

Stupak, Nataliya et al.

Working Paper

Wasserspeicherbecken als Klimaanpassungsoption für den Pflanzenbau in Deutschland: Planung, Umsetzbarkeit, Investitionsbedarf

Thünen Working Paper, No. 278

Provided in Cooperation with:

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

Suggested Citation: Stupak, Nataliya et al. (2026) : Wasserspeicherbecken als Klimaanpassungsoption für den Pflanzenbau in Deutschland: Planung, Umsetzbarkeit, Investitionsbedarf, Thünen Working Paper, No. 278, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig, <https://doi.org/10.3220/253-2025-222>

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/338112>

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.

Wasserspeicherbecken als Klimaanpassungsoption für den Pflanzenbau in Deutschland: Planung, Umsetzbarkeit, Investitionsbedarf

Nataliya Stupak, Niklas Ebers, Ruben von Zepelin, Konstantin Ilgen, Kai
Schröter, Hannes Müller-Thomy

Thünen Working Paper 278

Dr. Nataliya Stupak und Niklas Ebers

Thünen-Institut, Stabsstelle Klima, Boden, Biodiversität

Prof. Dr. Kai Schröter, Dr. Hannes Müller-Thomy und Ruben von Zepelin

Technische Universität Braunschweig, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Abteilung Hydrologie und
Flussgebietsmanagement

Konstantin Ilgen

Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, Arbeitsgebiet Schwimmende Photovoltaik

Thünen Working Paper 278

All rights reserved ©2026 Thünen-Institut

Braunschweig/Germany, Januar 2026

Zusammenfassung

Ausreichende Wasserversorgung ist eine der wichtigsten Herausforderungen für den Pflanzenbau in Deutschland im Kontext des fortschreitenden Klimawandels. Niedrige Grundwasserstände, Änderung der räumlichen Variabilität des Niederschlags, zunehmende Häufigkeit des Niederschlags in Form von Starkregenereignissen sowie Einschränkungen von Wasserentnahmen verringern die Wasserverfügbarkeit für Pflanzen und die Bewässerungssicherheit. Das Verbundprojekt LAWAMAD – Landwirtschaftliches Wassermanagement in Deutschland – untersucht das Potenzial und die Umsetzbarkeit der oberirdischen Wasserspeicherung für eine Erhöhung der Wasserverfügbarkeit für Bewässerung. Wasserspeicherbecken können im Winterhalbjahr gefüllt und im Sommerhalbjahr für die Bewässerung genutzt werden. Somit können die zunehmend ungünstige jahreszeitliche Niederschlagsverteilung ausgeglichen, die Zuverlässigkeit der Bewässerung für Betriebe verbessert sowie die Interessenkonflikte um Wassernutzungen im Sommerhalbjahr abgemildert werden.

Dimensionierung von Wasserspeicherbecken. Für Landschaftsausschnitte in der Magdeburger Börde (Sachsen-Anhalt) und in der Region Weingarten (Rheinland-Pfalz) wurde die Speicherung (i) von Wasserentnahmen aus Fließgewässern I. Ordnung (überregionales Konzept), (ii) von Entnahmen aus Fließgewässern II.-III. Ordnung (regionales Konzept), und (iii) von Oberflächenabfluss (lokales Konzept) untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass in den ausgewählten Landschaftsausschnitten der Abfluss in den Fließgewässern im Winterhalbjahr ausreichend ist, um die für die Bewässerung erforderlichen Wassermengen zwischenspeichern. Die Möglichkeit zur Speicherung von Oberflächenabfluss ist sehr standortspezifisch und stark von den Gelände- und Bodeneigenschaften abhängig. Im Vergleich zu den Abflussmengen in Fließgewässern können bei dieser Option nur deutlich kleinere Wassermengen für die Zwischenspeicherung zurückgehalten werden. Zusätzlich entstehen bei dieser Option Interessenkonflikte zwischen Wasserspeicherung und Erosionsschutz.

Planung von Wasserspeicherbecken und Ermittlung des Investitionsbedarfs. Der Bau eines Wasserspeicherbeckens ist eine kostenintensive Maßnahme. Je nach Gesamtvolumen des Beckens, liegt der Investitionsbedarf für 1 m³ im Folienbecken gespeichertes Wasser zwischen 20-70 €. Dieser Preis umfasst neben den Bauarbeiten und Materialien auch technische Anlagen und Baunebenkosten. Die Wirtschaftlichkeit der Wasserspeicherung kann durch (i) Minderung des Bewässerungs- und Wasserspeicherungsbedarfs, (ii) Verringerung der Kosten durch die Bauform und Ausführung des Wasserspeicherbeckens, und (iii) multifunktionale Nutzung des Wasserspeicherbeckens, z. B. für Energieerzeugung verbessert werden.

Synergien zwischen Wasserspeicherung und Energieerzeugung. Die Ergebnisse zeigen auf, dass bei maximaler Belegung der Wasseroberfläche mit schwimmender Photovoltaik die Verdunstung erheblich reduziert werden kann. Dies wirkt sich positiv auf die Dimensionierung von Speicherbecken und den erforderlichen Investitionsbedarf aus. Stromerzeugung stellt eine zusätzliche Einkommensquelle dar und ermöglicht die Einführung von intelligenter Bewässerungssteuerung auch auf den Flächen, die keinen Anschluss an ein Stromnetz haben.

Das Potenzial und die Umsetzbarkeit der oberirdischen Wasserspeicherung sind in breiterem rechtlichem und politischem Kontext zu betrachten. Erforderlich ist die einheitliche und ökologisch sichere Regelung von Entnahmen aus Fließgewässern und Erteilung von wasserrechtlichen Erlaubnissen. Weiterentwicklungen des Wasserhaushaltsgesetzes und des Erneuerbaren Energien Gesetzes sind geboten, um die Synergien zwischen Wasserspeicherung und Energieerzeugung auszuschöpfen. Um das ganze Potenzial von Wasserspeicherbecken für die landwirtschaftliche Wasserversorgung, den Grundwasserschutz und weitere gesellschaftliche Leistungen (z. B. Hochwasserschutz, Energieerzeugung) auszuschöpfen, soll die Wasserspeicherung zukünftig besser koordiniert und in die räumliche Landschaftsplanung integriert werden.

Schlüsselwörter: Klimaanpassung, Wassermanagement, Wasserspeicherung für Bewässerung, schwimmende Photovoltaik

JEL-Codes: Q15, Q25, Q42, Q54, Q55

Abstract

Sufficient water supply is one of the major challenges for German crop production in the context of advancing climate change. Low groundwater levels, changes in rainfall patterns, and increasing frequency of precipitation in form of heavy rainfall together with restrictions on water extraction for irrigation reduce water availability for crops and reliability of irrigation. The joint research project LAWAMAD – Agricultural Water Management in Germany – examines the potential and feasibility of water storage to increase water availability for crop production. The main principle of this technical measure is to store water extracted in winter and use it for irrigation in summer. In this way the increasingly unfavourable rainfall distribution can be balanced, the reliability of irrigation improved, and the seasonal conflicts of interests regarding water use alleviated.

Dimensioning of water storage reservoirs. The storage of (i) water extractions from watercourses of 1st order (supra-regional concept), (ii) water extractions from watercourses of 2nd and 3rd order (regional concept) and (iii) surface runoff in case of heavy rain (local concept) was examined for two case studies in Magdeburg Börde (Saxony-Anhalt) and the Weingarten region (Rhineland-Palatinate). The results demonstrate, that for these cases the river discharge in winter is sufficient for storing necessary amounts of water for irrigation. Storage of surface run-off is very site-specific and depends strongly on terrain and soil characteristics. Comparing with the levels of river discharge, much smaller amounts of water for storage can be generated when implementing the local concept. Furthermore, the conflicts of interests between water storage and soil protection from erosion are to be considered.

Planning of water storage reservoirs investment requirements. The construction of water storage reservoirs for securing irrigation implies high investment requirements ranging between 20-70 € per 1 m³ of stored water, depending i. a. on the total volume of a reservoir. These estimated investment costs cover construction works, materials, technical facilities and ancillary expenses. The economic efficiency of water storage can be improved by (i) measures reducing irrigation demand and therefore water storage needs, (ii) decreasing investment requirements by choice of the reservoir's construction form and design, and (iii) multifunctional use of water storage reservoirs, i. e. for energy production.

Synergies between water storage and power generation. The research results demonstrate, that the maximum coverage of water surface with floating photovoltaic can significantly reduce evaporation from a water storage reservoir, which has positive effects on dimensioning of the latter and the corresponding investment costs. Power generation constitutes an additional income source for agricultural producers and enables implementation of intelligent irrigation scheduling systems on farmland without connection to electricity supply.

The potential and feasibility of water storage for irrigation are to be considered in a broader legal and political context. There is a clear need for coherent and environmentally safe regulation of water extractions from watercourses and for issuance of water extraction permits. Amendments to the Germany's Federal Water Act and the Renewable Energy Act are advisable for exploiting the synergies between water storage for irrigation and power generation. In the future, water storage should be better coordinated and integrated into regional landscape planning, in order to exploit the full potential of storage reservoirs both for agricultural water supply and groundwater protection as well as for provision of further public services such as flood protection and power generation.

Key words: climate adaptation, crop production, water management, water storage for irrigation, floating photovoltaic

JEL-Codes: Q15, Q25, Q42, Q54, Q55

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	i
Abstract	ii
Verzeichnis der Abbildungen	iv
Verzeichnis der Tabellen	vi
Verzeichnis der Formel	viii
Verzeichnis der Abkürzungen	ix
1 Einleitung	1
2 Fallstudien	3
2.1 Landschaftsausschnitt Magdeburger Börde (Sachsen-Anhalt)	3
2.2 Landschaftsausschnitt Weingarten (Rheinland-Pfalz)	5
3 Dimensionierung von Wasserspeicherbecken	8
3.1 Methodik	9
3.1.1 Regionales und überregionales Wasserspeicherkonzept	9
3.1.2 Lokales Wasserspeicherkonzept	14
3.2 Ergebnisse für den Landschaftsausschnitt Magdeburger Börde	15
3.3 Ergebnisse für den Landschaftsausschnitt Weingarten	23
3.4 Fazit zur Dimensionierung von Wasserspeicherbecken	28
4 Planung von Wasserspeicherbecken und Ermittlung des erforderlichen Investitionsbedarfs	29
4.1 Wasserspeicherbeckenvarianten Fließgewässer „künstlich“	31
4.2 Wasserspeicherbeckenvarianten Fließgewässer „natürlich“	33
4.3 Wasserspeicherbeckenvariante Regen	34
4.4 Fazit zu Wasserspeicherbeckenvarianten	35
5 Mögliche Synergien zwischen Wasserspeicherung und Energieerzeugung	37
5.1 Verdunstungsminderung durch Belegung der Wasserspeicherfläche mit Photovoltaik	39
5.2 Methodik	40
5.3 Ergebnisse	42
5.3.1 Verdunstungsverluste	42
5.3.2 Stromertrag durch FPV	46
5.4 Synergien zwischen Wasserspeicherung und Energieerzeugung	49
6 Diskussion	51
Literaturverzeichnis	54
Anhang	58
A1 Abdichtungsoptionen von Wasserspeicherbecken	58

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1:	Bewässerungsertrag (€/mm) von Kartoffeln zur Auswahl des ersten Landschaftsausschnitts	3
Abbildung 2:	Entwicklung der jährlichen klimatischen Wasserbilanz im RCP 4.5 und 8.5 in der Magdeburger Börde	4
Abbildung 3:	Umsetzbarkeit des lokalen Konzepts für Deutschland in Abhängigkeit der Bodeneigenschaften und Hangneigung	5
Abbildung 4:	Übersicht angebaute Kulturen im Landschaftsausschnitt Weingarten	6
Abbildung 5:	Entwicklung der Niederschlagssummen für den Landschaftsausschnitt Weingarten für den Zeitraum 1950-2020	6
Abbildung 6:	Untersuchte Wasserspeicherkonzepte	8
Abbildung 7:	Konzept zur Speicherdimensionierung	9
Abbildung 8:	Konzeptionierter umgedrehter Pyramidenstumpf zur Darstellung des Speicherbeckenkörpers	10
Abbildung 9:	Vergleich des Abflusses am Pegel Hadmersleben und der Bewässerungsmenge im Landschaftsausschnitt Magdeburger Börde zur Speicherdimensionierung im Beobachtungszeitraum 2007-2020	16
Abbildung 10:	Verdunstungsverluste in Abhängigkeit der Beckentiefe für ein Speicherbecken mit Volumen 130.000 m ³ an einem durchschnittlichen Tag im Juli	18
Abbildung 11:	Vergleich zwischen dem modellierten jährlichen Bewässerungsbedarf und den beobachteten Bewässerungsmengen im Beobachtungszeitraum 2007-2020	19
Abbildung 12:	Simulierter und beobachteter Abfluss am Pegel Hadmersleben im Landschaftsausschnitt Magdeburger Börde für den Zeitraum 1992-2020 (Abflussspitzen abgeschnitten)	19
Abbildung 13:	Vergleich von Abfluss am Pegel Peseckendorf und der Bewässerungsmenge im Landschaftsausschnitt Magdeburger Börde zur Speicherdimensionierung im Zeitraum 2007-2016	21
Abbildung 14:	Übersichtskarte für den Landschaftsausschnitt Weingarten mit den beiden Fließgewässern Kaltenbach und Hainbach	23
Abbildung 15:	Abflussspende für die Einzugsgebiete am Pegel Speyerbach (A) und Woogbach (B)	24
Abbildung 16:	Berechneter Abfluss aus der Abflussspende und Einzugsgebietsgröße für den Kaltenbach (A) und Hainbach (B) im Landschaftsausschnitt Weingarten für den Zeitraum 2000-2021	25
Abbildung 17:	Lage der vier Teilflächen im Landschaftsausschnitt Weingarten	27
Abbildung 18:	Modellierter Oberflächenabfluss für die vier Teilflächen im Landschaftsausschnitt Weingarten	28
Abbildung 19:	Beispiel für den Lageplan für ein rechteckiges und ein quadratisches Wasserspeicherbecken	31
Abbildung 20:	Beispiel für das Querprofil eines Wasserspeicherbeckens	32

Abbildung 21:	Prinzipdarstellung zur Wasserspeicherung in einer natürlichen Vertiefung im Gelände	33
Abbildung 22:	Prinzipdarstellung zum Ausbau einer natürlichen Vertiefung im Gelände für die Vergrößerung des Wasserspeichervolumens	34
Abbildung 23:	Investitionsbedarf für Speicherung von 1 m ³ Wasser je nach Gesamtvolumen eines Wasserspeicherbeckens	35
Abbildung 24:	Schematische Darstellung des PV-systems von Modul bis zur Netzeinspeisung	41
Abbildung 25:	Mittlere jährliche Verdunstungsvolumen über den Beobachtungszeitraum für keinen, 15 % und 90 % Belegungsgrad sowie die vier Speicherbeckenvarianten	42
Abbildung 26:	Mittleres monatliches Verdunstungsvolumen (Linien) im Beobachtungszeitraum für keinen (rot), 15 % (grün) und 90 % (blau) Belegungsgrad sowie Maximum und Minimum der monatlichen Verdunstungsvolumen (farbige Bereiche) für Speicherbeckenvariante 5	43
Abbildung 27:	Mittleres monatliches Verdunstungsvolumen (Linien) und deren Spannweite (resultierend aus Minimum und Maximum) im Beobachtungszeitraum für die vier Speicherbeckenvarianten	44
Abbildung 28:	Mittleres monatliches Verdunstungsvolumen (Linien) im Beobachtungszeitraum für Speicherbeckenvariante 7 mit Entnahme an der Oberfläche (floating offtake) und Entnahme an der Beckensohle (no floating offtake) sowie die Spannweite resultierend aus Minimum und Maximum	46
Abbildung 29:	Mittlere Leistung im Tagesgang zwischen 3 Uhr und 18 Uhr im Beobachtungszeitraum für ein Modul mit Süd-, Ost- und Westausrichtung	46
Abbildung 30:	Mittlere Lufttemperatur und Bewölkungsgrad im Tagesgang zwischen 3 und 18 Uhr	47
Abbildung 31:	Mittlere Leistung im Tagesgang zwischen 3 Uhr und 18 Uhr für ein Modul bei verschiedenen Neigungswinkeln	47

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1:	Entwicklungsstadien, kc-Werte und Wurzeltiefe von Kartoffeln	12
Tabelle 2:	Zusammensetzung aus GCM-RCM Kombination des DWD Kernensembles	13
Tabelle 3:	Monatliche Curve Number-Werte unterschiedlicher Ackerkulturen unter Anbaubedingungen in Deutschland für die Bodengruppe C	14
Tabelle 4:	Erforderliches Speichervolumen im Landschaftsausschnitt Magdeburger Börde für den Zeitraum 2007-2017	17
Tabelle 5:	Bewässerungssicherheit im Landschaftsausschnitt Magdeburger Börde für verschiedene Speichergrößen für den Zeitraum 2020-2065 unter Berücksichtigung der zukünftigen klimatischen Entwicklung im überregionalen Konzept	20
Tabelle 6:	Speichervolumen im Landschaftsausschnitt Magdeburger Börde für den Zeitraum 2007-2016	21
Tabelle 7:	Bewässerungssicherheit im Landschaftsausschnitt Magdeburger Börde für verschiedene Speichergrößen bis 2065 unter Berücksichtigung der zukünftigen klimatischen Entwicklung im regionalen Konzept	22
Tabelle 8:	Potentiell speicherbares Abflussvolumen im Landschaftsausschnitt Weingarten für das Szenario 1 (Entnahme Januar-Februar) und Szenario 2 (November-März)	25
Tabelle 9:	Bewässerungsbedarf der angebauten Kulturen im Landschaftsausschnitt Weingarten für den Zeitraum 2000-2021	26
Tabelle 10:	Bewässerungssicherheit und Speichervolumen im Landschaftsausschnitt Weingarten für zwei Entnahmeszenarien im Beobachtungszeitraum 2000-2021	26
Tabelle 11:	Flächengröße und modellierter Abfluss im Landschaftsausschnitt Weingarten für den Zeitraum 2001 bis 2020	28
Tabelle 12:	Überblick über mögliche Wasserspeicherbeckenvarianten für überregionales, regionales und lokales Wasserspeicherkonzept	30
Tabelle 13:	Investitionsbedarf für vergleichbare Wasserspeicherbecken mit abweichenden technischen Charakteristika	32
Tabelle 14:	Auswahl von Besonderheiten und Vorteilen von FPV-Anlagen gegenüber landbasierten PV-Anlagen	37
Tabelle 15:	Auswahl von Herausforderungen und Nachteilen von FPV-Anlagen gegenüber landbasierten PV-Anlagen mit Literaturhinweis	39
Tabelle 16:	Geometrische Angaben für die vier Speicherbeckenvarianten	39
Tabelle 17:	Übersicht über die modellierten Zeiträume	40
Tabelle 18:	Erklärende Tabelle zu den DWD-Klimastationen und verwendeten Daten für die Ermittlung der Verdunstungsminderung und des Stromertrags für die mit FPV bedeckten Wasserspeicherbecken im Landschaftsausschnitt Magdeburger Börde	40

Tabelle 19:	Relative Änderungen des Verdunstungsvolumen der nahen (NTF) und fernen (LTF) Zukunft gegenüber dem Kontrollzeitraum (C20) für die drei Belegungsgrade und vier Speicherbeckenvarianten	44
Tabelle 20:	Relative Änderungen des Wasserspiegels und der Oberflächentemperatur der nahen (NTF) und fernen (LTF) Zukunft gegenüber dem Kontrollzeitraum C20 für drei Belegungsgrade und vier Speicherbeckenvarianten	45
Tabelle 21:	Stromertrag für 15 % und 90 % Belegungsgrad und die vier Speicherbeckenvarianten für die nach Süden ausgerichtete Anlage	48
Tabelle 22:	Stromertrag für 15 % und 90 % Belegungsgrad und die vier Speicherbeckenvarianten für die nach Osten und Westen ausgerichtete Anlage	48
Tabelle 23:	Die relative Änderung des mittleren Jährlichen Stromertrages für die nahe (NTF) und ferne (LTF) Zukunft sowie Süd- und Ost-West-Anlage für 15 % und 90 % Belegungsgrad und die vier Speicherbeckenvarianten gegenüber dem Kontrollzeitraum C20	49

Verzeichnis der Formel

Formel 1:	Verdunstungsmenge	10
Formel 2:	Wasseroberfläche	10
Formel 3:	Wasserbilanz	11
Formel 4:	Kulturspezifische Verdunstung	11
Formel 5:	Retention	14
Formel 6:	Abflusswirksamer Niederschlag	14
Formel 7:	Effektive Infiltrationskapazität	15
Formel 8:	Stündlicher effektiver Niederschlag	15

Verzeichnis der Abkürzungen

AIDreg	Regionaler Bewässerungsbedarf (Engl.: <i>regional Agricultural Irrigation Demand</i>)
ALB	Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und Landwirtschaftliches Bauwesen Bayern
BLAG ALFFA	Bund-Länder-Arbeitsgruppe Klimaschutz und Klimaanpassung in Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakultur
C20	Kontrollzeitraum
CMIP5	Internationales Klimamodell-Vergleichsprojekt und für den fünften Klimasachstandsbericht der Vereinten Nationen
CN	Curve Number
DIN	Deutsches Institut für Normung
DWD	Deutscher Wetterdienst
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
ET ₀	Grasreferenzverdunstung
ET _c	Kulturspezifische Verdunstung
FAO	Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (Engl.: <i>Food and Agriculture Organisation of United Nations</i>)
FPV	Schwimmende Photovoltaikanlage (Engl.: <i>Floating Photovoltaic</i>)
GCM	Globales Klimamodell
GLM	Generall Lake Modell
GS	Geisenheimer Bewässerungssteuerung
HBV	Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning hydrological model
k _c	Kulturspezifischer Wasserbedarf zu bestimmten Entwicklungsstadien
LAWA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
LAWAMAD	Landwirtschaftliches Wassermanagement in Deutschland
LTF	Langfristiger zukünftiger Zeitraum (Engl.: <i>Long Term Future</i>)
MNQ	Mittlerer Niedrigwasserabfluss
MS	Mittelspannung
NHN	Normalhöhennull (für Höhenmessungen über dem Meeresspiegel)
NS	Niederspannung
NTF	Kurzfristiger zukünftiger Zeitraum (Engl.: <i>Near Term Future</i>)
NWS	Nationale Wasserstrategie
PR	Leistungsverhältnis (Engl.: <i>Performance Ratio</i>)

PV	Photovoltaik
RCM	Regionales Klimamodell
RCP	Repräsentativer Konzentrationspfad
SCS	Soil Conversation Service
TU	Technische Universität
TUW	Technische Universität Wien
vFK	Verfügbare Feldkapazität des Bodens
WHG	Wasserhaushaltsgesetz

1 Einleitung

Auch wenn Deutschland bezüglich des durchschnittlichen Jahresniederschlags ein wasserreiches Land bleiben wird, nimmt der fortschreitende Klimawandel zunehmend Einfluss auf die Wasserverfügbarkeit für die landwirtschaftliche Produktion. Die jahreszeitlichen und regionalen Niederschlagsmuster ändern sich. Vor allem im Winterhalbjahr sind häufigere und intensivere Niederschläge zu erwarten. Infolge der zunehmenden Temperaturen und Verdunstungsraten im Sommerhalbjahr ist zukünftig mit steigendem Wasserbedarf im Pflanzenbau zu rechnen. Die Anzahl und Intensität der Starkregenereignisse werden mit hoher Wahrscheinlichkeit vor allem im Sommer zunehmen (Söder et al. 2022; Ebers et al. 2024). Der stärkere Oberflächenabfluss führt zu niedrigerer Wasserinfiltration und Wasserspeicherung im Boden und erhöht entsprechend den Zusatzwasserbedarf der Kulturpflanzen.

Bewässerung ist eine der wirksamsten Maßnahmen um das zunehmende Risiko der Trockenheits- und Dürreereignisse zu begegnen und landwirtschaftliche Erträge zu stabilisieren (LAWA und BLAG ALFFA 2024). Bisher erfolgt Bewässerung bis zu 70 % mittels Grundwassers (Destatis 2024). Angesichts der klimawandelbedingt sinkenden Grundwasserstände (Wunsch et al. 2022) führen die Grundwasserentnahmen für Bewässerung zu Interessenkonflikten um die begrenzte Ressource Wasser mit anderen wassernutzenden Sektoren, vor allem mit der Trinkwasserversorgung. Um die Trinkwasserversorgung zu sichern, können die landwirtschaftlichen Wasserentnahmen in Situationen mit besonders ausgeprägtem Wassermangel eingeschränkt werden. Somit ist die deutsche Landwirtschaft zunehmend mit der Herausforderung konfrontiert, dass das Wasser physisch und institutionell genau dann fehlt, wenn es besonders erforderlich ist, um Erträge zu sichern.

Das Verbundprojekt LAWAMAD – Landwirtschaftliches Wassermanagement in Deutschland – wurde ins Leben gerufen, um Optionen zur Erhöhung der Wasserverfügbarkeit für die deutsche Landwirtschaft und ihre Umsetzbarkeit zu analysieren. Das Projekt wurde durch die Stabsstelle Klima, Boden, Biodiversität des Thünen-Instituts koordiniert und unter der Beteiligung des Thünen-Instituts für Lebensverhältnisse in Ländlichen Räumen und der Abteilung Hydrologie und Flussgebietsmanagement des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau an der Technischen Universität Braunschweig bearbeitet. Ziel des Projektes ist es, das Potenzial und die Umsetzbarkeit der kleinräumigen oberirdischen Wasserspeicherung zur Klimaanpassung in der Landwirtschaft zu ermitteln. Bei dieser technischen Option können Wasserspeicherbecken im Winterhalbjahr gefüllt und im Sommerhalbjahr für die Bewässerung der Kulturpflanzen genutzt werden. Somit können die zunehmend ungünstige jahreszeitliche Niederschlagsverteilung ausgeglichen, die Zuverlässigkeit der Bewässerung für Betriebe verbessert sowie Interessenkonflikte um die Ressource Wasser abgemildert werden.

Auf Basis von zwei ausgewählten Landschaftsausschnitten wurde im LAWAMAD-Teilprojekt A untersucht, wie eine kleinräumige oberirdische Speicherung von Oberflächenwasser geplant und optimal durchgeführt werden kann. Das Oberflächenwasser umfasst den Oberflächenabfluss im Fall eines Dauer- oder Starkregenereignisses sowie die Entnahmen aus Fließgewässer. Dabei soll ausschließlich die Speicherung von Überschusswasser in Betracht gezogen werden – d. h. von Wasser, welches nicht zur Aufrechterhaltung wichtiger ökologischer Funktionen der Gewässer benötigt wird und welches ohne diese Speicherung ungenutzt in die Meere abfließen würde. Somit wird sichergestellt, dass durch die zusätzliche Bewässerung kein Grundwasser in Anspruch genommen wird, die Grundwasserneubildung nicht eingeschränkt wird und die Ökologie von Oberflächengewässern nicht beeinträchtigt wird.

Das LAWAMAD-Teilprojekt B adressiert die Wirtschaftlichkeit der oberirdischen Wasserspeicherung für unterschiedliche Fruchtfolgen bzw. Kombinationen angebauter Kulturen. Es wurde der Investitionsbedarf für den Bau unterschiedlicher Arten von Wasserspeicherbecken ermittelt, sowie die Synergien zwischen Wasserspeicherung und Energieerzeugung mittels schwimmender Photovoltaik untersucht. Die letzteren haben das Potenzial, die Wirtschaftlichkeit von Wasserspeicherung für Bewässerung zu verbessern.

Im Teilprojekt C wird mit Hilfe von räumlich hochaufgelösten Modellrechnungen flächendeckend für ganz Deutschland untersucht, wie sich der Bewässerungsbedarf und die Bewässerungswürdigkeit in den letzten Jahren entwickelt haben und wie sie sich im Klimawandel voraussichtlich entwickeln werden. Damit sind Aussagen über Trendentwicklungen auf regionaler Ebene (Gemeinde) möglich, die insbesondere bei der Identifikation regionaler Wassernutzungskonflikte helfen können.

Dieses Working Paper fasst die Methodik und die Ergebnisse des LAWAMAD-Teilprojektes A sowie ausgewählte Ergebnisse des LAWAMAD-Teilprojektes B zusammen. In Kapitel 2 werden das Vorgehen bei der Festlegung von zwei Landschaftsausschnitten sowie ihre relevanten Charakteristika beschrieben. Kapitel 3 stellt die Methodik bei der Planung von Wasserspeicherbecken und die Ergebnisse für die beiden Landschaftsausschnitte vor. In Kapitel 4 sind 22 Varianten von Wasserspeicherbecken und der Investitionsbedarf für ihren Bau vorgestellt. Kapitel 5 betrachtet mögliche Synergien zwischen Wasserspeicherung für Bewässerung und Stromerzeugung mittels schwimmender Photovoltaik. Im letzten Kapitel werden das Potenzial der kleinräumigen Wasserspeicherung u. a. im Kontext geltender rechtlicher Rahmenbedingungen diskutiert sowie die offenen Fragen und weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt.

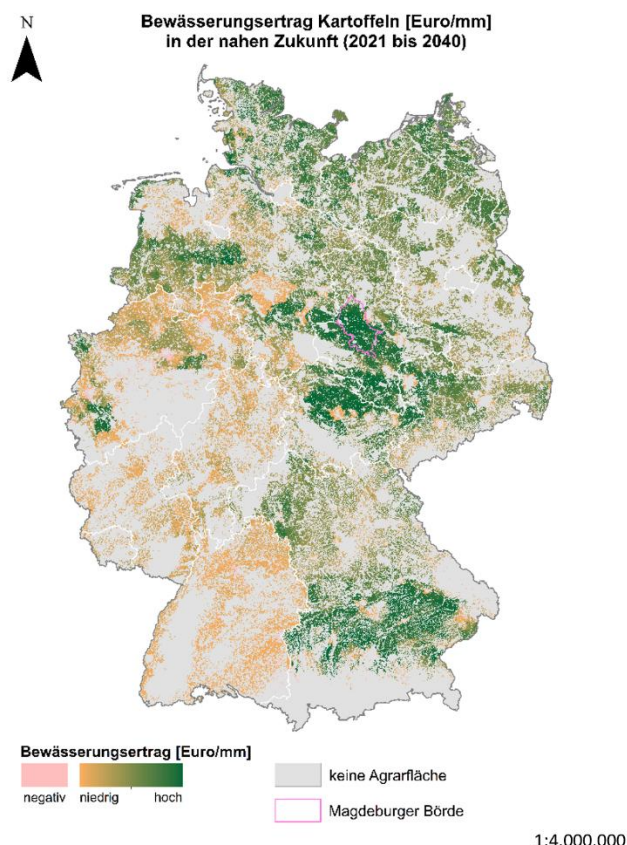
2 Fallstudien

Für die Analysen in den LAWAMAD-Teilprojekten A und B wurden zwei Fallstudien erarbeitet, die in zwei Landschaftsausschnitten liegen. Ein Landschaftsausschnitt ist eine repräsentative landwirtschaftliche Fläche, die über homogene Standorteigenschaften verfügt und sich durch betriebliche und räumliche Strukturen abgrenzt. Die zwei Landschaftsausschnitte wurden mittels verschiedener Kriterien – u. a. Bewässerungsertrag, zukünftige klimatische Entwicklungen, Umsetzbarkeit von Wasserspeicherbecken aufgrund von Bodeneigenschaften und Topographie – ausgewählt, die in diesem Kapitel vorgestellt werden.

2.1 Landschaftsausschnitt Magdeburger Börde (Sachsen-Anhalt)

Für die Auswahl des ersten Landschaftsausschnitts wurden Ergebnisse aus dem Projekt LandCaRe 2020 – Vorsorge und Gestaltungspotenziale in ländlichen Räumen unter regionalen Wetter- und Klimaänderungen berücksichtigt (Gömann et al. 2010). LandCaRe 2020 (2006-2010) war ein Verbundprojekt unter der Beteiligung des Thünen-Instituts. Dabei wurden erste Berechnungen zur regionalen Bewässerungsbedürftigkeit und -würdigkeit verschiedener ackerbaulicher Kulturen für Deutschland durchgeführt. Durch eine Verschneidung dieser beiden Datensätze wurde für die Auswahl des Landschaftsausschnitts für das LAWAMAD-Projekt der Bewässerungsertrag berechnet. Regionen mit einem hohen Bewässerungsertrag sind demzufolge Regionen, in denen neben einem hohen Bewässerungsbedarf auch eine hohe Wirtschaftlichkeit der Bewässerung gegeben ist. Bei einem negativen Bewässerungsertrag ist die Bewässerung nicht wirtschaftlich. Für Kartoffeln – eine besonders bewässerungswürdige Ackerkultur – hat sich in Deutschland die Region Magdeburger Börde (Sachsen-Anhalt) für potentiellen Landschaftsausschnitt ergeben (siehe Abbildung 1).

Abbildung 1: Bewässerungsertrag (€/mm) von Kartoffeln zur Auswahl des ersten Landschaftsausschnitts

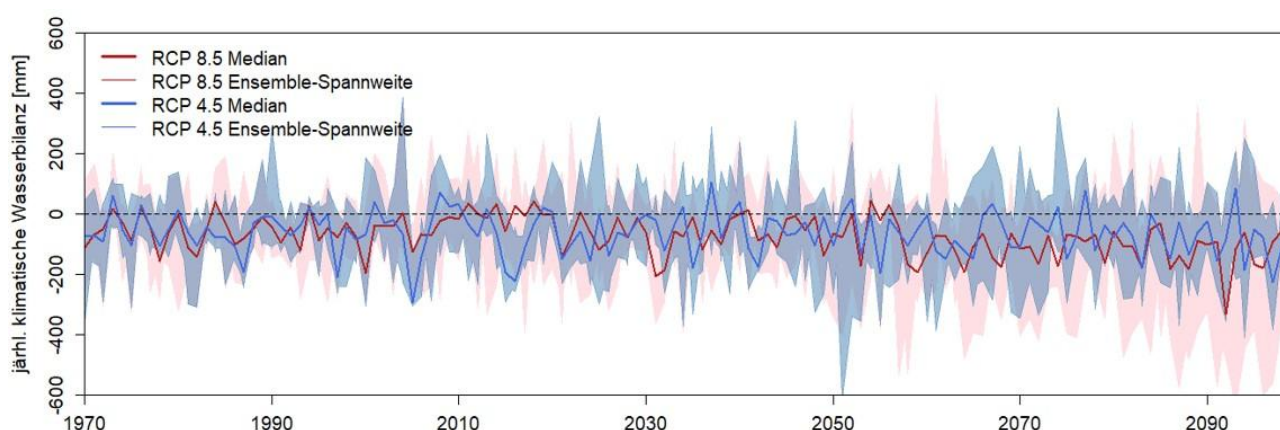


Quelle: eigene Darstellung auf der Grundlage von Daten aus Gömann et al. (2010).

In der Magdeburger Börde ergibt sich für Kartoffeln ein sehr hoher Bewässerungsertrag. Zu beachten ist, dass die zugrunde liegenden Daten aus dem LandCaRe-Projekt aus den Jahr 2010 stammen. Für eine erste Abschätzung und Unterstützung bei der Auswahl des Landschaftsausschnitts wurden die Daten jedoch als ausreichend eingeschätzt. Im LAWAMAD Projekt wird unter anderem im Teilprojekt C ein neuer regionaler Ansatz entwickelt (AIDreg Modell), um den regionalen Bewässerungsbedarf in Deutschland zu bestimmen.

Weiterhin wurde bei der Auswahl des Landschaftsausschnitts die zukünftige klimatische Entwicklung betrachtet. Dadurch kann abgeschätzt werden, ob der Bewässerungsbedarf in der Magdeburger Börde steigen wird und wie sich der Wasserhaushalt saisonal verändert. Für die klimatische Wasserbilanz wurde eine zukünftige Abnahme projiziert (siehe Abbildung 2). Für das Sommerhalbjahr ist dabei mit gleichbleibenden Niederschlägen zu rechnen, im Winterhalbjahr ist eine leichte Zunahme zu erwarten. Die Verdunstung hingegen wird in der Zukunft über das gesamte Jahr ansteigen, was u. a. mit steigenden Temperaturen zusammenhängt.

Abbildung 2: Entwicklung der jährlichen klimatischen Wasserbilanz im RCP 4.5 und 8.5 in der Magdeburger Börde



Quelle: eigene Darstellung auf der Grundlage von DWD-Kernensemble für Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 (siehe Tabelle 2 im Kapitel 3.1).

In der Region Magdeburger Börde wurde anschließend die Kooperation mit einem landwirtschaftlichen Betrieb (im Folgenden bezeichnet als Kooperationspartner) vereinbart, um detaillierte Analysen des Wasserspeicherbedarfs und die Planung von Wasserspeicherbecken zu ermöglichen. Der Kooperationspartner ist ein reiner Ackerbaubetrieb mit für die Region Magdeburger Börde typischen Fruchtfolgen. Auf ca. 1700 ha der durch den Betrieb bewirtschafteten Agrarfläche werden drei Reihenkulturen (Silomais, Kartoffeln und Zuckerrüben), vier Getreidearten (Winterweizen, Dinkel, Wintergerste und Winterroggen) sowie Winterraps angebaut.

Der Landschaftsausschnitt der 1. Fallstudie umfasst ca. 900 ha der betrieblichen Anbaufläche und liegt im nördlichen Harzvorland entlang der Bode. Die geringsten Geländehöhen liegen hier bei 70 m über Normallhöhennull (NHN). Nördlich und südlich steigt das Relief auf maximal 130 m ü. NHN an, wobei jedoch keine Geländesprünge entstehen und das Gefälle flach steigt. Die Agrarflächen im Landschaftsausschnitt liegen an der Bode und sind mit Bewässerungsinfrastruktur erschlossen. Die Flächen mit dem größten Gefälle finden sich im Norden. Die Böden sind überwiegend Schwarzerden mit hohen Schluffanteilen. Sie gehören zu den Lehm- und Tonschluffen und weisen hohe Bodenkennzahlen auf.

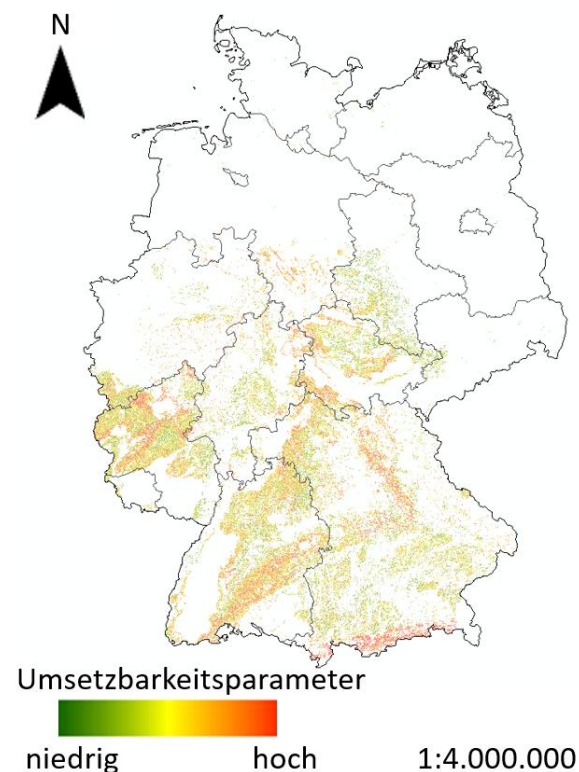
Die Fruchtfolge auf der mit Bewässerungsinfrastruktur erschlossenen Agrarfläche ist wie folgt zusammengesetzt: Zuckerrübe – Winterweizen – Pommeskartoffeln – Winterweizen – Silomais – Winterweizen. Bewässert werden hauptsächlich Kartoffeln (ca. 165 ha), gelegentlich auch Winterweizen und Zuckerrüben. Das zur Bewässerung eingesetzte Wasser stammt aus der Bode – einem betriebsnahen Fließgewässer I. Ordnung, welches im Harz entspringt und im Harzvorland in die Saale mündet. Fließgewässer I. Ordnung sind große, überregionale Gewässer, die in der Zuständigkeit des Bundeslandes liegen und häufig eine zentrale Rolle in der regionalen

Wasserbewirtschaftung spielen. Für die Wasserentnahmen verfügt der Kooperationspartner über eine Wasserentnahmeerlaubnis in Höhe von 440.000 m³/Jahr.

2.2 Landschaftsausschnitt Weingarten (Rheinland-Pfalz)

Für die Auswahl des zweiten Landschaftsausschnitts wurden die Ergebnisse aus dem ersten Landschaftsausschnitt berücksichtigt. Besonders das lokale Konzept (Auffangen und Speicherung des Oberflächenabflusses, siehe Kapitel 3.1.2), das aufgrund der Boden- und Geländeeigenschaften im Landschaftsausschnitt Magdeburger Börde nicht umsetzbar war (siehe Kapitel 3.2.3), sollte genauer untersucht werden. Dafür wurde anhand verschiedener Boden- und Geländeparameter (Tongehalt, Hangneigung) ein Umsetzbarkeitsparameter ermittelt, der für gesamt Deutschland die Anwendbarkeit des lokalen Konzepts anzeigt (siehe Abbildung 3). Ein hoher Umsetzbarkeitsparameter zeigt gute Voraussetzungen bzgl. Boden- und Geländeeigenschaften. Auf Flächen mit einem niedrigen Umsetzbarkeitsparameter ist das Konzept hingegen eher schlecht umsetzbar aufgrund hoher Infiltrationsraten oder geringen Gefälles. Bei deutschlandweiter Betrachtung konnten in Rheinland-Pfalz mehrere Regionen identifiziert werden, in denen das Konzept umsetzbar erscheint. Daher wurde der Fokus bei der Auswahl des zweiten Landschaftsausschnitts auf diese Regionen gelegt.

Abbildung 3: Umsetzbarkeit des lokalen Konzepts für Deutschland in Abhängigkeit der Bodeneigenschaften und Hangneigung

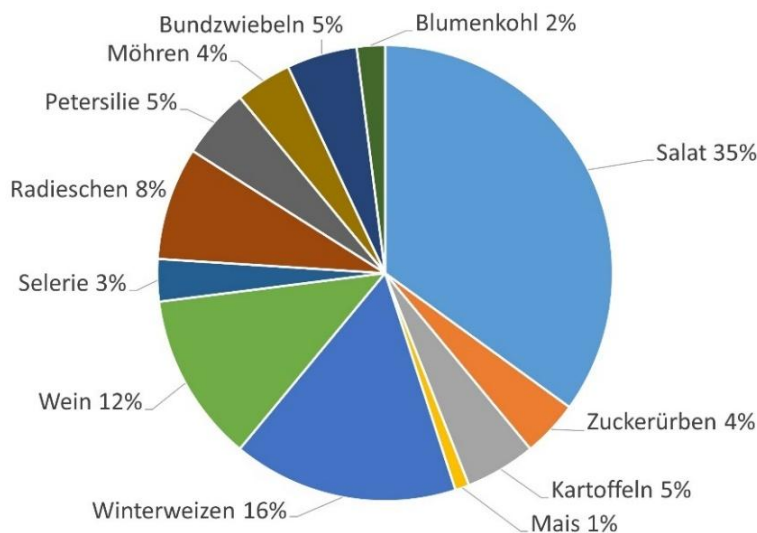


Quelle: eigene Darstellung.

In Kooperation mit dem Ministerium für Wirtschaft, Verkehr, Landwirtschaft und Weinbau Rheinland-Pfalz und dem Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität Rheinland-Pfalz sowie dem Dienstleistungszentrum Rhenipfalz wurde der 2. Landschaftsausschnitt in der Region Weingarten südwestlich von Speyer ausgewählt. Der Landschaftsausschnitt umfasst ein Gebiet von ca. 600 ha Agrarfläche, welches durch Gemüseanbau geprägt ist. Mit 35 % ist Salat die am häufigsten angebaute Gemüsekultur (siehe Abbildung 4). Neben Gemüse werden aber auch typische Ackerkulturen wie Winterweizen (16 %) und Zuckerrüben (4 %) sowie Wein (12 %) angebaut.

Aktuell erfolgt die Bewässerung im Landschaftsausschnitt durch Grundwasserentnahmen. Da sich durch den Klimawandel die Grundwasserneubildungsraten in der Region verringern (Landesamt für Umwelt Rheinland Pfalz) und Grundwasserstände sinken, setzen sich die Akteure in der Region zunehmend mit alternativen Optionen zur Erhöhung der Bewässerungswassermengen auseinander. Da im Landschaftsausschnitt mehrere landwirtschaftliche Betriebe tätig sind, wurde dieser anhand hydrologischer Einzugsgebietsgrenzen abgegrenzt, wodurch eine Bilanzierung der Wassermengen für das Gebiet durchführbar ist. Charakteristisch für den Landschaftsausschnitt sind die kleinräumigen Agrarstrukturen, die im Gegensatz zur Struktur im Landschaftsausschnitt Magdeburger Börde stehen, der von einem einzelnen großflächigen Betrieb dominiert wird.

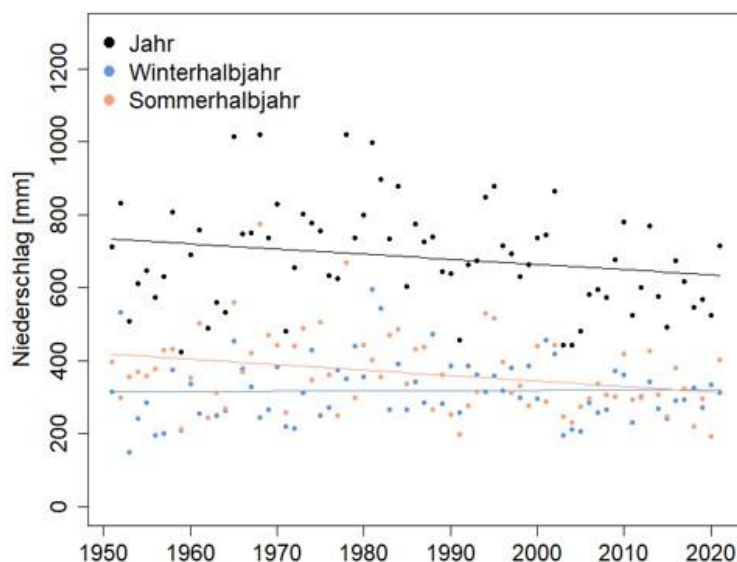
Abbildung 4: Übersicht angebaute Kulturen im Landschaftsausschnitt Weingarten



Quelle: eigene Darstellung auf der Grundlage der Daten, die vom Dienstleistungszentrum Rhenpfalz bereitgestellt wurden.

Die klimatische Entwicklung im Landschaftsausschnitt Weingarten lässt sich aus den beobachteten Niederschlagssummen ableiten (siehe Abbildung 5).

Abbildung 5: Entwicklung der Niederschlagssummen für den Landschaftsausschnitt Weingarten für den Zeitraum 1950-2020



Quelle: eigene Darstellung auf der Grundlage der Daten von DWD climate data center (cdc) an der Klimastation Freimersheim/Pfalz.

Seit 1950 ist ein abnehmender Trend in den Jahresniederschlagssummen zu beobachten. Dies lässt auf ein trockener werdendes Klima schließen, in dem die Bewässerung an Bedeutung gewinnt. Sehr deutlich ist dieser Trend an den Niederschlagssummen des Sommerhalbjahrs zu beobachten. Zu Beginn des Beobachtungszeitraums lagen diese noch deutlich über denen des Winterhalbjahrs. Zum Ende des Beobachtungszeitraums sind die Niederschlagssummen beider Halbjahre ähnlich groß. Die Niederschlagssumme des Winterhalbjahres zeigt keine deutlichen Veränderungen im Beobachtungszeitraum, lediglich ein leichter Anstieg ist zu identifizieren. Wenn sich diese Veränderungen fortsetzen, wird die Niederschlagssumme über das ganze Jahr weiter zurückgehen, besonders im Sommerhalbjahr.

3 Dimensionierung von Wasserspeicherbecken

Im LAWAMAD-Projekt wurden für die Planung der Wasserspeicherbecken drei Speicherkonzepte untersucht (siehe Abbildung 6). Die Wasserspeicherkonzepte unterscheiden sich in der Herkunft des Wassers, die sich auf die Planung des Beckens auswirkt.

Abbildung 6: Untersuchte Wasserspeicherkonzepte

<u>Überregional</u>	<u>Regional</u>	<u>Lokal</u>
Speicherung von Abfluss aus Flüssen (Gewässer I. Ordnung)	Speicherung von Abfluss aus Bächen und kleinen Flüssen (Gewässer II. und III. Ordnung)	Speicherung von Oberflächenabfluss, der bei Starkregen auf betriebseigenen Flächen entsteht
Großes Speichervolumen	Mittleres Speichervolumen	Kleines Speichervolumen
Großes Einzugsgebiet	Mittleres Einzugsgebiet	Kleines Einzugsgebiet
Abhängigkeit von hydrologischen Rahmenbedingungen und überregionalen Niederschlagsereignissen	Abhängigkeit von hydrologischen Rahmenbedingungen und regionalen Niederschlagsereignissen	Starke Abhängigkeit von Bodenparametern und lokalen Starkregenereignissen

Quelle: eigene Darstellung.

Im überregionalen Konzept wird das Wasser aus größeren Fließgewässern (Fließgewässer I. Ordnung) entnommen und zwischengespeichert. Aufgrund der großen Abflusshöhen besonders in den Wintermonaten sind in diesem Konzept die höchsten Speichervolumen erreichbar. Aufgrund des großen Einzugsgebiets ist die Speicherung von Wasser eher von überregionalen Niederschlagsereignissen abhängig und nicht direkt von den Witterungsbedingung am Speicherstandort.

Das regionale Wasserspeicherkonzept unterscheidet sich vom überregionalen Konzept nur darin, dass das Wasser aus kleineren Fließgewässern (Gewässer II. und III. Ordnung) entnommen wird. Das Einzugsgebiet des Speichers ist damit kleiner als im überregionalen Konzept, aber größer als im lokalen Konzept. Die Menge an speicherrelevantem Abfluss hängt von regionalen Niederschlagsereignissen ab, die den Abfluss in Fließgewässer beeinflussen.

Beim lokalen Konzept wird ermittelt, ob der oberflächige Abfluss auf betriebseigenen Agrarflächen, der z. B. bei Starkregenereignissen auftritt, speicherrelevant ist und zu einer Erhöhung des Bewässerungswassers beitragen kann. Im Fokus dieses Konzepts sind kleine Einzugsgebiete. Dementsprechend wird erwartet, dass die speicherbaren Wassermengen in diesem Konzept kleiner als in den beiden anderen Konzepten sind. Außerdem ist dieses Konzept sehr standortspezifisch und abhängig von Bodenparametern, Hangneigung und dem Auftreten von relevanten Regenereignissen.

Für die Dimensionierung von Wasserspeicherbecken sind der Bewässerungsbedarf in der Landwirtschaft und das verfügbare Wasserdargebot entscheidend. Der Bewässerungsbedarf gibt die Wassermenge und den Zeitraum an, in dem Wasser für die Bewässerung der Kulturpflanzen benötigt wird. Das Wasserdargebot hingegen beschreibt den Teil des landschaftlichen Wasserhaushaltes, der für eine Bewässerung zur Verfügung steht. Das zeitliche Zusammenspiel und die jeweilige Höhe dieser beiden Größen bilden die Grundlage für die Dimensionierung eines Wasserspeicherbeckens, das mit Oberflächenwasser befüllt werden soll.

3.1 Methodik

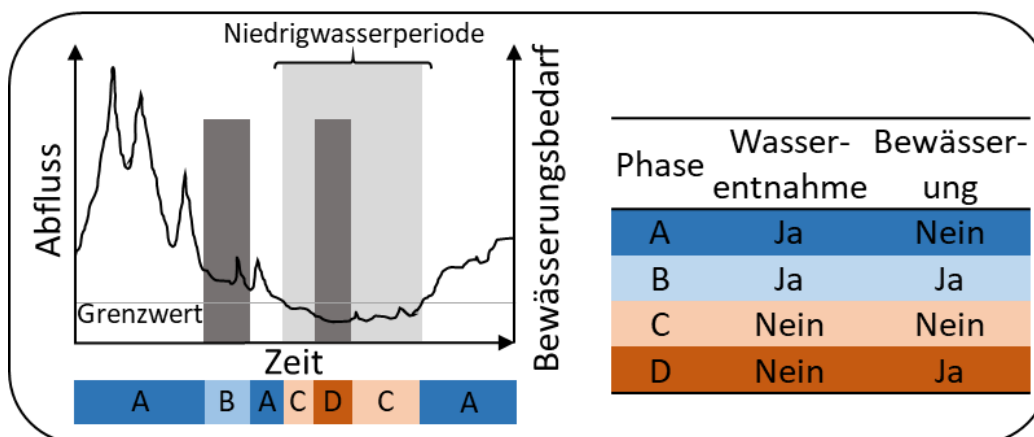
3.1.1 Regionales und überregionales Wasserspeicherkonzept

Die Speicherdimensionierung beschreibt den Prozess zur Identifikation des benötigten Speichervolumens. Dafür wird die zeitliche Überlagerung von Bewässerungsbedarf und Niedrigwasserperioden analysiert, da letztere das Wasserentnahmerecht aus Fließgewässern beschränken können.

Speicherdimensionierung

Konzeptionell lassen sich für die Speicherdimensionierung vier Phasen identifizieren (siehe Abbildung 7). In Phase A findet keine Bewässerung statt und der Abfluss liegt über dem Grenzwert zur Ermittlung von Niedrigwasser. Der Grenzwert gibt an, ab welchem Abflusswert kein Wasser mehr aus dem Fließgewässer entnommen werden darf. Entnahmerechte werden bei Abflüssen kleiner dem Grenzwert beschränkt. In der Wasserwirtschaft ist der mittlere Niedrigwasserabfluss (MNQ) ein häufig verwendeter Grenzwert bei Entnahmerechten. Phase B beschreibt den Bewässerungszeitraum, in welchem das Wasser direkt aus dem Fließgewässer entnommen werden darf, da der Abfluss über dem Grenzwert liegt. Zu einer Beschränkung der Wasserentnahme kommt es in Phase C und D. In diesen Phasen liegt der Abfluss unterhalb des Grenzwertes, wodurch sich eine Niedrigwasserperiode ergibt. Da in Phase C jedoch keine Bewässerung benötigt wird, spielt diese Phase eine untergeordnete Rolle im Dimensionierungsprozess. Phase D hingegen ist die maßgeblich volumenbestimmende Phase der Speicherdimensionierung. Hier liegt der Abfluss unterhalb des Grenzwertes, jedoch ist eine Bewässerung der Kulturpflanzen erforderlich. Das Bewässerungswasser in dieser Phase muss also potenziell aus einem Wasserspeicherbecken entnommen werden.

Abbildung 7: Konzept zur Speicherdimensionierung



Quelle: eigene Darstellung.

Die zeitliche Abfolge der einzelnen Phasen im Jahresverlauf gibt an, in welchem Zeitraum das Speicherbecken befüllt werden kann (Phase A), über welchen Zeitraum Wasser zwischengespeichert wird (Phase B und C) und welche Tage für die Speicherdimensionierung relevant sind (Phase D). Mit Hilfe dieses Konzepts kann ein jährliches Speichervolumen abgeschätzt werden. Für die Vergangenheit kann diese Analyse anhand beobachteter Pegel- und Bewässerungsdaten durchgeführt werden. Um jedoch auch die zukünftige Entwicklung zu berücksichtigen, ist eine Modellierung der Abflussverhältnisse hinsichtlich Niedrigwasserperioden und des zukünftigen Bewässerungsbedarfs anhand von Klimaszenarien notwendig.

Um zu bestimmen in wie vielen Jahren der dimensionierte Speicher ausreichend Bewässerungswasser enthält, wird die Bewässerungssicherheit als Maß angegeben. Sie gibt den Prozentsatz an Jahren an, in denen der

Speicher ausreichend bemessen ist und für die Bewässerung genügend Wasser zur Verfügung gestellt werden kann.

Speicherverluste durch Versickerung und Verdunstung

Verdunstung und Versickerung sind Verluste, die bei der Speicherdimensionierung berücksichtigt werden müssen. Versickerung tritt bei Speicherbecken auf, die nicht komplett abgedichtet sind. In Speicherbecken mit einer einfachen Ton-Innenabdichtung kann die Versickerung nur minimiert werden. Bei Speicherbecken die hingegen mit Kunststoffdichtungsbahnen ausgelegt sind, kann die Versickerung vernachlässigt werden. Für die Analyse wurde die Annahme getroffen, dass die Speicherbecken mit Kunststoffdichtungsbahnen ausgelegt sind und daher keine Versickerungsverluste auftreten.

Die Verdunstung spielt eine große Rolle und ist vor allem für Phase B und C ausschlaggebend, da in diesen Phasen das Wasser im Speicher zwischengespeichert wird, ohne dass es für die Bewässerung benötigt wird. Bei der Speicherdimensionierung wurde die Verdunstung mit Hilfe der Grasreferenzverdunstung (ET_0) und einem wasserabhängigem k_c -Wert nach Vorgaben der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (FAO) berechnet (Allen et al. 1998). Die ET_0 beschreibt dabei als klimatische Größe die Verdunstungsleistung der Atmosphäre. Laut FAO beträgt der k_c -Wert von Wasser für die verdunstungsrelevanten Monate 1,2. Für die Berechnung wurde im Modell ein saisonal variabler k_c -Wert angenommen der in den Wintermonaten bei 0,8 liegt. Für die Berechnung der Verdunstungsmenge wird außerdem die Wasseroberfläche des Speichers benötigt (siehe Formel 1).

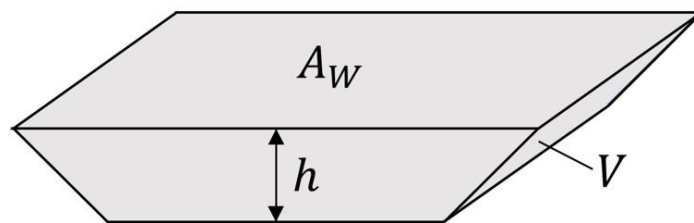
Formel 1: Verdunstungsmenge

$$V_W = ET_0 \cdot k_{c_w} \cdot A_W$$

V_W = Verdunstungsmenge [m^3], ET_0 = Grasreferenzverdunstung [mm], k_{c_w} = k_c -Wert für Wasser und A_W = Wasseroberfläche [m^2]

Die Wasseroberfläche ergibt sich aus der Form des Beckens und dem gespeicherten Volumen. Es wird angenommen, dass das Speicherbecken die Form eines umgedrehten Pyramidenstumpfs entspricht (siehe Abbildung 8). Die Seiten haben dabei eine Neigung von 1:3.

Abbildung 8: Konzeptionierter umgedrehter Pyramidenstumpf zur Darstellung des Speicherbeckenkörpers



A_W = Wasseroberfläche, h = Wasserstand im Becken und V = Speichervolumen im Becken.

Quelle: eigene Darstellung.

Mit Hilfe des Volumens und dem Wasserstand im Becken kann die Wasseroberfläche berechnet werden (siehe Formel 2:

Formel 2: Wasseroberfläche

$$A_W = \left(\left(-3h + 3 \cdot \sqrt{h^2 + \frac{\frac{4}{3}h^3 + \frac{1}{9}V}{h}} \right) + 6 \cdot h \right)^2$$

Technische Verluste

Neben den direkten Verlusten aus den Speicherbecken (Verdunstung und Versickerung) trägt auch die Bewässerungstechnik zu den Verlusten bei und wirkt sich auf die Speicherdimensionierung aus. Während der modellierte phänologische Bewässerungsbedarf nur den Wasserbedarf der Pflanzen analysiert, entstehen während der Bewässerung zusätzliche Verluste durch die Effizienz des Bewässerungssystems und des Rohrleitungssystems. Nikolaou et al. (2020) ermittelt eine Effizienz der Bewässerungstechnik von 90 % für Tropfbewässerung und 70 % für Sprinklersysteme. Für die im Landschaftsausschnitt Magdeburger Börde eingesetzte Bewässerungstechnik kann ein Wirkungsgrad von rund 85 % angenommen werden. Somit gehen 15 % des für die Bewässerung vorhergesehenen Wassers verloren und sind für die Pflanzen nicht zugänglich. Diese Verluste müssen berücksichtigt und das Speicherbecken dementsprechend größer dimensioniert werden.

Bewässerungsbedarf

Eine Modellierung des Bewässerungsbedarfs ist immer dann nötig, wenn keine beobachteten Bewässerungsmengen zur Verfügung stehen oder die zukünftige Entwicklung des Bewässerungsbedarfs analysiert werden soll. Zur Bestimmung des Bewässerungsbedarfs können verschiedene Methoden angewandt werden. Praktische Ansätze sind Bodenfeuchtemessungen mit Instrumenten wie Tensiometern, mit denen das Wasserdefizit der Pflanzen ermittelt werden kann. Außerdem tragen Bodenfeuchtemessungen zur Erstellung von Simulationsmodellen für die Bodenfeuchte bei, die die Simulation des Bewässerungsbedarfs erleichtern. Eine alternative Methode ist die Bestimmung des Bewässerungsbedarfs mit Hilfe von Modellen, die auf der Verdunstung oder der klimatischen Wasserbilanz basieren (Paschold et al. 2009). Eines dieser Modelle ist die Geisenheimer Bewässerungssteuerung, bei dem die Evapotranspiration mit Hilfe von kulturspezifischen k_c -Werten und der Grasreferenzverdunstung (ET_0) berechnet wird. Die einzelnen Bewässerungsmengen werden dann auf der Grundlage der Bodeneigenschaften bestimmt (Paschold et al. 2002). Ursprünglich für die Analyse des phänologischen Bewässerungsbedarfs im Gemüseanbau entwickelt, ist die Geisenheimer Bewässerungssteuerung jedoch vielseitig einsetzbar, sodass sie auch auf verschiedene Ackerkulturen wie Kartoffeln oder Zuckerrüben angewendet werden kann. In dieser Studie wird der phänologische Bewässerungsbedarf auf Grundlage der Geisenheimer Bewässerungssteuerung simuliert, da im Untersuchungsgebiet keine Bodenfeuchtemessungen zur Verfügung stehen.

Dafür wird die Wasserbilanz über das gesamte Jahr für jeden täglichen Zeitschritt ausgeglichen, in dem die kulturspezifische Verdunstung (ET_c) mit dem Niederschlag und einer potentiellen Bewässerung in der Anbauperiode verglichen wird (siehe Formel 3).

Formel 3: Wasserbilanz

$$\text{Wasserbilanz} = \sum_{\text{Start}}^{\text{Ende}} \text{Niederschlag} + \text{Bewässerung} - ET_c$$

ET_c wird anhand von ET_0 berechnet, die durch k_c -Werte angepasst wird, um die Evapotranspiration der einzelnen Kulturen darzustellen (siehe Formel 4). Die k_c -Werte werden im Laufe der Anbauperiode schrittweise angepasst, je nach der phänologischen Entwicklung der Kulturpflanze.

Formel 4: Kulturspezifische Verdunstung

$$ET_c = ET_0 \cdot k_c$$

Die in dieser Studie verwendeten k_c -Werte für Kartoffeln sind in Tabelle 1 dargestellt. Für jedes Entwicklungsstadium wird die Bewässerungsschwelle berechnet. Die Bewässerungsschwelle ist abhängig von der verfügbaren Feldkapazität des Bodens (vFK), der maximalen Durchwurzelungstiefe und der durchwurzelten Zone der Kultur.

Tabelle 1: Entwicklungsstadien, k_c -Werte und Wurzeltiefe von Kartoffeln

Entwicklungsstadium	Beginn des Entwicklungsstadiums ¹ [Tag]	k_c -Werte	Wurzeltiefe [cm]
Stadium 1	1	0.3	5
Stadium 2	102	0.5	15
Stadium 3	140	0.8	60
Stadium 4	220	1.1	60
Stadium 5	270	0.3	5

¹ Die Zählung beginnt zum Start eines Kalenderjahres, 1. Januar = Tag 1.

Quelle: eigene Darstellung auf der Grundlage der k_c -Werte der FAO und der Hochschule Geisenheim sowie den empirischen Daten zu Bewässerungsmengen im Landschaftsausschnitt Magdeburger Börde.

Die vFK gibt an, ob der Wasserhaushalt des Bodens ausreichend ist oder ob eine Bewässerung erforderlich ist. Der Schwellenwert für die Bewässerung liegt bei 65 % vFK, und der Bewässerungsbedarf ergibt sich aus dem Wasserdefizit ab 80 % vFK. Es wird ein Ausgangspunkt für den Bodenwassergehalt festgelegt, der bei 90 % vFK liegt. Die tägliche Wasserbilanz summiert sich fortlaufend über die Anbauperiode und bildet die Gesamtwasserbilanz. Erreicht oder übersteigt die Gesamtwasserbilanz das Defizit, das der Bewässerungsschwelle entspricht, signalisiert sie die Notwendigkeit einer Bewässerung. Wenn die Gesamtwasserbilanz aufgrund von Niederschlägen oder Bewässerung 100 % vFK überschreitet, fließt das überschüssige Wasser in tiefere Bodenschichten ab, wodurch die Gesamtwasserbilanz auf null zurückgesetzt wird. Im Falle übermäßiger Regenfälle, die zu einer Sättigung der groben Bodenporen führen, wird die Berechnung für zwei Tage unterbrochen, um die Entwässerung bis zur Feldkapazität zu erleichtern. Weitere Informationen über die Geisenheimer Bewässerungssteuerung (GS-Modell) sind in Olberz et al. (2018) zu finden.

Bei der Analyse des zukünftigen Bewässerungsbedarfs wurden einige Annahmen getroffen. Es wird angenommen, dass sich die Vegetationsperiode in Zukunft nicht verschieben wird. Außerdem werden für die Zukunft die gleichen k_c -Werte angenommen wie für den Beobachtungszeitraum. Diese Annahmen ermöglichen eine Projektion des Bewässerungsbedarfs mit Implementierung zukünftiger Klimazeitreihen. Darüber hinaus kann der Bewässerungsbedarf einzelner Kulturen für den Beobachtungszeitraum auch mit der Bewässerungs-App der Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und Landwirtschaftliches Bauwesen Bayern (ALB) berechnet werden. Die Bewässerungs-App ist ein webbasiertes Entscheidungssystem und Werkzeug zur Planung, Berechnung und Dokumentation von Maßnahmen zur Bewässerung (Müller et al. 2020).

Ein weiteres Modell zur Analyse der Bewässerungsmengen ist das AIDreg Modell, das im LAWAMAD Projekt am Thünen-Institut aufgebaut wird und die regionale pflanzenphysiologische Bewässerungsbedürftigkeit für den Beobachtungszeitraum als auch die Zukunft in Deutschland modelliert.

Hydrologische Modellierung

Für Analysen zum Speicherbedarf der Vergangenheit werden beobachtete Abflusszeitreihen verwendet. Für unbeobachtete Teileinzugsgebiete kann unter bestimmten Voraussetzungen die Abflusssspende verwendet werden, um das Oberflächenwasserpotential abzuschätzen. In diesem Fall müssen die Einzugsgebietseigenschaften (z. B. Bodenart, Landnutzung, Gefälle) des Teileinzugsgebietes und des Einzugsgebiets am Pegel vergleichbar sein.

Um die zukünftige Veränderung des Abflusses vor dem Hintergrund der klimatischen Veränderung bei der Speicherdimensionierung zu berücksichtigen, wird der Abfluss mit Hilfe eines Niederschlag-Abfluss-Modells simuliert. Für die Untersuchungen im Rahmen des LAWAMAD Projekts wurde das HBV-TUW-Modell verwendet, welches der Struktur des HBV-Modells folgt (Bergström 1992). Das HBV Modell besteht aus einer Schneeakkumulation und -schmelze, einer Bodenfeuchteberechnung sowie einer Abflussroutine und berechnet den Abfluss auf Tageswertbasis. Weitere Einzelheiten über das Modell sind in Parajka et al. (2007) zu finden. Die

Parameter des Modells werden in der Kalibrierungsphase ermittelt und validiert. Anschließend können die Klimaszenarien als Input für die zukünftige Modellierung des Abflusses verwendet werden.

Klimaszenarien

Um die zukünftigen klimatischen Verhältnisse abbilden zu können, wurden die repräsentativen Konzentrationspfad-Szenarien (RCP) 4.5 und 8.5 analysiert. Das RCP 4.5-Szenario erreicht seinen Emissionshöhepunkt im Jahr 2040 und nimmt danach ab, während das RCP 8.5-Szenario einen kontinuierlichen Anstieg der Emissionen während des gesamten 21. Jahrhunderts zeigt (Thomson et al. 2011). Diese Szenarien liefern einen externen Antrieb für die globalen Klimamodelle (GCM) im internationalen Klimamodell-Vergleichsprojekt (CMIP5) und treiben die regionalen Klimamodelle (RCM) von EURO-CORDEX an. Die Kombination aus einem GCM und einem RCM ergibt ein Ensemble-Mitglied der RCP-Szenarien.

Um die Konsistenz zwischen verschiedenen Klimaindikatoren und Wirkungsmodellen zu gewährleisten, wählte der Deutsche Wetterdienst (DWD) sechs Ensemblemitglieder für jedes RCP aus, die zusammen das DWD-Kernensemble bilden (Dalelane 2021). Diese wurden vom Expertennetzwerk Thema 1 des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr¹ mittels multipler linearer Regression und anschließender Interpolation auf der Grundlage typischer Verteilungsmuster von Klimavariablen räumlich von 0,11° auf ~5 km Rasterweite runterskaliert (Hänsel et al. 2020). Vor dem Downscaling wurden die Klimaprojektionen einer Bias-Korrektur unterzogen, wobei für die Niederschlagsdaten die quantile-delta change mapping-Methode und für die Temperaturdaten die Methode der multivariaten Quantilkartierung (Engl.: *multivariate quantile mapping*) verwendet wurde, um statistische Momente zu korrigieren und die Konsistenz zwischen den Klimavariablen zu erhalten (Hänsel et al. 2020). Die Grasreferenzverdunstung wurde nach FAO-Vorgaben unter Verwendung der regionalisierten und Bias-korrigierten Klimavariablen berechnet.

Die zeitliche Auflösung der DWD-Kern-Ensemble-Daten ist täglich. Details zu den GCM-RCM-Kombinationen der Ensemblemitglieder finden sich in Tabelle 2.

Tabelle 2: Zusammensetzung aus GCM-RCM Kombination des DWD Kernensembles

Ensemble- mitglied	<u>RCP 4.5</u>		<u>RCP 8.5</u>	
	GCM	RCM	GCM	RCM
1	ICHEC-EC-EARTH (r1)	KNMI-RACMO22E	ICHEC-EC-EARTH (r1)	KNMI-RACMO22E
2	ICHEC-EC-EARTH (r12)	KNMI-RACMO22E	CCCma-CanESM2 (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17
3	ICHEC-EC-EARTH (r12)	SMHI-RCA4	MOHC-HadGEM-ES (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17
4	MOHC-HadGEM-ES (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17	MIROC-MIROC5 (r1)	GERICS-REMO2015
5	MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	MPI-CSC-REMO2009	MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	UHOH-WRF361H
6	MPI-M-MPI-ESM-LR (r2)	MPI-CSC-REMO2009	MPI-M-MPI-ESM-LR (r2)	MPI-CSC-REMO2009

Quelle: DWD (2018).

Die Emissionsszenario-Datensätze für den Zeitraum 01.01.1970 - 31.12.2100 können auf Anfrage beim DWD angefordert werden. Zu den wichtigsten Klimavariablen, die in dieser Studie analysiert werden, gehören die täglichen Niederschlagsmengen, die mittlere Tagestemperatur und die Evapotranspiration über Gras. Die Analyse vergleicht den Kontrollzeitraum C20 (1971-2000) mit naher Zukunft (NTF, 2021-2050) und der fernen Zukunft (LTF, 2071-2100), um Veränderungen in der Dimensionierung des Wasserreservoirs zu bewerten.

¹ ehem. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.

3.1.2 Lokales Wasserspeicherkonzept

Die Speicherdimensionierung für das lokale Konzept wird ebenfalls durch das Oberflächenwasserdargebot und den Bewässerungsbedarf bestimmt. Da das Oberflächenwasserdargebot jedoch abhängig u. a. von Starkregenereignissen ist, limitiert deren Dargebot die Dimensionierung. Der Bewässerungsbedarf spielt bei der Planung daher zunächst nur eine untergeordnete Rolle.

Um das Dargebot des Oberflächenabflusses einzelner Agrarflächen zu bestimmen, existieren verschiedene Methoden. Beobachtete Zeitreihen des Oberflächenabflusses stehen für kleinräumige Untersuchungen nur selten zur Verfügung, weshalb die Abflussbildung mit Modellen abgeschätzt werden muss. Die Abflusskonzentration spielt in kleinräumigen Betrachtungen eine untergeordnete Rolle und kann daher vernachlässigt werden. Das bekannteste Modell zur Abflussbildung ist das Curve-Number-Verfahren vom amerikanischen Soil Conservation Service (SCS) (Singh et al. 2003). Dieses Verfahren wurde im 20. Jahrhundert zur Abflussprognose in kleinen landwirtschaftlichen Einzugsgebieten entwickelt. Der Niederschlag wird dabei aufgeteilt in den abflusswirksamen Niederschlag N_{eff} und den vom Boden zurückgehaltenen Niederschlag. Die Retention S (mm) wird dabei mit Hilfe der Curve Number (CN) berechnet (siehe Formel 5). Der Extremfall mit $CN=100$ beschreibt, dass der komplette Niederschlag abflusswirksam wird. Bei $CN=0$ ist der Retentionsparameter unendlich groß und es wird kein Oberflächenabfluss gebildet.

Formel 5: Retention

$$S = 254 \cdot \left(\frac{100}{CN} - 1 \right)$$

Der abflusswirksame Niederschlag wird dann über einen Vergleich der Retention mit dem Niederschlag bestimmt. Dabei wird angenommen, dass Abfluss erst auftritt, wenn 20 % der Retention erreicht werden, um Anfangsverluste zu berücksichtigen (siehe Formel 6).

Formel 6: Abflusswirksamer Niederschlag

$$\begin{cases} N_{eff} = \frac{(N - 0,2 \cdot S)^2}{N + 0,8 \cdot S} & \text{für } N > 0,2 \cdot S \\ N_{eff} = 0 & \text{für } N \leq 0,2 \cdot S \end{cases}$$

Um die Abflusssumme Q aus dem abflusswirksamen Niederschlag zu berechnen muss dieser mit der Einzugsgebietsgröße multipliziert werden. Das Einzugsgebiet ergibt sich aus der Fläche der landwirtschaftlichen Fläche, die mindesten eine Neigung von zwei Prozent ausweist (erst ab einer Neigung von zwei Prozent Gefälle tritt Oberflächenabfluss auf). Bei weniger als zwei Prozent staut sich das Wasser auf der Fläche und es tritt kaum abflusswirksamer Niederschlag auf. Die Curve Number ist der elementare Bestandteil des SCS-Verfahrens. Die CN-Werte sind abhängig vom Boden, der Bodenfeuchte vor einem Niederschlagsereignis und der Art der Nutzung bzw. angebauten Kultur (Tabelle 3).

Tabelle 3: Monatliche Curve Number-Werte unterschiedlicher Ackerkulturen unter Anbaubedingungen in Deutschland für die Bodengruppe C

Kultur	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Sommergetreide	95	95	95	80	46	44	44	44	87	91	95	95
Wintergetreide	95	88	66	54	44	44	70	80	87	91	95	95
Mais	94	94	94	90	88	73	50	43	62	85	90	94
Zuckerrüben	95	94	94	88	86	62	50	45	43	70	91	95
Kartoffeln	95	94	94	88	86	62	50	45	43	70	91	95

Die Böden der Bodengruppe C haben einen lehmigen Aufbau. Sie bestehen aus 20-40 % Lehm/Ton und weniger als 50 % Sand.

Quelle: Seibert und Auerswald (2020).

Die Umrechnung der CN-Werte zwischen den einzelnen Bodenklassen und Ausgangsfeuchten ist in der Literatur gut dokumentiert (Seibert und Auerswald 2020) und wird daher an dieser Stelle nicht im Detail beschrieben. Für die Landwirtschaft jedoch relevant sind die CN-Werte einzelner Kulturen im Jahresverlauf. Mit der Vegetationsphase steigt der Bedeckungsgrad der landwirtschaftlichen Flächen durch die Kulturen, wodurch die CN-Werte abnehmen. Abflusswirksamer Niederschlag tritt dadurch erst bei größeren Niederschlagsereignissen auf. Um den kulturabhängigen Jahresgang der CN-Werte zu berücksichtigen haben Seibert und Auerswald (2020) anhand des Bedeckungsgrad für ackerbauliche Kulturen in Deutschland typische CN-Werte zusammengestellt.

Das SCS-Verfahren schätzt den Oberflächenabfluss mit einer täglichen Auflösung ab. Auf einer kleinräumigen Skala wie einzelnen Agrarfläche ist die Abflussbildung auf täglicher Basis oftmals nicht ausreichend. Es ergibt sich ein großer Unterschied, ob die Tagesniederschlagssumme vergleichsweise konstant über den Tag gefallen ist oder innerhalb weniger Stunden.

Nearing et al. (1996) haben das SCS-Verfahren mit dem Horton-Infiltrationsansatz kombiniert, um dadurch mit Hilfe des CN-Wertes auch stündliche effektive Niederschlagshöhen zu modellieren. Mit Hilfe der gesättigten Wasserleitfähigkeit K_{sat} des Bodens und des täglichen CN-Wertes kann die effektive Infiltrationskapazität K_{eff} berechnet werden (siehe Formel 7).

Formel 7: Effektive Infiltrationskapazität

$$K_{eff} = \frac{56,82 \cdot K_{sat}^{0,286}}{1 + 0,051 \cdot \exp(0,062 \cdot CN)} - 2$$

Die effektive Infiltrationskapazität gibt an, wie viel Niederschlag in den Boden infiltriert, bevor Oberflächenabfluss auftritt. Der stündliche effektive Niederschlag kann dementsprechend berechnet werden (siehe Formel 8).

Formel 8: Stündlicher effektiver Niederschlag

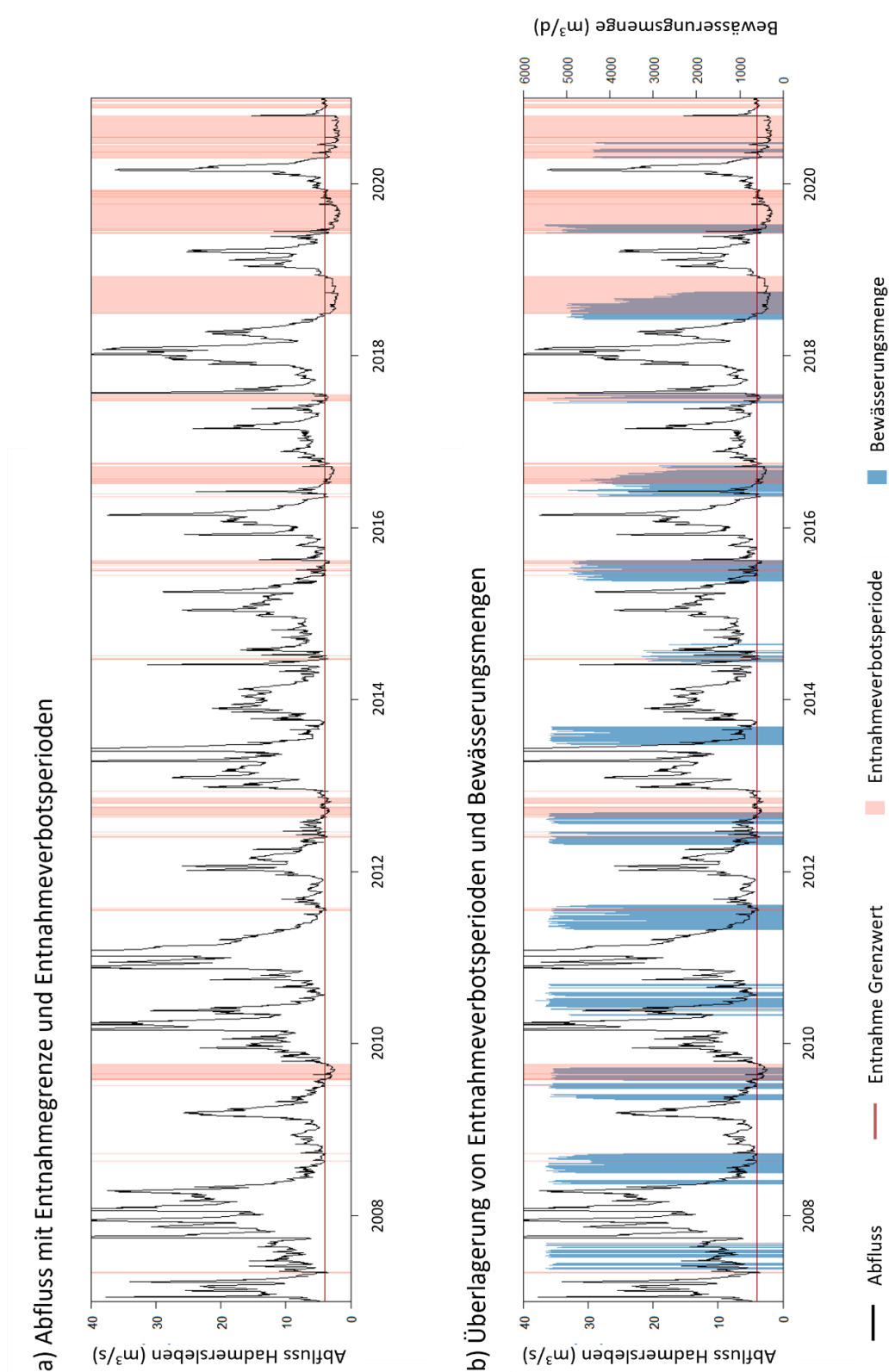
$$\begin{cases} N_{eff}^h = N^h - K_{eff} & \text{für } N^h > K_{eff} \\ N_{eff}^h = 0 & \text{für } N^h \leq K_{eff} \end{cases}$$

3.2 Ergebnisse für den Landschaftsausschnitt Magdeburger Börde

Überregionales Wasserspeicherkonzept

Für das überregionale Konzept wird die Entnahme und Speicherung von Wasser aus der Bode analysiert. Die Bode ist ein im Harz entspringendes Fließgewässer I. Ordnung, das im nördlichen Harzvorland fließt und in die Saale mündet. Der Abfluss der Bode ist abhängig von den Niederschlagsverhältnissen im Harz. Der Bode-Pegel Hadmersleben wird als Referenzpegel für die Entnahmeregulierung verwendet. Fällt der Abfluss unter einen Grenzwert von 3,98 m³/s, ist keine Wasserentnahme nach Entnahmerecht mehr gestattet (siehe Abbildung 9a). Es wird angenommen, dass oberhalb des Grenzwertes Bewässerungswasser aus der Bode entnommen werden kann, bzw. wenn keine Bewässerung notwendig ist, das Speicherbecken gefüllt werden kann. Mit Hilfe der langen Beobachtungszeitreihen des Bode-Pegels (>20 Jahre) und der Bewässerungszeitreihen des Kooperationspartners in der Magdeburger Börde kann für den Beobachtungszeitraum (2007-2020) der Speicherbedarf aus den beobachteten Daten abgeschätzt werden. Zu berücksichtigen ist dabei, dass für die Jahre 2018-2020 die Bewässerung am Betrieb eingeschränkt wurde, weshalb diese Jahre für die Dimensionierung eines Wasserspeicherbeckens nicht berücksichtigt werden.

Abbildung 9: Vergleich des Abflusses am Pegel Hadmersleben und der Bewässerungsmenge im Landschaftsausschnitt Magdeburger Börde zur Speicherdimensionierung im Beobachtungszeitraum 2007-2020



Quelle: eigene Darstellung auf der Grundlage von betrieblichen Bewässerungsdaten und der Daten zum Pegel Hadmersleben bereitgestellt durch Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt.

Am Pegel Hadmersleben treten Niedrigwasserperioden hauptsächlich in den Sommermonaten bei geringen Niederschlägen auf. Besonders lange Niedrigwasserperioden wurden in den Jahren 2009, 2016 sowie 2018-2020 beobachtet (siehe Abbildung 9a). Die Länge des Entnahmeverbots beträgt in diesen Zeiträumen 40 bis 100 Tage. Überlagern sich diese Perioden mit dem Bewässerungszeitraum, muss das Bewässerungswasser aus einem Speicher entnommen werden (siehe Abbildung 9b). In den Jahren, in denen keine oder nur kurze Niedrigwasserperioden auftreten bzw. es keine Überlagerung mit der Bewässerung gibt, wird kein Speicher benötigt.

Bei der Speicherdimensionierung wird die Überlagerung der Niedrigwasserperioden mit der Bewässerung für jedes Jahr einzeln analysiert. Treten in einzelnen Jahren mehrere Perioden mit Speicherbedarf auf, die zeitlich voneinander getrennt sind, wird der Speicher zwischen diesen Zeiträumen mit Wasser gefüllt unter Berücksichtigung des vorhandenen Abflusses. Das Speichervolumen wird dementsprechend angepasst. Tabelle 4 stellt die daraus abgeleiteten Speichervolumen für den Zeitraum 2007-2017 dar. Die letzten drei Jahre des Beobachtungszeitraums wurden bei der ex-post Ermittlung des Speichervolumens nicht berücksichtigt, da aufgrund der Wasserentnahmeeinschränkungen in 2018-2020 die landwirtschaftlichen Kulturen nicht im erforderlichen Umfang bewässert werden konnten.

In den Jahren 2007, 2010 und 2013 wäre kein Speicher benötigt, da es in diesen Jahren zu keiner Überlagerung der Perioden mit Niedrigwasser und Bewässerung gekommen ist. Die höchsten Speichervolumen würden im Jahr 2009 mit 215.000 m³ und 2016 mit 206.000 m³ benötigt. Im Mittel wäre für den gesamten Zeitraum 2007-2017 ein Speichervolumen von 60.000 m³ benötigt.

Tabelle 4: Erforderliches Speichervolumen im Landschaftsausschnitt Magdeburger Börde für den Zeitraum 2007-2017

Jahr ¹	Speichervolumen m ³
2007	0
2008	4.400
2009	215.000
2010	0
2011	26.000
2012	60.000
2013	0
2014	12.000
2015	70.000
2016	206.000
2017	36.000

¹ Bei der Ermittlung des Speichervolumens wurden die Jahre 2018-2020 des Beobachtungszeitraums wegen des Wasserentnahmeverbots und entsprechend geringeren als erforderlich Bewässerungsmengen nicht berücksichtigt

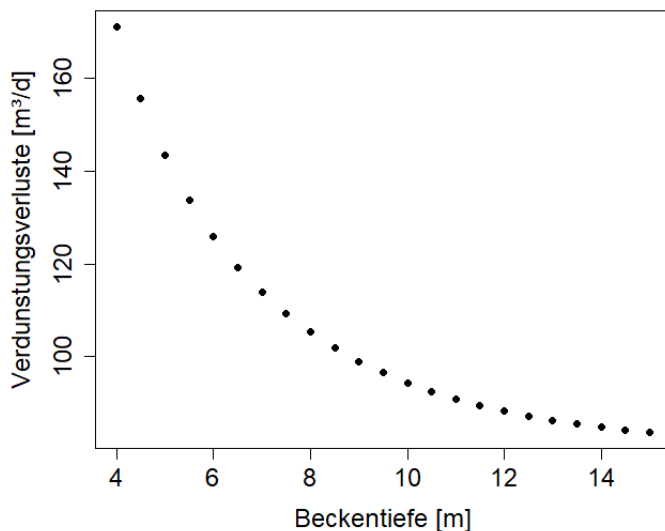
Quelle: eigene Darstellung.

Der Anteil der Verdunstungsverluste aus den Speicherbecken liegt im Beobachtungszeitraum bei zwei bis fünf Prozent. Die Verdunstung ist abhängig von den Zeiträumen, in den Speicher befüllt wird, und der Beckentiefe. Im optimalen Fall wird das Speicherbecken erst kurz vor der Nutzung befüllt. Damit soll erreicht werden, dass sich die Verdunstung nur über einen kurzen Zeitraum auswirkt und Verluste somit minimiert werden können. Die Beckentiefe hingegen bestimmt die Wasseroberfläche des Speichers. Je größer die Wasseroberfläche ist, desto höher ist die Verdunstung.

In Abbildung 10 sind für einen durchschnittlichen Tag im Juli die Verdunstungsverluste bei unterschiedlichen Beckentiefen für ein Speichervolumen von 130.000 m³ dargestellt. Da die Beckenform standortabhängig ist, wird

vereinfachend von einem Pyramidenstumpf ausgegangen, wodurch sich mit zunehmender Beckentiefe die Wasseroberfläche erhöht, und die Verdunstungsverluste steigen.

Abbildung 10: Verdunstungsverluste in Abhängigkeit der Beckentiefe für ein Speicherbecken mit Volumen 130.000 m³ an einem durchschnittlichen Tag im Juli



Quelle: eigene Darstellung.

Es zeigt sich ein exponentiell abnehmender Verlauf mit großen Verdunstungsverlusten bei geringen Beckentiefe. Im Bereich 4-10 m hat die Tiefe aufgrund einer größeren Wasseroberfläche den größten Einfluss auf die Verdunstung. Bei einem Speicherbecken mit einer Tiefe von 8 m sind die Verdunstungsverluste z. B. um 26 % geringer als bei einer Beckentiefe von 5 m.

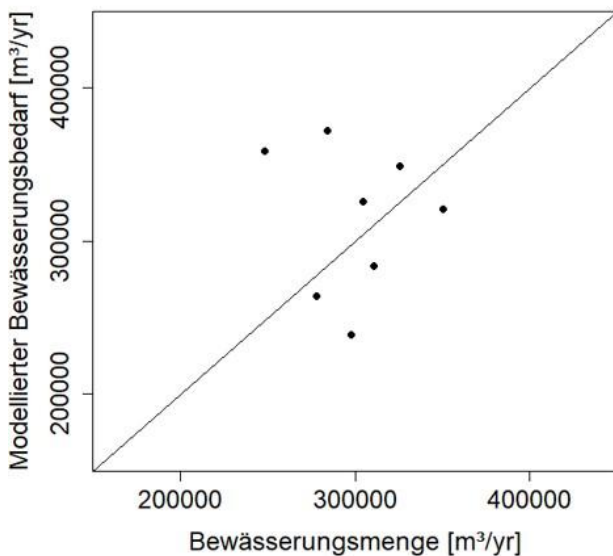
Um das Speicherbecken auch in Hinblick auf ein sich wandelndes Klima für die Zukunft zu planen, wird die Speicherdimensionierung auch unter der Berücksichtigung der Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 betrachtet. Dafür wird der zukünftige phänologische Bewässerungsbedarf abgeschätzt. Der Vergleich des modellierten Pflanzenwasserbedarfs und der beobachteten Bewässerungsmengen zeigt, dass das Bewässerungsbedarfs-Modell den Bedarf im Durchschnitt für unsere Analyse hinreichend genau abschätzt. Bessere Ergebnisse konnten in der Modellierung nicht erreicht werden, da die tatsächliche Bewässerung von weiteren Faktoren abhängt. Unter anderem wurde im Modell eine konstante Anbaufläche von 169 ha Kartoffeln angenommen. Die tatsächliche Anbaufläche lag jedoch in einigen Jahren über bzw. unter diesem Wert. Außerdem sind die Bewässerungsmengen des Betriebs durch betriebliche Abläufe (verspätete Abschaltung der Bewässerungstechnik) beeinflusst, die einen direkten Vergleich mit den modellierten phänologischen Bewässerungsbedarfen erschwert.

Mit dem erarbeiteten Modell wurden anschließend an die Validierung des Modells zur Abschätzung des Bewässerungsbedarfs die zukünftigen Bewässerungsmengen berechnet. Die Emissionsszenarien dienen dafür als klimatische Eingangsdaten in das Modell. Zusätzlich wurde angenommen, dass sich der Anbau der Kulturen nicht verändert.

Für die Zukunft ergibt sich ein Anstieg des Bewässerungsbedarfs. Diese Entwicklung hängt maßgeblich von einer steigenden Grasreferenzverdunstung auf Grund höherer Temperaturen in der Zukunft ab. Die leichte Veränderung der Niederschlagsintensität und räumlichen Variabilität hat vergleichsweise nur einen geringen Einfluss auf die Erhöhung des zukünftigen Bewässerungsbedarfs.

Neben dem zukünftigen Bewässerungsbedarf wird für die Speicherdimensionierung auch das zukünftige zeitliche Auftreten von Niedrigwasserperioden benötigt. Abbildung 11 zeigt die Ergebnisse der Niederschlag-Abfluss-Modellierung für den Pegel Hadmersleben (Bode) für den Beobachtungszeitraum 2007-2020.

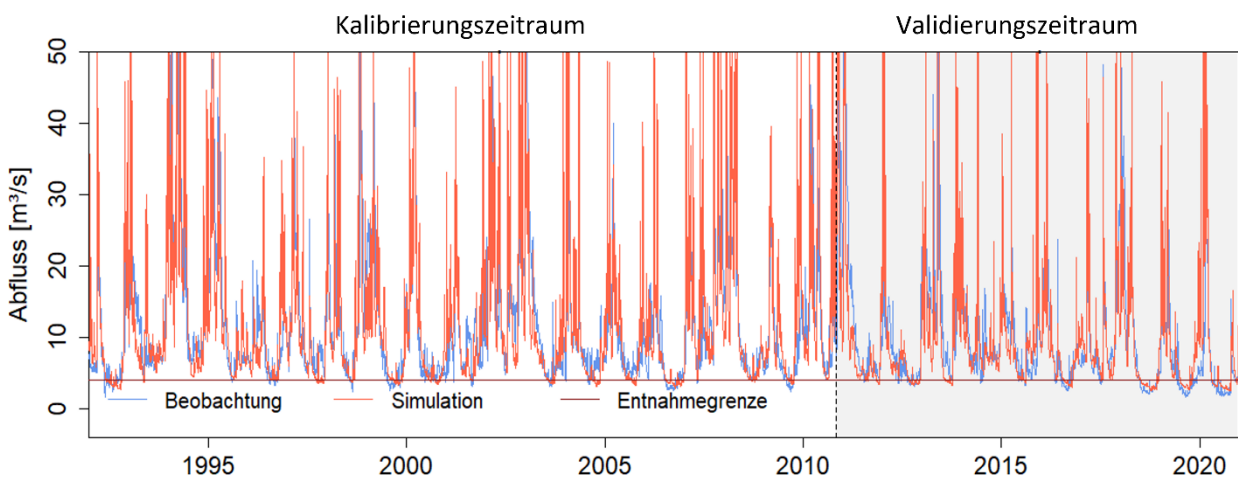
Abbildung 11: Vergleich zwischen dem modellierten jährlichen Bewässerungsbedarf und den beobachteten Bewässerungsmengen im Beobachtungszeitraum 2007-2020



Quelle: eigene Darstellung.

Während der Kalibrierungsphase ergab der Vergleich zwischen beobachtetem und simuliertem Abfluss eine Kling-Gupta-Effizienz² von 0,80. In der anschließenden Validierungsphase stieg dieser Wert leicht auf 0,83, was auf eine geringfügig bessere Modellgüte im Vergleich zur Kalibrierungsphase hindeutet. Insgesamt kann die Modellgüte für unsere Fragestellung als gut eingestuft werden (siehe Abbildung 12).

Abbildung 12: Simulierter und beobachteter Abfluss am Pegel Hadmersleben im Landschaftsausschnitt Magdeburger Börde für den Zeitraum 1992-2020 (Abflussspitzen abgeschnitten)



Quelle: eigene Darstellung auf der Grundlage der Daten zum Pegel Hadmersleben und Modellierungsergebnissen.

² Die Kling-Gupta-Effizienz ist ein Indikator in den Hydrowissenschaften um Simulationen im mit Beobachtungen zu vergleichen und die Modellgüte zu ermitteln.

Besonderes Augenmerk wurde bei der Kalibrierung auf die Nachbildung der Niedrigwasserperioden gelegt, da diese für die Speicherdimensionierung von großer Bedeutung sind. Das Modell zeigt hier eine gute Reproduktion der Niedrigwasserperioden, was insbesondere für die Jahre 2018 bis 2020 gilt. In einigen Fällen kommt es jedoch zu Abweichungen, wie z. B. in den Jahren 1999 und 2004, in denen Perioden mit Entnahmeverboten in den Modellergebnissen verzögert auftreten. Die Modellgüte hinsichtlich Niedrigwasserperioden verbessert sich, je länger die Dauer der Entnahmeverbote ist.

Die zukünftigen Abflussverhältnisse werden analog zum Bewässerungsbedarf ermittelt, indem die Emissionsszenarien als klimatische Eingangsparameter verwendet werden. Der Abfluss am Pegel Hadmersleben ändert sich in Zukunft dahingehend, dass die Perioden mit Entnahmeverbot kürzer werden. Dieses Verhalten ist in beiden RCP-Szenarien zu beobachten und hat damit einen entscheidenden Einfluss auf die Speicherdimensionierung.

Für die Speicherdimensionierung wurde der Zeitraum 2020-2065 analysiert. Die Unterschiede zwischen beiden RCP-Szenarien sind in diesem Zeitraum minimal, weshalb die Ergebnisse bzgl. der zukünftigen Speicherdimensionierung zusammengefasst werden, eine Differenzierung wird nicht vorgenommen. Das Ergebnis der Speicherdimensionierung repräsentiert die Bewässerungssicherheit bis 2065 und die dafür benötigten Speichervolumen (siehe Tabelle 5). Für eine Bewässerungssicherheit von 50 % wird ein Speicherbecken mit einem Volumen von 22.500 m³ benötigt. Dieses Volumen ist ausreichend, um in der Hälfte der Jahre von 2020 bis 2065 ausreichend Wasser für die Bewässerung zur Verfügung zu stellen. Mit steigender Bewässerungssicherheit steigt das Volumen leicht exponentiell an. Für eine Bewässerungssicherheit von 80 % werden 135.000 m³ benötigt.

Tabelle 5: Bewässerungssicherheit im Landschaftsausschnitt Magdeburger Börde für verschiedene Speichergrößen für den Zeitraum 2020-2065 unter Berücksichtigung der zukünftigen klimatischen Entwicklung im überregionalen Konzept

Bewässerungssicherheit [%]	Speichervolumen [m ³]
95	250.000
90	210.000
85	180.000
80	135.000
75	100.000
60	50.000
50	22.500

Quelle: eigene Darstellung.

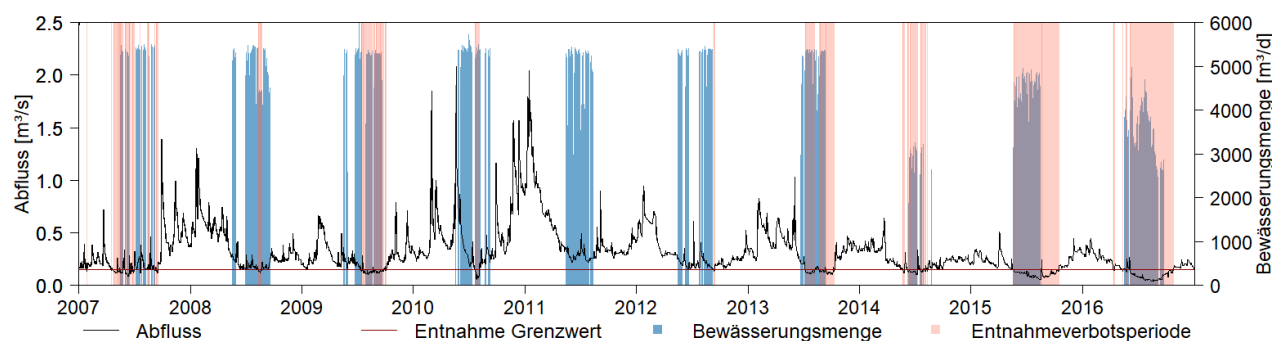
Regionales Wasserspeicherkonzept

Für das regionale Konzept wird die Wasserentnahme und Zwischenspeicherung für die Bewässerung aus dem Geesgraben untersucht. Der Geesgraben ist ein Fließgewässer II. Ordnung, welches in der Magdeburger Börde entspringt und bei Hadmersleben in die Bode entwässert. Die Abflussverhältnisse im Geesgraben sind durch regionale Niederschlagsereignisse bestimmt. Für die Speicherdimensionierung wurde der Pegel in Peseckendorf verwendet. Die gemessenen Abflusswerte für diesen Pegel liegen nur für den Zeitraum 1995-2016 vor. Entsprechend wurde dieser Zeitraum für die ex-post Dimensionierung des Wasserspeicherbeckens betrachtet. Als Grenzwert für die Einschränkungen der Wasserentnahmen wurde analog zum überregionalen Konzept der mittlere Niedrigwasserabfluss (MNQ) festgelegt. Dieser liegt am Pegel Peseckendorf bei 0,088 m/s. Unter Berücksichtigung der Annahme, dass auch bei einer Wasserentnahme zur Bewässerung bzw. zur Befüllung des Speichers der Abfluss nicht unter 0,088 m³/s fällt, wurde der Grenzwert auf 0,145 m³/s erhöht. Es wird mindestens dieser Abfluss benötigt, da durch Wasserentnahmen mittels Pumpen der Abfluss weiter von 0,145

m^3/s auf $0,088 \text{ m}^3/\text{s}$ runterfällt und liegt noch über dem Grenzwert. Berücksichtigung von Grenzwerten über den MNQ ist vor allem bei kleineren Abflüssen I. und II. Ordnung relevant.

Für den Abfluss ergeben sich für 2015 und 2016 lange Entnahmeverbotsperioden aufgrund von Niedrigwasser (siehe Abbildung 13). In 2015 könnte an 143 Tagen und in 2016 an 145 Tagen kein Wasser für die Bewässerung entnommen werden. Hingegen könnte in 2011 und 2012 das komplette Wasser für die Bewässerung aus dem Geesgraben entnommen werden. In 2007, 2008 und 2010 gibt es jeweils nur eine kurze zeitliche Überlagerung (<10 Tage) von Abfluss und Bewässerungsmenge.

Abbildung 13: Vergleich von Abfluss am Pegel Peseckendorf und der Bewässerungsmenge im Landschaftsausschnitt Magdeburger Börde zur Speicherdimensionierung im Zeitraum 2007-2016



Quelle: eigene Darstellung.

Wie aus der Überlagerung von Abfluss und Bewässerungsmenge abgeleitet werden kann, wäre in den Jahren 2011 und 2012 kein Speicher benötigt (Siehe Tabelle 6). In 2007, 2008 und 2014 wäre ein vergleichsweise kleines Speichervolumen von ca. 50.000 bis 65.000 m^3 benötigt. Im Gegensatz dazu stehen die Jahre 2015 und 2016, in denen aufgrund der langanhaltenden Entnahmeverbotsperioden das Speichervolumen ca. 360.000 m^3 betragen müsste. Im Durchschnitt über den gesamten Beobachtungszeitraum läge das Speichervolumen bei ca. 145.000 m^3 pro Jahr.

Tabelle 6: Speichervolumen im Landschaftsausschnitt Magdeburger Börde für den Zeitraum 2007-2016

Jahr	Speichervolumen [m^3]
2007	61.000
2008	48.000
2009	217.000
2010	71.500
2011	0
2012	0
2013	254.000
2014	65.000
2015	362.500
2016	358.000

Quelle: eigene Darstellung.

Um bei der Speicherdimensionierung die zukünftige klimatische Entwicklung zu berücksichtigen wurden analog zum überregionalen Konzept das Auftreten zukünftiger Niedrigwasserperioden und der phänologische Bewässerungsbedarf modelliert. Aus der Analyse der beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 kann die

Bewässerungssicherheit verschiedener Speichervolumen bis 2065 aufgestellt werden (siehe Tabelle 7). Für eine Bewässerungssicherheit von 50 % wird ein Speichervolumen von 110.000 m³ benötigt. Mit steigender Bewässerungssicherheit steigt auch das Speichervolumen an. Ein Speichervolumen von 360.000 m³ reicht für eine Bewässerungssicherheit von 90 %.

Tabelle 7: Bewässerungssicherheit im Landschaftsausschnitt Magdeburger Börde für verschiedene Speichergrößen bis 2065 unter Berücksichtigung der zukünftigen klimatischen Entwicklung im regionalen Konzept

Bewässerungssicherheit [%]	Speichervolumen [m ³]
95	415.000
90	360.000
85	305.000
80	265.000
75	210.000
60	145.000
50	110.000

Quelle: eigene Darstellung.

Im Vergleich zum überregionalen Konzept sind die benötigten Speichervolumen bei gleicher Bewässerungssicherheit im regionalen Konzept größer. Auch die berechneten Speichervolumen aus dem Beobachtungszeitraum sind im regionalen Konzept höher. Der Grund dafür sind die Zeiträume in denen kein Wasser für die Speicherung und die Bewässerung aus den jeweiligen Fließgewässern entnommen werden können. Der Abfluss im Geesgraben fällt deutlich häufiger unter den festgelegten Grenzwert. Dadurch kommt es zu längeren Perioden mit Entnahmeverbot als beim überregionalen Konzept.

Der Vergleich zwischen überregionalem und regionalem Konzept zeigt, dass beide Konzepte für den Landschaftsausschnitt umsetzbar sind. Im überregionalen Konzept ergeben sich jedoch kleinere Speichervolumen weshalb dieses Konzept für die Speicherdimensionierung am Betriebsstandort als besser umsetzbar erscheint als das regionale Konzept. Daher wird bei der Wirtschaftlichkeitsanalyse der Speicherbecken in den Kapitel 5-6 das überregionale Konzept als Grundlage für die berechneten Speichervolumen angewendet.

Lokales Wasserspeicherkonzept

Das lokale Konzept wurde in der ersten Fallstudie für eine 95 ha große Fläche untersucht. Die Fläche ist im westlichen Bereich durch einen Hang geprägt. Die Hangneigung beträgt in diesem Bereich mehr als 5 % und eignet sich daher für das Auffangen und Speicherung vom Niederschlagswasser. Im östlichen Bereich der Fläche nimmt die Hangneigung ab bis keine Steigung mehr vorhanden ist. Diese Bereiche der ausgewählten Fläche sind bei Starkregen aufgrund des fehlenden Gefälles kaum abflusswirksam. Die Abflussakkumulation gibt die Fließpfade an, in denen das Wasser potentiell oberflächlich ablaufen würde. Die Fließpfade im westlichen Teil der Fläche sind nach Westen gerichtet. Für das lokale Konzept spielt diese geographische Ausrichtung eine große Rolle, da durch einen einzelnen Graben entlang der westlichen Flächengrenze der komplette Oberflächenabfluss gesammelt und zwischengespeichert werden kann.

Mit Hilfe von Doppelringinfiltrometern wurde die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit im Gelände experimentell ermittelt. Für die untersuchten Standorte ergab sich eine Leitfähigkeit von 30-40 cm/d. Die ermittelten Leitfähigkeiten entsprechen den Werten der vorläufigen Bodenkarte Sachsen-Anhalts, die für diese Fläche eine Leitfähigkeit von 28-32 cm/d angeben, entsprechend der vorhandenen Bodenart eines sandigen Lehms.

Aufgrund der hohen gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit ergeben sich für die Fläche hohe Infiltrationsraten und es kommt z. B. nach Starkregenereignissen kaum zum Oberflächenabfluss. Das lokale Konzept ist daher für

den Standort nicht umsetzbar. Es zeigt sich eine hohe Abhängigkeit von den Boden- und Geländeparametern für dieses Konzept.

3.3 Ergebnisse für den Landschaftsausschnitt Weingarten

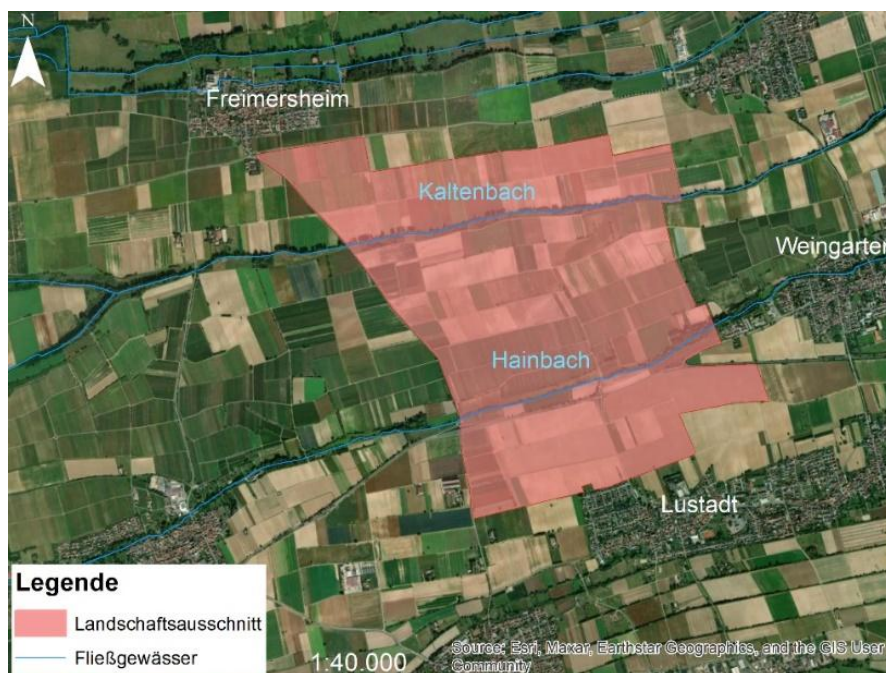
Überregionales Wasserspeicherkonzept

Das überregionale Konzept wurde für den Landschaftsausschnitt Weingarten nicht untersucht. Der Fokus in dieser Region liegt auf dem regionalen und lokalen Konzept. Eine Umsetzung des überregionalen Konzepts wäre jedoch möglich, für eine Wasserentnahme würde der Rhein als großes Fließgewässer in der Nähe des Untersuchungsgebiets zur Verfügung stehen. Eine Wasserentnahme aus dem Rhein wäre potentiell umsetzbar und könnte für die Region genügend Bewässerungswasser für die Zwischenspeicherung liefern. Die rechtlichen Aspekte sowie der Wassertransportinfrastruktur und der entsprechende Investitionsbedarf sind jedoch zu berücksichtigen. Die Umsetzbarkeit des Konzepts im Landschaftsausschnitt Weingarten ist diesbezüglich schwierig zu bewerten. Da in der ersten Fallstudie das überregionale Konzept bereits umfänglich betrachtet wurde, ergeben sich neben rechtlichen Fragen keine neuen Fragestellungen.

Regionales Wasserspeicherkonzept

Die Herangehensweise im regionalen Konzept ist analog zum Landschaftsausschnitt Magdeburger Börde. Die Besonderheit in dieser Region liegt darin, dass die beiden Fließgewässer (Kaltenbach und Hainbach), die den Landschaftsausschnitt von Westen nach Osten durchfließen, keine beobachteten Pegel im Gebiet besitzen (siehe Abbildung 14). Außerdem führen beide Fließgewässern in den Sommermonaten nur sehr wenig Wasser, weshalb angenommen wird, dass eine Entnahme nur im Winterhalbjahr möglich ist.

Abbildung 14: Übersichtskarte für den Landschaftsausschnitt Weingarten mit den beiden Fließgewässern Kaltenbach und Hainbach



Quelle: eigene Darstellung.

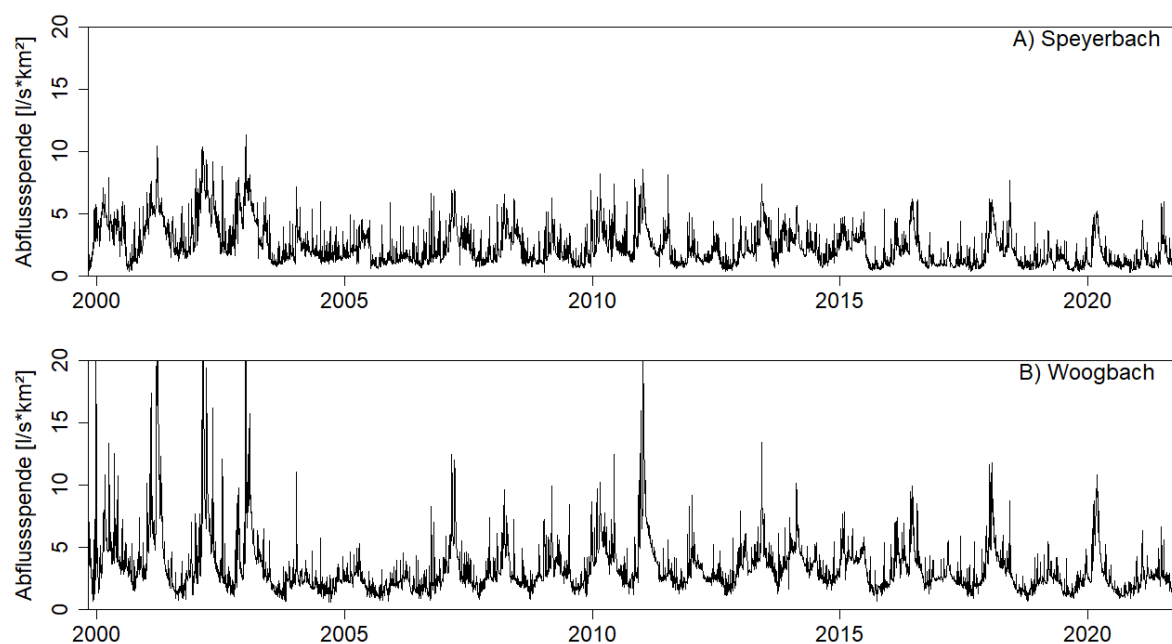
Für kleinere Fließgewässer liegen häufig keine beobachteten Abflusszeitreihen vor. Für die Speicherdimensionierung ist der Abfluss jedoch wichtig, um die Entnahmezeiträume und -mengen einzugrenzen. Eine häufig verwendete Methode, mit welcher der Abfluss für unbeobachtete Einzugsgebiete abgeschätzt werden kann, ist

die Abflussspende des Einzugsgebiets. Hierbei wird der Abfluss des Einzugsgebiets mittels der Einzugsgebietsfläche normiert, anschließend erfolgt die Skalierung für den betrachteten Landschaftsausschnitt mittels dessen Fläche. Abflussregionalisierung wurde dabei berücksichtigt.

Der Kaltenbach gehört zum Einzugsgebiet des Speyerbachs, für den ein beobachteter Pegel zur Verfügung steht. Das Einzugsgebiet des Speyerbachs hat am Pegel eine Einzugsgebietsgröße von 307 km². Der Hainbach liegt im Einzugsgebiet des Woogbachs. Dieser hat einen beobachteten Pegel und eine Einzugsgebietsgröße von 278 km². Bei dieser Methodik ist jedoch zu beachten, dass die unbeobachteten Teileinzugsgebiete vergleichbare Einzugsgebietseigenschaften wie das Gesamteinzugsgebiet am Pegel aufweisen müssen.

Anhand der beobachteten Pegelzeitreihen und der Einzugsgebietsgröße kann für den Speyerbach und den Woogbach die Abflussspende ermittelt werden (siehe Abbildung 15). Für den Speyerbach ergibt sich eine mittlere Abflussspende von 2,33 l/s*km² und für den Woogbach 3,33 l/s*km². Damit ist die mittlere Abflussspende im Woogbach etwas größer.

Abbildung 15: Abflussspende für die Einzugsgebiete am Pegel Speyerbach (A) und Woogbach (B)

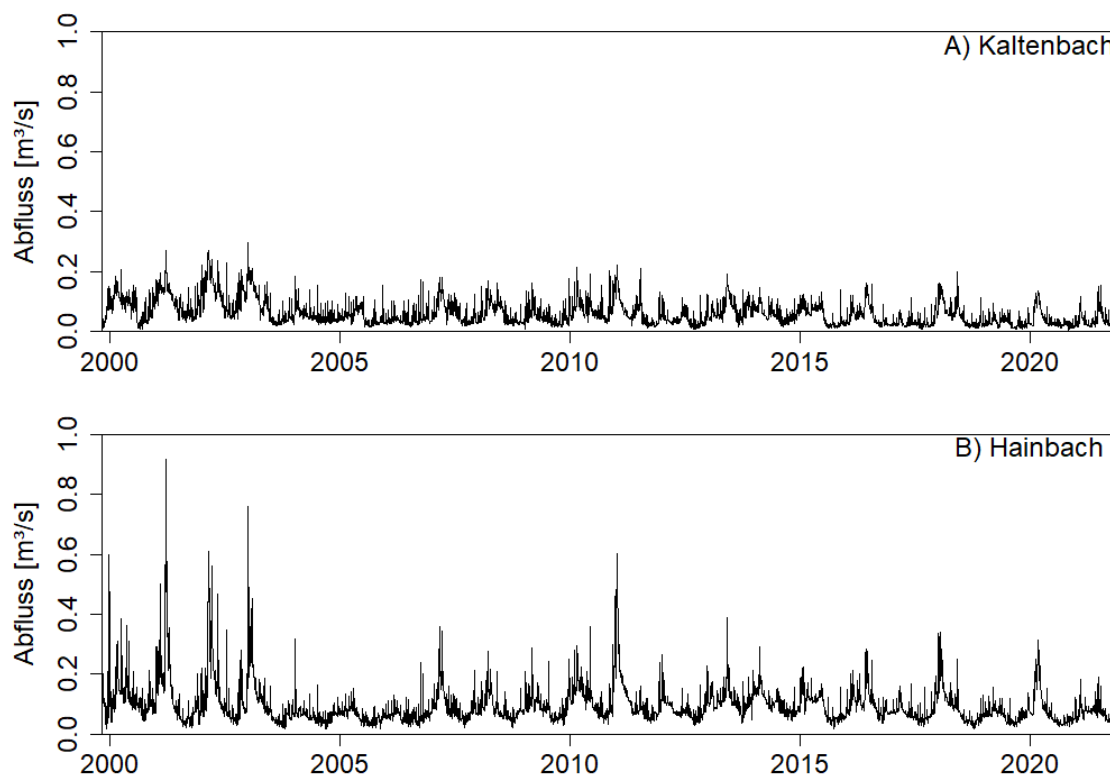


Quelle: eigene Darstellung.

Mit Hilfe der Abflussspende und der Teileinzugsgebietsgröße des Kaltenbachs (26 km²) und Hainbachs (29 km²) kann der Abfluss in beiden Fließgewässern abgeschätzt werden (siehe Abbildung 16). Für den Kaltenbach ergibt sich für den Zeitraum 2000-2021 ein mittlerer Niedrigwasserabfluss von 0,02 m³/s, ein Mittelwasserabfluss von 0,06 m³/s und ein mittlerer Hochwasserabfluss von 0,18 m³/s. Die Abflusskennzahlen sind sehr klein, wodurch deutlich wird, dass eine Entnahme für die Bewässerung oder zur Befüllung eines Speichers nur in bestimmten Zeiträumen stattfinden kann.

Die Abflusskennzahlen im Hainbach sind im Vergleich zum Kaltenbach etwas größer. Der mittlere Niedrigwasserabfluss liegt bei 0,03 m³/s, der Mittelwasserabfluss bei 0,10 m³/s und der mittlere Hochwasserabfluss bei 0,37 m³/s.

Abbildung 16: Berechneter Abfluss aus der Abflusspende und Einzugsgebietsgröße für den Kaltenbach (A) und Hainbach (B) im Landschaftsausschnitt Weingarten für den Zeitraum 2000-2021



Quelle: eigene Darstellung.

Mit Hilfe des Abflusses kann nun das potentiell entnehmbare Abflussvolumen ermittelt werden, das für die Speicherdimensionierung zur Verfügung steht (siehe Tabelle 8). Dafür wurden zwei Szenarien untersucht. Im ersten Szenario wird angenommen, dass die Wasserentnahme nur in den Wintermonaten (Dezember bis Februar) stattfindet. Für das zweite Szenario wird angenommen, dass eine Entnahme in den abflussreichen Monaten November bis März möglich ist. Als Grenzwert, der die Entnahme einschränkt, wird jeweils der mittlere Niedrigwasserabfluss für den ausgewählten Zeitraum ermittelt, da in diesem Szenario kein Wasser während der Vegetationszeit entnommen werden soll. Für das erste Szenario ergibt sich ein durchschnittliches, potentiell speicherbares Abflussvolumen von 0,95 Mio. m³ aus beiden Fließgewässern. Das kleinste speicherbare Volumen, das im untersuchten Zeitraum aufgetreten ist, liegt bei 72.000 m³. Im zweiten Szenario, bei dem eine Entnahme im Zeitraum November bis März angenommen wird, ist das speicherbare Abflussvolumen höher. Im Durchschnitt liegt dieses für den Beobachtungszeitraum bei 1,68 Mio. m³ und das kleinste Volumen bei 0,36 Mio. m³. Das speicherbare Volumen ist in beiden Szenarien für den Hainbach größer als für den Kaltenbach. Dies hängt mit dem höheren Abfluss im Hainbach zusammen, was sich bereits in den Abflusskennzahlen gezeigt hat.

Tabelle 8: Potentiell speicherbares Abflussvolumen im Landschaftsausschnitt Weingarten für das Szenario 1 (Entnahme Januar-Februar) und Szenario 2 (November-März)

Speicherbares Abflussvolumen	<u>Szenario 1</u>		<u>Szenario 2</u>	
	Kaltenbach	Hainbach	Kaltenbach	Hainbach
Ø-Speichervolumen [Mio. m ³ /Jahr]	0,38	0,62	0,68	1,0
Minimales Speichervolumen [Mio. m ³ /Jahr]	0,009	0,063	0,08	0,28

Quelle: eigene Darstellung.

Der jährliche Bewässerungsbedarf der einzelnen Kulturen ist in Tabelle 9 dargestellt. Im Durchschnitt liegt die benötigte Bewässerungsmenge bei 413.000 m³ pro Jahr. Salat ist die Kulturart mit dem höchsten Bewässerungsbedarf (170.000 m³/Jahr), Mais und Zuckerrüben werden hingegen kaum bewässert. Der Bewässerungsbedarf liegt hier bei etwa 10.000 m³/Jahr.

Der maximale jährliche Bewässerungsbedarf beträgt fast 850.000 m³ und wurde für das trockene Jahr 2018 ermittelt. Allein die Bewässerung von Salat hat in 2018 mehr als 300.000 m³ benötigt. Auch der Bewässerungsbedarf von Bundzwiebeln lag in diesem Jahr bei über 100.000 m³. Der geringste jährliche Bewässerungsbedarf liegt bei insgesamt 93.000 m³. Salat ist auch hier die Kultur, die mit 50.000 m³ den höchsten Bewässerungsbedarf hat.

Tabelle 9: Bewässerungsbedarf der angebauten Kulturen im Landschaftsausschnitt Weingarten für den Zeitraum 2000-2021

Kultur	<u>Ø Bewässerungsbedarf</u>		<u>Max. Bewässerungsbedarf</u>		<u>Min. Bewässerungsbedarf</u>	
	mm/Jahr	m ³ /Jahr	mm/Jahr	m ³ /Jahr	mm/Jahr	m ³ /Jahr
Winterweizen	10	10.417	50	50.000	0	0
Mais	35	3.542	125	12.500	0	0
Zuckerrübe	33	8.333	125	31.250	0	0
Kartoffel	111	38.938	210	73.500	30	10.500
Sellerie	184	36.775	286	57.200	60	12.000
Salat	76	171.205	142	319.500	22	49.500
Radieschen	49	24.333	109	54.500	14	7.000
Bundzwiebeln	198	59.400	351	105.300	38	11.400
Blumenkohl	129	12.936	197	19.700	0	0
Petersilie	122	36.525	289	86.700	9	2.700
Möhre	43	10.813	129	32.250	0	0
Gesamt		413.216		842.400		93.100

Quelle: eigene Berechnung.

Die Bewässerungssicherheit berechnet sich aus dem verfügbaren speicherbaren Abflussvolumen und dem Bewässerungsbedarf in den einzelnen Jahren (siehe Tabelle 10). Dabei ist zu berücksichtigen, dass es in einigen Jahren einer überjährigen Speicherung bedarf, da das Abflussvolumen im Entnahmezeitraum nicht ausreichend ist, um den Bewässerungsbedarf in der folgenden Bewässerungsperiode zu decken.

Tabelle 10: Bewässerungssicherheit und Speichervolumen im Landschaftsausschnitt Weingarten für zwei Entnahmeszenarien im Beobachtungszeitraum 2000-2021

Bewässerungssicherheit [%]	<u>Speichervolumen [m³]</u>	
	Szenario 1	Szenario 2
95	945.000	770.000
90	830.000	685.000
85	725.000	665.000
80	670.000	620.000
75	620.000	590.000
60	520.000	515.000
50	480.000	475.000

Quelle: eigene Darstellung.

Durch die überjährige Speicherung ergeben sich teilweise größere Speichervolumen. Dies zeigt sich vor allem im Entnahmeszenario 1 mit einem kürzerem Wasserentnahmezeitraum von Dezember-Februar. Für dieses Szenario müssen entsprechend größere Wassermengen in Jahren mit höheren Abflüssen entnommen und langfristig gespeichert werden. Dadurch ergeben sich für die Bewässerungssicherheiten >80 % größere Speichervolumen als im zweiten Szenario. Für eine Bewässerungssicherheit von 90 % wird im ersten Szenario ein Speicher mit einem Volumen von 830.000 m³ benötigt, während im zweiten Szenario nur ein Speichervolumen von 685.000 m³ benötigt wird.

Die Unterschiede zwischen den beiden Szenarien ergeben sich aus dem längeren Entnahmezeitraum und damit dem größeren Wasserdargebot in Szenario 2. Für kleinere Bewässerungssicherheiten gibt es nur einen kleinen Unterschied zwischen beiden Szenarien. Bei einer Bewässerungssicherheit von 50 % ergibt sich ein Speichervolumen von 480.000 m³ im ersten Szenario und 475.000 m³ im zweiten Szenario.

Lokales Wasserspeicherkonzept

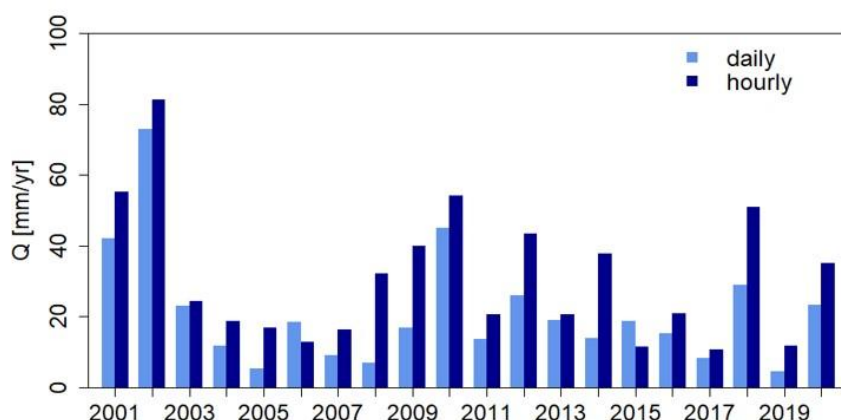
Für das lokale Konzept wurden vier für die Abflussakkumulation geeignete Teilflächen entlang des Kaltenbachs im Landschaftsausschnitt identifiziert (siehe Abbildung 17). Die Flächen haben eine durchschnittliche Hangneigung von >5 % und sind durch eine Hangexposition in Richtung Norden charakterisiert. Dadurch ergeben sich für die Flächen identische Fließpfade, die in Richtung Norden gerichtet sind. Lehm ist die vorherrschende Bodenart auf den vier Teilflächen. Daher sind geringe Infiltrationsraten zu erwarten, wodurch die Bildung von Oberflächenabfluss begünstigt wird. Die Teilflächen summieren sich auf ca. 20 ha. Diese Fläche wird als abflussrelevante Fläche angesehen, da sie hauptsächlich für die Entstehung von Oberflächenabfluss verantwortlich ist.

Abbildung 17: Lage der vier Teilflächen im Landschaftsausschnitt Weingarten



Quelle: eigene Darstellung.

Der Oberflächenabfluss wurde mittels täglicher und stündlicher Auflösung modelliert (siehe Abbildung 18). Die Abflusssummen in stündlicher Auflösung weisen tendenziell leicht höhere Abflusssummen auf. Dies bestätigt die Annahme, dass die zeitliche Auflösung des Niederschlags einen Einfluss auf die modellierte Abflussmenge hat. Maximal beträgt die jährliche Abflussmenge 80 mm/a im Jahr 2002. Im Durchschnitt über den gesamten Zeitraum entsteht ca. 30,5 mm/a Oberflächenabfluss. Die geringsten Abflussmengen mit 10-11 mm/a traten in 2015 und 2017 auf.

Abbildung 18: Modellierter Oberflächenabfluss für die vier Teilflächen im Landschaftsausschnitt Weingarten

Quelle: eigene Darstellung.

Das potentiell speicherbare Abflussvolumen kann aus dem Oberflächenabfluss und der abflussrelevanten Fläche abgeschätzt werden (siehe Tabelle 11). Im Durchschnitt entstanden im Zeitraum 2001 bis 2020 ca. 6.000 m³ pro Jahr an Oberflächenabfluss. Dieser Abfluss kann potentiell mit Hilfe von einem Graben gesammelt werden und anschließend zwischengespeichert werden, um die Verfügbarkeit von Bewässerungswasser in Trockenperioden zu erhöhen. Maximal bildet sich ein Oberflächenabfluss von 16.000 m³/a (3,9 % des durchschnittlichen Bewässerungsbedarfs) auf den Teilflächen, im abflussärmsten Jahr sind es nur 2.120 m³/a (0,5 % des durchschnittlichen Bewässerungsbedarfs).

Tabelle 11: Flächengröße und modellierter Abfluss im Landschaftsausschnitt Weingarten für den Zeitraum 2001 bis 2020

	<u>Teilflächen</u>				<u>Gesamt</u>
	<u>A</u>	<u>B</u>	<u>C</u>	<u>D</u>	
Fläche [m ²]	28.000	90.000	63.000	19.000	220.000
Minimum [m ³ /a]	300	950	670	200	2.120
Durchschnitt [m ³ /a]	860	2.700	1.900	590	6.050
Maximum [m ³ /a]	2.300	7.200	5.100	1.500	16.100

Quelle: eigene Darstellung.

3.4 Fazit zur Dimensionierung von Wasserspeicherbecken

Die in den vorherigen Unterkapiteln 3.2 und 3.3. verfassten Ergebnisse zeigen, dass in den ausgewählten Landschaftsausschnitten der Abfluss in den Fließgewässern im Winterhalbjahr ausreichend ist, um die für die Bewässerung erforderlichen Wassermengen zwischenzuspeichern. Diese Schlussfolgerung bezieht sich sowohl auf das überregionale als auch regionale Konzept. Die genauen potenziell entnehmbaren Wassermengen hängen stark von der festgelegten Entnahmegrenze aus dem Oberflächengewässer ab. Im Rahmen des LAWAMAD-Projektes wurde mittlere Niedrigwasserabfluss berücksichtigt. Perspektivisch sollen alternative Kenngrößen – z. B. die ökologisch-begründete Mindestwasserführung – betrachtet werden, um zum einen die Nachhaltigkeit der Wasserentnahmen sicherzustellen. Zum anderen wird dadurch der Zeitraum der Wasserentnahmen sowie das Wasserspeicherungspotenzial mitbestimmt. Die Möglichkeit zur Speicherung des Oberflächenabflusses (lokales Konzept) ist sehr standortspezifisch und stark von den Gelände- und Bodeneigenschaften abhängig. Im Vergleich zu den Abflussmengen in Fließgewässern können bei dieser Option nur deutlich kleinere Wassermengen für die Zwischenspeicherung generiert werden. Zusätzlich entstehen bei dieser Option Interessenkonflikte zwischen Wasserspeicherung und Erosionsschutz.

4 Planung von Wasserspeicherbecken und Ermittlung des erforderlichen Investitionsbedarfs

Die Planung von Wasserspeicherbecken für die beiden Landschaftsausschnitte (siehe Kapitel 2) erfolgte auf der Grundlage der Ergebnisse der Dimensionierung von Wasserspeicherbecken (siehe Kapitel 3) in Zusammenarbeit mit einem Ingenieurbüro. Die Ermittlung des Kostenrahmens erfolgte nach DIN 276 „Kosten im Bauwesen“.

Insgesamt wurden 22 Berechnungen für drei Varianten von Wasserspeicherbecken – Variante Fließgewässer „künstlich“ (19 Berechnungen), Variante Fließgewässer „natürlich“ (zwei Berechnungen) und Variante Regen (eine Berechnung) – durchgeführt. Die Wasserspeicherbeckenvarianten Fließgewässer „künstlich“ und „natürlich“ wurden für die Speicherung von Entnahmen aus Fließgewässern konzipiert. Die Wasserspeicherbeckenvariante Regen wurde für das Auffangen und Speicherung von Oberflächenabfluss geplant.

Alle 22 geplanten Wasserspeicherbecken, ihre Charakteristika und ihr Investitionsbedarf sind in Tabelle 12 zusammengefasst. Bei allen Berechnungen wurde angenommen, dass es am potenziellen Standort des Beckens kein drückendes Grundwasser gibt, sodass z. B. auf eine Abdeckschicht zur Beschwerung des Kunststoffdichtungsbahn beim leeren Becken verzichtet werden kann.

Der nach DIN 276 ermittelte Investitionsbedarf für die jeweilige Beckenvariante umfasst Kosten für vorbereitende Maßnahmen, Bauwerkkosten und ggf. Baunebenkosten. Es ist zu beachten, dass die Planung der Becken sowie die Ermittlung des Investitionsbedarfs standortspezifisch für die zwei im Kapitel 2 beschriebenen Landschaftsausschnitte und auf der Grundlage der in den Kapiteln 3.2 und 3.3 zusammengefassten Ergebnisse erfolgten und sich nicht direkt auf andere Standorte übertragen lassen. Entsprechend geben die in diesem Kapitel vorgestellten Ergebnisse nur eine Orientierung. In konkreten Einzelfällen können die Baukosten je nach Standort, Größe und Ausführung des Beckens höher oder niedriger fallen, als in diesem Bericht dargestellt.

Tabelle 12: Überblick über mögliche Wasserspeicherbeckenvarianten für überregionales, regionales und lokales Wasserspeicherkonzept

Nr	Art	Volumen [m³]	Gesamt- fläche [m²]	Abmessungen [m]	Wasser- oberfläche [m²]	Sohlfläche [m²]	Mittlere Dammhöhe [m]	Abgrabung [m]	Becken- tiefe [m]	Becken- anzahl	Ausführung	Investitions- bedarf [€]	Investitions- bedarf [€/m³]
1	K	250.000	45.000	150x300	28.900	5.800	5,5	11	16,5	1	KDB	7.365.000	29,46
2	K	250.000	45.000	212x212	28.200	9.800	6,5	8	14,5	1	KDB	6.187.000	24,75
3	K	250.000	45.000	212x212	28.200	9.800	6,5	8	14,5	1	Asphalt	6.223.000	24,89
4	K	250.000	45.000	212x212	28.200	9.800	6,5	8	14,5	1	Innendichtung	6.774.000	27,10
5	K	250.000	97.300	312x312	82.700	71.900	2	2	4	1	KDB	10.611.000	42,44
6	K	210.000	45.000	212x212	27.200	7.700	5,8	7,8	13,6	1	KDB	5.591.000	26,62
7	K	180.000	45.000	212x212	29.200	14.400	4,8	4,4	9,2	1	KDB	5.086.000	28,26
8	K	135.000	44.500	211x211	31.300	21.300	3,6	2,3	5,9	1	KDB	4.421.000	32,75
9	K	100.000	35.000	187x187	23.800	15.000	3,4	2,6	6	1	KDB	3.684.000	36,84
10	K	75.000	27.900	167x167	18.100	10.500	3,3	2,8	6,1	1	KDB	3.026.000	40,35
11	K	50.000	20.700	144x144	12.900	6.800	3	2,9	5,9	1	KDB	2.401.000	48,02
12	K	22.500	11.700	108x108	6.500	2.400	2,5	3,5	6	1	KDB	1.659.000	73,73
13	K	600.000	110.200	332x332	79.400	51.200	6,3	3,7	10	1	KDB	11.941.000	19,90
14	K	400.000	84.700	291x291	60.000	38.200	5,6	3,4	9	1	KDB	8.891.000	22,23
15	K	10.000	7.100	84x84	3.700	1.200	1,8	3,2	5	1	KDB	1.184.000	118,40
16	K	5.000	4.800	69x69	2.400	850	1,3	2,7	4	1	KDB	974.000	194,80
17	K ¹	100.000	33.900	184x184	23.700	15.000	3,6	2,4	6	1	KDB	2.965.000	29,65
18	K ¹	100.000	33.900	184x184	23.700	15.000	3,6	2,4	6	1	-	1.511.000	15,11
19	K ²	200.000	79.500	150x530	50.000	36.700	3,5	2,3	5,8	3	KDB	7.436.000	37,18
20	N	65.000	40.000	360x105	38.000	4.000	4,45 ³	1,1 ⁴	6,05	1	Asphalt	3.868.000	59,51
21	N	96.000	78.000	310x236	73.000	8.600	5,95 ³ & 1,75 ³	1,0 ⁴ & 0,2 ⁵	7,45	1	Asphalt	6.694.000	69,73
22	SAZ	5.000	3.700	61x61	2.100	800	2,1	1,9	4	1	KDB	395.000	79,00

K = „künstlich“; KDB = Kunststoffdichtungsbahn; N = „natürlich“; SAZ = Speicher- und Absetzbecken mit Zulaufgraben

¹ künstliches Becken mit angepassten technischen Charakteristika, ² eine Kaskade aus drei kleineren künstlichen Becken, ³ an der Luftseite; ⁴ an der Sohle; ⁵ auf der Restfläche.

Quelle: eigene Darstellung.

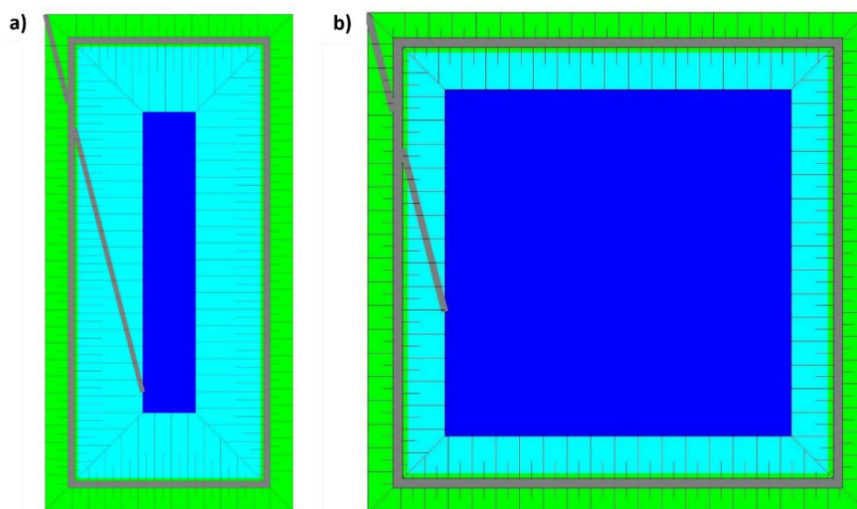
4.1 Wasserspeicherbeckenvarianten Fließgewässer „künstlich“

Für die Variante Fließgewässer „künstlich“ wurden 19 Wasserspeicherbecken geplant unter Berücksichtigung von:

- verschiedenen Volumina der Wasserspeicherbecken entsprechend der Bewässerungssicherheit (siehe Kapitel 3.2 und 3.3)
- unterschiedlichen Materialien für Innendichtung und Oberflächendichtung (siehe Anhang A1)
- unterschiedlichen Verhältnissen zwischen Oberfläche und Tiefe eines Beckens
- verschiedenen Formen (Rechteck und Quadrat) sowie
- angepassten technischen Charakteristika in Bezug auf Freibord, Böschungsneigung, Kronenbreite sowie Betrachtung der Baunebenkosten und bauwerktechnischen Anlagen.

Die Wasserspeicherbeckenvariante „künstlich“ stellt ein geometrisches Bauwerk (siehe Abbildung 19) dar, das aus einem Wasserkörper und einem Damm unter Berücksichtigung von 0,75 m Freibord (siehe Abbildung 20) besteht und mit Entnahmen aus Fließgewässer gefüllt wird.

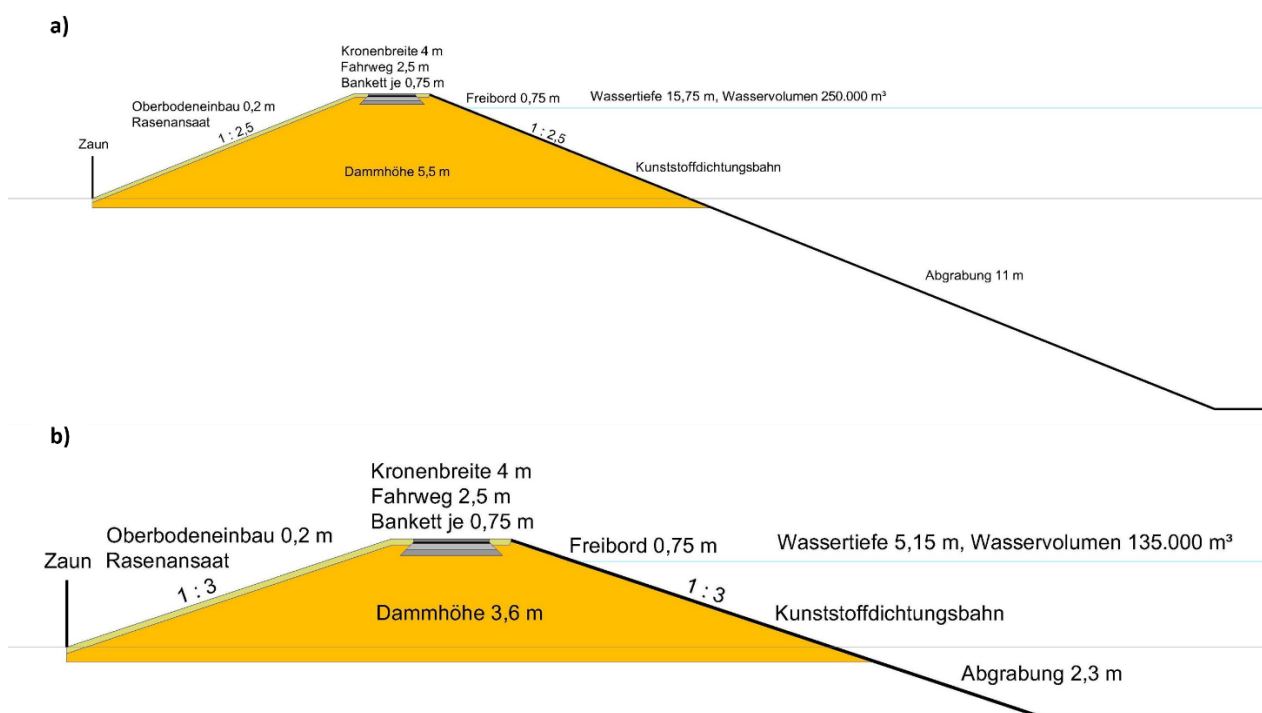
Abbildung 19: Beispiel für den Lageplan für ein rechteckiges und ein quadratisches Wasserspeicherbecken



a) Erstellt für die Wasserspeicherbeckenvariante 1 (siehe Tabelle 12); b) Erstellt für die Wasserspeicherbeckenvariante 8 (siehe Tabelle 12)

Quelle: eigene Darstellung.

Die ersten fünf Berechnungen für die Wasserspeicherbeckenvariante „künstlich“ wurden für das Wasserspeichervolumen von 250.000 m³ durchgeführt, welches 95 % der Bewässerungssicherheit im Landschaftsausschnitt Magdeburger Börde entspricht. Bei diesen Berechnungen wurde der Einfluss der Beckenform (rechteckig vs. quadratisch), des Oberfläche-Tiefe-Verhältnisses sowie unterschiedlicher Abdichtungen auf den Investitionsbedarf überprüft. Das Ziel dabei war es zu ermitteln, welche Faktoren eine Auswirkung auf einzelne Kostenpositionen und den gesamten Investitionsbedarf haben. Es zeigte sich, dass unter den gegebenen Annahmen die Baukosten für quadratische mit Kunststoffdichtungsbahn abgedichtete Becken niedriger sind als für Becken anderer Formen und mit anderen Abdichtungsvarianten. Diese Erkenntnisse wurden für die weiteren sieben Berechnungen der Wasserspeicherbeckenvariante Fließgewässer „künstlich“ berücksichtigt (siehe Tabelle 12). Entsprechend wurden die Beckenvarianten 6 bis 12 in quadratischer Form, ausgelegt mit Kunststoffdichtungsbahn, Böschungsneigung 1:3, Kronenbreite 4 m konzipiert. Die Berechnungen 13 bis 16 sind von den im Kapitel 3.2 und 3.3 ermittelten Wasserspeicherungsbedarf losgelöst und liefern eine Orientierung für den möglichen Investitionsbedarf beim Bau kleinerer und größerer Becken als die Varianten 1 bis 12.

Abbildung 20: Beispiel für das Querprofil eines Wasserspeicherbeckens

a) Erstellt für die Wasserspeicherbeckenvariante 1 (siehe Tabelle 12 und Anhang A1); b) Erstellt für die Wasserspeicherbeckenvariante 8 (siehe Tabelle 12 und Anhang A1)

Quelle: eigene Darstellung.

Bei den Wasserspeicherbeckenvarianten 17 und 18 wurden weitere mögliche Ansätze zur Reduktion einzelner Kostenpositionen und des gesamten Investitionsbedarfs geprüft. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden diese auf Basis von Variante 9 als quadratische Becken mit gleichem Volumen, gleichen Abmessungen und Beckentiefe geplant (siehe Tabelle 13).

Tabelle 13: Investitionsbedarf für vergleichbare Wasserspeicherbecken mit abweichenden technischen Charakteristika

Beckenvariante	Technische Charakteristika	Investitionsbedarf, €/m ³
9 (Folienbecken)	Kronenbreite 4 m, inkl. Baunebenkosten, Pumptechnik und Gebäude, Unterhaltungsweg	37 €/m ³
17 (Folienbecken)	Kronenbreite 2 m, minimale Betrachtung der Baunebenkosten, keine Pumpengebäude, kein Unterhaltungsweg	30 €/m ³
18 (Erdbecken)	Kronenbreite 2 m, anstehender Boden ist dicht genug, minimale Betrachtung der Baunebenkosten, keine Pumpengebäude, kein Unterhaltungsweg	15 €/m ³

Quelle: eigene Darstellung.

In Bezug auf technische Charakteristika wurden bei den Wasserspeicherbeckenvarianten 17 und 18 eine schmalere Kronenbreite von 2 m (vgl. 4 m bei den vorherigen Varianten) berücksichtigt, mit entsprechendem Verzicht auf die Befahrbarkeit des Dammes und den Unterhaltungsweg. Weiterhin wurden bei diesen beiden Varianten die Kosten für ein Pumpengebäude ausgelassen unter der Implikation, dass die Steuerung zur Wasserentnahmen außerhalb des Beckens erfolgen sollen. Die Ermittlung des Investitionsbedarfs für die

Varianten 17 und 18 erfolgte unter Betrachtung minimaler Baunebenkosten. Entsprechend wurden in der Kostengruppe 700 nach DIN 276 ausschließlich die Bauüberwachung (Kostenposition 719) und die Planung vom Becken (Kostenposition 733) kalkuliert.

Bei der Wasserspeicherbeckenvariante 18 wurde zusätzlich angenommen, dass die Bodeneigenschaften ausreichend sind, um eine natürliche Dichtung des Beckens zu ermöglichen. Entsprechend wurde bei dieser Beckenvariante auf die zusätzliche Abdichtung mit Kunststoffdichtungsbahn verzichtet, und die jeweiligen Kosten wurden bei der Ermittlung des Investitionsbedarfs nicht berücksichtigt. Der Vergleich der Varianten 9, 17 und 18 ist in Tabelle 13 dargestellt.

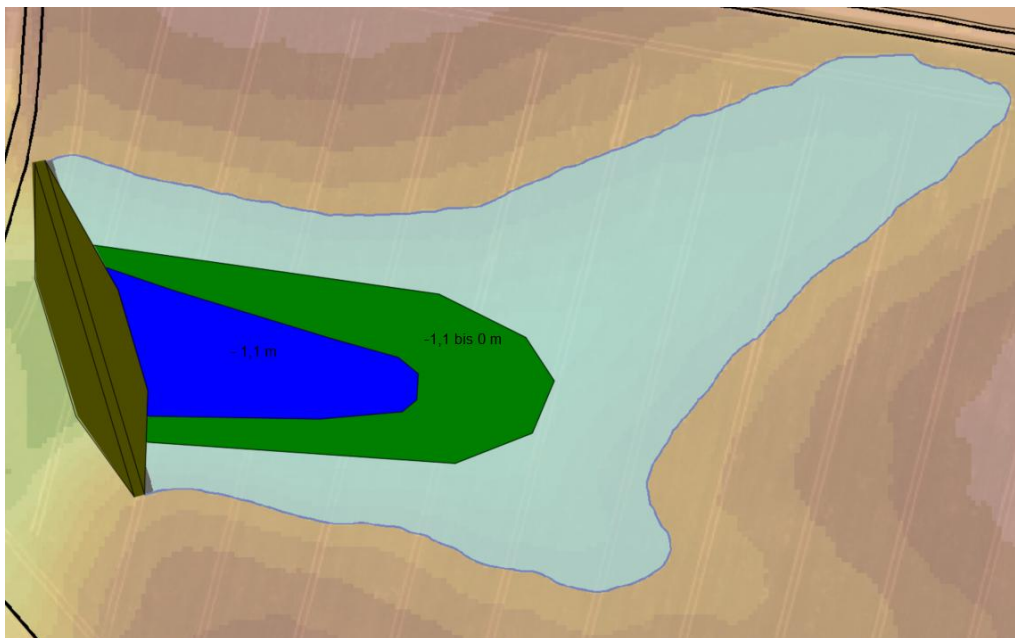
Die Wasserspeicherbeckenvariante 19 (siehe Tabelle 12) wurde unter Berücksichtigung von Landschaftseigenschaften im Landschaftsausschnitt Magdeburger Börde konzipiert. Sie stellt eine Kaskade von drei Becken mit Abmessung je 150 m x 177 m und einer Tiefe von 6 m dar. Damit wurde überprüft, ob die Anpassung der Beckenform an das Gelände eines Baugrundstücks aus der Perspektive des Investitionsbedarfs vorteilhaft sein kann. Die in Tabelle 12 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die an das Gelände angepasste Kaskade von Wasserspeicherbecken deutlich teurer sein kann als ein einzelnes Becken mit vergleichbaren Volumen.

4.2 Wasserspeicherbeckenvarianten Fließgewässer „natürlich“

Die Wasserspeicherbeckenvarianten Fließgewässer „natürlich“ (siehe Variante 20 und 21 in Tabelle 12) wurden ähnlich zu den Varianten Fließgewässer „künstlich“ für die Speicherung von Wasserentnahmen aus Fließgewässer unter Berücksichtigung der Landschaftseigenschaften konzipiert. Am Beispiel des Landschaftsausschnitts Magdeburger Börde wurde die Möglichkeit untersucht, die vorhandene natürliche Vertiefung im Gelände für Wasserspeicherung zu nutzen.

Die Wasserspeicherbeckenvariante 20 ermittelt die Möglichkeit, in dieser Vertiefung 65.000 m³ Wasser durch das Errichten eines Dammes an der westlichen Seite der Vertiefung zu speichern, mit 1,1 m Abgrabung an der Sohle sowie dem Freibord von 75 cm (siehe Abbildung 21).

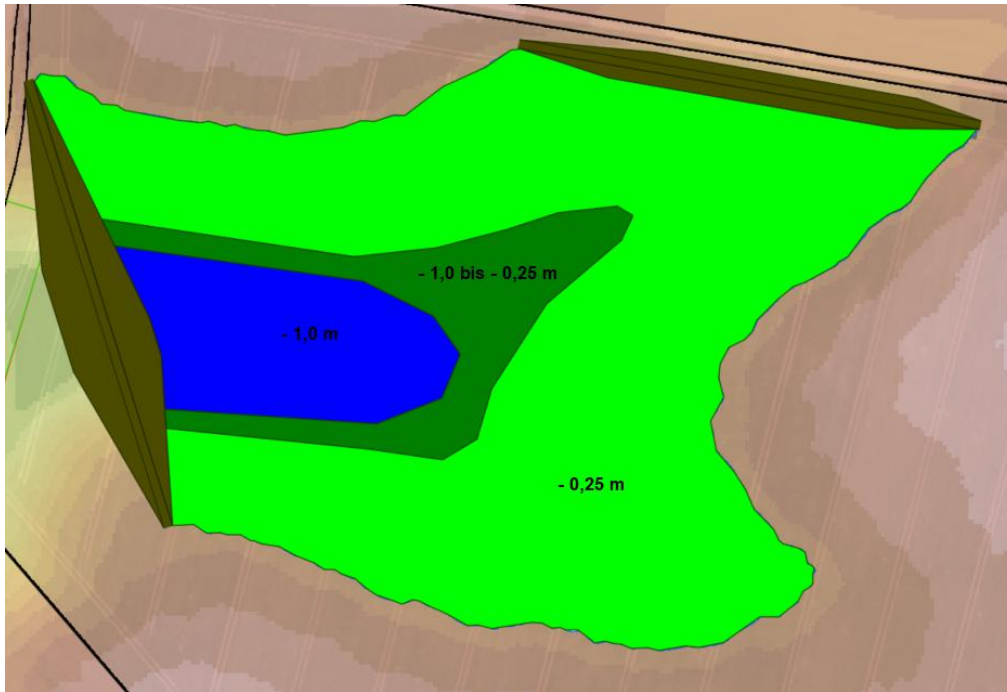
Abbildung 21: Prinzipdarstellung zur Wasserspeicherung in einer natürlichen Vertiefung im Gelände



Quelle: eigene Darstellung.

Bei der Wasserspeicherbeckenvariante 21 wurde das gesamte Wasserspeichervolumen durch Abgrabung sowohl an der Sohle als auch auf der Restfläche der Vertiefung erhöht (siehe Abbildung 22). Dies erfordert zusätzlich das Errichten eines zweiten Damms an der nördlichen Seite der Vertiefung.

Abbildung 22: Prinzipdarstellung zum Ausbau einer natürlichen Vertiefung im Gelände für die Vergrößerung des Wasserspeichervolumens



Quelle: eigene Darstellung.

Bei den beiden Wasserspeicherbeckenvarianten Fließgewässer „natürlich“ ist eine Verwallung von 0,2 m Höhe um die Becken vorgesehen um Sedimenteintrag zu verhindern. Trotz dieser Maßnahmen kann es bei der Beckenvariante „natürlich“ schneller zu einem Sedimenteintrag kommen, als bei einem Becken, in dem kein zusätzliches Oberflächenwasser hineinfließen kann. Um das Wasserspeicherbeckenvarianten Fließgewässer „natürlich“ einfacher von Sediment zu befreien wurde Asphalt für die Abdichtung vorgesehen. Aufgrund der Form des Beckens könnte die Abdichtung des Beckens mit Kunststoffdichtungsbahn auch komplizierter sein.

Der Investitionsbedarf für den Bau des Wasserspeicherbeckenvariante 20 ist etwas höher als eine Wasserspeicherbeckenvariante Fließgewässer „künstlich“ mit vergleichbarem Volumen. Der Ausbau einer natürlichen Vertiefung führt zu einer bedeutenden Erhöhung des Investitionsbedarfs, sodass dieser mehr als doppelt so hoch ist wie der Investitionsbedarf für einen Wasserspeicherbecken Fließgewässer „künstlich“ mit vergleichbarem Volumen.

4.3 Wasserspeicherbeckenvariante Regen

Die Wasserspeicherbeckenvariante Regen (siehe Variante 22 in Tabelle 12) wurde nur in einer Ausführung für das lokale Wasserspeicherkonzept im Landschaftsausschnitt Weingarten geplant. Bei der Konzeption dieser Variante wurde der modellierte Abfluss auf den geeigneten Teilflächen (siehe Kapitel 3.3) berücksichtigt.

Die Wasserspeicherbeckenvariante besteht aus:

- (1) einem mit Kunststoffdichtungsbahn ausgelegten Hauptbecken mit dem Gesamtvolumen von 5.000 m³. Bei der Planung wurden ein reduzierter Freibord von 0,5 m und eine Böschungsneigung von 1:2,5 sowie eine

schmalere Dammkrone von 1 m berücksichtigt. Die Hochwasserentlastung erfolgt am Auslauf mittels Mönchbauwerk und Verrohrung zum nächsten Vorfluter,

- (2) einem 1 m tiefen Absetzbecken (Erdbecken) zur Verringerung des Sedimentationseintrags mit einem reduzierten Freibord von 0,5m und einer Böschungsneigung 1:2, sowie
- (3) einem 2 km langen und 0,75 m tiefen Zulaufgraben mit einer Böschungsneigung 1:2, der mit Oberboden und Rasenansaat gedeckt werden soll.

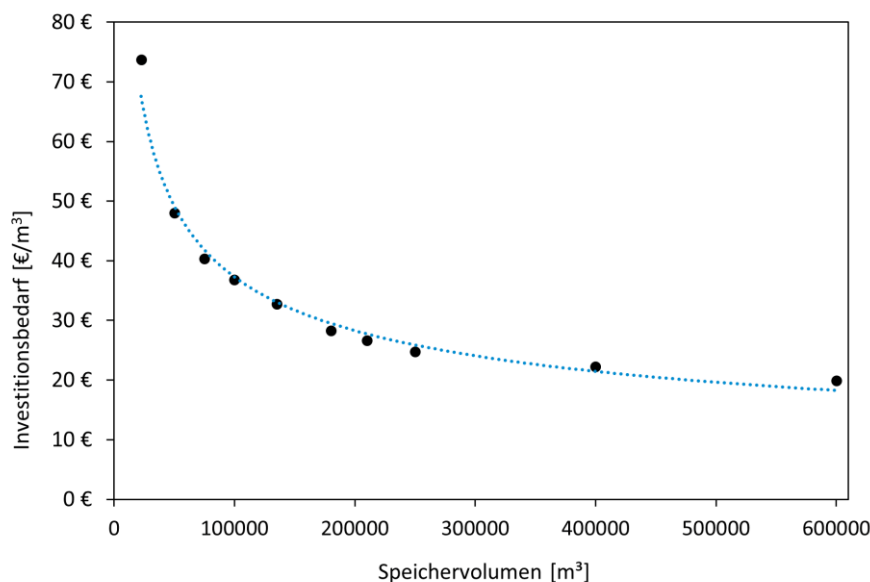
Der Investitionsbedarf bei der Wasserspeicherbeckenvariante Regen ist niedriger als bei der Wasserspeicherbeckenvariante Fließgewässer „künstlich“ mit vergleichbaren Volumen. Bei der Umsetzung von Variante 22 sind mögliche Zielkonflikte mit Erosionsschutz und ggf. Gewässerökologie zu betrachten.

4.4 Fazit zu Wasserspeicherbeckenvarianten

Die vorherigen Unterkapitel stellen unterschiedliche Varianten von Wasserspeicherbecken vor. Zusammen mit dem in den Kapitel 3.2 und 3.3 ermittelten Wasserspeicherbedarf unter Berücksichtigung der Bewässerungssicherheit (siehe Tabelle 5 und Tabelle 7) stellen diese eine Grundlage für die betrieblichen Entscheidungen dar. Welche Wasserspeicherbeckenvariante für einen konkreten Betrieb oder ihren Verbund interessant wäre, hängt von mehreren Faktoren ab. Neben dem Investitionsbedarf und den Optionen zu Investitionsförderung können auch betriebliche Faktoren wie Flächenverfügbarkeit, persönliche Erwartungen bzgl. der klimatischen Entwicklungen und Risikoeinstellungen entscheidend sein. Bei den äußeren Rahmenbedingungen ist vor allem der Umfang und die Dauer der wasserrechtlichen Erlaubnis für die Umsetzung von Wasserspeicherbeckenvarianten von Bedeutung. Die beobachtete Tendenz zu kürzeren Befristungen von Wasserentnahmeerlaubnissen (Stupak et al. 2025) stellt die Wirtschaftlichkeit solch langfristiger Investitionsprojekte in Frage.

Der Bau eines Wasserspeicherbeckens zur Sicherung der Bewässerung ist eine kostenintensive Maßnahme. Je nach Gesamtvolumen des Beckens liegt der Investitionsbedarf für 1 m³ im Folienbecken gespeichertes Wasser zwischen 20-70 € (siehe Abbildung 23). Dieser umfasst neben den Bauarbeiten und Materialien auch technische Anlagen und Baunebenkosten.

Abbildung 23: Investitionsbedarf für Speicherung von 1 m³ Wasser je nach Gesamtvolumen eines Wasserspeicherbeckens



Quelle: eigene Darstellung.

Die betriebliche Umsetzung von Maßnahmen zur Verbesserung der Bodenstruktur (z. B. Verdichtungs-minderung, Auflockerung des Bodens, Humusaufbau), zur Minderung des Wasserbedarfs einzelner Kulturen (z. B. Anbau von trockenstresstoleranten Kultursorten, Anpassung der Fruchtfolgen), und zur Verbesserung der Wassernutzungseffizienz unterschiedlicher Bewässerungsansätze können zur Minderung des Bewässerungs- und somit des Wasserspeicherungsbedarfs beitragen.

Die Wirtschaftlichkeit der Wasserspeicherung kann erhöht werden, indem die Wasserspeicherkosten durch die Bauform des Wasserspeicherbeckens und seine multifunktionale Nutzung verringert werden. Die Ergebnisse in Kapitel 4.1 zeigen, dass der Investitionsbedarf durch die Bauform und Ausführung eines Wasserspeicherbeckens beeinflusst werden kann. Bei einem Folienbecken kann der Investitionsbedarf durch Berücksichtigung folgender Aspekte reduziert werden:

- die Form der Beckenoberfläche (eher quadratisch als rechteckig),
- einfache Gestaltung der Böschungen ohne Befahrbarkeit und mit entsprechend schmaler Dammkrone,
- einfache Gestaltung der Pumpanlagen.

In Bezug auf die Ausführung eines Beckens können Erdbecken deutlich günstiger sein als Folienbecken. Bei dieser Wasserspeicherbeckenvariante müssen aber Aspekte wie Bodenart und damit zusammenhängender Versickerungsrate, die für die Bewässerung erforderliche Wasserqualität sowie mögliche Naturschutzaufgaben betrachtet werden.

Die Wirtschaftlichkeit von Wasserspeicherbecken kann zusätzlich durch seine multifunktionale Nutzung verbessert werden. In erster Linie bietet sich die Belegung der Wasseroberfläche mit schwimmender Photovoltaik (Engl. *Floating Photovoltaic*, FPV) an, die zum einen Wasserverluste aus dem Wasserspeicherbecken durch Verdunstung reduziert und zum anderen eine zusätzliche Einkommensquelle bietet. Die möglichen Synergien zwischen Wasserspeicherung und Energieerzeugung mittels FPV sind im nächsten Kapitel diskutiert.

5 Mögliche Synergien zwischen Wasserspeicherung und Energieerzeugung

Die möglichen Synergien zwischen Wasserspeicherung für die Bewässerung und Energieerzeugung mittels schwimmender Photovoltaik wurden im Rahmen einer Masterarbeit untersucht (von Zepelin 2024), die im Rahmen des LAWAMAD-Projektes an der Technischen Universität (TU) Braunschweig und unter Betreuung der TU Braunschweig, des Thünen-Instituts, und des Fraunhofer Instituts für Solare Energiesysteme ISE (Fraunhofer ISE) durchgeführt wurde.

Dieses Kapitel stellt ausgewählte Ergebnisse der Masterarbeit dar und diskutiert die Anforderungen an die rechtlichen Rahmenbedingungen, um die Synergien zwischen Wasserspeicherung und Energieerzeugung auszuschöpfen.

Wasserspeicherbecken für die Bewässerung gelten neben Trinkwassertalsperren und Speicherbecken zur Wasserkraftnutzung als besonders geeignet für den Einsatz schwimmender Photovoltaikanlagen (FPV) (Ghigo et al. 2022). Tabelle 14 fasst die Besonderheiten und Vorteile von FPV-Anlagen im Vergleich zu landbasierten PV-Anlagen zusammen.

Tabelle 14: Auswahl von Besonderheiten und Vorteilen von FPV-Anlagen gegenüber landbasierten PV-Anlagen

Vorteile von FPV-Anlagen	Literaturquelle
Effizienzsteigerung durch Wasser- und Windkühlung (meist 3-5 % gegenüber konventioneller PV)	Acharya und Devraj (2019); Dörenkämper et al. (2021); Essak und Ghosh (2022); Kjeldstad et al. (2022); Sahu et al. (2016); Sukarso und Kim (2020); World Bank Group et al. (2019b)
Geringe Staubablagerung (Engl.: <i>soiling</i>) der Module	Acharya und Devraj (2019); Essak und Ghosh (2022)
Minimale Landnutzung	Acharya und Devraj (2019); Essak und Ghosh (2022); Cazzaniga und Rosa-Clot (2021); Sahu et al. (2016)
Einfache Installation	World Bank Group et al. (2019b); Sahu et al. (2016); Acharya und Devraj (2019); Essak und Ghosh (2022); Cazzaniga und Rosa-Clot (2021)
Schnelle Installation	World Bank Group et al. (2019b); Sahu et al.
Einfacher Rückbau nach Laufzeit	Cazzaniga und Rosa-Clot 2021; Agrawal et al.
Offene Wasserflächen -> kein Schattenwurf auf Module, geringe Reihenabstände und hohe Belegungsichte (bis zu 1,7 MWp/ha)	World Bank Group et al. (2019a)
Verdunstungsreduktion	Acharya und Devraj (2019); Essak und Ghosh (2022); Cazzaniga und Rosa-Clot (2021); Sahu et al. (2016); World Bank Group et al. (2019b)
Gegebenenfalls weniger Algenblüten	Essak und Ghosh (2022); Cazzaniga und Rosa-Clot (2021); Acharya und Devraj (2019); World Bank Group et al. (2019b); Exley et al. (2022); Haas et al. (2020)
Eignung für geschützte oder sensible Gebiete in denen Freiflächen-PV Restriktionen unterliegt	World Bank Group et al. (2019b)
Vielfalt an Anlagendesigns ermöglichen Anpassung an unterschiedliche Gewässerbedingungen	World Bank Group et al. (2019b)

Quelle: von Zepelin (2024).

Aus Perspektive der Stromerzeugung umfassen die FPV-Vorteile die natürliche Kühlung von angebrachten Modulen durch die Nähe zum Wasser und die Windexposition, sowie ihre geringere Verschmutzung mit Staub und Sand (Engl.: *soiling*), wodurch eine höhere Effizienz der Anlage im Vergleich zur landbasierten Photovoltaik erreicht wird (Liu et al. 2017; Ziar et al. 2021). Die minimale Landnutzung ist eine weitere Besonderheit der FPV. Der Flächenbedarf von FPV-Anlagen beschränkt sich größtenteils auf die Wasserfläche, wobei auch die Wechselrichter auf den schwimmenden Strukturen installiert werden können. Lediglich die Infrastruktur zum Netzanschluss, inklusive des Transformators, sind üblicherweise auf dem Land (Acharya und Devraj 2019). Der schnelle und unkomplizierte Aufbau von FPV-Anlagen liegt an dem minimalen Vorbereitungsaufwand der Fläche sowie der Modularität der Anlage, wobei Reihe für Reihe auf das Wasser gebracht werden kann (World Bank Group et al. 2019b). Auch nach Ablauf der Lebensdauer lässt sich die Anlage zumeist unproblematisch zurückbauen oder durch Repowering ersetzen (Cazzaniga und Rosa-Clot 2021). Ein besonderer Vorteil bei Wasserkörpern, die nicht dauerhaft gefüllt sind, ist, dass einige FPV-Anlagen trockenfallen können (World Bank Group et al. 2019b). Aufgrund von technisch bedingten Abständen zum Ufer ist eine Beschattung von FPV-Anlagen beispielsweise durch Vegetation zumeist nicht vorhanden (World Bank Group et al. 2019a).

Durch die Verdunstungsminderung stellt schwimmende Photovoltaik eine physische Methode zur Beschattung des Wasserkörpers und zur Minderung des Strahlungseintrags dar (Youssef und Khodzinskaya 2019). Entscheidend für die Beschattungseffizienz sind der Bedeckungsgrad und der Abstand zum Wasser. Wenn das oberflächennahe Wasser durch geringere Einstrahlung kühler bleibt und gleichzeitig die Schwimmkörper den windinduzierten Luftaustausch der wassergesättigten Luft verringern, maximiert dies die Verdunstungsreduktion (Maniak 2016). Nach Ergebnissen von Ilgen et al. (2023) liegt die Strahlungsreduktion unter FPV-Anlagen bei 73 % und die Reduktion der Windgeschwindigkeit bei 23 %. In Bezug auf den Abstand der FPV-Anlage zum Wasser wird die Tendenz konstatiert, dass insbesondere geringe Neigungswinkel der Module die Verdunstung reduzieren.

FPV-Anlagen verzögern die Erwärmung der Wasserschichten infolge von Reduktion solarer Einstrahlung in das Gewässer, reduzieren aber auch die nächtliche Abkühlung (Wärmeemission aus dem Gewässer). Nach Haas et al. (2020) werden bei Belegungsgraden zwischen 40 % und 60 % toxische Algenblüten verhindert. Damit könnten unerwünschte Folgen der Eutrophierung reduziert oder gar verhindert werden. Andererseits zeigten Ziar et al. (2021) auf, dass die Platzierung einer FPV-Anlage in einem flachen Gewässer oberhalb bestehender Wasserpflanzen zu einem dreifach geringeren Biomassezuwachs führen kann. Diese Effekte könnten zu positiven Auswirkungen auf die Wasserqualität auch in landwirtschaftlichen Speicherbecken führen.

Ein weiterer insbesondere für die Bewässerungslandwirtschaft wichtiger Aspekt der FPV ist Verbesserung der Energieeffizienz der Bewässerung. Wasserpumpenanlagen mit Elektroantrieb haben einen deutlichen Vorteil im Vergleich zu den mit Diesel betriebenen Pumpen sowohl hinsichtlich der Arbeitswirtschaft und Wartung als auch hinsichtlich der möglichen Umweltauswirkungen (Fricke 2014). Ein Elektroantrieb ermöglicht weiterhin die Umsetzung von intelligenten automatisierten Bewässerungssteuerungssystemen. Die Belegung von Wasserspeicherbecken mit FPV kann somit die Energieeffizienz von Bewässerungssystemen erhöhen, die Energiekosten der Bewässerung verringern und ermöglicht ggf. die mit Strom betriebene Bewässerung auf Flächen, die vom Hof und Strom-Netzanschluss räumlich entfernt sind.

Neben den vielen Vorteilen von FPV-Anlagen im Vergleich zu den landbasierten PV-Anlagen existieren auch einzelne negative Aspekte (siehe Tabelle 15). Der Wartungsaufwand ist durch die schlechtere Erreichbarkeit erhöht (World Bank Group et al. 2019b). Der Bau von FPV-Anlagen ist durch die bislang geringe Nachfrage noch auf wenige Firmen verteilt, was verschiedene Nachteile von Verfügbarkeit bis zu Kosten nach sich zieht (Acharya und Devraj 2019).

Tabelle 15: Auswahl von Herausforderungen und Nachteilen von FPV-Anlagen gegenüber landbasierten PV-Anlagen mit Literaturhinweis

Nachteile	Literaturquelle
Mögliche Feuchtigkeitseffekte auf Modulen	Essak und Ghosh (2022)
Investitionsbedarf höher als Freiflächen PV	World Bank Group et al. (2019b); Sahu et al. (2016); Acharya und Devraj (2019)
Wartungsaufwand auf Wasser erhöht	World Bank Group et al. (2019b)
Erhöhter Verschleiß durch (Salz-) Wasser	Sahu et al. (2016)

Quelle: von Zepelin (2024).

5.1 Verdunstungsminderung durch Belegung der Wasserspeicher Oberfläche mit Photovoltaik

Die Ermittlung der Verdunstungsminderung und des Stromertrags durch Belegung mit einer schwimmenden Photovoltaikanlage erfolgte für die Speicherbeckenvarianten 2, 5, 7 und 9 für den Landschaftsausschnitt Magdeburger Börde (siehe Tabelle 12 in Kapitel 4). Die für dieses Kapitel relevanten Charakteristika dieser vier Wasserspeicherbeckenvarianten sind in Tabelle 16 zusammengefasst. Die Beckentiefen und Oberflächen sind die entscheidenden Faktoren in Bezug auf die Zielgrößen Verdunstung und Stromertrag von FPV-Anlagen.

Tabelle 16: Geometrische Angaben für die vier Speicherbeckenvarianten

Variante ¹	Volumen V_1 [m ³]	Sohlfläche A_0 [m ²]	Wasseroberfläche A_1 [m ²]	Beckentiefe h_{max} [m]	Wassertiefe h_1 [m]	Böschungsneigung $m_{Bösch}$ [-]
2	250.000	9.800	28.200	14,5	13,73	1:2,5
5	250.000	71.900	82.200	4	3,25	1:2,5
7	180.000	14.400	29.200	9,2	8,42	1:3
9	100.000	15.000	23.800	6	5,20	1:3

¹ Vgl. Tabelle 12 in Kapitel 4.

Quelle: eigene Darstellung.

Es wurden zwei Grade der Bedeckung von Wasserspeicherbecken mit FPV berücksichtigt. Bedeckungsgrad X_{15} basiert auf den geltenden rechtlichen Grundlagen für Anlagen in, an, über und unter oberirdischen Gewässern. Das Wasserhaushaltsgesetz (WHG)³ untersagt in §36 grundsätzlich die Installation von Solaranlagen „in und über einem oberirdischen Gewässer, das kein künstliches oder erheblich verändertes Gewässer ist (WHG § 36 Abs. 3). Der Betrieb auf den verbleibenden Wasserkörpern, insbesondere anthropogen geschaffenen Speicherbecken und Kiesgruben, wird nur erlaubt, wenn die Anlage bei Mittelwasserstand weniger als 15 % der Gewässer Oberfläche bedeckt und einen Mindestabstand von 40 Metern zu allen Ufern eingehalten wird (WHG § 36 Abs. 3). Der Bedeckungsgrad X_{90} ist mit 90 % nah an der kompletten Beschattung der Wasseroberfläche. Hierbei werden 10 % der Wasserfläche als nicht nutzbare Gewässerrandzone berücksichtigt (Conexio GmbH 2021). Mit den beiden Belegungsgraden kann einerseits die rechtlich mögliche Anlagengröße und andererseits die technisch mögliche Anlagengröße in Bezug auf die Verdunstungsminimierung und Wirtschaftlichkeit untersucht werden. Für eine einheitliche Beschreibung wird der Fall ohne FPV Anlage als X_0 definiert.

³ WHG (2009): Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts. Wasserhaushaltsgesetz - WHG. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/whg_2009/WHG.pdf.

5.2 Methodik

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Zeitraum zwischen 2007 und 2017 als Beobachtungszeitraum definiert, da in diesem Zeitraum die Bewässerungswassermengen im Landschaftsausschnitt Magdeburger Börde in täglicher Auflösung vorliegen. Für die Analyse der Klimaszenarien wird der gesamte Zeitraum in (i) einen Kontrollzeitraum C20 in der Vergangenheit, (ii) eine nahe Zukunft (NTF) und (iii) eine ferne Zukunft (LTF) aufgeteilt. Die genauen Daten sind in Tabelle 17 zu finden.

Tabelle 17: Übersicht über die modellierten Zeiträume

Zeitraum	Start	Ende
Beobachtungszeitraum	01.01.2007	31.12.2017
C20	01.01.1971	31.12.2000
NTF	01.01.2021	31.12.2050
LTF	01.01.2071	31.12.2100

Quelle: von Zepelin (2024).

Für die Berechnung der Verdunstung sowie des Energieertrages wurden die folgenden meteorologischen Daten benötigt: die Strahlung, die Windgeschwindigkeit, die Luftfeuchte, die Lufttemperatur sowie der Niederschlag. Diese Daten wurden von den drei benachbarten DWD-Klimastationen in Braunschweig, Magdeburg und Bottmersdorf-Klein Germersleben bezogen (siehe Tabelle 18). Von allen erforderlichen Daten wird nur der Niederschlag in der direkten Nähe zum Landschaftsausschnitt Magdeburger Börde gemessen. Neben den Daten der Klimastationen liegt auch das Kernensemble des DWD für das Szenario RCP 8.5 zwischen 1970 und 2100 in täglicher Auflösung vor. Ebers et al. (2024) beschreiben die Wahl der Ensemblemitglieder. Kleine Datenlücken einzelner Stunden oder Tage wurden für die Berechnungen linear interpoliert.

Tabelle 18: Erklärende Tabelle zu den DWD-Klimastationen und verwendeten Daten für die Ermittlung der Verdunstungsminderung und des Stromertrags für die mit FPV bedeckten Wasserspeicherbecken im Landschaftsausschnitt Magdeburger Börde

Ort	ID	Distanz zum Landschaftsausschnitt [km]	Bezogene Daten	Zeitliche Auflösung
Braunschweig	662	ca. 67	Horizontale Globalstrahlung	h, d
			Horizontale diffuse Strahlung	h
			Langwellige Wärmestrahlung	h, d
Magdeburg	3126	ca. 17	Lufttemperatur	h
			Luftfeuchtigkeit	h
			Windgeschwindigkeit	h
Bottmersdorf-Klein Germersleben	630	ca. 4	Niederschlag	h

Quelle: von Zepelin (2024).

Die Berechnung der Verdunstungsmengen in Abhängigkeit des Belegungsgrades und der Speicherbeckenvarianten erfolgte mittels des General Lake Modells (GLM). Das GLM ist ein eindimensionales Modell zur Simulation von Hydrodynamiken von Seen, Speicherbecken und Feuchtgebieten. Es berechnet die vertikale Stratifikation, also Schichtung von Seen, sowie die Durchmischung dieser Schichten. Zu- und Abflüsse, Oberflächenerwärmung und -abkühlung sowie Eisbildung werden dabei berücksichtigt.

Eingangsinformationen sind die zuvor genannten meteorologischen Zeitreihen, die als Meteo-Datei – erstellt mithilfe des Pakets „rDWD“ – in das Modell gegeben wurden. Das Klimaszenarien-Kernensemble des DWD

beinhaltet lediglich die horizontale Globalstrahlung bzw. kurzwellige Strahlungssumme. Die Ermittlung des Bewölkungsgrades erfolgte aus der langwelligen Einstrahlung (für weitere Details siehe von Zepelin (2024)).

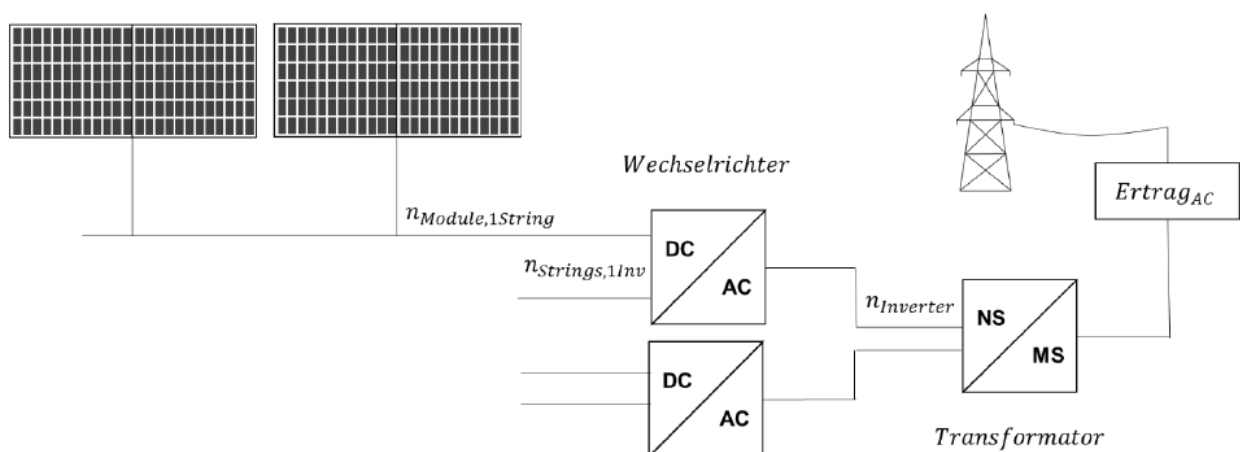
Der Stromertrag der FPV-Anlagen auf den Speicherbecken wurde mithilfe von PVlib python berechnet. Die Toolbox ist frei verfügbar und wird von einer Vielzahl von Akteuren gemeinsam weiterentwickelt, um den Ausbau der PV-Industrie zu beschleunigen (Andrews et al. 2014). PVlib benötigt festzulegende Randbedingungen und meteorologische Zeitreihen zur Ertragsberechnung. Zu den Randbedingungen gehören Informationen zu den genutzten PV-Modulen, Wechselrichtern und Transformatoren sowie Koordinaten der Anlage, Neigungswinkel und Ausrichtung der Module. Die meteorologischen Zeitreihen beinhalten die Globalstrahlung, die diffuse und direkte Strahlung sowie Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit. Diese sind beim DWD frei verfügbar. Die Umrechnung der Strahlungsdaten für PVlib wird detailliert in von Zepelin (2024) beschrieben.

Für die Berechnung des Stromertrags wurden zwei FPV-Systeme auf Basis realer Anlagen modelliert. Das eine System mit südlich ausgerichteten Modulen basiert auf einer pontonbasierten Lösung. Das zweite System, bei dem jeweils die Hälfte der Module nach Osten bzw. Westen ausgerichtet ist, verwendet eine schwimmende Metallkonstruktion. Die Verwendung der gleichen Größenverhältnisse ermöglicht die theoretische technische Umsetzung der berechneten Anlagen. Neben den beiden Systemen werden auch der Belegungsgrad und die Speicherbeckenvarianten variiert (siehe Kapitel 5.1).

Um die Anzahl der Module für die Ertragsberechnung in PVlib in Abhängigkeit der Belegungsgrade X_{15} und X_{90} zu berechnen, werden die Wasseroberflächen sowie die Anlagengeometrien benötigt. Die einzelnen Abstände zwischen den Modulen wurden anhand der Geometrien ihrer Vorbilder nachempfunden. Die Moduleigenschaften unter elektrischer Last wurden durch ein manuell konfiguriertes Panel auf Grundlage des Datenblatts für ein konkretes Solarmodul berechnet (für Details siehe von Zepelin (2024)). Neben zusätzlichen elektrotechnischen Eigenschaften wie z. B. Spannung und Stromstärke am optimalen Betriebspunkt ist auch die maximale Leistung bei Standardbedingungen eine grundlegende Eingangsgröße für PVlib.

Abbildung 24 zeigt schematisch den Weg der Energie von der PV-Anlage bis in das Stromnetz. Einzelne Module werden zu Strings in Reihe $n_{Module,1String}$ geschaltet und münden parallel mit anderen Strings in einen Wechselrichter, der den Gleichstrom zum netzüblichen Wechselstrom umwandelt. Einer oder mehrere Wechselrichter $n_{Inverter}$ münden in den Transformator, der die Spannung der Anlage (Niederspannung NS bzw. 400 V) auf die Netzspannung (Mittelspannung MS bzw. 20 kV) anhebt. Werden mehrere Module in Reihe geschaltet, ist die Gesamtspannung die Summe der Spannungen aller einzelnen Module, die Stromstärke des Strings bleibt dabei gleich.

Abbildung 24: Schematische Darstellung des PV-systems von Modul bis zur Netzeinspeisung



Quelle: von Zepelin (2024).

Demgegenüber steht, dass parallele Strings die Stromstärke aufsummieren, die Spannung aber beibehalten. Ein ausgewogenes Verhältnis von Modulen pro String zu Strings pro Wechselrichter ist daher wichtig für die Dimensionierung des Wechselrichters. von Zepelin (2024) beschreibt die Berechnung der Anzahl der Module je Wechselrichter, der gesamten Anzahl der Module, der Anzahl von belegten und teilweise belegten Wechselrichtern, der Leistung und des Wirkungsgrads des Wechselrichters sowie der Stromverluste von Transformatoren.

Die Bestimmung des Energieertrages erfordert die Berücksichtigung der Wirkungsgrade und Verluste im System. Für diese Arbeit wurde Beschattung von außerhalb des Beckens wegen der offenen Wasserfläche und des Abstandes der Anlage zum Ufer vernachlässigt. Die Berechnungen des Energieertrages wurden wie auch die Berechnung der Verdunstung ohne Schnee- und Eisbildung getätigt, weshalb der Schneeverlust in dieser Untersuchung vernachlässigt wird. Nach Liu et al. (2017) wurde auch Staubablagerung (Engl.: *soiling*) nicht berücksichtigt. Berücksichtigung finden jedoch die Verluste im Gleich- und Wechselstromkabel. Die Begrenzung der Wirkungsgrade des genutzten Moduls und des Wechselrichters reduzieren ebenfalls den Ertrag und wurden berücksichtigt.

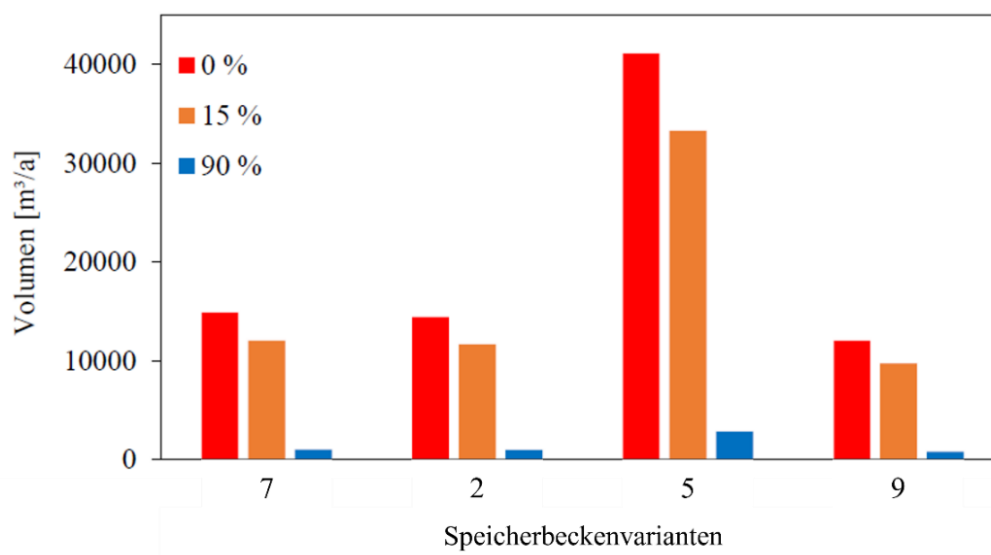
5.3 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Verdunstungsberechnung sowie des Stromertrages und daraus resultierende wirtschaftliche Faktoren vorgestellt. Dabei werden der Beobachtungszeitraum und das Klimaszenario RCP 8.5 (repräsentiert durch das Kernensemble des DWD) betrachtet. Auch der Einfluss verschiedener Speicherbeckenvarianten und Belegungsgrade wird in diesem Kapitel vorgestellt.

5.3.1 Verdunstungsverluste

In Abbildung 25 sind die jährlichen Verdunstungsverluste je Speicherbeckenvariante in Abhängigkeit des Bedeckungsgrades der FPV-Anlage dargestellt.

Abbildung 25: Mittlere jährliche Verdunstungsvolumen über den Beobachtungszeitraum für keinen, 15 % und 90 % Belegungsgrad sowie die vier Speicherbeckenvarianten

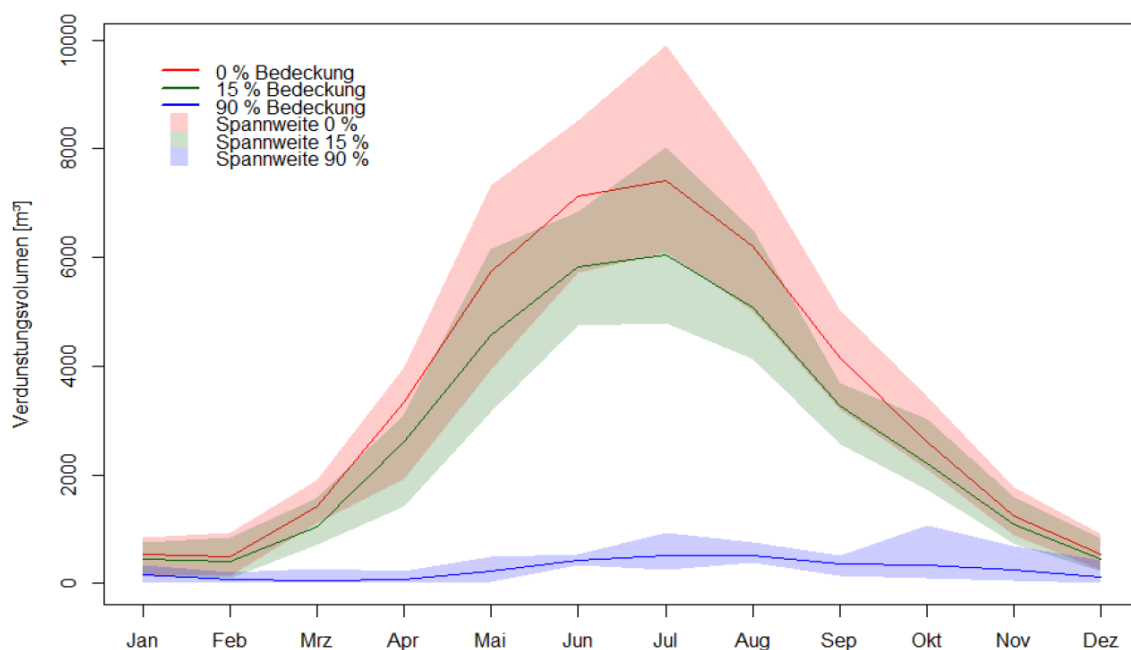


Quelle: von Zepelin (2024).

Abbildung 26 zeigt den Verlauf des monatlichen Verdunstungsvolumens im Jahresgang für Speicherbeckenvariante 5. Dargestellt sind neben den mittleren monatlichen Verdunstungsvolumen (rote, grüne und blaue Linie) über den Beobachtungszeitraum auch die Unsicherheiten der jeweiligen Bedeckungsgrade. Die Unsicherheiten werden stellvertretend durch die minimale und maximale Verdunstungssumme jedes Monats dargestellt, welche jeweils eine (rote, grüne und blaue) Fläche aufspannen.

Es lässt sich erkennen, dass keine (0 %) und geringe (15 %) Bedeckungsgrade im Winter aufgrund der geringen Verdunstungssummen nur geringe Spannweiten aufweisen, während diese im Sommer aufgrund der großen Verdunstungssummen ansteigen. Die Verdunstungssummen bei einem Bedeckungsgrad von 90 % weisen ganzjährig nur eine geringe Spannweite auf.

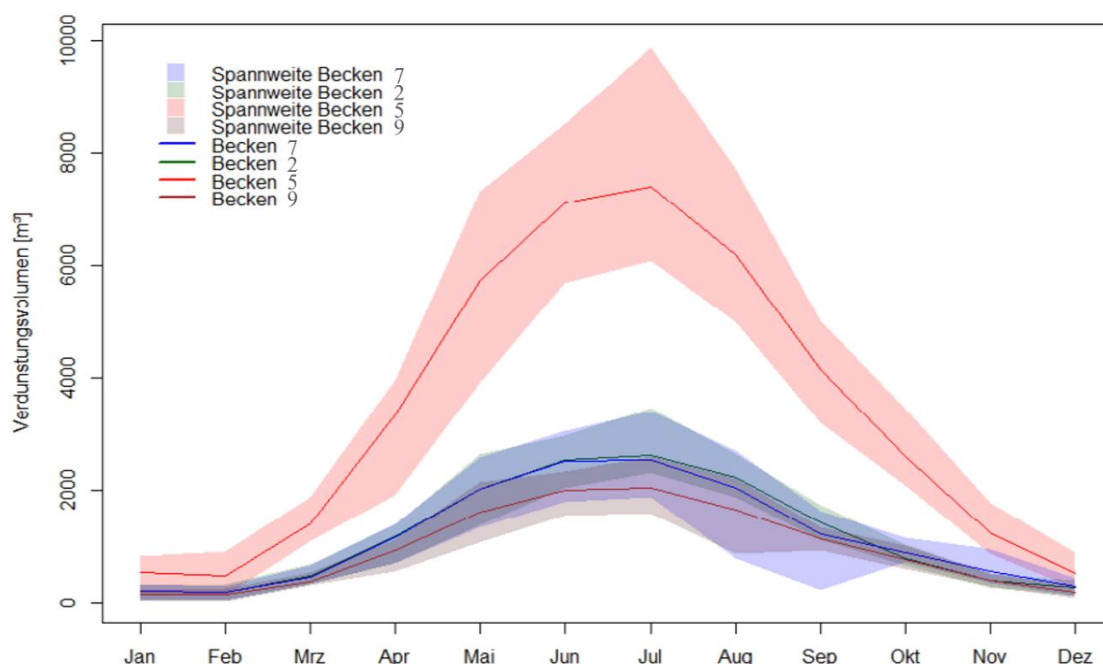
Abbildung 26: Mittleres monatliches Verdunstungsvolumen (Linien) im Beobachtungszeitraum für keinen (rot), 15 % (grün) und 90 % (blau) Belegungsgrad sowie Maximum und Minimum der monatlichen Verdunstungsvolumen (farbige Bereiche) für Speicherbeckenvariante 5



Quelle: von Zepelin (2024).

In Abbildung 27 ist das mittlere Verdunstungsvolumen pro Monat für den Beobachtungszeitraum für alle Speicherbeckenvarianten dargestellt. Die farbigen Bereiche resultieren erneut aus Minimum und Maximum jedes Monats. Das Verdunstungsvolumen aus allen Speicherbeckenvarianten liegt zum Anfang und Ende des Jahres im Mittel zwischen 160 m³ im Januar und 530 m³ im Dezember. Während das mittlere monatliche Maximum der flachen Speicherbeckenvariante 5 (rote Linie) bei 7400 m³ liegt, beträgt das Maximum der kleinen Speicherbeckenvariante 9 lediglich 2050 m³. Die Maxima der Speicherbeckenvarianten 2 (grüne Linie) und 7 (blaue Linie) liegen bei 2650 m³ und 2550 m³.

Abbildung 27: Mittleres monatliches Verdunstungsvolumen (Linien) und deren Spannweite (resultierend aus Minimum und Maximum) im Beobachtungszeitraum für die vier Speicherbeckenvarianten



Quelle: von Zepelin (2024).

Die Verdunstungsverluste in den Zeiträumen C20, NTF und LTF konnten mithilfe von GLM und den Klimamodelldaten des DWD-Kernensembles berechnet werden. Tabelle 19 zeigt die relative Änderung des mittleren jährlichen Verdunstungsvolumens von NTF und LTF gegenüber dem Kontrollzeitraum C20 in Abhängigkeit von Beckenform und Belegungsgrad. Die mittleren Verdunstungsverluste des Zeitraums LTF liegen je nach Bedeckungsgrad zwischen 13,2 % und 82,1 % über den Verdunstungsverlusten des Zeitraums C20.

Tabelle 19: Relative Änderungen des Verdunstungsvolumen der nahen (NTF) und fernen (LTF) Zukunft gegenüber dem Kontrollzeitraum (C20) für die drei Belegungsgrade und vier Speicherbeckenvarianten

Speicherbecken-variante	Belegungsgrad %	NTF zu C20 %	LTF zu C20 %
2	0	5,1	15,2
	15	6,0	19,7
	90	22,9	68,8
5	0	5,4	18,0
	15	6,1	21,1
	90	22,9	82,1
7	0	5,0	15,2
	15	5,9	19,5
	90	22,8	81,5
9	0	3,2	13,2
	15	6,0	19,5
	90	23,1	82,2

Quelle: von Zepelin (2024).

Tabelle 20 zeigt die relativen Änderungen des Wasserspiegels und der Temperatur der Wasseroberfläche von NTF und LTF gegenüber C20 für die vier Speicherbeckenvarianten mit keinem (0 %), geringem (15 %) und großem (90 %) Belegungsgrad. Zu erkennen ist, dass der Wasserspiegel über alle betrachteten Varianten hinweg bei den Belegungsgraden 0 % und 15 % sinkt. Bei einem hohen Belegungsgrad hingegen steigt der Wasserstand geringfügig an. Eine Ausnahme bildet hier das tiefe Becken 2, welches in der fernen Zukunft einen geringeren Wasserstand aufweist. Die Änderung der Temperatur der Wasseroberfläche hingegen zeigt ein klares Bild über alle betrachteten Varianten. Mit der Zeit (NTF, LTF) und zunehmendem Belegungsgrad steigt auch die Wassertemperatur.

Tabelle 20: Relative Änderungen des Wasserspiegels und der Oberflächentemperatur der nahen (NTF) und fernen (LTF) Zukunft gegenüber dem Kontrollzeitraum C20 für drei Belegungsgrade und vier Speicherbeckenvarianten

Speicherbecken- variante	Belegungsgrad %	Wasserspiegel		Oberflächentemperatur	
		NTF zu C20, %	LTF zu C20, %	NTF zu C20, %	LTF zu C20, %
2	0	-0,2	-3,8	9,3	26,4
	15	0,0	-2,2	10,0	28,1
	90	0,1	-4,5	19,7	54,9
5	0	-0,8	-10,4	9,2	25,6
	15	-0,4	-6,6	9,9	27,4
	90	0,6	1,3	19,3	54,9
7	0	-0,3	-5,2	9,3	26,1
	15	-0,1	-3,1	9,9	28,0
	90	0,2	0,5	19,3	54,5
9	0	2,0	-4,8	9,2	25,9
	15	-0,2	-4,5	9,9	27,7
	90	0,4	0,8	19,3	54,8

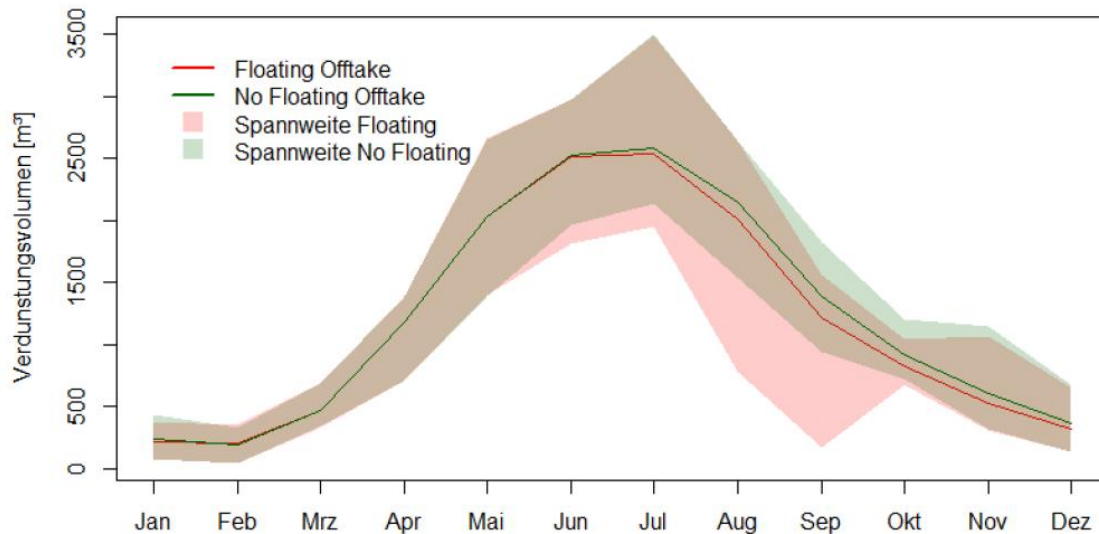
Quelle: von Zepelin (2024).

Das geplante Speicherbecken dient der Bereitstellung von landwirtschaftlichem Bewässerungswasser in Trockenzeiten. Daher ist der Einfluss des Zu- und Abflusses⁴ in und aus dem Speicherbecken essentiell für eine realistische Betrachtung des Verdunstungsvolumens. Auch der Ort der Wasserentnahme aus dem Speicherbecken – Oberflächenentnahme oder Entnahme an der Beckensohle – kann das Verdunstungsvolumen beeinflussen.

Abbildung 28 vergleicht die Verdunstungsvolumina der Monate eines Jahres beider Entnahmestrategien für Speicherbecken 7. Das Verdunstungsvolumen bei oberflächennaher Entnahme (rote Linie) fällt im Spätsommer kleiner aus, als mit der sohnahen Entnahme, zu allen anderen Zeitpunkten sind die Verdunstungssummen ähnlich. Die Spannweite der Verdunstungssummen ist bei der oberflächennahen Entnahme im September besonders groß.

⁴ Zufluss bezieht sich auf das Auffüllen von Wasserspeicherbecken; Abfluss bezieht sich auf das Entnehmen des Wassers aus dem Becken für Bewässerung.

Abbildung 28: Mittleres monatliches Verdunstungsvolumen (Linien) im Beobachtungszeitraum für Speicherbeckenvariante 7 mit Entnahme an der Oberfläche (floating offtake) und Entnahme an der Beckensohle (no floating offtake) sowie die Spannweite resultierend aus Minimum und Maximum



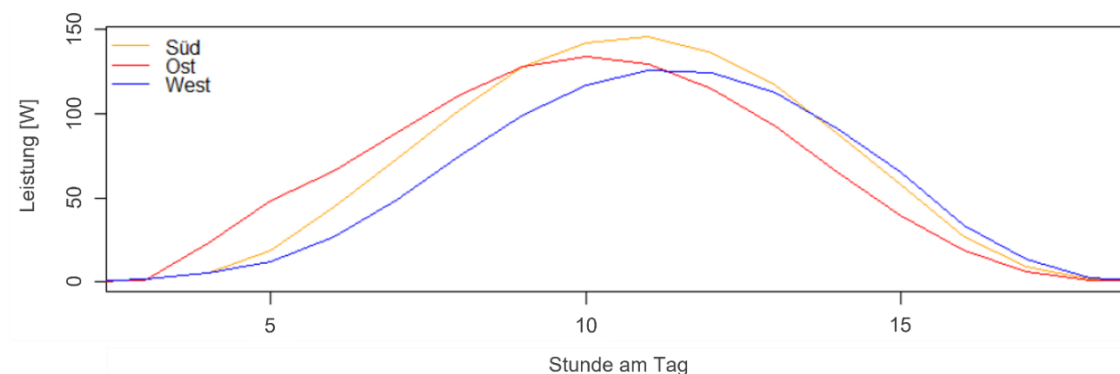
Quelle: von Zepelin (2024).

5.3.2 Stromertrag durch FPV

Die Leistung einzelner FPV-Module hängt von ihrer Ausrichtung und vom Neigungswinkel ab. In dieser Arbeit wurden die Anlagen mit Süd-Ausrichtung und Ost-West-Ausrichtung (siehe Kapitel 5.2) berücksichtigt.

Abbildung 29 zeigt die mittlere Leistung eines Moduls zwischen 3 Uhr und 18 Uhr mit verschiedenen Ausrichtungen über alle Tage des Beobachtungszeitraums. Die Leistung des Moduls bei Ausrichtung nach Osten (rote Linie) hat ihren Höhepunkt gegen 10 Uhr, nach Süden (gelbe Linie) um 11 Uhr und nach Westen (blaue Linie) um 12 Uhr. Die Ausrichtung nach Süden bringt im Mittel die höchste Maximalleistung, gefolgt von Osten und Westen.

Abbildung 29: Mittlere Leistung im Tagesgang zwischen 3 Uhr und 18 Uhr im Beobachtungszeitraum für ein Modul mit Süd-, Ost- und Westausrichtung

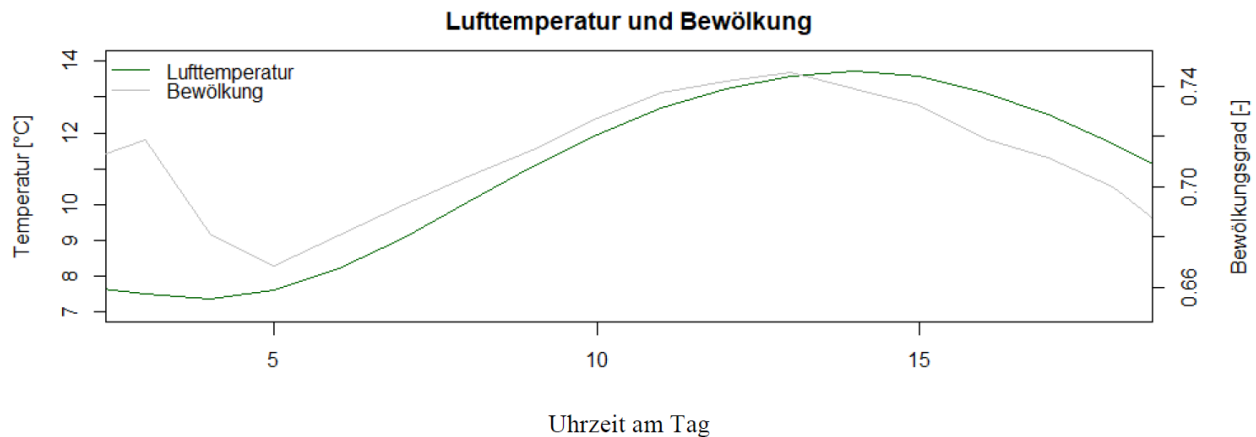


Quelle: von Zepelin (2024).

Auffällig bei dieser Analyse ist, dass die Leistungskurve des West-Moduls mit ihrem Höhepunkt am Nachmittag durch den Verlauf der Sonne auf der Nordhalbkugel im Tagesgang unter der Leistungskurve des Ost-Moduls liegt, obwohl das West-Modul am Nachmittag der Sonneneinstrahlung besser nutzt. Dafür wurden als erklärende

Variablen zusätzlich die Lufttemperatur und die Bewölkung berücksichtigt. Beide Variablen sind morgens klein und steigen zum Nachmittag hin an (siehe Abbildung 30). Eine erhöhte Bewölkung am Nachmittag verringert die Einstrahlung, eine erhöhte Lufttemperatur erhöht die Modultemperatur. Beide genannten Einflüsse verringern die Leistung des Moduls am Nachmittag, weswegen die Leistungskurve des West-Moduls folglich geringer ausfällt.

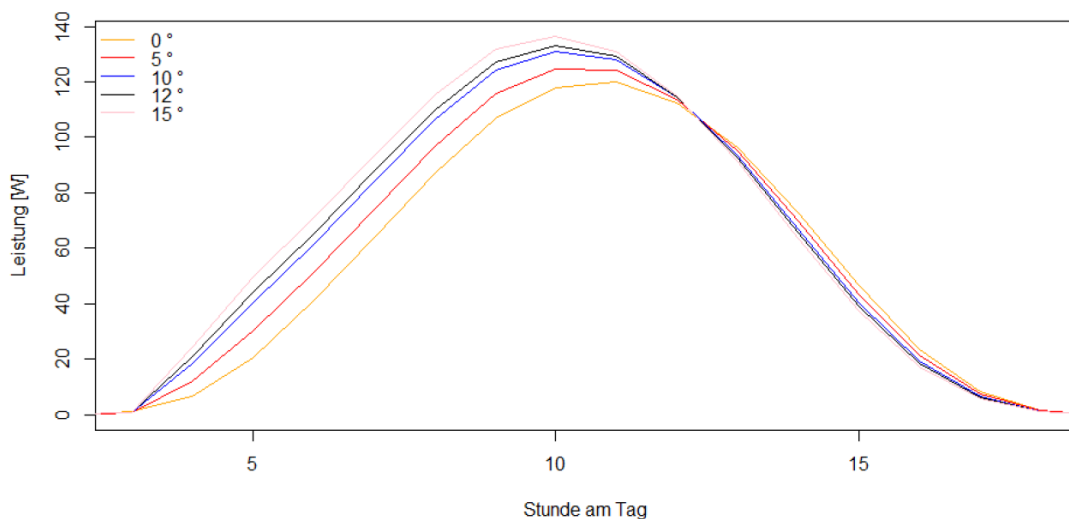
Abbildung 30: Mittlere Lufttemperatur und Bewölkungsgrad im Tagesgang zwischen 3 und 18 Uhr



Quelle: von Zepelin (2024)

Abbildung 31 zeigt die Abhängigkeit der Leistung vom Neigungswinkel der Module. Dargestellt sind die Leistungen eines Moduls mit Ost-Ausrichtung bei Neigungswinkeln zwischen 0° und 15° . Die Spitzenleistung des Moduls steigt, je größer der Neigungswinkel ist und die Leistungsphase wird zeitlich Richtung Tagesbeginn verschoben. Auffällig ist, dass der Versatz der Kurven in die Morgenstunden nicht in gleichem Maße auch Leistungseinbußen am Nachmittag impliziert. Bei den Ergebnissen der Berechnung des Stromertrages stellt sich die Ausrichtung der Anlage nach Süden (Abbildung 29) mit einem Neigungswinkel von 15° (Abbildung 31) als beste Lösung dar. Durch den erhöhten Windangriff bei größeren Neigungswinkeln werden viele Anlagen mit Winkeln von 12° gebaut.

Abbildung 31: Mittlere Leistung im Tagesgang zwischen 3 Uhr und 18 Uhr für ein Modul bei verschiedenen Neigungswinkeln



Quelle: von Zepelin (2024).

Im weiteren Verlauf werden ausschließlich Module mit 12 ° Neigungswinkel zugrunde gelegt. Für die Variation verschiedener horizontaler Ausrichtungen wird weiter die Süd-Anlage und die Ost-West-Anlage betrachtet.

Tabelle 21 zeigt die Ergebnisse der Stromertrag-Modellierung für die nach Süden ausgerichtete Anlage. Die Ergebnisse wurden in Abhängigkeit von der Speicherbeckenvariante sowie dem Belegungsgrad ermittelt. Dargestellt werden verschiedene Aspekte der Anlage hinsichtlich Effizienz (Leistungsverhältnis, Engl.: *Performance Ratio*, PR), Anzahl der Module, Leistung der Anlage und jährlichen Ertrags. Nach der PR liegt die nach Süden ausgerichtete Anlage zwischen 74,02 % und 81,71 %. Die Anzahl der Module liegt bei kleinem Belegungsgrad zwischen 936 und 3.800 und bei großem Belegungsgrad zwischen 6.600 und 24.000. Entsprechend verhält sich auch die Anlagenleistung und der jährliche Energieertrag. Dieser liegt zwischen 425 MWh/a und 8.884 MWh/a.

Tabelle 21: Stromertrag für 15 % und 90 % Belegungsgrad und die vier Speicherbeckenvarianten für die nach Süden ausgerichtete Anlage

Speicherbecken- variante	Belegungsgrad %	PR %	Module -	Leistung kWp	Stromertrag MWp/a
2	15	76,22	1.232	567	425
	90	80,12	7.776	3.577	2.823
5	15	77,65	3.800	1.748	1.337
	90	81,71	24.000	11.040	8.884
7	15	76,21	1.276	587	441
	90	80,27	8.288	3.812	3.014
9	15	74,02	936	431	314
	90	79,72	6.600	3.036	2.384

Quelle: von Zepelin (2024).

Tabelle 22 zeigt analog zu Tabelle 22 die Ergebnisse für die nach Osten und Westen ausgerichtete FPV-Anlage. Hier liegt die PR zwischen 80,27 % und 87,27 % und die Anzahl der Module zwischen 1.248 und 28.800.

Tabelle 22: Stromertrag für 15 % und 90 % Belegungsgrad und die vier Speicherbeckenvarianten für die nach Osten und Westen ausgerichtete Anlage

Speicherbecken- variante	Belegungsgrad %	PR %	Module -	Leistung kWp	Stromertrag MWp/a
2	15	81,85	1.512	696	494
	90	85,85	9.660	4.444	3.307
5	15	83,56	4.608	2.120	1.536
	90	87,27	28.800	13.248	10.021
7	15	81,85	1.512	696	494
	90	86,01	10.368	4.769	3.556
9	15	80,27	1.248	574	402
	90	85,38	8.064	3.709	2.745

Quelle: von Zepelin (2024).

Der Stromertrag hängt von vielen verschiedenen meteorologischen Faktoren ab, wie Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit und Strahlung. Einige dieser Faktoren verändern sich im Zuge des Klimawandels, sodass sie den Stromertrag der Zukunft beeinflussen. Daher ist es wichtig, neben der Betrachtung des Ertrages infolge

gemessener meteorologischer Daten (Beobachtungszeitraum) auch die Veränderung des Ertrages durch die Änderung der Rahmenbedingungen abzuschätzen.

In Tabelle 23 sind die relativen Veränderungen des Stromertrages des Klimaszenarios RCP 8.5 dargestellt. Dabei wird unterschieden zwischen der nach Süden und der nach Osten und Westen ausgerichteten FPV-Anlage in Abhängigkeit der Beckenform und des Belegungsgrades.

Tabelle 23: Die relative Änderung des mittleren Jährlichen Stromertrages für die nahe (NTF) und ferne (LTF) Zukunft sowie Süd- und Ost-West-Anlage für 15 % und 90 % Belegungsgrad und die vier Speicherbeckenvarianten gegenüber dem Kontrollzeitraum C20

Speicherbecken- variante	Belegungsgrad %	Südausrichtung		Ost-West-Ausrichtung	
		NTF %	LTF %	NTF %	LTF %
2	15	-3,09	-5,49	-2,77	-4,93
	90	-2,98	-5,35	-2,62	-4,74
5	15	-3,05	-5,46	-2,65	-4,78
	90	-2,93	-5,29	-2,57	-4,67
7	15	-3,09	-5,49	-2,76	-4,91
	90	-2,97	-5,35	-2,62	-4,73
9	15	-3,17	-5,58	-2,84	-5,02
	90	-2,99	-5,37	-2,64	-4,76

Quelle: von Zepelin (2024).

Die relative Änderung des Stromertrages wurde aus den Mittelwerten der Ergebnisse der sechs Ensemblemitglieder gemittelt über den betrachteten Zeitraum (C20, NTF oder LTF) berechnet. Alle mittleren relativen Änderungen prognostizieren eine Reduktion des Energieertrages in NTF und LTF. Dabei ist die Reduktion in der fernen Zukunft LTF höher als in der nahen Zukunft NTF. Die Reduktion der Erträge fällt für die nach Süden ausgerichtete Anlage leicht höher aus. Die Reduktion ist bei kleinen Belegungsgraden ausgeprägter als bei hohen.

5.4 Synergien zwischen Wasserspeicherung und Energieerzeugung

Die Ergebnisse der Arbeit zur Kopplung von i) Wasserspeicherung für landwirtschaftliche Bewässerung mit ii) Stromerzeugung mittels FPV-Anlagen zeigen, dass die prozentuale Verdunstungsreduktion infolge der Beschattung der Wasseroberfläche durch FPV über dem jeweiligen Belegungsgrad liegt. Die prozentualen Verdunstungsreduktionen sind mit 19 % für den kleinen und 93 % für den großen Bedeckungsgrad verglichen mit der Literatur hoch. Doch auch dort werden größere Verdunstungsreduktionen als Belegungsgrade verzeichnet (Fereshtehpour et al. 2021; Abdelal 2021; Agrawal et al. 2022; Farrar et al. 2022), weshalb die Ergebnisse als realistisch eingeschätzt werden. Ein Grund für dieses Phänomen ist, dass die FPV-Anlage nicht nur die eingehende Strahlung reduziert, sondern auch den Austausch wassergesättigter Luft durch die reduzierte Windgeschwindigkeit.

Die Verdunstungsverluste (basierend auf dem Klimaszenarien-Kernensembles des DWD, RCP 8.5) erhöhen sich in naher und ferner Zukunft (NTF und LTF). Die Verdunstungsvolumina sind auch in Zukunft bei 90 % Belegungsgrad deutlich kleiner als bei 15 %.

Der Einfluss des schwankenden Wasserstandes auf die Verdunstung wurde primär mit der Veränderung der Wasseroberfläche und sekundär mit der Wassertemperatur begründet. Nach der Entnahme von Wasser sinkt der Wasserstand, es verkleinert sich somit auch die Wasseroberfläche. Durch eine kleinere Wasseroberfläche kann bei gleicher Verdunstungshöhe weniger Wasser verdunsten.

Der Einfluss der Wassertemperatur, besonders der Wassertemperatur der Oberfläche, zeigt sich im Vergleich von zwei Entnahmearten. Wird das Bewässerungswasser im Sommer von der Wasseroberfläche entnommen, verringert sich das verdunstete Wasservolumen, da die neue Oberfläche kälter ist und weniger Energie zum Phasenübergang der Verdunstung zur Verfügung hat. Da nach den beschriebenen, erwarteten klimatischen Veränderungen Dürren häufiger werden, steigt die Bedeutung, in welcher Höhe die Wasserentnahme stattfindet.

Im Vergleich der zwei verschieden ausgerichteten FPV-Anlagen (nach Süden und nach Ost- West) zeigt sich, dass die Ost-West-Ausrichtung pro Modul weniger Ertrag bringt, aber je Speicherbecken und Belegungsgrad zwischen 18 % und 33 % mehr Module auf derselben Fläche installiert werden können. Die Performance Ratio (PR) bei allen Varianten von Speicherbecken und FPV-Anlagen liegt nach der Literatur im unteren, jedoch noch effizienten Bereich. Die großen Belegungsgrade der Ost-West-Anlage liegen mit einer mittleren PR von 86,13 % leicht über dem deutschen Median mit 84 % (Reich et al. 2012). Die Ost-West-Anlage erzielt somit eine um 5,76 % bessere PR als die Anlage mit Südausrichtung.

Anhand des Klimaszenarien-Kernensembles des DWD (RCP 8.5) verringert sich der Stromertrag infolge des Klimawandels um bis zu 5 %. Ost-West-Anlagen sind davon etwas weniger betroffen, da sie mit einer Performance Ratio um etwa 5,76 % über den Süd-Anlagen liegen und damit die einfallende Strahlung effizienter umsetzen. Wenn erfolgreiche Maßnahmen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen umgesetzt werden, beschreiben die berechneten Verluste die maximalen Verluste in Abhängigkeit der Meteorologie, was aufgrund der Größenordnung akzeptabel wäre. Allerdings sind Aussagen und Szenarien für zukünftige Entwicklungen mit erheblichen Unsicherheiten verbunden.

Entsprechend unterliegen die Aussagen dieser Arbeit zu den Verdunstungsverlusten sowie zum Stromertrag einer Vielzahl an Unsicherheiten. Für eine Plausibilitätsschätzung der dargestellten Ergebnisse ist die Transparenz zu Annahmen von maßgeblichen Einflussfaktoren im Verlauf der Modellierung wichtig. Limitationen dieser Arbeit können theoretische Einschränkungen aufgrund einschränkender Modellannahmen, methodisch vereinfachter Werkzeuge hinsichtlich der verwendeten Analysemethoden, sowie die Repräsentativität der Datenquellen und damit verbundener Fragen der Generalisierbarkeit beinhalten. Hinzu kommen zeitliche Einschränkungen durch den spezifischen Beobachtungszeitraum und generell zufällige sowie systematische Fehler.

Zukünftige Studien sollten Grundlagen erarbeiten, auf denen rechtliche Rahmenbedingungen bezüglich des Belegungsgrades angepasst werden können. Dazu gehören qualitative sowie quantitative Forschung zu gewässerökologischen und physikalischen Parametern. Im Rahmen dieser Forschung sollte die Lichtextinktion von landwirtschaftlichen Speicherbecken durch FPV untersucht werden, die maßgeblich die Präzision modellbasierter Verdunstungsberechnungen beeinflusst. Ungeachtet der rechtlichen Rahmenbedingungen könnte der ideale Belegungsgrad für eine vollständige Resilienz von landwirtschaftlichen Speicherbecken erforscht werden, um nach potentiellen Änderungen des rechtlichen Rahmens zeitnah effiziente Lösungen für die Landwirtschaft umzusetzen.

6 Diskussion

Dieses Working Paper fasst ausgewählte Ergebnisse aus dem Verbundforschungsprojekt LAWAMAD – Landwirtschaftliches Wassermanagement in Deutschland – zusammen. Im Rahmen des LAWAMAD-Teilprojektes A wurde die technische Umsetzbarkeit eines lokalen, regionalen und überregionalen Wasserspeicherungskonzepts für den ackerbaulichen Landschaftsausschnitt Magdeburger Börde (Sachsen-Anhalt) und für den durch Gartenbau geprägten Landschaftsausschnitt Weingarten (Rheinland-Pfalz) durchgeführt. Das lokale Konzept beruht auf Auffangen und Speicherung des Oberflächenabflusses bei Starkregenereignissen. Beim regionalen und überregionalen Wasserspeicherungskonzept werden die Wasserentnahmen im Winterhalbjahr aus Fließgewässern II. und III. Ordnung (regional) bzw. I. Ordnung (überregional) zur Bewässerung im Sommerhalbjahr zwischengespeichert.

Die hydrologischen Simulationen der Landschaftsausschnitte zeigen, dass die für die Bewässerung erforderlichen Wassermengen vor allem bei der Umsetzung des regionalen und überregionalen Konzepts generiert werden können, auch unter Berücksichtigung zukünftiger klimatischer Entwicklungen und deren Auswirkungen auf die Wasserhaushaltsgrößen und die Abflussdynamik. Somit stellt oberirdische Speicherung von Entnahmen aus Fließgewässern grundsätzlich eine Option zur Erhöhung der Wasserverfügbarkeit für den Pflanzenbau dar.

Die Umsetzung des lokalen Konzeptes ist hierbei weniger empfehlenswert, da:

- deutlich kleinere Wassermengen generiert und gespeichert werden können,
- bestimmte Voraussetzungen an das Gelände (Hangneigung) und den Bodentyp erfüllt werden müssen, und
- Zielkonflikte mit Erosionsschutz verschärft werden können.

Die Untersuchung des regionalen Wasserspeicherungskonzepts führte zur Erkenntnis, dass kleinere Fließgewässer häufig unbeobachtet sind, sodass Informationen zu langjährigen Abflussmengen oder saisonalen Unterschieden unzureichend sind. Es besteht ein Monitoring-Bedarf für kleinere Fließgewässer. Bei fehlenden Beobachtungsdaten stellt die Simulation von Abflusszeitreihen mittels hydrologischer Modelle die einzige Alternative dar (siehe Abschnitt 3.1.1).

Für die oberirdische Wasserspeicherung sollen ausschließlich Wassermengen genutzt werden, welche nicht zur Aufrechterhaltung wichtiger ökologischer Funktionen der Gewässer benötigt werden. Für die Ermittlung der potenziell speicherbaren Wassermengen aus Fließgewässern wurde im LAWAMAD-Projekt der mittlere Niedrigwasserabfluss (MNQ) als Entnahmegrenze berücksichtigt. Im Rahmen zukünftiger Forschungsaktivitäten sollen andere Kenngrößen – z. B. ökologisch-begründete Mindestwasserführung – als Entnahmegrenze angewandt und weiterentwickelt sowie ihr Einfluss auf die Ökologie der Oberflächengewässer, den Entnahmezeitraum und die potenziell speicherbaren Wassermengen untersucht werden.

Die im LAWAMAD-Projekt erzielten hydrologischen Ergebnisse für zwei Landschaftsausschnitte sollen in weiteren Forschungsaktivitäten hochskaliert werden, um die potenziell speicherbaren Wassermengen für das gesamte Einzugsgebiet einzelner Fließgewässer ermitteln zu können. Dies ist eine Voraussetzung für die Entwicklung regionaler Wasserspeicherungs- und Wassermanagementkonzepte sowie eines Konzepts für einen Interessensausgleich, wenn es räumlich (Oberlieger vs. Unterlieger) und zeitlich (frühzeitige Anwender (Engl.: *Innovators* und *Early Adopters*) vs. spätere Anwender aufgrund mangelnden Bedarfs oder Bereitschaft (Engl.: *Early Majority* und *Late Majority*)) zu einer versetzten Umsetzung dieser technischen Anpassungsoption kommt.

Die Planung der Wasserspeicherbecken und die Ermittlung des erforderlichen Investitionsbedarfs haben gezeigt, dass oberirdische Wasserspeicherung eine kostenintensive Anpassungsmaßnahme ist. Je nach Größe, Bauform und Ausführung eines Speichers liegt der Investitionsbedarf zwischen 20-75 € pro 1 m³ gespeicherten Wassers unter Berücksichtigung von erforderlichen Bauarbeiten und Materialien, technischen Anlagen und Baunebenkosten. In Anbetracht dessen, dass allein die Bewässerung nicht für alle Ackerbaukulturen wirtschaftlich ist (Fricke 2014, 2022; SMUL), ist die Bewässerung mit gespeichertem Wasser ohne Förderung für

die meisten Ackerbetriebe unter derzeitigen Rahmenbedingungen kaum tragbar. Für Gartenbaubetriebe dagegen stellt die Kombination von Bewässerungs- und Wasserspeichungsinfrastruktur eine wirtschaftliche Option dar, u. a. wegen des Ausmaßes der Ertragsverluste bei unzureichender Bewässerung.

Der Wasserspeicherungsbedarf und der damit verbundene Investitionsbedarf für den Bau eines Wasserspeicherbeckens kann durch eine Minderung des Bewässerungsbedarf mittels pflanzenbaulicher Maßnahmen und Verbesserung der Bewässerungseffizienz reduziert werden. Durch Anpassung der Bauform, des Oberflächen-Tiefe-Verhältnisses, der Abdichtung und anderer Ausführungsaspekte kann der Investitionsbedarf ebenfalls reduziert werden.

Die multifunktionale Nutzung der Wasserspeicherbecken kann ebenfalls zur Verbesserung ihrer Wirtschaftlichkeit beitragen. Im Rahmen des LAWAMAD-Projektes wurden insbesondere die Synergien zwischen Wasserspeicherung für die Bewässerung und Energieerzeugung mittels FPV-Anlage untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass bei maximaler Belegung der Wasseroberfläche mit FPV die Verdunstung erheblich reduziert werden kann, was auch für die Bemessung des Wasserspeicherbeckens von Relevanz ist. Die Stromerzeugung kann eine zusätzliche Einkommensquelle darstellen, je nach Vermarktungspotenzial. Potenziell ermöglicht sie die Einführung intelligenter Bewässerungssteuerung auch auf den Flächen, welche nicht ans Stromnetz angeschlossen sind (PV-Inselanlage, auch Off-Grid-System genannt). Das Potenzial und die Umsetzbarkeit dieser technischen Option soll in weiteren Forschungsvorhaben untersucht werden.

Im Rahmen zukünftiger Forschungsarbeiten sollen weitere Optionen zur multifunktionalen Nutzung von Speicherbecken untersucht werden, z. B. mögliche Synergien mit Hochwasserschutz und die relevanten Anforderungen an die Ausführung von Speicherbecken und ihre Integration in die Landschaftsplanung.

Die Umsetzbarkeit und Attraktivität der oberirdischen Wasserspeicherung hängt nicht nur von in diesem Working Paper dargestellten hydrologischen und technischen Aspekten ab, sondern wird auch durch rechtliche und förderrechtliche Rahmenbedingungen bestimmt, welche auch die Wirtschaftlichkeit dieser Anpassungsmaßnahme beeinflussen. Zunächst muss die Wasserentnahme aus dem Fließgewässer zulässig sein, und ein Wasserspeicherbecken zu füllen. Besonders bei Entnahmen aus kleineren Flüssen existieren in den Bundesländern unterschiedliche Regelungen. Ein grundsätzliches Verbot oder Einschränkungen bei den Wasserentnahmen aus einem Fließgewässer basiert meist auf gewässerökologischen Überlegungen. Weitere Forschung und ein enger Austausch mit Umweltbehörden zu ökologisch unbedenklichen Entnahmemengen und -zeiträumen sowie zu Kompromissen (Trade-offs) zwischen Grundwasserentnahmen im Sommerhalbjahr und Entnahmen aus Fließgewässer im Winterhalbjahr können zu einer positiven Weiterentwicklung der rechtlichen Rahmenbedingungen beitragen.

Wasserrechtliche Erlaubnisse stellen eine weitere wichtige Stellschraube für die Umsetzbarkeit oberirdischer Wasserspeicherung dar. Aufgrund des Abschreibungszeitraums von 20 Jahren für Wasserspeicherbecken⁵ empfiehlt es sich, die Wasserentnahmeerlaubnisse für den gleichen oder einen längeren Zeitraum zu erteilen, um die Wirtschaftlichkeit der Investition sicherzustellen. Jedoch ist in der Praxis die Tendenz zu immer kürzeren Befristungen von Wasserentnahmeerlaubnisse zu beobachten.

§36 des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) reguliert die Zulassung und Wirtschaftlichkeit großer FPV-Anlagen auf Wasserspeicherbecken zu Bewässerungszwecken. Um höhere Belegungsgrade und damit auch einen effektiveren Wasserrückhalt zur landwirtschaftlichen Bewässerung unter zukünftigen klimatischen Bedingungen zu ermöglichen, müsste das WHG angepasst werden. So können die Speicherbecken, die nur dem Zweck des Wasserrückhalts dienen und somit im Sommer auch trocken fallen können, sowie keinen freizeitlichen oder

⁵ Bundesministerium für Finanzen (2020). AfA-Tabelle für die allgemein verwendbaren Anlagegüter. Online verfügbar unter [https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steuern/Weitere Steuerthemen/Betriebsaufwertung/AfA-Tabellen/Ergaenzende-AfA-Tabellen/AfA-Tabelle_AV.pdf?__blob=publicationFile&v=5](https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steuern/Weitere%20Steuerthemen/Betriebsaufwertung/AfA-Tabellen/Ergaenzende-AfA-Tabellen/AfA-Tabelle_AV.pdf?__blob=publicationFile&v=5).

ökologischen Nutzen haben, als technische Anlagen betrachtet werden und vom pauschalen Verbot von FPV-Anlagen nach § 36 Satz 3 des WHG ausgenommen werden.

Im Einklang mit den möglichen gesetzlichen Änderungen des WHG müssten auch Änderungen des Erneuerbaren Energien Gesetzes (EEG) für FPV-Anlagen vorgenommen werden. Eine Förderung besonderer Anlagen nach dem EEG 2023 mit Leistungen auch größer als 1 MW würde große Belegungsgrade wirtschaftlich ermöglichen. Um die Leistungsspitze von PV-Anlagen nicht weiter nach oben zu treiben, könnte die Energieinfrastruktur durch spezielle Förderungen für Anlagen mit Ost-West Ausrichtungen ertüchtigt werden.

Die Vor- und Nachteile sowie die Umsetzbarkeit der oberirdischen Wasserspeicherung für die Bewässerung ist auch im größeren politischen Kontext zu betrachten. Durch eine Erhöhung der Wasserverfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Bewässerung trägt diese Anpassungsmaßnahme zur Umsetzung der Ernährungsstrategie der Bundesregierung⁶ und insbesondere zum Erreichen des strategischen Ziels b) „Mehr Gemüse, Obst und Hülsenfrüchte – pflanzenbetonte Ernährung stärken“ bei, in welcher vor allem saisonal und regional produziertes Gemüse und Obst sowie ballaststoffreiche Getreideprodukte im Fokus stehen.

Weiterhin ist die oberirdische Wasserspeicherung für die Umsetzung mehrerer Aktionen der Nationalen Wasserstrategie⁷ (NWS) von Relevanz oder kann durch diese betroffen sein. Die Wasserentnahmen im Winterhalbjahr bei hohen Abflüssen reduzieren die Abhängigkeit des Pflanzenbaus von Wasserressourcen im Sommerhalbjahr. Entsprechend wird auch zur Entschärfung des Priorisierungsbedarfs bei Wasserknappheit (im Sinne der NWS-Aktion 6) beigetragen. Der Verzicht auf Grundwasserentnahmen im Sommer kann weiterhin die Umsetzung von NWS-Aktion 5 im Bereich des Abbaus von Ausnahmen von der Erlaubnispflicht bei Grundwasserentnahmen vereinfachen.

Die Kopplung von Wasserspeicherung und Energieerzeugung kann durch die Umsetzung der NWS-Aktion 53 „Hilfestellung zur Sektorenkopplung Energie/Wasser erarbeiten“ und ggf. der NWS-Aktion 52 „Überprüfung bestehender rechtlicher Rahmenbedingungen/ Abbau von Investitionshürden bei Investitionen in die Daseinsvorsorge“ gefördert werden. Die möglichen noch zu erforschenden Synergien zwischen Wasserspeicherung und Hochwasserschutz sind direkt in der NWS-Aktion 43 „Identifikation und Bewertung potenzieller Synergien des Hoch- und Niedrigwasserrisikomanagements insbesondere mit Blick auf Speichermanagement“ adressiert. Die Umsetzung der NWS-Aktion 51 fördert die Bestimmung von Gebieten, in denen Wasserspeicherung zum Hochwasserschutz beitragen kann, unter der Voraussetzung ihrer Integration in die regionale Landschaftsplanung.

Zusammengefasst stellt die oberirdische Wasserspeicherung eine mögliche Anpassungsmaßnahme dar, um die Wasserverfügbarkeit für die Landwirtschaft und Zuverlässigkeit der Bewässerung zu verbessern und somit zum Erhalt des Pflanzenbaus beizutragen. Um das Potenzial von Wasserspeicherbecken für die landwirtschaftliche Wasserversorgung, den Grundwasserschutz und für die Erbringung weiterer gesellschaftlicher Leistungen (Hochwasserschutz, Energieerzeugung) zu entfalten, sollte die Wasserspeicherung zukünftig besser koordiniert und in die räumliche Landschaftsplanung integriert werden. Somit ist diese technische Maßnahme und ihre Umsetzbarkeit zukünftig auch bei der Erstellung von regionalen Wasserversorgungskonzepten (im Sinne der NWS-Aktion 47 „Bundesweit einheitliche Leitlinien für regionale Wasserversorgungskonzepte erstellen“) eingehend zu berücksichtigen.

⁶ BMEL (2024). Gutes Essen für Deutschland – Ernährungsstrategie der Bundesregierung. Online verfügbar unter https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Ernaehrung/ernaehrungsstrategie-kabinett.pdf?__blob=publicationFile&v=8.

⁷ BMUV (2023). Nationale Wasserstrategie (Kabinettsbeschluss). Online verfügbar unter https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Binnengewasser/BMUV_Wasserstrategie_bf.pdf.

Literaturverzeichnis

- Abdelal, Qasem (2021): Floating PV; an assessment of water quality and evaporation reduction in semi-arid regions. In: *International Journal of Low-Carbon Technologies* 16 (3), S. 732–739. DOI: 10.1093/ijlct/ctab001.
- Acharya, Mohit; Devraj, Sarvesh (2019): Floating Solar Photovoltaic (FSPV): A Third Pillar to Solar Sector ? TERI Discussion Paper: Output of the ETC India Project. The Energy and Resources Institute. New Delhi: (TERI Discussion Paper). Online verfügbar unter <https://www.teriin.org/sites/default/files/2020-01/floating-solar-PV-report.pdf>, zuletzt geprüft am 30.01.2025.
- Agrawal, Karmendra Kumar; Jha, Shibani Khanra; Mittal, Ravi Kant; Vashishtha, Sanjay (2022): Assessment of floating solar PV (FSPV) potential and water conservation: Case study on Rajghat Dam in Uttar Pradesh, India. In: *Energy for Sustainable Development* 66, S. 287–295. DOI: 10.1016/j.esd.2021.12.007.
- Allen, Richard G.; Pereira, L. S.; Raes, Dirk; Smith, S. (1998): Crop evapotranspiration guidelines for computing crop requirements. FAO Irrig. Drain. Report modeling and application. FAO Irrig. Drain. Report modeling and application. In: *Journal of Hydrology* (285), S. 19–40.
- Andrews, Robert W.; Stein, Joshua S.; Hansen, Clifford; Riley, Daniel (2014): Introduction to the open source PV LIB for python Photovoltaic system modelling package. In: 2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). 2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). Denver, CO, USA, 6/8/2014 - 6/13/2014: IEEE, S. 170–174.
- Bergström, Sten (1992): The HBV Model: Its Structure and Applications. 4. Aufl.: SMHI (SMHI Reports Hydrology, 4).
- Cazzaniga, Raniero; Rosa-Clot, Marco (2021): The booming of floating PV. In: *Solar Energy* 219, S. 3–10. DOI: 10.1016/j.solener.2020.09.057.
- Conexio GmbH (2021): 36. PV-Symposium/BIPV Forum. 18.-26. Mai 2021, online : Tagungsunterlagen. Pforzheim, Deutschland: Conexio GmbH. Online verfügbar unter <https://d-nb.info/1253387788/34>, zuletzt geprüft am 30.01.2025.
- Dalelane, C. (2021): Die DWD-Referenz-Ensembles und die DWD-Kern-Ensembles. In: DWD (Hg.): Regionale Klimamodellierung II - Anwendungen. Langen (promet - Meteorologische Fortbildung, 104), S. 27–29.
- Destatis (2024): Landwirtschaftliche Betriebe - Bewässerung 2023. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Statistisches Bundesamt (Statistischer Bericht). Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Landwirtschaftliche-Betriebe/Publikationen/Downloads-Landwirtschaftliche-Betriebe/statistischer-bericht-betriebe-bewaesserung-5411205239005.xlsx?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 24.05.2024.
- Dörenkämper, Maarten; Wahed, Arifeen; Kumar, Abhishek; Jong, Minne de; Kroon, Jan; Reindl, Thomas (2021): The cooling effect of floating PV in two different climate zones: A comparison of field test data from the Netherlands and Singapore. In: *Solar Energy* 219, S. 15–23. DOI: 10.1016/j.solener.2021.03.051.
- DWD (Hg.) (2018): Datensätze auf der Basis der RCP - Szenarien. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/forschung/klima_umwelt/klimaprojektionen/fuer_deutschland/fuer_dtsl_rcp-datensatz_node.html, zuletzt geprüft am 12.03.2025.
- Ebers, Niklas; Schröter, Kai; Müller-Thomy, Hannes (2024): Estimation of future rainfall extreme values by temperature-dependent disaggregation of climate model data. In: *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 24 (6), S. 2025–2043. DOI: 10.5194/nhess-24-2025-2024.
- Essak, Laura; Ghosh, Aritra (2022): Floating Photovoltaics: A Review. In: *Clean Technol.* 4 (3), S. 752–769. DOI: 10.3390/cleantechnol4030046.
- Exley, Giles; Page, Trevor; Thackeray, Stephen J.; Folkard, Andrew M.; Couture, Raoul-Marie; Hernandez, Rebecca R. et al. (2022): Floating solar panels on reservoirs impact phytoplankton populations: A modelling experiment. In: *Journal of environmental management* 324, S. 116410. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116410.

- Farrar, Lewis W.; Bahaj, AbuBakr S.; James, Patrick; Anwar, Arif; Amdar, Nafn (2022): Floating solar PV to reduce water evaporation in water stressed regions and powering water pumping: Case study Jordan. In: *Energy Conversion and Management* 260, S. 115598. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.115598.
- Fereshtehpour, Mohammad; Javidi Sabbaghian, Reza; Farrokhi, Ali; Jovein, Ehsan Bahrami; Ebrahimi Sarindizaj, Elham (2021): Evaluation of factors governing the use of floating solar system: A study on Iran's important water infrastructures. In: *Renewable Energy* 171, S. 1171–1187. DOI: 10.1016/j.renene.2020.12.005.
- 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 (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.
- Ghigo, Alberto; Faraggiana, Emilio; Sirigu, Massimo; Mattiazzo, Giuliana; Bracco, Giovanni (2022): Design and Analysis of a Floating Photovoltaic System for Offshore Installation: The Case Study of Lampedusa. In: *Energies* 15 (23), S. 8804. DOI: 10.3390/en15238804.
- Gömann, Horst; Anter, Jano; Kreins, Peter; Stonner, Roger (2010): Endbericht. LandCare 2020 Teilprojekt 5 Sozioökonomische Analysen. Hg. v. Unveröffentlicht.
- Haas, J.; Khalighi, J.; La Fuente, A. de; Gerbersdorf, S. U.; Nowak, W.; Chen, Po-Jung (2020): Floating photovoltaic plants: Ecological impacts versus hydropower operation flexibility. In: *Energy Conversion and Management* 206, S. 1–8. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.112414.
- Hänsel, Stephanie; Brendel, Christoph; Fleischer, Claudius; Ganske, Anette; Haller, Michael; Helms, Martin et al. (2020): Vereinbarungen des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertennetzwerk zur Analyse von klimawandelbedingten Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre.
- Ilgen, Konstantin; Schindler, Dirk; Wieland, Stefan; Lange, Jens (2023): The impact of floating photovoltaic power plants on lake water temperature and stratification. In: *Scientific reports* 13 (1), S. 7932. DOI: 10.1038/s41598-023-34751-2.
- Kjeldstad, Torunn; Nysted, Vilde S.; Kumar, Manish; Oliveira-Pinto, Sara; Otnes, Gaute; Lindholm, Dag; Selj, Josefine (2022): The performance and amphibious operation potential of a new floating photovoltaic technology. In: *Solar Energy* 239, S. 242–251. DOI: 10.1016/j.solener.2022.04.065.
- Landesamt für Umwelt Rheinland Pfalz: Geoexplorer. Online verfügbar unter <https://wasserportal.rlp-umwelt.de/geoexplorer>, zuletzt geprüft am 29.07.2025.
- LAWA und BLAG ALFFA (2024): Fokus Wasser – Folgen des Klimawandels und Maßnahmen zur Anpassung. Beispiele und Lösungsansätze für Wechselwirkungen zwischen Wasserwirtschaft, Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Aquakultur und Binnenfischerei. Hg. v. LAWA und BLAG ALFFA. Online verfügbar unter https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Klima-Energie/BLAG-ALFFA/Fokus-Wasser.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 14.05.2024.
- Liu, Luyao; Wang, Qinxing; Lin, Haiyang; Li, Hailong; Sun, Qie; Wennersten, Ronald (2017): Power Generation Efficiency and Prospects of Floating Photovoltaic Systems. In: *Energy Procedia* 105, S. 1136–1142. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.483.
- Müller, Martin; Demmel, Markus; Sander, Gerd (2020): Bewässerungs-App. Beratungsblatt. 1. Aufl. Hg. v. Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und Landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e.V. (ALB). Freising. Online verfügbar unter <https://www.alb-bayern.de/media/files/0004/bb.bef1-bew-sserungs-app-20200706h.pdf>, zuletzt geprüft am 20.02.2025.
- Nearing, M. A.; Liu, B. Y.; Risse, L. M.; Zhang, X. (1996): CURVE NUMBERS AND GREEN-AMPT EFFECTIVE HYDRAULIC CONDUCTIVITIES 1. In: *J American Water Resour Assoc* 32 (1), S. 125–136. DOI: 10.1111/j.1752-1688.1996.tb03440.x.

- 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. 1–33. DOI: 10.3390/agronomy10081120.
- Olberz, Matthias; Kahlen, Katrin; Zinkernagel, Jana (2018): Assessing the Impact of Reference Evapotranspiration Models on Decision Support Systems for Irrigation. In: *Horticulturae* 4 (4), S. 1–14. DOI: 10.3390/horticulturae4040049.
- Parajka, Juraj; Blöschl, Günter; Merz, Ralf (2007): Regional calibration of catchment models: Potential for ungauged catchments. In: *Water Resources Research* 43 (6), Artikel 2006WR005271. DOI: 10.1029/2006WR005271.
- Paschold, Peter-Jürgen; Kleber, Jürgen; Mayer, Norbert (2002): Geisenheimer Bewässerungssteuerung 2002. 37. Aufl. Hg. v. Zeitschrift für Bewässerungswirtschaft (1, 5-15).
- Paschold, Peter-Jürgen; Kleber, Jürgen; Mayer, Norbert (2009): Bewässerungssteuerung bei Gemüse im Freiland. In: Walter Dirksmeyer und Heinz Sourell (Hg.): Wasser im Gartenbau. Tagungsband zum Statusseminar am 9. und 10. Februar 2009 im Forum des vTI in Braunschweig. Braunschweig (Landbauforschung, Sonderheft 328), S. 43–48.
- Reich, Nils H.; Mueller, Bjoern; Armbruster, Alfons; van Sark, Wilfried G. J. H. M.; Kiefer, Klaus; Reise, Christian (2012): Performance ratio revisited: is PR > 90% realistic? In: *Progress in Photovoltaics* 20 (6), S. 717–726. DOI: 10.1002/pip.1219.
- Sahu, Alok; Yadav, Neha; Sudhakar, K. (2016): Floating photovoltaic power plant: A review. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 66, S. 815–824. DOI: 10.1016/j.rser.2016.08.051.
- Seibert, Simon P.; Auerswald, Karl (2020): Hochwasserminderung im ländlichen Raum. Ein Handbuch zur quantitativen Planung. Berlin: Springer Spektrum.
- Singh, V. P.; Mishra, Surendra Kumar; Singh, Vijay P. (2003): Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology. Dordrecht: Springer Netherlands (42).
- SMUL (2014): Anpassungsmaßnahmen des sächsischen Pflanzenbaus an den Klimawandel. Hg. v. Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft. Dresden. Online verfügbar unter <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/11449/documents/29474>, zuletzt geprüft am 20.02.2025.
- 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.
- Stupak, Nataliya; Augustin, Lea; Baumann, Thomas; Broda, Stefan; Busciacco, Fabio Manuele; Ebers, Niklas et al. (2025): Herausforderung Wasserverfügbarkeit und Anpassungsoptionen im Gartenbau: Tagungsband zur Tagung am 18./19.06.2024 in Berlin. Hg. v. Thünen-Institut. Braunschweig (Thünen Working Paper, 269). Online verfügbar unter https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-workingpaper/ThuenenWorkingPaper_269.pdf.
- Sukarso, Adimas Pradityo; Kim, Kyung Nam (2020): Cooling Effect on the Floating Solar PV: Performance and Economic Analysis on the Case of West Java Province in Indonesia. In: *Energies* 13 (9), S. 2126. DOI: 10.3390/en13092126.
- Thomson, Allison M.; Calvin, Katherine V.; Smith, Steven J.; Kyle, G. Page; Volke, April; Patel, Pralit et al. (2011): RCP4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. In: *Climatic Change* 109 (1-2), S. 77–94. DOI: 10.1007/s10584-011-0151-4.
- von Zepelin, Ruben (2024): Verdunstungsminimierung und Wirtschaftlichkeit schwimmender Photovoltaikanlagen auf landwirtschaftlichen Speicherbecken. Masterarbeit im Studiengang Umweltingenieurwesen. Technische Universität Braunschweig, Braunschweig. Leichtweiß-Institut für Wasserbau.
- World Bank Group; ESMAP; SERIS (Hg.) (2019a): Where Sun Meets Water. Floating Solar Handbook for Practitioners. Washington. Online verfügbar unter

<https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/42f25d0e-edb3-5db1-abad-f8e67986693f/content>, zuletzt geprüft am 30.01.2025.

World Bank Group; ESMAP; SERIS (Hg.) (2019b): Where Sun Meets Water. Floating Solar Market Report. Washington. Online verfügbar unter <https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/42f25d0e-edb3-5db1-abad-f8e67986693f/content>, zuletzt geprüft am 30.01.2025.

Wunsch, Andreas; Liesch, Tanja; Broda, Stefan (2022): Deep learning shows declining groundwater levels in Germany until 2100 due to climate change. In: *Nature communications* 13 (1), S. 1221. DOI: 10.1038/s41467-022-28770-2.

Youssef, Yara Waheeb; Khodzinskaya, Anna (2019): A Review of Evaporation Reduction Methods from Water Surfaces. In: *E3S Web Conf.* 97. DOI: 10.1051/e3sconf/20199705044.

Ziar, Hesan; Prudon, Bjorn; Lin, Fen-Yu; Roeffen, Bart; Heijkoop, Dennis; Stark, Tim et al. (2021): Innovative floating bifacial photovoltaic solutions for inland water areas. In: *Progress in Photovoltaics* 29 (7), S. 725–743. DOI: 10.1002/pip.3367.

Anhang

A1 Abdichtungsoptionen von Wasserspeicherbecken

Abdichtungsvariante	Haltbarkeit [a]	Orientierungskosten [€/m²]	Anmerkungen
<i>Oberflächenabdichtung</i>			
Asphaltoberflächendichtung mit Versiegelung eines bitumenreichen Mastix		46	Kann leichte Verformungen aufnehmen
Betonoberflächendichtung		60	Ist setzungsempfindlich
Geosynthetische Tondichtungsbahnen/Bentonitmatten	100	22	Ist austrocknungs- und frostempfindlich sowie durchwurzelnbar; auch Wühltierbefall ist möglich
Kunststoffdichtungsbahn	100	45	Ist setzungsunempfindlich
Mineralische Oberflächendichtung		57	Ist austrocknungs- und frostempfindlich sowie durchwurzelnbar; auch Wühltierbefall ist möglich
Vollvergossene Wasserbausteine		70	Diese Dichtung ist setzungsempfindlich
<i>Innenabdichtung</i>			
Asphaltninnendichtung		190	
Dichtwandmassen		180	
Mineralische Innendichtung		180	
Spundwände		140	

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
Bibliographie; 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:

Stupak, N., Ebers, N., von Zepelin, R., Ilgen, K., Schröter, K., Müller-Thomy, H.
(2026) Wasserspeicherbecken als Klimaanpassungsoption für Pflanzenbau in
Deutschland: Planung, Umsetzbarkeit, Investitionsbedarf. Thünen Working Paper
278. Thünen-Institut, Stabsstelle Klima, Boden, Biodiversität, Braunschweig.
<https://doi.org/10.3220/253-2025-222>

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 278

Herausgeber/Redaktionsanschrift – *Editor/address*

Johann Heinrich von Thünen-Institut
Bundesallee 50
38116 Braunschweig
Germany

thuenen-working-paper@thuenen.de
www.thuenen.de

DOI:10.3220/253-2025-222
urn:nbn:de:gbv:253-2025-000227-5