



Fachgutachten
„Auswirkungen von Solarparks
auf die Schutzgüter Boden, Wasser, Klima und Luft“

von

Dr. Irabella Fuhrmann

Dr. Norbert Feldwisch

Im Auftrag vom

Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende

Titelbild: Ingenieurbüro Feldwisch

Der Text gibt die Auffassung und Meinung der Autorinnen und Autoren wieder, die nicht mit der Auffassung und Meinung des Auftraggebers übereinstimmen muss.

Bergisch Gladbach, 11. Mai 2026

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	4
Abkürzungsverzeichnis	5
1 Einleitung	6
1.1 Hintergrund und Zielsetzungen	6
1.2 Berücksichtigung der Schutzgüter Boden, Wasser, Luft und Klima bei Planung und Genehmigung von PV-FFA	8
1.3 Ausgangssituation	9
1.4 Methodik	11
1.5 Relevante Studien zu Auswirkungen von PV-Anlagen auf die Schutzgüter Boden, Wasser, Luft und Klima	12
2 Baubedingte Auswirkungen	15
2.1 Baubedingte Auswirkungen auf das Schutzgut Boden	15
2.1.1 Bodenverdichtungen	15
2.1.2 Umlagerungen	19
2.1.3 Substrat- und Stoffeinträge	20
2.1.4 Erosion	21
2.1.5 Zwischenfazit	23
2.2 Baubedingte Auswirkungen auf das Schutzgut Wasser	23
2.3 Baubedingte Auswirkungen auf das Schutzgut Luft und Klima	24
3 Anlagebedingte Auswirkungen	25
3.1 Anlagebedingte Auswirkungen auf das Schutzgut Boden	25
3.1.1 Versiegelung	25
3.1.2 Verschattung und Abschirmung	26
3.1.3 Landnutzungsänderung	29
3.1.4 Zwischenfazit	30
3.2 Anlagebedingte Auswirkungen auf das Schutzgut Wasser	30
3.2.1 Versiegelung	31
3.2.2 Verschattung und Abschirmung	31
3.2.3 Landnutzungsänderung	32
3.2.4 Zwischenfazit	32

3.3	Anlagebedingte Auswirkungen auf das Schutzgut Luft und Klima	32
3.3.1	Versiegelung	33
3.3.2	Verschattung und Abschirmung	33
3.3.3	Landnutzungsänderung	34
3.3.4	Zwischenfazit	35
4	Betriebsbedingte Auswirkungen	36
4.1	Betriebsbedingte Auswirkungen auf das Schutzgut Boden	36
4.2	Betriebsbedingte Auswirkungen auf das Schutzgut Wasser	37
4.3	Betriebsbedingte Auswirkungen auf das Schutzgut Luft und Klima	38
4.4	Zwischenfazit	38
5	Maßnahmenkatalog	39
5.1	Maßnahmen für bau-, anlagen- und betriebsbedingten Wirkungen	42
5.2	Maßnahmen beim Rückbau	54
6	Fazit	55
6.1	Forschungslücken	56
6.2	Kernaussagen	57
6.3	Überlegungen zu den Folgen einer 30-jährigen Überstellung	58
7	Quellenverzeichnis	61

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Bau einer über 23 ha großen Photovoltaik-Anlage bei Zwickau (Quelle: Ingenieurbüro Feldwisch).	6
Abbildung 2	Untersuchungen der Verdichtungswirkungen einer PV-FFA auf einem zuvor ackerbaulich genutzten Lössstandort; Lage der Bodenschürfe mit Pfeilen gekennzeichnet (Quelle: Ingenieurbüro Feldwisch).	17
Abbildung 3	Starke Verdichtungsschäden im Zuge des Baus einer vertikalen Agri-PV-Anlage (Quelle: Ingenieurbüro Feldwisch).	18
Abbildung 4	Substratvermischungen durch fehlende Trennung des Ober- und Unterbodens und des Bettungsmaterials (Quelle: Ingenieurbüro Feldwisch).	20
Abbildung 5	Abfluss- und Erosionsschäden auf einer PV-FFA, die zu Baubeginn nicht ausreichend begrünt war (Quelle: Ingenieurbüro Feldwisch).	21
Abbildung 6	Bodenerosion in der Bauphase einer ca. 23 ha großen PV-FFA im hügeligen Unteren Westerzgebirge in Folge nicht ausreichender Vorbegrünung der ehemaligen Ackerfläche (Quelle: Ingenieurbüro Feldwisch).	22
Abbildung 7	Erhebliche Verdichtungsschäden auf dem Umlaufweg einer PV-FFA im Bergischen Land, die durch Befahrungen ungeschützter Böden im Winterhalbjahr entstanden sind (Quelle: Ingenieurbüro Feldwisch).	41

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Funktionsbeschreibung für das Schutzgut Boden	7
Tabelle 2	Funktionsbeschreibung für das Schutzgut Wasser gemäß WHG und WRRL	7
Tabelle 3	Funktionsbeschreibung für das Schutzgut Luft und Klima gemäß BNatSchG, BImSchG und KSG	8
Tabelle 4	Relevante Studien zu PV-FFA und ihren Ergebnissen zu Auswirkungen auf Funktionen der Schutzgüter Boden, Wasser, Luft- und Klima für gemäßigte Klimaregionen.	12
Tabelle 5	Potenzielle baubedingte Auswirkungen auf Bodenfunktionen	15
Tabelle 6	Potenzielle baubedingte Auswirkungen auf Funktionen des Schutzgutes Wasser.	24
Tabelle 7	Potenzielle anlagenbedingte Auswirkungen auf Bodenfunktionen	25
Tabelle 8	Potenzielle anlagenbedingte Auswirkungen auf Funktionen des Schutzgutes Wasser.	31
Tabelle 9	Potenzielle anlagenbedingte Auswirkungen auf Funktionen der Schutzgüter Luft- und Klima	33
Tabelle 10	Potenzielle betriebsbedingte Auswirkungen auf Bodenfunktionen	36
Tabelle 11	Potenzielle betriebsbedingte Auswirkungen auf Funktionen des Schutzgutes Wasser.	38

Tabelle 12	Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen für potenzielle Beeinträchtigungen des Schutzgutes Boden durch baubedingte Wirkfaktoren von PV-FFA.....	42
Tabelle 13	Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen für potenzielle Beeinträchtigungen des Schutzgutes Wasser durch baubedingte Wirkfaktoren von PV-FFA.....	45
Tabelle 14	Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen für potenzielle Beeinträchtigungen des Schutzgutes Luft und Klima durch baubedingte Wirkfaktoren von PV-FFA.	47
Tabelle 15	Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen für potenzielle Beeinträchtigungen des Schutzgutes Boden durch anlagebedingte Wirkfaktoren von PV-FFA.....	48
Tabelle 16	Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen für potenzielle Beeinträchtigungen des Schutzgutes Wasser durch anlagebedingte Wirkfaktoren von PV-FFA.....	49
Tabelle 17	Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen für potenzielle Beeinträchtigungen des Schutzgutes Luft und Klima durch anlagebedingte Wirkfaktoren von PV-FFA.....	50
Tabelle 18	Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen für potenzielle Beeinträchtigungen des Schutzgutes Boden durch betriebsbedingte Wirkfaktoren von PV-FFA.....	51
Tabelle 19	Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen für potenzielle Beeinträchtigungen des Schutzgutes Wasser durch betriebsbedingte Wirkfaktoren von PV-FFA.....	52
Tabelle 20	Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen für potenzielle Beeinträchtigungen des Schutzgutes Luft und Klima durch betriebsbedingte Wirkfaktoren von PV-FFA.....	53

Abkürzungsverzeichnis

BauGB	Baugesetzbuch
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BE-Fläche	Baueinrichtungsfläche
BG	Baugesetzbuchs
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
EE	Energiebedarf aus Erneuerbaren Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
KSG	Bundes-Klimaschutzgesetz
K _f	Wasserdurchlässigkeit
LABO	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz
PV-FFA	Photovoltaik-Freiflächenanlagen
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Zielsetzungen

Zukünftig ist ein massiver Ausbau der installierten Photovoltaik (PV)-Leistung notwendig, um unseren gesamten Energiebedarf aus Erneuerbaren Energien (EE) zu decken. Im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG 2023) ist ein PV-Ausbau auf 215 GW_p bis 2030 und auf 400 GW_p bis 2040 vorgesehen. Zukünftig könnten laut Hochrechnungen des Thünen-Instituts 280.000 ha¹ landwirtschaftlicher Fläche bis 2040 beansprucht werden, um dieses Ausbauziel zu erreichen (Böhm & Tietz, 2022).



Abbildung 1 Bau einer über 23 ha großen Photovoltaik-Anlage bei Zwickau (Quelle: Ingenieurbüro Feldwisch).

Insgesamt beträgt die Flächeninanspruchnahme aller bis Ende 2024 installierten PV-Freiflächenanlagen (PV-FFA) in Deutschland rund 45.200 ha. Der größte Anteil entfällt auf Ackerflächen (15.200 ha), gefolgt von Konversionsflächen (12.200 ha), Seitenrandstreifen (5.090 ha), Grünland (2.360 ha) und sonstige Flächen (Kelm & Stauch, 2025). Die Leistungen und Größen der Anlagen in Deutschland variieren stark und reichen von weniger als einem Megawatt auf wenigen ha bis 650 Megawatt auf rund 500 ha². Sie können somit erhebliche Wirkungen auf Natur und Landschaft entfalten. Dabei können sich die Wirkungen je nach Standort, Umgebung, Bauweise und Bewirtschaftung variieren.

Zu den Auswirkungen auf Arten und Biotope gibt es bereits zahlreiche Studien (Karner et al., 2024; Peschel & Peschel, 2025; Schlegel et al., 2021), aber auch andere Schutzgüter

¹ Annahme: Spezifische Flächeninanspruchnahme 1,4 ha/MWp

² Witznitz in Westsachsen ist derzeit Deutschlands größter Solarpark. <https://www.moveon-energy.de/energiepark-witznitz/> (17.02.2026)

werden beeinflusst. Zu den weiteren Schutzgütern zählen Boden, Wasser, Klima und Luft. Dabei erfüllt jedes Schutzgut essenzielle Funktionen im Naturhaushalt.

Das Schutzgut Boden dient im Sinne des Bundes-Bodenschutzgesetz (§ 2 BBodSchG) verschiedene Funktionen (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1 Funktionsbeschreibung für das Schutzgut Boden

Bodenfunktion	Funktionsbeschreibung
Lebensraumfunktion	Lebensraum für Menschen, Tiere, Pflanzen und Bodenorganismen ¹
Speicherungs-, Regelungs- und Pufferfunktion	Speicherung von Wasser, Filterung und Umwandlung, von Nährstoffen und Schadstoffen ²
Klimafunktion	Speicherung von Kohlenstoff, Einfluss auf das Klima ²
Produktionsfunktion	Nutzstandort für die Land- und Forstwirtschaft ³
Archivfunktion	Speicherung von Informationen über Natur- und Kulturgeschichte ⁴

¹ § 2 Abs. 2 S. 1 lit. a BBodSchG

² § 2 Abs. 2 S. 1 lit. b und c BBodSchG

³ § 2 Abs. 2 S. 3 lit. c BBodSchG

⁴ § 2 Abs. 2 S. 2 BBodSchG

Das Schutzgut Wasser ist Lebensgrundlage des Menschen, und dient als Lebensraum für Tiere und Pflanzen sowie als nutzbares Gut (§ 1 Wasserhaushaltsgesetz – WHG). Die Funktionen des Wassers im Naturhaushalt lassen sich aus dem WHG und der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) ableiten (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2 Funktionsbeschreibung für das Schutzgut Wasser gemäß WHG und WRRL

Funktion im Naturhaushalt	Funktionsbeschreibung
Lebensraumfunktion	Lebensraum für Phytoplankton, Makrophyten, Phyto- und Makrozoobenthos, Fischfauna (biologische Qualitätskomponenten im Sinne der Wasserrahmenrichtlinie)
physikalische-chemische Wasserfunktionen bzw. Qualitätskomponenten	Unterstützung der biologischen Komponenten bzw. Lebensraumfunktionen
Wasserhaushaltsfunktion	Bestandteil des Landschaftswasserhaushaltes, insbesondere des Basis- und Mittelwasserabflusses (hydromorphologische Qualitätskomponenten im Sinne der Wasserrahmenrichtlinie)
Abflussregulationsfunktion	Retention des Abflusses im Gewässerbett und Aue, insbesondere bei Hochwasser
Grundwasserdargebot und Trinkwasserbereitstellung	Ausreichende Grundwasserbereitstellung als Bestandteil des Landschaftswasserhaushaltes und zur sicheren und qualitativ hochwertigen Trinkwasserversorgung

Neben dem Schutz der Schutzgüter Boden und Wasser sind im Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) auch das Schutzgut Luft und Klima explizit erwähnt. Der Schutz gilt insbesondere für Flächen mit günstiger lufthygienischer oder klimatischer Wirkung wie Frisch- und Kaltluftentstehungsgebiete, Luftaustauschbahnen oder Freiräume im besiedelten Bereich

(§ 1 BNatSchG). Ergänzend regelt das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) den Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen und das Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) die nationalen Klimaschutzziele und Emissionsminderungen. Die Funktionen des Schutzgutes Luft und Klima lassen sich aus den genannten Gesetzen zusammengefasst ableiten und einteilen (vgl. Tabelle 3).

Tabelle 3 Funktionsbeschreibung für das Schutzgut Luft und Klima gemäß BNatSchG, BImSchG und KSG

Funktion im Naturhaushalt	Funktionsbeschreibung
Klimaregulationsfunktion	Steuerung Temperatur- und Strahlungsbilanz für ein ausgeglichenes Mikroklima
Luftaustauschfunktion	Abtransport von Wärme und Feuchtigkeit
Feuchtehaushaltsfunktion	Steuerung Luftfeuchtigkeit
Kaltluftentstehungs- und Frischluftzufuhrfunktion	Temperaturausgleich und Kühlung von Siedlungsräumen

Studien zu den Auswirkungen von Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA) auf die genannten Schutzgüter konzentrierten sich meist auf einzelne Parameter (beispielsweise Armstrong et al. (2016), Carvalho et al. (2025); Cook & McCuen (2013)). Für das Schutzgut Boden gibt es von der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) eine Arbeitshilfe mit Hinweisen zu bodenschonender Standortauswahl sowie die Etablierung von Bodenschutzmaßnahmen bei Bau, Betrieb und Rückbau der Anlagen (Miller et al., 2023).

Bislang gibt es keine anschauliche und systematische Darstellung der Auswirkungen der PV-FFA auf die unterschiedlichen Schutzgüter. Angesichts dieser Ausgangslage zielt dieses Gutachten auf eine objektive und evidenzbasierte Betrachtung der potenziellen Beeinflussung von PV-FFA auf die Schutzgüter Boden, Wasser, Klima und Luft ab. Auf dieser Grundlage werden Schlussfolgerungen zum Einfluss auf die Funktionsfähigkeit der Schutzgüter gezogen. Dazu zählen die Bodenfunktionen, die Funktionsfähigkeit von Gewässern und Grundwasserqualität sowie klimatische Funktionen. Bei Beeinträchtigungen der Schutzgüter bedarf es angepasster Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen für den Bau, den Anlagenbetrieb und den Rückbau. Aus diesem Grunde wird auf Basis der potenziellen Auswirkungen ein Maßnahmenkatalog entwickelt. Weiterhin werden Annahmen zu weiteren potenziellen Auswirkungen auf die Schutzgüter abgeleitet und Überlegungen zu den Folgen einer 30-jährigen Überstellung angestellt.

1.2 Berücksichtigung der Schutzgüter Boden, Wasser, Luft und Klima bei Planung und Genehmigung von PV-FFA

PV-FFA unterliegen in Deutschland vor allem dem Bauplanungsrecht des Baugesetzbuchs (BauGB). Auf landwirtschaftlich genutzten Böden, Grünland oder sonstigen Freiflächen (nicht privilegierte Standorte) ist die Errichtung in den meisten Bundesländern nur auf Grundlage einer kommunalen Bauleitplanung mit Flächennutzungs- und Bebauungsplan

zulässig. In Bayern, Baden-Württemberg und Niedersachsen ist die Errichtung von PV-FFA seit dem Jahr 2025 verfahrensfrei gestellt, ohne dass die materiellen fachrechtlichen Anforderungen damit außer Kraft gesetzt sind, wie in der Praxis nicht selten angenommen wird. Mehr Informationen zu verfahrensfreien und nicht-verfahrensfreien PV-FFA und eine Übersicht zu den Prozessschritten und Beteiligungsmöglichkeiten wurden von Gätsch & Wiehe (2026) zusammengestellt.

Im Zuge der Bauleitplanung ist gemäß § 2 Abs. 4 BauGB eine Umweltprüfung durchzuführen, deren Ergebnisse im Umweltbericht darzustellen sind. Dabei werden die voraussichtlichen Auswirkungen des Vorhabens auf die Schutzgüter Mensch, Tiere, Pflanzen, biologische Vielfalt, Boden, Wasser, Luft und Klima sowie Landschaft systematisch ermittelt und bewertet. Die Umweltprüfung bildet eine wesentliche Entscheidungsgrundlage für die planerische Abwägung und dient der frühzeitigen Berücksichtigung umweltbezogener Belange.

Besondere Bedeutung kommt dabei dem Bodenschutz zu. Das BBodSchG enthält die Pflicht zur nachhaltigen Sicherung der Bodenfunktionen und zur Abwehr schädlicher Bodenveränderungen (§ 1 BBodSchG), zur Sanierung schädlicher Bodenveränderungen (§ 4 BBodSchG) und die Vorsorgepflicht zur Verhinderung des Entstehens von schädlichen Bodenveränderungen (§ 7 BBodSchG). Durch bauliche Maßnahmen können Beeinträchtigungen in Form von Verdichtung, Bodenumlagerung, Substrat- und Stoffeinträgen³ sowie Erosionen auftreten (Miller et al., 2023). Im Rahmen der Umweltprüfung und der planerischen Abwägung sind Maßnahmen zur Vermeidung und Minderung von Beeinträchtigungen, wie bodenschonende Bauweisen und eine extensive Nutzung der Flächen, zu berücksichtigen. Insgesamt ist die planungsrechtliche Zulässigkeit von PV-FFA eng mit der Umweltprüfung und dem Schutz der Bodenfunktionen verknüpft.

Der Schutz des Wassers wird durch wasserrechtliche Anforderungen des WHG geregelt. Es gelten die Regelungen zu Gewässerrandstreifen (§ 38 WHG), Überschwemmungsgebiete (§ 78 WHG) und insbesondere zum Grundwasserschutz in Wasserschutzgebieten (§ 52 WHG und Wassergesetze der Länder).

1.3 Ausgangssituation

Das vorliegende Gutachten bezieht sich im Wesentlichen auf klassische PV-FFA.

Bei einer klassischen PV-FFA handelt es sich um nach Süden oder Süd-Westen ausgerichtete Anlagen in Reihenaufstellung. Die PV-Module sind fest auf Gestellen montiert, welche dem Sonnenstand nicht nachfolgen. Die Gestelle sind durch Rammpfähle oder Schraubanker, selten über Betonfundamente im Boden verankert. Die Unterkonstruktion ist in der Regel aus verzinktem Stahl oder Aluminium. Die Anlagen werden meist mit einem Anstellwinkel von 30° errichtet (Günnewig et al., 2007). Zur guten Praxis gehört ein Abstand des

³ Das Bodenschutzrecht differenziert zwischen den Einträgen mineralischer Fremdbestandteile (insbesondere Beton, Ziegel, Keramik, Bauschutt, Straßenaufbruch und Schlacke, aber auch standortfremder natürliches Schottermaterial etc.), Störstoffen (insbesondere behandeltes Holz, Kunststoffe, Glas und Metallteile) und Schadstoffen.

Gestells zur Geländeoberkante von zumeist ca. 80 cm, so dass eine Beweidung mit Schafen als auch eine Mahd unterhalb der Modultische möglich ist. Der Reihenabstand liegt zwischen ca. 2,5 m bis 6 m. Die Modultistiefe beträgt häufig ca. 5 m. Die Grundflächenzahl, also der Anteil der Fläche, die von Modulen überstellt oder mit Nebenanlagen bebaut ist, liegt bei 0,6 bis 0,8 (Günnewig et al., 2024).

Darüber hinaus müssen technische Einrichtungen (Wechselrichter, Trafostationen), eventuelle Betriebsgebäude zur Lagerung von Ersatzteilen und Wartungsfahrzeugen sowie Zu- und Wartungswege errichtet werden. Die Verbindungen zwischen den Modulgestellen und den Wechselrichtern verlaufen in der Regel unterirdisch. Hierfür müssen Kabelgräben mit einer Verlegetiefe von mindestens 60 bis 80 cm gezogen werden (Günnewig et al., 2007). Die darauffolgende Grünlandentwicklung erfolgt üblicherweise durch Selbstbegrünung, Mahdgutübertrag oder Ansaat. Innerhalb der PV-FFA wird auf Düngemittel und Pestizide verzichtet (Günnewig et al., 2024).

Aufgrund ihrer Ausrichtung erzielen klassische PV-FFA ihre Leistungsspitze in den Mittagsstunden.

Ost-West-Anlagen erreichen ihre Leistungsspitzen aufgrund ihrer Ausrichtung am Vor- und Nachmittag. Dies kann sich positiv auf die Netzauslastung auswirken, weswegen ihr Anteil zukünftig wahrscheinlich steigen wird (Feldmeier et al., 2024; Günnewig et al., 2024). Ost-West-Anlagen bestehen aus dachförmigen Doppelreihen. Aufgrund der geringen Verschattungseffekte bezogen auf die PV-Modulreihen sind die Reihenabstände im Vergleich zur klassischen PV-FFA deutlich kleiner (regelmäßig < 2 m). Die Grundflächenzahl liegt regelmäßig bei ca. 0,8. Der Abstand des Gestells zur Geländeoberkante liegt meist unter der von klassischen PV-FFA (Günnewig et al., 2024).

Durch den größeren Anteil der überstellten Fläche wird Ost-West-Anlagen im Vergleich zu klassischen PV-FFA eine stärkere Veränderung der Niederschlagsverteilung auf der Fläche zugeordnet (Feldmeier et al., 2024). Auch könnte eine erhöhte Erosionsgefahr durch sehr große Modulflächen bestehen, weil das Niederschlagswasser stärker konzentriert am unteren Modulende auf den Boden abtropft (Miller et al., 2023).

Im vorliegenden Gutachten werden aufgrund der wahrscheinlich verstärkten Auswirkungen der Ost-West-Anlagen auf die Schutzgüter Boden, Wasser, Klima und Luft nach Möglichkeit auch die potenziellen Einflüsse dieser Art von Anlagen abgeschätzt.

Andere Formate wie beispielsweise Agri-PV-Anlagen oder Moor-PV-Anlagen, welche Landwirtschaft bzw. Paludikulturen mit PV-Nutzungsformen auf einer Fläche kombinieren, stehen nicht im Fokus dieses Gutachtens. Der Aufbau (und damit auch die Beeinflussung der Umwelt) dieser Anlagen kann sich erheblich vom Aufbau klassischer PV-FFA unterscheiden. Studien mit Agri-PV-Anlagen werden nur einbezogen, wenn diese Forschungslücken bei PV-FFA füllen können und sich Wirkzusammenhänge so besser erschließen lassen.

1.4 Methodik

Für die Bearbeitung des Gutachtens wurde eine Literaturrecherche zu den Auswirkungen von PV-FFA auf die Schutzgüter Boden, Wasser, Luft und Klima durchgeführt. Im Fokus standen Peer-Reviewed-Studien aus gemäßigten Klimaregionen. Um eine größere Studienzahl zu erreichen, wurden auch Studien aus z. B. ariden Klimazonen und Studien mit alternativen Nutzungsformen, wie Agri-PV-Anlagen, berücksichtigt, jedoch gesondert bewertet. Auch auf graue Literatur wurde zum Teil zurückgegriffen, um den teils lückenhaften Forschungsstand zu füllen.

Die Recherche erfolgte für englisch- und deutschsprachige Literatur, vornehmlich in Google Scholar und ResearchGate. Außerdem dienten systematische Literaturstudien als Grundlagen für die Recherche (Chen et al., 2024; Hernandez et al., 2014; Krasner et al., 2025; Yavari et al., 2022; Zhang et al., 2023).

Für dieses Gutachten werden die Auswirkungen von PV-FFA anhand von Wirkfaktoren systematisch beurteilt und den jeweiligen Schutzgütern Boden, Wasser, Luft und Klima zugeordnet. Es wird zwischen folgenden Auswirkungsgruppen differenziert, da sie sich in unterschiedlicher Art, Intensität und Dauer auf die Schutzgüter auswirken können:

- Baubedingte Auswirkungen
- Anlagenbedingte Auswirkungen
- Betriebsbedingte Auswirkungen.

Innerhalb der Auswirkungsgruppen wird auf die verschiedenen Funktionen der Schutzgüter anhand verfügbarer Literatur eingegangen. Dabei wird weiterhin auf einzelne relevante Auswirkungen eingegangen. So wird beispielsweise beim Schutzgut Boden zwischen Auswirkungen durch Verdichtung, Bodenumlagerung, Substrat- und Stoffeinträgen sowie Erosion unterschieden.

Für die jeweiligen Wirkfaktoren werden Funktionseinschränkungen oder ggf. -verluste der Schutzgüter und deren Erheblichkeit eingeschätzt. Ein Überblick über relevante Studien zu PV-FFA und ihren Auswirkungen auf die Funktionen der Schutzgüter ist in Tabelle 4 zu finden.

1.5 Relevante Studien zu Auswirkungen von PV-Anlagen auf die Schutzgüter Boden, Wasser, Luft und Klima

In nachstehender Tabelle sind die im Zuge der Literaturrecherche ermittelten relevanten Studien zusammengestellt. Die Überblickstabelle vermittelt die wesentlichen Informationen zum Untersuchungsdesign und den ermittelten Auswirkungen auf die Schutzgüter Boden, Wasser sowie Luft und Klima. Auf Grundlagen der Studienlage und weiterer Quellen werden die möglichen Auswirkungen auf die Schutzgüter und deren Funktionen im Naturhaushalt bewertet.

Tabelle 4 Relevante Studien zu PV-FFA und ihren Ergebnissen zu Auswirkungen auf Funktionen der Schutzgüter Boden, Wasser, Luft- und Klima für gemäßigte Klimaregionen.

Studie	Dauer/ Zeitpunkt	Standort	Angaben zur Anlage	Gemessene Parameter	Einfluss auf die Funk- tion des Schutzgutes Boden	Einfluss auf die Funk- tion des Schutzgutes Wasser	Einfluss auf die Funk- tion des Schutzgutes Luft und Klima
Adeh et al. (2018)	2 Vegetati- onsperio- den	USA	Agri-PV, Aufstände- rung 1,1 m	Bodenfeuchte, Pflan- zenwachstum, Mikro- klima	höhere Bodenfeuchte und geringere Verduns- tung	k. A.	geringere Bodentempe- raturen und modifizier- tes Mikroklima unter PV-FFA
Armstrong et al. (2016)	12 Monate	UK	Südlich ausgerich- tete PV-FFA; 4,4 m Reihenbreite, 11,2 m Reihenabstand, 30° Neigung	Bodenatmung, -tem- peratur, -feuchte, C- Flüsse, Vegetations- entwicklung	mögliche Veränderun- gen der C-Dynamik und mikrobiellen Aktivität; tendenziell erhöhte Bo- denfeuchte durch Ver- schattung (insgesamt keine Signifikanz)	k. A.	reduzierte Bodentem- peratur und veränderte Strahlungsbilanz unter PV-FFA
Baiamonte et al. (2023)	k. A. (Si- mulation)	Italien (Sizi- lien)	simulierte PV- Modulflächen auf ge- neigten Hängen	Oberflächenabfluss	indirekt Erosionsrisiken möglich	Peak-Abfluss bis 11- fach höher als Referenz ohne Module	k. A.
Baumann et al. (2025)	erste 9 Wochen der Vege- tations- phase	Deutschland (Nordwest)	PV-Modul-Attrappe, 5 m × 1 m Module, 35° Neigung	Bodenfeuchte, -tem- peratur, photosynthe- tisch aktive Strahlung, Vegetationsbede- ckung, Biomasse	Veränderte Boden- feuchte in Schattenbe- reichen; indirekter Ein- fluss über veränderte Vegetationsdynamik	k. A.	deutliche Reduktion der Strahlung und lokales Mikroklima unter Modu- len

Studie	Dauer/ Zeitpunkt	Standort	Angaben zur Anlage	Gemessene Parameter	Einfluss auf die Funk- tion des Schutzgutes Boden	Einfluss auf die Funk- tion des Schutzgutes Wasser	Einfluss auf die Funk- tion des Schutzgutes Luft und Klima
Vandré (2024)	k. A.	Deutschland (Ermetz- hofen)	Ost-West-Anlage und südlich ausge- richtete PV-FFA	Infiltration, Boden- struktur, Oberflächen- abfluss	keine signifikante Ver- schlechterung der Bo- denstruktur; Vegetati- onsdecke stabilisiert Boden	Niederschlagsumvertei- lung durch Module, punktuell höhere Infil- tration an Tropfkanten	geringere Bodenerwär- mung im Schatten
Feistel et al. (2024)	Ca. 1,5 Jahre	Deutschland (Weesow, Pilnitz)	PV-FFA und Agri-PV	Bodenfeuchteprofile (10–100 cm), Eva- potranspiration	geringere Evapotrans- piration unter Modulen, höhere Bodenfeuchte in Trockenperioden	k. A.	lokale Abkühlung durch reduzierte Strahlung und Verdunstungsän- derungen
Lambert et al. (2021)	Beprobung auf 2 Jahre verteilt	Frankreich (südlich)	3 südlich ausgerich- tete PV-FFA; 4 m Reihenabstand, 30° Neigung	Bodenqualität, CO ₂ - Flüsse, Mikroklima, Vegetation	Verdichtung während Bauphase möglich; langfristig Stabilisierung Bodengefüge durch Ve- getation	Beschattung reduziert Verdunstung und be- einflusst Wasservertei- lung	niedrigere Bodentem- peraturen und gerin- gere CO ₂ -Emissionen aus Boden
Lambert et al. (2023)	Einmalige Beprobung (keine wei- teren An- gaben)	Frankreich (südlich)	10 PV-FFA (klas- sisch und der Sonne folgend)	Vegetationsstruktur, Bodenparameter	mehr Biomasse und Bodenorganik möglich; verbesserte Wasserre- tention durch Vegeta- tion	k. A.	lokal verändertes Mikro- klima durch Beschat- tung
Marrou et al. (2013)	1,5 Jahre	Frankreich (südlich)	Agri-PV	Mikroklima (Strahlung, Luft- und Bodentem- peratur), Bodenwas- ser, Pflanzenwachs- tum	veränderte Boden- feuchte	geringere Evapotrans- piration und veränderte Wasserflüsse im Boden	reduzierte Strahlung und Temperatur unter Modulen; veränderte Luftbewegung
Moscatelli et al. (2022)	Einmalig Beprobung 7 Jahre nach Fer- tigstellung	Italien	Südlich ausgerich- tete PV-FFA, 2 m Reihenabstand, 30° Neigung	Bodenchemie (C, N), pH, mikrobiologische Aktivität, Vegetation,	leichte Zunahme orga- nischer Substanz, ver- änderte mikrobielle Ak- tivität, geringere Boden- temperatur und Ver- dunstung unter Modu- len, erhöhte Boden- feuchte in teilbeschatte- ten Bereichen;	k. A.	k. A.

Studie	Dauer/ Zeitpunkt	Standort	Angaben zur Anlage	Gemessene Parameter	Einfluss auf die Funk- tion des Schutzgutes Boden	Einfluss auf die Funk- tion des Schutzgutes Wasser	Einfluss auf die Funk- tion des Schutzgutes Luft und Klima
Rück et al. (2011)	Einmalige Beprobung nach Fer- tigstellung	Deutschland (Nieder- sachsen)	klassische PV-FFA	Bodenzustand, Lage- rungsdichte, Wasser- durchlässigkeit, Ein- dringwiderstand, pH, nFK, Vegetation,	Verdichtung und Stö- rung während Bau- phase	veränderte Versicke- rung durch Bodenver- dichtung	geringfügige lokale Mikroklimaänderungen
Scholten et al. (2025)	4 bis 7 Mo- nate	Niederlande	17 PV-FFA; südliche Ausrichtung, verein- zelt Ost-West,	Bodenfeuchte, Mikro- klima, Vegetationsbio- masse	Bodenfeuchte unter PV-Modulen eher gleichbleibend als in Lücken: dort im Som- mer trockener, ab Herbst feuchter	k. A.	geringere Einstrahlung unter Modulen; Tempe- raturunterschiede zwi- schen Modul- und Zwi- schenflächen (bis ca. 1 °C)
Vervloesem et al. (2022)	1 bis 2 Jahre	Italien	10 PV-FFA	Bodenoberflächentem- peratur, Mikroklima, Pflanzenvielfalt	Niedrigere Oberflä- chentemperatur, pH und Pflanzenbiodiversi- tät unter Modulen	k. A.	geringere Lufttempera- tur; höhere Luftfeuchtig- keit unter Modulen
Zappek et al. (2025)	4 Monate	Deutschland (Sachsen)	3 südlich ausgerich- tete PV-FFA, 3 bis 7 m Reihenabstand	Vegetation, Boden- feuchte, Nährstoffindi- katoren	Nährstoffanreicherung durch Beweidung unter Modulen	höhere Bodenfeuchte zwischen und an Mo- dulkanten	lokale Beschattung be- einflusst Mikroklima

2 Baubedingte Auswirkungen

Die baubedingten Auswirkungen ergeben sich neben dem Bau der PV-Module und ihrer Unterkonstruktion, durch den Bau von Trafostationen, das Anlegen von Zuwegungen und Wartungswegen und die Verlegung von Erdkabeln, um den Anschluss an das bestehende Stromnetz zu gewährleisten (siehe Kapitel 1.3). Hauptwirkfaktoren durch Baumaßnahmen sind Verdichtung, Umlagerung, Substrat- und Stoffeinträge und Erosionen.

2.1 Baubedingte Auswirkungen auf das Schutzgut Boden

Die Baumaßnahmen können sich insbesondere auf das Schutzgut Boden auswirken. Mögliche Auswirkungen während der Bauphase sind stark von den Bodeneigenschaften, der Witterung und den Ausführungsbedingungen abhängig. Vergleichende Studien zu Auswirkungen der Baumaßnahmen während der Errichtung von PV-FFA, welche sich explizit auf das Schutzgut Boden konzentrieren, gibt es nur wenige.

Im Folgenden werden die potenziellen Beeinträchtigungen anhand der Hauptwirkfaktoren dargelegt, welche durch Baumaßnahmen von PV-FFA auf das Schutzgut Boden und seinen Funktionen ausgelöst werden können (vgl. Tabelle 5). In den folgenden Unterkapiteln werden die möglichen Auswirkungen fachlich begründet.

Tabelle 5 **Potenzielle baubedingte Auswirkungen auf Bodenfunktionen**

Baubedingte Wirkfaktoren	Lebensraumfunktion	Speicherungs-, Regulations-/ Pufferfunktion	Klimafunktion	Produktionsfunktion	Archivfunktion
Verdichtung	x	x	x	x	o
Umlagerung*	x	x	x	x	x
Substrat-/Stoffeinträge*	x	o	o	x	o
Erosion*	x	x	x	x	o

* Aufgrund fehlender Literaturquellen sind diese potenziellen Auswirkungen hergeleitet.

x: Potenzielle Auswirkungen mit höherer Wahrscheinlichkeit zu erwarten.

o: Potenzielle Auswirkungen mit geringerer Wahrscheinlichkeit zu erwarten.

2.1.1 Bodenverdichtungen

Durch den Einsatz schwerer Baumaschinen kann es bei Überschreitung der Tragfähigkeit des Bodens zu Porenraumverlust und erhöhten Lagerungsdichten kommen. Dies führt zu eingeschränktem Wurzelwachstum, verminderter Wasserleitfähigkeit und reduzierter Nährstoffverfügbarkeit für Pflanzen und Mikroorganismen.

Untersuchungen zeigen erhöhte Lagerungsdichten und verringerte Wasserdurchlässigkeit insbesondere unter PV-Modulen und auf stark befahrenen Baueinrichtungsflächen (Carvalho et al., 2025; Rück et al., 2011).

In der Studie von Carvalho et al. (2025) wurden 32 PV-FFA in England and Wales untersucht. Die Bodenverdichtung war unter den PV-Modulen um 14,4 % bzw. 15,5 % höher als in den zwischen den Modulreihen und auf den Weiden, die als Kontrollflächen neben den PV-FFA beprobt wurden. Die Böden zwischen den Modulreihen wiesen ein ähnliches Maß an Verdichtung wie unter dem Weideland auf.

Die Autoren führen dies auf den Einsatz schwerer Maschinen während des Baus zurück, wobei auch Vorbelastungen durch nicht schonende landwirtschaftliche Praktiken nicht ausgeschlossen werden können. Während die Begrünung zwischen den Modulreihen zu einer Erhöhung der Bodenporosität und -belüftung und so zu einer Verringerung der Verdichtung beitrugen, war unter den PV-Modulen keine Lockerung nach Bauabschluss möglich und auch die Vegetationsausbildung, von der ein gewisser Lockerungseffekt durch die Wurzelbildung ausgehen kann, war geringer. Die Autoren beobachteten zusätzlich, dass die Schafe den Schatten der PV-Module bevorzugten, so dass dort Verdichtungen auch von der Weidehaltung intensiviert werden könnten (vgl. auch 4.1).

In der Untersuchung von Rück et al. (2011) wurden erhöhte Lagerungsdichten ($+ 0,09 \text{ g/cm}^3$), nach der Errichtung einer PV-FFA ermittelt, da zu schwere Baufahrzeuge bei der Zulieferung von Baumaterialien den ungeschützten Boden verdichtet hatten. Außerdem waren die Eindringwiderstände ($+ 2,29 \text{ MPa}$) durch die Baumaßnahme erhöht und die Wasserdurchlässigkeit ($K_f - 63 \text{ cm/d}$) reduziert. Verglichen wurde der nach Baumaßnahmen verdichtete Oberboden mit einem „normal vorbelasteten Unterboden“. Bei der Untersuchung handelte es sich um nur einen Standort mit vier untersuchten Bodenprofilen, so dass die Aussagen nicht generalisierbar sind.

Nach der Errichtung einer PV-FFA auf einem zuvor ackerbaulich genutzten Lössstandort führte das Ingenieurbüro Feldwisch stichprobenartige Untersuchungen der baubedingten Verdichtungen durch (Ingenieurbüro Feldwisch (2024), nicht veröffentlicht). An vier Bodenschürfen wurden nach Baufeldräumung und vor der Rekultivierung in verschiedenen Bodentiefen jeweils in fünffacher Wiederholung ungestörte Bodenproben mittels 100 cm^3 großen Stechringen gewonnen und daran die Trockenrohdichten ermittelt (Abb. 2).

Die Bodenschürfe lagen zwischen den PV-Tischen („Weg“), unter einem PV-Tisch („unter PV“), im Bereich einer stark befahren und nicht ausreichend geschützten Baueinrichtungsfläche („BE-Fläche“) und der benachbarten Ackerfläche („Acker“) als Referenz. Die ungefähren Positionen sind im Schrägluftbild mit Pfeilen gekennzeichnet.

Beispielhaft sind die Trockenrohdichten der ersten Tiefenstufe aufgeführt, die aus probentechnischen Gründen zwischen 10 und 20 cm unter Geländeoberkante lag.

Es wird deutlich, dass baubedingte Verdichtungen auftreten, die insbesondere bei einer nicht fachgerechten Befestigung stark frequentierter Bereiche wie der BE-Fläche sehr stark ausfallen können und geeignet sind, schädliche Bodenveränderungen im Sinne des Bodenschutzrechts auszulösen. So wurden auf der BE-Fläche mittlere Trockenrohdichten $1,81 \text{ g/cm}^3$ (Median: $1,85 \text{ g/cm}^3$) ermittelt, wohingegen auf der Referenzfläche mittlere Werte von $1,49 \text{ g/cm}^3$ (Median: $1,51 \text{ g/cm}^3$) gemessen worden sind. Zwischen und unter den PV-

Tischen war auch eine Verdichtungswirkung nachweisbar, allerdings auf einem geringeren Niveau. Die Einzelfalluntersuchungen von Ingenieurbüro Feldwisch (2024, nicht veröffentlicht) zeigen anschaulich das Beeinträchtigungspotenzial auf, sind aber nicht generalisierbar, weil sie nur von einem Standort und ohne Wiederholungsuntersuchungen in den verschiedenen Teilflächen der FF-PFA stammen.

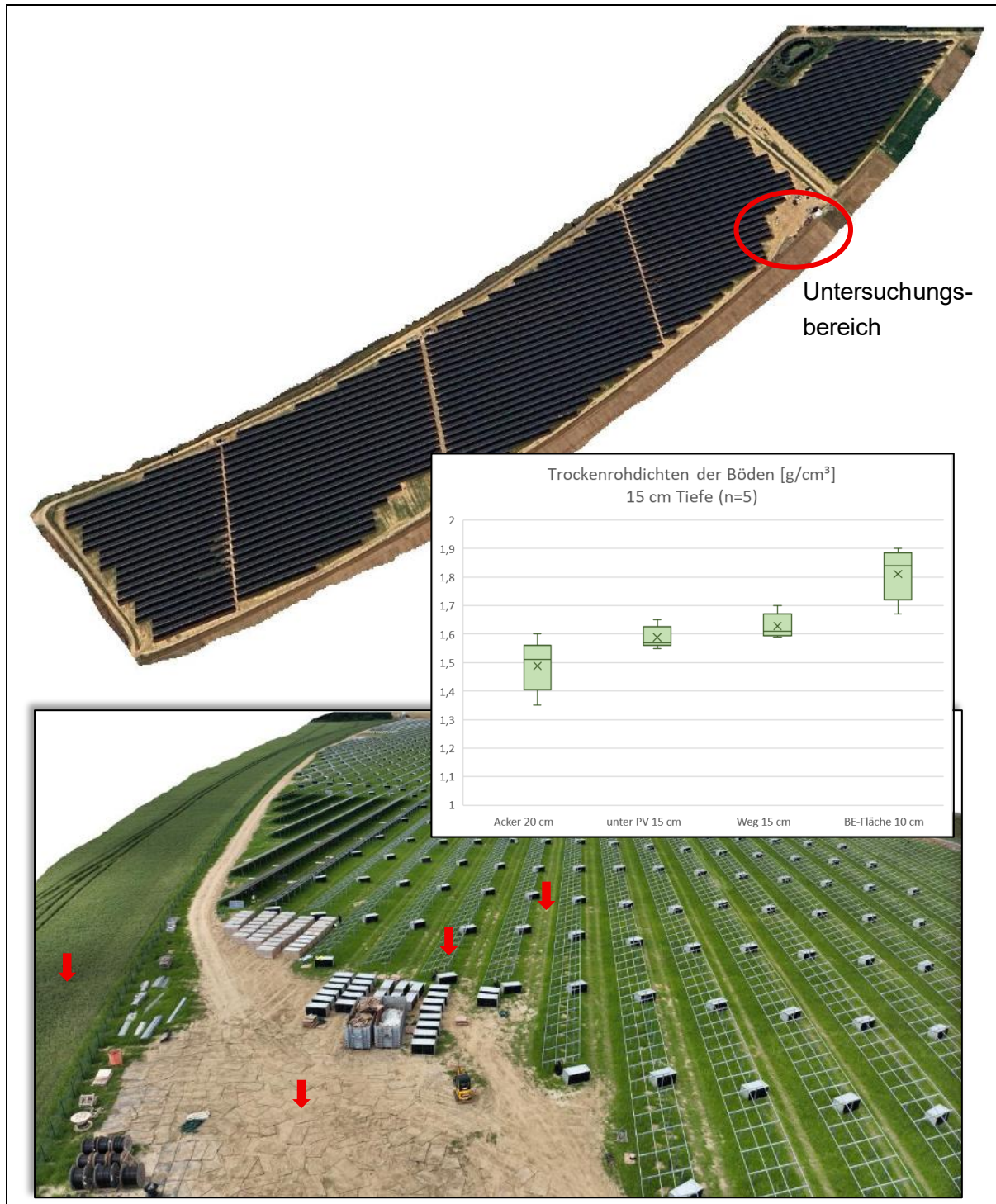


Abbildung 2 Untersuchungen der Verdichtungswirkungen einer PV-FFA auf einem zuvor ackerbaulich genutzten Lössstandort; Lage der Bodenschürfe mit Pfeilen gekennzeichnet (Quelle: Ingenieurbüro Feldwisch).

Von den Autoren des Fachgutachtens konnten sehr starke Verdichtungsschäden auch beim Bau einer senkrechten Agri-PV-Anlage auf einem Lössstandort im Rheinland beobachtet werden (Abbildung 3). Der Bau erfolgte in den nassen Wintermonaten ohne jede Vermeidungsmaßnahme auf dem ungeschützten Boden. Die Befahrungen verursachten Fahrspurtiefen bis 50 cm Tiefe.



Abbildung 3 Starke Verdichtungsschäden im Zuge des Baus einer vertikalen Agri-PV-Anlage (Quelle: Ingenieurbüro Feldwisch).

Vergleichend können Untersuchungen zu Bodenauswirkungen anderer Vorhabentypen herangezogen werden, weil die grundsätzlichen Wirkmechanismen auch auf PV-FFA übertragen werden können. Beispielsweise wurden im Rahmen baubegleitender Untersuchungen eines Erdkabelprojekts die Bodeneigenschaften sowie die landwirtschaftlichen Erträge an verschiedenen Standorten systematisch erfasst und im Vergleich zu ungestörten Böden neben dem Kabelgraben analysiert (Feldwisch et al., 2023). Die Verlegung dieser Erdkabel verläuft ebenfalls größtenteils im offenen Graben. Der Eingriff ist mit einer Verlegetiefe von ca. 2 m deutlich tiefer. Es lassen sich jedoch wichtige Erkenntnisse zu potenziellen Folgen und Minderungsmaßnahmen ziehen.

Beispielsweise waren die Verdichtungswirkungen unterhalb der mit Lastverteilungsplatten befestigten Baustraße, die auf den begrüneten Oberböden ausgelegt worden sind, nur sehr gering und deutlich unterhalb einer Schädlichkeitsschwelle. Auch die Porengrößenverteilung und die nutzbare Feldkapazität (= pflanzenverfügbares Wasserspeichervermögen der

Böden) wurden unter den Baustraßen nicht wesentlich beeinträchtigt. Weiterhin wurden auch die Ertragsparameter nicht signifikant verändert. Die von anderen Autoren berichteten Auswirkungen von Baustraßen, die beim Leitungsbau zum Teil noch nach Jahrzehnten im Boden nachweisbar sind (u. a. Brehm & Culman, 2022), konnten durch die schonende Bauausführung bei der untersuchten Erdkabeltrasse vermieden werden.

Die Studie von Feldwisch et al. (2023) macht deutlich, dass ein effektiver Schutz der Böden vor schädlichen Verdichtungswirkungen mit Hilfe von fachgerecht befestigten Baustraßen möglich ist. Diese Kernaussage ist auch auf baubedingte Verdichtungswirkungen von PV-FFA übertragbar.

Die geringere Porosität und Sauerstoffverfügbarkeit im Boden kann die die Wurzelentwicklung und mikrobielle Aktivität hemmen, wodurch die Lebensraum- und die Produktionsfunktion beeinträchtigt werden können. Verdichtete Böden weisen reduzierte Infiltrationsraten und geringere Wasserleitfähigkeit auf, wodurch verstärkte Oberflächenabflüsse, Staunässe und gestörte Nährstoffkreisläufe entstehen können. Mit dem Oberboden werden nicht nur Nährstoffe, sondern auch organisch gebundener Kohlenstoff abgetragen (vgl. 2.1.3 und 2.1.4.) Somit wird nicht nur die Speicherungs-, Regelungs- und Pufferfunktion, sondern auch die Klimafunktion nachhaltig gestört. Auch die im Boden gespeicherten Informationen zur Natur- und Kulturgeschichte können durch massive bis in den Unterboden wirkende Verdichtungen gestört werden, so dass die Archivfunktion beeinträchtigt werden kann.

2.1.2 Umlagerungen

Erkenntnisse aus Rohrleitungsbauprojekten (Brehm & Culman, 2022) zeigen, dass Vermischungen des Ober- und Unterbodens bei allen Eingriffen in Böden häufig auftreten und langfristige Veränderungen der Bodenfunktionen, namentlich der Lebensraum- und Produktionsfunktionen verursachen können. Gründe sind eine veränderte Nährstoffverteilung, Durchwurzelbarkeit und Lebensraumbedingungen im Boden.

Vermischungen können beim Bau von PV-FFA ebenfalls auftreten (Abbildung 4). Unsachgemäße Erdarbeiten können durch Vermischung von Ober- und Unterboden zu einer veränderten Nährstoffverteilung, Durchwurzelbarkeit und Lebensraumbedingungen im Boden führen, wodurch die Produktions- und Lebensraumfunktion beeinträchtigt werden. Veränderungen der physikalischen und chemischen Bodeneigenschaften beeinflussen die Speicherungs-, Regelungs- und Pufferfunktion. Die Klimafunktion wird durch veränderte Kohlenstoffgehalte und Kohlenstoffumsetzungsprozesse potenziell beeinflusst. Die Archivfunktion kann punktuell ebenfalls beeinträchtigt werden. Empirische Studien, welche PV-FFA unter diesem Aspekt untersuchen, liegen allerdings nicht vor.



Abbildung 4 Substratvermischungen durch fehlende Trennung des Ober- und Unterbodens und des Bettungsmaterials (Quelle: Ingenieurbüro Feldwisch).

2.1.3 Substrat- und Stoffeinträge

Während der Bauphase können Kraftstoffe, Öle, mineralische Fremdbestandteile oder Störstoffe in den Boden gelangen. Solche Einträge können Bodenorganismen schädigen und die natürliche Pufferkapazität verringern, in deren Folge das Grundwasser durch erhöhte Stoffausträge mit dem Sickerwasser gefährdet wird.

Untersuchungen anderer Bauprojekte (Helmus et al., 2016) zeigen, dass insbesondere Baustelleneinrichtungen potenzielle Eintragsquellen für Verunreinigungen darstellen. Einträge von Kraftstoffen, Ölen, mineralische Fremdbestandteile oder Störstoffe können Bodenorganismen (Lebensraumfunktion) schädigen, die Produktionsfunktion und die natürliche Regelungs- und Pufferfunktion verringern, in deren Folge auch das Grundwasser durch erhöhte Stoffausträge mit dem Sickerwasser gefährdet wird (2.2). Es können ja nach Höhe der Einträge alle Bodenfunktionen beeinträchtigt werden.

Bislang fehlen jedoch Studien, welche die potenziellen Einträge von Schadstoffen, mineralischen Fremdbestandteilen und Störstoffen bei der Errichtung von PV-FFA quantifiziert.

2.1.4 Erosion

Wird die schützende Vegetationsdecke während der Bauphase entfernt oder der Boden stark verdichtet, steigt das Risiko von Wasser- und Winderosion (vgl. Abbildung 5).



Abbildung 5 Abfluss- und Erosionsschäden auf einer PV-FFA, die zu Baubeginn nicht ausreichend begrünt war (Quelle: Ingenieurbüro Feldwisch).

Entsprechende Beobachtungen konnten die Autoren des Fachgutachtens beim Bau einer ca. 23 ha großen PV-FFA im hügeligen Unteren Westerzgebirge in Folge nicht ausreichender Vorbegrünung der ehemaligen Ackerfläche machen (Abbildung 6).



Abbildung 6 Bodenerosion in der Bauphase einer ca. 23 ha großen PV-FFA im hügeligen Unteren Westerzgebirge in Folge nicht ausreichender Vorbegrünung der ehemaligen Ackerfläche (Quelle: Ingenieurbüro Feldwisch)

Das Niederschlagswasser konzentrierte sich u.a. in Richtung des zum unteren Bildrand abfallenden Geländes und trat von der Anlagenfläche über die Böschung auf den Feldweg über, siehe Pfeilmarkierung und kleiner Bildausschnitt. Über den Feldweg wurde der Abfluss mit dem Erosionsmaterial schnell in Richtung des Fließgewässers weitergeleitet.

Modellierungen zeigen eine erhöhte Erosionsanfälligkeit bei Böden ohne schützende Vegetationsdecke auf PV-FFA (Liu et al., 2023). Untersuchungen im mediterranen Raum ergaben, dass die Rodung und Planierung der Bodenoberfläche während des Baus zu einer starken Verschlechterung der physikalischen Bodenqualität führten, insbesondere der Bodenstruktur (Lambert et al., 2021). Eine zerstörte Bodenstruktur kann dazu führen, dass Regenwasser die Oberfläche verschlämmt und damit die Porenkontinuität bis zur Bodenoberfläche unterbricht. Dadurch kann die Infiltration von Niederschlagswasser erheblich reduziert und damit der Oberflächenabfluss erheblich verstärkt werden, in deren Folge die Bodenerosion erheblich zunimmt.

Die Erosion von Oberboden führt zu Humusverlust, Nährstoffverlagerung und zur Verringerung der nutzbaren Feldkapazität. Damit wird die Lebensraum- und Produktionsfunktion unmittelbar gemindert. Verschlechterungen der physischen und chemischen Bodeneigenschaften beeinträchtigen die Speicherungs-, Regelungs- und Pufferfunktion. Die Klimafunktion wird insbesondere durch den Abtrag humusreicher Oberböden gestört. Die

Archivfunktion kann lediglich bei tiefgreifenden Erosionsformen, die bis in den Unterboden mit seinen archivarischen Merkmalen reichen, beeinträchtigt werden.

2.1.5 Zwischenfazit

Baubedingte Auswirkungen auf das Schutzgut Boden betreffen potenziell alle natürlichen Bodenfunktionen. Belegt sind Auswirkungen durch Bodenverdichtungen, Substratvermischungen und Erosion. Auswirkungen durch Schadstoffeinträge sind nicht explizit für PV-FFA belegt, jedoch anhand von Analogieschlüssen aus Untersuchungen anderer Vorhabentypen möglich.

Das Ausmaß der Beeinträchtigungen hängt maßgeblich von der Bauausführung ab. Bei konsequent bodenschonender Planung und Umsetzung können die Auswirkungen gering bis vernachlässigbar sein. Ohne geeignete Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen können jedoch erhebliche und teilweise langfristige Funktionsbeeinträchtigungen entstehen.

2.2 Baubedingte Auswirkungen auf das Schutzgut Wasser

Bei bauzeitlich fehlender Vegetationsdecke, zu hoher mechanischer Beanspruchung des Bodens oder nicht fachgerechter Wiederverfüllung des Bodenaushubs entlang der erdverlegten Anschlussleitungen der PV-FFA können die Bodenfunktionen so stark beeinträchtigt werden (siehe 2.1), dass die Infiltration, Speicherung und Versickerung von Niederschlagswasser erheblich verringert werden. In der Folge ist mit deutlich erhöhtem Oberflächenabfluss (Direktabfluss) und erhöhter Bodenerosion zu rechnen, was wiederum zu Wasserübertritten sowie Sediment- und Stoffeinträgen in Oberflächengewässer führen kann. Auswirkungen von PV-FFA sind auf Oberflächengewässer möglich durch erhöhte Direktabflüsse auf den PV-FFA und damit verbundenen Sediment- und Stoffeinträgen in die Oberflächengewässer.

Im Gegensatz dazu sind auf das Grundwasser marginale Auswirkungen zu erwarten. Die Grundwasserneubildung wird durch die kleinflächig veränderten Abflussverhältnisse durch PV-FFA auf einen Grundwasserkörper nicht messbar bis geringfügig verändert. Auch sind keine messbaren stofflichen Auswirkungen auf das Grundwasser zu erwarten.

Im Falle von Unfällen und Havarien können boden- und wassergefährdende Stoffe, wie Kraftstoffe und Öle, in angrenzende Oberflächengewässer und das Grundwasser gelangen. Durch Aufstellen eines Alarmplans vor Baubeginn, können Umweltauswirkungen weitestgehend ausgeschlossen werden.

Die Hauptwirkfaktoren für das Schutzgut Wasser ergeben sich somit indirekt durch die bodenfunktionalen Auswirkungen aus Verdichtung, Umlagerung, Substrat- und Stoffeinträge sowie Erosion.

Tabelle 6 Potenzielle baubedingte Auswirkungen auf Funktionen des Schutzgutes Wasser

Baubedingte Wirkfaktoren	Lebensraum-funktion	Phys.-chemi-sche Wasser-funktion	Wasserhaus-haltsfunktion	Abflussregu-lationsfunk-tion	Grundwas-serdargebot/ Trinkwasser-bereitstellung
Verdichtung*	x	x	x	x	o
Umlagerung*	o	o	o	o	o
Substrat-/Stoffeinträge*	o	o	o	o	o
Erosion*	x	x	x	x	o

* Aufgrund fehlender Literaturquellen sind diese potenziellen Auswirkungen hergeleitet.

x: Potenzielle Auswirkungen mit höherer Wahrscheinlichkeit zu erwarten.

o: Potenzielle Auswirkungen mit geringerer Wahrscheinlichkeit zu erwarten.

Empirische Studien, welche den Einfluss der Baumaßnahmen auf das Schutzgut Wasser untersuchen, liegen nicht vor.

2.3 Baubedingte Auswirkungen auf das Schutzgut Luft und Klima

Die Luftqualität kann durch baubedingte Verunreinigungen (Staub, Abgase) zeitlich begrenzt gemindert werden (Wieser et al., 2021).

Hier besteht wiederum ein Zusammenhang zu den bodenfunktionalen Auswirkungen. Bei fehlender Vegetationsdecke während der Bauphase sowie bei Bodenbeeinträchtigungen durch Verdichtungen, Umlagerungen und Erosion werden potenziell auch die Staubemissionen erhöht.

Empirische Studien, welche den Einfluss der Baumaßnahmen von PV-FFA auf das Schutzgut Luft und Klima untersuchen, liegen nicht vor. Die Baumaßnahmen sind temporär und dürften keine dauerhaften und erheblichen Auswirkungen auf die klimatischen Ausgleichs- und Transportfunktionen der Baufläche haben.

3 Anlagebedingte Auswirkungen

Anlagebedingte Wirkungen gehen vor allem von den Modulen, der Aufständerung und Nebengebäuden aus. PV-FFA verändern die Standortbedingungen durch punktuelle Versiegelung, Beschattung und veränderte Niederschlagsverteilung durch Überschirmung. Aber auch eine veränderte Landnutzungsform kann die betrachteten Schutzgüter beeinflussen.

3.1 Anlagebedingte Auswirkungen auf das Schutzgut Boden

Die anlagebedingten Auswirkungen stehen insbesondere durch ihren Einfluss auf die Lebensraumfunktionen, Speicherungs-, Regelungs- und Pufferfunktion sowie Klimafunktion in enger Wechselwirkung mit den Auswirkungen auf den Wasserhaushalt (vgl. 3.2) und klimatischen Auswirkungen (vgl. 3.3).

Im Folgenden werden die potenziellen Beeinträchtigungen anhand der Hauptwirkfaktoren dargelegt, welche anlagebedingt von PV-FFA auf das Schutzgut Boden und seinen Funktionen ausgelöst werden können (vgl. Tabelle 7).

Tabelle 7 Potenzielle anlagenbedingte Auswirkungen auf Bodenfunktionen

Anlagebedingte Wirkfaktoren	Lebensraumfunktion	Speicherungs-, Regelungs-/Pufferfunktion	Klimafunktion	Produktionsfunktion	Archivfunktion
Versiegelung*	o	o	o	o	o
Verschattung/ Abschirmung	x	x	x	x	o
Landnutzungsänderung	x	x	x	x	o

* Aufgrund fehlender Literaturquellen sind diese potenziellen Auswirkungen hergeleitet.

x: Potenzielle Auswirkungen mit höherer Wahrscheinlichkeit zu erwarten.

o: Potenzielle Auswirkungen mit geringerer Wahrscheinlichkeit zu erwarten.

3.1.1 Versiegelung

Im Bereich von Trafostationen, Fundamenten oder Zuwegungen kann es zu dauerhaften Versiegelungen kommen. In diesen Bereichen werden natürliche Bodenfunktionen – wie, Lebensraumfunktion, Speicherungs-, Regelungs- und Pufferfunktion, Klimafunktion sowie die Produktionsfunktion vollständig aufgehoben. In den versiegelten Teilflächen kann auch die Archivfunktion des Bodens gestört werden, wenn die Befestigungen bis in die für die Archivfunktion relevante Bodenschicht, die im Regelfall im Unterboden liegt, eingreifen.

Die Verwendung von Betonfundamenten führt im Vergleich zu Ramm- und Schraubfundamenten zu einer größeren versiegelten Fläche (Miller & Peter, 2023). Insgesamt ist der Versiegelungsanteil bei PV-FFA jedoch relativ gering und liegt bei etwa unter 2 bis 5 % der Betriebsfläche (Günnewig et al., 2007). Negative Auswirkungen durch Versiegelung sind daher flächenmäßig begrenzt.

3.1.2 Verschattung und Abschirmung

Die Überschirmung der Fläche durch PV-Module – bei klassischen Anlagen etwa 60 bis 80 % der bebaubaren Fläche (Günnewig et al., 2024) – reduziert die photosynthetisch aktive Strahlung unter den PV-Modulen. Der Grad der Verschattung, von dauerhaft bis im Tagesverlauf zeitlich beschränkt, ist dabei von der Anlagenkonfiguration, insbesondere der Größe der zusammenhängenden Modulfläche und der Höhe ihrer Aufständering abhängig (Herden et al., 2009). Diese Verschattung führt häufig zu geringerem Pflanzenwachstum (Armstrong et al., 2016; Lambert et al., 2023; Vervloesem et al., 2022). und verändert die Artenzusammensetzung zugunsten schattentoleranter Pflanzen (Lambert et al., 2021; Uldrijan et al., 2023).

Ein reduzierter Pflanzenaufwuchs verringert den Eintrag organischer Substanz in den Boden und kann die mikrobielle Aktivität beeinflussen (Bhattacharyya et al., 2022). Studien aus den Niederlanden (Scholten et al., 2025) zeigen zwar eine reduzierte Pflanzenproduktion unter den Modulen, jedoch kurzfristig keine signifikanten Veränderungen der Bodenkohlenstoffvorräte. Langfristig gehen die Autoren von einer Abnahme der organischen Substanz und einer Verschlechterung der Bodengesundheit aus.

Für Deutschland, wo PV-FFA häufig auf ehemaligen Acker- oder Grünlandflächen errichtet werden, bedeutet dies, dass vor allem die beschattungsbedingten Veränderungen der Vegetation und der organischen Stoffeinträge relevant sind.

Eine systematische Literaturanalyse von Krasner et al. (2025) zeigt global keine einheitliche Entwicklung der Kohlenstoffvorräte unter PV-Anlagen. Je nach Landnutzung können die Kohlenstoffvorräte unter Modulen sinken, insbesondere wenn der Pflanzenaufwuchs reduziert ist (vgl. 3.1.3).

Untersuchungen in England und Wales ergaben niedrigere Kohlenstoffgehalte durch die niedrigere Pflanzenbiomassen unter den Modulen im Vergleich zu den Modulzwischenräumen (Carvalho et al., 2025). Gleichzeitig wurden höhere mineralische Stickstoffgehalte unter den Modulen festgestellt, während der pflanzenverfügbare Phosphorgehalt von PV-FFA insgesamt höher war als auf Kontrollflächen. Eine Studie aus dem mediterranen Raum zeigte nach sieben Jahren unter den PV-Modulen eine deutliche Abnahme des Kohlenstoffgehalts sowie eine verringerte mikrobielle Aktivität (Moscatelli et al., 2022), was wiederum in Verbindung mit dem weiter oben beschriebenen reduzierten Pflanzenaufwuchs, geringerem Eintrag organischer Substanz in den Boden und folglich auch geringerer Aktivität des Bodenlebens gebracht werden kann. Zwischen den PV-Modulen wurden höhere Kohlenstoffgehalte ermittelt.

Reduzierte Kohlenstoffvorräte können die Nährstoffspeicherfähigkeit, das Bodenleben und damit die langfristige Bodenfruchtbarkeit beeinträchtigen. Davon betroffen sind die natürlichen Bodenfunktionen. Entscheidend für die tatsächlichen Auswirkungen sind insbesondere Standortbedingungen, vorherige Landnutzung sowie das Vegetations- und Flächenmanagement innerhalb der PV-FFA.

Die Beschattung und Niederschlagsumverteilung beeinflussen Bodenfeuchte und somit die Wasserverfügbarkeit für Pflanzen und Mikroorganismen. In mediterranen Standorten wurde eine deutliche Abnahme der Wasserhaltekapazität unter den PV-Modulen festgestellt (Moscatelli et al., 2022). Durch eine Abnahme des Kohlenstoffgehaltes sinkt auch die Wasserhaltekapazität des Bodens. Für gemäßigte Klimazonen ist mit einer geringeren Abnahme der Wasserhaltekapazität unter den PV-Modulen zurechnen. Der Effekt kann sich jedoch mit sinkenden Humusgehalten verstärken.

Die Verschattung durch PV-Module kann die Evapotranspiration reduzieren, wodurch die Bodenfeuchtigkeit insbesondere während Trockenperioden länger erhalten bleibt. Entsprechend wurden in mehreren Studien erhöhte Bodenfeuchtegehalte sowohl in konventionellen FFA (Feistel et al., 2024; Scholten et al., 2025) als auch in Agri-PV-Systemen (Adeh et al., 2018)⁴ festgestellt.

Andere Untersuchungen zeigen jedoch keine signifikanten Unterschiede in der Bodenfeuchte. Armstrong et al. (2016) stellten fest, dass Niederschlagswasser entlang der Modulrahmen abläuft und den Boden relativ gleichmäßig befeuchtet. Choi et al. (2020) beobachteten jedoch eine heterogene Verteilung der Bodenfeuchte, da sich Niederschläge teilweise an den unteren Modulrändern konzentrieren.

Reviews zur Hydrologie von PV-FFA zeigen, dass typischerweise der Bereich unterhalb der Abtropfkanten der Module dauerhaft feuchter ist, während die Zwischenräume der Modulreihen tendenziell trockener bleiben (Yavari et al., 2022). Die tatsächliche Bodenfeuchteverteilung hängt jedoch stark von klimatischen Bedingungen, Moduldesign sowie dem Verhältnis von Evapotranspiration und Oberflächenabfluss ab (Krasner et al., 2025)

Für gemäßigte Klimazonen deuten die bisherigen Erkenntnisse auf kleinräumige Umverteilungen der Bodenfeuchte hin. Mit zunehmender Überdeckung der Fläche durch Module kann sich dieser Effekt verstärken. Bei Anlagen mit hoher Grundflächenzahl besteht die Möglichkeit, dass der Boden unter den Modulen aufgrund reduzierter Niederschlagseinträge austrocknet. Solche Beobachtungen wurden beispielsweise bei einer Ost-West-Anlage dokumentiert (Vandré, 2024). Umgekehrt können beschattete Flächen, die weiterhin Niederschlag erhalten, besonders hohe Bodenfeuchtegehalte aufweisen (Zappek et al., 2025).

In einem noch nicht abgeschlossenen Forschungsprojekt zum landwirtschaftlichen Wert von Solarparks⁵ gibt es ebenfalls Hinweise, dass Flächen im Schatten und teilweise im Halbschatten im Herbst eine deutlich höhere Bodenfeuchte aufweisen als die entsprechenden Positionen in der offenen Referenzfläche (Hamidi, 2026). Die Autorin vermutet, dass Lücken zwischen den in den Modulreihen von wenigen Zentimetern („Fenster“) zu einer erhöhten Feuchtigkeit beitragen können (persönliche Mitteilung). Entsprechende Beobachtungen haben die Autoren des vorliegenden Fachgutachtens bei einer Anlage gemacht, bei der zwischen den Modulen nur eine Lücke von 2 cm vorhanden war; während eines

⁴ Durch die vergleichsweise niedrige Aufständering von 1,1 m ähnelt der Aufbau dieser Agri-PV-Anlage eher einer klassischen PV-FFA. Das Klima des Versuchsstandortes ist mediterran mit gemäßigten Einflüssen.

⁵ [Landwirtschaftlicher Wert von Solarparks - Sonne Sammeln](#) (12.03.2026)

moderaten Niederschlags konnte das Abtropfen des Niederschlags an der Unterkante jedes einzelnen Moduls beobachtet werden. Damit zeichnet sich eine Möglichkeit ab, dass ein konzentriertes Abtropfen des gesamten Niederschlags an der Unterkante des unteren Moduls und damit eine sehr starke Veränderung des Bodenfeuchtereimes verhindert werden kann, wenn Lücken in den Modulreihen eingebaut werden. In einer Untersuchung mit PV-Modul-Attrappen, welche keine Lücken zwischen den einzelnen PV-Modulen hatten, nahm die Bodenfeuchte nach einigen Wochen tendenziell eher ab (Baumann et al., 2025).

Ein wichtiger Aspekt ist der Schutz vor Bodenerosion, so dass der Rückhalt von Sedimenten und Nährstoffen gewährleistet ist, bevor diese in unterliegende Flächen oder Oberflächengewässer gelangen. Somit stehen die Bodenfunktionen im engen Verhältnis zu den Funktionen des Wassers im Naturhaushalt. Bei erhöhtem Oberflächenabfluss und verstärkter Bodenerosion besteht die Gefahr, dass Sedimente sowie daran gebundenen Nährstoffe aus PV-FFA in angrenzende Gewässer eingetragen werden. Dies kann insbesondere bei fehlender Vegetationsbedeckung oder während der Bauphase auftreten (vgl. 2.1.4).

Das von den PV-Modulen abfließende Wasser weist häufig eine höhere kinetische Energie auf als natürlicher Niederschlag. Niederschlagswasser sammelt sich auf der Moduloberfläche und gelangt konzentriert über die Abtropfkante auf den Boden. Dadurch entstehen lokal erhöhte Erosionserscheinungen insbesondere im Bereich der Tropfkanten (Cook & McCuen, 2013; Vandré, 2024).

Modellierungen für hügelige L sslandschaften zeigen, dass sowohl während der Bauphase als auch während des Betriebs von PV-FFA erhöhte Erosionsraten auftreten können (Liu et al., 2023). Dabei reagieren die Erosionsraten stärker auf einzelne Starkniederschläge als auf die jährliche Niederschlagsmenge oder die Reliefenergie des Geländes. Besonders hohe Erosionsraten wurden innerhalb der Anlagenflächen selbst sowie in den unterhalb liegenden Hangbereichen festgestellt.

Experimente mit Regensimulationen bestätigen, dass PV-FFA insbesondere an Hanglagen zu erhöhten Erosionsraten führen können, wenn keine ausreichende Vegetationsbedeckung vorhanden ist (Baiaomonte et al., 2023).

Gleichzeitig berichten Wang & Gao (2025) aus ariden und semiariden Regionen auch gegenteilige Effekte. Nach Auffassung der Autoren können PV-Module die Aufprallenergie von Regentropfen reduzieren und dadurch Oberfl chenabflussgeschwindigkeiten sowie die Ausbildung von Erosionsrillen verringern. Allerdings beziehen sich Wang & Gao lediglich auf den Abschirmeffekt von PV-Modulen, ohne auf das konzentrierte Abtropfen/Ablaufen des Niederschlagswassers an der unteren Modulkante mit in den Blick zunehmen. Aus diesem Grund erscheint die Aussage nach Einschätzung der Autoren dieses Fachgutachtens nicht allgemein gültig.

Zudem können sich weitere physikalisch-chemische Bodenparameter unter PV-Modulen verändern: Teilweise wurden erhöhte elektrische Leitfähigkeiten und veränderte pH-Werte beobachtet. Während Moscatelli et al. (2022) einen pH-Anstieg (möglicherweise durch marine Aerosole) feststellten, beobachteten (Vervloesem et al. (, 2022) lokal auch pH-

Abnahmen, die mit geringerer Biomasseproduktion und Stickstoffakkumulation in Verbindung gebracht wurden. Inwiefern dies die Speicherungs-, Regelungs- und Pufferfunktion unter den Modulen in gemäßigttem Klima maßgeblich beeinflusst, ist unklar.

Aus den zumeist verzinkten Unterkonstruktionen kann Zink in die Umwelt abgegeben werden (Miller et al., 2023). Zink kann so in Böden und Gewässer gelangen. Schadstoffeinträge können neben der Lebensraumfunktion auch die Speicherungs-, Regelungs- und Pufferfunktion beeinträchtigen. Allerdings sind den Autoren dieses Fachgutachtens belastbare Berechnungen der Eintragsfrachten und damit einhergehender Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen und der Funktionen des Schutzgutes Wasser nicht bekannt.

Die meisten PV-Module in Deutschland basieren auf Siliziumwafern (über 90 % Marktanteil, Wirth (2026)). Bei Nicht-Silizium-Halbleiter-Modulen kann die Halbleiterschicht verschiedene Cadmiumverbindungen enthalten. Für die Verlötung der Einzelzellen zum Gesamtmodul können Zinn, Silber und Blei eingesetzt werden. Bei intakten PV-Modulen ist eine Bodenkontamination sehr gering (T. Ebert & Müller, 2011). Sind die Module durch Hagel oder Brand der Witterung ausgesetzt, kann eine Bodenkontamination durch Blei oder Cadmium jedoch nicht ausgeschlossen werden.

Neuere Technologien könnten auch weitere Eintragsquellen für Schwermetalle in den Boden sein, wie beispielsweise Blei aus Perowskit-PV-Zellen. Nach derzeitigem Wissensstand sind die Austrittsraten auch hier marginal (Nover et al., 2021; Sidler et al., 2025).

3.1.3 Landnutzungsänderung

Je nach Vornutzung kann sich eine veränderte Landnutzungsform positiv auf den Boden auswirken. Wird intensiv genutztes Ackerland im Zuge einer PV-FAA in extensives Grünland überführt, entfallen Düngung, Pflanzenschutzmitteleinsatz sowie regelmäßige maschinelle Bodenbearbeitung. Diese Bodenruhe kann die biologische Vielfalt der Bodenorganismen fördern und die Humusbildung begünstigen. Dadurch können Bodenfunktionen erhalten oder sogar gestärkt werden (Miller et al., 2023).

Veränderungen der Kohlenstoffvorräte hängen stark von der Vornutzung ab. Wird Ackerland in extensives Grünland überführt, können die Kohlenstoffgehalte in der obersten Bodenschicht langfristig steigen (Osterburg et al., 2013). Gleichzeitig können in tieferen Schichten geringere Gehalte auftreten, da die Durchmischung durch Bodenbearbeitung entfällt. Daher sind Betrachtungen einzelner Bodenschichten ohne Analyse des gesamten Bodenprofils nur eingeschränkt aussagekräftig.

Carvalho et al. (2024) weisen darauf hin, dass mögliche Kohlenstoffzunahmen meist eher auf die weniger intensive Landnutzung als auf die PV-FAA selbst zurückzuführen sind.

Generell beeinflussen die Kohlenstoffvorräte bzw. der Humusgehalt der Böden die Nährstoff- und Wasserspeicherfähigkeit, das Bodenleben und damit die langfristige Bodenfruchtbarkeit als Grundlage für die Produktions- und Lebensraumfunktion. Entscheidend für die

tatsächlichen Auswirkungen sind insbesondere Standortbedingungen, vorherige Landnutzung sowie das Vegetations- und Flächenmanagement innerhalb der PV-FFA.

CO₂-Emissionen aus dem Boden stehen in engem Zusammenhang mit Temperatur und Bodenfeuchte. In gemäßigten Klimazonen wurden geringere CO₂-Emissionen ab Mai beobachtet (Armstrong et al., 2016), in wärmeren Klimazonen bereits ab März (Lambert et al., 2021). Ursache sind klimabedingt frühere Austrocknung und reduzierte mikrobielle Aktivität. Insofern können die Auswirkungen einer PV-FFA im Hinblick auf Beschattung und in Folge verändertem Bodentemperatur- und Bodenwasserhaushalt sowie Pflanzenwuchs die Klimafunktion des Bodens beeinflussen.

3.1.4 Zwischenfazit

PV-FFA wirken sowohl direkt (z. B. Versiegelung, Beschattung) als auch indirekt (Landnutzungsänderung) auf das Schutzgut Boden. Während die Umstellung von intensiver Ackernutzung auf extensives Grünland Bodenfunktionen stärken kann, können dauerhafte Beschattung und reduzierte Biomasseproduktion lokal zu Beeinträchtigungen der organischen Substanz, der Bodenbiologie und der Wasserverteilung im Boden führen. Die tatsächlichen Auswirkungen hängen stark vom Aufbau der Anlage und den Standorteigenschaften ab.

3.2 Anlagebedingte Auswirkungen auf das Schutzgut Wasser

Anlagebedingte Auswirkungen von PV-FFA betreffen vor allem Veränderungen des Wasserhaushalts und der Niederschlagsverteilung innerhalb der Anlagenflächen. Die Hauptwirkfaktoren sind neben der Versiegelung und einer eventuell veränderten Landnutzungsform die Verschattungseffekte und die Niederschlagsumverteilung durch die PV-Module, in deren Folge verstärkter Oberflächenabfluss mit Bodenerosion auftreten und zu entsprechenden hydraulischen und stofflichen Beeinträchtigungen von Oberflächengewässern beitragen kann (vgl. Tabelle 8). Auswirkungen auf Oberflächengewässer sind allerdings nur dann zu erwarten, wenn der anlagenbedingte Oberflächenabfluss direkt in ein Oberflächengewässer übertritt. Versickert der anlagenbedingte Oberflächenabfluss und sedimentiert damit auch die Erosionsfracht vor Erreichen eines Oberflächengewässers, dann treten keine anlagenbedingten Auswirkungen auf die Funktionen eines Oberflächengewässers auf.

Weiterhin können Funktionen des Grundwassers anlagenbedingt beeinflusst werden. Verringerte Sickerwasserraten unterhalb von PV-FFA können das Grundwasserdargebot reduzieren und damit auch die Nutzungsfunktion des Grundwassers zur Trinkwasserbereitstellung beeinflussen.

Tabelle 8 Potenzielle anlagenbedingte Auswirkungen auf Funktionen des Schutzgutes Wasser

Anlagebedingte Wirkfaktoren	Lebensraumfunktion	Phys.-chemische Wasserfunktion	Wasserhaushaltsfunktion	Abflussregulationsfunktion	Grundwasserdargebot/Trinkwasserbereitstellung
Versiegelung*	o	o	o	o	o
Verschattung/ Abschirmung	x	x	x	x	o
Landnutzungsänderung	o	o	o	o	o

* Aufgrund fehlender Literaturquellen sind diese potenziellen Auswirkungen hergeleitet.

x: Potenzielle Auswirkungen mit höherer Wahrscheinlichkeit zu erwarten.

o: Potenzielle Auswirkungen mit geringerer Wahrscheinlichkeit zu erwarten.

3.2.1 Versiegelung

Im Bereich der versiegelten Flächen (vgl. 3.1.1) ist die Wasserinfiltration eingeschränkt. Durch den geringen Versiegelungsanteil sind negative Auswirkungen auf Funktionen von Oberflächengewässern und Grundwasser nur sehr begrenzt zu erwarten.

3.2.2 Verschattung und Abschirmung

PV-Module verändern die räumliche Verteilung von Niederschlag sowie die Verdunstungsprozesse im Boden, wodurch sich die Abflussprozesse innerhalb der Anlagen verändern können. Durch Beschattung und teilweise Überdeckung des Bodens kommt es zu Veränderungen der Evapotranspiration sowie der Bodenfeuchteverhältnisse (vgl. 3.1.2).

Modellsimulationen zeigen, dass die Ausrichtung der PV-Module im Verhältnis zur Geländeneigung einen Einfluss auf den Oberflächenabfluss haben kann. PV-Module, dessen Neigungen gleichgerichtet mit der Hangneigung sind, weisen geringere maximale Abflussraten auf als PV-Module, entgegengesetzt zur Hangneigung ausgerichtet sind (Nair et al., 2022). In derselben Studie wurde im Vergleich zum Zustand vor der Errichtung der Anlage eine Zunahme sowohl des Spitzenabflusses als auch des gesamten Abflussvolumens festgestellt. Dabei wurde jedoch eine relativ starke Hangneigung von 23 % untersucht.

Andere Modellierungen zeigen dagegen, dass PV-Module selbst keinen signifikanten Einfluss auf Abflussmengen oder Spitzenabflüsse haben, sofern eine geschlossene Grasbedeckung vorhanden ist (Cook & McCuen, 2013). Fehlt diese Vegetationsbedeckung, kann der Spitzenabfluss hingegen deutlich zunehmen.

Wenn der anlagenbedingte Oberflächenabfluss mit seiner Sedimentfracht (vgl. 3.1.2) in ein Oberflächengewässer übertritt, dann kann es zur Kolmation des Interstitials in Gewässern kommen, was erhebliche Beeinträchtigungen der Lebensraumfunktionen hat. Darüber hinaus können mitgeführte Nährstoffe Eutrophierungsprozesse begünstigen. Solche Risiken

sind insbesondere auf nicht oder unzureichend begrünten Flächen zu erwarten, wie sie während der Errichtungsphase von PV-FFA häufig vorkommen (vgl. 2.1.1)

3.2.3 Landnutzungsänderung

Eine veränderte Landnutzungsform kann sich positiv auf das Schutzgut Wasser auswirken. PV-FFA werden im Regelfall weder gedüngt noch werden Pflanzenschutzmittel eingesetzt, so dass keine entsprechenden anlagenbedingte Einträge von Dünge- und Pflanzenschutzmittel in Oberflächengewässer und oder in das Grundwasser auftreten können.

3.2.4 Zwischenfazit

Die bisherigen Untersuchungen zeigen, dass die Veränderungen des Wasserhaushalts in der Regel kleinräumig und auf die Anlagenflächen begrenzt sind. Anlagenbedingte Auswirkungen auf Oberflächengewässer und deren Funktionen im Naturhaushalt sind nur dann potenziell möglich, wenn ein unmittelbarer Übertritt des Abflusses in ein Oberflächengewässer auftreten kann.

Bei ausreichender Vegetationsbedeckung und geeigneter Anlagenplanung bleibt die Versickerungsfähigkeit der Böden meist erhalten, sodass großräumige Auswirkungen auf den natürlichen Wasserhaushalt oder auf angrenzende Gewässer in der Regel nicht zu erwarten sind.

Damit sind auch anlagenbedingte erhebliche Auswirkungen auf die Funktionen des Grundwassers weitgehend auszuschließen, weil die theoretischen Wirkungen einer PV-FFA aufgrund ihrer sehr geringen Größe im Vergleich zum Einzugsgebiet eines Grundwasserkörpers verschwindend gering ist.

3.3 Anlagebedingte Auswirkungen auf das Schutzgut Luft und Klima

Durch den Verschattungseffekt von PV-Modulen ergeben sich Auswirkungen auf die Wärme- und Strahlungsbilanz, die Luftströmungen und das lokale Mikroklima (vgl. Tabelle 9).

Tabelle 9 Potenzielle anlagenbedingte Auswirkungen auf Funktionen der Schutzgüter Luft- und Klima

Anlagebedingte Wirkfaktoren	Klimaregulationsfunktion	Luftaustauschfunktion	Feuchtehaushaltsfunktion	Kaltluftentstehungs-/Frischluftzufuhrfunktion
Versiegelung*	o	o	o	o
Verschattung/ Abschirmung	x	x	x	x
Landnutzungsänderung*	o	o	o	o

* Aufgrund fehlender Literaturquellen sind diese potenziellen Auswirkungen hergeleitet.

x: Potenzielle Auswirkungen mit höherer Wahrscheinlichkeit zu erwarten.

o: Potenzielle Auswirkungen mit geringerer Wahrscheinlichkeit zu erwarten.

3.3.1 Versiegelung

Durch den geringen Anteil der versiegelten Fläche bei PV-FFA sind keine erheblichen Beeinträchtigungen der Schutzgüter Luft und Klima zu erwarten.

3.3.2 Verschattung und Abschirmung

PV-Module können das lokale Mikroklima verändern, insbesondere durch Verschattung und einer veränderten Strahlungsbilanz. Unter den Modulreihen wird der solare Wärmeeintrag reduziert, wodurch Temperaturspitzen gedämpft werden können. Untersuchungen an konventionellen PV-FFA (Armstrong et al., 2016) sowie Agri-PV-Anlagen (Adeh et al., 2018; Marrou et al., 2013) zeigen, dass sowohl Boden- als auch Lufttemperaturen unter den Modulen im Frühjahr und Sommer niedriger sind als an Referenzstandorten mit voller Sonneneinstrahlung.

Armstrong et al. (2016) stellten zudem fest, dass die Zwischenräume der Modulreihen im Winter teilweise niedrigere Temperaturen aufweisen als die Bereiche unter den Modulen und als Referenzflächen. Die Autoren vermuten, dass u. A. die Sonneneinstrahlung, durch den niedrigen Sonnenstand im Winter, in den Zwischenräumen der Modulreihen abgeschwächt wird. Insgesamt können PV-Module Temperaturspitzen unter PV-FFA lokal abschwächen (Armstrong et al., 2016; Liu et al., 2019). Gründe sind hierfür eine geringere Sonneneinstrahlung tagsüber und eine geringere Wärmestrahlung in der Nacht durch PV-Module.

Die Moduloberflächen können sich bei längerer Sonneneinstrahlung zwar erwärmen, die Temperaturerhöhung liegt jedoch in einer Größenordnung, die auch von anderen dunklen Oberflächen wie Steinen oder Asphalt bekannt ist (Peschel & Peschel, 2025). Messungen in 2,7 m Höhe zeigten keine signifikanten Temperaturunterschiede mehr, sodass die klimatischen Effekte insbesondere in gemäßigten Klimazonen räumlich stark begrenzt sind (Adeh et al., 2018).

Veränderungen des Mikroklimas können sich auch auf die Luftfeuchtigkeit auswirken. Untersuchungen zeigen, dass das Dampfdruckdefizit unter PV-Modulen im Vergleich zu Referenzflächen häufig reduziert ist (Armstrong et al., 2016; Barron-Gafford et al., 2016).

In trockenen und warmen Klimazonen kann die Verschattung durch PV-Module jedoch auch positive Effekte haben, indem sie Vegetation vor intensiver Sonneneinstrahlung und Trockenstress schützt (Lambert et al., 2021).

PV-Module können außerdem die lokalen Luftströmungen beeinflussen. Untersuchungen zeigen Veränderungen der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung im Bereich von PV-Modulen (Adeh et al., 2018). Der Wind wird teilweise senkrecht zu den Modulreihen umgelenkt. Gleichzeitig kann sich die Windgeschwindigkeit über den Modulen erhöhen, während sie unter den Modulen abnimmt.

Auch Armstrong et al. (2016) beobachteten reduzierte Windgeschwindigkeiten unter den Modulen sowie in den Zwischenreihen. Dies deutet auf eine verringerte Durchlüftung der Anlagenflächen und einen reduzierten Luftaustausch hin.

Naturnahe Freiflächen spielen eine wichtige Rolle bei der Entstehung und dem Abfluss von Kaltluft, insbesondere für die nächtliche Durchlüftung von Siedlungsräumen. Werden solche Flächen mit PV-FFA bebaut, kann dies die Luftströmungen beeinflussen. Untersuchungen zeigen, dass reduzierte Windgeschwindigkeiten im Bereich von PV-FFA auftreten können (Adeh et al., 2018; Armstrong et al., 2016).

PV-FFA können daher ein mechanisches Hindernis für abfließende Kaltluft darstellen (Günnewig et al., 2007). Aus diesem Grund wird im Rahmen der Bauleitplanung in Deutschland regelmäßig geprüft, ob geplante Anlagen in Kaltluftentstehungsgebieten oder Frischluftschneisen liegen.

Ein Gutachten zum Einfluss einer PV-FFA auf das Stadtklima zeigt, dass die Bebauung eines Kaltluftentstehungsgebietes die nächtliche Kaltluftproduktion reduzieren kann. Wenn die Anlage jedoch von weiteren Freiflächen umgeben ist, kann dieser Effekt teilweise kompensiert werden (Kupski, 2024).

Zusammenfassend können von PV-FFA sowohl eine reduzierte Kaltluftentstehung als auch eine reduzierter Kaltluftstrom ausgehen, so dass klimatische Ausgleichsfunktionen für die Landschaft und speziell Siedlungsräume beeinträchtigt werden können.

3.3.3 Landnutzungsänderung

Eine veränderte Landnutzungsform kann Einfluss auf die Verdunstungsrate ausüben, wenn beispielsweise Ackerflächen im Zuge der Errichtung von PV-FFA in Grünland umgewandelt werden.

Anhand bundesweiter Daten des Hydrologischen Atlases der Bundesanstalt für Gewässerkunde ist davon auszugehen, dass die tatsächlichen Verdunstungsrate von Grünlandflächen durchschnittlich rund 23 mm/a (Sandböden) und 44 mm/a (bindige Böden) geringer

sind als bei Ackerflächen; das entspricht einer ungefähren Reduzierung um 5 % bei Sandböden und 8 % bei bindigen Böden⁶. Werden Ackerflächen im Zuge der PV-FFA-Errichtung in dauerhafte Grünlandflächen umgewandelt, ist dem Grundsatz nach von geringeren Verdunstungsraten in Höhe der vorgenannten Werte auszugehen.

Lokale Auswirkungen auf das Schutzgut Luft und Klima sind möglich. Auf Grund der im Landschaftsmaßstab kleinen PV-FFA sind erhebliche, großflächige Auswirkungen nicht zu erwarten.

Erhebliche Auswirkungen durch eine eventuelle veränderte Landnutzungsform im Zuge der Errichtung von PV-FFA sind für das Schutzgut Luft und Klima nicht zu erwarten.

3.3.4 Zwischenfazit

PV-FFA können das Mikroklima in gemäßigten Klimazonen lokal verändern, insbesondere durch Verschattung, geringere Boden- und Lufttemperaturen sowie reduzierte Windgeschwindigkeiten innerhalb der Anlagenflächen. Dadurch kann es zu kleinräumigen Veränderungen der Luftfeuchtigkeit und des Luftaustausches kommen. Großflächig angelegte PV-FFA, könnten lokal bedeutsame Kaltluftentstehungsgebiete oder Frischluftleitbahnen beeinträchtigen.

Insgesamt sind die klimatischen Auswirkungen in gemäßigten Klimazonen wie Deutschland überwiegend lokal begrenzt und werden keine erheblichen, großflächigen Auswirkungen auslösen.

⁶ <https://geoportal.bafg.de/dokumente/had/Verdunstungshoehe.pdf> (10.04.2026)

4 Betriebsbedingte Auswirkungen

Betriebsbedingte Auswirkungen ergeben sich durch den eigentlichen Betrieb sowie der Pflege und Wartung der Anlagen. Technische und bauliche Wartungsarbeiten hängen von der Bauart, der Flächenbeschaffenheit und den lokalen Verschmutzungsquellen ab. Pflege- bzw. Bewirtschaftungsarbeiten können je nach Pflegekonzept variieren.

Mögliche Auswirkungen auf die Schutzgüter und deren Funktionen durch den Betrieb wurden bislang kaum untersucht. Die nachfolgenden Auswirkungen beruhen überwiegend auf Ableitungen und nicht auf konkrete Untersuchungen.

4.1 Betriebsbedingte Auswirkungen auf das Schutzgut Boden

Die betriebsbedingten Auswirkungen auf das Schutzgut Boden ergeben sich durch Pflege und Wartung der PV-Anlage und durch potenzielle Schäden der PV-Module (vgl. Tabelle 10).

Tabelle 10 **Potenzielle betriebsbedingte Auswirkungen auf Bodenfunktionen**

Betriebsbedingte Wirkfaktoren	Lebensraumfunktion	Speicherungs-, Regulations-/Pufferfunktion	Klimafunktion	Produktionsfunktion	Archivfunktion
Pflege/Wartung ^(*)	o	o	o	o	o
Stofflicher Aus- trag [*]	o	o	o	o	o
Stromableitung [*]	o	o	o	o	o

^{*} Aufgrund fehlender Literaturquellen sind diese potenziellen Auswirkungen hergeleitet.

x: Potenzielle Auswirkungen mit höherer Wahrscheinlichkeit zu erwarten.

o: Potenzielle Auswirkungen mit geringerer Wahrscheinlichkeit zu erwarten.

Beim Einsatz von Fahrzeugen/Maschinen für Pflege und Wartungsarbeiten sind Bodenverdichtungen möglich. Dies könnte sich auf alle Bodenfunktionen auswirken (vgl. 2.1).

Eine Kurzzeitstudie zur Weidehaltung von Schafen in einer sonnennachführenden PV-FFA zeigte, dass bei steigenden Lufttemperaturen die Schafe tagsüber mehr Zeit unter den PV-Modulen verbrachten und nachts mehr Zeit in der Freifläche (Siede et al., 2026). Das Verhalten der Schafe könnte sich durch Trittbelastung und Dungablagerung auf den Boden und Wasserhaushalt auswirken. Trittbelastungen könnten zu Bodenverdichtungen führen, während Nährstoffe durch den zurückgelassenen Kot wieder in den Boden gelangen können und die Produktions- und Lebensraumfunktion verbessern.

Durch die Weidetierhaltung können außerdem Arzneimittelrückstände direkt während der Anwendung oder indirekt über Kotrückstände in den Boden gelangen⁷. So können beispielsweise Nicht-Zielorgansimen im Boden betroffen sein, wodurch die Lebensraum- und Produktionsfunktion gemindert werden könnte.

⁷ <https://www.uba.de/n60423de> (16.03.2026)

Bei beschädigten Modulen kann es zu Schadstoffeinträgen (z.B. Blei, Cadmium) in den Boden kommen (vgl. 3.1.2; Ebert & Müller (2011)). Dies ist jedoch nicht wissenschaftlich belegt.

Bei der Stromableitung über die Erdkabel entsteht in geringem Umfang Verlustwärme. Die Erwärmung der Kabel ist abhängig vom Querschnitt der Leiter (Widerstand) und von der Leistung, die über die Kabel abgeführt werden. Diese wird bei PV-FFA aufgrund der insgesamt als vernachlässigbar eingestuft (Herden et al., 2009).

Weiterhin kann im Zuge der extensiven Grünlandnutzung und der damit im Regelfall entfallenden Erhaltungskalkung der Boden-pH-Wert absinken, weil der ubiquitäre Säureeintrag und die natürlichen pedogenen Versauerungsprozesse nicht mehr abgepuffert werden. Bodenbiologische und -chemische Prozesse werden im starken Maße auch vom pH-Wert-Zustand des Bodens beeinflusst. Bei sehr deutlichen pH-Wert-Absenkungen im Vergleich zu den landwirtschaftlichen Ziel-pH-Werten nach den Landwirtschaftlichen Untersuchungs- und Forschungsanstalten bzw. Landwirtschaftskammern der Bundesländer⁸ können die natürlichen Bodenfunktionen und landwirtschaftliche Produktionsfunktion nachhaltig beeinträchtigen.

4.2 Betriebsbedingte Auswirkungen auf das Schutzgut Wasser

Betriebsbedingte Auswirkungen auf das Schutzgut Wasser sind gering und ergeben sich nur durch Pflege und Wartung und eventuelle stoffliche Austräge (vgl. Tabelle 11).

Aus der Sicht des Bundesverbandes der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW, 2025) sind Beeinträchtigung im Betrieb der Anlage nahezu ausgeschlossen. Lediglich im Falle eines unvorhergesehenen Falls, wie Brände, können Umweltauswirkungen auftreten. Diese können durch Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen weitestgehend ausgeschlossen werden. Bei der Reinigung der Module beispielsweise sollte ausschließlich Wasser verwendet werden.

Durch die Weidetierhaltung können Arzneimittelrückstände indirekt über Kotrückstände mit dem Oberflächenabfluss auch in Oberflächengewässer bzw. mit dem Sickerwasser ins Grundwasser gelangen (Fußnote 7).

⁸ Vergleich bspw. Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen unter <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/duengung/basisinfos/kalkung-pdf.pdf> (15.04.2026)

Tabelle 11 Potenzielle betriebsbedingte Auswirkungen auf Funktionen des Schutzgutes Wasser

Betriebsbedingte Wirkfaktoren	Lebensraumfunktion	Phys.-chemische Wasserfunktion	Wasserhaushaltsfunktion	Abflussregulationsfunktion	Grundwasserdargebot/Trinkwasserbereitstellung
Pflege/Wartung*	o	o	o	o	o
Stofflicher Austrag*	o	o	o	o	o
Stromerzeugung*	o	o	o	o	o

* Aufgrund fehlender Literaturquellen sind diese potenziellen Auswirkungen hergeleitet.

x: Potenzielle Auswirkungen mit höherer Wahrscheinlichkeit zu erwarten.

o: Potenzielle Auswirkungen mit geringerer Wahrscheinlichkeit zu erwarten.

4.3 Betriebsbedingte Auswirkungen auf das Schutzgut Luft und Klima

Während des Betriebes sind keine erheblichen Auswirkungen zu erwarten.

4.4 Zwischenfazit

Insgesamt könnte es betriebsbedingt durch Wartungs- und Reinigungsarbeiten zur Beeinflussung der Bodenfunktionen kommen. Verunreinigungen des Oberflächen- bzw. Grundwassers sind durch Reinigungs-/Arzneimittel möglich. Im Vergleich zu baubedingten und anlagenbedingten Auswirkungen sind die betriebsbedingten Auswirkungen wahrscheinlich sehr gering und vernachlässigbar. Mögliche Beeinträchtigungen lassen sich durch ein angepasstes Management vermeiden.

5 Maßnahmenkatalog

Der Maßnahmenkatalog greift die möglichen Auswirkungen auf. Jedem Wirkfaktor werden Strategien zur Vermeidung und Minderung zugeordnet. Die Ergebnisse basieren auf der Literaturrecherche und umfangreichen Erfahrungen aus der Baupraxis.

Dabei kristallisiert sich heraus, dass mögliche Beeinträchtigungen der Schutzgüter Boden und Wasser insbesondere in der Bauphase, sowohl bei der Errichtung als auch beim Rückbau von PV-FFA, zu erwarten sind. Im Vordergrund stehen Verdichtungswirkungen auf das Schutzgut Boden. In deren Folge sind erhöhte Oberflächenabflüsse und Bodenerosion zu befürchten, die bei Übertritten in Oberflächengewässer dann auch das Schutzgut Wasser erheblich beeinträchtigen können.

Insofern steht im Vordergrund einer Vermeidungsstrategie, Verdichtungen von Böden so weit wie möglich fernzuhalten. Die Verdichtungsempfindlichkeit von Böden ist insbesondere von der aktuellen Wassersättigung abhängig.

Die durchschnittliche Wassersättigung der Böden ist in Deutschland vor allem in den Monaten Januar und Februar so hoch, dass die Tragfähigkeit sehr gering und die Verdichtungsempfindlichkeit der Böden sehr hoch sind. Je nach Witterungsverlauf können auch die angrenzenden Monate (Oktober bis Dezember und März bis April) ebenfalls sehr hohe Wassersättigungen aufweisen. Bodenarbeiten können bei Wassersättigung der Böden nicht fachgerecht durchgeführt werden.

Wird diese bodenschutzfachliche Grundregel nicht beachtet, wird die Vorsorgeverpflichtungen nach § 7 BBodSchG nicht erfüllt. Es entstehen schädliche Bodenveränderungen im Sinne des § 2 Absatz 3 BBodSchG (Abbildung 7), die aufwendige und teure Sanierungsmaßnahmen nach § 4 BBodSchG nach sich ziehen.

Diese Erkenntnis ist von grundlegender Bedeutung und muss bei der Bauzeitenplanung für alle Bodenarbeiten berücksichtigt werden. In Phasen der vollständigen Wassersättigung oder Wasserübersättigung, die regelmäßig im Winterhalbjahr und insbesondere im Januar und Februar auftreten, sind weder Bodenarbeiten wie Aushub, Umlagerung und Rekultivierung noch Befahrungen ungeschützter Böden angesichts der fachrechtlichen Anforderungen möglich.

Weiterhin zeigt die Baupraxis, dass die vollständige und dichte Begrünung der Anlagenfläche vor der Errichtung von PV-FFA von zentraler Bedeutung ist, um möglichen negativen Auswirkungen auf die Schutzgüter Boden und Wasser vorzubeugen.

Die beiden vorgenannten wesentlichen Grundsätzen, keine Bauausführung in Zeitspannen mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit der Wassersättigung und keine Bauausführung auf unbegrüntem Flächen, sind bei der Konzeption der erforderlichen Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen unbedingt zu berücksichtigen. Ergänzende Maßnahmen zur Vermeidung und Minderung zielen auf einen optimalen Schutz der Schutzgüter Boden, Wasser, Luft und Klima.

Zusätzlich kann bei der Aufstellung von Bebauungsplänen die Wahl des Standortes mit bodenbezogener Rangfolge eine effektive Vermeidungsstrategie sein (vorrangig anthropogen überprägte Böden wie Konversionsflächen, keine Hanglagen), um empfindliche Böden zu schützen. Kaltluftentstehungsgebieten oder Frischluftschneisen sollten ebenso vermieden werden, um die Kalt- und Frischluftproduktion nicht zu behindern.

Im Folgenden werden tabellarisch geeignete und praxistaugliche Maßnahmen zur Vermeidung und Minderung aufgeführt. Die aufgeführten Maßnahmen zur Vermeidung und Minderung von Beeinträchtigungen der Auswirkungen auf die Schutzgüter Boden, Wasser, Luft und Klima basieren auf generellen Erkenntnissen zu Wirkungszusammenhängen. Spezifische Zuordnungen von Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen zu einzelnen Wirkfaktoren für den Vorhabentyp PV-FFA sind der Literatur kaum zu entnehmen. Hilfreich sind die Veröffentlichungen von BDEW (2025) und Miller et al. (2023), die speziell auf PV-FFA eingehen. Auch diese beiden Quellen greifen auf allgemein anerkannte Maßnahmen zurück, die sich in der Baupraxis als geeignet herausgestellt haben und auf die Bedingungen von PV-FFA übertragen werden können. Veröffentlichungen zu generell geeigneten Maßnahmen sind beispielsweise folgenden Quellen zu entnehmen: BAFU (2015), DIN 18915, DIN 19639, DWA (2015), HUKLV (2017), LABO (2009), LBEG (2019) und LLUR (2021). Literaturquellen insbesondere zu anlage- und betriebsbedingten Auswirkungen mit spezifischer Zuordnung sind im Maßnahmenkatalog hinterlegt.



Abbildung 7 Erhebliche Verdichtungsschäden auf dem Umlaufweg einer PV-FFA im Bergischen Land, die durch Befahrungen ungeschützter Böden im Winterhalbjahr entstanden sind (Quelle: Ingenieurbüro Feldwisch).

5.1 Maßnahmen für bau-, anlagen- und betriebsbedingten Wirkungen

Tabelle 12 Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen für potenzielle Beeinträchtigungen des Schutzgutes Boden durch baubedingte Wirkfaktoren von PV-FFA.

Wirkfaktoren	Potenzielle Beeinträchtigungen von Bodeneigenschaften und Bodenfunktionen	Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen
Verdichtung	- Reduzieren des Porenvolumens und der Porenkontinuität - Reduzieren der Wasserinfiltration und Sickerwasserrate sowie Vergrößern des Oberflächenabflusses - Reduzieren des Gasaustauschs zwischen Boden und Atmosphäre - Reduzieren der Durchwurzelbarkeit und folglich der pflanzlichen Biomasseproduktion - Beeinträchtigen des Lebensraums für das Bodenleben - Beeinträchtigen aller natürlichen Bodenfunktionen nach Tabelle 1	- Bauzeitenplanung: Keine Bodenarbeiten wie Aushub, Umlagerung und Rekultivierung sowie keine Befahrungen ungeschützter Böden in Zeitebenen der Wassersättigung, die im Winterhalbjahr und dort insbesondere im Januar und Februar im langjährigen Durchschnitt zu erwarten sind (vgl. auch Kap. 6 und Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.). Gilt für die Errichtung und den Rückbau von PV-FFA. Die Bauzeitenplanung ist rechtzeitig zwischen Bautechnik, Bodenschutz und Arten-/Biotopschutz abzustimmen. - Flächendeckende dichte Begrünung vor Baubeginn: Ein nicht frisch bearbeiteter und mit zeitlichem Vorlauf begrünter Oberboden ist tragfähiger, weil die Pflanzenverdunstung den Boden Wasser entzieht und sie damit weniger verdichtungsempfindlich macht. Weiterhin fördert der dichte Wurzelfilz der Vegetation eine bessere Tragfähigkeit der Böden. - Bodenfeuchte und Konsistenzklasse: Beachten der Bodenfeuchte und Konsistenzklasse entsprechend Vorgaben der DIN 19639; keine Bautätigkeiten bei zu nassen Böden ($\geq$ Feuchtestufe 4 oder Konsistenzstufe 4) - Befestigungen von Baubedarfsflächen: Um die mechanischen Auswirkungen von Befahrungsvorgängen bodenverträglich abzufangen, müssen stark beanspruchte Baubedarfsflächen mit geeigneten Techniken befestigt werden, um die Lasten auf ein unschädliches Maß der Bodenpressung zu reduzieren. Das unschädliche Maß der Bodenpressung ist anhand von Feinbodenart, Humusgehalt und standorttypischen Vernässungsmerkmalen (Grund-, Stau- und Haftnässe) fachgutachterlich zu bestimmen. Zu befestigen sind insbesondere die Baueinrichtungs- und Lagerflächen sowie die stark frequentierten Fahrwege.

Wirkfaktoren	Potenzielle Beeinträchtigungen von Bodeneigenschaften und Bodenfunktionen	Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen
		Zur Befestigung stehen verschiedene Systeme aus mineralischen Schüttungen, Holzhackschnitzeln und Lastverteilungsplatten aus Holz, Metall oder Kunststoffen zur Verfügung. Im Zuge der Vorhabenplanung sind anhand der Standort- und Bauausführungsbedingungen die jeweils geeigneten Befestigungssysteme auszuwählen. - Anlegen der Befestigungen auf dem begrünten Oberboden: Oberböden sind im Gegensatz zu Unterböden zumeist vollständig regenerierbar nach erheblichen Verdichtungswirkungen. Das liegt insbesondere am Wechsel zwischen Quellen und Schrumpfen in Folge von Niederschlägen und Trockenphasen, am Bodenfrost im Winterhalbjahr, an der erhöhten bodenbiologischen Aktivität und der leichteren Zugänglichkeit mit lockernden Geräten. Alle diese die Regeneration fördernden Einflussfaktoren wirken im Oberboden, wohingegen sie im Unterboden nicht oder nur deutlich reduziert wirken. Insofern bleiben unvermeidbare Verdichtungswirkungen im Unterboden mit deutlich größerer Wahrscheinlichkeit dauerhaft zurück als in Oberböden. Das gilt auch nach mechanischen Lockerungsmaßnahmen bis in den Unterboden. Aus diesem Grund sind erforderliche Befestigungen im Regelfall auf dem begrünten Oberboden anzulegen. Ausnahmen sind möglich und müssen anhand der Standortbedingungen bodenschutzfachlich begründet werden. - Ausweisen ausreichend großer Baueinrichtungs- und Lagerflächen: In der Baupraxis ist zu beobachten, dass regelmäßig zu kleine Flächen eingeplant werden. Während der Bauausführung werden dann Befahrungen und Lagertätigkeiten zwangsweise auf unbefestigte Flächen ausgedehnt, so dass wiederum schädliche Verdichtungen ausgelöst werden.
Umlagerung*	- Vermischen unterschiedlicher Bodenschichten beim Bodenaushub, der bei PV-FFA insbesondere bei der Anlage der Trafostandorte und bei der Verlegung der Anschlussleitungen vorgenommen wird	- Vorbereitung / Planung des Vorhabens: Die anstehenden Böden und deren Schichtung muss vor Baubeginn bekannt sein, damit die Aushubarbeiten und der erforderliche Platz zur Zwischenlagerung bekannt sind und auch in der Bauausschreibung berücksichtigt werden können. Die Erfassung und Bewertung der betroffenen Böden erfolgt am besten im Zuge eines vorhabenspezifischen Bodenschutzkonzeptes nach DIN 19639. Zwischen Ober- und Unterboden ist generell bei Aushubarbeiten zu differenzieren. Wechseln innerhalb der Aushubtiefe die Substrateigenschaften des auszuhebenden

Wirkfaktoren	Potenzielle Beeinträchtigungen von Bodeneigenschaften und Bodenfunktionen	Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen
	- Beeinträchtigen aller natürlichen Bodenfunktionen nach Tabelle 1	Unterbodens, dann ist zusätzlich zwischen unterschiedlichen Unterbodenschichten zu differenzieren. Die zu differenzierenden Schichten müssen getrennt ausgehoben, getrennt zwischengelagert und – im Falle der Rückverfüllung, wie das im Leitungsgraben erfolgt – wieder lagegerecht und ohne Überverdichtung in einem standorttypischen durchwurzelbaren Zustand eingebaut werden.
Substrat-/Stoffeinträge*	- Eintragen mineralischer Fremdbestandteile und Störstoffe verändern die bodenphysikalischen Bodeneigenschaften - Im Falle von Kunststoffeinträgen ist auch eine stoffliche Sekundärwirkung zu besorgen (Mikro- und Nanoplastik mit der Gefahr der Aufnahme durch Pflanzen oder Bodenlebewesen) - Eintrag boden- und gewässergefährdender Betriebsstoffe wie Kraft- und Schmierstoffe beeinträchtigen die bodenchemischen Eigenschaften - Beeinträchtigen aller natürlichen Bodenfunktionen nach Tabelle 1, insbesondere der Lebensraumfunktion, Speicherungs-, Regulations-/ Pufferfunktion und Produktionsfunktion	- Rückbau aller Befestigungen: Vollständiger, rückstandsfreier Rückbau von Vliesen, Schotter, Befestigungsplatten etc. - Abfallmanagement: Während der Bauausführung ist durch ein vorhabensspezifisches Abfallmanagement die Erfassung und geordnete Entsorgung von Bauabfällen sicherzustellen. Dies umfasst auch die vollständige Erfassung von kleinteiligen Abfällen wie Kunststoffgebinde oder Kunststoffspänen, Metallabfälle, Getränkegefäße etc. - Umgang mit boden- und gewässergefährdenden Stoffen: Aufstellen eines Alarmplans vor Baubeginn, um im Falle von Unfällen und Havarien eine geordnete Schadenseindämmung und -beseitigung ergreifen zu können. Fach- und gefahrengerechte Lagerung im Abgleich mit ggf. gesonderten Anforderungen innerhalb von Trinkwasserschutzgebieten. Betankungen nur auf asphaltierten Flächen. Auf nicht asphaltierten Flächen verwenden von Auffangwannen oder Ähnlichem.
Erosion*	- Verlust von Bodenmaterial, insbesondere von Oberboden und	- Flächendeckende dichte Begrünung vor Baubeginn Siehe Ausführungen weiter oben unter „Verdichtung“

Wirkfaktoren	Potenzielle Beeinträchtigungen von Bodeneigenschaften und Bodenfunktionen	Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen
	darin enthaltener organische Bodensubstanz (Humus) - Reduzieren der Wasser- und Nährstoffspeicherefähigkeit - Reduzieren der Filter- und Puffereigenschaften - Beeinträchtigen aller natürlichen Bodenfunktionen nach Tabelle 1	

* Aufgrund fehlender Literaturquellen sind diese potenziellen Auswirkungen hergeleitet.

Tabelle 13 Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen für potenzielle Beeinträchtigungen des Schutzgutes Wasser durch baubedingte Wirkfaktoren von PV-FFA.

Wirkfaktoren	Potenzielle Beeinträchtigungen von Wassereigenschaften und der Funktion im Naturhaushalt	Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen
Verdichtung*	- Siehe Ausführungen zu „Verdichtung“ in Tabelle 12 - Erhöhen von Direktabflüssen und damit verbundene Sediment- und Stoffeinträgen in die Oberflächengewässer - Einschränken der Lebensraumfunktion, physikalisch-chemischen Wasserfunktion, Wasserhaushaltsfunktion und Abflussregulationsfunktion	- Siehe Ausführungen zum Schutzgut Boden in Tabelle 12
Umlagerung	- Siehe Ausführungen zu „Verdichtung“ in Tabelle 12	- Siehe Ausführungen zum Schutzgut Boden in Tabelle 12

Wirkfaktoren	Potenzielle Beeinträchtigungen von Wassereigenschaften und der Funktion im Naturhaushalt	Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen
	- Erhöhen von Direktabflüssen und damit verbundene Sediment- und Stoffeinträgen in Oberflächengewässer - Einschränken der Lebensraumfunktion, physikalisch-chemischen Wasserfunktion, Wasserhaushaltsfunktion und Abflussregulationsfunktion	
Substrat-/Stoffeinträge*	- Erhöhen von Sediment- und Stoffeinträgen in Oberflächengewässer durch erhöhte Oberflächenabflüsse - Eintrag boden- und gewässergefährdender Betriebsstoffe wie Kraft- und Schmierstoffe in angrenzende Oberflächengewässer und Grundwasser - Einschränken der Lebensraumfunktion, physikalisch-chemischen Wasserfunktion und des Grundwasserdargebots/Trinkwasseraufbereitung	- Siehe Ausführungen zum Schutzgut Boden unter „Verdichtung“ und „Umlagerung“ in Tabelle 12 - Aufstellen eines Alarmplans vor Baubeginn, um im Falle von Unfällen und Havarien eine geordnete Schadenseindämmung und -beseitigung ergreifen zu können. Fach- und gefahrengerechte Lagerung im Abgleich mit ggf. gesonderten Anforderungen innerhalb von Trinkwasserschutzgebieten. - Betankungen nur auf asphaltierten Flächen. Auf nicht asphaltierten Flächen verwenden von Auffangwannen oder Ähnlichem.
Erosion*	- Erhöhen von Direktabflüssen und damit verbundene Sediment- und Stoffeinträgen in die Oberflächengewässer - Einschränken der Lebensraumfunktion, physikalisch-chemischen Wasserfunktion,	- Flächendeckende dichte Begrünung vor Baubeginn - Siehe Ausführungen zum Schutzgut Boden unter „Verdichtung“ in Tabelle 12

Wirkfaktoren	Potenzielle Beeinträchtigungen von Wassereigenschaften und der Funktion im Naturhaushalt	Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen
	Wasserhaushaltsfunktion und Abflussregulationsfunktion	

* Aufgrund fehlender Literaturquellen sind diese potenziellen Auswirkungen hergeleitet.

Tabelle 14 Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen für potenzielle Beeinträchtigungen des Schutzgutes Luft und Klima durch baubedingte Wirkfaktoren von PV-FFA.

Wirkfaktoren	Potenzielle Beeinträchtigungen von Luft- und Klimateigenschaften und der Funktion im Naturhaushalt	Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen
Staubemissionen als Folge von fehlender Vegetationsdecke und Bodenverdichtungen*	- Staubemissionen während des Baus führen zu temporären Verunreinigungen der Luft und Beeinträchtigungen der Funktion des Schutzgutes Luft im Naturhaushalt	- Siehe Ausführungen zum Schutzgut Boden in Tabelle 12, insbesondere „Flächendeckende dichte Begrünung vor Baubeginn“
Abgase von Baumaschinen*	- Abgase der Baumaschinen während des Baus führen zu temporären Verunreinigungen der Luft und Beeinträchtigungen Funktion des Schutzgutes Luft im Naturhaushalt	- Durch eine effiziente Baulogistik können im begrenzten Umfang Leerfahrten etc. vermieden werden, so dass damit auch die Abgasmenge reduziert werden kann. - Insgesamt werden die baubedingten Auswirkungen auf Luft und Klima als vernachlässigbar eingestuft.

* Aufgrund fehlender Literaturquellen sind diese potenziellen Auswirkungen hergeleitet.

Tabelle 15 Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen für potenzielle Beeinträchtigungen des Schutzgutes Boden durch anlagebedingte Wirkfaktoren von PV-FFA.

Wirkfaktoren	Potenzielle Beeinträchtigungen von Bodeneigenschaften und Bodenfunktionen	Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen
Versiegelung*	- Flächenversiegelung durch technische Bauwerke und Wege - Beeinträchtigen aller natürlichen Bodenfunktionen nach Tabelle 1	- Verwendung von Ramm- und Schraubfundamenten anstelle von Betonfundamenten zur Verringerung der versiegelten Fläche
Verschattung/ Abschirmung	- Überstellung der Bodenoberfläche mit PV-Modulen - dauerhafte Beschattung und reduzierte Biomasseproduktion führt lokal zu Beeinträchtigungen der organischen Substanz, der Bodenbiologie und der Wasserverteilung im Boden - Beeinträchtigen aller natürlichen Bodenfunktionen nach Tabelle 1	- Größere Modulreihenabstände mit besonnten Bereichen⁹ - Lückenhafte Montage der Module zur breitflächigen Verteilung des Niederschlagswassers unter den Modultischen; Festlegung von Mindestabständen im Falle von Ost-West-ausgerichteter Anlagen im Bereich der Modulober- und Unterkanten - Begrenzung der Modultischtiefe und Festlegung einer Mindesthöhe von 80 cm¹⁰ um die Verschattung zu minimieren - möglichst ständige dichte Vegetationsdecke: Einsaat mit standortgerechtem Regiosaatzgut oder Mahdgutübertragung (Carvalho et al., 2024; KNE, 2024a) - Vermeidung von Hanglagen, um Erosionsrisiko zu senken; ggf. erosionsmindernde Maßnahmen wie Kalkung (Costa et al., 2021), Anlegen von Pufferstreifen (Cook & McCuen, 2013), Versickerungsgräben oder Steintropfbeete (Yavari et al., 2022)
Landnutzungsänderung*	- Bei der Umwandlung von Ackerflächen und Intensivgrünland zu dauerhaft begrüntem, extensiv bewirtschafteten PV-FFA werden Bodeneigenschaften verändert, die vom Grundsatz her eher positive Wirkungen entfalten können, wie z. B. geringere Stoffausträge	- Keine Vermeidungs- und Minderungsmaßnahme erforderlich, weil die Landnutzungsänderung bereits positive Auswirkungen entfaltet.

⁹ Es gibt bislang keine konkreten Maßangaben zu Reihenabständen, Modullücken oder Modultischtiefen. Es sollte darauf geachtet werden, dass die verschatteten und abgeschirmten Bereiche nicht komplett vor Sonnenbestrahlung und Niederschlag isoliert sind.

¹⁰ Diese Höhe ermöglicht außerdem eine Beweidung mit Schafen (https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/informationen/beweidung-pv-anlagen-schafe_lfl-information.pdf (20.03.2026) bzw. Mahd (Günnewig et al., 2024).

Wirkfaktoren	Potenzielle Beeinträchtigungen von Bodeneigenschaften und Bodenfunktionen	Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen
	- wie Nitrat und Pflanzenschutzmittel, weil Düngung und Pflanzenschutz in PV-FFA nicht eingesetzt werden - Im Regelfall kein Beeinträchtigen der natürlichen Bodenfunktionen nach Tabelle 1	

* Aufgrund fehlender Literaturquellen sind diese potenziellen Auswirkungen hergeleitet.

Tabelle 16 Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen für potenzielle Beeinträchtigungen des Schutzgutes Wasser durch anlagebedingte Wirkfaktoren von PV-FFA.

Wirkfaktoren	Potenzielle Beeinträchtigungen von Wassereigenschaften und der Funktion im Naturhaushalt	Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen
Versiegelung*	- Flächenversiegelung durch technische Bauwerke und Wege - Beeinträchtigen der Wasserinfiltration - Beeinträchtigen der Funktionen nach Tabelle 2, geringe Auswirkungen zu erwarten	- Siehe Ausführungen zum Schutzgut Boden in Tabelle 15
Verschattung/ Abschirmung	- Erhöhen von Oberflächenabflüssen - Kolmation des Interstitials in Gewässern - Begünstigen von Eutrophierungsprozessen - Einschränken der Lebensraumfunktion, physikalisch-	- Siehe Ausführungen zum Schutzgut Boden in Tabelle 15

Wirkfaktoren	Potenzielle Beeinträchtigungen von Wassereigenschaften und der Funktion im Naturhaushalt	Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen
	chemischen Wasserfunktion, Wasserhaushaltsfunktion und Abflussregulationsfunktion	
- Landnutzungsänderung	- Siehe Ausführungen zum Schutzgut Boden in Tabelle 15 - Im Regelfall kein Beeinträchtigen der Funktionen nach Tabelle 2	- Keine Vermeidungs- und Minderungsmaßnahme erforderlich, weil die Landnutzungsänderung bereits positive Auswirkungen entfaltet

* Aufgrund fehlender Literaturquellen sind diese potenziellen Auswirkungen hergeleitet.

Tabelle 17 Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen für potenzielle Beeinträchtigungen des Schutzgutes Luft und Klima durch anlagebedingte Wirkfaktoren von PV-FFA.

Wirkfaktoren	Potenzielle Beeinträchtigungen von Luft- und Klimateigenschaften und der Funktion im Naturhaushalt	Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen
Versiegelung*	- Keine Beeinträchtigungen zu erwarten	- Keine Maßnahmenvorschläge
Verschattung/ Abschirmung	- Veränderungen des Mikroklimas und lokaler Luftströmungen - Reduzierung der Kaltluftentstehung und Frischluftzustroms - Beeinträchtigen aller Funktionen nach Tabelle 3	- Maßnahmen zur Begrenzung der verschatteten/abgeschirmten Bereiche können Veränderungen des Mikroklimas reduzieren, siehe Ausführungen Schutzgut Boden in Tabelle 15 - Kaltluftentstehungsgebiete nicht bebauen. Bei einer Bebauung dieser Flächen sollte genügend Freifläche zur Kompensation vorhanden sein, so dass der Luftstrom zur nächstgelegenen Ortschaft nicht behindert wird. Dies sollte durch einen Abgleich mit den Kaltluftvolumenströmen geprüft werden.
Landnutzungsänderung*	- Keine Beeinträchtigungen zu erwarten. Lokal kann die Verdunstungsrate beeinflusst werden.	- Keine Maßnahmenvorschläge

* Aufgrund fehlender Literaturquellen sind diese potenziellen Auswirkungen hergeleitet.

Tabelle 18 Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen für potenzielle Beeinträchtigungen des Schutzgutes Boden durch betriebsbedingte Wirkfaktoren von PV-FFA.

Wirkfaktoren	Potenzielle Beeinträchtigungen von Bodeneigenschaften und Bodenfunktionen	Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen
Pflege/Wartung ^(*)	- Bodenverdichtung durch Wartungsfahrzeuge oder Mahd (Mähfahrzeuge oder Trittschäden von Weidetieren). Siehe Ausführungen in Tabelle 12 zu „Verdichtungen“ - Beeinträchtigen aller natürlichen Bodenfunktionen nach Tabelle 1	- Verwenden von Fahrzeugen mit möglichst geringer Bodenpressung - Beweidungsintensität niedrig bis mäßig halten
Stofflicher Austrag [*]	- Eintrag von Arzneimitteln (Entwurmungsmittel) durch Weidetierhaltung - Schadstoffeinträge (z.B. Blei, Cadmium) bei Schäden an PV-Modulen - Beeinträchtigen der Lebensraum- und Produktionsfunktion	- Selektive Entwurmung zur Reduzierung der Einträge (Ebert et al., 2014), behandelte Tiere von der Weide nehmen (Vidaurre et al., 2016) - Schnellstmögliche Reparatur/Entsorgung beschädigter PV-Module (Ebert & Müller, 2011)
Stromableitung [*]	- Lokale Erwärmung des Bodens durch Wärmeemissionen der Erdkabel beeinflussen die natürlichen Bodenfunktionen nach Tabelle 1, geringe Auswirkungen zu erwarten - Keine Beeinträchtigungen zu erwarten	- Keine Maßnahmenvorschläge

^{*} Aufgrund fehlender Literaturquellen sind diese potenziellen Auswirkungen hergeleitet.

Tabelle 19 Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen für potenzielle Beeinträchtigungen des Schutzgutes Wasser durch betriebsbedingte Wirkfaktoren von PV-FFA.

Wirkfaktoren	Potenzielle Beeinträchtigungen von Wassereigenschaften und der Funktion im Naturhaushalt	Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen
Pflege/Wartung*	- Bodenverdichtung durch Wartungsfahrzeuge oder Mahd (Mähfahrzeuge oder Trittschäden von Weidetieren). Siehe Ausführungen in Tabelle 12 zu „Verdichtungen“ - Erhöhen von Direktabflüssen und damit verbundene Sediment- und Stoffeinträgen in die Oberflächengewässer - Einschränken der Lebensraumfunktion, physikalisch-chemischen Wasserfunktion, Wasserhaushaltsfunktion und Abflussregulationsfunktion	- Siehe Ausführungen zum Schutzgut Boden in Tabelle 18
Stofflicher Austrag*	- Einträge von Arzneimitteln/Schadstoffen/Reinigungsmitteln/PFAS (Löschschaum) in Oberflächengewässer bzw. mit dem Sickerwasser ins Grundwasser - Beeinträchtigen der Lebensraumfunktion und der Trinkwasseraufbereitung	- Siehe Ausführungen zum Schutzgut Boden in Tabelle 18 - Verwendung von reinem Wasser zur Reinigung der PV-Module - Erstellen eines Brandschutzkonzeptes (nur PFAS-freien Löschschaum verwenden)
Stromableitung*	- Keine Beeinträchtigungen zu erwarten	- Keine Maßnahmenvorschläge

* Aufgrund fehlender Literaturquellen sind diese potenziellen Auswirkungen hergeleitet

Tabelle 20 Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen für potenzielle Beeinträchtigungen des Schutzgutes Luft und Klima durch betriebsbedingte Wirkfaktoren von PV-FFA.

Schutzgut Luft und Klima		
Keine	- Keine Beeinträchtigungen zu erwarten	- Keine Maßnahmenvorschläge

5.2 Maßnahmen beim Rückbau

Der Rückbau der oberirdischen Teile von PV-FFA ist aus technischer Sicht weitgehend unproblematisch und dürfte in der Regel bei bodenschonender Ausführung nicht zu erheblichen nachhaltigen Beeinträchtigungen der Funktionen der Schutzgüter Boden-, Wasser, Luft- und Klima im Naturhaushalt führen.

Bei unterirdisch eingelassenen Betonfundamenten ist dagegen der Einsatz schwerer Baumaschinen vermutlich unvermeidbar. Die Entfernung der Erdkabel ist ebenfalls mit starken Eingriffen in den Boden und die dort befindlichen Lebensräume verbunden, da hierfür in den meisten Fällen eine offene Bauweise notwendig ist (Herden et al., 2009).

Beim Rückbau sollten alle bodenschutzfachlichen Anforderungen wie sie beim Aufbau gelten berücksichtigt werden. Dazu zählen ein Bodenschutzkonzept nach DIN 19639. Eine bodenkundliche Baubegleitung begleitet den Rückbau der PV-FFA und die Rekultivierung der Böden (vgl. 6.3). Dabei beurteilt sie den Umfang einer Zwischenbewirtschaftung, führt ein Monitoring durch und empfiehlt – falls erforderlich – Maßnahmen zu Beseitigung von Funktionseinschränkungen (DIN 19639; Miller & Peter, 2023).

6 Fazit

Der notwendige Ausbau von PV-FFA zur Erreichung der Klimaziele führt zu einer zunehmenden Flächeninanspruchnahme und damit zu relevanten Wechselwirkungen mit den Schutzgütern Boden, Wasser, Klima und Luft. Die Auswirkungen sind stark standort-, bau- und bewirtschaftungsabhängig und können sowohl negativ als auch positiv ausfallen.

Besonders kritisch sind die baubedingten Auswirkungen, da sie häufig die größten und teilweise langfristigen Beeinträchtigungen verursachen. Vor allem Bodenverdichtungen, Erosion sowie Substratvermischungen können zentrale Bodenfunktionen wie die Lebensraum- und Speicherungs-, Regelungs-/ Pufferfunktion nachhaltig einschränken. Aus den Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen steigt das Risiko für Oberflächenabfluss und Bodenerosion; tritt der Oberflächenabfluss mit seinen Sediment- und Stofffrachten in Oberflächengewässer über, dann werden auch die Funktionen des Schutzgutes Wasser erheblich beeinträchtigt. Diese Effekte hängen maßgeblich von der Bauausführung ab und können durch bodenschonende Maßnahmen deutlich reduziert werden.

Die anlagebedingten Auswirkungen sind differenziert zu betrachten: Einerseits kann die Umwandlung intensiv genutzter Ackerflächen in extensives Grünland zu einer Verbesserung der Bodenfunktionen führen (insbesondere die Förderung von Bodenleben). Andererseits verändern PV-Module durch Verschattung und Niederschlagsumverteilung die Standortbedingungen. Dies kann zu kleinräumigen Veränderungen von Vegetation, Bodenwasserhaushalt, Erosionsprozessen und Stoffkreisläufen führen. Die Effekte können teilweise reduziert werden, in dem die Einzelmodule nicht nahtlos aneinander montiert werden, sondern auf Lücke; bereits wenige Zentimeter Abstand zwischen den Modulreihen mindern den Konzentrationseffekt auf den abfließenden Niederschlag, der dann von jedem einzelnen Modul abtropfen kann, so dass der Boden gleichmäßiger mit Niederschlagswasser versorgt wird. Über die Modultischtiefe und -höhe kann der Beschattungseffekt beeinflusst werden. Das Wechselspiel zwischen den verschiedenen anlagenbedingten Auswirkungen auf die betroffenen Funktionen der Schutzgüter ist komplex und sicherlich auch Ursache dafür, dass die recherchierten Literaturquellen zum Teil gegensätzliche Auswirkungen beschreiben. Insgesamt lässt sich schlussfolgern, dass die anlagenbedingten Auswirkungen auf Böden jedoch meist lokal begrenzt sind und stark vom Aufbau der Anlage sowie dem Flächenmanagement abhängig.

Für das Schutzgut Wasser stehen anlagenbedingt insbesondere Veränderungen im Wasserhaushalt und im Oberflächenabfluss im Vordergrund. Während großräumige Auswirkungen (z. B. auf die Grundwasserneubildung) eher gering sind, können lokal veränderte Versickerungsraten und Stoffeinträge auftreten – insbesondere bei unzureichender Vegetationsdeckung.

Die klimatischen Auswirkungen beschränken sich überwiegend auf mikroklimatische Veränderungen durch Verschattungseffekte wie reduzierte Temperaturen, veränderte Luftfeuchte und modifizierte Luftströmungen innerhalb der Anlagen. Diese Effekte sind im Wesentlichen räumlich begrenzt und in der Regel nicht großräumig klimawirksam. Stärkere Auswirkungen können entstehen, wenn PV-FFA auf Kaltluftentstehungsflächen oder in

bedeutsamen Kaltluftschneisen gebaut werden. Die recherchierte Literatur gibt Hinweise auf bedeutsame Beeinflussungen dieser klimatisch wichtigen Prozesse, ohne dass die Effekte bisher systematisch untersucht worden sind.

Betriebsbedingte Auswirkungen sind insgesamt gering und können eher indirekt durch Pflege- und Wartungsmaßnahmen auftreten. Potenzielle Auswirkungen können durch ein angepasstes Management (wie leichte Wartungsfahrzeuge) vermieden werden.

Insgesamt wird deutlich, dass PV-FFA kein grundsätzliches Risiko für die Schutzgüter darstellen, sofern geeignete Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen konsequent umgesetzt werden. Eine zentrale Rolle spielen dabei eine sorgfältige Standortwahl, bodenschonende Bauweisen (sowohl beim Aufbau als auch beim Rückbau) sowie ein angepasstes Vegetations- und Flächenmanagement. So kann der notwendige Ausbau der Photovoltaik mit den Anforderungen des Umwelt- und Ressourcenschutzes in Einklang gebracht werden.

6.1 Forschungslücken

Trotz rasantem Ausbau der PV-FFA in Deutschland bestehen hinsichtlich der Wirkungen auf die Schutzgüter Boden, Wasser, Klima und Luft noch erhebliche Forschungslücken.

Durch nicht schonende Baumaßnahmen können erhebliche und schädliche Auswirkungen für das Schutzgut Boden entstehen. Quantitative und auf andere Standorte direkt übertragbare Studien zur Schädigung des Bodengefüges, dadurch ausgelöster Beeinträchtigungen der Lebensraum- sowie Speicherungs-, Regelungs-/ Pufferfunktionen und erhöhter Oberflächenabflüsse und Erosionsraten fehlen.

Insbesondere der Langzeitbetrieb und damit die Folgen auf die Bodentemperatur, die Bodenfeuchte und die Wasserdynamik in Abhängigkeit von der Vornutzung und der Bodenart muss anhand von empirischen Studien begleitet werden. Dazu zählen auch umfangreichere Abschätzungen zu CO₂-Speicherung der Böden unter PV-FFA. Eine intensivere Betrachtung der Schattenwirkung und Niederschlagsumverteilung könnte hilfreiche Hinweise zur Gestaltung von PV-FFA geben, um Mindestabstände der PV-Module auf den Tischen und Reihenabstände definieren zu können, insbesondere bei Anlagen mit hohem Beschattungspotenzial (Ost-West-Anlagen).

Es fehlen umfassende Studien (auch zu neueren Technologien) zu potenziellen Schadstoffausträgen der PV-Gestelle und -Module, welche in situ und unter verschiedenen Wetterextremen durchgeführt werden sollten.

Trotz der genannten Forschungslücken ist die Hinweislage auf mögliche negative Auswirkungen bereits ausreichend, um die vorgestellten Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen unverzüglich umzusetzen, so dass insgesamt eine umweltschonende Errichtung der PV-FFA bereits beim heutigen Wissensstand möglich ist.

6.2 Kernaussagen

- Der Ausbau von PV-FFA ist notwendig, führt aber zu steigender Flächeninanspruchnahme und damit Umweltwirkungen auf die Schutzgüter Boden, Wasser, Luft und Klima.
- Die größten Risiken entstehen durch baubedingte Auswirkungen, v. a. durch Bodenverdichtung und Erosion, die insbesondere die Bodenfunktionen und Funktionen des Schutzgutes Wasser im Naturhaushalt erheblich und schädlich verändern können.
- Anlagebedingte Auswirkungen sind standortabhängig und müssen durch wissenschaftliche Untersuchungen intensiver betrachtet werden. Möglich sind positive und negative Effekte wie: Extensivierung (Förderung des Bodenlebens, Humusaufbau, geringere Stoffeinträge), Verschattung, veränderte Niederschlagsverteilung, lokale Erosion. Veränderter Wasserhaushalt: Einflüsse sind lokal möglich, großräumigen Auswirkungen auf Oberflächengewässer und das Grundwasser sind nicht zu erwarten. Lokalen Risiken wie dem direkten Übertritt durch erhöhten Oberflächenabfluss und Bodenerosion kann mit geeigneten und praxistauglichen Maßnahmen effektiv entgegengewirkt werden.

Effekte auf Luft und Klima: Unter den Modulreihen sind Effekte auf Luft- und Bodentemperaturen und somit Auswirkungen auf das Mikroklima durch die Literatur belegt. Auf bedeutsamen Kaltluftbildungsflächen und in Kaltluftschneisen sollten PV-FFA nur sehr zurückhaltend aufgestellt werden, um negative Auswirkungen auf den Landschaftshaushalt und Siedlungsflächen zu vermeiden. Insgesamt sind jedoch großflächige Auswirkungen nicht zu erwarten, wenn die Anlagengröße und räumliche Anlagenkonzentration das heute übliche Maß nicht deutlich übersteigen.

- Betriebsbedingte Auswirkungen: Die Auswirkungen sind insgesamt gering und können durch angepasste Pflege- und Wartungsmaßnahmen gut gesteuert werden.
- Langfristig ist auch nach Einstellung des Betriebs von PV-FFA nach ca. 30 Jahren eine landwirtschaftliche Folgenutzung möglich, wenn die im Fachgutachten aufgeführten Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen bei der Errichtung und beim Rückbau konsequent umgesetzt werden. Entscheidend ist die fachgerechte Planung und Umsetzung von Schutzmaßnahmen (Boden-, Wasser- und Flächenmanagement). Insgesamt sind PV-FFA umweltverträglich umsetzbar, wenn geeignete Maßnahmen berücksichtigt werden.
- Als wesentliche Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen können anhand der Studienlage genannt werden:
 - Keine Errichtung von PV-FFA auf besonders empfindlichen Standorten (Standortauswahl im Zuge der Planung und Genehmigung)
 - Kein Winterbau: In den Wintermonaten, insbesondere im Januar und Februar sind anhand langfristiger klimatischer Wasserbilanzen auf den meisten Standorten vollständig wassergesättigte und damit sehr hoch verdichtungsempfindliche Bodenverhältnisse zu erwarten. Aus diesem Grund darf die Bauzeitenplanung (Auf- und Rückbau) nicht in die Monate mit regelmäßig sehr hohen Bodenwassergehalten gelegt werden. In diesen Monaten sind Befahrungen, Bodenausbau,

Bodenumlagerung und Rekultivierung des Baufeldes nicht fachgerecht umsetzbar und führen nahezu zwangsläufig zu schädlichen Bodenveränderungen im Sinne des Bodenschutzrechts.

- Begrünung: Das Baufeld muss rechtzeitig vor Baubeginn vollständig und dicht begrünt sein. Werden PV-FFA auf Ackerstandorten errichtet, ist die Begrünung mindestens 3 Monate vor Baustart vorzunehmen. Andernfalls drohen erhebliche Beeinträchtigungen des Bodenwasserhaushaltes und damit einhergehend erhöhte Oberflächenabflüsse und Bodenerosion, von denen auch Risiken für weitere Schutzgüter (Siedlungs- und Verkehrsflächen unterhalb der PV-FFA, Oberflächengewässer, Biotope) ausgehen bis hin zu möglichen Umweltschäden.
- Befestigungen von Baubedarfsflächen: Stark befahrene Baueinrichtungs-, Baulager- und Baustraßenflächen müssen mit geeigneten Techniken befestigt werden, um Verdichtungsschäden mit all seinen Folgewirkungen effektiv zu vermeiden bzw. zu reduzieren.
- Ausreichende Ausweisung von Baubedarfsflächen: In der derzeitigen Praxis ist zu beobachten, dass die in der Ausführungsplanung gekennzeichneten Baubedarfsflächen häufig zu klein sind. Das führt zur Aufweitung der Flächen für die Lagerung von Baumaterial etc. auf unbefestigte Böden mit entsprechenden Schädigungen. Insofern müssen realistische Flächenbedarfe in die Planung eingehen, um das Baufeld für eine schonende Bauausführung bestmöglich vorbereiten zu können.
- Erdverlegte Leitungen: Beim Aushub der Kabelgräben, sowohl der Kabelgräben innerhalb der Anlagenfläche als auch der Anschlussleitungen, ist auf eine fachgerechte Bodentrennung beim Aushub und bei der Zwischenlagerung zu achten. Die Rückverfüllung muss lagegerecht entsprechend der ursprünglichen Schichten erfolgen. Die Rückverfüllung darf nicht überverdichtet werden, sondern muss die standorttypische Normalverdichtung und die natürliche Durchwurzelbarkeit wiederherstellen.
- Konsequente und direkte Umsetzung der vorgestellten Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen, da es trotz Forschungslücken bereits ausreichend Indizien für mögliche negative Auswirkungen gibt.

6.3 Überlegungen zu den Folgen einer 30-jährigen Überstellung

Da die Laufzeiten von PV-FFA sich meist auf 20 bis 30 Jahre belaufen, sind die meisten Anlagen noch aktiv oder werden modernisiert. Es gibt von daher keine publizierten Untersuchungen oder Praxisbeispiele, um festzustellen, inwieweit eine landwirtschaftliche Folgenutzung nach dem Anlagenrückbau möglich ist.

Das KNE hat die rechtliche Darlegung (KNE, 2024b) und eine Ausarbeitung über die naturschutzrechtlichen Aspekte im Rahmen der Folgenutzung (KNE, 2023) veröffentlicht. Offen bleibt, wie die zuvor aufgeführten potenziellen Auswirkungen von PV-FFA eine landwirtschaftliche Folgenutzung beeinflussen.

Angesichts der Erkenntnisse zu den bau-, anlagen- und betriebsbedingten Auswirkungen (2 bis 4) sind im Wesentlichen erhebliche Auswirkungen auf das Schutzgut Boden zu erwarten. Dabei dominieren die Verdichtungswirkungen auf die natürlichen Bodenfunktionen, die für die Folgenutzung relevant sein können. Die Verdichtungswirkungen sind insbesondere in der Bauphase zu erwarten, wenn keine Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen (vgl. Tabelle 12) ergriffen werden; dabei sind sowohl die Errichtung als auch der Rückbau der PV-FFA bedeutsam für das Verdichtungsmaß. Aber auch in der Betriebsphase bei der PV-FFA können Verdichtungsschäden durch Befahrungen während der Pflege- und Unterhaltungsmaßnahmen sowie durch unsachgemäße Beweidungspraktiken mit zu hohem Viehbesatz oder zu langen Besatzzeiten ausgelöst werden.

Dauerhafte und erhebliche Auswirkungen auf die Schutzgüter Wasser sowie Luft und Klima sind nicht zu besorgen.

Insgesamt hängen die Folgen einer 30-jährigen Überstellung insbesondere von der Intensität der baubedingten und anlagenbedingten Auswirkungen ab.

Baubedingte tiefgreifende Bodenverdichtungen könnten die Produktionsfunktion nachhaltig und erheblich einschränken. Eine Tieflockerung mit speziellen Lockerungsgeräten ist prinzipiell möglich, jedoch verbleiben insbesondere im Unterboden nicht selten dauerhafte Verdichtungen. Eine vollständige Beseitigung von Verdichtungsschäden ist also nicht immer zu erreichen und sollte durch die beschriebenen vorsorgenden Maßnahmen (vgl. 5) vermieden werden.

Potenzielle anlagenbedingte Beeinträchtigungen des Bodens durch Veränderungen des Wasser- und Nährstoffhaushaltes, des Kalkzustandes sowie des Kohlenstoffvorrats sollten durch entsprechende Rekultivierungsmaßnahmen nach dem Anlagenrückbau prinzipiell mit Hilfe geeigneter Maßnahmen nach DIN 19639 sowie DIN 18915 wieder hergestellt werden können, so dass diesbezüglich keine dauerhaften Beeinträchtigungen zu erwarten sind. Bei sehr stark abgesunken pH-Werten ist allerdings zu berücksichtigen, dass eine Gesundungskalkung zur Erreichung der landwirtschaftlichen Ziel-pH-Werte (Fußnote 8) auch mehr als 3 Jahre in Anspruch nehmen kann. Derartige Gesundungskalkungen könnten nach Anlagerückbau auch mit einer bodenschonenden Zwischenbewirtschaftung im Sinne der DIN 19639 kombiniert werden, um wiederum eine volle Funktionalität der Böden herstellen zu können.

Je nach Vornutzung kann sich der Boden unter einer extensiven Grünlandnutzung während der Überstellung durch PV-Module durchaus regenerieren (Badelt et al., 2020; Miller et al., 2023), da im Vergleich zu einer intensiven Ackernutzung keine Bodenbearbeitung durchgeführt wird und keine Düngemittel oder Pestizide appliziert werden. So kann die Lebensraumfunktion durch ein gesteigertes Bodenleben über einen langen Zeitraum gestärkt werden. Auch die Belastung des Grundwassers kann sich so reduzieren.

Damit anlagebedingt keine nachhaltigen negative Auswirkungen insbesondere die Produktionsfunktion des Bodens einschränken, sollte das Vegetations- und Flächenmanagement angepasst und der Anteil der überschirmten Fläche begrenzt sein, um einer dauerhaften

Beschattung und einer reduzierten Biomasseproduktion vorzubeugen (vgl. 3.1.4 und Maßnahmenkatalog Tabelle 15).

Beim Rückbau sollten – wie beim Aufbau – alle bodenschutzfachlichen Anforderungen nach DIN 19639 sowie DIN 18915 berücksichtigt werden. Liegen schädliche Bodenveränderungen oder Funktionseinschränkungen vor, sind geeignete Rekultivierungsmaßnahmen nach dem Rückbau entsprechend der DIN 19639 und DIN 18915 zu ergreifen. Die zu ergreifenden Maßnahmen sollten von einer Bodenkundlichen Baubegleitung ermittelt werden (Miller et al., 2023).

Eine landwirtschaftliche Folgenutzung als Acker- oder Grünland sollte mit fachgerechter Planung, Durchführung und Rekultivierung nach 30 Jahren in der Regel möglich sein.

7 Quellenverzeichnis

- Adeh, E. H., Selker, J. S., & Higgins, C. W. (2018). Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. *PLoS ONE*, 13(11). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203256>
- Armstrong, A., Ostle, N. J., & Whitaker, J. (2016). Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling. *Environmental Research Letters*, 11(7). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074016>
- Badelt, O., Niepelt, R., Wiehe, J., Matthies, S., Gewohn, T., Stratmann, M., Brendel, R., & Von Haaren, C. (2020). Integration von Solarenergie in die niedersächsische Energielandschaft (INSIDE).
- Baiamonte, G., Gristina, L., & Palermo, S. (2023). Impact of solar panels on runoff generation process. *Hydrological Processes*, 37(12). <https://doi.org/10.1002/hyp.15053>
- Barron-Gafford, G. A., Minor, R. L., Allen, N. A., Cronin, A. D., Brooks, A. E., & Pavao-Zuckerman, M. A. (2016). The photovoltaic heat island effect: Larger solar power plants increase local temperatures. *Scientific Reports*, 6. <https://doi.org/10.1038/srep35070>
- Baumann, K., Carillo, A., Hamidi D, Colombo, A. W., & Kayer, M. (2025). Impact of a dummy field-photovoltaic construction on the early development of a multi-species sward. *Grassland Science in Europe*, 30 (Multi-species swards). https://doi.org/https://doi.org/10.1163/9789004751163_112
- BDEW. (2025). Empfehlungen zur Nutzung von PV-Anlagen in Wasserschutzgebieten – Vorschläge aus Sicht des BDEW.
- Bhattacharyya, S. S., Ros, G. H., Furtak, K., Iqbal, H. M. N., & Parra-Saldívar, R. (2022). Soil carbon sequestration – An interplay between soil microbial community and soil organic matter dynamics. In *Science of the Total Environment* (Bd. 815). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.152928>
- Böhm, J., & Tietz, A. (2022). Abschätzung des zukünftigen Flächenbedarfs von Photovoltaik-Freiflächenanlagen.
- Brehm, T., & Culman, S. (2022). Pipeline installation effects on soils and plants: A review and quantitative synthesis. In *Agrosystems, Geosciences and Environment* (Bd. 5, Nummer 4). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/agg2.20312>
- Carvalho, F., Healing, S., & Armstrong, A. (2024). Enhancing soil carbon in solar farms through active land management: a systematic review of the available evidence. In *Environmental Research: Ecology* (Bd. 3, Nummer 4). Institute of Physics. <https://doi.org/10.1088/2752-664X/ad8ce4>
- Carvalho, F., Montag, H., Bentley, L., Šarlej, R., Broyd, R. C., Blaydes, H., Cattin, M., Burke, M., Wallwork, A., Ramanayaka, S., White, P. C. L., Sharp, S. P., Clarkson, T., & Armstrong, A. (2025). Plant and soil responses to ground-mounted solar panels in temperate agricultural systems. *Environmental Research Letters*, 20(2). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ada45b>

- Chen, X., Chen, B., Wang, Y., Zhou, N., & Zhou, Z. (2024). Response of Vegetation and Soil Property Changes by Photovoltaic Established Stations Based on a Comprehensive Meta-Analysis. *Land*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/land13040478>
- Choi, C. S., Cagle, A. E., Macknick, J., Bloom, D. E., Caplan, J. S., & Ravi, S. (2020). Effects of Revegetation on Soil Physical and Chemical Properties in Solar Photovoltaic Infrastructure. *Frontiers in Environmental Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00140>
- Cook, L. M., & McCuen, R. H. (2013). Hydrologic Response of Solar Farms. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE))
- Costa, C. R. T., Moreira, M. L., & Saliba, A. P. M. (2021). Soil stabilization with lime for erosion control in solar plants. *REM - International Engineering Journal.*, 74(3), 329–335. <https://doi.org/10.1590/0370-44672020740127>
- DIN 18915. (2018). Vegetationstechnik im Landschaftsbau - Bodenarbeiten.
- DIN 19639. (2019). Bodenschutz bei Planung und Durchführung von Bauvorhaben.
- Ebert, I., Amato, R., Hein, A., & Konradi, S. (2014). Arzneimittel in der Umwelt - vermeiden, reduzieren, überwachen. https://www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/378/publikationen/01.08.2014_hintergrundpapier_arzneimittel_final_.pdf
- Ebert, T., & Müller, C. (2011). Sind Schadstoffe in Photovoltaik-Freiflächenanlagen eine Gefahr für den Boden? https://doi.org/https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/iab/dateien/boden_pv_tagung.pdf
- Feistel, U., Kettner, S., Ebermann, J., Mueller, F., & Krajcsi, E. (2024). Quantifying the Distribution of Evapotranspiration at PV and APV Sites Using Soil Moisture. *AgriVoltaics Conference Proceedings*, 2. <https://doi.org/10.52825/agripv.v2i.978>
- Feldmeier, S., Folz, S., Konrad, J., Müller, D., & Seibert, M. (2024). Möglichkeiten und Grenzen des artenschutzrechtlichen Ausgleichs in Solarparks. www.bghplan.com
- Feldwisch, N., Thies, C., Koumans, C., Herzog, M., Sperl, D., & Koschel, S. (2023). Bodeneigenschaften und landwirtschaftliche Erträge auf der ALEGrO-Erdkabeltrasse. *Bodenschutz*, (1), 4. <https://doi.org/10.37307/j.1868-7741.2023.01.04>
- Gätsch, C., & Wiehe, J. (2026). Verfahrensfreistellung von Photovoltaik-Freiflächenanlagen – Auswirkungen auf die Beachtung naturschutzrechtlicher Belange. www.naturschutz-energiewende.de
- Günnewig, D., Johannwerner, E., Wachter, T., Bleyhl, B., Kelm, T., Liebhart, L., Klingler, M., Wegner, N., Otto, J., & Fietze, D. (2024). Zukünftige Solar-Anlagen: Technologien, Auswirkungen, räumliche Steuerungsmöglichkeiten. <https://doi.org/10.19217/skr712>
- Günnewig, D., Sieben, A., Püschel, M., Bohl, J., & Mack, M. (2007). Leitfaden zur Berücksichtigung von Umweltbelangen bei der Planung von PV-Freiflächenanlagen.
- Hamidi, D. (2026). Artikel zur EGF-Conference 2026 in Evora/Portugal zum Thema Mikroklima und Bodenfeuchte in PV-Freiflächenanlagen (accepted).
- Herden, C., Rassmus, J., & Gharadjedaghi, B. (2009). Naturschutzfachliche Bewertungsmethoden von Freilandphotovoltaikanlagen. http://www.bfn.de/0502_skriptliste.html?&no_cache=1

- Hernandez, R. R., Easter, S. B., Murphy-Mariscal, M. L., Maestre, F. T., Tavassoli, M., Allen, E. B., Barrows, C. W., Belnap, J., Ochoa-Hueso, R., Ravi, S., & Allen, M. F. (2014). Environmental impacts of utility-scale solar energy. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Bd. 29, S. 766–779). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.041>
- HUKLV – heute hessisches Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt, Weinbau, Forsten, Jagd und Heimat (2017). Bodenschutz in Hessen. Rekultivierung von Tagebau- und sonstigen Abgrabungsflächen. Herstellung einer durchwurzelbaren Bodenschicht. www.umweltministerium.hessen.de
- Karner, K., Weber, N., Asbäck, Y., Getzner, M., & Schönhart, M. (2024). Analyse der Auswirkungen von Photovoltaikanlagen auf Biodiversität unter Berücksichtigung der vielfältigen naturräumlichen Standortvoraussetzungen in Österreich. www.startclim.at
- Kelm, T., & Stauch, D. (2025). Flächeninanspruchnahme von PV-Freiflächenanlagen, Update 2024. https://www.zsw-bw.de/fileadmin/user_upload/Flaecheninanspruchnahme_PV-FFA_Update_2024.pdf
- KNE- Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende (2023). Photovoltaik und Folgenutzung auf Ackerland und Grünland - Teil 2. www.naturschutz-energiewende.de
- KNE (2024a). Anfrage Nr. 362 zu Untersaat für PV-Freiflächenanlagen mit Regiosaatgut. Antwort vom 27. August 2024. www.naturschutz-energiewende.de
- KNE (2024b). Photovoltaik und Folgenutzung auf Ackerland und Grünland. www.naturschutz-energiewende.de
- Krasner, N. Z., Fox, J., Armstrong, A., Ave, K., Carvalho, F., Li, Y., Walston, L. J., Ricketts, M. P., Jordaan, S. M., Abou Najm, M., Hartmann, H. M., Lybrand, R., & Hernandez, R. R. (2025). Impacts of photovoltaic solar energy on soil carbon: A global systematic review and framework. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Bd. 208). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115032>
- Lambert, Q., Bischoff, A., Cueff, S., Cluchier, A., & Gros, R. (2021). Effects of solar park construction and solar panels on soil quality, microclimate, CO₂ effluxes, and vegetation under a Mediterranean climate. *Land Degradation & Development*, 32(18), 5190–5202.
- Lambert, Q., Bischoff, A., Enea, M., & Gros, R. (2023). Photovoltaic power stations: an opportunity to promote European semi-natural grasslands? *Frontiers in Environmental Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1137845>
- Liu, H., Wu, C., Yu, Y., Zhao, W., Liu, J., Yu, H., Zhuang, Y., & Yetemen, O. (2023). Effect of Solar Farms on Soil Erosion in Hilly Environments: A Modeling Study From the Perspective of Hydrological Connectivity. *Water Resources Research*, 59(12). <https://doi.org/10.1029/2023WR035067>
- Liu, Y., Zhang, R. Q., Huang, Z., Cheng, Z., López-Vicente, M., Ma, X. R., & Wu, G. L. (2019). Solar photovoltaic panels significantly promote vegetation recovery by modifying the soil surface microhabitats in an arid sandy ecosystem. *Land Degradation and Development*, 30(18), 2177–2186. <https://doi.org/10.1002/ldr.3408>

- LLUR - Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (2021). Leitfaden zum Bodenschutz beim Bauen. Schriftenreihe: LLUR SH – GB 28.
- Marrou, H., Guillioni, L., Dufour, L., Dupraz, C., & Wery, J. (2013). Microclimate under agri-voltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? *Agricultural and Forest Meteorology*, 177, 117–132. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.04.012>
- Miller, R., Peter, M. & Molder, F. (2023). Bodenschutz bei Standortauswahl, Bau, Betrieb und Rückbau von Freiflächenanlagen für Photovoltaik und Solarthermie. https://www.labo-deutschland.de/documents/LABO-Arbeitshilfe_FFA_Photovoltaik_und_Solarthermie.pdf
- Moscatelli, M. C., Marabottini, R., Massaccesi, L., & Marinari, S. (2022). Soil properties changes after seven years of ground mounted photovoltaic panels in Central Italy coastal area. *Geoderma Regional*, 29. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00500>
- Nair, A. A., Rohith, A. N., Raj, C., & McPhillips, L. E. (2022). Evaluating the potential impacts of solar farms on hydrological responses. 2022 ASABE Annual International Meeting. <https://doi.org/10.13031/aim.202201262>
- Nover, J., Zapf-Gottwick, R., Feifel, C., Koch, M., & Werner, J. H. (2021). Leaching via weak spots in photovoltaic modules. *Energies*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/en14030692>
- Osterburg, B., Rüter, S., Freibauer, A., De Witte, T., Elsasser, P., Kätsch, S., Leischner, B., Paulsen, H. M., Rock, J., Röder, N., Sanders, J., Schweinle, J., Steuk, J., Stichnothe, H., Stümer, W., Welling, J., & Wolff, A. (2013). Handlungsoptionen für den Klimaschutz in der deutschen Agrar- und Forstwirtschaft. https://doi.org/10.3220/REP_11_2013
- Peschel, R., & Peschel, T. (2025). Artenvielfalt im Solarpark. Eine bundesweite Feldstudie. www.bne-online.de
- Rück, F., Reichel, A., & Schneider, O. (2011). Bodenzustand nach Erstellung einer Photovoltaik-Freiflächenanlage in Südniedersachsen. <http://www.dbges.de>
- Schlegel, J., Hintz, W., Rohrer, J., Rupf, R., & Stickelberger, D. (2021). Auswirkungen von Freiflächen-Photovoltaikanlagen auf Biodiversität und Umwelt. *EnergieSchweiz*.
- Scholten, L., de Goede, R. G. M., Edlinger, A., Van Aken, B. B., & De Deyn, G. B. (2025). Sharing the light, impact of solar parks on plant productivity, soil microbes and soil organic matter. *Plants People Planet*. <https://doi.org/10.1002/ppp3.70011>
- Sidler, A., Schmidt, F., Vallat, B., Grifoni, F., Habisreutinger, S. N., Suhonen, R., Snaith, H., Schäffer, A., & Lenz, M. (2025). Assessment of soil impacts from lead release by lead-halide perovskite solar cells based on outdoor leaching tests. *EES Solar*. <https://doi.org/10.1039/d5el00191a>
- Siede, C., Rethmeyer, F., Wilms, L., Zinken, L., Kunz, F., Sutterlütli, R., Weber, L., Hamidi, M., Kayser, M., Isselstein, J., & Hamidi, D. (2026). Short-term behavioural patterns of sheep under extensive solar grazing management with sun-tracking photovoltaic modules. *Livestock Science*, 303. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2025.105880>

- Uldrijan, D., Winkler, J., & Vaverková, M. D. (2023). Bioindication of Environmental Conditions Using Solar Park Vegetation. *Environments - MDPI*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/environments10050086>
- Vandré, R. (2024). Begutachtung von Solaranlagen am 18.03.2024: Oberflächenabfluss, Erosion, Maßnahmen. <https://boden-staendig.eu/file/3fcae692-b38b-4376-8560-8542eaf4c107.pdf/ortstermin-solaranlagen-ermetzhofen-bericht>
- Vervloesem, J., Marcheggiani, E., Choudhury, M. A. M., & Muys, B. (2022). Effects of Photovoltaic Solar Farms on Microclimate and Vegetation Diversity. *Sustainability (Switzerland)*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/su14127493>
- Vidaurre, R., Lukat, E., Steinhoff-Wagner, J., Ilg, Y., Petersen, B., & Möller, K. (2016). Konzepte zur Minderung von Arzneimittelinträgen aus der landwirtschaftlichen Tierhaltung in die Umwelt. www.umweltbundesamt.de
- Wang, F., & Gao, J. (2025). The Photovoltaic Panel Array Inhibits Initial Rill Development and Soil Erosion During Rainfall-Runoff Processes in a Soil Slope. *Water Resources Research*, 61(10). <https://doi.org/10.1029/2025WR040180>
- Wieser, A. A., Scherz, M., Passer, A., & Kreiner, H. (2021). Challenges of a healthy built environment: Air pollution in construction industry. In *Sustainability (Switzerland)* (Bd. 13, Nummer 18). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su131810469>
- Wirth, H. (2026). Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. www.pv-fakten.de, Fassung vom 15.01.2026
- Yavari, R., Zaliwciw, D., Cibi, R., & McPhillips, L. (2022). Minimizing environmental impacts of solar farms: a review of current science on landscape hydrology and guidance on stormwater management. In *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability* (Bd. 2, Nummer 3). Institute of Physics. <https://doi.org/10.1088/2634-4505/ac76dd>
- Zappek, N., Achtziger, R., Glaser, K., & Richert, E. (2025). Analyse der Vegetation von drei Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA) im Raum Freiberg Analysis of the vegetation of three ground-mounted photovoltaic parks (PV-FFA) in the Freiberg area.
- Zhang, Y., Tian, Z., Liu, B., Chen, S., & Wu, J. (2023). Effects of photovoltaic power station construction on terrestrial ecosystems: A meta-analysis. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 11. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1151182>