

Projekttitlel

VERBESSERTE GRUNDWASSERNEUBILDUNG UND WASSERQUALITÄT
DURCH SOLARPARKS (AQUASOL)

Aktenzeichen der DBU

37808/01

Verfasser

Prof.Dr. Markus Disse
Prof.Dr. Gabriele Chiogna
Dr. Mohammad Alqadi
Moritz Wirthensohn
Michael Tarantik

Institution

Technische Universität München
Lehrstuhl für Hydrologie und Flussgebietsmanagement

München, 15.05.2025

Inhalt

Zusammenfassung.....	1
1 Einführung	2
2 Aufgabenstellung und Projektablauf.....	3
3 Methodik	4
3.1 Untersuchungsgebiete	4
3.1.1 Darstadt	4
3.1.2 Bundorf.....	4
3.2 Experimentelle Arbeit.....	5
3.2.1 Darstadt	5
3.2.2 Bundorf.....	6
3.3 Einbeziehung von Interessengruppen	8
3.4 Entwicklung des konzeptionellen Rahmens und der Software	9
3.4.1 Systematische Literaturrecherche.....	9
3.4.2 Entwicklung einer Evidenzdatenbank.....	10
3.4.3 Auswahl von Ökosystemdienstleistungen.....	10
3.4.4 Entwicklung eines Bewertungsrahmens.....	11
3.4.5 Entwicklung des Entscheidungsunterstützungssystems	12
3.5 Hydrodynamische Modellierung	12
4 Projektergebnisse	17
4.1 Experimentelle Ergebnisse	17
4.1.1 Darstadt	17
4.1.2 Bundorf.....	17
4.2 Einbeziehung von Interessensgruppen	20
4.3 Literaturübersicht und Entwicklung der Datenbank	21
4.4 Auswahl von Ökosystemdienstleistungen.....	22
4.5 Bewertungsrahmen	24
4.5.1 Wirtschaftliche Methode.....	24
4.5.2 Biophysikalische Indikatoren	24
4.6 Das Entscheidungsunterstützungssystem	28
4.7 Limitationen und zukünftige Verbesserungen	32
4.8 Hydrodynamische Modellierung	32
4.8.1 Einfluss von Niederschlagsereignissen, Bodenfeuchte und Nutzungsszenarien auf das Abflussvolumen	32
4.8.2 Räumliche Verteilung der kumulierten Infiltration	34
4.8.3 Modellierte Ganglinien und räumlich-zeitliche Abflussteilung am Auslass	35
4.8.4 Diskussion.....	37
5 Öffentlichkeitsarbeit/Veröffentlichungen/Vorträge	39
6 Fazit	40
7 Literatur	41

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersichtskarte des Solarparks Darstadt.....	4
Abbildung 2: Wetterstationslage und Wetterstation in Darstadt.....	5
Abbildung 3: Einbau Bodenfeuchtesensoren in Darstadt	6
Abbildung 4: Übersicht Messstandorte Solarpark Bundorf	6
Abbildung 5: Messstandort „Unter“	7
Abbildung 6: Messstandort „Neben“ (links) und Messstandort „Außerhalb“ (rechts).....	7
Abbildung 7: Die fünf Schritte zur Entwicklung des konzeptionellen Rahmens und des Entscheidungsunterstützungssystems	9
Abbildung 8: a) Lage und Ausdehnung des Solarparks Bundorf b) Abgrenzung des hydrologischen Modellgebiets in der südlichen Hälfte der Anlage basierend auf Fließweganalysen und DGM.....	12
Abbildung 9: Rechnernetz mit den zugewiesenen Randbedingungen (links) und den belegten Rauigkeitsbeiwerten (rechts)	14
Abbildung 10: Beispielhafte Niederschlagsverteilung für ein 10-jährliches Regenereignis mit Dauerstufen von 15 min (links) und 60 min (rechts).....	15
Abbildung 11: Bodenfeuchte in 15, 30, 45, 60 und 80 cm Tiefe sowie der gemessene Niederschlag.....	17
Abbildung 12: Bodentemperaturen in 15, 30, 45 und 80 cm Tiefe sowie gemessene Lufttemperatur	18
Abbildung 13: Windgeschwindigkeit, Strahlung und Wasserdampfdruck.....	19
Abbildung 14: Evaporation, Niederschlag, Bodenfeuchte in 15 cm Tiefe.....	20
Abbildung 15: Bewertung der Relevanz verschiedener ÖSD basierend auf einer Umfrage	21
Abbildung 16: Auswirkungen von Solarmodule auf wasserbezogene Prozesse und deren Zusammenhänge	22
Abbildung 17: Das Hauptfenster beim Start des DSS.....	29
Abbildung 18: Registerkarte zur Gewichtung der einzelnen Ökosystemdienstleistungen	30
Abbildung 19: Registerkarte für die Ökosystemdienstleistung 9 „Wasserkreislauf und Abflussregulierung“	30
Abbildung 20: Simulierte Abflussvolumina in Abhängigkeit von Nutzungsszenarien, Bodenfeuchte und Niederschlagsintensität.....	33
Abbildung 21: Entwicklung des mittleren Abflussvolumens bei fortschreitender ökologischer Bodenregeneration	34
Abbildung 22: Zeitliche Entwicklung der kumulierten Infiltrationsmenge (in mm) für drei Nutzungsszenarien bei einem 100-jährlichen Niederschlagsereignis (15 min) unter feuchten Anfangsbedingungen.....	35
Abbildung 23: Modellierte Abflussganglinien für ausgewählte Nutzungsszenarien bei einem 100-jährlichen Niederschlagsereignis (15 und 60 Minuten Dauer) unter feuchten Anfangsbedingungen	36
Abbildung 24: Räumlich-zeitliche Abflussverteilung am Modellauslass für ein 100-jährliches 15-Minuten-Ereignis in den Szenarien MS und MSÖ: 32.0 – 5 unter feuchten Anfangsbedingungen	37

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verwendete Messtechnik.....	8
Tabelle 2: Gerechnete Szenarien der hydrodynamischen Modellierung.....	16
Tabelle 3: Übersicht über ausgewählte Ökosystemdienstleistungen und deren Auswirkungen.....	23
Tabelle 4: Punktesystem für die ÖSD „Kontrolle der Erosionsraten“	25
Tabelle 5: Punktesystem für die ÖSD „Regulierung des chemischen Zustands von Süßgewässern durch lebende Prozesse“	27
Tabelle 6: Punktesystem für die ÖSD „Als Material verwendetes Grundwasser und Grundwasser zum Trinken“	27
Tabelle 7: Punktzahlen der einzelnen ÖSD für die PV-FFA und Status-quo für die Fallstudie Darstadt	31

Erläuterung zu den Abkürzungen

Agri-PV	Agri-Photovoltaik
ABAG	Allgemeine Bodenabtragungsgleichung
CICES	Common International Classification of Ecosystem Services
DGM	Digitales Geländemodell
DSS	Entscheidungsunterstützungssystem
FDR	Frequency Domain Reflectometry
KGA	Grundwasseranreicherung
KOSTRA	Koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung
LCA	Lebenszyklusanalyse
LULC	Landnutzung und -bedeckung
MCDM	Multikriterielle Entscheidungsfindung
PV	Photovoltaik
PV-FFA	Photovoltaik-Freiflächenanlagen
WEFE	Water-Energy-Food-Ecology
WoS	Web of Science
ÖSD	Ökosystemdienstleistungen

Zusammenfassung

Der Ausbau erneuerbarer Energien erfordert in Deutschland eine flächendeckende Installation von Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA). Diese Eingriffe beeinflussen jedoch lokale Wasserhaushalte und ökologische Funktionen. Um Potenziale und Risiken systematisch zu erfassen, wurde im Projekt AQUASOL ein umfassender Bewertungsrahmen zur Analyse wasserbezogener Ökosystemdienstleistungen (ÖSD) im Kontext von PV-FFA entwickelt.

Ziel war es, ein Entscheidungsunterstützungssystem (DSS) zu entwickeln, das hydrologische Auswirkungen sowie die Förderung von ÖSD wie Grundwasserneubildung, Wasserqualität und Rückhalt von Oberflächenabfluss berücksichtigt. Die Software verfügt über eine benutzerfreundliche Oberfläche, transparente Bewertungslogik und vielseitige Exportfunktionen und wurde erfolgreich an einer Fallstudie in Darstadt getestet.

Die frühzeitige Einbindung relevanter Akteure war ein zentraler Bestandteil des Projekts. Durch Workshops, Präsentationen und eine Umfrage unter über 380 Stakeholdern wurde das DSS bedarfsgerecht entwickelt und praxisnah gestaltet.

Durch eine systematische Literaturrecherche wurden dreizehn relevante ÖSD ausgewählt und in die Bewertung aufgenommen. Für jede dieser Leistungen wurde ein Bewertungssystem entwickelt, das sich je nach verfügbarer Datengrundlage auf den ökonomischen Wert, festgelegte Indikatoren oder Eigenschaften der Landnutzung und -bedeckung (LULC) stützt. Die Gewichtung der einzelnen Leistungen kann je nach Erfahrung oder im Dialog mit relevanten Akteuren angepasst werden.

Das in das DSS integrierte Rahmenwerk wurde auf einen Anwendungsfall in Darstadt, Bayern, übertragen. Die Analyse zeigte, dass bodengebundene PV-Anlagen im Vergleich zu traditionellen landwirtschaftlichen Nutzungen potenziell positive Effekte auf wasserbezogene ÖSD haben können, etwa durch die Verringerung von Bodenerosion und Nitratauswaschung. Das DSS-Tool ermöglicht es Entscheidungsträgern, Zielkonflikte zwischen Energieerzeugung und Ökosystemwirkungen effizient zu bewerten. Ergänzend wurden meteorologische Daten und Bodenfeuchtesensoren verwendet, um die Infiltrationsdynamik und Veränderungen des Wasserhaushalts durch PV-FFA zu analysieren.

Außerdem wurde ein hochaufgelöstes, zweidimensionales hydrodynamisches Modell mit einem neu entwickelten Infiltrationsmodul angewendet. Die Simulationen zeigen, dass PV-FFA die Wasserverfügbarkeit lokal beeinflussen können – insbesondere in der Anfangsphase nach der Errichtung. Jedoch lassen sich mögliche negative Effekte durch gezielte Begrünung und Rückhaltemaßnahmen deutlich reduzieren oder sogar umkehren.

Insgesamt zeigt AQUASOL, dass Solarparks – bei ökologisch integrierter Planung – nicht nur Risiken, sondern auch relevante Beiträge zur Förderung wasserbezogener Ökosystemleistungen leisten können. Damit unterstützt das Projekt den nachhaltigen Ausbau erneuerbarer Energien im Einklang mit wasserwirtschaftlichen und ökologischen Zielen.

1 Einführung

Die Herausforderungen durch die Energiekrise und den Klimawandel erfordern eine verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien, die weltweit einen wachsenden Anteil an der Stromerzeugung einnehmen [1, 2]. In Deutschland betrug ihr Anteil an der Bruttostromerzeugung im Jahr 2023 bereits 51,8 % mit dem Ziel, bis 2030 auf 80 % zu steigen [3]. Die Photovoltaik (PV) nimmt dabei eine zentrale Rolle ein, da sinkende Modulpreise und steigende Wirkungsgrade den Ausbau beschleunigen. Allein 2023 wurden über eine Million neue Solaranlagen installiert, wodurch die Gesamtkapazität auf knapp 82 GW anstieg, mit einer angestrebten Erweiterung auf 215 GW bis 2030 [4]. Neben Dachanlagen gewinnen Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA) zunehmend an Bedeutung, da sie eine kosteneffiziente Stromproduktion ermöglichen. Gleichzeitig können sie jedoch zu Landnutzungsänderungen mit potenziellen Auswirkungen auf die Umwelt und den Wasserhaushalt führen [5]. Die Installation und Anordnung von Photovoltaikmodulen verändert die Bodenbedeckung und damit Niederschlagsverteilung, Verdunstung, Abflussverhalten und Bodenerosion [6–8]. Diese hydrologischen Veränderungen wirken sich auf die Grundwasserneubildung aus, die ein wichtiger Faktor für die nachhaltige Wasserbewirtschaftung ist.

Nachhaltig gestaltete Solarparks können jedoch auch positive Effekte auf den Wasserhaushalt haben. Studien zeigen, dass Solarparks durch Schattenwurf die Evapotranspiration verringern und durch extensive Landnutzung die Artenvielfalt fördern [9, 10]. Dies wiederum führt zu einer verbesserten Kohlenstoffspeicherung im Boden. Auch die Wasserqualität kann durch natürliche Filtrationsprozesse im Boden gesteigert werden. Darüber hinaus können Solarparks als Werkzeuge für künstliche Grundwasseranreicherung (KGA) genutzt werden [11]. Durch gezielte Maßnahmen wie die Schaffung von Versickerungsflächen oder die Steuerung von Wasserflüssen kann die Infiltration in Grundwasserleiter erheblich gesteigert werden, wodurch die Wasserreserven erhöht und deren Qualität verbessert werden [12, 13]. Mit Hilfe von Modellierungsstudien können die Gestaltung und der Betrieb solcher Systeme weiter optimiert werden, um negative Umweltauswirkungen zu minimieren und positive Effekte zu maximieren [14].

Das Konzept der Ökosystemdienstleistungen (ÖSD), das zunehmend an Bedeutung gewinnt, beschreibt die Beiträge von Ökosystemen zum menschlichen Wohlbefinden, wie sauberes Wasser, Luft und Bestäubung, die für unser Wohlbefinden unerlässlich sind, aber im Allgemeinen nicht direkt verbraucht oder genutzt werden. Die „Common International Classification of Ecosystem Services“ (CICES) gliedert diese Leistungen in einer fünfstufigen Hierarchie. Solarenergieprojekte werfen neue Fragen für ein nachhaltiges Ressourcenmanagement auf, da sie die Wechselwirkungen zwischen den Komponenten Wasser, Energie, Nahrung und Ökosystem beeinflussen [15].

Semeraro et al. (2020) [16] betonen, wie wichtig die Entwicklung eines Leitfadens für Ökosystemdienstleistungen von Energieprojekten ist, um die Effizienz der natürlichen Ressourcen zu verbessern und die Energieunternehmen zu ermutigen, umweltfreundliche Lösungen zu favorisieren. Der Leitfaden soll den Wissenstransfer von der Wissenschaft zu öffentlichen und privaten Organisationen erleichtern. Randle-Boggis et al. (2020) [17] entwickelten ein evidenzbasiertes Instrument zur Entscheidungsunterstützung, das Daten über die Auswirkungen verschiedener Bewirtschaftungsmethoden von Solarparks auf Ökosystemdienstleistungen sammelt. Das Tool ermöglicht es den Beteiligten, die wahrscheinlichen Auswirkungen verschiedener Managementstrategien auf die Bereitstellung von Ökosystemleistungen zu bewerten. Die Nutzer können alternative Bewirtschaftungsstrategien vergleichen und eine Vergleichstabelle einsehen, die zeigt, welche Ökosystemleistungen durch einen Wechsel der Strategie verbessert, unverändert oder verschlechtert werden.

In Anbetracht der zunehmenden Bedeutung von Ökosystemdienstleistungen und Naturkapital sowie aufgrund der Komplexität des Nexus *Water-Energy-Food-Ecology* (WEFE) ist es entscheidend, die Auswirkungen von Solarparks auf wasserbezogene Ökosystemdienstleistungen zu verstehen. Bisher

gibt es keine Studie, die einen konzeptionellen Rahmen für die Analyse der Auswirkungen von Solarparks auf wasserbezogene Ökosystemdienstleistungen geschaffen hat. Dieses Projekt und seine drei Arbeitspakete zielen darauf ab, diese Lücke zu schließen und ein umfassendes Verständnis und Instrumentarium für das Management der Umweltauswirkungen von Bau und Betrieb von Solarparks zu schaffen.

Ziel dieses Projekts ist die Entwicklung eines konzeptionellen Rahmens und eines Entscheidungsunterstützungssystems (DSS) zur Ermittlung und Quantifizierung hydrologischer Auswirkungen und wasserbezogener Ökosystemleistungen im Zusammenhang mit dem Bau von Solarparks. Das DSS wird die Planung und das Management unterstützen, um Grundwasseranreicherung, Wasserqualität und andere ökohydrologische Bedingungen zu optimieren.

2 Aufgabenstellung und Projektablauf

Das Projekt AQUASOL startete im Jahr 2022 und wurde vom Lehrstuhl für Hydrologie und Flussgebietsmanagement der Technischen Universität München durchgeführt. Das Hauptziel des Projekts war die Entwicklung eines konzeptionellen Rahmens und einer darauf basierenden Software zur Identifizierung und Quantifizierung von hydrologischen Auswirkungen und wasserbezogener Ökosystemdienstleistungen im Zusammenhang mit dem Bau von Solarparks. Die entwickelte Software unterstützt die Planung und das Management von Solarparks. Sie ermöglicht insbesondere die Optimierung der Grundwasserneubildung, der Wasserqualität und weiterer ökohydrologischer Bedingungen (z.B. Bereitstellung von Nahrung und Wasser, Verringerung des Oberflächenwasserabflusses, Verbesserung des Lebensraums für Tiere und Pflanzen, Vermeidung des Einsatzes von Düngemitteln und Pestiziden). Zur praktischen Umsetzung und Validierung der Projektziele arbeitete der Lehrstuhl eng mit der MaxSolar GmbH zusammen, deren Solarpark in Darstadt ursprünglich als Pilotstudie dienen sollte. Dort wurden bereits vor Baubeginn Messstationen errichtet, um einen Langzeitvergleich der hydrologischen und meteorologischen Bedingungen vor und nach der Errichtung des Solarparks zu ermöglichen. Aufgrund erheblicher Verzögerungen beim Baubeginn des Solarparks in Darstadt wurde stattdessen der bereits fertiggestellte Solarpark in Bundorf als Alternativstandort genutzt. Die notwendige Verlagerung der Messstationen von Darstadt nach Bundorf erforderte eine Projektverlängerung. Am Standort Bundorf konnten daher nur hydrologische und meteorologische Daten für einen Zustand nach Fertigstellung des Solarparks erhoben werden.

Die Arbeitsstruktur des Projektes bestand im Wesentlichen aus zwei Arbeitspaketen und einem bereichsübergreifenden Paket. Arbeitspaket 1 beinhaltete die Sammlung und Auswertung von ökologischen und hydrologischen Daten, die Identifizierung von wasserbezogenen ÖSD und deren Einfluss auf Solarparks sowie die Bewertung der ÖSD. Das zweite Arbeitspaket umfasste das Design, die Prototypentwicklung und die Evaluierung des DSS, die Codierung und Entwicklung der entsprechenden Softwaremodule, die Erstellung einer grafischen Benutzeroberfläche, die Qualitätssicherung, Testläufe, die Bereitstellung der App, und die Entwicklung eines Benutzerhandbuchs. Das bereichsübergreifende Paket "Verbreitung des Projekts" bezieht die Beteiligten ein, um die Software mit ihren Ideen und Beiträgen in der Frühphase des Projekts mitzugestalten und die Ergebnisse des Projekts über verschiedene Kommunikationskanäle zu verbreiten.

Zusätzlich wurde im Rahmen des Projektes ein hochauflösendes zweidimensionales (2D) hydrodynamisches Modell entwickelt, das um ein speziell entwickeltes Infiltrationsmodul erweitert wurde. Dies ermöglichte eine genauere Analyse der hydrologischen Auswirkungen von Photovoltaik-Freiflächenanlagen. Das Modell wurde verwendet, um verschiedene Szenarien hinsichtlich hydrologischer Veränderungen vor und nach der Errichtung eines Solarparks sowie der Entwicklung unter verschiedenen Vegetationsbedingungen im Laufe der Jahre zu untersuchen.

3 Methodik

3.1 Untersuchungsgebiete

3.1.1 Darstadt

Wie im vorherigen Abschnitt erwähnt, sollte der geplante Solarpark in Darstadt als Pilotstudie dienen. Darstadt befindet sich auf ca. 49° nördlicher Breite und 10° östlicher Länge im Nordwesten Bayerns. Zu Beginn dieses Projekts wurde hier eines der größten Freiflächen-Photovoltaik Projekte mit einer Gesamtfläche von ca. 80 ha geplant. Durch erhebliche Verzögerungen beim Baubeginn, wurde der Solarpark erst im Herbst 2024 fertiggestellt. Der Solarpark gliedert sich in zwei Bereiche nördlich und südlich des Ortes Darstadt, wie in Abbildung 1 dargestellt. Die Region gehört zu Unterfranken und ist aufgrund des Klimawandels von zunehmendem Wasserstress betroffen, der sich in den kommenden Jahrzehnten voraussichtlich weiter verschärfen wird.

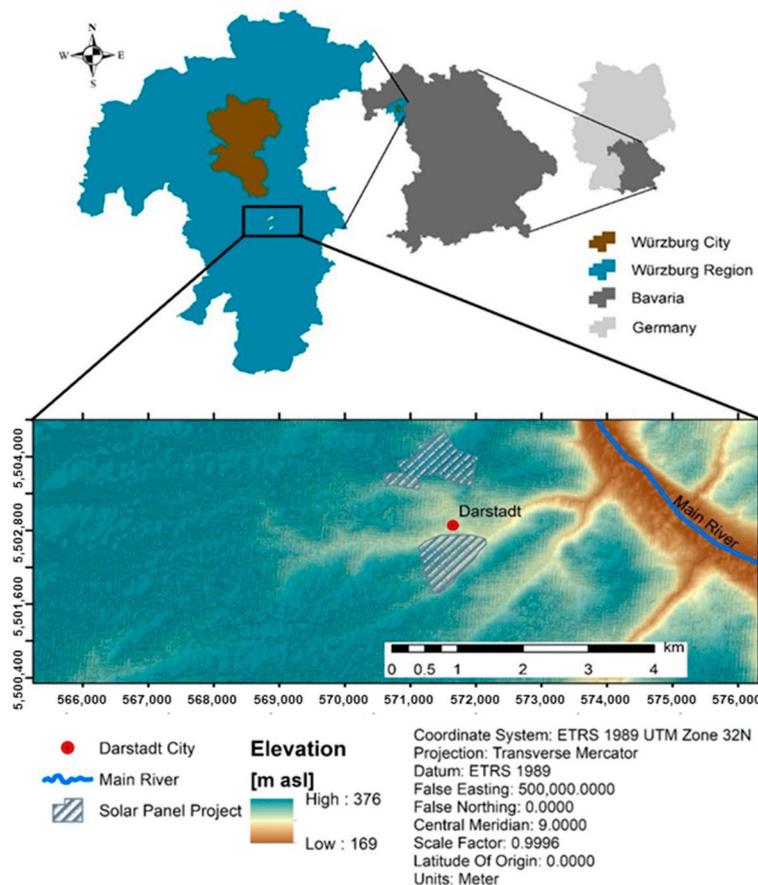


Abbildung 1: Übersichtskarte des Solarparks Darstadt

3.1.2 Bundorf

Wegen den erheblichen Verzögerungen beim Bau des Solarparks in Darstadt, wurde auf den bereits bestehenden Solarpark Bundorf ausgewichen. Der Solarpark Bundorf liegt im nördlichen Unterfranken in Bayern und zählt mit einer Gesamtleistung von 125 MWp zu den größten Anlagen seiner Art im Freistaat. Seit dem Herbst 2023 ist der Park in Betrieb und kann jährlich rund 37.500 Haushalte mit Strom aus Sonnenenergie versorgen. Auf einer Fläche von etwa 125 Hektar wurden die Solarmodule von der Firma MaxSolar geplant und installiert. Auf den ehemaligen landwirtschaftlichen Flächen stehen nun Solarmodulreihen, wobei ausreichend Raum für Flora und Fauna zwischen und unter den Modulen erhalten bleibt. Bei der Planung wurde besonderer Wert auf eine nachhaltige Nutzung und landschaftliche Einbindung gelegt [18]. Der Solarpark Bundorf ist in Abbildung 8 dargestellt.

3.2 Experimentelle Arbeit

3.2.1 Darstadt

Am 04.01.2023 wurden im Untersuchungsgebiet bei Darstadt (Koordinaten: 49.68019, 9.97917) eine Wetterstation (Abbildung 2) sowie fünf Bodenfeuchtesensoren (Abbildung 3) installiert, um meteorologische Daten und den Bodenwassergehalt zu erfassen. Zu diesem Zeitpunkt war der Bau des Solarparks noch nicht erfolgt. Die Messtechnik wurde im Februar 2024 abgebaut und im Untersuchungsgebiet Bundorf installiert. Die installierte Kompaktwetterstation erfasste insgesamt zwölf meteorologische Parameter. Für die vorliegende Untersuchung wurden folgende Messgrößen verwendet:

- Sonneneinstrahlung (W/m^2)
- Lufttemperatur ($^{\circ}\text{C}$)
- Niederschlag (mm)
- Maximale Niederschlagsrate (mm/h)
- Windgeschwindigkeit (m/s)
- Windrichtung ($^{\circ}$)
- Maximale Windböen (m/s)

Zur Messung des Bodenwassergehalts wurden FDR-Sensoren (Frequency Domain Reflectometry) in fünf Bodentiefen (15, 30, 45, 60 und 80 cm) installiert. Die Sensoren geben den volumetrischen Wassergehalt in m^3/m^3 an. Der vorherrschende Bodentyp ist Rendzina und hangbedingter Kolluvisol.



Abbildung 2: Wetterstationslage und Wetterstation in Darstadt



Abbildung 3: Einbau Bodenfeuchtesensoren in Darstadt

3.2.2 Bundorf

Im Solarpark Bundorf (Koordinaten Standort „Außerhalb“: 50.22604, 10.52409), der sich bereits im laufenden Betrieb befand, wurde im Februar 2024 die Messtechnik bestehend aus Wetterstationen (meteorologische Parameter wie am Standort Darstadt), Bodenwassergehaltssensoren und einem Pluviometer installiert. Im Mai 2024 folgte die Ergänzung durch Evaporationspfannen. Die Messinstallationen erfolgten an drei gezielt ausgewählten Standorten innerhalb des Solarparks (Abbildung 4), um den Einfluss der Solarpaneele auf bodenklimatische und meteorologische Parameter differenziert erfassen zu können. Der vorherrschende Bodentyp ist an allen drei Standorten Regosol und Pelosol.



Abbildung 4: Übersicht Messstandorte Solarpark Bundorf

Die drei Messstandorte repräsentieren unterschiedliche Expositionsbedingungen gegenüber der Solarpanelstruktur:

- **„Unter“**: direkt unter einer Solarpanelreihe mit leichtem Neigungsgradienten (Abbildung 5),
- **„Neben“**: unmittelbar angrenzend an eine Panelreihe mit leichtem Neigungsgradienten (Abbildung 6),
- **„Außerhalb“**: in einem Bereich mit ungestörter Sonneneinstrahlung und ohne Überdachung durch Module in einer flachen Senke – soweit dies innerhalb des Solarparks möglich war (Abbildung 6).

Am Standort **„Unter“** wurden Bodenfeuchtesensoren (Teros 10 und Teros 11, Meter Group) in Tiefen von 15, 30, 45, 60 und 80 cm zur Erfassung von Bodenwassergehalt und teilweise Bodentemperatur installiert. Ergänzt wird die Messausstattung durch eine Wetterstation (Atmos 41, Meter Group) in 1 m Höhe sowie eine Klasse-A-Evaporationspfanne mit einem Drucksensor (Mini, OTT) zur Erfassung des Wasserstandes in der Wanne.

Der Standort **„Neben“** ist identisch ausgestattet, wobei die Wetterstation hier in 2 m Höhe montiert wurde.

Am Standort **„Außerhalb“** kommt die gleiche Sensorik wie bei „Neben“ zum Einsatz. Zusätzlich wurden ein Regensmesser (Pluviometer, OTT) sowie zwei weitere Bodenfeuchtesensoren zur Validierung der Niederschlags- und Bodenwassergehaltmessungen installiert.

Eine Übersicht aller eingesetzten Messgeräte an den Standorten Bundorf und Darstadt ist in der Tabelle 1 dargestellt.



Abbildung 5: Messstandort „Unter“



Abbildung 6: Messstandort „Neben“ (links) und Messstandort „Außerhalb“ (rechts)

Tabelle 1: Verwendete Messtechnik

Messtechnikstadt	Kompaktwetterstation Atmos 41 (Meter)	Evaporationspfanne Klasse A	FDR Bodenwasser-gehaltssensoren Teros 10/11 (Meter)	FDR Bodenwasser-gehaltssensoren Drill&Drop (Sentek)	Niederschlagsmesser mit Wägeprinzip (Ott)
Bundorf Außerhalb	✓	✓	✓	✓	✓
Bundorf Unter	✓	✓	✓	✗	✗
Bundorf Neben	✓	✓	✓	✗	✗
Darstadt	✓	✓	✓	✗	✗

3.3 Einbeziehung von Interessengruppen

Um Stakeholder für das AQUASOL-Projekt zu identifizieren, die die Themen Energie, Wasser und Landwirtschaft miteinander verbinden, wurde eine Stakeholder-Karte erstellt. Die Stakeholder müssen einen beruflichen Bezug zu mindestens einem dieser Bereiche haben und sollten aus verschiedenen Sektoren wie der Privatwirtschaft, dem öffentlichen Sektor, der Forschung, Verbänden und gemeinnützigen Organisationen (NGOs) stammen, um ein breites Meinungsspektrum zu gewährleisten.

Für die öffentlichen Akteure wurden nur diejenigen innerhalb Bayerns angesprochen, während die anderen Akteure bundesweit ausgewählt wurden. Die Stakeholder benötigten außerdem eine öffentlich zugängliche E-Mail-Adresse, um an einer Online-Umfrage zur Datenerhebung teilnehmen zu können. Die meisten Stakeholder können einem der drei Bereiche (Energie, Landwirtschaft oder Wasser) und einem der vier Sektoren (Öffentlichkeit, Forschung, Privatwirtschaft oder Verbände und NGOs) zugeordnet werden. Einige Akteure, wie z. B. Umweltschutzbehörden, können jedoch in mehr als einem Bereich tätig sein. Da das Projekt in Zusammenarbeit mit der DBU und der MaxSolar GmbH durchgeführt wurde, wurden zusätzliche Stakeholder-Kontakte über deren jeweilige Ansprechpartner berücksichtigt. Die Umfrage wurde intern innerhalb der DBU und der MaxSolar GmbH verteilt, und drei zusätzliche Stakeholdergruppen wurden von der DBU empfohlen.

Zusätzlich wurden sechs Teilnehmer eines Expertengesprächs zu Agri-Photovoltaik (Agri-PV) im März 2022, rund 80 TUM-Studenten aus dem IWRM-Studiengang (als Master-Studenten) und dem Studiengang Wasserqualität (als Bachelor-Studenten) sowie Mitarbeiter an 22 Lehrstühlen der TUM in die Umfrage einbezogen. Die Empfänger wurden gebeten, den Link zur Umfrage in ihren Netzwerken weiterzugeben, so dass es nicht möglich ist, die Gesamtzahl der kontaktierten Stakeholder über die Lehrstühle der TUM zu ermitteln. Insgesamt wurden mindestens 388 Stakeholder-Gruppen identifiziert und kontaktiert.

Professor Wurster von der Hochschule für Politik München an der Technischen Universität München wurde konsultiert, um die beste Methode für die Datenerhebung zu bestimmen. Nach Abwägung der Möglichkeiten empfahl er die Verwendung eines Online-Fragebogens oder Interviews. Er argumentierte, dass das Thema keine Gruppendiskussion oder einen Workshop rechtfertige und dass sowohl Online-Fragebögen als auch Interviews eine einfache und unkomplizierte Methode zur Datenerhebung seien. Er schlug jedoch vor, dass mit einem Online-Fragebogen eine größere Anzahl von Interessengruppen erreicht werden könnte. Daher wurde der Online-Fragebogen als Methode zur Datenerhebung gewählt. Dieser Ansatz bietet eine effiziente und kostengünstige Möglichkeit, die erforderlichen Daten zu erheben. Um die Wirksamkeit des Fragebogens zu gewährleisten, muss er sich an die richtige Gruppe von Interessenvertretern richten und einen geeigneten Satz von Fragen enthalten. Dennoch kann diese Methode zu verzerrten Ergebnissen und zu einer hohen Ausfallquote bei den Antworten führen.

Ziel der Umfrage war es, die Anforderungen der Interessengruppen an eine Software zur Quantifizierung und Optimierung von Ökosystemdienstleistungen im Zusammenhang mit Solarparks zu ermitteln. Der Inhalt des Fragebogens basierte auf einer Zusammenarbeit mit Frau Zaharieva, die mithilfe der CICES-Datenbank relevante wasserbezogene Ökosystemdienstleistungen für Solarparks identifizierte. Für den Fragebogen wurde eine Liste von 12 ÖSD erstellt.

Um die Zuverlässigkeit zu gewährleisten, wurden die Fragen klar und einfach formuliert und konzentrierten sich hauptsächlich auf Single-Choice-Fragen. Außerdem waren demografische Fragen und zwei offene Fragen enthalten. Der Fragebogen wurde in deutscher und englischer Sprache verfasst. Das Umfragetool Lamapoll wurde aufgrund seiner kostenlosen Testversion, der Gestaltungsmöglichkeiten und der Teilnehmerkapazität ausgewählt. Der Fragebogen wurde in zwei Runden verschickt, zunächst an die direkt am AQUASOL-Projekt Beteiligten und darauf an die identifizierten Stakeholder. Der Fragebogen war vier Wochen lang aktiv, mit einem Zeitraum von 10 Tagen für die Stichprobengruppe und einem Zeitraum von 2,5 Wochen für die Stakeholder. Den Studenten der Technischen Universität München wurde der englische Fragebogen am 6. Dezember 2022 vorgelegt. Nach Erhalt der Antworten wurden die Daten geprüft und grundlegende statistische Analysen durchgeführt.

3.4 Entwicklung des konzeptionellen Rahmens und der Software

Die Entwicklung des konzeptionellen Rahmens sowie eines Entscheidungsunterstützungssystems zur Bewertung der Auswirkungen von Solarparks auf wasserbezogene ÖSD erfolgte in fünf aufeinanderfolgenden Schritten (Abbildung 7). Die Methodik und die Ergebnisse wurden von Alqadi et al. (2025) in einer Veröffentlichung zusammengefasst und erläutert [19]. Zunächst wurde eine systematische Literaturrecherche durchgeführt, um Erkenntnisse aus bestehenden Studien über die Auswirkungen von Solarparks auf wasserbezogene ÖSD zu gewinnen. Die daraus gewonnenen Informationen wurden anschließend in einer Datenbank strukturiert erfasst und in einem Diagramm visualisiert, das die Zusammenhänge zwischen den untersuchten Einflussfaktoren veranschaulicht. Daraufhin wurden relevante Ökosystemdienstleistungen anhand objektiver Kriterien ausgewählt und ein quantitativer Bewertungsrahmen für diese erarbeitet. Zum Schluss wurde eine grafische Benutzeroberfläche entwickelt, die am Beispiel für den geplanten Solarpark in Darstadt getestet wurde, da für diesen Standort bereits grundlegende Daten ermittelt worden waren.

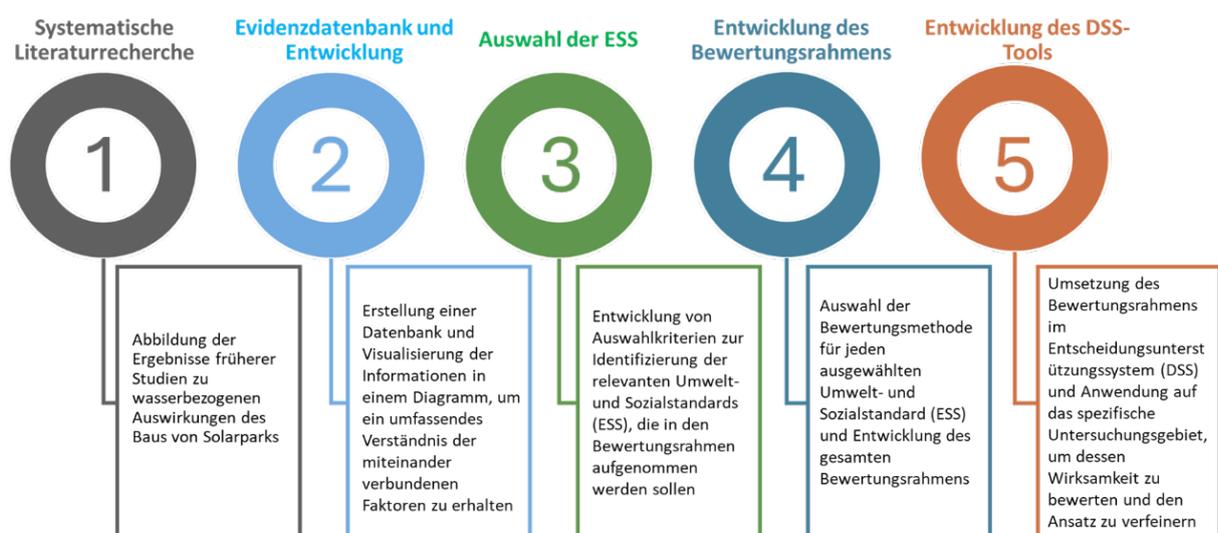


Abbildung 7: Die fünf Schritte zur Entwicklung des konzeptionellen Rahmens und des Entscheidungsunterstützungssystems

3.4.1 Systematische Literaturrecherche

Für diese Studie wurde eine systematische Literaturrecherche nach dem Schneeballprinzip durchgeführt, da diese Methode als zuverlässig gilt und eine umfassende Abdeckung relevanter Quellen ermöglicht. Ausgangspunkt der Recherche waren drei zentrale Begriffe, die sich aus den

Forschungsfragen ableiten: Solarpark, Wasser und Ökosystemdienstleistungen. Um die Suche möglichst vollständig zu gestalten, wurden für jedes dieser Schlüsselwörter passende Synonyme identifiziert und in einer komplexen Suchanfrage in der Datenbank Web of Science (WoS) verwendet. Die Suchabfrage kombinierte Begriffe wie Photovoltaik, Hydrologie, Niederschlag und Naturkapital mithilfe logischer Operatoren, um ein möglichst breites thematisches Spektrum abzudecken.

Der konzeptionelle Rahmen der Recherche konzentrierte sich auf die Wechselwirkungen zwischen Solarparks, wasserbezogenen Prozessen und Ökosystemdienstleistungen. Angesichts der potenziellen hydrologischen und mikroklimatischen Effekte von PV-FFA ist eine systematische Analyse dieser Zusammenhänge besonders relevant. Die Recherche folgte daher einem strukturierten Ansatz zur Identifikation, Kategorisierung und Analyse einschlägiger Literatur.

Die drei zentralen Themenfelder wurden jeweils mit verwandten Begriffen operationalisiert: Solarpark umfasste z. B. auch Photovoltaikanlage oder PV-Freiflächenanlage, wasserbezogene Prozesse wurden durch Begriffe wie Niederschlag oder Grundwasser ergänzt, und Ökosystemdienstleistungen schlossen etwa Naturkapitalwirkungen oder Ökosystemfunktionen ein. Durch diese umfassende Begriffsauswahl konnte ein integrativer Zugang zu Literatur an der Schnittstelle von Solarenergie, Hydrologie und Ökosystemleistungen sichergestellt werden.

Die Suchanfrage wurde im Volltextmodus der WoS-Datenbank durchgeführt und lieferte rund 100 relevante Treffer. Die Wahl fiel auf WoS aufgrund ihrer hohen wissenschaftlichen Relevanz, besonders im naturwissenschaftlichen Bereich, sowie ihrer erweiterten Suchfunktionen mit feldspezifischen Filtern. Für die Auswahl geeigneter Artikel wurden folgende Kriterien angewendet: (i) Fokus auf Photovoltaik-Freiflächenanlagen, (ii) Analyse von Umweltauswirkungen dieser Anlagen, (iii) Bezug zu wasserbezogenen Prozessen oder deren Beeinflussung, (iv) Durchführung der Studien in gemäßigten Klimazonen.

3.4.2 Entwicklung einer Evidenzdatenbank

Aus der ausgewählten Literatur wurden systematisch relevante Informationen extrahiert und in einer Evidenzdatenbank zusammengeführt. Dabei wurden folgende Kategorien berücksichtigt:

(i) Einflussfaktoren: Untersucht wurden Aspekte wie das Management von Solarparks sowie die vorherrschenden klimatischen Bedingungen und deren Auswirkungen auf hydrologische Prozesse und Umweltbedingungen. (ii) Systemelemente: Erfasst wurden alle ökologischen oder physikalischen Komponenten, die durch den Bau und Betrieb von Solarparks potenziell beeinflusst werden. (iii) Stärke der Evidenz: Die Qualität der Nachweise wurde basierend auf der Art der Quelle bewertet. Empirische Daten aus Feldstudien wurden als „starke“ Evidenz, modellgestützte Projektionen oder indirekte Beobachtungen hingegen als „schwache“ Evidenz eingestuft. (iv) Art und Ausmaß der Auswirkungen: Erfasst wurden sowohl die Richtung der beobachteten Veränderungen (positiv oder negativ) als auch deren Intensität (gering oder stark). (v) Zusätzliche Informationen: Ergänzende Angaben, wie methodische Details, Limitationen der jeweiligen Studien oder Hinweise auf Forschungslücken, wurden ebenfalls dokumentiert, um ein vertieftes Verständnis der Evidenzlage zu ermöglichen.

3.4.3 Auswahl von Ökosystemdienstleistungen

Um die Auswirkungen des Baus von Solarparks auf Wasserressourcen fundiert bewerten zu können, ist es notwendig, die relevanten wasserbezogenen ÖSD zu identifizieren. Der in diesem Projekt entwickelte Bewertungsrahmen zielt darauf ab, Vergleiche zwischen unterschiedlichen Landnutzungssystemen zu ermöglichen und Entscheidungsträgern die Interpretation der Ergebnisse zu erleichtern. Die Auswahl geeigneter ÖSD stellt daher einen zentralen Bestandteil der Methodik dar.

Als Grundlage für die Auswahl diente die CICES-Datenbank, welche insgesamt 90 Ökosystemdienstleistungen beschreibt. Die Auswahl der für diese Studie relevanten ÖSD erfolgte anhand von drei klar definierten Kriterien: Zunächst wurde geprüft, ob eine direkte Beeinflussung der ÖSD durch hydrologische Prozesse besteht, wie sie in [20] definiert sind, etwa Verdunstung, Kondensation oder Abfluss. ÖSD mit ausschließlich indirekten Bezügen, etwa der ästhetische Wert eines durch Wasserknappheit beeinträchtigten Waldes, wurden nicht berücksichtigt. Anschließend wurden, aufbauend auf der Literaturlauswertung, jene ÖSD ausgewählt, bei denen durch den Betrieb von Solarparks eine Auswirkung auf die zugrunde liegenden hydrologischen Prozesse und somit auf die ÖSD

selbst zu erwarten ist. Zudem beschränkte sich die Auswahl auf ÖSD, die durch die Umwandlung von landwirtschaftlichen Flächen oder Wäldern in PV-FFA in gemäßigten Klimazonen betroffen sind. Städtische Räume sowie andere Klimazonen wurden aus der Betrachtung ausgeschlossen.

Der entwickelte Rahmen konzentriert sich damit auf Süßwasser bezogene ÖSD in gemäßigten Klimaregionen und ist speziell auf die Bewertung von PV-FFA zugeschnitten. Eine Übertragung auf andere geografische oder klimatische Kontexte erfordert entsprechende Anpassungen, insbesondere hinsichtlich der einbezogenen hydrologischen Prozesse und ÖSD. Außerdem wurden integrative Nutzungsformen wie Agri-PV in dieser Analyse nicht berücksichtigt.

3.4.4 Entwicklung eines Bewertungsrahmens

Der Bewertungsrahmen fokussiert sich auf ausgewählte wasserbezogene ÖSD, die anhand definierter Kriterien (siehe Abschnitt 3.4.3) identifiziert wurden. Ziel ist es, die Auswirkungen von Solarparks auf diese ÖSD systematisch zu bewerten und vergleichbar zu machen. Als methodische Grundlage dient ein multikriterieller Entscheidungsfindungsansatz (MCDM). Dabei werden:

- a. die relevanten ÖSD als Bewertungskriterien festgelegt,
- b. ihre Bedeutung von den Nutzern direkt im DSS gewichtet,
- c. und die Auswirkungen unterschiedlicher Landnutzungsoptionen (z. B. Solarpark vs. Ackerfläche) anhand eines gewichteten Summenmodells aggregiert.

Für jede ÖSD wurde ein eigenes Bewertungsschema entwickelt, das sowohl die Richtung als auch das Ausmaß möglicher Veränderungen berücksichtigt. Dieser Ansatz ermöglicht eine transparente Bewertung, die sowohl ökologische Auswirkungen als auch unterschiedliche Stakeholder-Prioritäten berücksichtigt.

Für jede ausgewählte Ökosystemdienstleistung wurden spezifische Bewertungsmethoden festgelegt, darunter wirtschaftliche Bewertungen [21], indikatorbasierte Ansätze und Analysen basierend auf Landnutzung und -bedeckung (LULC). Die Wahl der Methode richtete sich nach der jeweiligen Art der ÖSD: So werden ökonomische Ansätze etwa für Versorgungsleistungen wie den Anbau von Kulturpflanzen eingesetzt. Für regulierende Leistungen wie die Kontrolle von Erosionsraten oder die Regulierung des Wasserkreislaufs finden hingegen Indikatoren wie die Allgemeine Bodenabtragsgleichung (ABAG) [22] oder das SCS-CN Verfahren [23] Anwendung. LULC-basierte Bewertungen wiederum dienen zum Beispiel bei der Erfassung der Fähigkeit lebender Prozesse, den chemischen Zustand von Süßgewässern zu regulieren [24].

Diese unterschiedlichen Methoden wurden im Bewertungsrahmen durch ein Punktesystem integriert [25]. Jeder ÖSD wurde eine Punktzahl zugewiesen, die anschließend entsprechend ihrer Relevanz für den jeweiligen Solarpark gewichtet wurde. Die Gewichtungsfaktoren (β_i) basieren auf Befragungen von Stakeholdern und Fachexperten, um sicherzustellen, dass der Rahmen lokale Prioritäten und Bedingungen realistisch abbildet. Der Gesamtwert einer Landnutzungsalternative ergibt sich aus der Summe der gewichteten Punktzahlen aller relevanten ÖSD.

Für Bewertungen, die auf Indikatoren oder LULC-Metriken basieren, erfolgt die Punktevergabe auf einer Skala von 1 bis 100. Bei wirtschaftlichen Bewertungen hingegen ist eine Normalisierung erforderlich, die nach folgender Formel erfolgt:

$$x_i = 100 \times \frac{x'_i - x'}{x'_{max} - x'}$$

Dabei bezeichnet x_i die normalisierte Punktzahl, x'_i den Marktwert der ÖSD-Alternative, x' den minimalen Referenzwert und x'_{max} den höchsten ermittelten Marktwert innerhalb der betrachteten Alternativen. Zur Berechnung des zusammengesetzten Endwerts wird die folgende Formel verwendet:

$$\text{Endwert} = \sum \beta_i \times x_i$$

Wobei β_i das Gewicht der jeweiligen ÖSD darstellt, das von Stakeholdern festgelegt wurde. Die Summe

aller Gewichte beträgt eins. Im Bewertungsrahmen wurde auch die Unsicherheit der Eingabedaten berücksichtigt, indem plausible Wertebereiche aus wissenschaftlich fundierten Fallstudien und Fachliteratur herangezogen wurden. Darüber hinaus erlaubt das entwickelte DSS-Tool den Nutzerinnen und Nutzern, ÖSD individuell zu gewichten. Dies ermöglicht einen flexiblen, anpassbaren Bewertungsprozess, der gezielt auf die Bedürfnisse von Umweltfachleuten, Behörden und Landnutzenden eingeht. Die Kombination aus flexibler Dateneingabe und anpassbaren Gewichtungen erhöht die Anwendbarkeit des DSS-Tools für verschiedene Kontexte, ohne auf vorgegebene Gewichtungsschemata angewiesen zu sein.

3.4.5 Entwicklung des Entscheidungsunterstützungssystems

Aufbauend auf dem in Abschnitt 3.4.4 vorgestellten Bewertungsrahmen wurde ein Entscheidungsunterstützungssystem entwickelt, das den Bewertungsprozess praxisnah und benutzerfreundlich umsetzt. Das DSS integriert kompensatorische, auf MCDM basierende Bewertungssysteme sowie flexible Gewichtungsmechanismen und stellt diese über eine intuitive grafische Benutzeroberfläche bereit. Nutzerinnen und Nutzer können Daten eingeben, Gewichtungen anpassen und die Ergebnisse anschaulich visualisieren, ohne tiefgehende Kenntnisse in Mathematik oder Programmierung zu benötigen.

Ziel des Tools ist es, den Vergleich von ÖSD im Kontext von Energieprojekte zu vereinfachen. Insbesondere unterstützt es Entscheidungsträger dabei, die Auswirkungen der Installation von Solarparks im Vergleich zu bestehenden ÖSD fundiert zu bewerten. Zur Sicherstellung einer hohen Benutzerfreundlichkeit wurde der Entwicklungsprozess an den zehn Usability-Heuristiken der Nielsen Norman Group ausgerichtet. Die grafische Benutzeroberfläche wurde mithilfe der PyQt5-Bibliothek realisiert und umfasst insgesamt 15 Fenster: (i) Das Hauptfenster, das beim Start der Software erscheint und den Einstieg über die Eingabe von Projektinformationen ermöglicht. (ii) Das DSS-Fenster, in dem den verschiedenen ÖSD Gewichtungen zugewiesen und relevante Informationen eingegeben werden können. (iii) 13 Informationsfenster, die jeweils eine spezifische ÖSD beschreiben und die zugrunde liegende Bewertungsmethodik verständlich erläutern.

3.5 Hydrodynamische Modellierung

Das hydrodynamische 2D Modell wurde für den Solarpark Bundorf erstellt. Durch seine Größe bietet der Solarpark gute Voraussetzungen, um die hydrologischen Auswirkungen solcher Anlagen zu untersuchen. Abbildung 8a zeigt die Lage und Ausdehnung des Areals. Mithilfe eines digitalen Geländemodells (DGM) wurde das Einzugsgebiet der südlichen Hälfte des Parks bestimmt. Für die Modellierung wurde ein rund 70.300 Quadratmeter großes Gebiet ausgewählt, das überwiegend vom Solarpark eingenommen wird. Ein kleinerer Teil im Süden wird weiterhin landwirtschaftlich genutzt (siehe Abbildung 8b). Die Modulreihen stehen in einem Abstand von 4,50 Metern, jede Reihe ist 6,85 Meter breit und besteht aus drei südlich ausgerichteten Solarpaneelen. Das Gelände fällt insgesamt leicht nach Norden und Osten ab. Entlang der Ostseite verläuft ein schmaler Entwässerungsgraben.

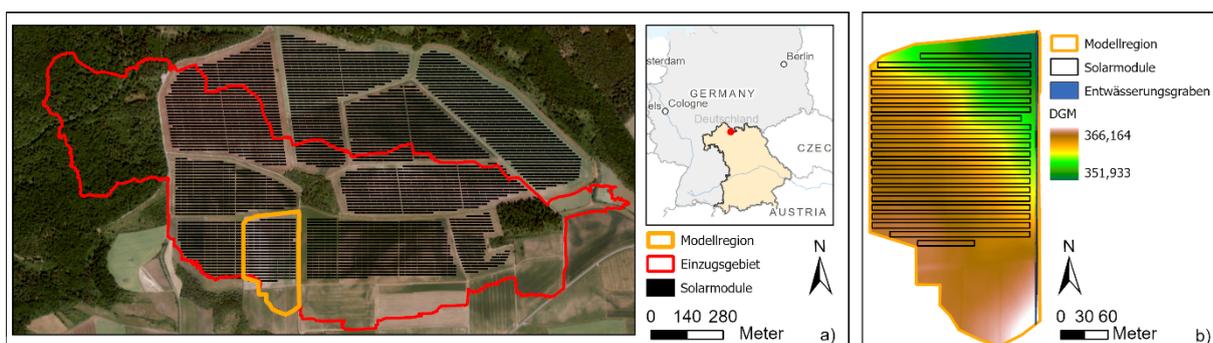


Abbildung 8: a) Lage und Ausdehnung des Solarparks Bundorf b) Abgrenzung des hydrologischen Modellgebiets in der südlichen Hälfte der Anlage basierend auf Fließweganalysen und DGM

Das DGM wurde aus öffentlich zugänglichen Laserdaten der Bayerischen Vermessungsverwaltung in Auflösungen von 10 cm und 2 m erstellt. Die für die Simulation benötigten Bodeneigenschaften wurden

aus einer räumlich hochaufgelösten Karte bodenhydrologischer Parameter für Bayern entnommen, die von Mitterer et al. (2024) [26] entwickelt wurde. Die genaue Lage und Konfiguration der Solarmodule wurde von der Firma MaxSolar bereitgestellt. Zur Simulation verschiedener Niederschlagsereignisse kamen die Niederschlagsdaten der Koordinierten Starkniederschlagsregionalisierung (KOSTRA) zum Einsatz.

Für die Niederschlags-Abfluss Modellierung wurde das zweidimensionale hydrodynamische Modell TELEMAC-2D herangezogen. Ein wesentlicher Vorteil von TELEMAC-2D ist der offene Quellcode, der eine Anpassung und Erweiterung für spezielle Anwendungen ermöglicht, was für diese Arbeit notwendig war. In bestehenden TELEMAC-2D-Modellen wird die räumliche Verteilung des Niederschlags als uniform angenommen, was für die Simulation eines Solarparks ungeeignet ist. Die Solarmodule verändern die Niederschlagsverteilung erheblich, sodass drei Zonen unterschieden werden müssen: i) Kein direkter Niederschlag unter den Solarmodulen ii) Erhöhte Niederschlagsintensität an den Abtropfkanten durch ablaufendes Wasser und iii) Normale Niederschlagsintensität zwischen den Modulreihen. Um diese Unterschiede im Modell abzubilden, wurde der Quellcode erweitert und eine eigene Subroutine geschrieben, die eine räumlich differenzierte Verteilung des Niederschlags erlaubt.

Damit der gesamte Niederschlag nicht als unmittelbarer Wasserzufluss in das System eingeht, wurde auch die Infiltration als Verlustprozess berücksichtigt. Die Green-Ampt-Infiltration ist ein weit verbreitetes, physikalisch basiertes Modell, das bereits 1911 entwickelt wurde [27]. Es beschreibt die vertikale Versickerung von Wasser in einen homogenen Boden. Die zentrale Annahme des Modells ist, dass das infiltrierende Wasser eine scharfe Feuchtefront bildet, anstatt sich diffus im Boden auszubreiten [28]. Obwohl das Green-Ampt-Modell in TELEMAC-2D bereits implementiert ist [29], berücksichtigt es keine Re-Infiltration. Daher wurde der Quellcode erweitert, um diesen Prozess explizit zu modellieren. Dadurch kann der Oberflächenabfluss, der an der Abtropfkante der Solarmodule entsteht, unterhalb der Module erneut versickern.

Das beschriebene Untersuchungsgebiet wurde mithilfe eines dreiecksbasierten Rechnernetzes für die Simulation aufgelöst. Um die Besonderheiten im Bereich der Solarmodule möglichst genau abbilden zu können, wurde dort eine feinere Netzauflösung von 40 cm gewählt. Für die übrigen Flächen im Modellgebiet genügte eine mittlere Auflösung von 50 cm. Die Höhendaten stammen aus den erstellten DGMs und wurden auf das Netz interpoliert. Für die Simulation des ursprünglichen Geländezustands sowie des Zustands direkt nach der Errichtung des Solarparks kam ein hochauflösendes DGM mit 10 cm Rasterweite zum Einsatz. Um hingegen den Zustand einige Jahre nach dem Bau zu modellieren, wurde ein DGM mit 2 m Auflösung verwendet. Damit lässt sich eine geglättete Oberfläche darstellen, auf der keine landwirtschaftliche Nutzung mehr stattfindet.

Im Modellgebiet verläuft ein Entwässerungsgraben mit zwei Durchlässen, welche zweidimensional modelliert wurden. Die Randbedingungen des Untersuchungsgebiets wurden so gewählt, dass am nordöstlichen Modellrand ein freier Auslass mit Thompson-Randbedingungen definiert wurde, während alle übrigen Modellgrenzen als undurchlässig angenommen wurden. Die Thompson-Bedingung verhindert, dass Strömungen oder Wellen, die das Modellgebiet verlassen, als Rückreflexionen wieder ins System gelangen. Diese Randbedingung wird häufig verwendet, wenn die genauen Bedingungen an den Rändern nicht bekannt sind [30].

Die Oberflächenrauigkeit wurde mithilfe von Manning-Strickler-Werten (k_{st} -Werten) für unterschiedliche Bereiche definiert. Aufgrund der geringen Wassertiefen in der reinen Niederschlags-Abfluss-Modellierung wurden für die landwirtschaftlichen Flächen Dünnfilmrauheiten angesetzt. Hier wurde ein k_{st} -Wert von 10 gewählt, während im Entwässerungsgraben aufgrund des erhöhten Abflusses ein Wert von 20 verwendet wurde [31]. Abbildung 9 zeigt das Rechnernetz mit den Randbedingungen und den zugewiesenen k_{st} -Werten.

Undurchlässiger Modellrand
 Freier Auslass
 Kst = 10
 Kst = 20

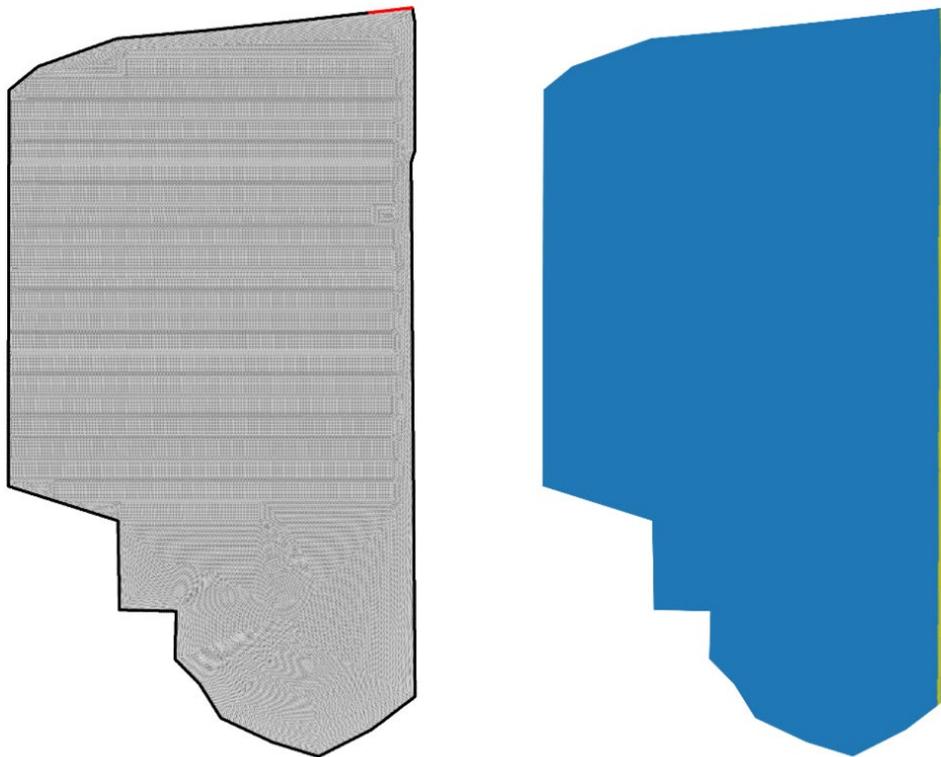


Abbildung 9: Rechennetz mit den zugewiesenen Randbedingungen (links) und den belegten Rauigkeitsbeiwerten (rechts)

Die hydrologischen Bodenparameter beziehen sich auf die ursprünglich landwirtschaftlich genutzten Flächen. Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit beträgt 22,9 mm/h, der volumetrische Feuchtigkeitsgehalt nahe der Sättigung liegt bei 0,48, und die Saugspannung an der Feuchtigkeitsfront bei 0,037 m. Der Feuchtigkeitsgehalt für trockene Böden beträgt 0,217, während er für feuchte Böden bei 0,337 liegt.

Ein wichtiger Aspekt der Modellierung ist die durch die Solarmodule veränderte Niederschlagsverteilung. Der Niederschlag wird in drei Zonen unterteilt: i) kein direkter Niederschlag unter den Solarmodulen, ii) erhöhte Niederschlagsintensität an den Abtropfkanten durch ablaufendes Wasser und iii) normale Niederschlagsintensität zwischen und außerhalb der Modulreihen. Jedem Knoten des Rechennetzes wurde eine Niederschlagsintensität zugewiesen, die der jeweiligen Zone entspricht. Jede Modulreihe verfügt über drei Abtropfkanten: zwei in einem Abstand von 2,40 m und eine an der Unterseite der Modulreihe nach weiteren 2,05 m. Das auf den Modulen gesammelte Niederschlagsvolumen wurde direkt auf diese Kanten umverteilt. Da die Konzentrationszeit nur wenige Sekunden beträgt und der Regen länger anhält, kann sie vernachlässigt werden. Daher erreicht der gesamte Abfluss der Solarmodule ab der ersten Sekunde die Abtropfkanten. Die Intensitäten wurden für jeden Zeitschritt an die Knoten des Rechennetzes übergeben, um die räumliche und zeitliche Variabilität der Niederschlagsverteilung abzubilden. Die Simulationszeit beträgt drei Stunden mit einem Zeitschritt von einer Sekunde. Die numerische Lösung der Flachwassergleichungen erfolgte mithilfe des Finite-Elemente-Verfahrens. Es wurden folgende drei Szenarien definiert und gerechnet:

Szenario 1: Vor dem Bau des Solarparks ohne Solarmodule (OS)

Dieses Szenario beschreibt den ursprünglichen Zustand des Gebiets als landwirtschaftlich genutzte Fläche mit Ackerhügeln und Fahrspuren landwirtschaftlicher Maschinen. Zur Modellierung wurde das hochaufgelöste DGM mit 10 cm Rastergröße verwendet. Die Oberflächenrauigkeit wurde mit einem kst-Wert von 10 für Ackerflächen angesetzt. Dieses Szenario wurde sowohl für trockene als auch für feuchte Anfangsbedingungen des Bodens simuliert.

Szenario 2: Unmittelbar nach dem Bau des Solarparks mit Solarmodule (MS)

Hier wurde der Zustand direkt nach der Errichtung des Solarparks betrachtet. Da die landwirtschaftliche

Prägung des Bodens in dieser Phase noch vorhanden ist und frühere Fahrspuren weiterhin existieren können, wurde erneut das DGM mit 10 cm Auflösung verwendet. Die Oberflächenrauigkeit blieb mit einem k_{st} -Wert von 10 für Ackerflächen unverändert. Auch dieses Szenario wurde für trockene und feuchte Anfangsbedingungen simuliert.

Szenario 3: Mehrere Jahre nach dem Bau des Solarparks mit ökologischen Maßnahmen (MSÖ)

Das dritte Szenario bildet einen Zustand ab, wie er sich einige Jahre nach der Inbetriebnahme des Solarparks einstellen könnte. Die landwirtschaftliche Nutzung wurde inzwischen eingestellt, stattdessen wurden ökologische Maßnahmen wie Begrünung oder Bodenauflockerung umgesetzt, wodurch sich die Bodenstruktur verändert. Zur Modellierung wurde ein DGM mit 2 m Rastergröße verwendet, um die geglättete, inzwischen unbewirtschaftete Oberfläche darzustellen. In diesem Szenario wurden die Rauigkeitswerte je nach Bodennutzung (Acker, Grünland oder Wiese) angepasst. Des Weiteren wurde die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit modifiziert, um die verbesserte Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens, die durch den Verzicht auf landwirtschaftliche Nutzung entsteht, abzubilden.

Niederschlagszenarien

Um unterschiedliche Niederschlagsintensitäten zu berücksichtigen, wurden Wiederkehrintervalle von 1, 5, 10 und 100 Jahren untersucht. Die entsprechenden Niederschlagsmengen für Regenereignisse mit Dauerstufen von 15, 30 und 60 Minuten wurden der KOSTRA-Tabelle für den Standort Bundorf entnommen. Die Niederschlagsverteilung erfolgte als Blockniederschlag über 15 Minuten. Das bedeutet:

- Bei einer 15-minütigen Regenepisode fällt die gesamte Niederschlagsmenge in dieser Zeit.
- Bei einer 60-minütigen Episode wird der Niederschlag in vier gleichmäßige 15-Minuten-Intervalle aufgeteilt.

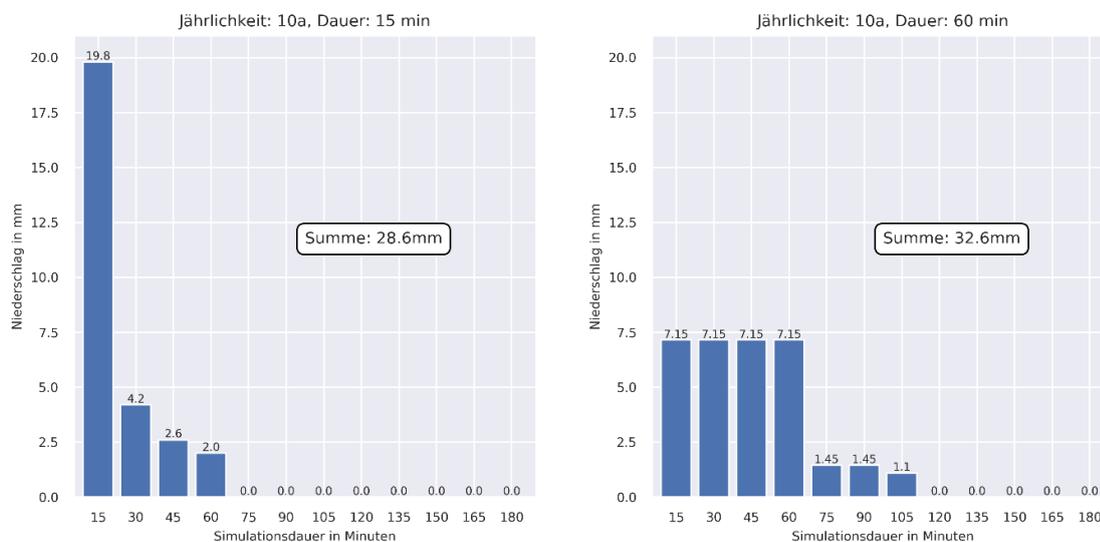


Abbildung 10: Beispielhafte Niederschlagsverteilung für ein 10-jährliches Regenereignis mit Dauerstufen von 15 min (links) und 60 min (rechts)

Für jede Dauerstufe wurde ein abklingendes Niederschlagsereignis über 45 Minuten festgelegt. Die Niederschlagswerte für dieses Ereignis wurden so berechnet, dass in jedem 15-Minuten-Intervall der 45 Minuten die Gesamtniederschlagsmenge aus der KOSTRA-Tabelle für die entsprechende Dauer herangezogen und die bereits gefallene Niederschlagsmenge abgezogen wurde. Fehlt eine Dauerstufe in der Tabelle (z. B. 75 Minuten), wurde die Niederschlagsmenge durch lineare Interpolation bestimmt. Abbildung 10 veranschaulicht dies am Beispiel eines 10-jährlichen Niederschlagsereignisses mit einer Dauer von 15 bzw. 60 Minuten.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über alle gerechneten Szenarien.

Tabelle 2: Gerechnete Szenarien der hydrodynamischen Modellierung

Szenario	DGM Auflösung	K_{sat} Wert	K_{st} Wert	Anfangsfeuchte	Niederschlags- jährlichkeit	Niederschlags- dauer (min)
Ohne Solarmodule (OS)	10 cm	22,9	10	Trocken + feucht	1, 5, 10, 100	15, 30, 60
Mit Solarmodule (MS)	10 cm	22,9	10	Trocken + feucht	1, 5, 10, 100	15, 30, 60
Mit Solarmodule und ökologischen Maßnahmen (MSÖ)	2 m	22,9 27 32	10 7 5	Trocken + feucht	1, 5, 10, 100	15, 30, 60

4 Projektergebnisse

4.1 Experimentelle Ergebnisse

4.1.1 Darstadt

Da der Bau des Solarparks nicht während des Messzeitraums begonnen wurde und damit keine Einflüsse eines Solarparks auf meteorologische Parameter und den Bodenwassergehalt gemessen werden konnten, sind diese Daten im Abschlussbericht nicht vorhanden. Der Zwischenbericht erhält einen Teil der Daten, sind aber durch den Wechsel nach Bundorf nicht von Relevanz.

4.1.2 Bundorf

4.1.2.1 Bodenfeuchteverhalten

Abbildung 11 zeigt den Verlauf der Bodenfeuchte/Wassergehalt sowie den Niederschlag in einem Zeitraum von 16.02.2025 bis 25.09.2025.

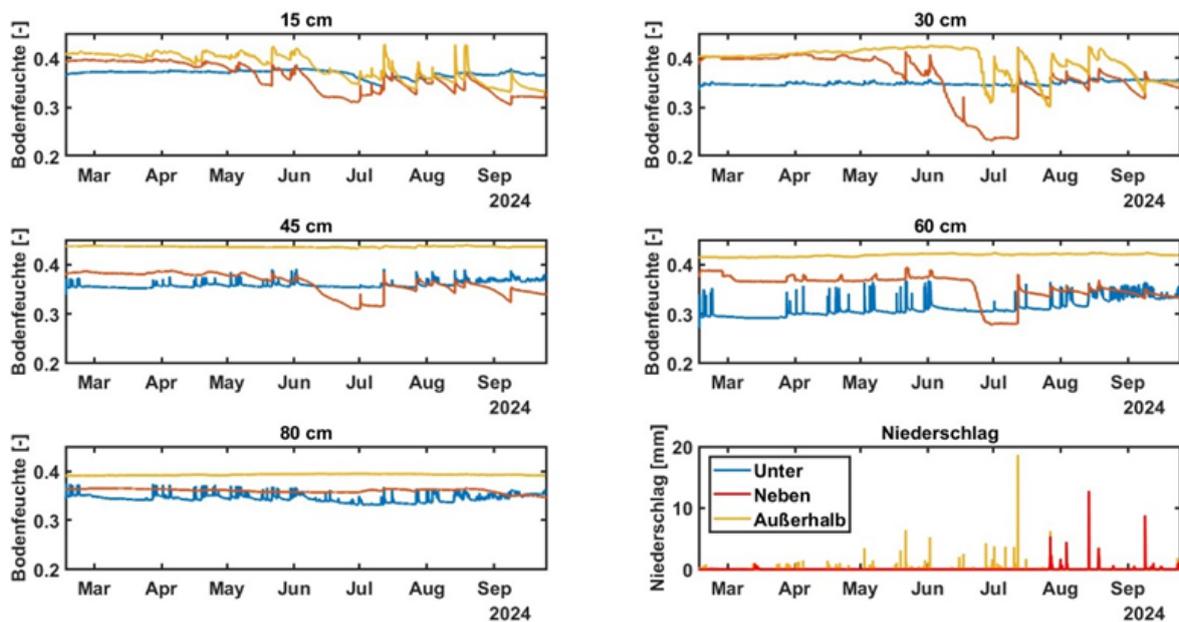


Abbildung 11: Bodenfeuchte in 15, 30, 45, 60 und 80 cm Tiefe sowie der gemessene Niederschlag

An den Standorten ohne Modulüberdachung zeigten sich insbesondere in den oberflächennahen Bodenschichten (15–30 cm) unmittelbar nach Niederschlagsereignissen deutliche Anstiege der Bodenfeuchte. In den tieferliegenden Schichten (60–80 cm) fiel die Reaktion hingegen verzögert und abgeschwächt aus, was auf einen langsamen Infiltrationsprozess hindeutet. Am Standort „Außerhalb“, der sich in einer leichten Geländesenke befindet, wurde in einer Tiefe von 45 cm eine vollständige Sättigung erreicht, während dies am Standort „Neben“ erst in 80 cm Tiefe der Fall war. Daraus lässt sich ableiten, dass an allen drei Messstandorten eine Grundwasserneubildung ab etwa 80 cm Tiefe möglich ist.

Die Bodenfeuchte unter freier Atmosphäre (ohne Überdachung durch Solarpaneele) zeigte zudem eine deutlich schnellere Abnahme durch Verdunstung im Vergleich zu den unter Modulflächen liegenden Böden. Am Standort „Unter“, der in Hanglage liegt, deuten die Bodenfeuchtedynamiken ab 45 cm Tiefe nach Niederschlagsereignissen auf lateralen Wassertransport hin. Es ist anzunehmen, dass Wasser aus angrenzenden Bereichen – entweder von außerhalb der Modulfläche oder entlang der Panelkanten – in den Messbereich gelangt, da dort selbst keine direkte Niederschlagszufuhr erfolgt.

Im Zeitraum vom 16. Februar bis zum 25. September 2024 wurden an den Standorten „Außerhalb“ und „Neben“ kumulierte Niederschlagsmengen von 483 mm bzw. 481 mm gemessen. Am Messstandort unterhalb der Überdachung wurde kein Niederschlag gemessen. Diese Werte liegen deutlich über dem langjährigen Mittelwert (5-Jahresmittel) der nahegelegenen DWD-Station in Bad Königshofen, die im

gleichen Zeitraum durchschnittlich 344 mm Niederschlag aufzeichnete. Zusätzlich war der vorausgehende Winter außergewöhnlich niederschlagsreich: Zwischen Oktober 2023 und Mitte Februar 2024 wurden an der DWD-Station 275 mm Niederschlag registriert, gegenüber einem 5-Jahresmittel von lediglich 152 mm im Vergleichszeitraum. Die Niederschlagsmessungen am Standort „Außerhalb“ wurden mithilfe eines Pluviometers mit Wägeprinzip validiert. Die Abweichung zur Kompaktwetterstation (Atmos 41) betrug lediglich 1 %, was auf eine hohe Messgenauigkeit der Kompaktstation hinweist.

4.1.2.2 Bodentemperaturen

Abbildung 12 zeigt den Verlauf der Lufttemperatur auf 2 m Höhe (Unter Solarpanel 1 m) sowie die Bodentemperatur für alle Stationen in 15 cm und 45 cm Tiefe sowie zusätzlich bei den Stationen „Unter“ und „Neben“ in den Tiefen 30 cm und 80 cm im Solarpark über einen Zeitraum von 16.02.2025 bis 25.09.2025.

Die täglichen Schwankungen der Bodentemperatur sind besonders in flachen Bodenschichten (15–30 cm) deutlich erkennbar. In tieferen Schichten (≥ 45 cm) zeigen sich diese Schwankungen weniger ausgeprägt, was auf eine langsamere Reaktionszeit der Bodentemperatur hinweist. Im Vergleich dazu verläuft der Tagesgang der Lufttemperatur am stärksten. Die Temperaturdifferenzen zwischen den verschiedenen Standorten sind gering, wobei jedoch die Temperaturen unter den Solarmodulen konstant niedriger sind als an Standorten ohne Beschattung.

Die Reaktion der Bodentemperatur auf tageszeitliche Veränderungen ist langsamer als die der Lufttemperatur, insbesondere in tieferen Bodenschichten. Die höchsten Temperaturwerte werden in einer Tiefe von 15 cm erreicht. Am Standort „Neben“ sind die Bodentemperaturen in allen gemessenen Tiefen etwas niedriger als am Standort „Außerhalb“, was durch die seitliche Beschattung der Solarmodule erklärt werden kann.

Die schnellen Temperaturschwankungen in 80 cm Tiefe, die unter den Solarmodulen beobachtet wurden, könnten durch gleichzeitige Niederschläge und den lateral verlaufenden Wassertransport im Boden beeinflusst worden sein.

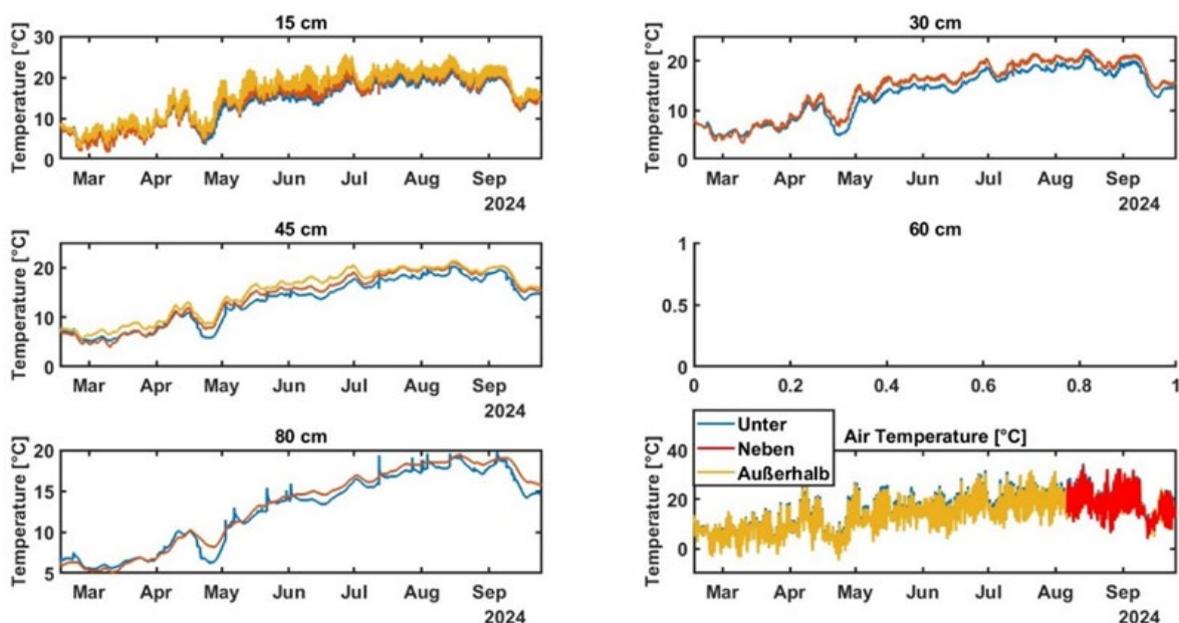


Abbildung 12: Bodentemperaturen in 15, 30, 45 und 80 cm Tiefe sowie gemessene Lufttemperatur

4.1.2.3 Windgeschwindigkeit, Strahlung und Wasserdampfdruck

Abbildung 13 zeigt den Verlauf der Windgeschwindigkeit, Strahlung und Wasserdampfdruck auf 2 m Höhe (Unter Solarpanel 1 m) im Solarpark über einen Zeitraum von 16.02.2025 bis 25.09.2025.

Die Windgeschwindigkeit korreliert mit der Strahlung. Eine hohe Strahlung bedingt eine höhere thermische Turbulenz und damit mehr Wind. Der Wasserdampfdruck zeigt parallele Trends zur Strahlung (typisch für warme, feuchte Tage). Unterschiede zwischen den Standorten sind tageszeitlich und meteorologisch bedingt, weniger standortspezifisch.

Windgeschwindigkeit:

Der Standort „Außerhalb“ zeigt tendenziell höhere Schwankungen. Standort „Neben“ liegt im Mittelbereich, Standort „Unter“ zeigt die geringsten Werte.

Strahlung:

Tagesgang ist klar erkennbar. Alle Standorte erfassen vergleichbare Strahlungswerte, wobei kleinere Unterschiede auf Abschattung zurückgehen könnten.

Wasserdampfdruck:

Verläuft parallel zur Lufttemperatur, keine auffälligen Abweichungen zwischen den Standorten sind erkennbar.

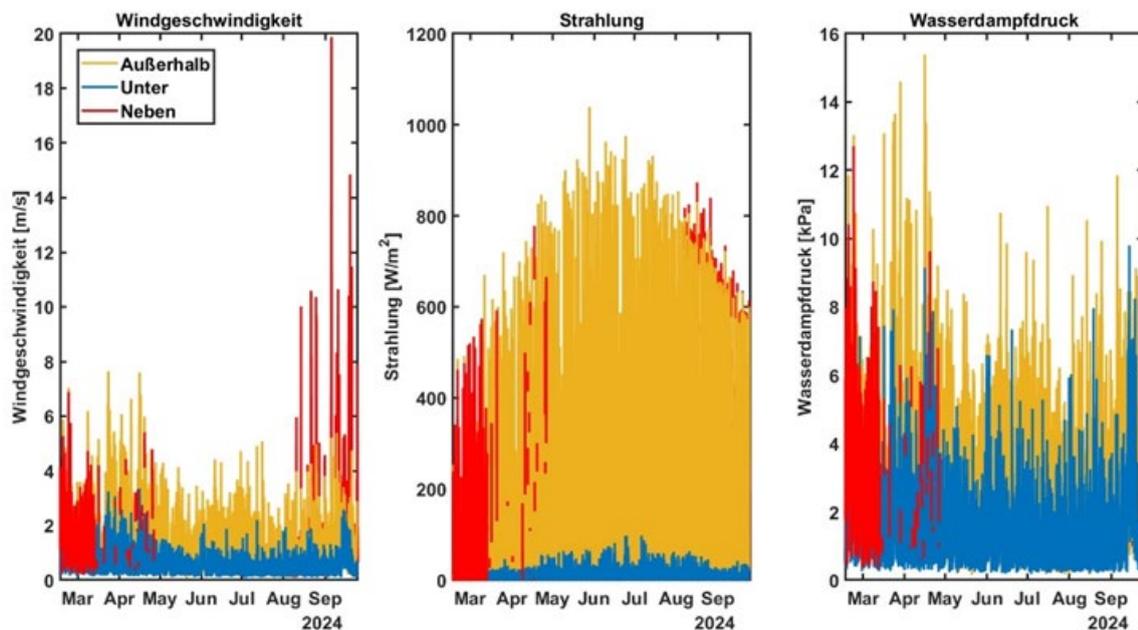


Abbildung 13: Windgeschwindigkeit, Strahlung und Wasserdampfdruck

4.1.2.4 Evaporation

Abbildung 14 zeigt den Verlauf der Bodenfeuchtigkeit in 15 cm Tiefe und des Wasserstands der Evaporationswannen an drei unterschiedlichen Messstandorten im Solarpark über einen Zeitraum von 03.05.2025 bis 26.07.2025. Die dargestellten Daten erfassen die Evaporation unter Berücksichtigung von Niederschlagsereignissen und verdeutlichen standortspezifische Unterschiede im Verdunstungsverhalten.

Die geringste Evaporation wurde mit durchschnittlich 1,5 mm/d unterhalb der Solarpanele gemessen. Im Vergleich dazu weisen die Messstationen neben (3,2 mm/d) und außerhalb der Solarpanelreihen (4,2 mm/d) eine ähnlich hohe Verdunstungsrate auf. Der Einfluss seitlicher Beschattung sowie reduzierter Windgeschwindigkeiten an dem Messstandort „Neben“ führt zu einer moderaten Reduktion der Evaporation im Vergleich zur unbeschatteten Referenzfläche außerhalb des Solarparks.

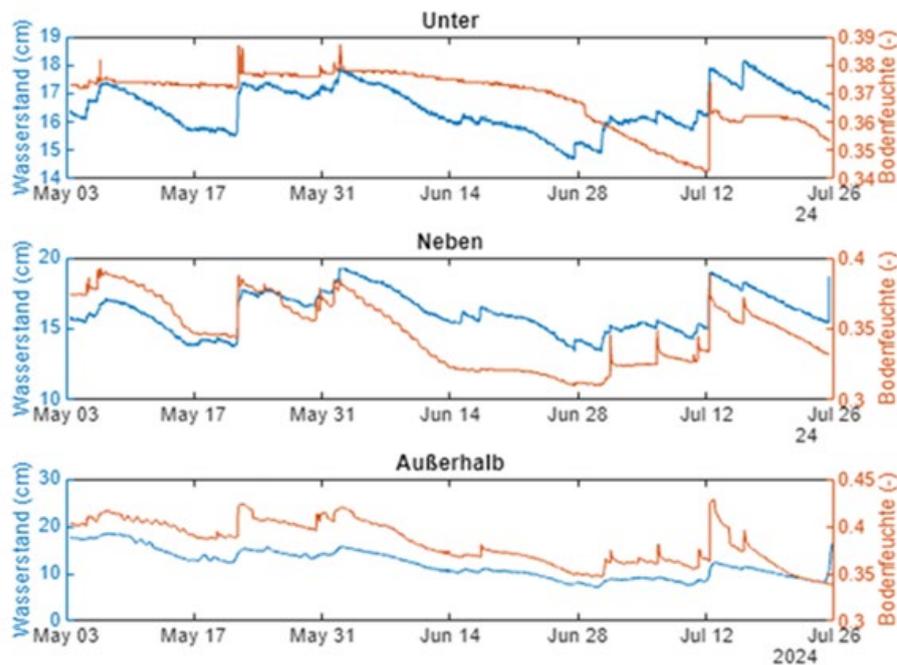


Abbildung 14: Evaporation, Niederschlag, Bodenfeuchte in 15 cm Tiefe

4.2 Einbeziehung von Interessensgruppen

In der Umfrage wurde eine einführende Projektzusammenfassung präsentiert, um die Teilnehmer mit den Projektzielen und -konzepten vertraut zu machen. Diese Gelegenheit wurde genutzt, um Rückmeldungen von Interessenvertretern über die Software einzuholen und das Projekt zu bewerben. Für eine Umfrage zur Bewertung der Relevanz der Software für die Analyse der Auswirkungen von Solarparks auf Ökosystemdienstleistungen wurden 388 Stakeholder ermittelt. Von den 188 Besuchern, die den Link zur Umfrage öffneten, nahmen 136 teil. Ungefähr 61 % der Teilnehmer füllten die Umfrage aus, wobei die Ausfüllquote bei Studenten (70 %) höher war als bei Fachleuten (56 %). Die meisten Befragten kamen aus Süddeutschland und waren Studenten, Forscher und Angestellte des Energiesektors. Etwa 49 % der Teilnehmer gaben an, weiblich zu sein, 51 % waren männlich. Die meisten Teilnehmer waren zwischen 25 und 39 Jahre alt. Von den 105 Teilnehmern, die die erste Frage nach der Relevanz der Software beantworteten, hielten 89 % die Software für wichtig.

Wie in Abbildung 15 dargestellt, variiert die Bewertung der Relevanz verschiedener ÖSD im Kontext der Software, so dass es schwierig ist, eine endgültige Rangfolge zu erstellen. Dennoch weisen mehrere ÖSD eine höhere Bewertung auf, was auf ihre Bedeutung für die Interessengruppen hinweist. Zu diesen hoch bewerteten Leistungen gehören Solarenergie, Grundwasser, Kontrolle der Erosionsraten, Kulturpflanzen und die Regulierung von Temperatur und Feuchtigkeit. Diese Leistungen weisen hohe Medianwerte und geringe Interquartilsbereiche auf hohem Niveau auf, was auf einen allgemeinen Konsens der Interessengruppen hinsichtlich ihrer Bedeutung schließen lässt.

Umgekehrt hat die Schädlingsbekämpfung den niedrigsten Medianwert. Ästhetische Erfahrungen, Schädlingsbekämpfung, Pufferung und Abschwächung von Massenbewegungen sowie Tiere, die zur Nahrungs-, Material- oder Energiegewinnung gehalten werden, weisen große Interquartilsabstände bei relativ niedrigen Werten auf. Die breiteren Interquartilsbereiche für diese Dienstleistungen könnten darauf hindeuten, dass die Meinungen der Interessengruppen über ihre Relevanz unterschiedlicher sind, oder dass weniger Wissen über ihre Bedeutung vorhanden ist.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es zwar keine eindeutige Rangfolge der Ökosystemdienstleistungen in Bezug auf die Relevanz für die Software gibt, dass aber einige durchweg einen höheren Stellenwert haben.

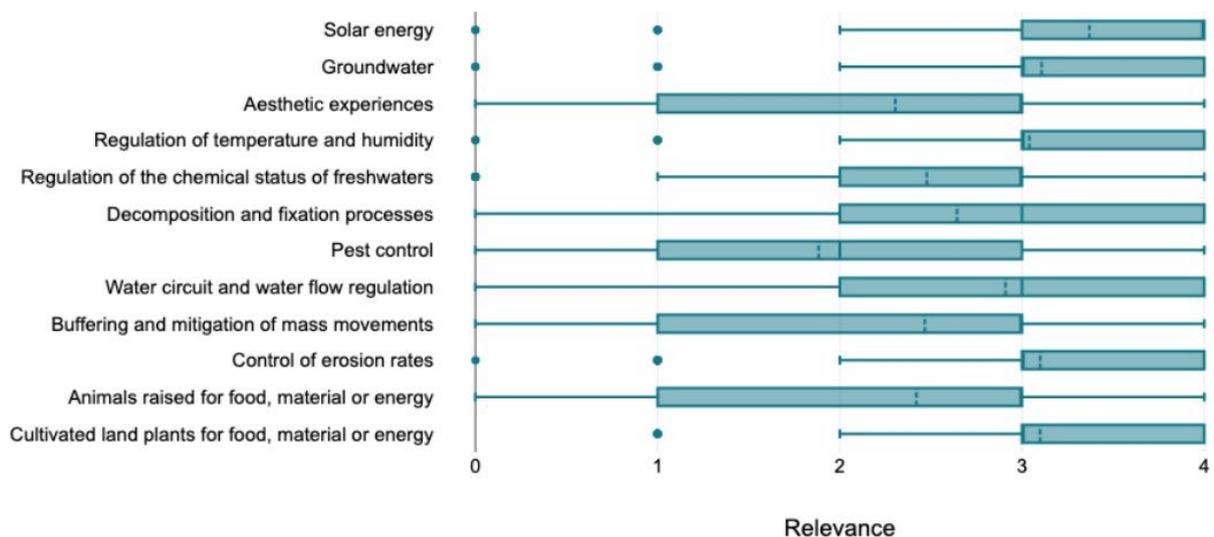


Abbildung 15: Bewertung der Relevanz verschiedener ÖSD basierend auf einer Umfrage

4.3 Literaturübersicht und Entwicklung der Datenbank

Zu Beginn wurden sechs zentrale Fachartikel als Primärliteratur ausgewählt [6] [7] [8] [10] [32] [33]. Durch die Analyse ihrer Literaturverweise konnten zwei weitere relevante Arbeiten als Sekundärliteratur identifiziert werden [34] [35]. Alle Artikel wurden anschließend systematisch anhand definierter Kriterien ausgewertet, die im Abschnitt 3.4 erläutert wurden. Die daraus entstandene Datenbank verdeutlicht, dass die Erforschung der Auswirkungen von Solarparks auf wasserbezogene ÖSD ein vergleichsweise neues Forschungsfeld darstellt. Gleichzeitig bietet sie die Möglichkeit, die komplexen Wechselwirkungen zwischen dem Bau von Solaranlagen und deren Einfluss auf unterschiedliche Umweltfaktoren systematisch darzustellen.

Wie bereits anfangs betont, sind die betroffenen Umweltfaktoren stark miteinander verknüpft. Dies wird in Abbildung 16 veranschaulicht, die eine visuelle Synthese der beobachteten Zusammenhänge bietet. Die Grafik skizziert die vielschichtigen Effekte von Solarparks auf wasserbezogene ökologische Prozesse. Sie dient als vorläufiger Rahmen, um potenzielle Kausalbeziehungen zwischen verschiedenen durch Solarpaneele beeinflussten Komponenten sichtbar zu machen. So zeigt die Abbildung beispielhaft, wie Photovoltaikanlagen lokale Windmuster, Schattenwurf, Oberflächenalbedo und andere Parameter verändern, was wiederum boden- und atmosphärische Prozesse wie Verdichtung, Erosion und Temperaturschwankungen beeinflusst. Diese Veränderungen wirken sich kaskadenartig auf das Ökosystem aus – etwa auf die mikrobielle Aktivität im Boden, die Evapotranspiration sowie die Vegetationsstruktur – und führen letztlich zu Veränderungen in übergeordneten Umweltindikatoren wie organischer Substanz, Treibhausgasemissionen oder Primärproduktion.

Es ist zu betonen, dass das dargestellte Diagramm einen ersten konzeptionellen Schritt in Richtung eines umfassenden Bewertungsrahmens darstellt. Es bildet nicht die gesamte ökologische Komplexität ab, insbesondere nicht räumlich und zeitlich differenzierte Prozesse. Dennoch bietet es ein grundlegendes Verständnis der durch Solarparks beeinflussten wasserbezogenen Dynamiken – ein entscheidender Beitrag zur Entwicklung nachhaltiger Energielösungen.

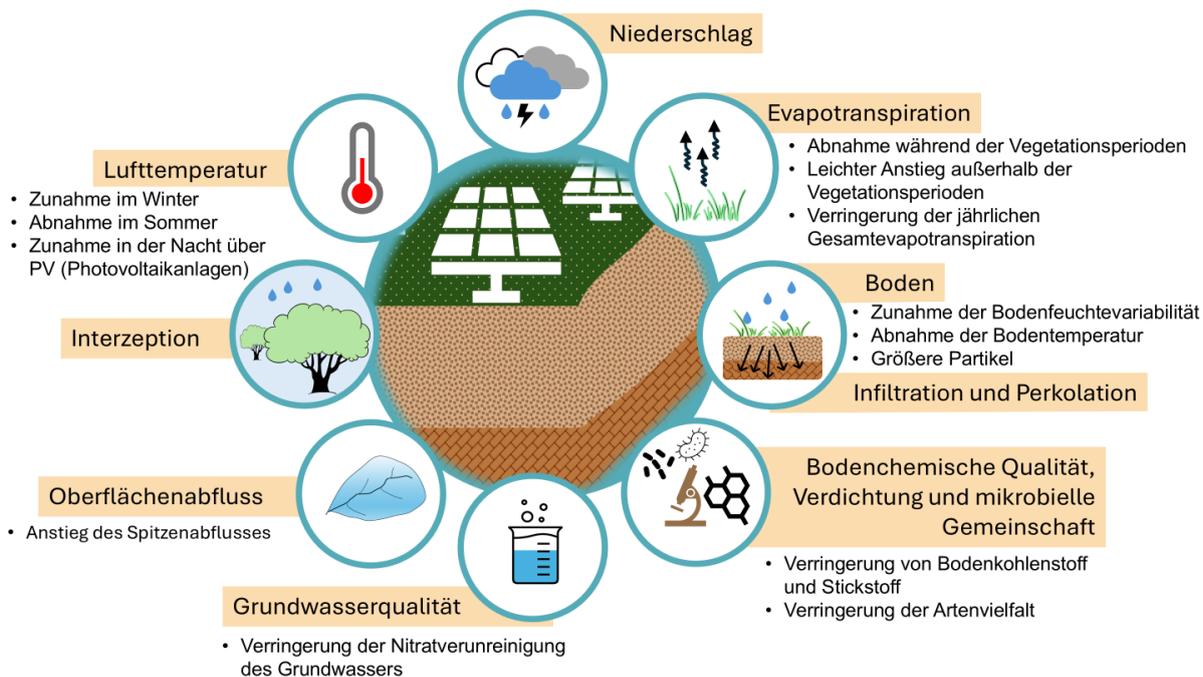


Abbildung 16: Auswirkungen von Solarmodule auf wasserbezogene Prozesse und deren Zusammenhänge

4.4 Auswahl von Ökosystemdienstleistungen

Tabelle 3 bietet eine detaillierte Übersicht darüber, inwieweit verschiedene ÖSD mit den beiden zentralen Auswahlkriterien übereinstimmen: (i) der direkte Zusammenhang mit hydrologischen Prozessen und (ii) die Relevanz im Kontext der Auswirkungen von Solarparks. Diese systematische Analyse stellt einen wesentlichen Bestandteil der vorliegenden Arbeit dar, da sie die Schnittstelle zwischen ökologischem Nutzen und den Umweltauswirkungen erneuerbarer Infrastrukturen sichtbar macht. Die ausgewählten ÖSD – darunter beispielsweise die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion oder die Kontrolle von Erosionsprozessen – werden hinsichtlich ihres Bezugs zum Wasserkreislauf bewertet. Dabei finden hydrologische Schlüsselprozesse wie Niederschlag, Infiltration, Perkolation, Transpiration und Abfluss Berücksichtigung. Niederschlag stellt die primäre Wasserquelle dar, beeinflusst die Bodenfeuchte und ist entscheidend für das Pflanzenwachstum. Infiltration ermöglicht das Eindringen von Wasser in den Boden, fördert die Grundwasserneubildung und erhält die Bodenstruktur. Perkolation transportiert Wasser in tiefere Bodenschichten und sichert die langfristige Speicherfunktion von Grundwasserleitern. Transpiration stabilisiert die lokale Luftfeuchtigkeit und unterstützt die Vegetation, ein zentraler Faktor für Biomasseproduktion. Abfluss beeinflusst Erosionsschutz, Sedimenttransport und Wasserqualität, was zur Bodenstabilität beiträgt.

Parallel dazu bewertet die Analyse, wie stark diese Ökosystemdienstleistungen durch die Entwicklung von Solarparks beeinflusst werden können – etwa durch veränderte Landnutzung, Albedo-Effekte oder Beeinträchtigungen von Lebensräumen. Diese umfassende Gegenüberstellung ist entscheidend für das Verständnis der komplexen Wechselwirkungen zwischen der Bereitstellung von ÖSD und der Transformation von Landschaften durch erneuerbare Energien. Die Ergebnisse liefern eine zentrale Grundlage für den in Abschnitt 4.5 vorgestellten Bewertungsrahmen und eröffnen neue Perspektiven für eine nachhaltige Planung und Bewertung von Solarprojekten.

Tabelle 3: Übersicht über ausgewählte Ökosystemdienstleistungen und deren Auswirkungen

#	ÖSD	Kriterium 1 (Direkte hydrologische Auswirkungen auf die ÖSD auf der Grundlage von CICES)	Kriterium 2 (Auswirkungen von Solarparks, durch Literaturanalyse identifiziert)
1	Kultivierte Landpflanzen (einschließlich Pilze und Algen), die zu Ernährungszwecken angebaut werden	<ul style="list-style-type: none"> - Niederschlag - Infiltration - Perkolation - Transpiration - Abfluss 	<ul style="list-style-type: none"> - Heterogenität der Bodenfeuchtigkeit - Verdichtung des Bodens - Chemische Qualität des Bodens - Tägliche Temperaturschwankungen
2	Fasern und andere Materialien aus gezüchteten Pflanzen, Pilzen, Algen und Bakterien zur direkten Verwendung oder Verarbeitung (ausgenommen genetisches Material)		
3	Kulturpflanzen (einschließlich Pilze, Algen), die zur Energiegewinnung angebaut werden		
4	Wildpflanzen (Land- und Wasserpflanzen, einschließlich Pilze und Algen), die zur Ernährung genutzt werden		
5	Fasern und andere Materialien von Wildpflanzen zur direkten Verwendung oder Verarbeitung (ausgenommen genetisches Material)		
6	Wildpflanzen (Land- und Wasserpflanzen, einschließlich Pilze und Algen), die als Energiequelle genutzt werden		
7	Kontrolle der Erosionsraten	<ul style="list-style-type: none"> - Niederschlag - Infiltration - Abfluss 	<ul style="list-style-type: none"> - Erosion des Bodens - Bodenverdichtung - Zusammensetzung der Vegetationsgemeinschaft
8	Pufferung und Abschwächung von Massenbewegungen	<ul style="list-style-type: none"> - Infiltration - Niederschlag 	<ul style="list-style-type: none"> - Erosion des Bodens - Niederschlag
9	Wasserkreislauf und Wasserflussregulierung (einschließlich Hochwasserschutz und Küstenschutz)	<ul style="list-style-type: none"> - Verdunstung - Kondenswasser - Niederschlag - Rückhalt - Infiltration - Perkolation - Transpiration - Abfluss - Speicherung 	<ul style="list-style-type: none"> - Niederschlag (lokale Verteilung) - oberirdische Biomasse
10	Zersetzungs- und Fixierungsprozesse und ihre Auswirkungen auf die Bodenqualität	<ul style="list-style-type: none"> - Niederschlag - Infiltration 	<ul style="list-style-type: none"> - Zersetzungsrate - Niederschlag - Mikrobielle Gemeinschaft im Boden
11	Regulierung des chemischen Zustands von Süßgewässern durch lebende Prozesse	<ul style="list-style-type: none"> - Abfluss - Speicherung 	<ul style="list-style-type: none"> - Nitratverunreinigung des Grundwassers
12	Grundwasser (und unterirdisches Wasser) als Trinkwasser	<ul style="list-style-type: none"> - Abfluss - Speicherung 	<ul style="list-style-type: none"> - Qualität des Grundwassers
13	Grundwasser (und unterirdisches Wasser), das als Material verwendet wird (nicht zu Trinkzwecken)		

4.5 Bewertungsrahmen

In diesem Abschnitt werden die Bewertungsmethoden erläutert, die auf die ausgewählten ÖSD angewendet wurden. Jede ÖSD wird dabei entsprechend der zugrunde liegenden Methode einer von zwei Kategorien zugeordnet: ökonomische oder biophysikalische Indikatoren. Die bereitstellenden (biotischen) Leistungen, nummeriert von ÖSD 1 bis 6, wurden mit ökonomischen Bewertungsansätzen analysiert, wobei der Fokus auf den finanziellen Nutzen und den wirtschaftlichen Auswirkungen dieser Leistungen liegt. Die ÖSD 7 bis 13 hingegen wurden mithilfe biophysikalischer Indikatoren bewertet. Für jede betrachtete ÖSD wurde ein Punktesystem entwickelt, um ihre jeweilige Leistung systematisch zu erfassen. Zur Quantifizierung des Gesamtbeitrags aller ÖSD war es erforderlich, den einzelnen Leistungen Gewichtungsfaktoren (β_i) zuzuweisen. Diese Gewichtungen werden üblicherweise durch Befragungen relevanter Stakeholder ermittelt [36].

4.5.1 Wirtschaftliche Methode

Gemäß der CICES-Klassifikation werden die ÖSD 1–6 den bereitstellenden Ökosystemdienstleistungen zugeordnet. Für deren Bewertung schlagen Carson und Bergstrom [37] die Anwendung der Marktpreismethode vor. Dabei wird der Wert einer Ökosystemdienstleistung anhand der Preise bestimmt, die vergleichbare Güter oder Dienstleistungen auf kommerziellen Märkten erzielen. Die Punktwerte für die ÖSD 1–6 werden auf Basis der Normalisierungsformel sowie der Bewertungsformel in folgender Gleichung berechnet:

$$x_{1-6} = 100 \times \frac{\text{wirtschaftlicher Wert von ÖSD}}{\text{max. wirtschaftlicher Wert der Alternativen}}$$

4.5.2 Biophysikalische Indikatoren

Kontrolle der Erosionsraten (ÖSD₇)

Im vorliegenden Bewertungsrahmen wird die ÖSD „Kontrolle der Erosionsraten“ mithilfe der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung [38] quantifiziert. Diese Methode ermöglicht die Berechnung des Bodenverlusts anhand der folgenden Gleichung:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P$$

In dieser Gleichung steht A für den geschätzten Bodenverlust, R für den Niederschlags-Erosivitätsfaktor, K für die Bodenerodierbarkeit, L für die Hanglängenkomponente, S für die Hangneigung, C für den Bewuchs- und Bewirtschaftungsfaktor und P für den Faktor unterstützender Erosionsschutzmaßnahmen, wie in [39] beschrieben. Kayet et al. [40] unterteilen die Bodenerosion in fünf Klassen: gering (0–5 t/ha/Jahr), mäßig (5–10 t/ha/Jahr), stark (10–20 t/ha/Jahr), sehr stark (20–40 t/ha/Jahr) und extrem (über 40 t/ha/Jahr). Diese Klassifikation wird im Bewertungsrahmen übernommen, um das Punktesystem für die ÖSD „Kontrolle der Erosionsraten“ zu definieren, wie in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Punktesystem für die ÖSD „Kontrolle der Erosionsraten“

Bodenverlust (berechnet mit ABAG) (t/ ha ⁻¹ Jahr ⁻¹)	Punktzahl (x ₇)
0-5	100
5-10	75
10-20	50
20-40	25
>40	0

Pufferung und Abschwächung von Massenbewegungen (ÖSD₈)

Bei der Bewertung der Anfälligkeit für Erdbeben werden typischerweise Faktoren wie lithologische Verwitterung, Hangneigung, Exposition, Bodenbedeckung, Nähe zu Fließgewässern und Abflussdichte berücksichtigt [41]. Im Kontext von Solarfarmen stellt die Bodenbedeckung jedoch den zentralen Einflussfaktor dar und ist daher entscheidend für die Bewertung dieser Ökosystemdienstleistung. Riis et al. [42] untersuchten die Beiträge der Ufervegetation zu verschiedenen ÖSD und bewerteten dabei die Schutzfunktion gegen Massenbewegungen. Während krautige Pflanzen oder Gräser nur eine geringe Schutzwirkung entfalten, wird der Nutzen von Wäldern als hoch eingestuft. Garcia-Chevesich et al. [43] wiesen zudem darauf hin, dass die landwirtschaftliche Bewässerung durch die Sättigung des Untergrunds wesentlich zur Auslösung von Erdbeben beitragen kann.

Die Auswirkungen von Solarparks auf das Erdbebenrisiko sind bislang nur unzureichend erforscht. Daher ist bei der Gewichtung dieser ÖSD im Bewertungsrahmen besondere Vorsicht geboten. Es ist zwar belegt, dass die Abholzung von Waldflächen für den Bau von Solaranlagen das Risiko von Hanginstabilitäten erhöhen kann [44] [45], doch fehlen bislang belastbare Vergleiche zu landwirtschaftlich genutzten Flächen. Der vorliegende Rahmen geht daher auf Grundlage einer Kompromissanalyse davon aus, dass landwirtschaftliche Flächen und Solarparks ein vergleichbares Risiko bergen. Diese Annahme stützt sich auf drei Aspekte: Erstens wird auf den Flächen von Solarparks in der Regel keine Bewässerung eingesetzt, wodurch das Risiko von hangwasserinduzierten Rutschungen im Vergleich zur Landwirtschaft verringert wird. Zweitens führt der Bau von Solaranlagen häufig zur Entfernung der Vegetation unter den Modulen, was die Hangstabilität schwächt – wohingegen in der Landwirtschaft der Bewuchs meist erhalten bleibt. Drittens schreiben viele lokale Bauvorschriften für Solarfarmen eine vorherige Bewertung des Erdbebenrisikos vor, was zur Risikominderung beitragen kann. Da Wälder bekanntermaßen die Stabilität von Hängen deutlich verbessern, während landwirtschaftliche Nutzflächen potenziell instabilisierend wirken, berücksichtigt das Punktesystem im Rahmen dieser ÖSD-Bewertung 100 Punkte für Waldflächen, jedoch 0 Punkte für sowohl Landwirtschaft als auch Solarparks.

Wasserkreislauf und Abflussregulierung (ÖSD₉)

Zur Bewertung dieser Ökosystemdienstleistung wird die SCS-Kurvennummer-Methode (Curve Number Method) herangezogen. Diese Methode wurde vom Soil Conservation Service – heute Teil des USDA Natural Resources Conservation Service – entwickelt und ist ein etabliertes Verfahren zur Abschätzung von Niederschlagsabfluss in Einzugsgebieten, insbesondere wenn keine direkten Abflussmessungen vorliegen [23] [46]. Grundlage der Methode ist ein Index, der die Abflussreaktion eines Gebiets in Abhängigkeit von seinen physikalischen Eigenschaften beschreibt.

Natürliche Landschaftselemente wie Wälder, Feuchtgebiete und Überschwemmungsflächen spielen hierbei eine zentrale Rolle, da sie durch ihre Fähigkeit zur Rückhaltung von Wasser und Förderung der Infiltration den Oberflächenabfluss maßgeblich beeinflussen. Zu den wichtigsten Faktoren, welche den CN-Wert bestimmen, zählen die Landnutzung, Bodenbedeckung, hydrologische Bodengruppe, Bodenfeuchte sowie die Hangneigung.

Die Publikation Urban Hydrology for Small Watersheds (TR-55) [47] liefert eine umfassende Übersicht zur Ableitung von CN-Werten unter Berücksichtigung von Parametern wie hydrologische Bodengruppe (HSG), Art und Zustand der Bodenbedeckung, Flächenversiegelung, vorhergehende Bodenfeuchte und hydrologische Behandlung. Für die vorliegende Bewertung werden die folgenden Gleichungen

verwendet, um den potenziellen Abfluss Q auf Grundlage dieser Einflussgrößen zu quantifizieren.

$$S_{max} = \frac{CN}{25400} - 254$$

$$I_a = 0,2 \times S_{max}$$

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S_{max}}$$

$$x_9 = \left(1 - \frac{Q}{P}\right) \times 100$$

Zersetzungs- und Fixierungsprozesse und ihre Auswirkungen auf die Bodenqualität (ÖSD₁₀)

Meentemeyer [48] entwickelte ein Modell zur Berechnung des jährlichen Gewichtsverlusts organischer Substanz unter Berücksichtigung klimatischer sowie chemisch-physikalischer Einflussfaktoren. Das Modell verwendet die jährliche tatsächliche Evapotranspiration (AE), um klimatische Bedingungen abzubilden, und die Ligninkonzentration (L) als Indikator für die Zersetzungsresistenz des organischen Materials. Die Formel lautet wie folgt:

$$\text{Gewichtsverlust} = (-3.44618 + 0.10015 \times \text{AE}) - (0.01341 + 0.00147 \times \text{AE}) \times L$$

Dabei ist AE die jährliche tatsächliche Evapotranspiration in Millimetern und L die anfängliche Ligninkonzentration in Prozent.

In späteren Studien wurde Meentemeyers Modell erfolgreich angewendet und validiert. Die Abweichung zwischen vorhergesagtem und gemessenem Gewichtsverlust lag in der Regel zwischen 8 % und 38 %, mit Ausnahme eines Ausreißers (92,6 %) infolge von Termitenaktivität.

Basierend auf diesen Erkenntnissen definiert das Bewertungssystem für diese ÖSD eine maximale Punktzahl von 100 bei einem jährlichen Gewichtsverlust von 40 % und eine minimale Punktzahl von 0 bei keinem Gewichtsverlust. Unter Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen der ÖSD-Leistung und dem Zersetzungsgrad wird die Punktvergabe wie folgt berechnet:

$$x_{10} = \frac{\text{Gewichtsverlust (\%)}}{40} \times 100$$

Regulierung des chemischen Zustands von Süßgewässern durch lebende Prozesse (ÖSD₁₁)

Diese Ökosystemdienstleistung bezieht sich auf die Fähigkeit der Vegetation, Stickstoff und andere Chemikalien aufzunehmen, um deren Eintrag in Süßwassersysteme zu verhindern. Der Bewertungsrahmen für diese ÖSD ist insofern besonders, als er nicht die tatsächlich emittierten Schadstoffmengen unterschiedlicher Landnutzungen berücksichtigt. Stattdessen basiert die Bewertung ausschließlich auf der angenommenen Fähigkeit der jeweiligen Landbedeckung, das chemische Gleichgewicht durch Nährstoffbindung zu regulieren – unter der Annahme, dass das Verschmutzungspotenzial über alle Landnutzungsformen hinweg gleich ist.

Tabelle 5 stellt das Punktesystem dar, das die Effizienz verschiedener Landnutzungen bei der Aufnahme von Stickstoff und anderen Chemikalien bewertet. Wälder erreichen aufgrund ihrer hohen Biomasse und damit verbundenen Filterkapazität die höchste Punktzahl, gefolgt von landwirtschaftlich genutzten Flächen. Demgegenüber kann die Vegetationsdecke in Solarparks stark reduziert sein und mitunter dem Zustand von nacktem Boden entsprechen [7].

Die ÖSD kann zudem durch gezielte Maßnahmen verbessert werden, wie in der Tabelle beschrieben. So fördern beispielsweise umweltverträgliche landwirtschaftliche Praktiken die Anlage von Pufferstreifen, die überschüssige Nährstoffe aus dem Oberflächenabfluss filtern, bevor sie in Gewässer gelangen.

Tabelle 5: Punktesystem für die ÖSD „Regulierung des chemischen Zustands von Süßgewässern durch lebende Prozesse“

Landnutzung	Ohne Maßnahmen	Mit Maßnahmen	Art der Maßnahme und Bedingungen für die Verbesserung der ÖSD ₁₁
Wald	80	100	<ul style="list-style-type: none"> - Lange Wachstumsperiode [49] - Niedrige Höhenlage [49] - Baumarten: Verschiedene Baumarten reagieren unterschiedlich auf hohe Stickstoffmengen [49]
Landwirtschaft	40	60	<ul style="list-style-type: none"> - Pufferstreifen [50] - Gesunde mikrobielle Gemeinschaft im Boden [51] - Angemessene physikalische und chemische Bodeneigenschaften [52] - Pflanzenarten: Blattgemüse nimmt schnell große Mengen an Nitraten auf [53] - Angemessene Fruchtfolge
Solarpark	0	20	<ul style="list-style-type: none"> - Vegetationsdecke - Pufferstreifen

Als Material verwendetes Grundwasser (Nicht-Trinkwasser) und Grundwasser zum Trinken (ÖSD₁₂₋₁₃)

Die Vorhersage der Grundwasserneubildung und -qualität stellt eine komplexe Herausforderung dar, wie in [54] hervorgehoben. Aus diesem Grund wurde die Landnutzung als Grundlage für die Bewertung der Ökosystemdienstleistungen 12 und 13 herangezogen.

Für ÖSD 13, das die stoffliche Nutzung von Grundwasser für Nicht-Trinkwasserzwecke bewertet, wird die verfügbare Grundwassermenge als geeigneter Indikator betrachtet. Solche Nutzungen erfordern in der Regel große Wassermengen, wobei die Wasserqualität eine untergeordnete Rolle spielt. Im Gegensatz dazu steht ÖSD 12, das sich auf die Trinkwassernutzung bezieht. Hier ist die Wasserqualität entscheidend, da die Einhaltung von Trinkwasserstandards mit erheblichen technischen und finanziellen Aufwänden verbunden ist.

Tabelle 6 zeigt die den verschiedenen Landnutzungs- und Bodenbedeckungskategorien (LULC) zugewiesenen Punktzahlen für beide ÖSD. Zudem werden die Auswirkungen von Maßnahmen zur Verbesserung der Nachhaltigkeit und Leistungsfähigkeit jeder Landnutzungsform dargestellt und mit Szenarien ohne Maßnahmen verglichen.

Tabelle 6: Punktesystem für die ÖSD „Als Material verwendetes Grundwasser und Grundwasser zum Trinken“

Landnutzung	Mit Maßnahmen	Ohne Maßnahmen	Maßnahmen
Solarpark	100	80	<ul style="list-style-type: none"> - Pufferstreifen - Deckfrüchte
Wald	60	40	<ul style="list-style-type: none"> - nachhaltiges Ernten - Uferpufferzonen - Management invasiver Arten
Landwirtschaft	20	0	<ul style="list-style-type: none"> - konservierende Bodenbearbeitung - Fruchtfolge - Düngemittel- und Pestizidmanagement - Bewässerungsmanagement - Deckfrüchte

4.6 Das Entscheidungsunterstützungssystem

Nachfolgend werden der Aufbau und die Funktionen des entwickelten Entscheidungsunterstützungssystems (DSS) beschrieben, in das der Bewertungsrahmen integriert wurde. Das DSS wurde mit beispielhaften Daten für den Standort Darstadt befüllt. Es ist dabei wichtig zu betonen, dass sämtliche Eingaben projektspezifisch sind und durch fachkundige Expertinnen und Experten vorgenommen werden sollten. Das DSS dient als Hilfsmittel und sollte nicht als alleinige Entscheidungsgrundlage verwendet werden.

Beim Start der Anwendung öffnet sich das Hauptfenster (Abbildung 17). Unterhalb des Titels und Untertitels werden zwei Eingabefelder angezeigt, in denen der Projektname sowie die Flächengröße eingetragen werden können. Diese Angaben sind insbesondere für organisatorische Zwecke und den späteren Datenexport relevant. Im zentralen Bereich des Fensters werden die Ergebnisse der ÖSD-Bewertungen für die PV-FFA sowie für die alternative Bewirtschaftungsstrategien innerhalb eines Rahmens angezeigt. Unterhalb sind sechs vertikal angeordnete Schaltflächen integriert: (i) eine Schaltfläche "Start Evaluation der Ökosystemdienstleistungen", die das Bewertungsfenster des Aquasol-Tools öffnet, (ii) eine Schaltfläche "Zurück zur Evaluation", die es dem Benutzer ermöglicht, die Eingaben anzupassen, (iii) eine Schaltfläche "Ergebnis als CSV-Datei speichern" zum Exportieren der Ergebnisse, (iv) die Schaltflächen „Projekt speichern“ und „Projekt laden“, um das gesamte Projekt und die Eingaben in eine .ini-Datei zu speichern bzw. aus dieser Datei zu laden und (v) eine Schaltfläche "Anwendung schließen" zum Beenden der Anwendung.

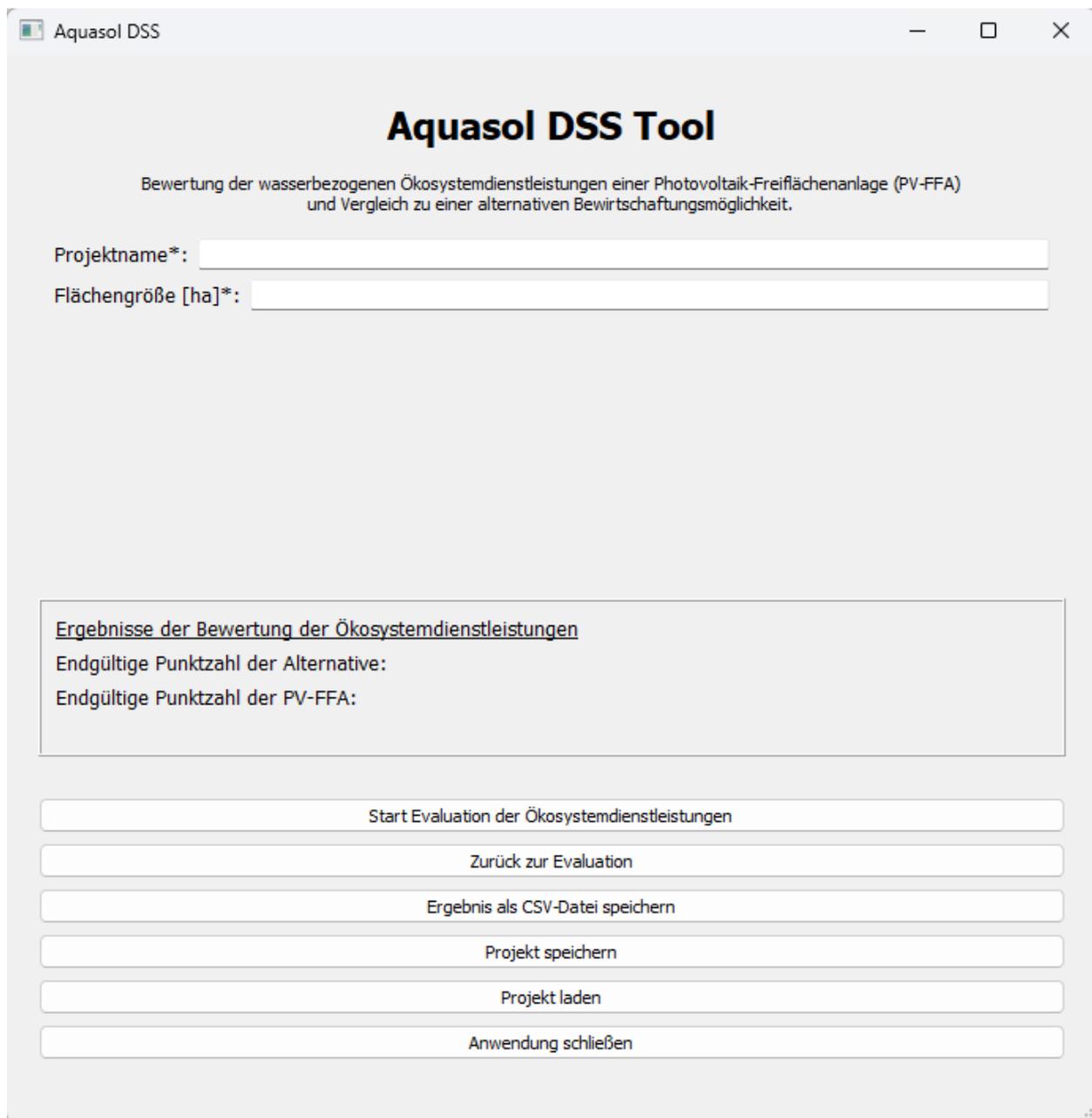


Abbildung 17: Das Hauptfenster beim Start des DSS

Das Bewertungsfenster des DSS umfasst 13 Registerkarten. Die erste Registerkarte, dargestellt in Abbildung 18, dient der Gewichtung der einzelnen Ökosystemdienstleistungen entsprechend ihrer Relevanz und Notwendigkeit. Im Zentrum dieser Registerkarte befindet sich ein Eingaberahmen mit zwölf Drehfeldern, in dem die Nutzer jeder ÖSD ein Gewicht zwischen 0 und 1 zuweisen können. Die Summe aller Gewichte muss dabei exakt 1 betragen. Basierend auf den im Kapitel „Bewertungsrahmen“ beschriebenen Methoden und Indikatoren können die entsprechenden Daten zu den verschiedenen ÖSD in das DSS-Tool eingebunden werden. Abbildung 19 zeigt beispielhaft die Dateneingabe für ÖSD 9 (Wasserkreislauf und Abflussregulierung).

Die Funktionalität des DSS-Tools wurde anhand des Solarparks Darstadt in einer Fallstudie getestet. Dabei wurden die endgültigen ÖSD-Werte für die PV-FFA ermittelt und mit einer alternativen landwirtschaftlichen Nutzungsstrategie verglichen. Die Ergebnisse dieses Vergleichs sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Mehrere ÖSD (ÖSD 2–6) weisen wirtschaftliche Werte basierend auf Biomasse auf, die auf der betrachteten landwirtschaftlichen Fläche nicht generiert werden. Daher wurde deren Gewichtung auf 0 gesetzt. Da es sich um eine Ackerfläche handelt, beträgt der Wert für ÖSD 8 in beiden Szenarien 0.

Aquasol DSS

Gewichtung ÖSD 1 ÖSD 2 ÖSD 3 ÖSD 4 ÖSD 5 ÖSD 6 ÖSD 7 ÖSD 8 ÖSD 9 ÖSD 10 ÖSD 11 ... 12 13

Gewichtung der Ökosystemdienstleistungen

- Bitte geben Sie für jede Ökosystemleistung einen Gewichtungsfaktor an.

Gewichtung ÖSD 01: 0,143
 Gewichtung ÖSD 02: 0,000
 Gewichtung ÖSD 03: 0,000
 Gewichtung ÖSD 04: 0,000
 Gewichtung ÖSD 05: 0,000
 Gewichtung ÖSD 06: 0,000
 Gewichtung ÖSD 07: 0,143
 Gewichtung ÖSD 08: 0,143
 Gewichtung ÖSD 09: 0,143
 Gewichtung ÖSD 10: 0,143
 Gewichtung ÖSD 11: 0,143
 Gewichtung ÖSD 12 & 13: 0,142

Summe aller Gewichtungen = 1

alles löschen
weiter
 Gewichtung fertig

Evaluation

	ÖSD 1	ÖSD 2	ÖSD 3	ÖSD 4	ÖSD 5	ÖSD 6	ÖSD 7	ÖSD 8	ÖSD 9	ÖSD 10	ÖSD 11	ÖSD 12&13
x_pv-ffa												
x_alternative												
Gewichtung												

Zurück zum Hauptmenü

Abbildung 18: Registerkarte zur Gewichtung der einzelnen Ökosystemdienstleistungen

Aquasol DSS

Gewichtung ÖSD 1 ÖSD 2 ÖSD 3 ÖSD 4 ÖSD 5 ÖSD 6 ÖSD 7 ÖSD 8 ÖSD 9 ÖSD 10 ÖSD 11 ... 12 13

Ökosystemdienstleistung 9

Wasserkreislauf und Abflussregulierung
(einschließlich Hochwasserschutz und Küstenschutz). weitere Informationen

Niederschlags-Abfluss Modellierung (SCS-Methode)

Niederschlagshöhe N [mm]: 25,00

Hydrologische Bodengruppe: C Alternative: C

Bodenbedeckung: CN für sonstige landwirtschaftliche Flächen CN für bewirtschaftete landwirtschaftliche Flächen

Weideland, Grasland oder Weideflächen - Niedrig Reihenkulturen, gerade Reihe (SR) - Niedrig

CN_pv-ffa = 86 CN_alternative = 88

Abfluss [mm] = 4.8 Abfluss [mm] = 6.2

Punktzahl für Ökosystemdienstleistung 9: x9_pv-ffa = 80.8 x9_alternative = 75.2

*Auswahl der Kurvennummer (CN): abhängig von der hydrologischen Bodengruppe
 * Auswahl der Bodengruppe: Bewuchsart - Bewirtschaftung (CR = Ernterückstände, SR = gerade Reihe, T = terrassiert und C = konturiert) - hydrologischer Zustand

Ökosystemdienstleistung 9 fertig

zurück weiter

Evaluation

	ÖSD 1	ÖSD 2	ÖSD 3	ÖSD 4	ÖSD 5	ÖSD 6	ÖSD 7	ÖSD 8	ÖSD 9	ÖSD 10	ÖSD 11	ÖSD 12&13
x_pv-ffa												
x_alternative												
Gewichtung												

Zurück zum Hauptmenü

Abbildung 19: Registerkarte für die Ökosystemdienstleistung 9 „Wasserkreislauf und Abflussregulierung“

Tabelle 7: Punktzahlen der einzelnen ÖSD für die PV-FFA und Status-quo für die Fallstudie Darstadt

ÖSD Nr.	Erklärung	Punktzahl PV-FFA	Punktzahl Status-quo	Gewichte
1	Kulturpflanzen für die Ernährung	100	5.633	0.143
2	Anbaupflanzen für die Verarbeitung	-	-	0.0
3	Kulturpflanzen als Energiequelle	-	-	0.0
4-6	Wildpflanzen	-	-	0.0
7	Kontrolle der Erosionsraten	100	50	0.143
8	Abschwächung von Massenbewegungen	0	0	0.143
9	Hydrologischer Kreislauf	80,8	75,2	0.143
10	Zersetzung & Fixierung	99,998	84,565	0.143
11	Qualität des Süßwassers	20	40	0.143
12 & 13	Grundwasser zum Trinken und zur Verarbeitung	100	20	0.142
Ergebnisse		71,51	39,36	1

Die Analyse zeigt, dass die PV-FFA in fast allen Kategorien bessere Ergebnisse erzielt als die alternative Nutzung – mit Ausnahme von ÖSD 11, bei der die alternative Nutzung im Vorteil ist. Die PV-FFA reduziert jedoch deutlich die Bodenerosion und Nitratauswaschung, was auf die durchgehende Bodenbedeckung zurückzuführen ist. Diese Ergebnisse werden durch Studien [8] [55] bestätigt, die auf eine geringere Bodenverschiebung und eine verbesserte Grundwasserqualität in PV-FFA-Gebieten hinweisen.

Gleichwohl ist festzuhalten, dass zusätzliche empirische Daten aus verschiedenen Klima- und Bodenregionen erforderlich wären, um die getroffenen Aussagen zu untermauern. Insgesamt jedoch erweist sich die PV-FFA gegenüber der alternativen landwirtschaftlichen Nutzung als vorteilhaftere Bewirtschaftungsform. Ausschlaggebend dafür sind insbesondere die positiven Beiträge zu mehreren ÖSD (ÖSD 1, 7, 9, 10, 12 und 13). Ein Beispiel ist ÖSD 7, das auf den Ergebnissen der ABAG basiert: Hier zeigt sich, dass PV-Freiflächenanlagen Bodenerosion und -verluste wirksamer verringern als die alternative Nutzung – ein Aspekt, der für die Erhaltung der Bodengesundheit besonders relevant ist. Die Auswirkungen von PV-Anlagen auf Bodentemperatur, Feuchtigkeit und Erosion können jedoch stark standortabhängig variieren. In trockenen Regionen kann der Schatten der Solarmodule beispielsweise die Bodentemperatur und die Verdunstung reduzieren, wodurch mehr Bodenfeuchtigkeit erhalten bleibt [56] [57]. In gemäßigten Zonen hingegen kann eine veränderte Niederschlagsverteilung zu verstärktem Oberflächenabfluss und einem erhöhten Erosionsrisiko führen [58]. Ein differenziertes Verständnis solcher regionalen Unterschiede ist entscheidend, um die Bewertungsparameter des DSS-Tools entsprechend anzupassen.

Für ÖSD 9, das den Wasserkreislauf und die Abflussregulierung abbildet, fallen sowohl PV-FFA als auch die alternative Nutzung in die hydrologische Bodengruppe C [59]. Die PV-FFA nutzt eine durchgängige Grasfläche, während in der Vergleichsstrategie Reihenkulturen angebaut werden. Dies führt zu einem höheren Punktwert von 80,8 für die PV-FFA im Vergleich zu 75,2 bei der konventionellen Nutzung. Auch bei ÖSD 10, das die Förderung von Zersetzungsprozessen bewertet, schneidet die PV-FFA besser ab. Dieser Vorteil lässt sich vermutlich auf eine niedrigere Ligninkonzentration im Boden unter den Solarmodulen zurückführen, die mit dem dort vorherrschenden Grasland im Gegensatz zu Weizenfeldern zusammenhängt.

Dabei ist zu beachten, dass die Ergebnisse von der festgelegten Gewichtung der einzelnen ÖSD abhängen. Einige Eingabeparameter erfordern möglicherweise weitere wissenschaftliche Untersuchungen. Eine fundierte Stakeholder-Analyse – mit Beteiligung lokaler Gemeinschaften, Umweltfachleuten und politischer Entscheidungsträger – ist essenziell, um die Relevanz einzelner ÖSD im jeweiligen Kontext korrekt zu erfassen. In Abwesenheit einer solchen Analyse wurden in dieser Bewertung ausgewogene Gewichtungen verwendet, um Verzerrungen zugunsten einzelner Ökosystemleistungen zu vermeiden und eine faire Vergleichsbasis zu schaffen. Dennoch ist eine weitere Einbindung von Interessengruppen erforderlich, um die Gewichtungen zu verfeinern und die lokale

Relevanz sicherzustellen. Das Aquasol DSS-Tool unterstützt diesen Prozess, indem es einen strukturierten Vergleich der Endwerte ermöglicht und somit seine Eignung für kontextbezogene Bewertungen bestätigt.

Auch für die Bewertung der ÖSD 1 bis 6 sind standortspezifische Informationen und die Perspektive der Stakeholder unerlässlich. Die Einnahmen von Solarparks oder alternativen Landnutzungen können sich über die Zeit verändern – etwa durch Marktpreisschwankungen oder Anbauänderungen. Zudem kann ÖSD 7 (Bodenerosion) in verschiedenen Phasen – etwa während der Bauphase oder als langfristiger Mittelwert – unterschiedlich gewichtet werden.

Das Ziel des DSS ist daher nicht, eine endgültige Aussage darüber zu treffen, ob ein Solarpark grundsätzlich vorteilhafter ist als andere Nutzungen. Vielmehr soll es eine fundierte Diskussion, Sensibilisierung und kritische Reflexion über die komplexen Wechselwirkungen zwischen PV-Anlagen und den betroffenen Ökosystemleistungen anstoßen. Die vorgeschlagenen Bewertungsschemata könnten weiter verfeinert werden, beispielsweise durch die Integration hydrologischer Modelle, detaillierte Marktanalysen zu Kulturpflanzen, Fruchtfolgen oder nichtlineare Bewertungsskalen. Dies würde jedoch schnell zu einer hohen Komplexität führen, die das Tool für nicht-fachliche Nutzer schwer zugänglich machen könnte.

4.7 Limitationen und zukünftige Verbesserungen

Das DSS stellt einen strukturierten Bewertungsrahmen dar, der derzeit mit vorläufigen Daten hinterlegt ist. Der zentrale Mehrwert dieses Artikels liegt in der Bereitstellung eines Werkzeugs zur systematischen Bewertung wasserbezogener Ökosystemleistungen von Photovoltaik-Freiflächenanlagen. Während das DSS-Tool seine Eignung für die Bewertung der Auswirkungen von Solarparks auf wasserbezogene ÖSD erfolgreich demonstriert, sind einige Einschränkungen zu berücksichtigen. Dazu zählen die Nutzung überwiegend zeitlich statischer Eingabeparameter, die begrenzte Einbindung dynamischer hydrologischer Modelle sowie der bisherige Ausschluss alternativer Standortkonzepte wie Agri-PV.

Zukünftige Weiterentwicklungen könnten sich daher auf die Integration von Echtzeitdaten, die dynamische Modellierung hydrologischer Prozesse und die Anwendung multikriterieller Optimierungsverfahren konzentrieren. Zusätzlich könnte eine Verknüpfung mit Lebenszyklusanalysen (LCA) ein umfassenderes Verständnis der ökologischen Auswirkungen von PV-Anlagen über deren gesamten Lebensweg ermöglichen. Die Einbindung von LCA-Ergebnissen in das DSS würde eine ganzheitlichere Entscheidungsgrundlage schaffen, indem Zielkonflikte zwischen Energieerzeugung und Umweltwirkungen systematisch quantifiziert werden.

Zur Verbesserung der Modellierung hydrologischer Prozesse könnten zukünftige Versionen des DSS auf etablierte dynamische Modelle wie SWAT [60] oder MIKE SHE [61] zurückgreifen. Diese ermöglichen eine detaillierte Simulation von Wasserflüssen und Wasserqualität unter variierenden Landnutzungsszenarien. Die Erweiterung des Spektrums berücksichtigter Ökosystemdienstleistungen sowie die Bereitstellung nutzerfreundlicher Anpassungsmöglichkeiten würden die Flexibilität und Anwendungsbreite des Tools weiter erhöhen.

4.8 Hydrodynamische Modellierung

4.8.1 Einfluss von Niederschlagsereignissen, Bodenfeuchte und Nutzungsszenarien auf das Abflussvolumen

Um den Einfluss der Niederschlagsintensität, der Bodenfeuchte und der simulierten Szenarien auf das Abflussverhalten zu verdeutlichen, werden in diesem Kapitel die berechneten Abflussvolumina übersichtlich dargestellt. Abbildung 20 zeigt zwei Heatmaps, die das Abflussvolumen (in m^3) für trockene und feuchte Anfangsbodenbedingungen abbilden. Die x-Achse unterteilt die Niederschlagsereignisse nach ihrer Jährlichkeit und ihrer Dauer, während die y-Achse die analysierten Nutzungsszenarien darstellt: vom ursprünglichen Zustand ohne Solarmodule (OS), über den Zustand direkt nach der Errichtung des Solarparks (MS) bis zu verschiedenen Szenarien einer ökologischen Bodenregeneration (MSÖ). Der erste Wert in der Szenario-Bezeichnung steht für die hydraulische Leitfähigkeit (K_{sat}) und der zweite für die Oberflächenrauigkeit (K_{st}).

Aus Abbildung 20 geht hervor, dass bei kleinen Niederschlagsereignissen (1- bis 5-jährlich) kein oder nur sehr geringer Abfluss entsteht und erst bei Ereignissen mit einer Jährlichkeit von mindestens 10 Jahren höherer Abfluss auftritt. Weiterhin zeigt sich, dass eine feuchte Anfangsbodenbedingung in allen Fällen zu höheren Abflussvolumina im Vergleich zu trockenen Bedingungen führt. Dies wird besonders bei mittleren Niederschlagsintensitäten (z.B. 10-jährlich) deutlich, da hier der Unterschied zwischen Speichervermögen und Sättigungseffekt des Bodens am größten ist. Bei extremen Niederschlagsereignissen (z.B. 100-jährlich) sind die Abflussvolumina generell hoch, da das Infiltrationspotenzial des Bodens schnell erschöpft ist. Innerhalb jeder Jährlichkeit zeigt sich, dass kürzere Niederschlagsdauern (15 Minuten) durch ihre höhere Intensität zu höheren Abflusswerten führen, da die Infiltrationskapazität schneller überschritten wird.

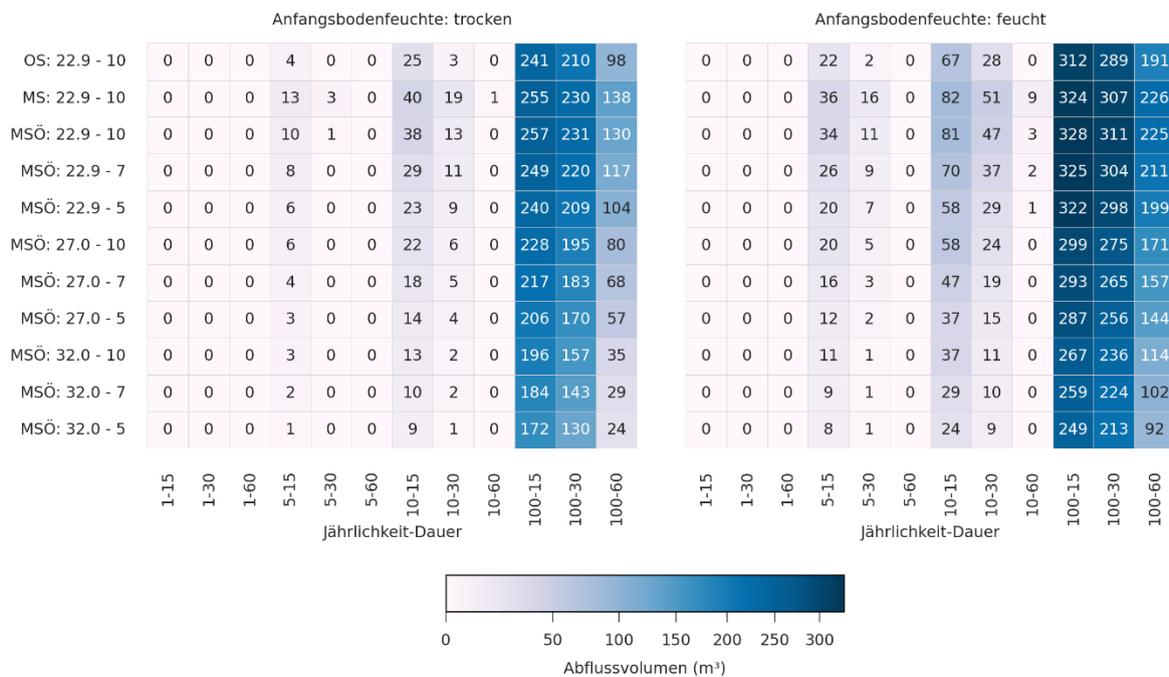


Abbildung 20: Simulierte Abflussvolumina in Abhängigkeit von Nutzungsszenarien, Bodenfeuchte und Niederschlagsintensität

Der Vergleich der Nutzungsszenarien zeigt, dass unmittelbar nach dem Bau des Solarparks das Abflussvolumen im Vergleich zum Ausgangszustand zunimmt. Dieser Effekt tritt sowohl bei trockenen als auch feuchten Anfangsbedingungen auf und ist auf die erhöhte Niederschlagsintensität an den Abtropfkanten der Solarmodule zurückzuführen, die zu verstärktem Oberflächenabfluss führt. Besonders ausgeprägt ist der relative Anstieg bei mittleren Niederschlagsintensitäten.

In den Szenarien, die mehrere Jahre nach dem Bau und unter Annahme ökologischer Maßnahmen modelliert wurden, zeigt sich dagegen ein klarer Rückgang der Abflussvolumina. Dieser Effekt verstärkt sich mit zunehmender Verbesserung der Bodenstruktur. Besonders im Szenario MSÖ 32.0 – 5, das eine stark verbesserte Infiltrationsfähigkeit des Bodens sowie eine geglättete Oberfläche ohne intensive landwirtschaftliche Nutzung abbildet, werden die geringsten Abflussvolumina erreicht. Solche günstigen Bedingungen treten jedoch nicht unmittelbar ein, sondern entstehen erst durch langfristige ökologische Maßnahmen wie Begrünung und aktive Bodenverbesserung.

Zur generellen Bewertung dieser Entwicklungen zeigt Abbildung 21 das mittlere Abflussvolumen über alle untersuchten Regenereignisse und Bodenfeuchten hinweg. Zunächst steigt das mittlere Abflussvolumen von etwa 63 m³ im Ausgangszustand auf über 70 m³ direkt nach Errichtung des Solarparks an. In den Folgejahren ist jedoch ein kontinuierlicher Rückgang des mittleren Abflussvolumens erkennbar, welches im fortgeschrittensten ökologischen Szenario unter 40 m³ sinkt. Diese Entwicklung unterstreicht die Effektivität ökologischer Maßnahmen und verdeutlicht die positiven Auswirkungen reduzierter landwirtschaftlicher Nutzung auf das Infiltrationsverhalten und die Minderung des Oberflächenabflusses.

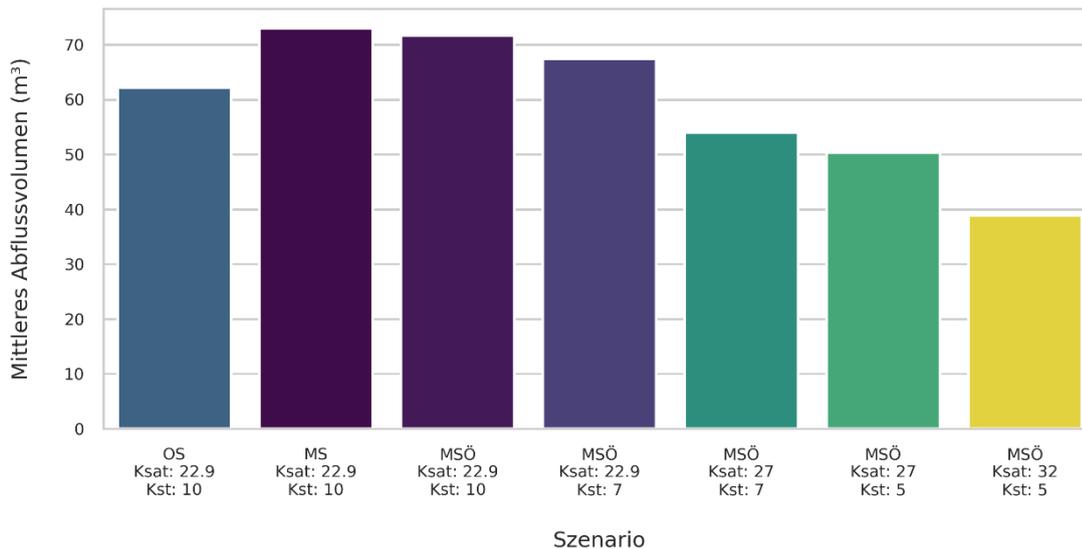


Abbildung 21: Entwicklung des mittleren Abflussvolumens bei fortschreitender ökologischer Bodenregeneration

4.8.2 Räumliche Verteilung der kumulierten Infiltration

Abbildung 22 zeigt die zeitliche Entwicklung der kumulierten Infiltrationsmenge (in mm) für drei ausgewählte Szenarien: den Zustand vor dem Bau des Solarparks, den Zustand unmittelbar nach der Errichtung des Solarparks sowie das ökologisch optimierte Szenario mit deutlich verbesserter Bodenstruktur. Die dargestellten Ergebnisse basieren auf einem 100-jährlichen Niederschlagsereignis mit einer Dauer von 15 Minuten unter feuchten Anfangsbedingungen, da dieses Ereignis das höchste Abflussvolumen verursacht. Die fünf Spalten der Abbildung zeigen Momentaufnahmen der kumulierten Infiltration nach 1, 15, 30, 60 und 180 Minuten der Simulation.

Beim Vergleich des Ausgangszustands mit dem Zustand unmittelbar nach Errichtung der Solaranlage wird deutlich, wie sich die hydrologischen Bedingungen durch die Solarmodule verändern. Im OS-Szenario verteilt sich der Niederschlag gleichmäßig, sodass die Infiltration zunächst flächig erfolgt. Mit zunehmender Zeit bildet sich eine zunehmend heterogene räumliche Verteilung heraus, da sich entlang topografischer Fließwege mehr Wasser sammelt und verstärkt infiltriert. Im MS-Szenario hingegen bleiben die Flächen unterhalb der Solarmodule zu Beginn trocken, da das Regenwasser von den Modulflächen abgefangen und konzentriert abgeführt wird. Erst im weiteren zeitlichen Verlauf dringt Wasser auch in diese Bereiche vor und infiltriert dort, allerdings ungleichmäßig. Wie im OS-Szenario konzentriert sich das Oberflächenwasser entlang der Fließpfade, sodass selbst nach 180 Minuten Flächen mit deutlich geringerer Infiltration unterhalb der Module verbleiben.

Im ökologisch optimierten Szenario zeigt sich anfangs ein ähnliches Muster wie im MS-Szenario. Die unter den Modulen liegenden Flächen erhalten zunächst keinen direkten Niederschlag. Jedoch entwickelt sich im zeitlichen Verlauf eine deutlich gleichmäßigere Verteilung des Oberflächenwassers. Die Infiltration erfolgt flächiger, Lücken schließen sich rascher, und insgesamt ist die kumulierte Infiltrationsmenge höher, insbesondere entlang der Fließpfade. Dies ist einerseits auf die geglättete Oberfläche zurückzuführen, die eine bessere Wasserverteilung begünstigt, andererseits auf die verbesserte Bodenstruktur, die eine erhöhte Wasseraufnahme ermöglicht.

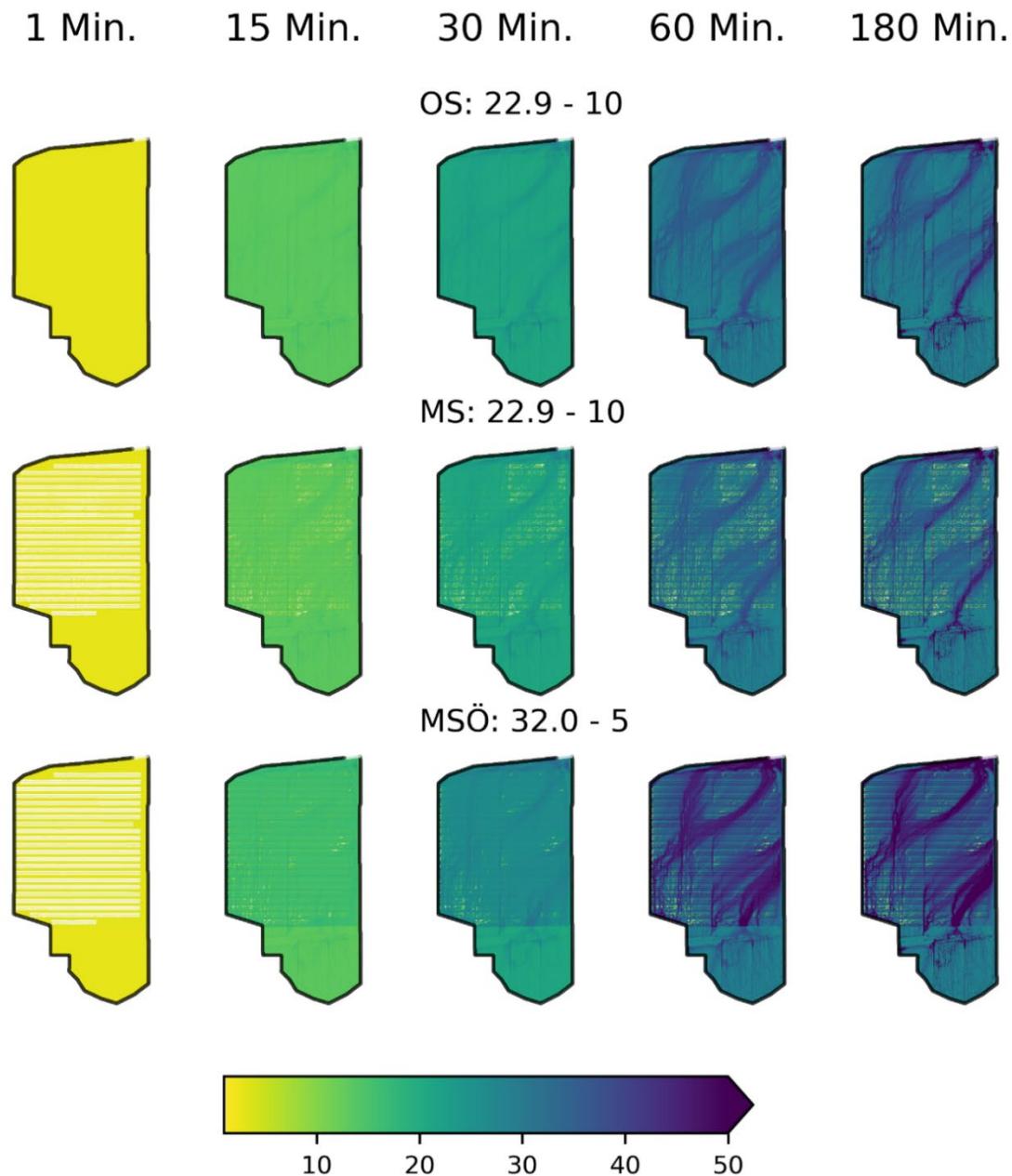


Abbildung 22: Zeitliche Entwicklung der kumulierten Infiltrationsmenge (in mm) für drei Nutzungsszenarien bei einem 100-jährlichen Niederschlagsereignis (15 min) unter feuchten Anfangsbedingungen

4.8.3 Modellierete Ganglinien und räumlich-zeitliche Abflussteilung am Auslass

Abbildung 23 zeigt die modellierten Abflussganglinien ausgewählter Szenarien für ein 100-jährliches Niederschlagsereignis unter feuchten Anfangsbedingungen. Betrachtet wurden zwei Ereignisdauern von 15 Minuten und 60 Minuten. Die Szenarien umfassen den natürlichen Ausgangszustand, den Zustand direkt nach Errichtung des Solarparks sowie mehrere Varianten mit ökologischen Maßnahmen.

Beim 15-minütigen Ereignis erfolgt ein rascher Anstieg des Abflusses, wobei die maximale Abflussspitze unmittelbar nach Ende des Niederschlags erreicht wird, gefolgt von einem schnellen Rückgang. Die höchste Abflussspitze tritt im Szenario MS auf, was auf die verminderte Infiltration und die konzentrierte Ableitung des Wassers durch die Solarmodule zurückzuführen ist. Im Vergleich dazu ist die Abflussspitze im Ausgangszustand (OS) geringer. Szenarien mit ökologischen Maßnahmen (MSÖ) zeigen insgesamt niedrigere Spitzenabflüsse. Besonders das Szenario MSÖ: 32.0 – 5 mit optimierten Bodenparametern erzielt die geringsten Abflusswerte.

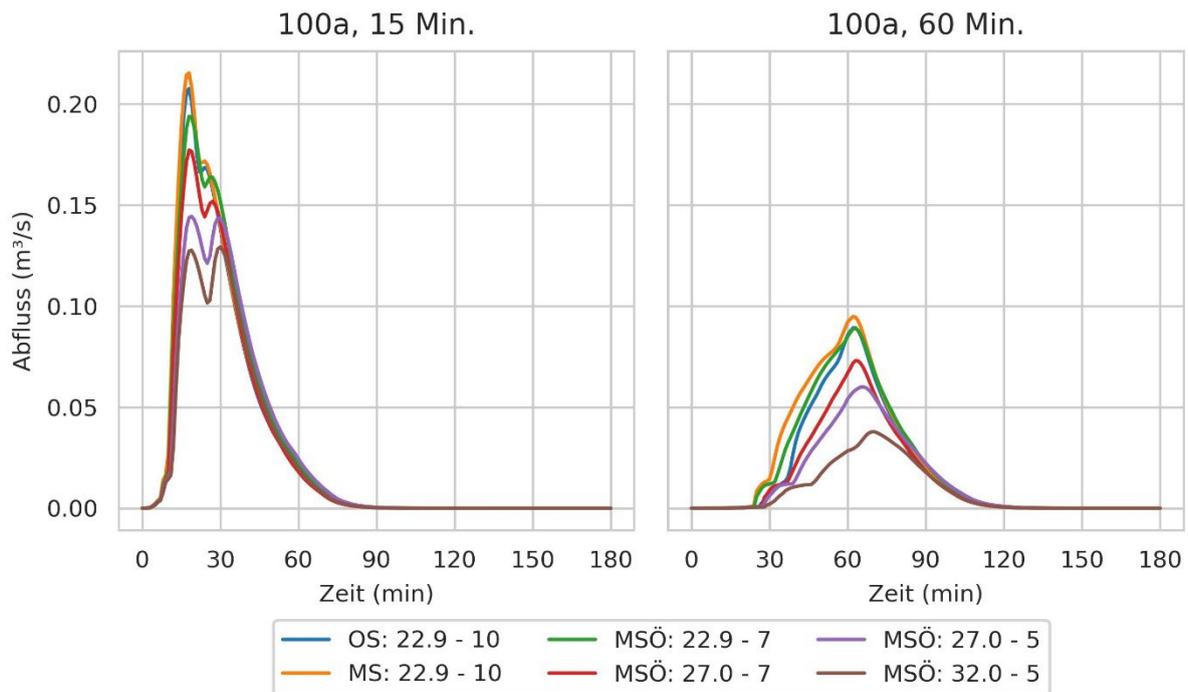


Abbildung 23: Modellierte Abflussganglinien für ausgewählte Nutzungsszenarien bei einem 100-jährigen Niederschlagsereignis (15 und 60 Minuten Dauer) unter feuchten Anfangsbedingungen

Ein auffälliges Merkmal bei 15-minütigen Ereignissen sind doppelte Abflussspitzen. Diese Doppelspitzen treten bereits in abgeschwächter Form bei OS und MS auf, werden jedoch in den MSÖ-Szenarien stärker ausgeprägt. Bei Szenarien mit erhöhtem K_{sat} -Wert und konstantem K_{st} -Wert sinken beide Spitzen deutlich. Umgekehrt reduziert eine rauere Oberfläche (geringerer K_{st} -Wert bei konstantem K_{sat} -Wert) ebenfalls beide Spitzen, wobei hier die zweite Spitze zeitlich verzögert und klarer ausgeprägt erscheint. Bei einer Ereignisdauer von 60 Minuten verschiebt sich die Abflussspitze zeitlich nach hinten, und der Verlauf wird insgesamt flacher. Erneut zeigt das Szenario MS die höchste Abflussspitze, während das ökologisch optimierte Szenario MSÖ: 32.0 – 5 den geringsten Abfluss aufweist. Aufgrund der längeren Niederschlagsdauer treten Unterschiede in den Infiltrationseigenschaften, insbesondere bezüglich der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit, stärker hervor.

Abbildung 24 ergänzt diese Ergebnisse durch die räumlich-zeitliche Darstellung der Abflussverteilung am Modellauslass für das 100-jährliche 15-Minuten-Ereignis in den Szenarien MS und MSÖ: 32.0 – 5. Im Szenario MS bilden sich zwei räumlich getrennte Abflussschwerpunkte heraus. Im linken Bereich des Auslasses tritt ein früher, intensiver Oberflächenabfluss auf. Rechts zeigt sich ein späteres zweites Maximum, welches dem Entwässerungsgraben zugeordnet werden kann.

Im optimierten Szenario MSÖ: 32.0 – 5 reduziert und verzögert sich der Abfluss im linken Bereich deutlich, was die positive Wirkung der ökologischen Maßnahmen und der verbesserten Bodenstruktur verdeutlicht. Im Bereich des Entwässerungsgrabens ist die Abflussreduktion geringer ausgeprägt, da hier das Wasser aufgrund des höheren K_{st} -Wertes des Grabens (20) schneller abgeführt wird und weniger Zeit zur Versickerung hat. In diesem Bereich treten zwei zeitlich versetzte Abflussspitzen auf, die mit den Doppelspitzen in Abbildung 8 korrespondieren. Diese zeitliche Staffelung entsteht durch das verzögerte Zufließen aus unterschiedlich entfernten Gebietsbereichen, zusätzlich verstärkt durch geringere Fließgeschwindigkeiten und längere Rückhaltezeiten im Gebiet.

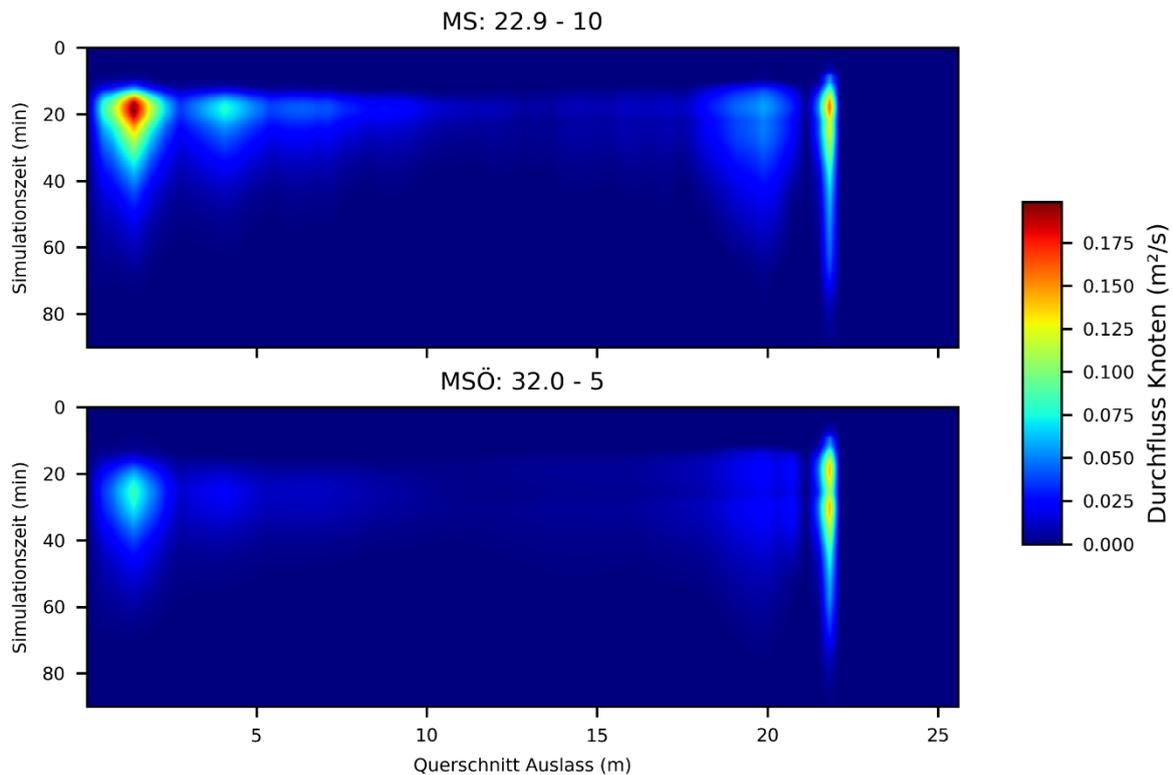


Abbildung 24: Räumlich-zeitliche Abflussverteilung am Modellauslass für ein 100-jährliches 15-Minuten-Ereignis in den Szenarien MS und MSÖ: 32.0 – 5 unter feuchten Anfangsbedingungen

4.8.4 Diskussion

Die Modellierungsergebnisse zeigen, dass der Bau des Solarparks das Abfluss- und Infiltrationsverhalten deutlich beeinflusst. Insbesondere nach der Errichtung der Anlage kommt es zu höheren Abflussspitzen und einem Anstieg des Abflussvolumens, vor allem bei mittleren Niederschlagsintensitäten (10-jährlich), bei denen der relative Effekt am stärksten ausgeprägt ist. Ursache hierfür ist die erhöhte lokale Niederschlagskonzentration entlang der Abtropfkanten der Solarmodule. Der Regenwasserabfluss von den Modulen trifft konzentriert auf begrenzte Bodenflächen, wodurch dort die Infiltrationskapazität rasch überschritten wird und verstärkter Oberflächenabfluss entsteht. Diese Wirkung lässt sich auch deutlich in der räumlichen Verteilung der Infiltration erkennen. Die unterhalb der Module liegenden Flächen bleiben zunächst trocken, da sie keinen direkten Niederschlag erhalten. Stattdessen fließt das Wasser entlang bevorzugter Pfade ab, was zu einem stark heterogenen Infiltrationsverhalten führt. Trotz des hohen relativen Anstiegs ist das absolute Abflussvolumen bei diesen mittleren Ereignissen jedoch vergleichsweise gering.

Bei extremen Regenereignissen, wie einem 100-jährlichen Starkregen, steigt das Abflussvolumen deutlich an, da die Infiltrationskapazität des Bodens schnell erschöpft ist. Zwar zeigen sich auch hier höhere Abflussspitzen und -volumina nach dem Bau des Solarparks, jedoch sind die relativen Unterschiede im Vergleich zum Ausgangszustand geringer.

Die Bodenfeuchte stellt einen zentralen Steuerfaktor des Systems dar. Feuchte Anfangsbedingungen erhöhen den Abfluss in allen Szenarien erheblich, insbesondere bei mittleren Niederschlagsereignissen wird die Sensitivität gegenüber der Wasserspeicherefähigkeit des Bodens deutlich. Aufeinanderfolgende Niederschläge in kurzer Abfolge, wie z. B. Sommergewitter, können somit die Gefahr von Oberflächenabfluss erheblich steigern.

Darüber hinaus bestimmen die Niederschlagsintensität und -dauer maßgeblich die Abflussdynamik. Kurze, intensive Ereignisse führen in der Regel zu einer schnellen Überschreitung der Infiltrationskapazität und somit zu ausgeprägten Abflussspitzen, wohingegen längere Ereignisse flachere Ganglinien erzeugen. Diese Erkenntnisse unterstreichen die Relevanz hochaufgelöster Starkregenanalysen für die hydrologische Bewertung von PV-FFA.

Die ökologisch optimierten Szenarien zeigen eine deutliche Verbesserung des hydrologischen Systemverhaltens im Vergleich zum Zustand unmittelbar nach dem Bau. Sowohl das Abflussvolumen als auch die Abflussspitzen nehmen mit zunehmender Bodenverbesserung signifikant ab, bedingt vor allem durch eine gesteigerte Infiltrationsleistung, die besonders auf die erhöhte hydraulische Leitfähigkeit des Bodens zurückzuführen ist. In vielen Fällen fällt das Abflussvolumen sogar geringer aus als im natürlichen Referenzzustand. In den ökologischen Szenarien erfolgt die Infiltration schneller, gleichmäßiger und über eine größere Fläche, was zu einer deutlichen Entschärfung des Oberflächenabflusses führt. Eine erhöhte Oberflächenrauigkeit (kleiner Kst-Wert), die beispielsweise durch eine dichte Begrünung erreicht werden kann, führt zu einer Verlangsamung der Fließgeschwindigkeit des Wassers an der Oberfläche. Dies hat eine längere Verweildauer des Wassers und eine gleichmäßigere Verteilung zur Folge. Infolgedessen erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass das Wasser nicht oberflächlich abfließt, sondern infiltriert.

In den Ganglinien spiegelt sich dieser Effekt in sanfteren Verläufen und zeitlich versetzten Doppelspitzen wider, welche auf eine verzögerte und gestreckte Abflussreaktion hindeuten. Dies zeigt auch die räumlich-zeitliche Verteilung am Modellauslass. Der Oberflächenabfluss aus dem Solarpark verringert sich deutlich, da das Wasser mehr Zeit für die Infiltration hat und die Infiltrationskapazität erhöht ist. Im Gegensatz dazu reduziert sich der Abfluss über den Entwässerungsgraben nur geringfügig. In diesem Bereich führt die höhere Fließgeschwindigkeit infolge eines größeren Kst-Werts dazu, dass das Wasser schneller zum Auslass transportiert wird und somit weniger Zeit für die Infiltration bleibt. Dieses Verhalten verdeutlicht das Retentionspotenzial ökologisch verbesserter Flächen, vorausgesetzt, das Wasser verbleibt ausreichend lange an der Oberfläche. Flächen, die direkt in den Entwässerungsgraben entwässern, verlieren hingegen einen Teil dieses Potenzials.

5 Öffentlichkeitsarbeit/Veröffentlichungen/Vorträge

Am 16. März 2022 präsentierte Prof. Disse auf der Darstadt-Sitzung den Projektplan einem Fachpublikum. Dieser Vortrag trug wesentlich dazu bei, das Bewusstsein für das Projekt zu schärfen und Kontakte zu potenziellen Partnern und Interessengruppen zu knüpfen.

Das TUM-Team entwickelte einen umfassenden Fragebogen mit zwei Zielsetzungen: Einerseits sollten gezielte Rückmeldungen zum Softwarekonzept eingeholt werden, um Optimierungspotenziale zu identifizieren. Andererseits diente der Fragebogen als Instrument zur Öffentlichkeitsarbeit, um die Projektidee bei der relevanten Zielgruppe bekannt zu machen. Die Umfrage war klar strukturiert und enthielt einen kompakten Informationsteil, in dem Ziele, Anwendungsbereiche und Reichweite des Projekts verständlich erläutert wurden. Der Fragebogen wurde an mindestens 188 Personen – darunter Forschende, Fachleute und Studierende – verteilt und erreichte so ein breites Spektrum an Stakeholdern.

Zur weiteren Verbreitung nutzte das Projektteam in der Anfangsphase die Plattform ResearchGate. Nach der Einstellung der „Projekte“-Funktion am 31. März 2023 sucht das Team nun nach alternativen Kanälen wie LinkedIn oder Twitter, um weiterhin über Projektergebnisse zu informieren und im Austausch mit Interessierten zu bleiben. Zusätzlich wurde das Projekt im vergangenen Jahr rund 80 Studierenden im IWRM-Masterstudiengang sowie in Bachelor-Lehrveranstaltungen zur Wasserqualität vorgestellt.

Am 8. November 2024 hielt Prof. Disse im Rahmen des Dialogforums Wasserkontroversen an der Universität Bayreuth einen Vortrag zum Thema „Wasserrückhalt in der Landschaft“. Dabei stellte er auch das Projekt AQUASOL vor und diskutierte experimentelle Messergebnisse sowie die Resultate der hydrodynamischen Modellierung.

Das Abschlusskolloquium von AQUASOL fand am 19. November 2024 im Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Tourismus statt. 21 Teilnehmende aus unterschiedlichen Institutionen kamen zusammen, um die Projektergebnisse gemeinsam mit dem Projektteam zu erörtern.

Am 21. März 2025 präsentierte Prof. Disse im Rahmen des „Tags der Hydrologie“ die Ergebnisse der hydrodynamischen Modellierungen in einem Fachvortrag.

Am 1. April 2025 wurde eine wissenschaftliche Veröffentlichung von Dr. Alqadi in der Zeitschrift MDPI-Sustainability publiziert. Der Artikel mit dem Titel „Developing and Implementing a Decision Support System-Integrated Framework for Evaluating Solar Park Effects on Water-Related Ecosystem Services“ beschreibt die Entwicklung des Bewertungsrahmens sowie des Entscheidungsunterstützungssystems (DSS).

Aktuell sind darüber hinaus zwei weitere deutschsprachige Beiträge in der Fachzeitschrift Hydrologie und Wasserbewirtschaftung (HyWa) in Vorbereitung. Diese werden sich mit den Ergebnissen der Modellierungen sowie den experimentellen Messungen befassen.

6 Fazit

Im Projekt AQUASOL wurde ein neuartiger Bewertungsrahmen entwickelt, der die komplexen Wechselwirkungen zwischen PV-FFA und wasserbezogenen Ökosystemdienstleistungen systematisch erfasst und bewertet. Auf dieser Grundlage entstand ein Entscheidungsunterstützungssystem (DSS), welches die Planung und das Management von Solarparks ökologisch fundiert begleiten kann – etwa zur Optimierung der Grundwasserneubildung, der Wasserqualität oder zur Minderung des Oberflächenabflusses. Das Tool zeichnet sich durch eine benutzerfreundliche Oberfläche, transparente Bewertungslogik und Exportfunktionen aus und wurde erfolgreich in der Praxis getestet.

Ergänzend wurden mithilfe eines hochauflösenden, zweidimensionalen hydrodynamischen Modells und eines eigens entwickelten Infiltrationsmoduls die hydrologischen Veränderungen durch Photovoltaik-Freiflächenanlagen quantifiziert. Die Ergebnisse zeigen, dass Solarparks – insbesondere unmittelbar nach der Errichtung – das lokale Wassergeschehen beeinflussen können, sich negative Effekte jedoch durch gezielte Begrünung und Rückhaltmaßnahmen deutlich reduzieren oder sogar umkehren lassen. Die Modellierung erlaubt eine realistische Abbildung räumlich-zeitlicher Dynamiken und bietet eine belastbare Grundlage für klimaresiliente Planung und standortspezifische Bewirtschaftung.

Insgesamt zeigt AQUASOL, dass Solarparks nicht nur mit ökologischen Risiken verbunden sind, sondern auch Potenziale zur Förderung wasserbezogener Ökosystemleistungen bieten – vorausgesetzt, hydrologische Aspekte werden frühzeitig in Planung und Betrieb integriert. Die Ergebnisse leisten somit einen wichtigen Beitrag zum nachhaltigen Ausbau erneuerbarer Energien im Einklang mit Umweltzielen.

7 Literatur

- [1] *Yolcan, O.O.*: World energy outlook and state of renewable energy: 10-Year evaluation. In: Innovation and Green Development 2 (2023), Heft 4. <https://doi.org/10.1016/j.igd.2023.100070>.
- [2] *Hassan, Q.; Viktor, P.; J. Al-Musawi, T. et al.*: The renewable energy role in the global energy Transformations. In: Renewable Energy Focus 48 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.ref.2024.100545>.
- [3] *Umweltbundesamt*: Erneuerbare Energien in Deutschland 2023 – Daten zur Entwicklung im Jahr 2023 Ausgabe 2024.
- [4] *Die Bundesregierung*: So läuft der Ausbau der Erneuerbaren Energien in Deutschland, 2024, <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/ausbau-erneuerbare-energien-2225808> [Zugriff am: 30.01.2025].
- [5] *Wirth, H.*: Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE Ausgabe 2024.
- [6] *Armstrong, A.; Waldron, S.; Whitaker, J. et al.*: Wind farm and solar park effects on plant-soil carbon cycling: uncertain impacts of changes in ground-level microclimate. In: Global change biology, Vol. 20 (2014), Iss. 6, pp. 1699-1706. <https://doi.org/10.1111/gcb.12437>.
- [7] *Cook, L.M.; McCuen, R.H.*: Hydrologic Response of Solar Farms. In: Journal of Hydrologic Engineering 18 (2013), Heft 5, S. 536-541. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000530](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000530).
- [8] *Lambert, Q.; Bischoff, A.; Cueff, S. et al.*: Effects of solar park construction and solar panels on soil quality, microclimate, CO₂ effluxes, and vegetation under a Mediterranean climate. In: Land Degradation & Development 32 (2021), Heft 18, S. 5190-5202. <https://doi.org/10.1002/ldr.4101>.
- [9] *Marrou, H.; Dufour, L.; Wery, J.*: How does a shelter of solar panels influence water flows in a soil-crop system? In: European Journal of Agronomy 50 (2013), S. 38-51. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.05.004>.
- [10] *Armstrong, A.; Ostle, N.J.; Whitaker, J.*: Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling. In: Environmental Research Letters 11 (2016), Heft 7, S. 74016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074016>.
- [11] *Bouwer, H.*: Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. In: Hydrogeology Journal 10 (2002), Heft 1, S. 121-142. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0182-4>.
- [12] *Racz, A.J.; Fisher, A.T.; Schmidt, C.M. et al.*: Spatial and temporal infiltration dynamics during managed aquifer recharge. In: Ground water, Vol. 50 (2012), Iss. 4, pp. 562-570. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2011.00875.x>.
- [13] *Grau-Martínez, A.; Folch, A.; Torrentó, C. et al.*: Monitoring induced denitrification during managed aquifer recharge in an infiltration pond. In: Journal of Hydrology 561 (2018), S. 123-135. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.03.044>.
- [14] *Ringleb, J.; Sallwey, J.; Stefan, C.*: Assessment of Managed Aquifer Recharge through Modeling—A Review. In: Water 8 (2016), Heft 12, S. 579. <https://doi.org/10.3390/w8120579>.
- [15] *Haines-Young, R.; Potschin, M.*: Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1 and Guidance on the Application of the Revised Structure.
- [16] *Semeraro, T.; Pomes, A.; Del Giudice, C. et al.*: Planning ground based utility scale solar energy as green infrastructure to enhance ecosystem services. In: Energy Policy 117 (2018), S. 218-227. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.01.050>.
- [17] *Randle-Boggis, R.J.; White, P.; Cruz, J. et al.*: Realising co-benefits for natural capital and ecosystem services from solar parks: A co-developed, evidence-based approach. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 125 (2020), S. 109775. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109775>.
- [18] *EGIS: Egis-Energiedorf: Das Projekt - mehr erfahren!*, 2024, <https://www.buergersolarpark-bundorf.de/das-projekt/> [Zugriff am: 07.02.2025].
- [19] *Alqadi, M.; Zaharieva, S.; Commichau, A. et al.*: Developing and Implementing a Decision Support System-Integrated Framework for Evaluating Solar Park Effects on Water-Related Ecosystem Services. In: Sustainability 17 (2025), Heft 7, S. 3121. <https://doi.org/10.3390/su17073121>.
- [20] *Raudkivi, A.J.*: Hydrology – An Advanced Introduction to Hydrological Processes and Modelling. Elsevier Science, Burlington, 1979.
- [21] *Turner, R.K.; Morse-Jones, S.; Fisher, B.*: Ecosystem valuation: a sequential decision support system and quality assessment issues. In: Annals of the New York Academy of Sciences, Vol. 1185 (2010),

- pp. 79-101. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.05280.x>.
- [22] *Wischmeier, W.H.; Smith, D.D.*: Predicting Rainfall Erosion Losses – A Guide to Conservation Planning. Department of Agriculture, Science and Education Administration, 1978.
- [23] *M. Karl Wood; Wilbert H. Blackburn*: AN EVALUATION OF THE HYDROLOGIC SOIL GROUPS AS USED IN THE SCS RUNOFF METHOD ON RANGELANDS1. *In: JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 20 (1984), Iss. 3, pp. 379-389. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1984.tb04720.x>.
- [24] *M. J. Weijters; J. H. Janse; R. Alkemade et al.*: Quantifying the effect of catchment land use and water nutrient concentrations on freshwater river and stream biodiversity. *In: Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, Vol. 19 (2009), Iss. 1, pp. 104-112. <https://doi.org/10.1002/aqc.989>.
- [25] *Yu, Y.; Chen, X.; Huttner, P. et al.*: Model based decision support system for land use changes and socio-economic assessments. *In: Journal of Arid Land* 10 (2018), Heft 2, S. 169-182. <https://doi.org/10.1007/s40333-018-0091-1>.
- [26] *Johannes Mitterer*: Enabling Comparative and Reproducible Flash Flood Modeling Research in Bavaria - Local Contributions to a Global Objective, 2024.
- [27] *Green, W.H.; Ampt, G.A.*: Studies in soil physics. *In: Journal of Agricultural Science* 4 (1911), Heft 1, S. 1-24.
- [28] *Chow, V.T.; Maidment, D.R.; Mays, L.W.*: Applied hydrology, McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering, McGraw-Hill, New York, 1988.
- [29] *EDF*: TELEMAT-2D. User Manual. Version v8p5 Ausgabe 2023.
- [30] *Hervouet, J.-M.*: Hydrodynamics of free surface flows – Modelling with the finite element method. Wiley, Chichester, 2007.
- [31] Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg. LUBW Landesanstalt für Umwelt Messungen und Naturschutz, Karlsruhe, 2016.
- [32] *Choi, C.S.; Cagle, A.E.; Macknick, J. et al.*: Effects of Revegetation on Soil Physical and Chemical Properties in Solar Photovoltaic Infrastructure. *In: Frontiers in Environmental Science* 8 (2020). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00140>.
- [33] *Zhang, J.; Li, Z.; Tao, J. et al.*: Observed Impacts of Ground-Mounted Photovoltaic Systems on the Microclimate and Soil in an Arid Area of Gansu, China. *In: Atmosphere* 15 (2024), Heft 8, S. 936. <https://doi.org/10.3390/atmos15080936>.
- [34] *Barron-Gafford, G.A.; Minor, R.L.; Allen, N.A. et al.*: The Photovoltaic Heat Island Effect: Larger solar power plants increase local temperatures. *In: Scientific reports*, Vol. 6 (2016), p. 35070. <https://doi.org/10.1038/srep35070>.
- [35] *Mishra, N.; Khare, D.; Gupta, K. et al.*: Impact of land use change on groundwater—a review, 2014.
- [36] *Perosa, F.; Fanger, S.; Zingraff-Hamed, A. et al.*: A meta-analysis of the value of ecosystem services of floodplains for the Danube River Basin. *In: The Science of the total environment*, Vol. 777 (2021), p. 146062. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146062>.
- [37] *Carson, R.M.; Bergstrom, J.C.*: A review of ecosystem valuation techniques, 2003.
- [38] *Wischmeier, W.H.; Smith, D.D.*: Predicting Rainfall Erosion Losses – A Guide to Conservation Planning. Department of Agriculture, Science and Education Administration, 1978.
- [39] *Lal, R.*: Soil erosion research methods / R. Lal, editor. Soil and Water Conservation Society (U.S.). Routledge, Milton, UNITED KINGDOM, 2017.
- [40] *Kayet, N.; Pathak, K.; Chakrabarty, A. et al.*: Evaluation of soil loss estimation using the RUSLE model and SCS-CN method in hillslope mining areas. *In: International Soil and Water Conservation Research* 6 (2018), Heft 1, S. 31-42. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.11.002>.
- [41] *Yalcin, A.*: GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): Comparisons of results and confirmations. *In: CATENA* 72 (2008), Heft 1, S. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.01.003>.
- [42] *Riis, T.; Kelly-Quinn, M.; Aguiar, F.C. et al.*: Global Overview of Ecosystem Services Provided by Riparian Vegetation. *In: BioScience* 70 (2020), Heft 6, S. 501-514. <https://doi.org/10.1093/biosci/biaa041>.
- [43] *Garcia-Chevesich, P.; Wei, X.; Ticona, J. et al.*: The Impact of Agricultural Irrigation on Landslide Triggering: A Review from Chinese, English, and Spanish Literature. *In: Water* 13 (2021), Heft 1, S.

10. <https://doi.org/10.3390/w13010010>.
- [44] *Li, B.V.; Jenkins, C.N.; Xu, W.*: Strategic protection of landslide vulnerable mountains for biodiversity conservation under land-cover and climate change impacts. *In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 119 (2022), Iss. 2. <https://doi.org/10.1073/pnas.2113416118>.
- [45] *Lehmann, P.; Ruetze, J. von; Or, D.*: Deforestation Effects on Rainfall-Induced Shallow Landslides: Remote Sensing and Physically-Based Modelling. *In: Water Resources Research* 55 (2019), Heft 11, S. 9962-9976. <https://doi.org/10.1029/2019WR025233>.
- [46] *Cayson, F.C.; Patiño, C.L.; Flores, M.J.L.*: RUNOFF ESTIMATION USING SCS RUNOFF CURVE NUMBER METHOD IN CEBU ISLAND. *In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-4/W19* (2019), S. 109-115. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W19-109-2019>.
- [47] *USDA*: Urban Hydrology for Small Watersheds (TR-55) Ausgabe 1986.
- [48] *Meentemeyer, V.*: The Geography of Organic Decomposition Rates. *In: Annals of the Association of American Geographers* 74 (1984), Heft 4, S. 551-560. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1984.tb01473.x>.
- [49] *Davidson, E.A.; David, M.B.; Galloway, J.N. et al.*: Excess nitrogen in the U.S. environment: Trends, risks, and solutions. *In: Issues in Ecology* (2011), Heft 15.
- [50] *Christen, B.; Dalgaard, T.*: Buffers for biomass production in temperate European agriculture: A review and synthesis on function, ecosystem services and implementation. *In: Biomass and Bioenergy* 55 (2013), S. 53-67. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.09.053>.
- [51] *Hartmann, M.; Six, J.*: Soil structure and microbiome functions in agroecosystems. *In: Nature Reviews Earth & Environment* 4 (2023), Heft 1, S. 4-18. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00366-w>.
- [52] *Giordano, M.; Petropoulos, S.; Rouphael, Y.*: The Fate of Nitrogen from Soil to Plants: Influence of Agricultural Practices in Modern Agriculture. *In: Agriculture* 11 (2021), Heft 10, S. 944. <https://doi.org/10.3390/agriculture11100944>.
- [53] *Salehzadeh, H.; Maleki, A.; Rezaee, R. et al.*: The nitrate content of fresh and cooked vegetables and their health-related risks. *In: PLoS one*, Vol. 15 (2020), Iss. 1, e0227551. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227551>.
- [54] *Jie, Z.; van Heyden, J.; Bendel, D. et al.*: Combination of soil-water balance models and water-table fluctuation methods for evaluation and improvement of groundwater recharge calculations. *In: Hydrogeology Journal* 19 (2011), Heft 8, S. 1487-1502. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0772-8>.
- [55] *Rabalais, N.N.*: Nitrogen in aquatic ecosystems. *In: Ambio*, Vol. 31 (2002), Iss. 2, pp. 102-112. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-31.2.102>.
- [56] *Pisinaras, V.; Wei, Y.; Barring, L. et al.*: Conceptualizing and assessing the effects of installation and operation of photovoltaic power plants on major hydrologic budget constituents. *In: The Science of the total environment*, Vol. 493 (2014), pp. 239-250. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.05.132>.
- [57] *Liu, H.; Wu, C.; Yu, Y. et al.*: Effect of Solar Farms on Soil Erosion in Hilly Environments: A Modeling Study From the Perspective of Hydrological Connectivity. *In: Water Resources Research* 59 (2023), Heft 12. <https://doi.org/10.1029/2023WR035067>.
- [58] *Wohlin, C.*: Guidelines for snowballing in systematic literature studies and a replication in software engineering. *In: Shepperd, M.; Hall, T.; Myrtveit, I. (Hrsg.): Proceedings of the 18th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering*. ACM, London England United Kingdom, 2014, S. 1-10.
- [59] *Ross, C.W.; Prihodko, L.; Anchang, J. et al.*: HYSOGs250m, global gridded hydrologic soil groups for curve-number-based runoff modeling. *In: Scientific data*, Vol. 5 (2018), p. 180091. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.91>.
- [60] *Arnold, J.G.; Srinivasan, R.; Muttiah, R.S. et al.*: LARGE AREA HYDROLOGIC MODELING AND ASSESSMENT PART I: MODEL DEVELOPMENT 1. *In: JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 34 (1998), Heft 1, S. 73-89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>.
- [61] *Abbott, M.B.; Bathurst, J.C.; Cunge, J.A. et al.*: An introduction to the European Hydrological

System — Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *In: Journal of Hydrology* 87 (1986), 1-2, S. 45-59.
[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90114-9](https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90114-9).