Michael; Meinke, Holger (2007): Adapting agriculture to climate change. In: *PNAS* 104 (50), S. 19691–19696. DOI: 10.1073/pnas.0701890104.
- Hüttel, Silke; Leuchten, Marie-Therese; Leyer, Michael (2022): The Importance of Social Norm on Adopting Sustainable Digital Fertilisation Methods. In: *Organization & Environment* 35 (1), S. 79–102. DOI: 10.1177/1086026620929074.
- IPCC (2021): Summary for Policymakers. In: Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zho (Hg.): *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, S. 3–32.
- IPCC (Hg.) (2022): *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability: Contribution to Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Unter Mitarbeit von H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Polozanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösche, V. Möller, A. Okem, B. Rama. In Press: Cambridge University Press.
- Jakku, E.; Thorburn, P. J.; Marshall, N. A.; Dowd, A-M.; Howden, S. M.; Mendham, E. et al. (2016): Learning the hard way: a case study of an attempt at agricultural transformation in response to climate change. In: *Climatic Change* 137 (3-4), S. 557–574. DOI: 10.1007/s10584-016-1698-x.
- Kates, Robert W.; Travis, William R.; Wilbanks, Thomas J. (2012): Transformational adaptation when incremental adaptations to climate change are insufficient. In: *PNAS* 109 (19), S. 7156–7161. DOI: 10.1073/pnas.1115521109.
- Klein, R. J. T.; Midgley, G. F.; Preston, B. L.; Alam, M.; Berkhout, F. G. H., Dow, K.; Shaw, M. R. (2014): Adaptation opportunities, constraints, and limits. In: Christopher B. Field, Vicente R. Barros, David Jon Dokken, Katharine J. Mach und Michael D. Mastrandrea (Hg.): *Climate Change Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press, S. 899–943.
- Kline, Stephen J.; Rosenberg, Nathan (1986): An Overview of Innovation. In: National Research Council (Hg.): *The Positive Sum Strategy. Harnessing Technology for Economic Growth*. Unter Mitarbeit von Ralph Landau und Nathan Rosenberg. Washington, D.C.: The National Academies Press, S. 275–306.
- Ko, Jonghan; Piccinni, Giovanni (2009): Corn yield responses under crop evapotranspiration-based irrigation management. In: *Agricultural Water Management* 96 (5), S. 799–808. DOI: 10.1016/j.agwat.2008.10.010.
- Konapala, Goutam; Mishra, Ashok K.; Wada, Yoshihide; Mann, Michael E. (2020): Climate change will affect global water availability through compounding changes in seasonal precipitation and evaporation. In: *Nature communications* 11 (1), S. 3044. DOI: 10.1038/s41467-020-16757-w.

Koul, Sahil; Eydgahi, Ali (2017): A systematic review of technology adoption frameworks and their applications. In: *Journal of Technology Management & Innovation* 12 (4), S. 106–113. DOI: 10.4067/S0718-27242017000400011.

KTBL (2014): Technik der Freilandbewässerung. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. Darmstadt. Online verfügbar unter https://www.ktbl.de/fileadmin/user_upload/Artikel/Gartenbau/Freilandbewaesserung/Technik_Freilandbewaesserung.pdf, zuletzt geprüft am 30.06.2022.

Kummu, Matti; Heino, Matias; Taka, Maija; Varis, Olli; Viviroli, Daniel (2021): Climate change risks pushing one-third of global food production outside the safe climatic space. In: *One Earth* 4 (5), S. 720–729. DOI: 10.1016/j.oneear.2021.04.017.

Kunz, Michael; Mohr, Susanna; Werner, Peter C. (2017): Niederschlag. In: Guy P. Brasseur, Daniela Jacob und Susanne Schuck-Zöllner (Hg.): *Klimawandel in Deutschland*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 57–66.

Lamm, Freddie R. (2002): Advantages and disadvantages of subsurface drip irrigation. International Meeting on Advances in Drip/Micro Irrigation. Instituto Canario de Investigaciones Agrarias. Puerto de La Cruz, Tenerife, Canary Island, 02.12.2002. Online verfügbar unter https://d1wqtxts1xze7.cloudfront.net/36203172/ADofSDI-libre.pdf?1420765302=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DADVANTAGES_AND_DISADVANTAGES_OF_SUBSURFA.pdf&Expires=1676638974&Signature=bCVSphFq8iEFUc1FBDIDt8tsoZP-Oyg-AD3ozlvIXJ2FTKfvclxRZWN7-JUvip73Xl5eg8KgyXG1CZeebi4FgSeS1OFCRHPQhxyqTCa3tURm3P9mdm43xjWx~qKhoOdJQe-YL3b83FvjP2JYWiSlvM8DyR3yeu0DXBpPCumuwnZe0mSwZBiz6FiU6Ea2uwh--HOUhL29h2vsGwXaEKLtcrJ9xZk-5zp4mjqrZmR4MamZ1aKObW5wBcXZ3nIIA2aFLIEK5ccQUex~2HhCRWuletqtmI5i-7JLenot61Ehj8N3QzJNZI3EkO7B8Mu~QY184~66eStRWR2Dsc8ij3Hg__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA, zuletzt geprüft am 30.06.2022.

Lamm, Freddie R.; Camp, R. Carl (2007): Subsurface drip irrigation. In: Freddie R. Lamm, James E. Ayars und Francis S. Nakayama (Hg.): *Microirrigation for crop production. Design, operation, and management*. Amsterdam: Elsevier (Developments in Agricultural Engineering, 13), S. 473–551.

LAU (2005): Ableitung, Rückhaltung und Behandlung von Niederschlagswasser mit offenen, die Versickerung begünstigenden, Systemen. Hinweise zur Planung und Bemessung. Landesamt für Umweltschutz. Online verfügbar unter https://lau.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/MLU/LAU/Abwasser/Kommunalabwasser/Niederschlagswasser/Dateien/Fachinformation_2_2010.pdf, zuletzt geprüft am 03.08.2021.

LAWA (2022): Umgang mit Zielkonflikten bei der Anpassung der Wasserwirtschaft an den Klimawandel. Hg. v. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA Bericht).

Lee, Seunghan; Paavola, Jouni; Dessai, Suraje (2023): Deeper understanding of the barriers to national climate adaptation policy: the case of South Korea. In: *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 28 (1). DOI: 10.1007/s11027-022-10038-1.

LFU (2005): Arbeitshilfen für den Umgang mit Regenwasser, -Regenrückhaltung. Hg. v. Landesamt für Umweltschutz Baden-Württemberg.

Li, Haoyang; Zhao, Jinhua (2018): Rebound Effects of New Irrigation Technologies: The Role of Water Rights. In: *American Journal of Agricultural Economics* 100 (3), S. 786–808. DOI: 10.1093/ajae/aay001.

Li, Long (2010): A Critical Review of Technology Acceptance Literature. Hg. v. Southwest Decision Sciences Institute Conference. Dallas, TX (2010 Conference Proceedings). Online verfügbar unter http://www.swdsi.org/swdsi2010/sw2010_preceedings/papers/pa104.pdf, zuletzt geprüft am 16.02.2023.

Li, Sen; Juhász-Horváth, Linda; Harrison, Paula A.; Pintér, László; Rounsevell, Mark D. A. (2017): Relating farmer's perceptions of climate change risk to adaptation behaviour in Hungary. In: *Journal of Environmental Management* 185, S. 21–30. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.10.051.

LLUR (2012): Betrieb von Info-Brief zum Thema: Regenrückhaltebecken / Regenklärbecken im ländlichen Raum und die Entsorgung der Schlämme. Hg. v. Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein. Online verfügbar unter https://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/A/abwasser/Downloads/Infobrief.pdf?__blob=publicationFile&v=1, zuletzt geprüft am 02.08.2021.

LTZ Augustenberg (2014): Feldversuchswesen Ackerbau - Produktionstechnische Versuche 2014 - Vorläufige Versuchsergebnisse. Wassereffizienz und Beregnungswürdigkeit versch. Kulturen und Sorten (V09-03). Hg. v. Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg, Referat 11. Forchheim. Online verfügbar unter https://ltz.landwirtschaft-bw.de/pb/site/pbs-bw-mlr/get/documents_E-1854382525/MLR.LEL/PB5Documents/ltz_ka/Arbeitsfelder/Pflanzenbau/Bew%C3%A4sserung_DL/Bew%C3%A4sserungErgebnisse/Bew%C3%A4sserungVerschKulturen_DL/V09-03%20Kurzinformativ%202014.pdf, zuletzt geprüft am 16.12.2022.

LUBW (2007): Arbeitshilfe zur DIN 19700 für Hochwasserrückhaltebecken. Hg. v. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg. Referat 41 – Fließgewässer, Integrierter Gewässerschutz. Mannheim.

Lüttger, Andrea; Dittmann, Bärbel; Sourell, Heinz (2005): Leitfaden zur Beregnung landwirtschaftlicher Kulturen. Hg. v. Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg und Landesamt für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flurneuordnung. Frankfurt (Oder) (Landwirtschaft, 6).

Maddrell, Simon (2018): Sand Dams: A Practical & Technical Manual, London: Excellent Development Limited

Maniak, Ulrich (2010): Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure. 6., neu bearb. Aufl. Berlin: Springer.

Marangunić, Nikola; Granić, Andrina (2015): Technology acceptance model: a literature review from 1986 to 2013. In: *Univ Access Inf Soc* 14 (1), S. 81–95. DOI: 10.1007/s10209-014-0348-1.

Martínez-García, Carlos Galdino; Ugoretz, Sarah Janes; Arriaga-Jordán, Carlos Manuel; Wattiaux, Michel André (2015): Farm, household, and farmer characteristics associated with changes in management practices and technology adoption among dairy smallholders. In: *Tropical animal health and production* 47 (2), S. 311–316. DOI: 10.1007/s11250-014-0720-4.

Martínez-Granados, David; Maestre-Valero, José Francisco; Calatrava, Javier; Martínez-Alvarez, Victoriano (2011): The Economic Impact of Water Evaporation Losses from Water Reservoirs in the Segura Basin, SE Spain. In: *Water Resources Management* (25).

Moser, Susanne C.; Ekstrom, Julia A. (2010): A framework to diagnose barriers to climate change adaptation. In: *PNAS* 107 (51), S. 22026–22031. DOI: 10.1073/pnas.1007887107.

Namara, R. E.; Nagar, R. K.; Upadhyay, B. (2007): Economics, adoption determinants, and impacts of micro-irrigation technologies: empirical results from India. In: *Irrig Sci* 25 (3), S. 283–297. DOI: 10.1007/s00271-007-0065-0.

Nikolaou, Georgios; Neocleous, Damianos; Christou, Anastasis; Kitta, Evangelini; Katsoulas, Nikolaos (2020): Implementing Sustainable Irrigation in Water-Scarce Regions under the Impact of Climate Change. In: *Agronomy* 10 (8), S. 1120. DOI: 10.3390/agronomy10081120.

- Oberlack, Christoph (2017): Diagnosing institutional barriers and opportunities for adaptation to climate change. In: *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 22 (5), S. 805–838. DOI: 10.1007/s11027-015-9699-z.
- Oweis, Theib; Pala, Mustafa; Ryan, John (1998): Stabilizing Rainfed Wheat Yields with Supplemental Irrigation and Nitrogen in a Mediterranean Climate. In: *Agronomy Journal* 90 (5), S. 672–681. DOI: 10.2134/agronj1998.00021962009000050017x.
- Panda, Architesh (2018): Transformational adaptation of agricultural systems to climate change. In: *WIREs Clim Change* 9 (4). DOI: 10.1002/wcc.520.
- Park, S. E.; Marshall, N. A.; Jakku, E.; Dowd, A. M.; Howden, S. M.; Mendham, E.; Fleming, A. (2012): Informing adaptation responses to climate change through theories of transformation. In: *Global Environmental Change* 22 (1), S. 115–126. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2011.10.003.
- Patt, Heinz; Jüpner, Robert (2020): Hochwasser-Handbuch. Auswirkungen und Schutz. 3., neu bearbeitete Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Pelling, Mark (2012): Resilience and transformation. In: Mark Pelling, David. Manuel-Navarrete und M. R. Redclift (Hg.): *Climate change and the crisis of capitalism*. London: Routledge (Routledge studies in human geography, 37), S. 51–65.
- Pfleger, Ingrid; Rößler, Uwe; Michel, Herbert; Knoblauch, Steffi; Nußbaum, Günter; Werner, Angela et al. (2010): Untersuchungsergebnisse zur Bewässerung in Thüringen. Hg. v. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. Jena (Landwirtschaft und Landschaftspflege in Thüringen, 6/2010). Online verfügbar unter <http://www.tll.de/www/daten/publikationen/schriftenreihe/h2ot1110.pdf>, zuletzt geprüft am 29.08.22.
- Pierpaoli, Emanuele; Carli, Giacomo; Pignatti, Erika; Canavari, Maurizio (2013): Drivers of Precision Agriculture Technologies Adoption: A Literature Review. In: *Procedia Technology* 8, S. 61–69. DOI: 10.1016/j.protcy.2013.11.010.
- Prokopy, L. S.; Floress, K.; Klotthor-Weinkauf, D.; Baumgart-Getz, A. (2008): Determinants of agricultural best management practice adoption: Evidence from the literature. In: *Journal of Soil and Water Conservation* 63 (5), S. 300–311. DOI: 10.2489/jswc.63.5.300.
- Quiggin, John (2008): Uncertainty and Climate Change Policy. In: *Economic Analysis and Policy* 38 (2), S. 203–210. DOI: 10.1016/S0313-5926(08)50017-8.
- Raju, Nandimandalam; Reddy, T.; Munirathnam, P. (2006): Subsurface dams to harvest rainwater - A case study of the Swarnamukhi River basin, Southern India. In: *Hydrogeology Journal* 14, S. 526–531.
- Regan, Courtney M.; Bryan, Brett A.; Connor, Jeffery D.; Meyer, Wayne S.; Ostendorf, Bertram; Zhu, Zili; Bao, Chenming (2015): Real options analysis for land use management: Methods, application, and implications for policy. In: *Journal of Environmental Management* 161, S. 144–152. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.07.004.
- Reilly, John; Schimmelpfennig, David (2000): Irreversibility, uncertainty, and learning: Portraits of adaptation to long-term climate change. In: *Climatic Change* 45 (1), S. 253–278. DOI: 10.1023/A:1005669807945.
- Rickards, L.; Howden, S. M. (2012): Transformational adaptation: agriculture and climate change. In: *Crop Pasture Sci.* 63 (3), S. 240. DOI: 10.1071/CP11172.
- Roco, Lisandro; Poblete, David; Meza, Francisco; Kerrigan, George (2016): Farmers' Options to Address Water Scarcity in a Changing Climate: Case Studies from two Basins in Mediterranean Chile. In: *Environmental management* 58 (6), S. 958–971. DOI: 10.1007/s00267-016-0759-2.

- Rodríguez-Díaz, J. A.; Pérez-Urrestarazu, L.; Camacho-Poyato, E.; Montesinos, P. (2011): The paradox of irrigation scheme modernization: more efficient water use linked to higher energy demand. In: *Span J Agric Res* 9 (4), S. 1000. DOI: 10.5424/sjar/20110904-492-10.
- Ruiz-Sanchez, M. C.; Domingo, R.; Castel, J. R. (2010): Review. Deficit irrigation in fruit trees and vines in Spain. In: *Spanish Journal of Agricultural Research* 8 (S2), S. 5–20.
- Schmidt, Jens (2019): Geschichte der Trinkwasserspeicherung. Archiv deutscher Wassertürme. Online verfügbar unter http://wassertuerme.com/wp-content/uploads/2019/10/FB_Schmidt_Historie-2.pdf, zuletzt geprüft am 22.07.2021.
- Schuck, Eric C.; Frasier, W. Marshall; Webb, Robert S.; Ellingson, Lindsey J.; Umberger, Wendy J. (2005): Adoption of More Technically Efficient Irrigation Systems as a Drought Response. In: *International Journal of Water Resources Development* 21 (4), S. 651–662. DOI: 10.1080/07900620500363321.
- Schulz, Dario; Börner, Jan (Hg.) (2021): Context and Technology Traits Explain Heterogeneity across Adoption Studies of Agricultural Innovations: A Global Meta-Analysis. International Conference of Agricultural Economists. online, 17-31.08.: Unknown.
- Sears, Louis; Caparelli, Joseph; Lee, Clouse; Pan, Devon; Strandberg, Gillian; Vuu, Linh; Lin Lawell, C.-Y. (2018): Jevons' Paradox and Efficient Irrigation Technology. In: *Sustainability* 10 (5), S. 1590. DOI: 10.3390/su10051590.
- Seo, Sangtaek; Segarra, Eduardo; Mitchell, Paul D.; Leatham, David J. (2008): Irrigation technology adoption and its implication for water conservation in the Texas High Plains: a real options approach. In: *Agricultural Economics* 38 (1), S. 47–55. DOI: 10.1111/j.1574-0862.2007.00280.x.
- Shortt, Rebecca; Simcoe, Shelby Jones; Simcoe, Patrick Handyside; Fransen Sonja (2016): Design, Construction and Maintenance of Irrigation Reservoirs in Ontario. Hg. v. Ontario Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs.
- Singh, Kamal; Sharda, Rakesh; Singh, Angrej (2019): Harvesting rainwater from greenhouse rooftop for crop production. In: *Agricultural Research Journal* 56 (3), S. 493–502. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/336136531_Harvesting_rainwater_from_greenhouse_rooftop_for_crop_production, zuletzt geprüft am 27.07.2021.
- SMUL (2014): Anpassungsmaßnahmen des sächsischen Pflanzenbaus an den Klimawandel. Hg. v. Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft. Dresden. Online verfügbar unter file:///C:/Users/stupak/AppData/Local/Temp/REGKLAM-RZ_web.pdf, zuletzt geprüft am 30.08.2022.
- Söder, Mareike; Berg-Mohnicke, Michael; Bittner, Marlene Bittner; Ernst, Stefan; Feike, Til; Frühauf, Cathleen et al. (2022): Klimawandelbedingte Ertragsveränderungen und Flächennutzung (KlimErtrag). Hg. v. Thünen-Institut. Braunschweig (Thünen Working Paper, 198). Online verfügbar unter https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-workingpaper/ThuenenWorkingPaper_198.pdf, zuletzt geprüft am 20.03.2023.
- Sourell, Heinz (2014): Technik - Planung und Anlage der Bewässerung. In: Michel Rickmann und Heinz Sourell (Hg.): *Bewässerung in der Landwirtschaft*. Clenze: Agrimedia (Themenbibliothek Pflanzenproduktion), S. 65–89.
- Stupak, Nataliya; Sanders, Jörn; Heinrich, Barbara (2019): The Role of Farmers' Understanding of Nature in Shaping their Uptake of Nature Protection Measures. In: *Ecological Economics* 157, S. 301–311. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2018.11.022.
- Sun, Hong-Yong; Liu, Chang-Ming; Zhang, Xi-Ying; Shen, Yan-Jun; Zhang, Yong-Qiang (2006): Effects of irrigation on water balance, yield and WUE of winter wheat in the North China Plain. In: *Agricultural Water Management* 85 (1-2), S. 211–218. DOI: 10.1016/j.agwat.2006.04.008.

- Sunding, David L.; Zilberman, David (2001): The Agricultural Innovation Process: Research and Technology Adoption. In: Bruce L. Gardner und Gordon C. Rausser (Hg.): *Handbook of Agricultural Economics*. 6 Bände. Amsterdam: Elsevier (1A), S. 207–261.
- susdrain: Component: Infiltration trenches. Online verfügbar unter https://www.susdrain.org/delivering-suds/using-suds/suds-components/infiltration/infiltration_trench.html, zuletzt geprüft am 03.08.2021.
- Swain, Daniel L.; Singh, Deepti; Touma, Danielle; Duffenbaugh, Noah S. (2020): Attributing Extreme Events to Climate Change: A New Frontier in a Warming World. In: *One Earth* 2 (6), S. 522–527. DOI: 10.1016/j.oneear.2020.05.011.
- Taherdoost, Hamed (2018): A review of technology acceptance and adoption models and theories. In: *Procedia Manufacturing* 22, S. 960–967. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.03.137.
- TLUBN (2007): Thüringer Technische Anleitung Stauanlagen (ThürTA-Stau:2005-06/Fassung:2007-05)). Hg. v. Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt. Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt. Online verfügbar unter https://umwelt.thueringen.de/fileadmin/content/wasser/44_thuer_ta_stauanlagen_2007-05.pdf, zuletzt geprüft am 22.07.2021.
- Torrion, Jessica A.; Stougaard, Robert N. (2017): Impacts and Limits of Irrigation Water Management on Wheat Yield and Quality. In: *Crop Science* 57 (6), S. 3239–3251. DOI: 10.2135/cropsci2016.12.1032.
- Venkatesh; Morris; Davis (2003): User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View. In: *MIS Quarterly* 27 (3), S. 425. DOI: 10.2307/30036540.
- Venkatesh, Viswanath; Davis, Fred D. (2000): A Theoretical Extension of the Technology Acceptance Model: Four Longitudinal Field Studies. In: *Management Science* 46 (2), S. 186–204. DOI: 10.1287/mnsc.46.2.186.11926.
- Vermeulen, Sonja J.; Dinesh, Dhanush; Howden, S. Mark; Cramer, Laura; Thornton, Philip K. (2018): Transformation in Practice: A Review of Empirical Cases of Transformational Adaptation in Agriculture Under Climate Change. In: *Front. Sustain. Food Syst.* 2, Artikel 65. DOI: 10.3389/fsufs.2018.00065.
- Vischer, Daniel; Huber, Andreas (1993): *Wasserbau. Hydrologische Grundlagen, Elemente des Wasserbaus, Nutz- und Schutzbauten an Binnengewässern*. Fünfte, vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer (Springer-Lehrbuch).
- Weltin, Meike; Zasada, Ingo; Hüttel, Silke (2021): Relevance of portfolio effects in adopting sustainable farming practices. In: *Journal of Cleaner Production* 313, S. 127809. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127809.
- Wixom, Barbara H.; Todd, Peter A. (2005): A Theoretical Integration of User Satisfaction and Technology Acceptance. In: *Information Systems Research* 16 (1), S. 85–102. DOI: 10.1287/isre.1050.0042.
- Zilberman, David; Zhao, Jinhua; Heiman, Amir (2012): Adoption Versus Adaptation, with Emphasis on Climate Change. In: *Annu. Rev. Resour. Econ.* 4 (1), S. 27–53. DOI: 10.1146/annurev-resource-083110-115954.
- Zwart, Sander J.; Bastiaanssen, Wim G.M. (2004): Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. In: *Agricultural Water Management* 69 (2), S. 115–133. DOI: 10.1016/j.agwat.2004.04.007.

CRediT Author Statement

Niklas Ebers: Conceptualization; Methodology; Investigation Chapters 1 & 2; Writing - Original draft, Chapters 1 & 2; Writing - Review & Editing Chapters 3, 4, 5.

Nataliya Stupak: Conceptualization; Methodology; Investigation Chapters 3 & 4; Writing - Original draft Chapters 1, 3, 4 & 5; Writing - Review & Editing Chapter 2.

Silke Hüttel: Investigation Chapter 4; Writing - Original Draft Chapter 4; Writing - Review and Editing Chapters 1, 3, 4 & 5.

Mats Woelfert: Investigation Chapter 3; Writing - Original draft Chapters 1, 3.

Hannes Müller-Thomy: Writing - Reviewing and Editing Chapters 1, 2, 3, 4 & 5.

Anhang

Tabelle A 1: Internationale Wasserspeicheroptionen

Demi-Lunes

Demi-Lunes sind kleine halbmondartige Erdbecken, die mit organischem Material ausgelegt werden. Sie werden in der traditionellen Landwirtschaft in Afrika angelegt, um Niederschlagswasser und Oberflächenabfluss zu sammeln. In Trockenphasen trocknet der Boden in Umgebung der Becken aus, in den Becken verbleibt jedoch genug Wasser im Boden, damit Landwirtschaft betrieben werden kann.

Cordons pierreux (Steinbündel Wälle)

Cordons pierreux sind Steinwälle, die auf Feldern mit leichtem Gefälle errichtet werden. Oberflächenwasser soll damit auf dem Feld gespeichert werden und in den Boden versickern. Gleichzeitig kann die Erosion verringert werden. Hauptsächlich werden Cordons pierreux im afrikanischen Raum in der Landwirtschaft eingesetzt.

Sanddamm (sand dams)

Ein Sanddamm ist ein künstlich angelegter Wasserspeicher. Ähnlich zur Speicherung im Grundwasser wird das Wasser hier in den Poren gespeichert. Errichtet werden Sanddämme in saisonal wasserführenden Fließgewässern mit sandigem Flussbett. Häufig sind sie daher in Afrika anzutreffen. Bei Regenereignissen wird das Wasser im Flussbett an einem Damm gestaut. Der im Wasser transportierte Sand sedimentiert vor dem Damm. Über die Zeit entsteht vor dem Damm ein Sandbecken in dem Wasser gespeichert werden kann. Das gespeicherte Wasser macht ca. 40 % des Gesamtvolumens aus (Maddrell 2018). Des Weiteren ist das Wasser vor Verdunstung geschützt und wird durch den Sand auf natürliche Weise filtriert. Durch Pumpen kann das Wasser bei Bedarf aus dem künstlich erzeugten Grundwasserleiter gefördert werden.

Quelle: eigene Darstellung auf der Grundlage der Literaturrecherche.

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

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

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

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

Zitationsvorschlag – Suggested source citation:
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, DOI:10.3220/WP1700732748000

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

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



THÜNEN

Thünen Working Paper 227

Herausgeber/Redaktionsanschrift – *Editor/address*

Johann Heinrich von Thünen-Institut

Bundesallee 50

38116 Braunschweig

Germany

thuenen-working-paper@thuenen.de

www.thuenen.de

DOI:10.3220/WP1700732748000

urn:nbn:de:gbv:253-202311-dn067235-2