

GeoBerichte 52

LANDESAMT FÜR
BERGBAU, ENERGIE UND GEOLOGIE



Entsiegelung
in der Klimaanpassung –
Leitfaden Teil A:
Hintergründe, Vorgehensweisen,
bodenschutzfachliche Hinweise



Niedersachsen



GeoBerichte 52

Landesamt für
Bergbau, Energie und Geologie

Entsiegelung
in der Klimaanpassung –
Leitfaden Teil A:
Hintergründe, Vorgehensweisen,
bodenschutzfachliche Hinweise

ANDRÉ KIRCHNER & ROBIN STADTMANN

Hannover 2025

Impressum

Herausgeber: © Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie

Stilleweg 2
30655 Hannover
Tel. (0511) 643-0

Download unter www.lbeg.niedersachsen.de

1. Auflage.

Version: 26.11.2025

Redaktion: Ricarda Nettelmann

Mail: bodenkundlicheberatung@lbeg.niedersachsen.de

Titelbild: A. Kirchner/R. Stadtmann (LBEG).

ISSN 1864–6891 (Print)

ISSN 1864–7529 (digital)

DOI 10.48476/geober_52_2025

GeoBer.	52	S. 3 – 99	32 Abb.	14 Tab.	Anh.	Hannover 2025
---------	-----------	-----------	---------	---------	------	---------------

Entsiegelung in der Klimaanpassung – Leitfaden Teil A: Hintergründe, Vorgehensweisen, bodenschutzfachliche Hinweise

ANDRÉ KIRCHNER & ROBIN STADTMANN

Kurzfassung

Bodenversiegelung hat vielfältige Auswirkungen auf das Ökosystem: Bodenfunktionen gehen verloren, der natürliche Wasserhaushalt wird verändert, der Abfluss verstärkt, das Mikroklima wird wärmer und trockener, und Lebensräume gehen verloren. Der Schutz der Böden vor Neuversiegelung stellt deshalb eine zentrale Klimaanpassungsmaßnahme dar, erbringen die Böden doch essenzielle natürliche Leistungen, die u. a. für eine erfolgreiche Klimaanpassung von Relevanz sind. Ergänzend zum Schutz der Böden vor Neuversiegelung rückt, insbesondere in Gebieten mit hohem Anteil versiegelter Flächen, zunehmend auch die Entsiegelung von Böden in den Fokus.

Der vorliegende GeoBericht widmet sich deshalb dem Thema Bodenentsiegelung. Mit dieser Maßnahme können natürliche Bodenfunktionen zurückgewonnen werden. Im ersten Teil des GeoBerichts werden fachliche Grundlagen zu den Themen Versiegelung und Entsiegelung erläutert. Dabei werden u. a. die Funktionen und Leistungen von Böden, die vielfältigen Auswirkungen der Bodenversiegelung sowie die positiven Effekte einer Bodenentsiegelung dargestellt. Anschließend werden relevante rechtliche Grundlagen vorgestellt, die zur Begründung und Umsetzung von Entsiegelungsmaßnahmen genutzt werden können.

Im zweiten Teil werden Empfehlungen zur Durchführung von Entsiegelungsmaßnahmen gegeben, von der Konzeption über die Planung bis hin zur praktischen Umsetzung. Dabei liegt der Fokus insbesondere auf dem schonenden Umgang mit dem Boden, der maßgeblich über den Erfolg oder Misserfolg einer Entsiegelungsmaßnahme entscheidet. Häufig gestellte Fragen (FAQ) im Zusammenhang mit Entsiegelungsmaßnahmen bilden den Abschluss des GeoBerichts.

Zukünftig wird der Bericht ergänzt durch einen Teil B, der u. a. Möglichkeiten zur Erfassung und Bewertung der Flächenversiegelung in Kommunen, die zu erwartenden Effekte von Entsiegelungsmaßnahmen sowie Praxisbeispiele aus Niedersachsen behandeln wird.

Inhalt

Vorwort.....	5
1. Hintergrund und Zielsetzung	7
1.1. Warum dieser Leitfaden?	7
1.2. An wen richtet sich dieser Leitfaden?	8
1.3. Aufbau des Leitfadens	8
2. Grundlagen	10
2.1. Funktionen und Leistungen von Böden in Zeiten des Klimawandels	10
2.2. Bodenversiegelung	13
2.2.1. Begrifflichkeiten	13
2.2.2. Auswirkungen von Bodenversiegelung	15
2.2.3. Versiegelungsschwerpunkt Stadt	30
2.3. Bodenentsiegelung	32
2.3.1. Begrifflichkeiten	32
2.3.2. Effekte von Bodenentsiegelung	35
2.3.3. Entsiegelungsschwerpunkt Stadt	36
2.3.4. Entsiegelungsrelevante Kriterien	39
2.4. Rechtsgrundlagen zur Begründung und Umsetzung von Entsiegelungsmaßnahmen	44
2.4.1. Entsiegelung nach BauGB	45
2.4.2. Entsiegelung nach BNatSchG	46
2.4.3. Entsiegelung nach BBodSchG	49
2.4.4. Entsiegelung nach WHG	50
2.4.5. Weitere fachliche Aspekte des Boden- und Grundwasserschutzes	50
2.4.6. Entsiegelung nach Klimarecht	51
3. Vorgehensweise bei der Umsetzung von Entsiegelungsmaßnahmen	53
3.1. Phase 0 – Projektentwicklung	55
3.1.1. Flächenauswahl und interne Abstimmungen	56
3.1.2. Vorhabenbeschreibung	56
3.1.3. Definition von Projektzielen	56
3.1.4. Zeitliche, technische und finanzielle Grobplanung	58
3.1.5. Machbarkeitsbewertung	59
3.2. Phase 1 – Vorprüfung und Ausschreibung von Planungs-/Bauleistungen	59
3.2.1. Grundlagenermittlung	59
3.2.2. Ausschreibungen und Vergabe von Planungs-/Bauleistungen	60
3.3. Phase 2 – Standortanalyse und Beurteilung	62
3.3.1. Aufbau versiegelte Fläche	62
3.3.2. Bodenaufbau im Umfeld	63
3.3.3. Beurteilung Entsiegelungsstandort	64
3.4. Phase 3 – Material- und Bodenmanagement	64
3.4.1. Umgang mit ausgebautem Versiegelungsmaterial	65
3.4.2. Anforderungen an einbaufähiges Bodenmaterial	65
3.5. Phase 4 – Entsiegelung und Flächenneugestaltung	68
3.5.1. Durchführung der Entsiegelungsmaßnahme	68
3.5.2. Umsetzung der Flächenneugestaltung	72
3.6. Phase 5 – Abnahme, Kontrolle und Nachsorge	73
3.6.1. Abnahme	73
3.6.2. Kontrolle und Nachsorge	74
4. Fazit und Ausblick	76
5. Häufig gestellte Fragen (FAQ) im Zusammenhang mit Entsiegelungsmaßnahmen	78
6. Dank	84
7. Quellen	84
Anhang	96

Vorwort

Niedersachsen hat in den vergangenen Jahren wiederholt extreme Starkregenereignisse, Hitze- und Dürreperioden sowie Wetterlagen mit Überflutungen erlebt, die vermutlich für alle von uns spürbar waren. In unserem kollektiven Gedächtnis bleiben sicherlich die große Trockenheit der Jahre 2018 und 2019, das Winterhochwasser 2023/2024 sowie lokale Starkregenereignisse mit den damit verbundenen Elementarschäden. Mit der Zunahme von Wetterextremen ist zukünftig noch weitaus häufiger zu rechnen, wie Klimaszenarien bis 2100 übereinstimmend zeigen. Die dringende Notwendigkeit, Vorsorge zu treffen und Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel zu ergreifen, rückt in den Fokus und ist das Gebot der Stunde. „Die“ eine Lösung zur Klimaanpassung gibt es nicht, sondern es bedarf vielmehr vielfältiger Maßnahmen in allen Lebensbereichen, um diese Herausforderung vor Ort zu bewältigen.

Ein oft übersehenes, weil buchstäblich unter unseren Füßen liegendes Element der Klimaanpassung ist der Boden. Intakte Böden spielen eine Schlüsselrolle: Sie regulieren das Klima, speichern Wasser, binden Kohlenstoff und leisten damit auch einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz. Gleichzeitig sind Böden ein bedrohtes Gut. Die zunehmende Bodenversiegelung zählt europaweit zu den größten Umweltproblemen und ist ein wesentlicher Treiber der Bodendegradation. Sie raubt den Böden ihre natürlichen Funktionen und verschärft damit die Folgen des Klimawandels.

Die Entsiegelung von Böden hingegen eröffnet die Möglichkeit, diese lebenswichtigen Funktionen wiederherzustellen. Sie leistet nicht nur einen Beitrag zur Klimaanpassung, sondern verbessert auch die ökologische und städtebauliche Qualität unserer Umwelt. Damit eine Entsiegelung tatsächlich positive Auswirkungen auf Umwelt und Gesellschaft hat, sind dabei einige Grundsätze zu beachten. Es ist essenziell, mit dem Boden schonend umzugehen und beispielsweise auch den Grundwasserschutz von vornherein mitzudenken. Mit dem vorliegenden Leitfaden stellt das Landesamt für Bergbau,

Energie und Geologie umfangreiche Informationen zu den Themen Bodenversiegelung und -entsiegelung zusammen. Der Bericht umfasst fachliche und rechtliche Grundlagen, empfohlene Vorgehensweisen sowie Antworten auf häufig gestellte Fragen im Zusammenhang mit Bodenversiegelung und -entsiegelung.

Ich lade Sie herzlich ein, diesen Leitfaden zu nutzen, und wünsche Ihnen interessante Erkenntnisse sowie Freude bei der Lektüre.

Carsten Mühlenmeier
Präsident LBEG



1.

HINTERGRUND UND ZIELSETZUNG



Klimaanpassungsmaßnahme der anderen Art. Alternativ würden sich in diesem Fall z. B. eine Entsiegelung und naturnahe Gestaltung des Außenbereichs anbieten.

1. Hintergrund und Zielsetzung

1.1. Warum dieser Leitfaden?

Die in den vergangenen Jahren immer deutlicher spürbaren Auswirkungen des Klimawandels, wie z. B. Hitzeperioden, saisonale Trockenheit und Dürren oder intensive Starkregenereignisse mit Überschwemmungen, erfordern umfangreiche Maßnahmen der Klimaanpassung (NIKO 2023). Wasserrückhalt in der Fläche, wassersensible Stadtentwicklung und Schwammstädte, hochwertige Grünflächen als Erholungsräume und blau-grüne Infrastrukturen zur Erreichung eines lebenswerten Stadtklimas – diese Ansätze stehen besonders im Fokus, um diesen Herausforderungen zu begegnen (BMUV 2023). Eine wesentliche Voraussetzung für ihre erfolgreiche Umsetzung sind unversiegelte und leistungsfähige Böden!

Der Schutz der Böden vor Neuversiegelung stellt deshalb eine zentrale Klimaanpassungsmaßnahme dar, erbringen die Böden doch essenzielle natürliche Leistungen (Kap. 2.1), die für eine erfolgreiche Klimaanpassung von Relevanz sind. Beispiele sind die Aufnahme und Speicherung von Niederschlagswasser, die Versorgung der Vegetation mit Wasser oder die Kühlung der Umgebung durch Verdunstung. In Niedersachsen werden allerdings weiterhin täglich etwa sechs Hektar Boden für Siedlungs- und Verkehrsflächen zusätzlich in Anspruch genommen. Davon wird etwa die Hälfte versiegelt (BASEDOW et al. 2021, LBEG 2023), was einer erfolgreichen Klimaanpassung entgegenwirkt. Dieser fortschreitende Bodenverlust muss reduziert werden, um die Bodenfunktionen und damit die natürlichen Lebensgrundlagen für Mensch und Umwelt zu erhalten. In Niedersachsen wird angestrebt, die Flächen-Neuversiegelung bis 2030 auf weniger als 3 ha/Tag zu begrenzen und danach weiter bzw. bis spätestens 2050 auf „Netto-Null“ zu reduzieren (NNatSchG § 1a).

§ 1a NNatSchG – Begrenzung der Versiegelung von Böden

(1) Ergänzend zu § 1 Abs. 3 Nr. 2 BNatSchG ist die Neuversiegelung von Böden landesweit bis zum Ablauf des Jahres 2030 auf unter 3 ha pro Tag zu reduzieren und bis zum Ablauf des Jahres 2050 zu beenden. Anzurechnen sind Flächen, die entsiegelt und dann renaturiert oder, soweit eine Entsiegelung nicht möglich oder nicht zumutbar ist, der natürlichen Entwicklung überlassen worden sind.

Ergänzend zum Schutz der Böden vor Neuversiegelung rückt, insbesondere in Gebieten mit hohem Anteil versiegelter Flächen, zunehmend die Bodenentsiegelung in den Fokus. Durch Entsiegelungsmaßnahmen soll Böden ihr ehemaliges Leistungsvermögen, zumindest teilweise, zurückgegeben werden, womit sie einen bedeutsamen Beitrag zur Klimaanpassung leisten und die Menschen vor Belastungen und Schäden schützen können (NIKO 2023). Des Weiteren ist Entsiegelung ein zentrales Element zur Erreichung der bis 2050 angestrebten Flächenkreislaufwirtschaft.

Um Entsiegelungsmaßnahmen gezielt planen zu können, sind hochauflösende und aktuelle Kenntnisse über die räumliche Verteilung von potenziellen Entsiegelungsflächen sowie deren systematische Verwaltung in einem Kataster nötig, eine umfangreiche Aufgabe, die nicht von jeder Kommune umgesetzt werden kann (VOLK et al. 2021). Dieser Umstand wird im § 19 („Entsiegelungskataster“) des Niedersächsischen Gesetzes zur Förderung des Klimaschutzes und zur Minderung der Folgen des Klimawandels (Niedersächsisches Klimagesetz – NKli-maG) rechtsverbindlich aufgegriffen.

§ 19 NKlimaG – Entsiegelungskataster

(1) Jede Gemeinde, die nicht Mitglied einer Samtgemeinde ist, sowie jede Samtgemeinde ermittelt und erfasst bis zum 31. Dezember 2026, für welche Flächen ihres Gebietes die Möglichkeit zur Entsiegelung besteht. Die Erfassung erfolgt in einem vom Land zu diesem Zweck elektronisch bereitgestellten Entsiegelungskataster. Das Entsiegelungskataster ist fortlaufend zu ergänzen.

Das im Gesetz beschlossene Entsiegelungskataster wird aktuell im Auftrag des Niedersächsischen Ministeriums für Umwelt, Energie und Klimaschutz (MU) durch das Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN) entwickelt und den Kommunen anschließend kostenfrei zur Verfügung gestellt. Fachlich begleitet wird dieser Prozess durch das Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG). Dieser Leitfaden bündelt den Kenntnisstand über Ver- und Entsiegelung und liefert fachliche Hinweise und Argumentationsgrundlagen für Entsiegelungsprojekte, um bei der Planung und praktischen Umsetzung zu unterstützen.

1.2. An wen richtet sich dieser Leitfaden?

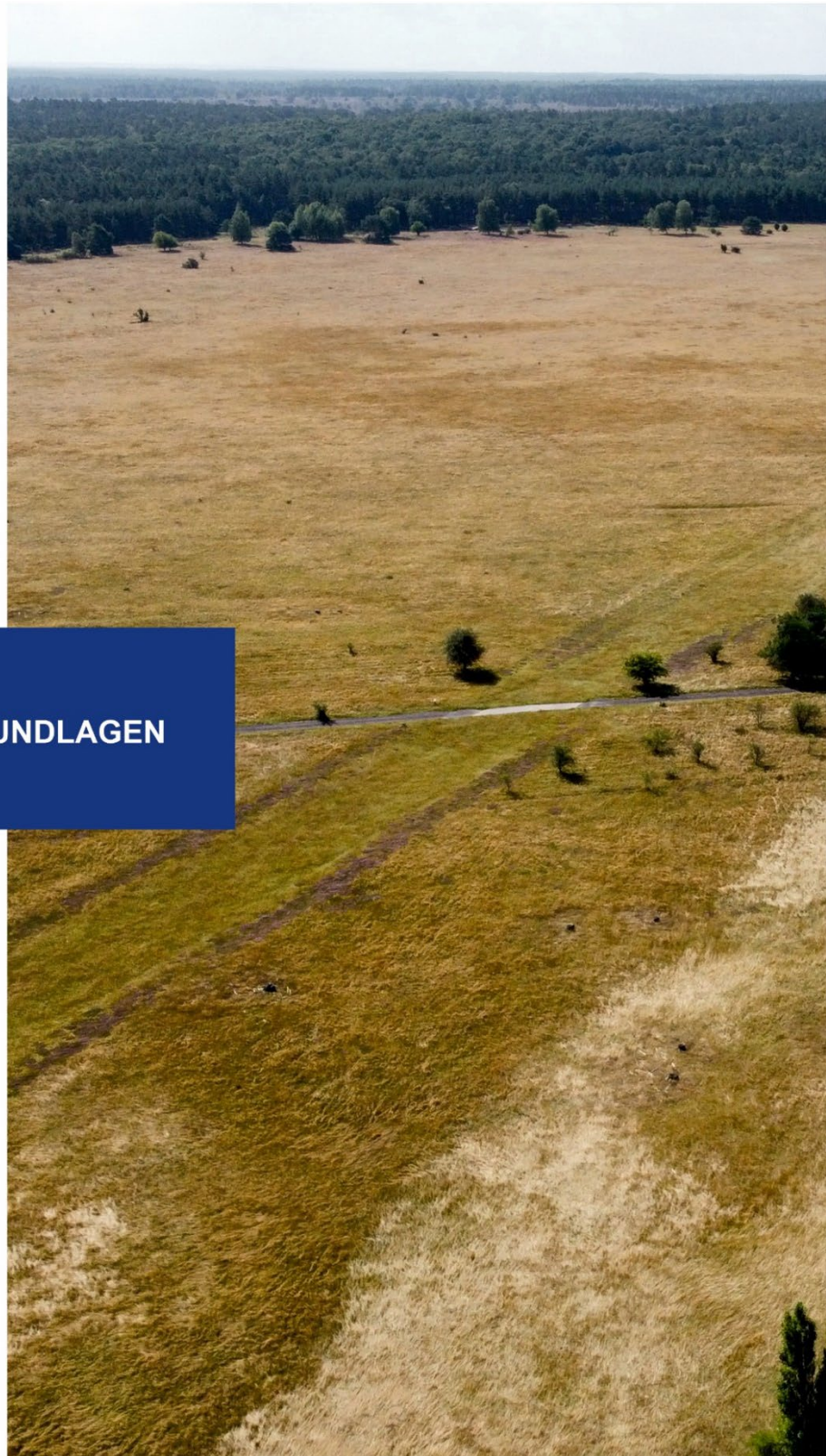
Der vorliegende Leitfaden richtet sich in erster Linie an Mitarbeitende niedersächsischer Gemeinden. Neben Klimaschutz- und Klimaanpassungsmanager*innen sind dies auch Mitarbeitende z. B. von Planungs-, Bau-, Grünflächen- oder Umweltämtern. Ebenfalls adressiert sind Vollzugsbehörden der Landkreise und kreisfreien Städte, Kommunalpolitiker*innen und Planungsbüros sowie die interessierte Öffentlichkeit, um auf das Potenzial von Entsiegelungsmaßnahmen bei der Klimaanpassung und zu berücksichtigende Sachverhalte aufmerksam zu machen. Da detaillierte technische Informationen, z. B. zur Bauweise spezifischer Versickerungssysteme, im Leitfaden nicht umfänglich behandelt werden, werden diesbezüglich Interessierten stärker technisch orientierte Regelwerke empfohlen (z. B. DWA 2005, 2007, 2008, 2024). Einen Überblick und fachliche Hinweise bietet der GeoBericht 14 des LBEG (BASEDOW et al. 2021).

1.3. Aufbau des Leitfadens

Der Leitfaden gliedert sich in die Teile A und B. Der vorliegende Teil A beinhaltet im ersten Abschnitt (Kap. 2) Grundlageninformationen zu den Themen Versiegelung und Entsiegelung sowie Rechtsgrundlagen zur Begründung von Entsiegelungsmaßnahmen. Anschließend wird in Kapitel 3 ein gestuftes Verfahren bei der Umsetzung von Entsiegelungsprojekten vorgestellt, und es werden Hinweise gegeben, was in der jeweiligen Entsiegelungsphase zu berücksichtigen ist. Kapitel 4 schließt mit einem Fazit und gibt einen Ausblick auf Teil B des Leitfadens. Den Abschluss bildet eine Übersicht häufig gestellter Fragen (FAQ) zu Entsiegelungsmaßnahmen (Kap. 5), die auf der *Internetseite* des Niedersächsischen Ministeriums für Umwelt, Energie und Klimaschutz auch online verfügbar ist und dort fortgeschrieben werden soll.

2.

GRUNDLAGEN



Spuren einer vor etwa 25 Jahren entsiegelten Straße,
die in ein Schutzgebiet eingegliedert wurde.

2. Grundlagen

2.1. Funktionen und Leistungen von Böden in Zeiten des Klimawandels

Beim Thema Entsiegelung steht der Boden besonders im Fokus, da durch die Maßnahme Böden mit ihren Funktionen wiederhergestellt werden und sie anschließend die Grundlage z. B. für vitale Grünstrukturen bilden sollen.

Böden werden auch als „Multitalente“ und als „die dünne Haut der Erde“ bezeichnet. Diese bildliche Sprache verdeutlicht: Böden sind als Lebensgrundlage in vielfältiger Weise bedeutsam – gleichzeitig sind sie auch verletzlich und zu schützen. Sie sind der größte terrestrische Kohlenstoffspeicher und binden in organischen Kohlenstoffverbindungen mehr Kohlenstoff als Atmosphäre und Vegetation zusammen (GEORGIOU et al. 2022). Sie sind also von großer Relevanz für den Klimaschutz. Zeitgleich liegt unter der Erdoberfläche der artenreichste Lebensraum unseres Planeten, in dem schätzungsweise ca. 59 % (±15 %) aller Lebewesen zumindest einen Teil ihres Lebens verbringen (ANTHONY et al. 2023). Über 90 % der weltweiten Nahrungsmittelproduktion hängt direkt vom

Boden ab (FAO 2023). Boden ist Wasserspeicher, Filter für das Sickerwasser und damit ein wichtiger Faktor für sauberes Grundwasser. Zudem speichern Böden als Archiv Spuren der Natur- und Kulturgeschichte für folgende Generationen. Oftmals viel zu wenig beachtet, bilden die Funktionen des Bodens die Lebensgrundlagen für Mensch und Umwelt.

Die Bedeutung der Böden wird im Bodenschutz über die Bodenfunktionen beschrieben, die als Leistungen des Bodens als Teil von Ökosystemen für Mensch und Umwelt aufgrund seiner Eigenschaften definiert sind (AD-HOC-AG BODEN 2005). Die Bodenfunktionen sind in § 2 Abs. 2 im Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) verankert (Tab. 1). Der Boden erfüllt im Sinne dieses Gesetzes natürliche Funktionen, Funktionen als Archiv der Natur- und Kulturgeschichte und Nutzungsfunktionen. Darüber hinaus hat sich in der Praxis die Klimafunktion der Böden etabliert, mit der die wichtige Rolle des Bodens im Kohlenstoffkreislauf und, über die Kühlungsleistung, bei der Klimaregulation gewürdigt wird (ENGEL & STADTMANN 2020, BODLE et al. 2023). Klimaschutz und Klimaanpassung sind vielfach abhängig von intakten Böden.

Tab. 1: Natürliche Bodenfunktionen und Archivfunktion nach BBodSchG, erweitert um die Klimafunktion nach LABO 2003, AD-HOC-AG-BODEN 2007 und BODLE et al. 2023.

Natürliche Bodenfunktionen und Archivfunktionen (vgl. § 2 BBodSchG)		Bodenteilfunktionen
Natürliche Funktionen	Lebensgrundlage und Lebensraum für Menschen, Tiere, Pflanzen und Bodenorganismen	Lebensgrundlage und -raum für Menschen
		Lebensgrundlage und -raum für Tiere und Pflanzen
		Lebensgrundlage und -raum für Bodenorganismen
	Bestandteil des Naturhaushalts, insbesondere mit seinen Wasser- und Nährstoffkreisläufen	Bestandteil des Wasserkreislaufs
		Bestandteil des Nährstoffkreislaufs
	Abbau-, Ausgleichs- und Aufbaumedium für stoffliche Einwirkungen auf Grund der Filter-, Puffer- und Stoffumwandlungseigenschaften, insbesondere auch zum Schutz des Grundwassers	Filter und Puffer für anorganische Schadstoffe (z. B. Schwermetalle)
		Filter und Puffer für organische Schadstoffe (z. B. diverse Kohlenwasserstoffe)
		Puffervermögen des Bodens für saure Einträge (Säuren)
		Filter für nicht sorbierbare Stoffe (z. B. Nitrat)
Archivfunktion	Funktionen als Archiv der Natur- und Kulturgeschichte	Archiv der Naturgeschichte
		Archiv der Kulturgeschichte
Klimafunktion	Funktion der Böden im Klimasystem	Funktion im Kohlenstoffkreislauf
		Kühlungsfunktion

Die Funktionen der Böden beschreiben

Auf Basis messbarer Bodeneigenschaften (z. B. Bodenart, Humusgehalt) können die Funktionen beschrieben und die Leistung der Böden auch in Zahlen ausgedrückt werden (z. B. das Was-

serspeichervermögen in Litern pro Quadratmeter). An einem typischen Boden für den Landkreis Peine lässt sich das beispielhaft verdeutlichen: Es handelt sich um einen schluffig- bis tonig-sandigen Ackerboden, der bodenkundlich als Bänder-Parabraunerde bezeichnet wird (NLFB 1997 und Abb. 1).



Abb. 1: Bänder-Parabraunerde aus Geschiebedecksand über glazifluvialen Sand, aus: *Böden in Niedersachsen Online* (NLFB 1997).

Bei einem ergiebigen Niederschlag bieten die vielen Poren, die die Bänder-Parabraunerde (Abb. 1) durchziehen, allein bis in einen Meter Tiefe kurzfristig Raum für bis zu 450 Liter Wasser pro Quadratmeter. So puffert der Boden den Niederschlag ab und gibt einen Teil des Wassers nach und nach an das Grundwasser, Fließgewässer oder die Vegetation weiter. Ähnlich wie ein Schwamm nehmen Böden Niederschlagswasser auf und tragen so dazu bei, den Wasserhaushalt zu regulieren. Intakte Böden mindern damit beispielsweise Hochwasserereignisse. Mehr als 100 Liter Wasser pro Quadratmeter speichert der Boden so, dass es Pflanzen auch längere Zeit zur Verfügung steht, eine Funktion, die im Zuge des Klimawandels durch trockene und heiße Sommer immer mehr an Bedeutung gewinnt (ENGEL et al. 2024, BUG & HARDERS 2024). Auch die Funktion als Kohlenstoffspeicher lässt sich beziffern: In einem Hektar

der Bänder-Parabraunerde (Abb. 1) ist innerhalb des ersten Bodenmeters ein Vorrat von ca. 50 t Kohlenstoff enthalten (BUG et al. 2020). Andere Böden, insbesondere kohlenstoffreiche Böden wie z. B. Moore, binden noch erheblich mehr Kohlenstoff und stellen daher ein wichtiges Handlungsfeld im natürlichen Klimaschutz dar (BMUV 2022, HÖPER 2022). Diese Leistungen des Bodens sind je nach Entstehung und Eigenschaften der Böden sehr unterschiedlich ausgeprägt. Dies gilt umso mehr für urbane Räume, wo der Mensch die Böden vielfach verändert hat (Kap. 2.2). Um standortgenau beschreiben zu können, wie ausgeprägt die Funktionserfüllung ist, sind also Informationen über Bodenaufbau und -eigenschaften notwendig. Basierend darauf können die Leistungen des Bodens dann in Planungen und Konzepte einfließen, z. B. im Bereich der Klimaanpassung.

Ökosystemleistungen von Böden

Das Ökosystem Boden trägt in vielfältiger Weise zum menschlichen Wohlbefinden bei. Diese aus den Bodenfunktionen hervorgehenden Beiträge der Böden werden nach dem weit verbreiteten Konzept der Ecosystem Services (dt. Ökosystemleistungen) als Boden-Ökosystemleistungen beschrieben, aus denen der Mensch unterschiedlichen Nutzen zieht (Abb. 2). Dieser Nutzen muss nicht wirtschaftlich oder materiell, sondern kann auch gesundheitlich oder psychisch sein (TEEB DE 2012). Die Leistungen können nach TEEB DE (2016) unterteilt werden in:

- Versorgungsleistungen (z. B. über Nahrungsmittel aus der Landwirtschaft),
- regulierende Leistungen (z. B. Kühlung des Stadtklimas, Abmilderung von Abflussspitzen durch Wasserspeicherung und damit Beitrag zum Schutz vor Überschwemmungen),
- kulturelle Leistungen (z. B. Böden als Grundlage von Erholungsräumen oder als kulturgeschichtliches Archiv einer Stadt).



Abb. 2: Boden-Ökosystemleistungen nach FAO (2015), verändert.

Die Ecosystem Services bieten eine neue Perspektive auf Ökosysteme, indem ihr großer und vielfach unterschätzter Wert für den Menschen sichtbar gemacht wird. Für urbane Räume lässt sich das gut verdeutlichen: Für eine Fläche von 100 x 100 m Parabraunerde-Boden aus Löss (Abb. 1), wie er zum Beispiel im Stadtgebiet von Northeim, Hildesheim oder Göttingen vorkommt, kann in Anlehnung an LANUV (2015) basierend auf dem pflanzenverfügbaren Bodenwasser eine durch Verdunstung der Vegetation erzeugte Kühlleistung ermittelt werden, die Kosten von etwa 900.000 € pro Jahr entspricht, wenn man sie technisch erzeugen würde. Wird der Boden versiegelt, geht diese jährlich kostenlos bereitgestellte Leistung dauerhaft verloren.

2.2. Bodenversiegelung

Im folgenden Kapitel 2.2.1 werden wichtige Begriffe im Themenkomplex Bodenversiegelung erläutert und anschließend deren negative Auswirkungen vorgestellt (Kap. 2.2.2). Städte sind Schwerpunkträume der Bodenversiegelung. Aufgrund dessen thematisiert Kapitel 2.2.3 anschließend nochmals gesondert die damit verbundenen ökologischen Folgen in Städten.

2.2.1. Begrifflichkeiten

Bodenversiegelung

Die Umwandlung von Landschaftsräumen in Siedlungs- und Verkehrsflächen geht in vielen Fällen mit der Versiegelung von Böden einher

(Abb. 3). Bodenversiegelung beschreibt in diesem Zusammenhang die Bedeckung des Bodens mit festen Materialien (SenSBW 2022). Diese führt zur Isolierung des Bodens von Atmo-, Hydro- und Biosphäre und dadurch zur weitestgehenden Unterbindung von Austauschvorgängen wie Versickerung und Verdunstung, Gasaustausch und biotischen Prozessen (BERLEKAMP & PRANZAS 1986, GUNREBEN & SCHNEIDER 2001, WESSOLEK 2001). Auch Bodenverdichtung, z. B. durch Bautätigkeiten, Parken auf Baumscheiben, Befahrung von Grünflächen oder die häufige Begehung unbefestigter Flächen, kann zu vergleichbaren Beeinträchtigungen des Bodens führen. Sie stellt einen Sonderfall dar, ist einer Versiegelung aber nicht im eigentlichen Sinne zuzurechnen (STULLE & WULFERT 2001).

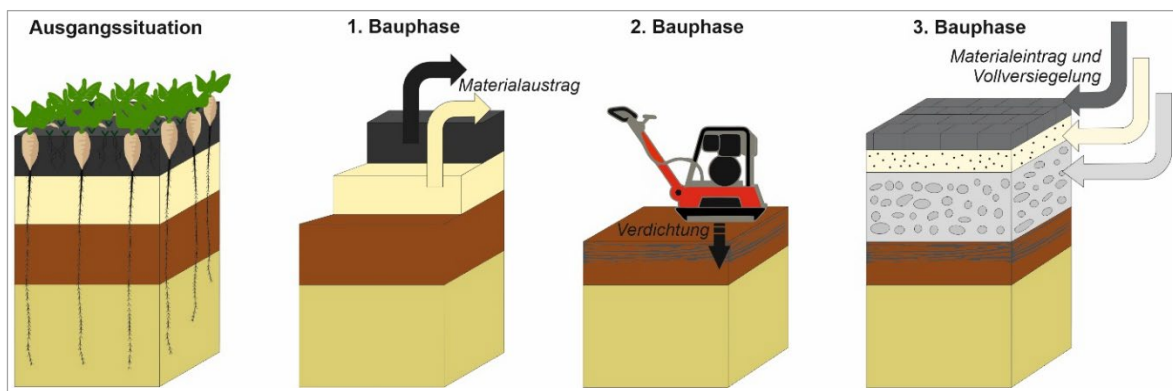


Abb. 3: Modellhafte Darstellung der Umwandlung einer unversiegelten Ackerfläche in eine vollversiegelte Verkehrsfläche (Grafik: LBEG).

In Anlehnung an BURGHARDT (1993) werden drei Formen der Versiegelung unterschieden:

- 1. Vollversiegelung:**
Diese Form der Versiegelung beschreibt großflächige, undurchlässige Flächen, z. B. Straßen, Plätze oder Gebäude, die durch die Verwendung von undurchlässigen Versiegelungsmaterialien (z. B. Asphalt) entstehen.
- 2. Teilversiegelung:**
Bei der Teilversiegelung handelt es sich um eine Form der Versiegelung, bei der nur bestimmte Bereiche einer Fläche vollversiegelt werden oder teildurchlässige Beläge (z. B. Rasengittersteine) genutzt

werden. Im Gegensatz zur Vollversiegelung bleibt ein Teil der betrachteten Fläche somit unversiegelt, beispielsweise durch breite Fugen oder unbebaute Teilflächen.

- 3. Unterflurversiegelung:**
Diese Form der Versiegelung betrifft Flächen, die sich unterhalb der Erdoberfläche befinden. Hierzu gehören u. a. Tiefgaragen, Tunnel und Leitungsschächte. Obwohl diese unterirdischen Strukturen an der Oberfläche meist nicht sichtbar sind, führen sie zu einer Reduzierung natürlicher Bodenfunktionen.

UBA (2021) ergänzt diese Unterteilung um die folgende vierte Form der Versiegelung:

4. indirekt oberirdisch abgeschirmte Flächen ohne Bodenkontakt:
Dabei handelt es sich beispielsweise um überdachte Flächen wie Carports. Obwohl solche Flächen generell durchlässig sind und Prozesse wie Gasaustausch sowie biotische Aktivitäten stattfinden können, sind andere Austauschprozesse eingeschränkt. Insbesondere die Versickerung und Verdunstung von Niederschlagswasser ist begrenzt und oft nur an gezielten Stellen möglich, falls das Wasser dorthin geleitet wird.

Während bei vollversiegelten Flächen kaum Interaktion zwischen Boden und Atmosphäre stattfindet, ist diese bei teilversiegelten Flächen noch bedingt gegeben. Je nach Art der Teilversiegelung ist diese Interaktion dabei unterschiedlich stark eingeschränkt. Um eine quantitative und qualitative Unterscheidung teilversiegelter Flächen vornehmen zu können, werden verschiedene Kriterien verwendet (BLUME et al. 2010).

Versiegelungsanteil

Angelehnt an FRIE & HENSEL (2009) bezeichnet der Versiegelungsanteil den prozentualen Anteil aus voll- und teilversiegelten Flächen innerhalb einer Bezugsfläche, wie etwa eines Flurstücks. Dabei handelt es sich sowohl um bebaute versiegelte Flächen, also Gebäude aller Art, und unbebaut versiegelte Flächen, z. B. Fahrbahnen, Parkplätze oder befestigte Wege. Im Rahmen der Umweltökonomischen Gesamtrechnung der Länder (UGRdL) zur Ermittlung der Bodenversiegelung, wird der Versiegelungsanteil beispielsweise dafür genutzt, den Anteil der versiegelten Fläche an der Gesamtfläche einer Nutzungsart anzugeben (BASEDOW et al. 2021).

Versiegelungsgrad

Der Versiegelungsgrad quantifiziert den Anteil der vollversiegelten Fläche zu einer bestimmten Gesamtfläche (UBA 2021). Diese Gesamtfläche kann sich dabei auf bebaute Gebiete (z. B. Stadtteile) oder auf einzelne Flächenabschnitte (z. B. Gehwege) beziehen. Die Angabe erfolgt in Prozent. Angaben zum Anteil der Teilversiegelung einer Gesamtfläche sind aus dem Versiegelungsgrad nicht ableitbar. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Bewertung des Versiegelungsgrades (STULLE & WULFERT 2001). Insbesondere für Flächen mit einem mittleren und hohen Versiegelungsgrad ($\geq 41\%$) ist davon auszugehen, dass ökologische Funktionen auf den verbleibenden unversiegelten Teilflächen nicht mehr ausreichend erfüllt werden können.

Tab. 2: Bewertung des Versiegelungsgrades (STULLE & WULFERT 2001) und Ableitung des ökologischen Zustands (in Anlehnung an SCHMIDT (1996), zitiert in STULLE & WULFERT (2001)).

Versiegelungsgrad [%]	Bewertung Versiegelung	ökologischer Zustand
< 20	gering	gut und besser
20 bis 40	mäßig	mäßig
41 bis 60	mittel	unbefriedigend
> 60	hoch	schlecht

Versiegelungsstufen

Durch die Zusammenfassung von Flächen mit unterschiedlichen Versiegelungsgraden entstehen für räumlich größere Gebiete Versiegelungsstufen. Diese werden insbesondere zur räumlichen Kategorisierung urbaner Gebiete (z. B. Wohngebiete) genutzt. BÖCKER (1984) weist vier Versiegelungsstufen aus und ordnet diese verschiedenen Bebauungstypen zu (Tab. 3).

Tab. 3: Einteilung urbaner Räume in Versiegelungsstufen (BÖCKER 1984).

Versiegelung		Flächencharakteristik
Stufe	in %	
I	10 bis 50	mäßige Versiegelung, Einfamilienhaussiedlungen, Kleingartengebiete, Zeilenhaussiedlungen; Mittelwert: 30 % = Stufe I
II	45 bis 75	mittlere Versiegelung, Blockrandbebauung, Nachkriegsbaugebiete; Mittelwert: 60 % = Stufe II
III	70 bis 90	starke Versiegelung, städtische Baugebiete mit Blockbebauung, ältere Industrieanlagen; Mittelwert: 80 % = Stufe III
IV	85 bis 100	sehr starke Versiegelung, unzerstörte Blockbaugebiete der Innenstadtbezirke und Industrieflächen, die in jüngerer Zeit entstanden oder verändert worden sind; Mittelwert: 90 % = Stufe IV

Versiegelungsfaktoren

In der kommunalen Praxis werden Versiegelungsinformationen u. a. im Rahmen der Niederschlagswasserentgelterhebung genutzt. Grundstückseigentümer*innen müssen als Teil der gesplitteten Abwassergebühr die Kosten der Niederschlagswasserbeseitigung tragen. Für die Ermittlung des abgeleiteten Niederschlagswassers in die Kanalisation wird die versiegelte Fläche und die tatsächlich an das Kanalnetz angeschlossene Grundstücksfläche als Grundlage verwendet. Für die Beurteilung des abflusswirksamen Anteils versiegelter Teilflächen eines Grundstücks (voll- und teilversiegelt) werden bei der Gebührenberechnung Versiegelungsfaktoren genutzt, die üblicherweise der Abwassersatzung der jeweiligen Kommune zu entnehmen sind. Die Versiegelungsfaktoren leiten sich aus dem Abflussbeiwert des versiegelnden Belags (DIN 1986-100) ab. Der Abflussbeiwert eines Belags beziffert den Anteil des anfallenden Niederschlagswassers, der an

der Oberfläche abfließt, von 0 (kein Oberflächenabfluss) bis 1 (100 % Oberflächenabfluss). Normalerweise orientieren sich die Kommunen an den vorgeschlagenen Versiegelungsfaktoren, jedoch kommt es in der Praxis mitunter zu kleineren Abweichungen in den kommunalen Abwassersatzungen.

2.2.2. Auswirkungen von Bodenversiegelung

Bodenversiegelung hat vielfältige Auswirkungen auf das Ökosystem. Einige Funktionen, wie z. B. die Archivfunktion des Bodens (Tab. 1), können dadurch irreversibel verlorengehen. Eine Übersicht über ausgewählte Folgen der Bodenversiegelung auf die Bestandteile des Ökosystems gibt Abbildung 4. Weiterführende Informationen folgen in den anschließenden Absätzen.

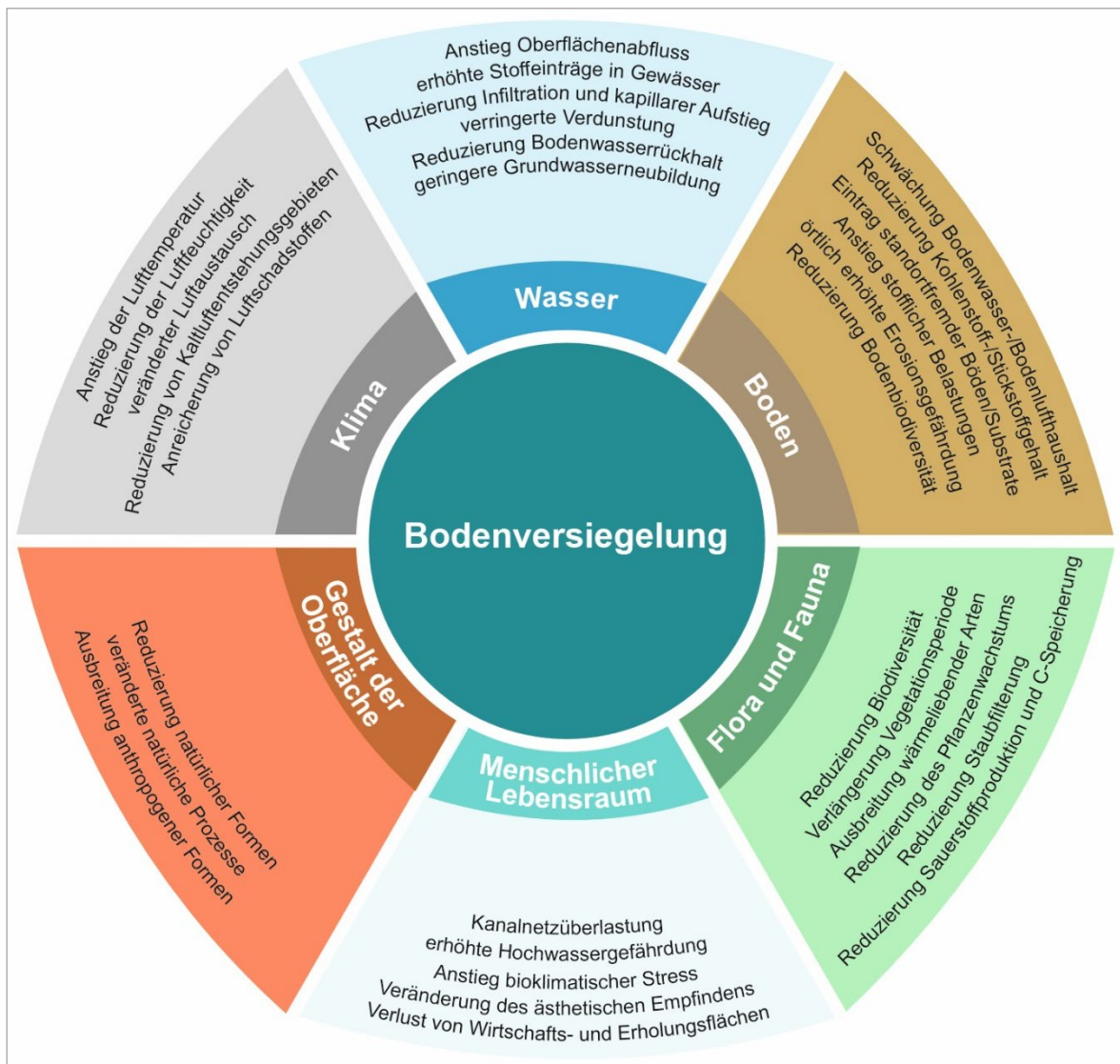


Abb. 4: Auswirkungen (Auswahl) von Bodenversiegelung auf die Kompartimente (Bestandteile) von Ökosystemen. Weiterführende Informationen folgen in den anschließenden Absätzen (Grafik: LBEG).

Auswirkungen von Bodenversiegelung auf den Wasserhaushalt

Kurz gesagt: Der natürliche Wasserhaushalt wird durch Bodenversiegelung verändert. Verdunstung und Infiltration werden bei ansteigender Versiegelung reduziert, der Oberflächenabfluss steigt an.

Hintergrundinformationen

Der Wasserhaushalt wird durch Bodenversiegelung maßgeblich beeinflusst, insbesondere indem die Wasserhaushaltskomponenten Verdunstung, Infiltration¹ und Abfluss verändert und teilweise voneinander entkoppelt werden (WESSOLEK & FACKLAM 1997). Grundsätzlich gilt, dass Verdunstung und Infiltration bei ansteigender Versiegelung reduziert werden, wohingegen der Abfluss ansteigt (Abb. 5).

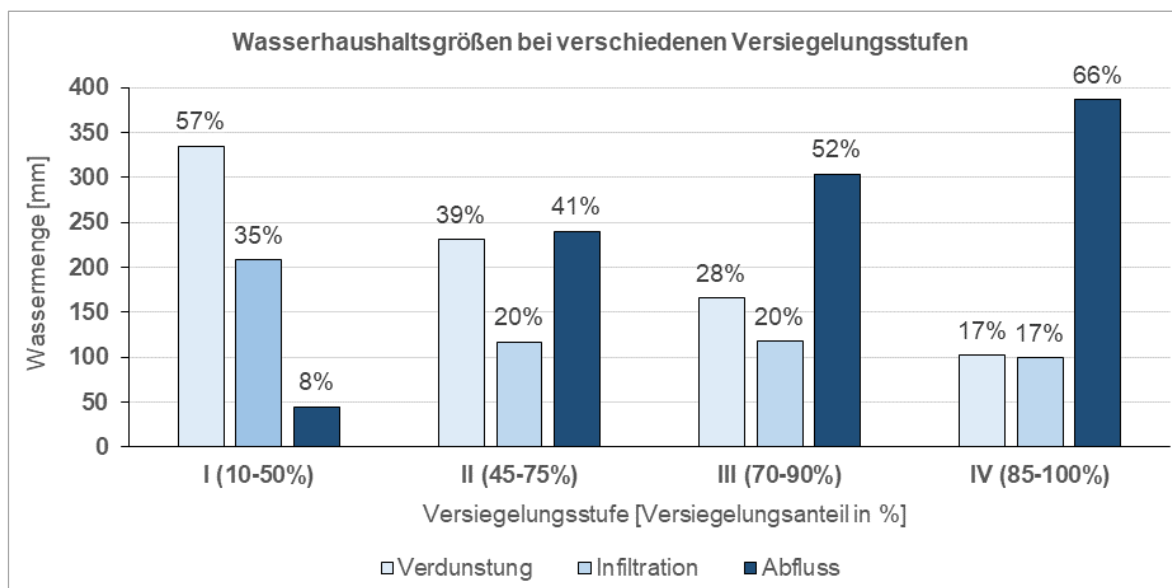


Abb. 5: Jahresbilanzierung von Wasserhaushaltsgrößen nach Versiegelungsstufen (nach BÖCKER (1984), Tab. 3) bei gleichbleibendem jährlichen Niederschlag von 588 mm (verändert, nach WESSOLEK (1993)). Aus der Abbildung wird deutlich, dass sich Verdunstung und Infiltration bei steigender Versiegelung reduzieren, wohingegen sich der Abfluss erhöht.

Wie stark die genannten Wasserhaushaltskomponenten verändert werden, hängt von den konkreten Eigenschaften der versiegelnden Materialien, insbesondere des Abflussbeiwerts (Kap. 2.2.1), ab (Abb. 6). So besitzen Kies-/Schotterwege oder Gitterpflaster (Rasengittersteine) beispielsweise sehr geringe bzw. geringe Abflussbeiwerte ($\leq 0,2$), was bedeutet, dass große Anteile des Niederschlagswassers auf den ent-

sprechenden Flächen versickern oder verdunsten können (DIN 1986-100), sofern der Boden unterhalb des Belags auch entsprechend versickerungsfähig ist. Im Gegensatz dazu ist die Infiltration und Verdunstung von Asphalt-, Beton- oder fugenarmen Pflasterflächen (Abflussbeiwert $\geq 0,7$) stark beeinträchtigt, und Niederschläge fließen auf den entsprechenden Flächen zum überwiegenden Teil oberflächlich ab.

¹ Die Infiltration ist der Prozess des Einsickerns von Wasser in den wasserungesättigten Boden.

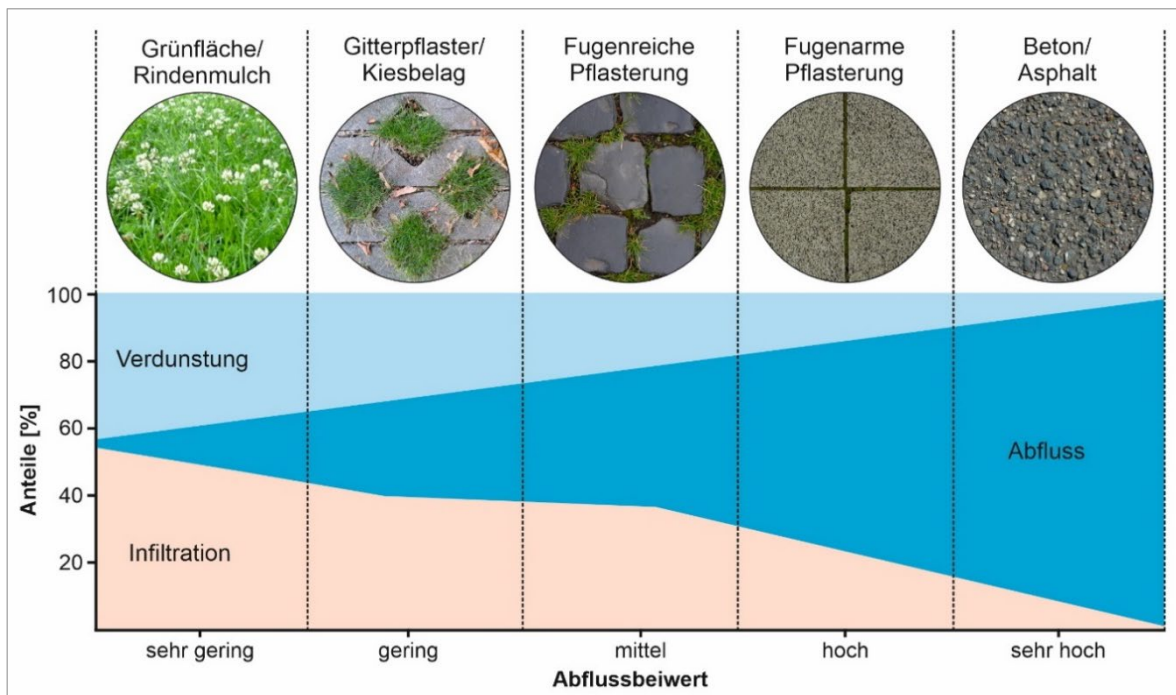


Abb. 6: Zusammensetzung der Wasserhaushaltskomponenten (Verdunstung, Abfluss und Versickerung) unterschiedlicher Oberflächenbeläge (in Anlehnung an Ingenieurbüro Reinhard Beck).

Eine Beurteilung typischer Versiegelungsmaterialien hinsichtlich ihrer Auswirkung auf den Wasserhaushalt ist Tabelle 4 zu entnehmen. Für physikalische Materialeigenschaften (z. B.

Infiltrationsraten) unterschiedlich versiegelter Flächen wird darüber hinaus auf WESSOLEK & FACKLAM (1997) und WESSOLEK (2001) verwiesen.

Tab. 4: Kategorisierung typischer Versiegelungsmaterialien hinsichtlich ihrer Abflussbeiwerte (orientierende Wertespektren) und ihrer Auswirkung auf den Wasserhaushalt (in Anlehnung an HANSCHKE & BEDDING 2005, verändert). Eine baubedingte Überverdichtung des Unterbodens oder auch eine eingeschränkte natürliche Wasserleitfähigkeit des Untergrundes kann in allen Belagsklassen einschränkend wirken (Kap. 3.5).

Belags- klasse	Belagarten	orientierende Abflussbeiwerte	Auswirkung auf Wasserhaushalt
4	Gittersteine, Verbundsteine mit breiten Sickerfugen, Sicker-/ Drainsteine, Kiesflächen	$\leq 0,4$	gering schwache Zunahme des Abflusses, herabgesetzte Verdunstung und Infiltration
3	Klein- und Mosaikpflaster	0,4 bis $\leq 0,6$	mittel mittlere Zunahme des Abflusses, herabgesetzte Verdunstung und Infiltration
2	Betonverbundpflaster, Klinker, Mittel- und Großpflaster, Kunststein und Plattenbeläge	0,6 bis 0,8	hoch starke Zunahme des Abflusses, stark herabgesetzte Verdunstung und Infiltration
1	Asphalt, Beton, Pflaster mit Fugenverguss oder Betonunterbau	$\geq 0,8$	sehr hoch sehr starke Zunahme des Abflusses, sehr stark herabgesetzte Verdunstung und Infiltration

Aus den beschriebenen Zusammenhängen ergibt sich eine eingeschränkte Infiltration in versiegelten Gebieten, wodurch dort der Bodewasserrückhalt und die Grundwasserneubildung prinzipiell reduziert sind. Der Abfluss erhöht sich in stark versiegelten Gebieten (Abb. 5), und das Risiko für Überschwemmungen nimmt zu. Dies kann eine Reihe von Folgeproblemen nach sich ziehen, wie z. B. Bodenerosion und eine erhöhte Belastung von Gewässern mit Schadstoffen.

Für die konkrete Bilanzierung dieser Wasserhaushaltsgrößen werden hydrologische Modelle genutzt. In Niedersachsen steht dafür u. a. das Wasserhaushaltsmodell mGROWA22 (monatlicher großräumiger Wasserhaushalt) zur

Verfügung, welches auch den Versiegelungsgrad berücksichtigt (ERTL et al. 2024). In folgender Abbildung 7 ist für eine 100 x 100 m große Fläche, die sich in der Flussaue der Schwülme (LK Göttingen) befindet, dargestellt, wie die Versiegelung die Wasserhaushaltskenngößen pro Quadratmeter verändert. Die vollständige Versiegelung reduziert die Grundwasserneubildung entsprechend auf 0 mm. Gleichzeitig steigt der Direktabfluss und damit die Gefährdung, z. B. durch Überschwemmungen, massiv auf 615 mm an. Ist die Fläche unversiegelt, liegt der Wert um 85 % niedriger. Auch die Verdunstung und damit die Kühlleistung von Boden und Vegetation wird um mehr als 70 % drastisch reduziert.

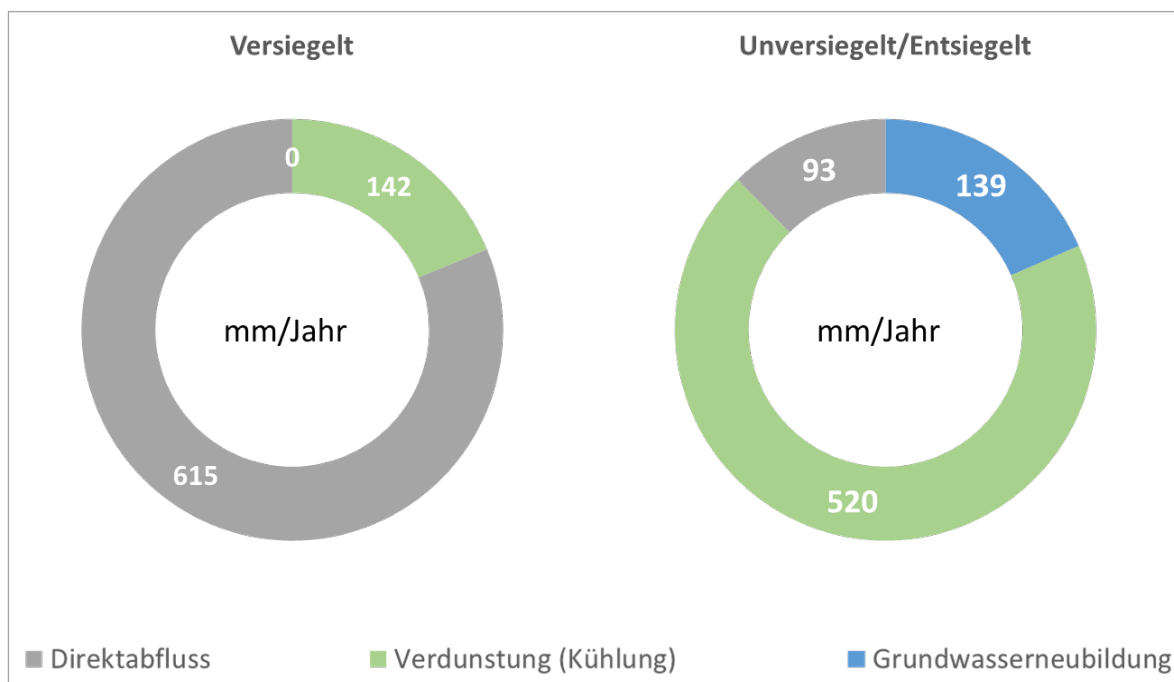


Abb. 7: Mit mGROWA22 berechnete Wasserhaushaltsgrößen einer 100 x 100 m großen Auenfläche (Schwülme, LK Göttingen, dominierender Bodentyp: Gley-Vega) für den Zeitraum 2013–2023 (Einheit mm entspricht Liter pro Quadratmeter).

Auswirkungen von Bodenversiegelung auf den Boden

Kurz gesagt: Bodenphysikalische und bodenchemische Eigenschaften werden durch Versiegelung in hohem Maße verändert, sodass natürliche Bodenfunktionserfüllungen verloren gehen.

Hintergrundinformationen

Bodenversiegelung oder Teilversiegelung verändert in hohem Maße die bodenphysikalischen und bodenchemischen Eigenschaften eines Standorts (AMELUNG et al. 2018, CHARZYŃSKI et al. 2018). Diese Veränderungen entstehen nicht ausschließlich durch die Bodenversiegelung, sondern auch durch bauliche Vorbereitungen (z. B. Auf- und Abtragen von Boden, Vermischung natürlicher und technogener Substrate, die Nutzung verdichtender Maschinen) Stoffeinträge sowie die aktuelle bzw. auch historische Nutzung.

Bodenphysikalische Veränderungen

Die Lagerungsdichte² versiegelter bzw. teilversiegelter Böden ist im Vergleich zu naturnahen Standorten häufig deutlich erhöht, das Porenvolumen³ geringer, die Vernetzung der Bodenporen untereinander (Porenkontinuität) eingeschränkt und auch das Bodengefüge in hohem Maße gestört (O'RIORDAN et al. 2021), mit negativen Konsequenzen insbesondere für den Wasser- und Lufthaushalt der Böden. Wie erläutert, werden bei einem sehr hohen Versiegelungs- bzw. Verdichtungsgrad die Wasserinfiltration in den Boden, die Wasserbewegung im Boden, auch die Versickerung in tiefere Schichten und damit die Grundwasserneubildung teils deutlich reduziert (Abb. 5). Darüber hinaus ist auch der kapillare Aufstieg⁴, der für die Wasserversorgung der Vegetation in Trockenperioden von großer Bedeutung ist, bei teilversiegelten Böden limitiert. In der Konsequenz sind versiegelte und teilversiegelte Böden allgemein tro-

ckener und damit weniger effektiv für den Wasserrückhalt. Weitere Einschränkungen ergeben sich auch für den Lufthaushalt versiegelter bzw. teilversiegelter Böden. Die Durchlüftung ist dadurch häufig geringer, und wichtige Prozesse im Boden, z. B. die Versorgung der Pflanzenwurzeln und Bodenorganismen mit Sauerstoff, sind eingeschränkt (WESSOLEK 2001).

Bodenchemische Veränderungen

Viele Leistungen von Böden beruhen auf bodenchemischen Eigenschaften. Vor allem die Fähigkeit des Bodens, Kationen auszutauschen (Kationenaustauschkapazität) ist in diesem Zusammenhang besonders wichtig. Dadurch können beispielsweise essenzielle Pflanzennährstoffe (z. B. Natrium, Calcium, Magnesium oder Kalium) im Wurzelbereich gespeichert oder aber auch Schadstoffe adsorbiert und umgewandelt werden. Entscheidende Einflussfaktoren für die Kationenaustauschkapazität sind der Humusgehalt des Bodens, dessen mineralogische Zusammensetzung (Art und Größe der Minerale) sowie der pH-Wert (BLUME et al. 2010), die allesamt, wie im Folgenden skizziert, durch Versiegelungsmaßnahmen verändert werden können.

So wird humoser Oberboden im Zuge von Versiegelungsmaßnahmen üblicherweise entfernt bzw. stark verdichtet, um einen tragfähigen Unterbau für den entsprechenden Versiegelungsbelag herzustellen. Durch den Bodenabtrag wird die Austauschkapazität des Bodens deutlich reduziert. Auch wenn weiter Wasser versickern kann (Teilversiegelung), ist die Filterfunktion des Bodens für das Sickerwasser deutlich geschwächt. Auch ein möglicher Humusaufbau ist unterbunden oder stark eingeschränkt. Ein Vergleich zwischen versiegelten und unversiegelten Böden in Berlin (THRUM et al. 2023) zeigt, dass der mittlere humusbürtige organische Kohlenstoffvorrat bis 1 m Tiefe an versiegelten Standorten um mehr als 60 % reduziert ist (1,4 vs. 3,6 kg/m²). Der Rückgang von organischem Bodenkohlenstoff ist insbesondere auch für den Klimaschutz von großer Bedeutung, fungieren

² Die Lagerungsdichte eines Bodens kennzeichnet das Verhältnis von Bodenmasse zum Bodenvolumen unter Berücksichtigung des Ton-, Schluff- und Humusgehalts (DWA 2016). Sie kann Hinweise darauf geben, ob und wie stark ein Boden komprimiert wurde und beschreibt dadurch den Verdichtungsstatus des Bodens.

³ Hohlraumvolumen des Bodens (in %), das mit Luft oder Wasser gefüllt sein kann.

⁴ In Richtung Geländeoberfläche (gegen die Schwerkraft) gerichtete Bewegung von Grund- (und ggf. Stau-)wasser aus der gesättigten Zone in den Wurzelraum durch Kapillarkräfte.

Böden doch als ein wichtiger terrestrischer Kohlenstoffspeicher (BATJES 1996, CIAIS et al. 2013, PFEIFFER et al. 2024).

Die mineralogische Zusammensetzung und auch der pH-Wert werden an Versiegelungsstandorten insbesondere durch den Ein- und Austrag natürlicher und technogener Substrate verändert (Abb. 8). Natürliche Substrate umfassen in diesem Kontext vor allem humoses Oberbodenmaterial, humusarmes Unterbodenmaterial, Festgesteine und Abraummaterial des Bergbaus (MEUSER 2004). Unter technogenen Substraten versteht man im Unterschied dazu Materialien, die durch menschliche Tätigkeit

entstanden sind, beispielsweise Bau- und Trümmerschutt, Mörtel, Schlacken oder Aschen (MEUSER 2004, SENSTADTUMWELT 2020, STEINWEG et al. 2022). In verdichteten Räumen sind Böden überwiegend aus einem Gemenge aus ebendiesen natürlichen und technogenen Substraten aufgebaut. Aufgrund der großen Heterogenität der Substrateigenschaften sind generalisierte Aussagen über die Auswirkungen von Ein- und Austrägen kaum möglich (LEHMANN & STAHR 2007, KASIELKE & BUCH 2011). Tabelle 5 fasst jedoch typische Bodeneigenschaften stark versiegelter Gebiete zusammen (LEHMANN & STAHR 2007, KASIELKE & BUCH 2011, SENSTADTUMWELT 2020).



Abb. 8: Beispiele für urbane Böden mit anthropogenen Beimengungen und technogenen Substraten (Bildrechte: LBEG).

Tab. 5: Parameter versiegelter Böden, gegliedert nach der Häufigkeit ihres Auftretens in urbanen Böden (nach LEHMANN & STAHR 2007, KASIELKE & BUCH 2011, SENSTADTUMWELT 2020).

Parameter	häufig in urbanen Böden	selten in urbanen Böden
Gehalt anthropogener oder technogener Bruchstücke/Artefakte	hoch <ul style="list-style-type: none"> • in anthropogenen Horizonten aus Bautätigkeiten (z. B. Glas, Keramik), • Böden aus Trümmer-/Bauschutt (z. B. Schlacke, Ziegel), • in versiegelten Böden, • auf gestalteten Oberflächen. 	niedrig <ul style="list-style-type: none"> • Böden aus Industrieschlämmen, Kohleschlämmen oder Aschen, • in natürlichen Böden und Substraten.
organischer und technogener Kohlenstoff und Nährstoffe	hoch <ul style="list-style-type: none"> • in (ehem.) Gartenböden, • Böden mit Anteilen organischer Abfälle, Aschen, Kohle, • Straßenbegleitböden (z. B. durch Abrieb), • als Mikroplastik. 	niedrig <ul style="list-style-type: none"> • in frischen Aufschüttungen humusarmen Bodenmaterials ohne sichtbare Bodenbildung, • Böden mit regelmäßiger Entfernung von Vegetation und Streu, • Böden aus nährstoffarmen Substraten.

Tab. 5: Parameter versiegelter Böden, gegliedert nach der Häufigkeit ihres Auftretens in urbanen Böden (nach LEHMANN & STAHR 2007, KASIELKE & BUCH 2011, SENSTADTUMWELT 2020) (Fortsetzung).

Parameter	häufig in urbanen Böden	selten in urbanen Böden
Kalkgehalt (anorganischer Kohlenstoff)/ pH-Wert	vorhanden/hoch <ul style="list-style-type: none"> • Böden mit Anteilen von Bauschutt, Bausand, Mörtel, Aschen und Schlacken, • natürliche Böden aus kalkhaltigem Substrat (z. B. Geschiebemergel, Kalkstein), • pH: neutral bis alkalisch. 	ohne/niedrig <ul style="list-style-type: none"> • anthropogene Böden mit Schwefel (z. B. aus pyrithaltigem Bergematerial), • natürliche Böden aus saurem Ausgangsgestein (z. B. Fluss-, Flugsande, sulfatsaure Substrate), • pH: sauer.
Gehalt an Schadstoffen	hoch <ul style="list-style-type: none"> • entlang von Straßen, • Böden verunreinigter Flächen (Altlasten), • Böden aus anthropogenen Bildungen (z. B. industrieller Substrate und Aschen), • Böden unbehandelter Rieselfelder. 	niedrig <ul style="list-style-type: none"> • Böden mit ausschließlich atmosphärischen Einträgen (Staub, Niederschlag) ohne industriell erhöhte Belastung, • Böden des naturnahen Raumes (z. B. Stadtwald).
Verdichtung	hoch <ul style="list-style-type: none"> • Verdichtung durch Befahren, Begehen, Planieren. 	gering <ul style="list-style-type: none"> • in mechanisch aufgelockerten Böden (z. B. durch Umlagerung, Umgraben), • in Böden mit hohem Anteil organischer Substanz oder Asche.
Bodenfeuchte	gering <ul style="list-style-type: none"> • drainierte Böden oder bei Versiegelung der Oberfläche. 	hoch <ul style="list-style-type: none"> • bewässerte Böden, • Böden im Umfeld leckender Wasserleitungen, • Böden in der Nähe versiegelter Oberflächen durch Zufluss.
Alter	< 150 Jahre, z. T. deutlich jünger <ul style="list-style-type: none"> • Böden aus anthropogenen Ab- und Umlagerungen/anthropogenen Bildungen, • Böden der Rieselfelder, Trümmerberge, Halden und Kippen. 	> 150 Jahre <ul style="list-style-type: none"> • historische anthropogene Böden, • Böden natürlicher Entstehung (z. B. in Nischen alter Stadtviertel).
Entwicklung	gering <ul style="list-style-type: none"> • initiale Bodenbildung (z. B. Verwitterungsmerkmale an leicht löslichen Bestandteilen, geringmächtige Ah- bzw. Ai-Horizonte). 	ausgeprägt <ul style="list-style-type: none"> • fortgeschrittene Bodenbildung (z. B. Entkalkung und Verbraunung des Ausgangssubstrats, Tonverlagerung).

Neben den Veränderungen, die Böden im Zuge der Versiegelung bzw. Teilversiegelung erfahren, ruft auch die aktuelle bzw. auch die historische Nutzung am Versiegelungsstandort bodenphysikalische und bodenchemische Veränderungen hervor. Diese können sowohl beabsichtigt (z. B. mechanische Lockerung oder Düngung zur Verbesserung der Wachstumsbedingungen) als auch unbeabsichtigt (z. B. Schadstoffeintrag durch Leckagen) sein. Eine Verallgemeinerung zwischen Nutzung und dar-

aus resultierender Bodenveränderung im Umfeld der Versiegelung ist wiederum kaum möglich, jedoch sind einige Regelmäßigkeiten bekannt (BLUME 1995). So zeigen Böden im Umfeld von Wohnstandorten und Grünflächen häufig starke Nährstoffeinträge (insbesondere Phosphat und Stickstoff), z. B. durch Düngung, Urin oder Tierkot (WITTIG 2008). In Industrie- und Gewerbegebieten sind Böden häufig sehr stark mit technogenen Substraten durchsetzt, vielfach stark verdichtet und betriebs- bzw. produktionsspezifisch durch Schadstoffeinträge

(z. B. PAK⁵, PCB⁶, Schwermetalle) belastet. Gewerblich-industrielle Brachflächen sind oftmals gekennzeichnet durch verdichtete Böden mit hohen Grobbodenanteilen, Kalk- und Schwermetallgehalten. Entlang von stark genutzten Straßen sind Bodenbelastungen durch Verkehrsimmissionen, Streusalzeinträge sowie eingebaute technogene Substrate typisch, was u. a. Schwermetalle, Salze, Kunststoffe, MKW⁷, PAK und auch Herbizide umfasst (WESSOLEK 2001, CHARZYŃSKI et al. 2017, LI et al. 2018). Eine Gefährdung (z. B. für das Grundwasser) ergibt sich insbesondere bei einem sauren bodenchemischen Milieu (niedriger pH-Wert), wodurch beispielsweise bestimmte Schwermetalle (z. B. Cadmium, Zink oder Blei) gelöst und verlagert werden können (ALLOWAY 1999). Böden im Umfeld von militärisch genutzten Anlagen oder Produktionsstätten von Kampfmitteln können mit sprengstofftypischen Verbindungen (STV) belastet sein, beispielsweise Trinitrotoluol (kurz TNT) und dazugehörige Zwischenprodukte (KÜCHLER 2011, REX et al. 2018).

Die vielfältigen Einflüsse, denen Böden in stark versiegelten Gebieten ausgesetzt sind, führen in der Regel zu einer Beeinträchtigung des Wasser- und Nährstoffkreislaufs, vielerorts ist zudem die Schadstoffbelastung oft erhöht. Der Bodenwasserrückhalt, die Grundwasserneubildung und auch die Kationenaustauschkapazität werden dadurch meist herabgesetzt. Die natürliche Bodenfunktionserfüllung (Kap. 2.1) ist in der Folge in vielen Fällen stark reduziert (HAASE & NUISSL 2007, ESCHENBACH & GRÖNGRÖFT 2020).

Auswirkungen von Bodenversiegelung auf das Klima

Kurz gesagt: Das Mikroklima wird durch Versiegelung wärmer und trockener. Der Luftaustausch bebauter und versiegelter Gebiete mit dem Umland wird erschwert.

Hintergrundinformationen

Versiegelung fördert die Entstehung von Hitzeinseln und eines trockenen Mikroklimas (STEWART & OKE 2012, HENNINGER & WEBER 2019). Die verringerte Luftfeuchtigkeit resultiert dabei vor allem aus einer reduzierten Verdunstung (Abb. 5 und 6). Die Erwärmung ist u. a. auf die eingesetzten Versiegelungsmaterialien (z. B. Beton, Asphalt oder Steine) zurückzuführen. Von der Sonne eingestrahelte Energie wird durch Versiegelungsmaterialien vergleichsweise gut gespeichert und auch nur verzögert wieder an die Umgebung abgestrahlt, sodass sich die Umgebung erwärmt. Durch die isolierende Wirkung der eingesetzten Versiegelungsmaterialien ist auch eine verstärkte Wärmespeicherung in den Böden unterhalb der Versiegelung nachweisbar, die ebenfalls nur langsam wieder abgegeben wird (WESSOLEK 2001). Daraus ergibt sich, dass die Lufttemperatur im Umfeld versiegelter Flächen im Vergleich zu un- bzw. gering versiegelten Arealen grundsätzlich erhöht ist. Wie stark der Temperaturanstieg ausfällt, hängt u. a. vom Versiegelungsanteil des jeweiligen Standorts, den thermischen Eigenschaften des Versiegelungsmaterials (Abb. 9), der Materialfarbe, der Rauigkeit der Materialoberfläche, der Wärmeabfuhrmöglichkeit am Standort oder auch von der Bebauungsdichte ab (WESSOLEK 2001, BLUME et al. 2010).

⁵ Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, chemische Stoffgruppe aus Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen (z. B. enthalten in teerhaltigen Produkten, Farb- und Lösungsmitteln).

⁶ Polychlorierte Biphenyle, synthetische Stoffgruppe (z. B. verwendet in elektrotechnischen Bauteilen und für Fugenmassen sowie für Anstriche).

⁷ Mineralölkohlenwasserstoffe, Gruppe von organischen Verbindungen (z. B. aus Treibstoffen, Getriebeölen).

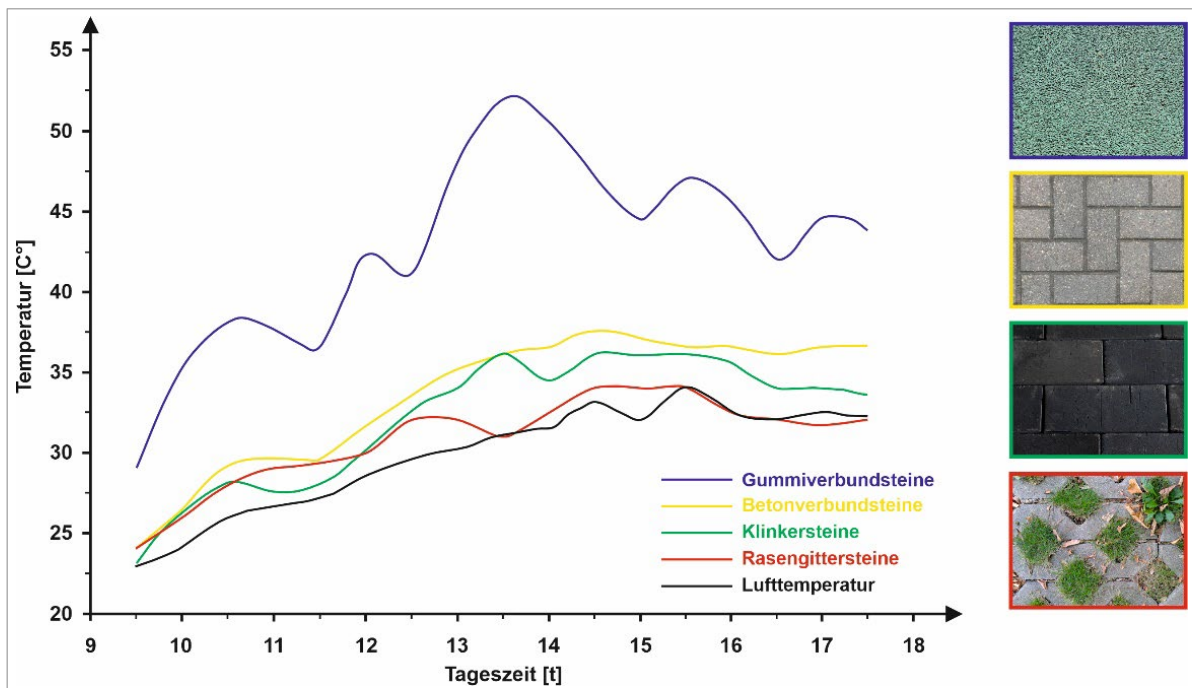


Abb. 9: Für einen warmen Augusttag (schwarze Temperaturkurve) wird in dieser Abbildung der Temperaturverlauf in unterschiedlichen Versiegelungsmaterialien (2 cm Tiefe) dargestellt. Mit Ausnahme der Rasengittersteine (rote Temperaturkurve) verzeichnen alle untersuchten Versiegelungsmaterialien eine Temperaturkurve, die deutlich über der Kurve der Lufttemperatur liegt (WESSOLEK & FACKLAM 1997, verändert).

Unversiegelte Böden können dabei einen wichtigen Beitrag zur Kühlung der Umgebung leisten. Diese Leistung kann modelliert und in Karten dargestellt werden (Abb. 10 und 11). Die Kühlleistung des Bodens hängt, neben den klimatischen Rahmenbedingungen, von der Wasserspeicherkapazität des Bodens, seiner Anbindung an das Grundwasser und dem Bewuchs bzw. der Versiegelung ab. Abbildung 10 zeigt die berechnete potenzielle Kühlleistung in der Vegetationsperiode (April bis September) für das Stadtgebiet Göttingens ohne die Versiegelung. Jeder Quadratmeter unversiegelten Bodens trägt zur Kühlung der Umgebung bei (Kap. 2.1) und erbringt in diesem konkreten Fall

eine Kühlleistung von meist mehr als 300 kWh pro Quadratmeter. Versiegelungen verringern im Vergleich zu unversiegelten Flächen erheblich die Verdunstung (Abb. 5). Die Ursachen dafür sind die stark eingeschränkte Verdunstungsleistung der Pflanzen sowie die reduzierte Direktverdunstung von Boden- und Wasseroberflächen (Kap. 2.2). In Abbildung 11 ist dargestellt, wie stark dieser versiegelungsbedingte Rückgang der Kühlleistung in der Vegetationsperiode im Stadtgebiet Göttingens ausfällt. Gerade in dicht bebauten Gebieten wird die Leistung um über 50 %, teils über 75 % reduziert. Als Konsequenz wird die beschriebene Erwärmung verstärkt.

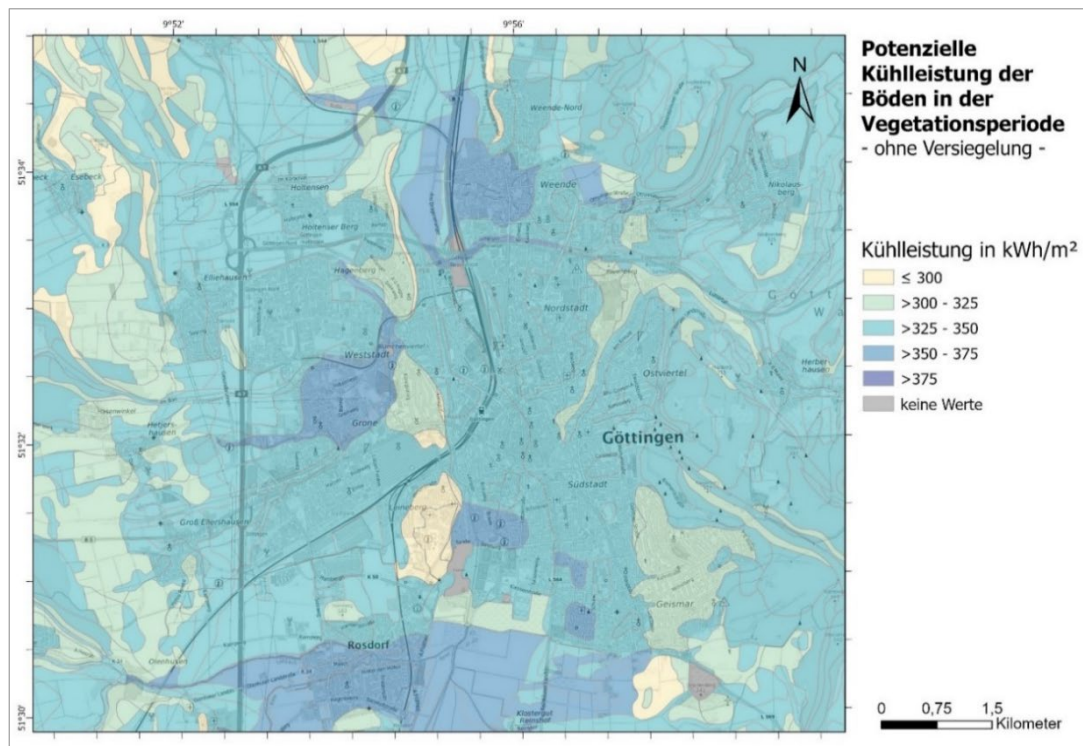


Abb. 10: Karte zur potenziellen Kühlleistung in der Vegetationsperiode (April bis September) im Stadtgebiet Göttingens. (Grafik: LBEG). Hintergrundkarte: ©BKG 2024a.

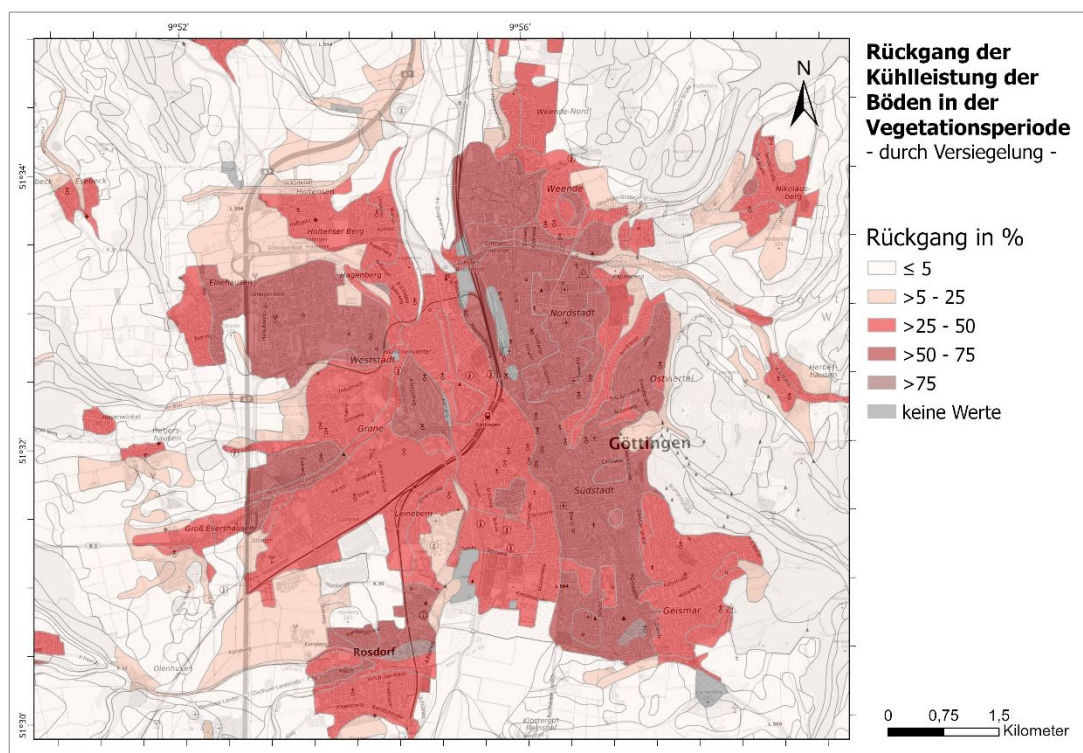


Abb. 11: Karte zum versiegelungsbedingten Rückgang der potenziellen Kühlleistung in der Vegetationsperiode (April bis September) im Stadtgebiet Göttingens (Grafik: LBEG). Hintergrundkarte: ©BKG 2024a.

Neben Temperatur und Luftfeuchtigkeit verändern Bebauung und Versiegelung massiv den klein- und regionalklimatischen Luftaustausch eines Gebiets. Die Blockade von Kaltluftschneisen, beispielsweise durch querstehende bzw. dichte Gebäudebebauung oder die Reduzierung von Kaltluftentstehungsgebieten durch Neuversiegelung, hemmt im hohen Maße eine effektive Luftzirkulation zwischen versiegelten und unversiegelten Gebieten. Das wiederum führt u. a. zu einer Anreicherung von Luftschadstoffen sowie zu einer Ansammlung und Stauung warmer Luftmassen in stärker bebauten und versiegelten Gebieten (KUTTLER 2013, HENNINGER & WEBER 2019).

Auswirkungen von Bodenversiegelung auf Flora und Fauna

Kurz gesagt: Lebensräume für Flora und Fauna werden durch Versiegelung zerstört und isoliert. Biodiversität wird reduziert, und daran gekoppelte Ökosystemleistungen gehen verloren oder können nicht in vollem Umfang erbracht werden.

Hintergrundinformationen

Versiegelung reduziert Lebensräume für Pflanzen und Tiere und führt überdies zu einer Fragmentierung und Isolierung dieser Lebensräume in kleinere Areale. Daraus ergeben sich zahlreiche negative Konsequenzen. So sind unter den mitteleuropäischen gemäßigten Klimabedingungen Wuchsleistung und Vitalität der Vegetation innerhalb versiegelter Gebiete häufig herabgesetzt (WITTIG 2008, BÖLL et al. 2014, PRETZSCH et al. 2017). Ursächliche Faktoren sind u. a. ein begrenzter Wurzelraum, ein häufig ungünstigeres chemisches Bodenmilieu, verdichtungsbedingte negative Veränderungen des Bodenluft- und Bodenwasserhaushalts sowie eine hohe Schadverdichtung des Bodens, wodurch die Wasser- und Nährstoffversorgung der Pflanzen eingeschränkt ist (ROSENBERGER et al. 2024). Wichtige Ökosystemleistungen des Bewuchses, wie z. B. die Produktion von Sauerstoff, die Aufnahme von Schadstoffen und Feinstaub, die Speicherung von Kohlenstoff oder die Abkühlung des Gebiets durch Beschattung und Verdunstung (Abb. 12), können in versiegelten bzw. teilversiegelten Gebieten oft nicht mehr in vollem Umfang erbracht werden (HAASE & NUISSL 2007, KÄNDLER et al. 2011, STROHBACH & HAASE 2012, RAHMAN et al. 2020).

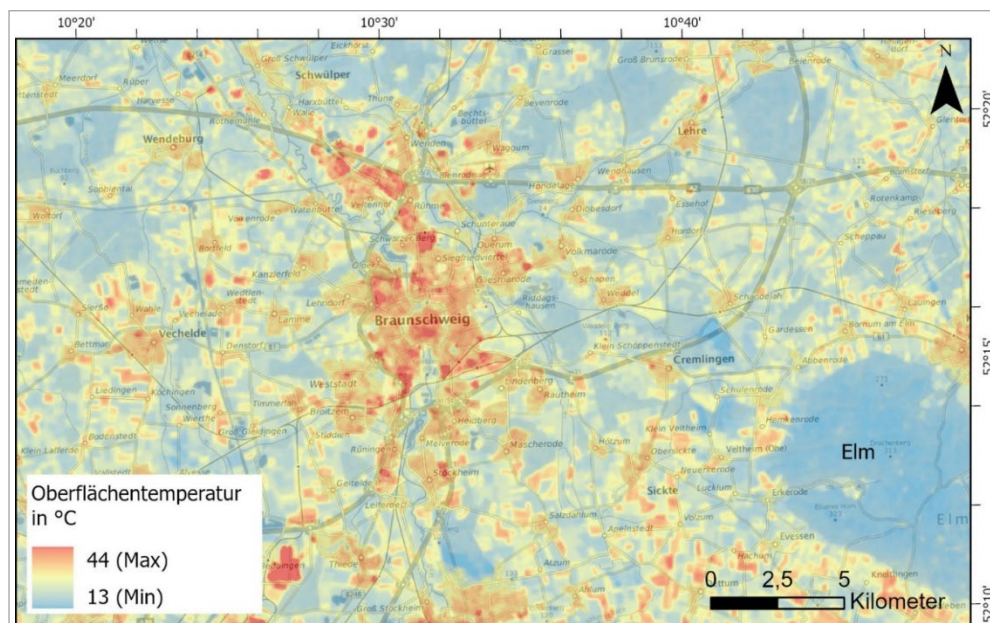


Abb. 12: Oberflächentemperaturen in Braunschweig und Umgebung vormittags am 30.07.2024 (Grafik: LBEG). Die Oberflächentemperatur kann als die Temperatur beschrieben werden, die beim Berühren einer Oberfläche mit der Hand gefühlt wird. Sie unterscheidet sich also von der Lufttemperatur (AVDAN & JOVANOVSKA 2016). In stark versiegelten Gebieten erreichen die Oberflächentemperaturen deutlich höhere Werte von bis zu 44 °C (rot dargestellt), während sie in bewaldeten Bereichen erheblich niedriger sind (blau dargestellt). Landsat Scene ID: LC81940242024212LGN00. Berechnung nach AVDAN & JOVANOVSKA (2016) und MUSTAFA et al. (2020).

Versiegelung war und ist ein wesentlicher Faktor beim Verlust der biologischen Vielfalt, da Lebensräume durch Versiegelung vollständig verlorengehen und die intensive Nutzung der verbleibenden Lebensräume zu einer Verschlechterung von deren Qualität führt. Starke negative Auswirkungen auf die biologische Vielfalt sind dokumentiert (WIRTH et al. 2024). Bezogen auf die Fauna führte die Versiegelung seit Beginn der 1990er Jahre zu negativen Effekten vor allem für Amphibien, Libellen, Reptilien, Wildbienen und Heuschrecken (WIRTH et al. 2024). Auch in Schutzgebieten werden diese Trends dokumentiert. So ist z. B. zwischen 1989 und 2016 die Biomasse von Fluginsekten in 63 untersuchten Schutzgebieten Deutschlands im Durchschnitt um 76 % zurückgegangen (HALLMANN et al. 2017). Diese Entwicklung ist alarmierend, da Insekten wichtige ökologische Funktionen erfüllen, wie etwa die Bestäubung von Pflanzen oder aber auch als Teil der Nahrungskette.

Wie erläutert, verändert Versiegelung massiv bodenphysikalische und bodenchemische Eigenschaften, mit Folgen für die Lebensbedingungen einer vielfältigen Gemeinschaft von Mikroorganismen (z. B. Pilze, Bakterien, Wirbellose und Wirbeltiere). ANTHONY et al. (2023) schätzen, dass der Boden wahrscheinlich Heimat für 59 % (± 15 %) der auf der Erde lebenden Arten ist. Die reiche Biodiversität im Boden trägt wesentlich zu wichtigen Ökosystemfunktionen bei, wie Zersetzung organischer Substanz und Erhaltung der Bodenstruktur (BARDGETT & VAN DER PUTTEN 2014). Darüber hinaus unterstützt die Bodenbiodiversität die Biodiversität oberirdischer Lebensräume, indem sie das Pflanzenwachstum fördert, biotische Nischen schafft, die Zusammensetzung von Pflanzengemeinschaften beeinflusst und letztlich die Resilienz des Ökosystems gegenüber externen Stressfaktoren stärkt (VAN DER HEIJDEN et al. 2008, WARDLE et al. 2004). Stellvertretend für die gesamte Bodenlebewelt (Bodenbiota) beleuchten umfangreiche Meta-Analysen von FENOGLIO et al. (2020) und SZABÓ et al. (2023) den Einfluss von Urbanisierung auf wirbellose Bodentiere (Bodeninvertebraten). Die Arbeiten kommen zu dem Ergebnis, dass mit zunehmender Urbanisierung die Artenvielfalt weltweit signifikant abnimmt. Während einige Generalisten offensichtlich gut mit den Umweltbedingungen in Siedlungsräumen zurechtkommen, verzeichnete beispielsweise die Artenvielfalt von Ringelwürmern, Springschwänzen, Schnecken oder

Käfern einen deutlichen Rückgang. Dies lässt sich unter anderem durch die Empfindlichkeit dieser Lebewesen gegenüber Bodenverdichtung und -verschmutzung erklären. Aus dem Rückgang der Artenvielfalt im Boden resultiert abermals ein Rückgang der Ökosystemleistungen, denn die Bodenlebewelt ist u. a. für die Zersetzung (TRESCH et al. 2019), die Erhöhung der Bodenporosität und die Steigerung der Wasserinfiltration (BABU OJHA & DEVKOTA 2014), die Verbreitung und Regulation von symbiotischen Mykorrhiza-Pilzen (HOPKIN 1997), oder aber auch für die Dezimierung von Schädlingen (KROMP 1999, KORÁNYI et al. 2022) von enormer Bedeutung (WIRTH et al. 2024).

Auswirkungen von Bodenversiegelung auf die Gestalt der Oberfläche

Kurz gesagt: Die Gestalt der Oberfläche wird durch die Ausweitung der Siedlungs- und Verkehrsflächen und damit einhergehendem Bodenabtrag und -auftrag umfangreich verändert.

Hintergrundinformationen

Deutschlandweit werden täglich 52 ha Freifläche in Siedlungs- und Verkehrsflächen umgewandelt (UBA 2024). In Niedersachsen beläuft sich diese tägliche Flächenneuanspruchnahme auf ca. 6 ha pro Tag (LBEG 2023). Etwa die Hälfte dieser Fläche wird versiegelt. Die versiegelte Fläche nimmt also weiterhin zu. Der aktuelle Kenntnisstand zum Wachstum der Siedlungs- und Verkehrsflächen und der Neuversiegelung in Niedersachsen ist im GeoBericht 14 des LBEG (BASEDOW et al. 2021) dokumentiert.

Mit diesen Prozessen geht auch eine tiefgreifende Veränderung der Erdoberfläche einher, da mit der Ausweitung der Siedlungs- und Verkehrsflächen das Relief durch den Ab- und Auftrag von Boden und Gestein umfassend verändert wird (HARNISCHMACHER 2022). Abbildung 13A stellt die Ausdehnung der Siedlungs- und Verkehrsflächen im 18. Jahrhundert und der Gegenwart exemplarisch für die Region Verden (Aller) dar und zeigt eindrücklich, wie viele Freiflächen in diesem Zeitraum neu in Anspruch genommen wurden.

Besonders stark sind die resultierenden Reliefveränderungen dabei in Städten. Arbeiten aus dem Stadtgebiet Aachen (PRÖSCHEL 2020) und Leipzig (GRIMM 2018) ergeben für Auftragsgebiete eine durchschnittliche Überdeckung des natürlichen Reliefs von etwa 2 bis 3 m. Untersuchungen aus dem Stadtgebiet von Hannover berichten von Auftragsmächtigkeiten zwischen etwa 20 cm und mehr als 2 m (SCHNEIDER 1994). Aber auch außerhalb von Städten können größere Reliefveränderungen beobachtet werden. Abbildung 13B stellt beispielhafte Reliefveränderungen durch lineare Infrastrukturmaßnahmen dar.

Veränderte Reliefverhältnisse, z. B. durch Aufhaltungen oder den Bau von Straßen, Dämmen

oder Kanälen, wirken sich auf eine ganze Reihe von Prozessen auf der Erdoberfläche aus. So hat das Relief beispielsweise einen erheblichen Einfluss auf die Abflussbildung in einem Gebiet. Bei steilerem Relief fließt Niederschlagswasser rascher ab und hat weniger Zeit, in den Boden zu infiltrieren, was in den entsprechenden Gebieten zu einem höheren und schnelleren Oberflächenabfluss führen kann. Die Konsequenz kann beispielsweise eine größere Erosionsgefährdung durch abfließendes Wasser sein. Aber auch die Richtung, in die das Wasser abfließt, wird vom Relief bestimmt. Reliefverändernde, künstliche Barrieren können folglich zu einer Veränderung der natürlichen Fließrichtung führen und die Wasserverteilung in der Landschaft beeinflussen.

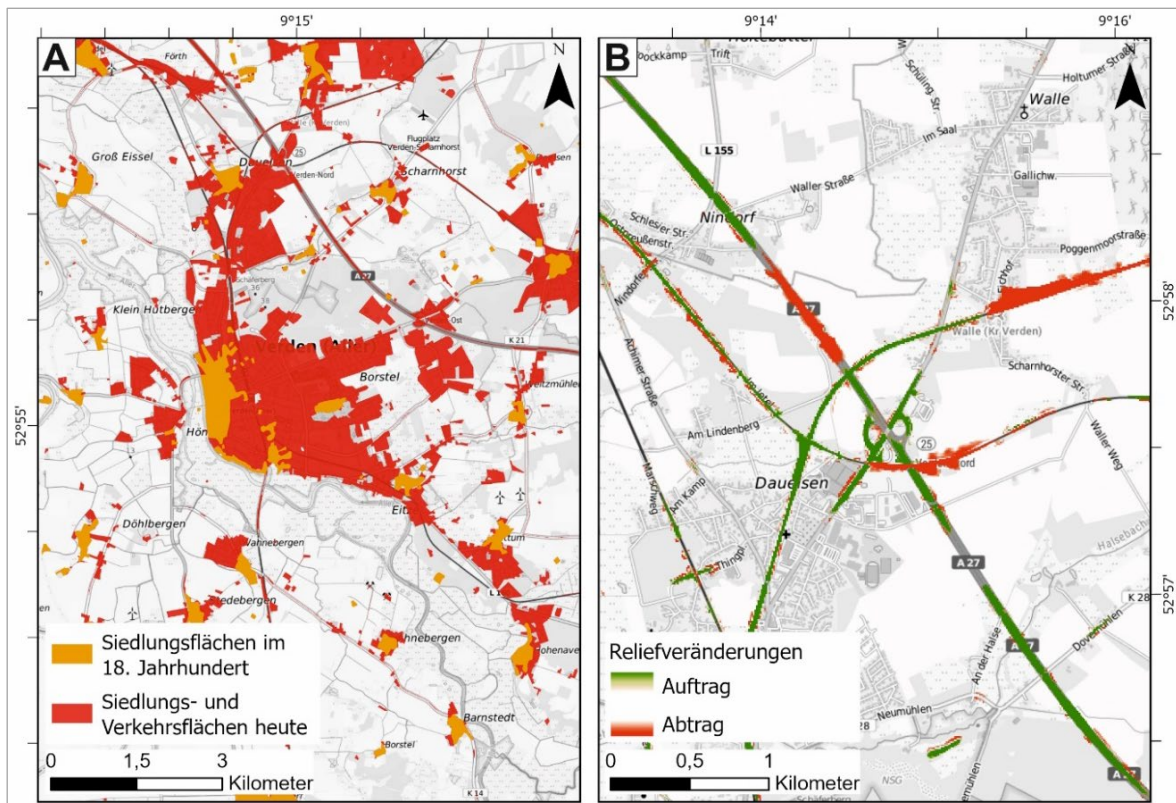


Abb. 13: A: Vergleich der Siedlungs- und Verkehrsflächenverteilung in der Region Verden (Aller) im 18. Jahrhundert und in der Gegenwart (basierend auf *Historischer Landnutzungskarte* des LBEG und DLM25). Im Bereich der alten Siedlungsflächen liegen i. d. R. auch heute Siedlungen (Hintergrundkarte: © BKG 2024a). B: Reliefveränderungen im Zuge von Versiegelung durch lineare Infrastrukturen wie Straßen und Bahnstrecken bei Verden (Auswertung LBEG/Scilands GmbH) (Hintergrundkarte: © BKG 2024a).

Auswirkungen von Bodenversiegelung auf den menschlichen Lebensraum

Kurz gesagt: Gesundheitliche Belastungen und bioklimatischer Stress steigen durch Versiegelung, woraus sich insbesondere für vulnerable Bevölkerungsgruppen eine erhöhte physische und mentale Gesundheitsgefährdung ergibt. Auch weitere Gefahren für den Menschen, wie Hochwasser und Überschwemmungen, nehmen zu.

Hintergrundinformationen

Wie in den vorangegangenen Erläuterungen thematisiert, beeinflusst Bodenversiegelung den menschlichen Lebensraum auf vielfältige Weise. Dadurch trägt Bodenversiegelung, insbesondere in bereits stark versiegelten Gebieten, zu einem Anstieg bioklimatischer Belastungsfaktoren bei. Detaillierte Informationen zu Hintergründen und Folgen von erhöhtem bioklimatischen Stress sind z. B. dem Sachstandsbericht Klimawandel und Gesundheit (RKI 2023) zu entnehmen. Von großer Relevanz sind in diesem Zusammenhang u. a. erhöhte Durchschnittstemperaturen, die Zunahme von Hitzeperioden hinsichtlich Dauer, Häufigkeit und Intensität, eine verringerte Luftfeuchtigkeit, Lärmbelastung oder auch erhöhte Gehalte an Aerosolen und Luftschadstoffen (MÜCKE & MATZARAKIS 2019, RKI 2023, WBGU 2023). Bei vielen Menschen verursacht bioklimatischer Stress körperliche Beschwerden, wie z. B. Herz-Kreislauf-Erkrankungen, belastete Schleimhäute, trockene Augen, Reizhusten oder ein höheres Risiko für Erkältungen. Eine erhöhte physische und mentale Gesundheitsgefährdung besteht für vulnerable Bevölkerungsgruppen, zu denen nach

WINKLMAYR et al. (2023) folgende Menschen gehören:

- (Klein-)Kinder,
- schwangere Frauen,
- ältere und pflegebedürftige Menschen,
- chronisch kranke Menschen,
- Menschen mit körperlichen und geistigen Beeinträchtigungen,
- psychisch belastete oder erkrankte Menschen,
- von Armut betroffene Menschen,
- obdachlose Menschen,
- Menschen, die überwiegend im Freien arbeiten.

Eine weitere Gefahr für Menschen und Sachgüter, die durch Versiegelungsprozesse gefördert wird, ergibt sich aus den veränderten hydrologischen Prozessabläufen (Abb. 5). Insbesondere Starkregenereignisse, bei denen innerhalb kurzer Zeiträume kleinräumig sehr hohe Niederschlagsmengen zu verzeichnen sind, können zu gefährlichen Hochwassersituationen führen (UAN 2024). Abbildung 14 stellt einen allgemeinen Zusammenhang zwischen dem Versiegelungsanteil eines Gebiets und dem Abflussverhalten dar. Es zeigt sich abermals, dass der Abfluss durch Versiegelung prinzipiell erhöht und darüber hinaus auch zeitlich beschleunigt ist. Die schnelle Ableitung von Niederschlagswasser führt in stark versiegelten Einzugsgebieten zu deutlich erhöhten Spitzenabflüssen und einer damit einhergehenden Hochwassergefährdung bei intensiven Niederschlagsereignissen. Durch eine Reduzierung des Versiegelungsanteils im Einzugsgebiet wird der Wasserrückhalt gestärkt, Abflussspitzen werden verringert (Scheitelabsenkung) und zeitlich verzögert (Scheitelrückverlagerung).

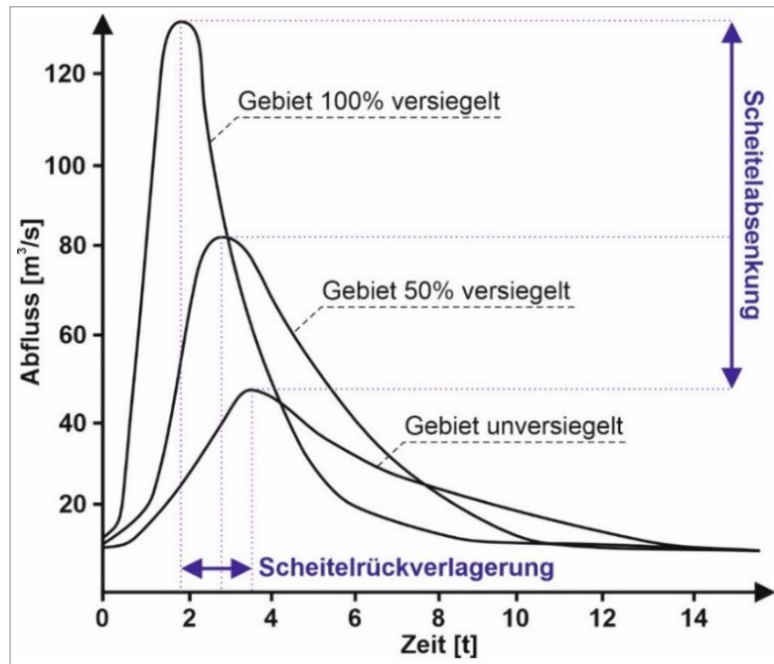


Abb. 14: Abflussverhalten bei veränderten Versiegelungsanteilen im Einzugsgebiet (in Anlehnung an DYCK & PESCHKE (1995)). Es wird deutlich, dass eine Reduzierung des Versiegelungsanteils im Einzugsgebiet eines Fließgewässers dazu führt, dass die Spitzenabflüsse verringert werden und die maximalen Abflussmengen später eintreten.

2.2.3. Versiegelungsschwerpunkt Stadt

Städte sind für viele Menschen ein attraktiver Lebensraum, insbesondere, weil sich vielfältige Funktionen auf einer vergleichsweise kleinen Fläche konzentrieren. Städte sind aber auch Hotspots der Bodenversiegelung, in denen die zuvor beschriebenen Auswirkungen (Kap. 2.2.2) besonders stark zu spüren sind. Abbildung 15 verdeutlicht beispielhaft die komplexen ökologischen Folgen der Bodenversiegelung in Städten. Die Wasserinfiltration ist aufgrund eines erhöhten Versiegelungsanteils eingeschränkt, was eine reduzierte Wasserspeicherung und -filterung nach sich zieht. Anfallende Niederschläge werden nicht selten schnell und in großem Volumen über das Kanalnetz abgeleitet, was besonders bei Starkniederschlägen zur Überlastung der Kanalisation und Kläranlagen sowie ggf. zu Hochwasser in den zugehörigen Fließgewässern führen kann. Die Grundwasserneubildung ist durch geringere Sickerwassermengen in Städten häufig verringert. Hinzu kommt die punktuelle Entnahme von Grundwasser, wodurch die Grundwasserstände herabgesetzt werden können.

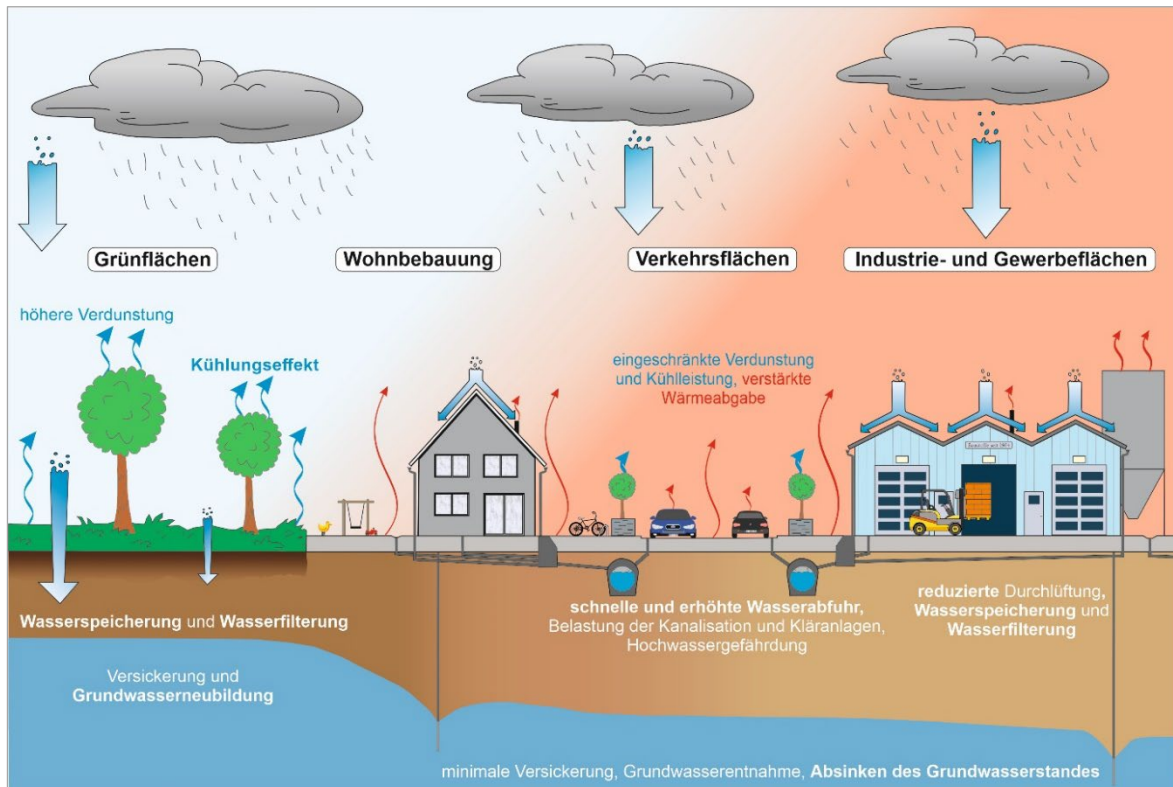


Abb. 15: Komplexe Folgen der Bodenversiegelung in stark versiegelten Gebieten (Grafik: LBEG).

Kleinklimatisch bedingt die Nutzung von wärmeabsorbierenden Baustoffen (z. B. Beton, Asphalt, Pflastersteine) bei gleichzeitig eingeschränkter Verdunstungskühlung und baulich begründeten Windveränderungen eine überdurchschnittliche Erwärmung stark versiegelter urbaner Räume (Kap. 2.2.3). Dieser thermische Effekt wird u. a. durch den Einsatz dunkler Farben sowie die Wärmefreisetzung des Industrie- und Verkehrssektors weiter verstärkt und führt zur Bildung städtischer Wärmeinseln und Hitzestress (KIM & BROWN 2021, ENDLICHER 2012, KOVATS & HAJAT 2008). Erfahrungsgemäß liegen die Jahresmitteltemperaturen in der Stadt ca. 1 bis 2 °C über denen des Umlands. Vor allem an windstillen, heißen Sommertagen können zwischen den hoch versiegelten Stadtzentren und geringer versiegelten Gebieten im Umland aber regelmäßig Temperaturunterschiede von 10 °C und mehr festgestellt werden (OKE 1973, KUTTLER 2013). Hinzu kommen weitere urbane Stressfaktoren (verringerte Luftfeuchtigkeit, verminderte Durchlüftung, Lärmbelastung, erhöhte Gehalte an Aerosolen und Luftschad-

stoffen), die insbesondere für vulnerable Bevölkerungsgruppen zu einer besonderen Gefährdung werden können.

2.3. Bodenentsiegelung

Im Folgenden werden wichtige Begriffe im Themenkomplex Bodenentsiegelung erläutert (Kap. 2.3.1) und Rückkopplungen durch Entsiegelungsvorhaben vorgestellt (Kap. 2.3.2). Anschließend widmet sich Kapitel 2.3.3 Entsiegelungsansätzen in Städten und entsiegelungsrelevanten Kriterien, die bei der Umsetzung von Entsiegelungsvorhaben berücksichtigt werden sollten (Kap. 2.3.4).

2.3.1. Begrifflichkeiten

Bodenentsiegelung

Bodenentsiegelung bedeutet, dass durch Um- oder Rückbau der vorhandenen Versiegelung Boden wieder freigelegt und rekultiviert wird (NEHLS et al. 2011). Prinzipiell zu unterscheiden sind Vollentsiegelung und Teilentsiegelung (Abb. 16).

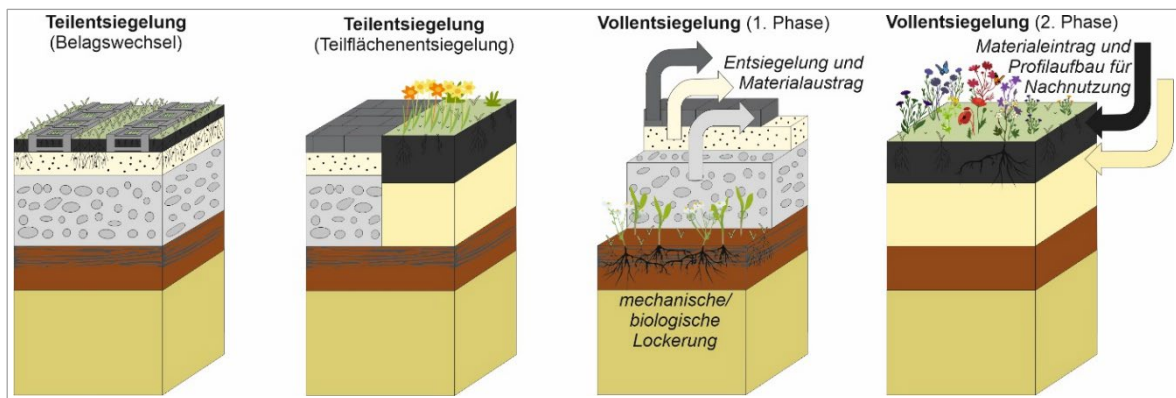


Abb. 16: Modellhafte Darstellung zu Möglichkeiten der Teilentsiegelung (Belagswechsel und Teilflächenentsiegelung) und Vollentsiegelung (Grafik: LBEG).

Vollentsiegelung

Unter Vollentsiegelung versteht man den Prozess, bei dem im ersten Schritt bestehende Bodenversiegelungen, wie Sperr- und Deckschichten, Fremdmaterialien und vorhandene Verdichtungen, vollständig entfernt werden. Anschließend ist es das primäre Ziel, den Wiederaufbau eines standorttypischen Bodens zu erreichen. So können die Wirkverbindung zum natürlichen Untergrund und die sich daraus ergebenden natürlichen Bodenfunktionen bestmöglich wiederhergestellt und/oder ein durchwurzelbarer Bodenaufbau etabliert werden (GUNREBEN & SCHNEIDER 2001, BLUME et al. 2010, HÖKE et al. 2010, SENSTADTUMWELT 2014, LANUV 2017, UBA 2021). Liegen andere Ansprüche an die Fläche vor, kann diese Zielvorstellung angepasst werden. Damit geht allerdings ggf. ein veringert positiver Effekt für den Naturhaushalt einher.

Teilentsiegelung

Unter Teilentsiegelung wird die lediglich partielle Entfernung der Versiegelung verstanden, meist ohne einen vollständigen Ausbau verwendeter technogener Substrate, ohne Lockerung bestehender Verdichtungen und ohne Wiederaufbau eines naturnahen Referenzzustandes. Auch wenn Teilentsiegelungsmaßnahmen die Bodenfunktionalität häufig nur im begrenzten Maß verbessern, so können sie kleinräumig dennoch zur Verbesserung der Situation beitragen (z. B. lokaler Bodenwasserhaushalt), insbesondere wo eine Vollentsiegelung nicht realisiert werden kann. Eine Teilentsiegelung kann durch folgende Maßnahmen umgesetzt werden:

1. Teilflächenentsiegelung:

Im Zuge dieser Maßnahme werden im besten Fall Sperr- und Deckschichten sowie Vorverdichtungen in Teilbereichen einer versiegelten Fläche entfernt (Abb. 17). Dementsprechend wird der Versiegelungsanteil der betreffenden Fläche verringert.



Abb. 17: Niedersächsische Beispiele für Teilflächenentsiegelung (Bildrechte: LBEG).

A: Auf einem zentralen Platz wurde die fugenarme Pflasterung entfernt und ein großzügiges Baumbett mit integrierten Sitzgelegenheiten angelegt.

B: Im Umfeld eines Hauptbahnhofs wurde eine ca. 1.000 m² große Teilfläche eines Parkplatzes vollentsiegelt und rekultiviert. Im Zuge der Neugestaltung wurden Bäume gepflanzt, und die entsiegelte Fläche wurde mit einer Gras-Kräuter-Mischung begrünt.

2. Belagswechsel:

Diese Maßnahme umfasst den Austausch vorhandener, meist stark versiegelnder Beläge, zugunsten von versickerungsfähigeren Belägen mit geringeren Abflussbeiwerten (Abb. 18, Tab. 4). Zu berücksichtigen sind dabei spezifische bautechnische

und nutzungsabhängige Vorgaben, denen die eingesetzten Beläge genügen müssen und die ggf. zu Einschränkungen bei der Belagswahl führen können (BASEDOW et al. 2021).

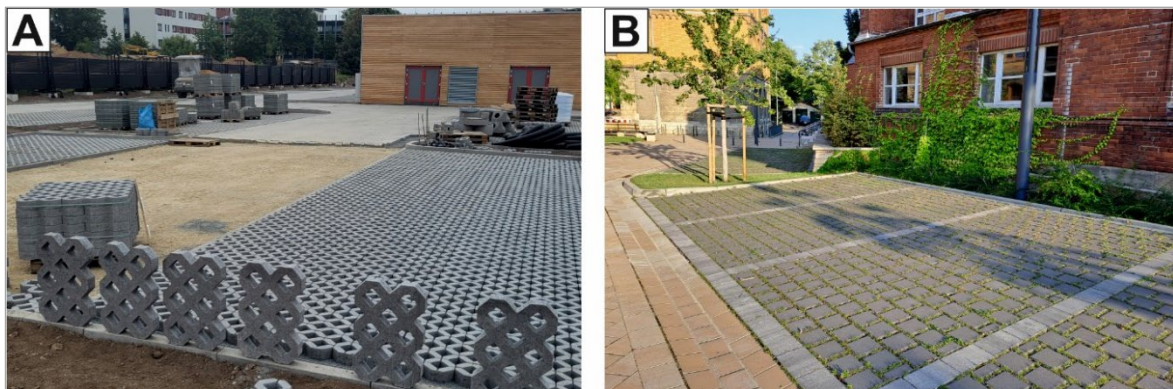


Abb. 18: Neu gestaltete Parkflächen mit versickerungsfähigen Rasengittersteinen (A) und Rasenfugensteinen (B) (Bildrechte: LBEG).

3. Funktionale Entsiegelung:

Unter diesem Begriff werden Maßnahmen zusammengefasst, die zu einer Reduzierung des über das Kanalnetz abgeführten Wassers führen. Das anfallende Niederschlagswasser wird stattdessen dezentral in den Boden versickert oder mittels technischer Möglichkeiten zwischengespeichert (Abb. 21). Für einen Überblick über

genutzte Versickerungsanlagen und weiterführende Informationen zum Thema Versickerung von Niederschlagsabflüssen wird auf BASEDOW et al. (2021) sowie DWA (2005, 2008, 2024) verwiesen.

Entsiegelungspotenzial

In Anlehnung an die Definitionen von GUNREBEN & SCHNEIDER (2001), STULLE & WULFERT (2001) und NEHLS et al. (2011) wird unter dem Entsiegelungspotenzial der Flächenanteil einer Bezugsfläche (z. B. Flurstück) verstanden, der unter Berücksichtigung der jeweiligen Nutzungsanforderungen entsiegelt werden kann. Für die Potenzialflächen soll entweder dauerhaft keine bauliche Nutzung mehr vorgesehen sein, oder deren Nutzung kann durch eine (Teil-)Entsiegelung bestehen bleiben (LANUV 2017). Technische (i. e. stoffliche und bauliche) sowie finanzielle, rechtliche und politische Restriktionen entscheiden in der Praxis darüber, ob theoretisch bestehende Entsiegelungspotenziale umgesetzt werden können (UBA 2021). Zu unterscheiden sind folgende Entsiegelungspotenzialstufen (Abb. 19):

- **Theoretisches Potenzial (Potenzialstufe 1):**
In dieser Potenzialstufe werden versiegelte Flächen zusammengefasst, die auch in absehbarer Zukunft nicht genutzt bzw. einer neuen Nutzung zugeführt werden können oder die aufgrund einer anderen Nutzung bzw. geänderter Nutzungsansprüche grundsätzlich entsiegelt werden können
- **Technisch verhältnismäßiges Potenzial (Potenzialstufe 2):**
Diese Potenzialstufe berücksichtigt die technische Umsetzbarkeit von theoretischen Entsiegelungspotenzialen (Potenzialstufe 1) nach gängigem Stand der Technik und mit vertretbarem Aufwand sowie potenzielle stoffliche und/oder bauliche Restriktionen (z. B. Altlasten, tiefreichende Fundamente).
- **Ökonomisch verhältnismäßiges Potenzial (Potenzialstufe 3):**
In dieser Potenzialstufe werden die Kosten (z. B. Umsetzungs-, Folge- oder Opportunitätskosten) für technisch machbare Entsiegelungsvorhaben (Potenzialstufe 2) in die Betrachtung einbezogen.
- **Politisch umsetzbares Potenzial (Potenzialstufe 4):**
Diese Potenzialstufe berücksichtigt, ob und in welchem Ausmaß eine Umsetzung von Entsiegelungsmaßnahmen politisch mehrheitsfähig und gesellschaftlich akzeptiert ist.

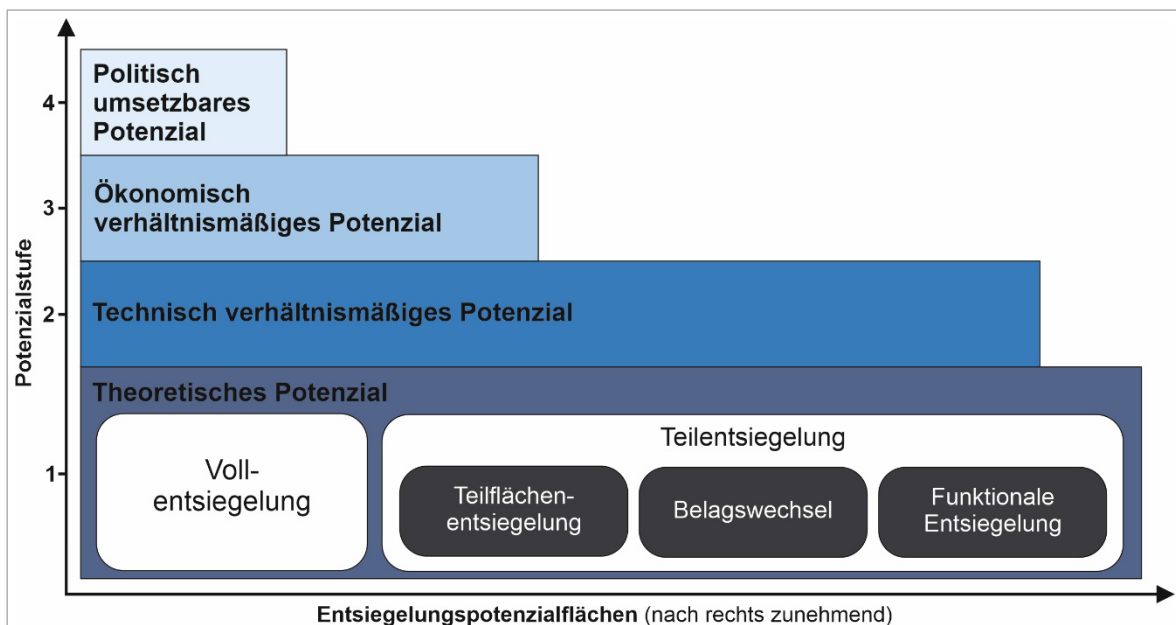


Abb. 19: Potenzialstufen von Entsiegelungspotenzialen (in Anlehnung an UBA (2021), verändert). Die Entsiegelungspotenzialflächen nehmen vom theoretischen zum politisch umsetzbaren Potenzial stufenweise ab, wobei sich die Entsiegelungspotenzialflächen insbesondere beim Übergang vom technisch zum ökonomisch verhältnismäßigen Potenzial (Finanzierungsdefizit) und beim Übergang vom ökonomisch verhältnismäßigen zum politisch umsetzbaren Potenzial (gesetzgebendes Defizit) erheblich verringern.

2.3.2. Effekte von Bodenentsiegelung

Die geschilderten Beeinträchtigungen durch Bodenversiegelung (Kap. 2.2), sind in der Regel nicht im vollen Umfang umkehrbar. Aus diesem Grund ist grundsätzlich eine deutliche Verringerung von Flächenneuanspruchnahme und Neuversiegelung anzustreben, die in Niedersachsen auch gesetzlich verankert ist (NNat-SchG § 1a). Vor dem Hintergrund der gebotenen Dringlichkeit im Bereich der Klimaanpassung (NIKO 2023) können Entsiegelungsmaßnahmen dennoch sinnvoll sein, um negativen Folgen der Versiegelung entgegenzuwirken. Ihre Bedeutung liegt in erster Linie darin, Ökosystemleistungen zumindest teilweise wiederherzustellen und somit eine Verbesserung der Vor-Ort-Situation zu erreichen. Die positiven Effekte der zumeist kleinflächigen Entsiegelungsmaßnahmen mögen lokal begrenzt sein, doch durch das Zusammenwirken vieler Einzelmaßnahmen können sich relevante ökologische Vorteile ergeben. Dabei können sich Entsiegelungsmaßnahmen in folgenden Bereichen positiv auswirken und dadurch helfen, Klimaanpassungsziele zu erreichen und Beiträge zu weiteren Herausforderungen des Umweltschutzes zu leisten (UBA 2021):

- Gesundheitsschutz:
Verringerung von Hitzebelastung und Lufttrockenheit, Förderung kleinräumiger

Luftzirkulation, Schaffung von Grün- und Freizeitflächen,

- Wasserschutz:
Reduzierung von Bodentrockenheit und Niedrigwasser, Stabilisierung des Grundwasserspiegels, Erhöhung der Grundwasserneubildung, Schutz vor Überflutungen und Hochwasser,
- Bodenschutz:
Reduzierung von schadhafte Bodenveränderungen und -erosion, Wiederherstellung natürlicher Bodenfunktionen,
- Naturschutz:
Reduzierung von Biodiversitätsverlusten, Schaffung und Vernetzung von Lebensräumen, Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushaltes sichern und wiederherstellen.

Erfolgversprechend sind insbesondere sinnvoll verknüpfte, übergreifende Maßnahmen. KASTLER & NEITE (2017) stellen in diesem Zusammenhang beispielhafte Verbesserungsmaßnahmen für die Bereiche „Boden“, „Pflanze“, und „Urbane Landschaftsgestaltung“ vor (Tab. 6, 7, 8), um die Auswirkungen des Klimawandels durch die Nutzung natürlicher Kühlleistungen und Wasserspeicher abzumildern. Zum einen spielt Entsiegelung als konkrete Maßnahme eine Rolle, zum anderen bieten die aufgeführten Beispiele Optionen für die Folgegestaltung von entsiegelten Flächen.

Tab. 6: Auswahl von Maßnahmen für den Bereich Boden (KASTLER & NEITE 2017, verändert).

Boden			
Optimierungsziel: Erhalt und Stärkung des Bodenwasserspeichers			
Maßnahmen	Schutz von Böden mit hoher Wasserspeicherkapazität vor Versiegelung sowie Wiederherstellung von Bodenfunktionen (v. a. durch Entsiegelung), insbesondere in klimastrategisch wichtigen Bereichen (z. B. Frischluftschneisen, siedlungsnahen Flächen)	Schutz von Böden mit Grundwasseranschluss vor Versiegelung, insbesondere in klimastrategisch wichtigen Bereichen (z. B. Frischluftschneisen, siedlungsnahen Flächen), Entsiegelung	grundsätzliche Vermeidung von Bodenschadverdichtung bei der Gestaltung und Nutzung von Freiflächen
Wirkung	Verringerung der Aufheizung, Sicherung bzw. Vergrößerung der Fläche, die für Versickerung und Speicherung von Wasser zur Verfügung steht	Erhalt von Flächen mit anhaltender Wassernachlieferung über kapillaren Aufstieg aus dem Grundwasser in Trockenphasen	Erhalt des für die Wasserspeicherung zur Verfügung stehenden Porenraums
Beispiel	Umsetzung von Entsiegelungsmaßnahmen, Optimierung der Flächennutzung und des Anteils versiegelter Flächen im B-Plan	Berücksichtigung von grundwassernahen Böden im B-Plan, Freihalten von Bebauung	kein Befahren bei ungünstigen Bodenfeuchten (Kap. 3.5)

Tab. 7: Auswahl von Maßnahmen für den Bereich Pflanze (KASTLER & NEITE 2017, verändert).

Pflanze			
Optimierungsziel: Etablierung von Pflanzen mit standortangepassten hohen Verdunstungsleistungen			
Maßnahmen	gezielte Auswahl geeigneter Pflanzen mit hoher Transpirationsleistung für Standorte mit ausreichender Wassernachlieferung	Auswahl von Pflanzen mit großem/tief reichendem Wurzelsystem, Anpassung von Pflegemaßnahmen	standortangepasste Bewässerung
Wirkung	Erhöhung der Luftfeuchtigkeit und der Kühlwirkung, verbesserte Ausnutzung des Bodenwasserspeichers	Vergrößerung des effektiven Wurzelraums, verbesserte Ausnutzung des Bodenwasserspeichers	Erhalt einer ausreichenden Füllung der Bodenspeichers, um Trockenstress zu vermeiden (nFKWe-Füllstand >50 %)
Beispiel	Etablierung von Pflanzen mit großer Phytomasse-Produktion (z. B. Sumpfpflanzen), Etablierung von Pflanzenarten mit hoher Verdunstungsleistung	Anpflanzen von tief wurzelnden Gehölzen, extensive Pflege (z. B. durch vergrößerte Mahdabstände auf Rasenflächen)	ressourcenschonende Bewässerung öffentlicher Grünflächen in Trockenperioden

Tab. 8: Auswahl von Maßnahmen für den Bereich Urbane Landschaftsgestaltung (KASTLER & NEITE 2017, verändert).

Urbane Landschaftsgestaltung				
Optimierungsziel: klimaresiliente Gestaltung der urbanen Landschaft und Grünanlagen				
Maßnahmen	Anlage von temporären Wasserflächen	Anlage von technischen Einrichtungen zur Speicherung von Überschusswasser	Vermeidung von Flächenversiegelung	planerische Festsetzung für Bepflanzungen und für den Erhalt von Bäumen, Sträuchern und sonstiger Bepflanzung
Wirkung	Speicherraum für Wasser	Speicherraum für Beregnungswasser	Erhalt von Freiflächen zur Zwischenspeicherung und Versickerung von Wasser	Erhalt von Flächen zur Integration in stadtklimatische Konzepte
Beispiel	Versickerungsmulden, Versickerungsgräben entlang von Straßen	Bau von Zisternen, Bau von Regenwasserrückhaltebecken	Festsetzung der Fläche, die von der Bebauung freizuhalten ist und ihrer Nutzung, Festsetzung der öffentlichen und privaten Grünflächen wie Parkanlagen	Erhalt der Bepflanzung, Erhalt von Freiflächen zur Vernetzung von Grünanlagen und Frischluftschneisen

2.3.3. Entsiegelungsschwerpunkt Stadt

Städtische Flächen unterliegen einer intensiven Flächenkonkurrenz. Sie befinden sich im Spannungsfeld zwischen konsequenter kompakter Innenentwicklung, mit welcher Böden im Außenbereich geschont und attraktive, lebenswerte Innenstädte erhalten oder geschaffen werden sollen, und dem Bedarf nach Freiräumen und Maßnahmen der Klimaanpassung in diesen verdichteten Räumen. Um zu verdeutlichen, dass es bei der Innenentwicklung nicht ausschließlich um Nachverdichtung geht, son-

dern ebenso um eine Sicherung und Aufwertung von Freiräumen, wurden die Begriffe der doppelten und dreifachen Innenentwicklung geprägt, wobei bei letzterer die Mobilität stärker in die Betrachtung einbezogen wird (UBA 2019, 2023). Freiräume sollen explizit erhalten und entwickelt werden. Hierbei kann auch Entsiegelung eine Rolle spielen.

Eine häufig diskutierte, naturbasierte Lösung zur Bewältigung dieser Herausforderungen ist der Ausbau von Grüner und Blauer Infrastruktur. Dies soll sowohl in bestehenden als auch neu geplanten Stadtquartieren zur Förderung der Ökosystemleistungen beitragen (WBGU

2023, BALANY et al. 2020, BENEDICT & MCMAHON 2012). Grüne Infrastruktur ist Infrastruktur mit sichtbarem „Grün“. Sie kann sich im privaten sowie öffentlichen Raum befinden und umfasst sowohl natürliche als auch gestaltete Grünflächen, von Parks und Straßenbäumen bis hin zu begrünten Fassaden, Dächern oder Gärten (Abb. 20). Blaue Infrastrukturen weisen sichtbares „Blau“ in Form von Wasser auf. Dies können beispielsweise künstlich angelegte Teiche,

Wasserflächen oder Wasserspiele sowie existierende natürliche Gewässer sein (TRAPP & WINKER 2020). Grüne und Blaue Infrastrukturen sind zentrale Elemente des Schwammstadt-Prinzips und der wassersensiblen Stadtentwicklung, die primär darauf abzielen, Städte so zu gestalten, dass sie weniger verwundbar und resilient gegenüber klimatischen Veränderungen sind.



Abb. 20: Beispiele für urbane Begrünungsmaßnahmen (Bildrechte: LBEG).
A: Fassadenbegrünung, B: Dachbegrünung, C: Baumpflanzung mit naturnaher Beetgestaltung.

Die Schaffung von Grün- und Blauräumen geht in vielen Fällen mit Entsiegelung einher; entsprechende Gestaltungsempfehlungen und Pilotprojekte für städtische Nutzungstypen sind verfügbar (BENDEN et al. 2017, BASEDOW et al. 2021, BLUEGREENSTREETS 2022, BOSOLD et al. 2024, <https://aussenstellenatur.de>). Viele der darin vorgeschlagenen Maßnahmen wirken sich positiv auf die Funktionsfähigkeit von Böden, die Biodiversität, den Wasserhaushalt, die Auslastung des Kanalnetzes und das Mikroklima eines Gebiets aus (Abb. 22). So ergibt sich z. B. aus einer gesteigerten Versickerung eine erhöhte Wasserspeicherung und -filterung, die letztlich auch zu einer verringerten Grundwasserabsenkung führt. Überdies stellt auch der Boden selbst einen wichtigen Wasserspeicher

dar, der durch eine höhere Versickerung im Zuge von Entsiegelungsmaßnahmen gestärkt wird (Tab. 6). Die Erhöhung des Wasserrückhalts im Boden und die Förderung der Grundwasserneubildung trägt zu einer Reduzierung der Wasserabfuhr über das Kanal- bzw. Gewässernetz bei und ist ein wichtiger Beitrag zum kommunalen Hochwasserschutz. Um die Versickerung von Niederschlägen in den Untergrund ggf. weiter zu fördern und/oder Wasser einer etwaigen Nutzung zuzuführen, bieten sich Belagsänderungen, Versickerungsanlagen bzw. Wasserspeicher (Abb. 21) an (DWA 2005, 2008, 2024; Tab. 8).



Abb. 21: Wasserrückhaltebecken, die bei Starkregenereignissen das Kanalnetz entlasten können (Bildrechte: LBEG).

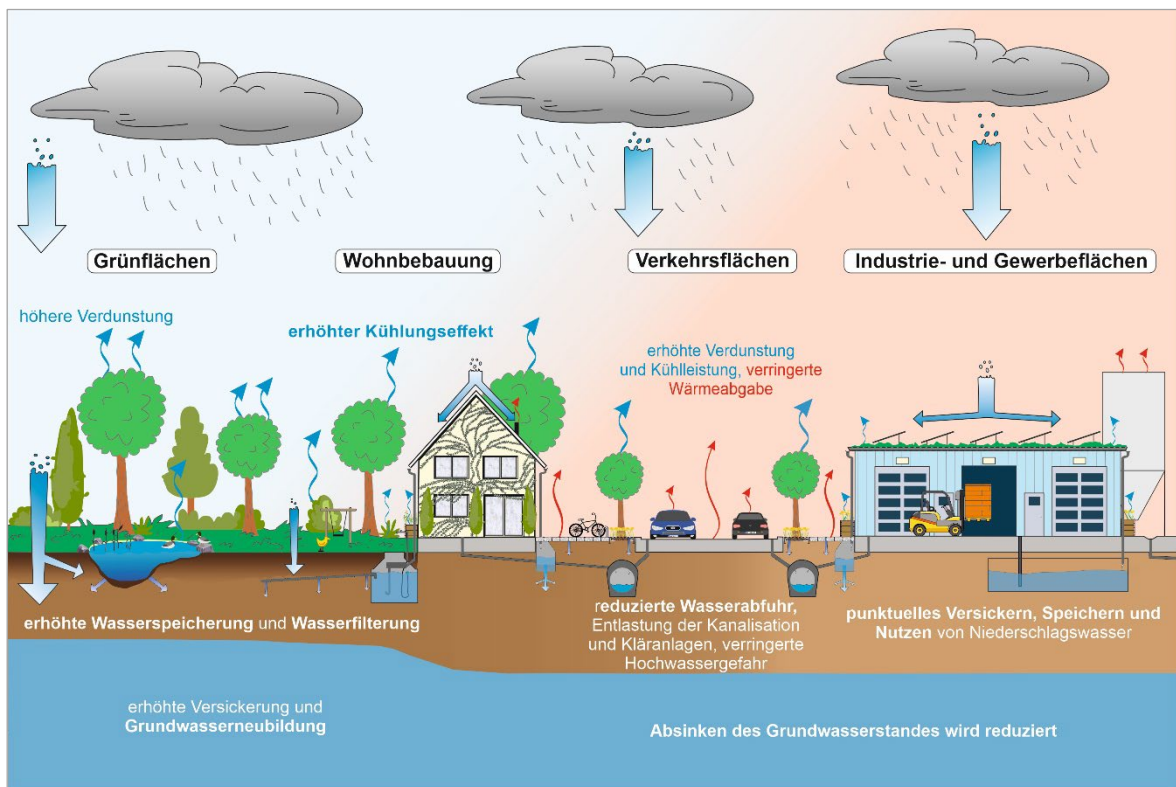


Abb. 22: Positive Effekte durch den Ausbau von Grüner und Blauer Infrastruktur, im Rahmen dessen auch Entsiegelungsmaßnahmen umgesetzt werden (Grafik: LBEG).

Bei der Milderung des städtischen Hitzestresses kommt insbesondere Grünflächen (Grüner Infrastruktur) eine besondere Bedeutung zu, denn sie fördern durch Schattenwurf und Verdunstung die Abkühlung der Umgebung (BALANY et al. 2020, EDMONDSON et al. 2016, ARMSON et al. 2012). Aktuelle Untersuchungen zeigen, dass in Stadtgebieten ein divers struktu-

rierter Grünflächenanteil (Baumbestand, Sträucher, Rasenflächen, Gründächer, begrünte Fassaden) zwischen 30 und 40 % anzustreben ist, um den Hitzestress deutlich zu reduzieren und im Sommer für kühlere Temperaturen zu sorgen (RAHMAN et al. 2022). Das konkrete Ausmaß von Kühlungseffekten durch städtisches Grün ist komplex und Gegenstand intensiver For-

sungen. Es ist u. a. abhängig von der Flächengröße, ihrer Ausgestaltung sowie ihrer Anbindung an die umgebende Bebauung. Es werden Abkühlungseffekte zwischen etwa 0,5 und 5 °C angenommen (RAHMAN et al. 2019, QIU et al. 2013). Die Bedeutung von Entsiegelungsmaßnahmen liegt in diesem Zusammenhang vor allem in der Bereitstellung von Wasser, da bei einer unzureichenden Wasserversorgung andernfalls die Kühlungsraten stark eingeschränkt sind (HARTMANN et al. 2023). Um die Kühlleistung auch während Trockenperioden sicherzustellen, muss künftig das Wasserspeichervermögen der Böden stärker beachtet, und es müssen auch technische Lösungen der Niederschlagswasserbewirtschaftung verstärkt genutzt werden (BASEDOW et al. 2021; DWA 2007, 2024). Gegebenenfalls kann eine auf den Standort abgestimmte, ressourcenschonende Bewässerung erforderlich sein, um die Wasserversorgung zu gewährleisten und die daran gekoppelte Kühlleistung aufrecht zu erhalten.

Bei der Gestaltung von Grünanlagen wird eine gezielte Auswahl geeigneter Pflanzen mit hoher Verdunstungsleistung und einem möglichst tief reichenden Wurzelsystem empfohlen. Tief reichende Wurzeln verbessern die Ausnutzung des Bodenwasserspeichers und fördern dadurch die Pflanzenverdunstung (Erhöhung der Luftfeuchtigkeit und der Kühlwirkung). Auch bei der Planung bzw. Umgestaltung von Baumstandorten außerhalb von Grünanlagen sollten eine möglichst geringe Versiegelung und ausreichend Wurzelraum angestrebt werden, um in Zukunft vitale Bäume zu erhalten (ROSENBERGER et al. 2024). Eine Entscheidungshilfe zur Auswahl sogenannter Zukunftsbäume, die geeignet sind, Städte klimarobuster zu gestalten, ist u. a. dem Merkblatt „Zukunftsbäume für die Stadt“ (BdD & GALK 2022) zu entnehmen. Weitere Pflanzempfehlungen und Hinweise zu einer naturnahen Gestaltung bietet beispielsweise der Internetauftritt des Projekts „Außenstelle Natur“ (UMWELTZENTRUM HANNOVER E. V., <https://ausstellenatur.de/downloads/>). Wo keine Freiflächen für die Anlage von Grünanlagen zur Verfügung stehen, bietet sich ggf. die Begrünung von Dachflächen oder Fassaden an (BALANY et al. 2020, BERARDI et al. 2014), um kleinräumige Abkühlung zu fördern (Abb. 20).

Gewässer (Blaue Infrastrukturen) tragen ebenfalls zur Verbesserung des städtischen Mikroklimas bei. Im Vergleich zu den umliegenden Versiegelungsmaterialien erwärmen sie sich

deutlich weniger, etwa um 2 bis 6 °C, und wirken dadurch temperaturnivellierend. Die kühlende Wirkung wird durch die direkte Verdunstung aus dem Wasserkörper noch verstärkt. QIU et al. (2013) bilanzieren, dass eine Gewässerfläche von 16 m² ein umliegendes Raumvolumen von 2.826 m³ um 1 °C abkühlen kann und sich kleinräumig auch die Luftfeuchtigkeit erhöht. Darüber hinaus dienen Fließgewässer als bedeutende Frischluftschneisen und fördern den regionalen Austausch von Luftmassen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der Ausbau von Grün-Blauer Infrastruktur vielfach mit einer Entsiegelung einhergeht und pfadübergreifend positive Auswirkungen nach sich zieht (Abb. 22). Entsiegelte und funktionsfähige Böden können dadurch dazu beitragen, die Auswirkungen von Hitzewellen und Starkregenereignissen in stark versiegelten Gebieten zu mindern und sind darum ein sehr wichtiges Element für die Anpassung an die Folgen des Klimawandels in urbanen Räumen.

2.3.4. Entsiegelungsrelevante Kriterien

Wie in Kapitel 2.3.1 erwähnt, sind technische, finanzielle sowie rechtliche und politische Aspekte bei der Umsetzung von Entsiegelungsvorhaben maßgeblich. Die konkrete Durchführung von Entsiegelungsvorhaben ist von standortspezifischen Randbedingungen abhängig, die über die Umsetzbarkeit eines Vorhabens entscheiden, denn nicht alle versiegelten Flächen sind auch gleichermaßen für eine Entsiegelung geeignet. Grundsätzlich liegen Entsiegelungspotenziale in unterschiedlichsten Nutzungstypen vor, jedoch kommen hierfür erfahrungsgemäß vor allem Verkehrsflächen, gewerbliche Bauflächen, Wohnbauflächen, Gemeinbedarfsflächen, gemischte Bauflächen, Sonderbauflächen, versiegelte Bereiche von Grünflächen, im Wald und von landwirtschaftlichen Anlagen in Betracht (LFU 2000, LANUV 2017, UBA 2021). Um die Umsetzbarkeit einer Maßnahme zu überprüfen, ist vor Ort stets eine Einzelfallbetrachtung nötig. Tabelle 9 gibt einen Überblick über Kriterien, die dabei Berücksichtigung finden sollten, deren Relevanz im Zusammenhang mit Entsiegelungsvorhaben und mögliche Datenquellen. Diese Kriterien können darüber hinaus dafür genutzt werden, eine Priorisierung unter den verfügbaren Flächen vorzunehmen. So können die vorliegenden finanziellen und personellen Ressourcen gelenkt werden (UBA 2021).

Tab. 9: Kriterien, die im Rahmen von Entsiegelungsvorhaben zu berücksichtigen sind. Zusammenstellung basierend auf UBA (2021), GUNREBEN & SCHNEIDER (2001).

Kriterium	Erläuterung	Relevanz für Entsiegelungspotenzial	mögliche Datenquelle
<i>Flächeninformationen</i>			
Versiegelungsanteil	Der Versiegelungsanteil einer Fläche ist ein zentrales Kriterium zur Einstufung des Entsiegelungspotenzials. Da bei der Umsetzung von Entsiegelungsmaßnahmen der Fokus weniger auf Gebäuden, sondern auf anderen versiegelten Flächen liegt, sollte der Versiegelungsanteil unterteilt in bebaute Flächen (Gebäude) und unbebaut versiegelte Bereiche (Zufahrten, Straßen) erfasst werden (Kap. 2.3.1).	hoch	LGLN, kommunale Daten
Belagsklasse	Die Art des Versiegelungsbelags (Asphalt, Rasengittersteine o. ä., Tab. 4) ist zentral für die Beurteilung des Entsiegelungs- oder Belagsänderungspotenzials. Wenn durchlässigere Beläge die erforderlichen Anforderungen erfüllen können, ist eine Belagsänderung sinnvoll und stellt eine Teilentsiegelung dar.	mittel – hoch	kommunale Daten, projektbezogene Auswertung
Größe der potenziellen Entsiegelungsfläche	Je größer die Entsiegelungsfläche, desto größer können auch die Effekte sein, die mit der jeweiligen Maßnahme erzielt werden sollen (z. B. für Klimaanpassung, Erholung oder Naturschutz). Eine größere Gesamtfläche kann zudem die Kosten pro Quadratmeter verringern (UBA 2021). Aber auch kleinere Maßnahmen (insbesondere eine Vielzahl von Einzelmaßnahmen) können zu Verbesserungen führen und dazu beitragen, die lokalen Verhältnisse zu verbessern.	mittel – hoch	projektbezogene Auswertung
Gefälle	Nach UBA (2021) sind die Möglichkeiten für Entsiegelungs- und Belagsänderungsmaßnahmen bei einem Gefälle der Fläche >10 % eingeschränkt, da nur bestimmte Beläge anwendbar sind. Eine Entsiegelung und Begrünung mit geschlossener Vegetationsdecke, z. B. mit Rasen, wäre dort allerdings umsetzbar.	gering	projektbezogene Auswertung
<i>Nutzungsinformationen</i>			
tatsächliche Nutzung	Daten der tatsächlichen Nutzung (ALKIS) oder ggf. kommunale Kartierungen (z. B. Stadtstrukturtypen) sind wichtig z. B. für die Ableitung von Nutzungsintensitäten und Schadstoffemissionspotenzialen (vgl. Kriterium Nutzungsintensität und Kap. 3.2.1).	hoch	LGLN, kommunale Daten
zukünftige Nutzung	Die zukünftige Nutzung bestimmt den Rahmen für die Entsiegelungsmaßnahmen und die Flächengestaltung. Flächen, für die dauerhaft keine bauliche Nutzung mehr vorgesehen ist, bieten ein hohes Entsiegelungspotenzial. In diesem Fall ist ggf. auch der Rückbau von Gebäuden möglich und sinnvoll. Auch anstehende Sanierungen von Flächen (Arbeiten an Infrastruktur, Neugestaltung von Hinterhöfen) bieten die Möglichkeit, Entsiegelungen mit geringerem Aufwand umzusetzen, da ohnehin Arbeiten im Gebiet stattfinden (UBA 2021). Baulasten (Wege- oder Leitungsrechte) sollten hier berücksichtigt werden (LANUV 2015).	hoch	Flächennutzungsplan, Bebauungsplan, kommunale Daten
Eigentumsverhältnisse	Es macht prinzipiell keinen Unterschied, ob Entsiegelung auf öffentlichen oder privaten Flächen umgesetzt wird. Jedoch sind die Eigentumsverhältnisse ggf. entscheidend für die Priorisierung und Umsetzbarkeit von Projekten (UBA 2021). Flächen im Eigentum der öffentlichen Hand werden z. B. nach SENS BW (2021, 2022) höher priorisiert, da hier	hoch	LGLN, kommunale Daten

Kriterium	Erläuterung	Relevanz für Entsiegelungspotenzial	mögliche Datenquelle
	üblicherweise weniger Vorlauf benötigt wird. Mit Blick auf die Klimaanpassung kann zudem ein höherer Gestaltungsspielraum vorliegen. Öffentliche Einrichtungen sollten diesbezüglich mit gutem Beispiel vorangehen (UBA 2021). Bei Absprachen mit Privateigentümern ist jedoch auch dort eine effektive Umsetzung möglich.		
Grundflächenzahl	Die Grundflächenzahl (GRZ) gibt gemäß BauNVO an, wie viel Fläche eines Baugrundstücks überbaut (also versiegelt) werden darf. Im Umkehrschluss kann daraus eine Fläche abgeleitet werden, die mindestens als Freifläche bestehen muss.	gering – hoch	Bebauungsplan
Leerstand	Leerstandskataster werden z. T. auf kommunaler Ebene geführt. Lange Leerstände deuten auf eine Mindernutzung hin. Auch wenn Gebäude üblicherweise wieder dem Wohnungsmarkt zugeführt werden sollten, kann in bestimmten Fällen eine Entsiegelung geprüft werden.	gering – mittel	kommunale Daten
Brachflächen	Brachflächen sind üblicherweise im Rahmen des Flächenrecyclings für eine Nachnutzung vorgesehen. So kann eine Neuversiegelung von Flächen vermieden werden. Sie können zudem eine Altlastenproblematik aufweisen. Für eine Entsiegelungsmaßnahme im klassischen Sinn bieten sich diese Flächen somit selten an.	gering – hoch (einzelfallabhängig)	kommunale Daten, ggf. Portale oder Kataster privater Anbieter
Sonderbauflächen	Nicht mehr genutzte Militärstandorte, Kasernen oder Bunker sind Beispiele für Sonderbauflächen, die theoretisch hohe Entsiegelungspotenziale bieten. Allerdings ist hier im Einzelfall die angestrebte Nutzung und auch die Belastungssituation zu prüfen.	hoch	kommunale Daten
<i>Fachinformationen, Schutzgebiete, Restriktionen</i>			
Altlasten ⁸ und Altlastenverdachtsflächen	Altlasten verhindern in der Regel die Umsetzung von Entsiegelungsvorhaben, da mögliche Gefährdungen für Mensch und Umwelt, die durch die Entsiegelung verstärkt oder ausgelöst werden könnten, ausgeschlossen werden müssen. Daher ist vor der Durchführung einer Maßnahme eine Abfrage des Altlastenkatasters sowie in der Regel eine entsprechende Voruntersuchung notwendig (Kap. 3.2 und 3.3), die eine Bewertung hinsichtlich des stofflichen Inventars, sowie der Toxizität, Mobilität und Abbaubarkeit der Schadstoffe vornimmt.	hoch	Untere Bodenschutzbehörden
flächenhafte stoffliche Bodenbelastungen	Flächenhafte Bodenbelastungen stellen besondere Anforderungen an den Umgang mit und ggf. die Entsorgung von Bodenmaterial dar. Entsiegelungen in flächenhaft belasteten Gebieten (z. B. Bodenplanungsgebiete) sollten in der Planung und Kalkulation Berücksichtigung finden.	mittel	LBEG, Untere Bodenschutzbehörden
Nutzungsintensität, Schadstoffemissionspotenzial, Verschmutzungsgrad der versiegelten Fläche	Entsiegelungsflächen stellen häufig auch Bereiche dar, auf denen Niederschlagswasser von den umliegenden Flächen versickert. Ist von den umliegenden Flächen der Eintrag von Schadstoffen zu erwarten, muss eine Entsiegelung hieran angepasst werden. Das Potenzial für Schadstoffemissionen kann anhand von Nutzungsinformationen abgeschätzt werden (Kap. 3.2.1, Tab. 13). Hierzu zählen Daten zur PKW-Auslastung von Straßen oder zur Parkplatzfrequentierung sowie allgemeine Nutzungskategorien. Über	hoch	NLStBV, kommunale Daten

⁸ Überbegriff für Altablagerungen und Altstandorte.

Kriterium	Erläuterung	Relevanz für Entsiegelungspotenzial	mögliche Datenquelle
	die Nutzungsintensität können auch überdimensionierte Versiegelungen abgeleitet werden.		
Grundwasserflurabstand	Durch eine Entsiegelung wird wieder ermöglicht, dass Wasser in den Boden infiltrieren und versickern kann. Der Boden bietet eine Schutzfunktion für das darunterliegende Grundwasser, die jedoch abhängig von den Bodeneigenschaften und der Mächtigkeit der Bodenschichten über dem Grundwasser ist. Hinzu kommt die Menge und Belastung des Sickerwassers. Je mächtiger die grundwasserfreie Sickerstrecke, desto besser ist das Grundwasser geschützt. Bei einer Entsiegelung muss also darauf geachtet werden, dass davon keine Gefährdung für das Grundwasser ausgehen kann. Betrachtet wird der mittlere Grundwasserhochstand (MHGW) unter der Geländeoberfläche. Als erster Schwellenwert für eine hinreichende Sickerstrecke kann ein Grundwasserflurabstand von $\geq 1,5$ m gelten (MEUSER 2005, NEHLS et al. 2011). Mindestens sollte der Abstand ≥ 1 m betragen (DWA 2024). Bei geringeren Abständen sollte die Unbedenklichkeit des Sickerwassers sichergestellt sein (DWA 2005). Letztlich ist eine Einzelfallbetrachtung vorzunehmen.	hoch	LBEG, projektbezogene Geländeuntersuchung
geologische und hydrogeologische Kriterien	Sehr oberflächennah anstehende wasserlösliche Gesteine (Subrosionsgebiete) können in Einzelfällen ggf. gegen eine Entsiegelung sprechen. Für eine Einschätzung der hydrogeologischen Eignung eines Gebiets (z. B. zur Grundwasseranreicherung, Versickerungsfähigkeit des Untergrundes) sind entsprechende Auswertungskarten zu berücksichtigen.	gering – hoch (einzelfallabhängig)	LBEG, projektbezogene Geländeuntersuchung
Wasserschutzgebiete	Wasserschutzgebiete werden im Interesse der öffentlichen Wasserversorgung festgesetzt. In Niedersachsen wird hiermit überwiegend auf den Schutz des Grundwassers im Einzugsgebiet von Wasserentnahmen gezielt. Grundsätzlich kann eine Entsiegelung sehr positive Auswirkungen auf das Grundwasser haben, indem mehr Wasser versickern und das Grundwasser angereichert werden kann. Allerdings darf es keine nachteiligen Einwirkungen auf das Grundwasser durch die Entsiegelung geben. Im Einzelfall ist die Verordnung des jeweiligen Schutzgebietes heranzuziehen und der Austausch mit der Unteren Wasserbehörde sinnvoll.	gering – hoch (einzelfallabhängig)	NLWKN, Untere Wasserbehörden
Denkmalpflege	Liegt im Bereich der geplanten Entsiegelungsfläche oder in deren Umgebung (Objekt- und Umgebungsschutz) ein Denkmal vor, kann das gegen eine Entsiegelung sprechen bzw. eine Anpassung der Planung erfordern. Es können sich auch Chancen für die hochwertige Gestaltung, Einbindung und die Finanzierung ergeben. Neben dem Belag selbst kann z. B. auch eine Freifläche schützenswert sein, was eine entsprechende Gestaltung erfordert. Eingriffe in den Boden können zudem archäologische Funde berühren. Eine frühzeitige Abstimmung mit der Unteren Denkmalbehörde ist deshalb sinnvoll.	gering – hoch (einzelfallabhängig)	NLD Denkmalatlas, kommunale Daten
Schutzgebietskategorien des Naturschutzes, Biotope	Grundsätzlich stellen Entsiegelungen positive Veränderungen des Naturhaushaltes dar. Zudem kann durch die Nähe zu einem Schutzgebiet ggf. eine Vernetzung zwischen entsiegelten und neugestalteten Flächen stattfinden. In Einzelfällen können aber auch Be-	gering – hoch (einzelfallabhängig)	NLWKN, Untere Naturschutzbehörden

Kriterium	Erläuterung	Relevanz für Entsiegelungspotenzial	mögliche Datenquelle
	lange gegen eine Entsiegelung sprechen bzw. ist eine Abstimmung von Arbeiten hinsichtlich des Zeitpunktes wichtig („Baufenster“). Hierzu können die Verordnung der Schutzgebiete sowie die Untere Naturschutzbehörde Auskunft geben.		
<i>Effektbezogene Kriterien</i>			
Vernetzbarkeit mit Grünstrukturen	Liegt eine potenzielle Entsiegelungsfläche angrenzend oder in der Nähe zu bestehenden Grünstrukturen (ggf. auch Schutzgebieten), bieten sich Möglichkeiten der Vernetzung als Lebens- und Erholungsraum. Solche Flächen können für eine Umsetzung priorisiert werden.	mittel – hoch	projektbezogene Auswertung
stadtklimatische Situation	Durch stadtklimatische Analysen können Bereiche identifiziert werden, in denen Menschen besonderen Belastungen ausgesetzt sind (z. B. durch Hitze), oder die eine besondere Bedeutung für die Kühlung der Stadt haben. Sind sie bekannt, können sie Priorisierungsräume für Entsiegelungsmaßnahmen darstellen, um die stadtklimatische Situation zu verbessern.	mittel – hoch	kommunale Daten
Bedeutung für Starkregenvorsorge	Entsiegelungsmaßnahmen, die die Auswirkungen von Starkregenereignissen besonders stark reduzieren (z. B. durch einen großen potenziellen Bodenwasserspeicher und hohe Versickerungsleistungen) können fachlich begründet priorisiert werden.	mittel – hoch	BKG (2024b), kommunale Daten
Bodenkundliche Bedeutung	Der Effekt der Entsiegelungsmaßnahme ist wesentlich von den Leistungen des neu aufzubauenden Bodens abhängig. Wichtige Kennwerte sind das Wasserspeichervermögen, die Sickerwasserrate, das Filterpotenzial für Schadstoffe und das Kühlpotenzial des Bodens. Ebenfalls relevant ist, ob Teile des natürlichen Bodenaufbaus (vor der Versiegelung) wiederhergestellt bzw. geschützt werden können.	mittel – hoch	LBEG
<i>Wichtige Planungskriterien</i>			
Kosten	In der praktischen Umsetzung stellen die Kosten eine entscheidende Größe dar und können als Priorisierungskriterium genutzt werden. Generell gilt, dass die Umsetzung von Entsiegelungsmaßnahmen meist kostspielig ist, insbesondere bei technisch anspruchsvollen Maßnahmen. Für überschlägige Informationen hierzu siehe Kapitel 3.1.4.	hoch	Planungsprozess, ergibt sich auch aus den in dieser Tabelle genannten Punkten.
zeitliche Umsetzbarkeit	Für Entsiegelungsmaßnahmen gibt es häufig Zeitfenster, die genutzt werden müssen. Diese können von der Finanzierung bzw. Fördermitteln, ohnehin stattfindenden Arbeiten (z. B. Straßenbau), Bereitschaft von Eigentümern*innen oder sonstigen Fristen abhängen. Werden die in dieser Tabelle genannten Kriterien berücksichtigt, können verzögernde „Überraschungen“ mit höherer Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen und eine gute zeitliche Planung erreicht werden.	hoch	

Hinweis

Die Vielfalt der Kriterien sollte nicht abschrecken! Viele dieser Informationen und Planungsschritte sind üblicher Teil kommunaler Arbeits- und Abwägungsprozesse, und ein routinierter und zügiger Umgang ist möglich. Es geht an dieser Stelle darum, für die jeweiligen Belange zu sensibilisieren, um ein möglichst gutes Ergebnis zu erzielen.

2.4. Rechtsgrundlagen zur Begründung und Umsetzung von Entsiegelungsmaßnahmen

Bodenversiegelung wirkt sich wesentlich negativ auf den Naturhaushalt und das Landschaftsbild aus, kann zu Belastungen für den Menschen führen und Gefahren verstärken (Kap. 2). Aus diesem Grund finden sich in unterschiedlichen Gesetzen Pflichten und Gebote zur Entsiegelung oder Möglichkeiten, Entsiegelungsmaßnahmen zu begründen und umzusetzen. Es besteht somit ein grundsätzlicher gesellschaftlicher Anspruch zur Entsiegelung, dem allerdings bisher nur unzureichend entsprochen wird. Einer Entsiegelungsmaßnahme können in der Praxis mehrere verschiedene Verpflichtungen aus dem Naturschutz-, Umwelt- und Planungsrecht zugrunde liegen.

Zentrale Rechtsbereiche für die Entsiegelung sind insbesondere das Bau-, Naturschutz- und Bodenschutzrecht. Von Bedeutung ist zudem das Wasserrecht, das auch in engem Zusammenhang mit den zu berücksichtigenden bodenschutzrechtlichen Belangen steht. Eine zunehmend wichtige Rolle nimmt außerdem das Klimarecht ein. Eine ausführliche Analyse der aktuellen rechtlichen Situation ist in UBA (2021) zu finden. An dieser Stelle kann lediglich ein knapper Überblick über einige wesentliche Rechtsbereiche, Instrumente und deren Anwendung in der Praxis gegeben werden. Eine umfangreichere Zusammenstellung ist in tabellarischer Form Anhang 1 zu entnehmen.

Abbildung 23 gibt einen Überblick über die relevantesten Gesetze und niedersächsischen Verordnungen und Konkretisierungen. Auch für freiwillige bzw. rein fachlich begründete Maßnahmen der Entsiegelung (z. B. Klimaanpassung, Hinterhofbegrünung) bilden die aufgeführten Gesetze den wesentlichen Rahmen.

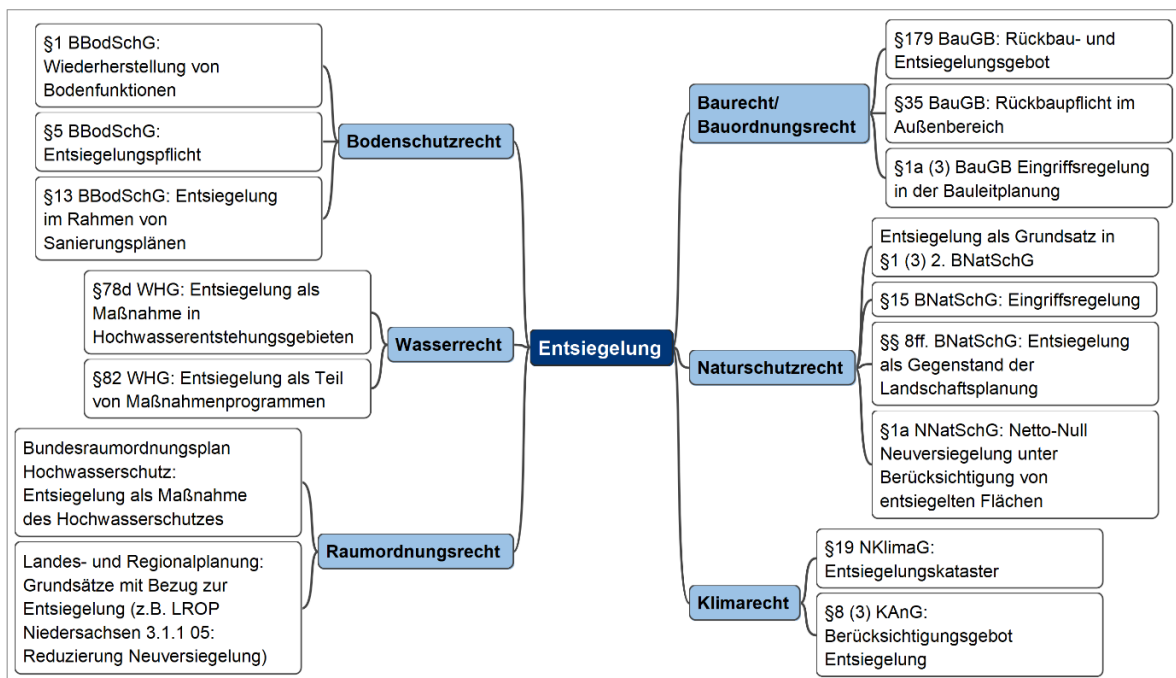


Abb. 23: Übersicht über wichtige gesetzliche und untergesetzliche Bestimmungen. Sofern im Text nicht benannt, vgl. Anhang 1.

2.4.1. Entsiegelung nach BauGB

Im Fokus stehen hier städtebauliche Regelungen, konkret das Rückbau- und Entsiegelungsgebot (§ 179 BauGB), die städtebauliche Sanierung (§§ 136 ff. BauGB) sowie der Stadtumbau (§§ 171a ff. BauGB; UBA 2021).

Das Rückbau- und Entsiegelungsgebot (§ 179 BauGB) kann eingesetzt werden, um die Festsetzungen, die im Bebauungsplan getroffen sind, durchzusetzen oder Missstände zu beheben. Diese Bestimmung unterstreicht ausdrücklich die Bedeutung der Böden und den Bedarf zur Wiederherstellung von Bodenfunktionen, indem die sonstige Nutzbarmachung wie folgt begründet wird: „[...] Wiedernutzbarmachung von dauerhaft nicht mehr genutzten Flächen, bei denen der durch Bebauung oder Versiegelung beeinträchtigte Boden in seiner Leistungsfähigkeit erhalten oder wiederhergestellt werden soll.“ (§ 179 (1) BauGB). Die Leistungsfähigkeit des Bodens kann durch die natürlichen Bodenfunktionen beschrieben werden (Kap. 2).

Zudem sind Entsiegelungsmaßnahmen im Rahmen von städtebaulichen Sanierungen (§ 136ff. BauGB) oder des Städteumbaus möglich (§ 171ff. BauGB). Im Rahmen von städtebaulichen Sanierungen können Entsiegelungen „[...] auch aus ökologischen Gründen und solchen der Klimaanpassung erfolgen, z. B. um Grünflächen und Biotope anzulegen, verdichtete Bauplätze zu entkernen, Freiluftschneisen zu schaffen, verrohrte Gewässer offenzulegen und andere Bodenversiegelungen abzubauen.“ (UBA 2021). Viele der möglichen Maßnahmen sind eher kleinflächig. Bei Maßnahmen des Städteumbaus hingegen können auch größere Flächen entsiegelt werden. Das Ziel ist die Behebung von erheblichen städtebaulichen Funktionsverlusten, die z. B. auch in mangelnder Klimaanpassung begründet sein können (§ 171a BauGB, UBA 2021).

Eine wichtige Regelung für den Außenbereich ist außerdem die in § 35 BauGB definierte Rückbauverpflichtung, welche festlegt, dass nach einer dauerhaften Aufgabe der zulässigen Nutzung bestimmte Vorhaben (z. B. gartenbauliche Betriebsflächen, Erdöl- und Erdgasförderplätze) zurückzubauen und Bodenversiegelungen zu beseitigen sind.

Anwendung in der Praxis

Der § 179 BauGB findet in der Praxis nach den Ergebnissen des UBA (2021, Beispiele S. 172ff.) nur selten Anwendung. In einer kompetenten Beratung sowie in finanziellen Anreizen für die Eigentümerinnen und Eigentümer wird die einfachere und verträglichere Lösung gesehen, da so ggf. eine einvernehmliche und freiwillige Umsetzung erfolgt (UBA 2021). Nach § 175 (1) BauGB ist vor dem Erlass eines Rückbau- oder Entsiegelungsgebots eine Erörterung und Beratung mit den Betroffenen zu führen, in der auch Hinweise zur Durchführung der Maßnahme sowie Hinweise auf Finanzierungsmöglichkeiten gegeben werden. In der Praxis dürfte es darauf ankommen, dass ausreichend Fördermittel zur Verfügung stehen.

Städtebauliche Sanierungen und der Stadtumbau kommen in der Praxis häufiger zum Einsatz und werden teilweise auch zur Entsiegelung genutzt (UBA 2021: 180ff.).

Auch Entsiegelungen auf Basis der Rückbauverpflichtung nach § 35 BauGB (z. B. von nicht mehr genutzten Mobilfunkmasten) finden statt (UBA 2021: 199).

Exkurs Schottergärten

Mit der gewachsenen Kritik an den sogenannten „Schottergärten“ ist auch die sie betreffende und von der Rechtsprechung bestätigte Rechtslage (z. B. Beschluss des OVG Lüneburg vom 17.01.2023 – 1 LA 20/22) stärker ins Bewusstsein getreten. Diese sind gemäß NBauO § 9 Abs. 2 nicht zulässig, da nicht überbaute Flächen von Baugrundstücken Grünflächen sein müssen, soweit sie nicht für eine andere zulässige Nutzung erforderlich sind. Die Bauaufsichtsämter können somit gem. § 79 NBauO die Beseitigung anordnen (siehe *Homepage des MW Niedersachsen*).

In der Praxis haben bereits einige Kommunen damit begonnen, Schottergärten zurückbauen zu lassen. Neben einem Anschreiben mit Erläuterung der rechtlichen Lage sind insbesondere Beratungsgespräche und entsprechende fachliche Argumente hilfreich, um eine Einsicht bei den Grundstücksinhabern zu erreichen. Es gibt viele gute Gründe, Freiflächen anders und besser zu gestalten. „Schottergärten sind nicht nur nachteilig für die Biodiversität, sondern auch für die Klimaanpassung, da sich die Flächen bei Sonneneinstrahlung stark aufheizen und die Wasserversickerungsfähigkeit durch die Abdichtung beeinträchtigt ist.“ (UBA 2021: 203). Darüber hinaus ist auch ihre Funktion im Kohlenstoffkreislauf beeinträchtigt.

Schottergärten sind somit Flächen mit Entsiegelungspotenzial.



Abb. 24: A: In Bau befindlicher, ohne Bodenabtrag umgesetzter privater Schottergarten.
B: Schottergarten in Wohngebiet mit aufkommendem Bewuchs (Bildrechte: LBEG).

2.4.2. Entsiegelung nach BNatSchG

Entsiegelung in den allgemeinen Vorschriften des BNatSchG

Zur dauerhaften Sicherung der Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushalts nach § 1 (3) Nr. 2 BNatSchG sind Böden so zu erhalten, dass sie ihre Funktion im Naturhaushalt erfüllen können. Nicht mehr genutzte versiegelte Flächen sind zu renaturieren, oder, soweit eine

Entsiegelung nicht möglich oder nicht zumutbar ist, der natürlichen Entwicklung zu überlassen.

In § 1a (1) des niedersächsischen Naturschutzgesetzes (NNatSchG) wird die Entsiegelung von Böden als Baustein einer Flächenkreislaufwirtschaft genannt. Nach 2050 soll keine Neuversiegelung mehr stattfinden, die in der Bilanz nicht durch eine Entsiegelung ausgeglichen wird.

§ 1a (1) NNatSchG – Begrenzung der Versiegelung von Böden

Ergänzend zu § 1 Abs. 3 Nr. 2 BNatSchG ist die Neuversiegelung von Böden landesweit bis zum Ablauf des Jahres 2030 auf unter 3 ha pro Tag zu reduzieren und bis zum Ablauf des Jahres 2050 zu beenden.

Anzurechnen sind Flächen, die entsiegelt und dann renaturiert oder, soweit eine Entsiegelung nicht möglich oder nicht zumutbar ist, der natürlichen Entwicklung überlassen worden sind.

Entsiegelung als Kompensation nach dem BNatSchG und in der Bauleitplanung

Die Entsiegelung gehört also zu den Maßnahmen, mit denen die Ziele des Naturschutzes und der Landschaftspflege verwirklicht werden sollen. Entsiegelung in dem oben beschriebenen allgemeinen Kontext sollte somit selbstverständlich sein. In diesem Abschnitt soll es jedoch insbesondere um Entsiegelung im Rahmen der Eingriffsregelung gehen.

Die Eingriffsregelung ist ein Instrument, um unvermeidbare Eingriffsfolgen bestmöglich zu kompensieren. Die Entsiegelung kann Teil oder Voraussetzung einer solchen Kompensation sein. Neben der inhaltlich notwendigen eingriffs- und funktionsgerechten Kompensation von Beeinträchtigungen, die mit einer Versiegelung verbunden sind und die mit einer Entsiegelung ggf. erreicht werden kann, ist gemäß § 15 (3) BNatSchG zu prüfen, ob eine Kompensation u. a. auch durch Maßnahmen zur Entsiegelung erreicht werden kann. Hiermit soll vermieden werden, dass land- oder forstwirtschaftlich genutzte Flächen für die Kompensation in Anspruch genommen werden (BNatSchG § 15 (3), BREUER 2023). Es ist zu unterscheiden zwischen der Anwendung der Eingriffsregelung nach dem BNatSchG und der bauplanungsrechtlichen Eingriffsregelung (s. u.). Grundsätzliche Unterschiede im Hinblick auf die Kompen-

sationsmaßnahmen und in diesem Kontext bezüglich der Entsiegelung bestehen allerdings nicht. Die niedersächsische Landesnaturschutzverwaltung hat eine Bewertungsmethodik für eine landesweit einheitliche und rechtssichere Anwendung der Eingriffsregelung entwickelt. Neben dieser Methodik finden allerdings, insbesondere in der Bauleitplanung, abweichende Bewertungsverfahren Anwendung. Zudem gilt für Eingriffe im Verantwortungsbereich des Bundes die Bundeskompensationsverordnung. Die Entsiegelung kommt regelmäßig als eine Maßnahme zur Bewältigung von versiegelungs- und unter Umständen auch anderweitig bedingten Beeinträchtigungen infrage (Tab. 10).

Im Baurecht richtet sich die Eingriffsregelung nach § 1a (3) BauGB. Die Eingriffsregelung gemäß BNatSchG ist dort in der Abwägung nach den Vorschriften des BauGB zu berücksichtigen. Die Beeinträchtigungen der Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushalts und des Landschaftsbildes durch Neuversiegelungen, die im Rahmen eines Bebauungsplans ermöglicht werden, können an anderer Stelle durch Entsiegelungsmaßnahmen kompensiert werden (UBA 2021). Auch hier gilt die oben genannte notwendige Berücksichtigung land- und forstwirtschaftlicher Interessen nach BNatSchG § 15 (3) und einem daraus folgenden erhöhten Begründungsbedarf, falls keine Entsiegelung erfolgt. Kommunen müssen sich deshalb mit Entsiegelungspotenzialen auseinandersetzen (UBA 2021). Dies erfolgt in der Planungspraxis der Beobachtung nach allerdings noch nicht in hinreichendem Maße. Besonderes Augenmerk ist bei Entsiegelungsmaßnahmen im Kontext bebauter Gebiete darauf zu legen, dass die Fläche auch dauerhaft gesichert bleibt und nicht wieder bebaut wird. Hierzu bestehen Möglichkeiten über städtebauliche Verträge oder Grundbucheinträge (UBA 2021).

Bei Vorhaben, die nicht über das Baurecht, sondern über andere fachgesetzliche Genehmigungsverfahren (z. B. Planfeststellungsverfahren für den Straßen- oder Netzausbau) genehmigt werden, ist die Eingriffsregelung nach dem BNatSchG maßgebend und von der verfahrensführenden Behörde anzuwenden (UBA 2021). Auch hier bietet sich die Möglichkeit zur Entsiegelung (Tab. 10).

Tab. 10: Beispiele von in Niedersachsen angewendeten Leitfäden zur Umsetzung der Eingriffsregelung. Eine Übersicht der Leitfäden der Landesnaturschutzverwaltung ist auf der *Homepage des NLWKN* verfügbar.

Leitfaden	Anwendungsbereich	Hinweise mit Entsiegelungsbezug
NLÖ 1994, aktualisiert NLWKN 2006, S. 9f	Bauleitplanung	„Für die Kompensation ist vorrangig die Entsiegelung von Flächen erforderlich. Die Flächen sind zu naturbetonten Biotoptypen [...] oder – soweit dies nicht möglich ist – zu Ruderalfluren, Brachflächen oder Siedlungsgehölzen aus standortheimischen Arten zu entwickeln. Soweit keine entsprechenden Entsiegelungsmöglichkeiten bestehen, sind die Flächen aus der intensiven agrarischen Nutzung zu nehmen und entsprechend zu entwickeln.“
NLT 2011a, S. 17, (70); NLT 2011b, S. 11	Bau von Hoch- und Höchstspannungsleitungen (Freileitungen und Erdkabel) / Bau von Mobilfunkmasten	„Für die Kompensation ist vorrangig die Entsiegelung von Flächen erforderlich. Die Flächen sind zu Biotoptypen der Wertstufen V und IV oder – soweit dies nicht möglich ist – zu Ruderalfluren oder Brachflächen zu entwickeln. Soweit keine entsprechenden Entsiegelungsmöglichkeiten bestehen, sind die Flächen aus der intensiven landwirtschaftlichen Nutzung zu nehmen und entsprechend zu entwickeln.“
NST 2013, Liste VI, S. 65	Bauleitplanung	Liste VI: Beschreibung von möglichen Ausgleichsmaßnahmen: Schutzgut Boden: Rückbau von Bodenversiegelungen (Entsiegelung und Teilentsiegelung) Schutzgut Wasser: Verringerung des Oberflächenabflusses (z. B. durch Entsiegelung) bei Beeinträchtigung der Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens, Wiederherstellung der Grundwasserneubildung (z. B. durch Niederschlagswasserversickerung, Bodenlockerung und -entsiegelung) bei Beeinträchtigung der Grundwasserneubildung.
LK OSNABRÜCK 2016: Kompensationsmodell, Kap. 5.3, S. 46	Bauleitplanung	Hinweis, dass verstärkt Entsiegelungen vorzunehmen sind.
BKompV 2020; Handreichung zur BKompV (BfN & BMU 2021), BKompV § 11 u. Anlage 6B; BfN & BMU 2021, Kap. 5.3.3, S. 73, Kap. 5.3.4.2, S. 76	Bundesbehördlich geführte Verfahren, z. B. Leitungsbau der Energiewende, Bahnverbindungen, Autobahnen	<ul style="list-style-type: none"> • „Maßnahmen zur Entsiegelung werden unter Beachtung der Anlage 6 Abschnitt B festgesetzt. Sie dienen insbesondere dazu, eingriffsbedingte Neuversiegelungen und damit verbundene Beeinträchtigungen der natürlichen Bodenfunktionen auszugleichen oder zu ersetzen.“ (BKompV) • „Eine Versiegelung soll grundsätzlich durch eine flächengleiche Entsiegelung ausgeglichen werden. Ist dies nicht möglich, sind bei anderen Maßnahmen in Abhängigkeit von der betroffenen Funktion und der bodenfunktionsspezifischen Wirkung der Maßnahme höhere Flächenumfänge erforderlich.“ (BfN & BMU 2021) • Entsiegelung zur Erhöhung der Grundwasserneubildung (siehe Anlage 6, Abschnitt B)

Verpflichtungen zur Entsiegelung, die über die Eingriffsregelung hinausgehen, beispielsweise aus dem Artenschutzrecht (als vorgezogene Ausgleichsmaßnahmen gemäß § 44 Abs. 5 BNatSchG) oder im Zusammenhang mit Ausnahmen vom Schutz der Natura-2000-Gebiete

(kohärenzsichernde Maßnahmen)⁹, werden hier nicht weiter vertieft. Entsprechende Fragestellungen sollten mit den zuständigen Naturschutzbehörden geklärt werden.

⁹ Schriftliche Mitteilung W. Breuer (NLWKN, Geschäftsereich Naturschutz).

Anwendung in der Praxis

In der Praxis zeigt sich bislang, dass Entsiegelungsmaßnahmen durchaus als Kompensationsmaßnahmen realisiert werden, wenn auch in relativ geringem Ausmaß. So lassen sich u. a. auf Nachfrage bei Unteren Naturschutzbehörden oder bei Durchsicht von Unterlagen zu Bebauungsplänen Beispiele finden, in denen Entsiegelungen festgelegt und verwirklicht wurden. Größere Entsiegelungsmaßnahmen können im Sinne einer Bevorratung umgesetzt werden. Auch Ersatzzahlungen können für Entsiegelungen genutzt werden.

Die Begründung bei Nicht-Umsetzung von Entsiegelungsmaßnahmen ist üblicherweise, dass keine Flächen zur Entsiegelung zur Verfügung stehen. Auch hohe Kosten zur Umsetzung von Entsiegelungsmaßnahmen werden als Hindernis genannt. Hier kann das geplante Entsiegelungskataster (Kap. 1) einen Beitrag für eine schnellere und gleichzeitig fundierte Prüfung leisten, da die Potenziale flächenhaft erfasst werden sollen. Entsiegelbare Flächen können auch in Landschafts- und Grünordnungspläne aufgenommen und so in ihrem Potenzial verdeutlicht werden.

Trotz genannter vorhandener Einschränkungen stuft das UBA (2021: 238) die Eingriffsregelung als „das wichtigste Instrument zur Durchsetzung von Entsiegelungsmaßnahmen ein, welches deutschlandweit auch tatsächlich Anwendung findet.“

2.4.3. Entsiegelung nach BBodSchG

Ziel des BBodSchG ist es, die Funktionen des Bodens nachhaltig zu sichern oder wiederherzustellen (§ 1 BBodSchG). Die fachgerechte Entsiegelung ist eine hochwertige Maßnahme zur Wiederherstellung von Bodenfunktionen (ENGEL & PRAUSE 2021). Insofern liegt die Entsiegelung von Böden allgemein im Interesse des Bodenschutzes.

Ein eigener Paragraph im BBodSchG (§ 5 Entsiegelung) lässt auf den ersten Blick eine wirkungsvolle Regelung zur Entsiegelung erwarten. Der Paragraph zielt auf die Entsiegelung dauerhaft nicht mehr genutzter Flächen ab, die wieder in den Naturhaushalt integriert werden sollen. Die Regelung ist jedoch mit Vorbehalten versehen. So dürfte die Fläche nicht dauerhaft genutzt sein und der Anwendungsfall müsste außerhalb von baulichen Anlagen liegen, welche den Vorschriften des Baurechts unterstellt sind. Beispiele für die Anwendung könnten also Verkehrsflächen oder Verkehrsbauwerke sein, die aus rechtlicher Sicht keine baulichen Anlagen sind (UBA 2021). Der Anwendungsbereich ist somit eher klein. Weitere Hürden bestehen darin, dass die Bundesregierung erst eine Entsiegelungsverordnung erlassen und der Bundesrat

dieser zustimmen müsste. Solange keine solche Bundesverordnung vorliegt, könnten jedoch die nach Landesrecht zuständigen Behörden im Einzelfall Anordnungen zur Entsiegelung treffen, sofern die Bedingungen des § 5 (1) BBodSchG erfüllt sind.

Anwendung in der Praxis

UBA (2021) analysiert, dass es bezüglich dieser Regelung so viele Schwierigkeiten bzw. offene Fragen gibt und der Anwendungsbereich durch die Subsidiarität nach dem Baurecht so begrenzt ist, dass eine Anwendung in der aktuellen Form kaum wahrscheinlich ist. Eine Bundesverordnung liegt bislang nicht vor, und es ist kein Fall bekannt, in dem nach § 5 (2) BBodSchG eine Entsiegelungsmaßnahme umgesetzt wurde.

2.4.4. Entsiegelung nach WHG

Inhaltlich zeigt das Wasserrecht sehr viele Verknüpfungen zum Thema Entsiegelung (UBA 2021). Über die europäischen Umweltziele der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) kann das Erfordernis von Entsiegelungsmaßnahmen im Bereich von Gewässerkorridoren begründet werden, z. B. wenn Renaturierungen von Gewässern einschließlich Rückbau von Versiegelungsstrukturen im Gewässer angestrebt werden (UBA 2021). Nach dem Wasserhaushaltsgesetz (WHG § 82) werden für Einzugsgebiete Maßnahmenprogramme aufgestellt, in denen Entsiegelungsvorhaben enthalten sein können. Die Umsetzung liegt letztlich bei den Unteren Wasserbehörden. Die Erhebungen des UBA (2021: 244) verdeutlichen, dass es in der Praxis auch zur Umsetzung von Entsiegelungsmaßnahmen kommt. Je nach Region bzw. Intensität der anthropogenen Veränderung der Gewässer kann dies auch größere Flächen betreffen.

Im Wasserrecht findet sich des Weiteren in § 78d (3) WHG ein Entsiegelungsgebot, welches für festgesetzte Hochwasserentstehungsgebiete vorgibt, „[...] zur Vermeidung oder Verringerung von Gefahren durch Hochwasser, das natürliche Wasserversickerungs- und Wasser-rückhaltevermögen des Bodens zu erhalten oder zu verbessern, insbesondere durch die Entsiegelung von Böden [...]“. Es handelt sich allerdings nicht um Gebote, die per Verfügung ohne Weiteres umsetzbar sind (UBA 2021: 254). Vielmehr ist das Entsiegelungsgebot laut UBA (2021) als Appell zu verstehen, welcher mit der Bereitstellung von Fördermitteln flankiert werden sollte.

2.4.5. Weitere fachliche Aspekte des Boden- und Grundwasserschutzes

Bodenschutzrecht und Wasserrecht finden grundsätzlich nebeneinander Anwendung. Dies gilt insbesondere, wenn Stoffe durch den Boden in Gewässer gelangen können. Eine zentrale Schnittstelle, die auch für das Thema Entsiegelung besonders wichtig ist, liegt beim Schutz des Grundwassers.

Zentrales Anliegen des Bodenschutzes ist der Erhalt und die Wiederherstellung der Bodenfunktionen (§ 1 BBodSchG). Mit Blick auf das Grundwasser steht die Funktion als Abbau-,

Ausgleichs- und Aufbaumedium für stoffliche Einwirkungen auf Grund der Filter-, Puffer- und Stoffumwandlungseigenschaften, insbesondere zum Schutz des Grundwassers im Fokus (§ 2 (2) BBodSchG). Anspruch bei einer Entsiegelungsmaßnahme muss also sein, diese Funktion nach Abschluss der Arbeiten so herzustellen, dass keine Gewässerverunreinigungen entstehen.

Daraus folgt zum einen der Bedarf nach einer hinreichenden Planung der Entsiegelungsmaßnahme (Kap. 3), zum anderen kann auch der Bedarf nach einer stofflichen Untersuchung und Bewertung des Bodenmaterials des bei der Entsiegelung herzustellenden Bodens bestehen, um direkte negative Auswirkungen auf Menschen sowie auf das Grundwasser auszuschließen. Das Bodenschutzrecht sieht hierfür die Betrachtung von Wirkungspfaden (darunter Wirkungspfad Boden – Grundwasser) vor. Hinweise zu stofflichen Anforderungen an Bodenmaterial zum Aufbau einer durchwurzelbaren Bodenschicht gemäß BBodSchV enthält Kapitel 3.

Ziel einer Entsiegelung ist üblicherweise auch, dass Niederschlagswasser in den Boden infiltrieren und versickern kann (Kap. 2, BASEDOW et al. 2021). Niederschlagswasser soll ortsnah versickert, verrieselt bzw. direkt oder über eine Kanalisation ohne Vermischung mit Schmutzwasser in ein Gewässer eingeleitet werden, soweit dem weder wasserrechtliche noch sonstige öffentlich-rechtliche Vorschriften noch wasserwirtschaftliche Belange entgegenstehen (§ 55 (2) WHG). Dabei wird der Boden zur Ableitung des Niederschlagswassers in Anspruch genommen, z. B. auch wenn das von umliegenden Flächen oder Dächern aufgefangene Wasser zwecks Versickerung auf den Boden geleitet wird. Hier stellt der Boden also die sogenannte Bodenpassage dar (LABO & LAWA 2016, DWA 2007). Da von Gebäuden oder Flächen je nach Beschaffenheit und Nutzungsintensität Schadstoffe (z. B. Kupfer, Zink, Blei, PAK) mit dem Wasser transportiert werden können, ist hier auf Boden und Wasser zu achten. Böden können grundsätzlich durch Rückhalte-, Umwandlungs- und Abbauprozesse zu einer Minderung oder Verzögerung der Schadstoffkonzentration bzw. -fracht im Sickerwasser führen (LABO 2024). Gleichzeitig ist aber eine Anreicherung der Schadstoffe im Boden zu vermeiden (DWA 2005, LABO & LAWA 2016, UBA 2020). Ziel ist die Vermeidung der Entstehung einer nachteiligen bzw. schädlichen Bodenveränderung.

Informationen zur Niederschlagswasserbewirtschaftung und damit z. B. zur Versickerung von Niederschlagswasser können bei den zuständigen Unteren Wasserbehörden sowie ggf. bei den kommunalen Entwässerungsbetrieben eingeholt werden. Eine schadlose Versickerung von Niederschlagswasser ist häufig ohne Erlaubnis möglich (WHG § 46 bzw. Niedersächsisches Wassergesetz NWG § 86 (1)).

2.4.6. Entsiegelung nach Klimarecht

Das Bundes-Klimaanpassungsgesetz (KAnG) beinhaltet in § 8 (3) ein umfassendes Berücksichtigungsgebot für Behörden und andere Träger öffentlicher Aufgaben. Das bedeutet, dass bei allen Planungen das Ziel der Klimaanpassung und damit auch die konkret in Absatz 3 genannte Entsiegelung fachübergreifend zu berücksichtigen sind (ZKA 2024).

KAnG § 8 (3) – Berücksichtigungsgebot

Träger öffentlicher Aufgaben sollen darauf hinwirken, dass bereits versiegelte Böden, deren Versiegelung dauerhaft nicht mehr für die Nutzung der Böden notwendig ist, im Rahmen von Maßnahmen in ihrem Verantwortungsbereich in den natürlichen Funktionen des Bodens nach § 2 Abs. 2 Nr. 1 des Bundes-Bodenschutzgesetzes, soweit dies erforderlich und zumutbar ist, wiederhergestellt und entsiegelt werden.

In Niedersachsen wurde, ebenfalls im Kontext der Klimaanpassung, im Niedersächsischen Klimagesetz die Pflicht zur Erstellung eines Entsiegelungskatasters auf kommunaler Ebene verankert (NKlimaG § 19, Kap. 1.1). Insgesamt bietet die erforderliche Klimaanpassung eine umfangreiche Argumentationsgrundlage für Entsiegelungsmaßnahmen. Dies verdeutlicht insbesondere die Studie des UBA (2021), welche als Kernbotschaft herausarbeitet: „Trotz räumlich heterogener Möglichkeiten und Prioritäten qualifizieren sich Entsiegelungsmaßnahmen und die Wiederherstellung von Bodenfunktionen als sehr breit anwendbare, sofort und dauerhaft wirksame Maßnahme zur Anpassung an viele Folgen des Klimawandels, insbesondere in Städten, mit zusätzlichen Mehrwerten für weitere kommunale Entwicklungsziele und die umgebende Region. [...]“ (UBA 2021: 321).

3.

VORGEHENSWEISE BEI DER UMSETZUNG



Schwerer Maschineneinsatz bei der Entsiegelung eines ehemaligen Militärgeländes.

3. Vorgehensweise bei der Umsetzung von Entsiegelungsmaßnahmen

Um einen allgemeinen Ablauf für Entsiegelungsprojekte darzustellen, kann das in Abbildung 25 gezeigte Schema als Orientierungshilfe dienen. Es bietet eine flexible Grundlage, die je nach Projektbedarf angepasst werden kann. Das Schema umfasst sechs Phasen, die von der Konzeption über die Objektplanung bis hin zur Umsetzung reichen und eine grobe Übersicht über mögliche Arbeitsschritte bieten. Da sich die rechtlichen und örtlichen Rahmenbedingungen einer umzusetzenden Maßnahme einzelfallbezogen stark unterscheiden, sind allgemeine Informationen zum Planungs- und Genehmigungsprozess im dargestellten Schema (Abb. 25) bewusst ausgelassen. Wie in Kapitel 2.4 verdeutlicht, kann die Grundlage für Entsiegelungsmaßnahmen in unterschiedlichen Rechtsbereichen liegen. Alle möglichen Varianten abzudecken, ist für diesen Leitfaden nicht zielführend. Aber natürlich sind mögliche Genehmigungsprozesse oder Auflagen in Plänen relevant. So können Anforderungen an Entsiegelungsmaßnahmen in Genehmigungsunterlagen enthalten (Nebenbestimmungen) oder fachliche Ansprüche hinterlegt sein, die dann in die detaillierteren Planungen zu integrieren sind.

Die vorgeschlagene Strukturierung in Abbildung 25 soll dazu beitragen, frühzeitig Herausforderungen einer Maßnahme zu identifizieren und idealerweise Probleme proaktiv zu lösen, um Verzögerungen in der Ausführung zu minimieren. Dabei ist es im Einzelfall nicht immer zwingend nötig, alle genannten Arbeitsschritte durchzuführen. Diesbezüglich entscheidend sind u. a. folgende flächenspezifische Rahmenbedingungen:

- Entsiegelungsumfang (Größe der Fläche, Vollentsiegelung oder Teilentsiegelung),
- angestrebtes Ziel bzw. angestrebte Nachnutzung,
- Ausmaß und Ausführung der Versiegelung (baulicher Aufwand),
- Art und ggf. Belastung der Versiegelungsmaterialien und des umgebenden Bodensubstrats (Eignung zur Entsiegelung, Verwertung, Entsorgung),
- etwaiger Schutzstatus (z. B. Beanspruchung besonders schutzwürdiger oder empfindlicher Böden als Baustelleneinrichtungsfläche, Baudenkmäler, schutzwürdige Baumbestände oder Vegetationsflächen).

In der Praxis weit verbreitet ist auch die Strukturierung von Entsiegelungsmaßnahmen in Planungsabschnitte, häufig untergliedert in Leistungsphasen nach HOAI¹⁰. Darin werden die Inhalte von Planungs-, Vergabe- und Bauüberwachungsleistungen geregelt und eine Orientierung für deren Vergütung gegeben. Für ausführliche Informationen zu diesen Themen wird auf die HOAI verwiesen. Die Inhalte des hier gezeigten Schemas können den einzelnen Leistungsphasen zugeordnet werden.

¹⁰ Honorarordnung für Architekten und Ingenieure,
https://www.gesetze-im-internet.de/hoai_2013/.

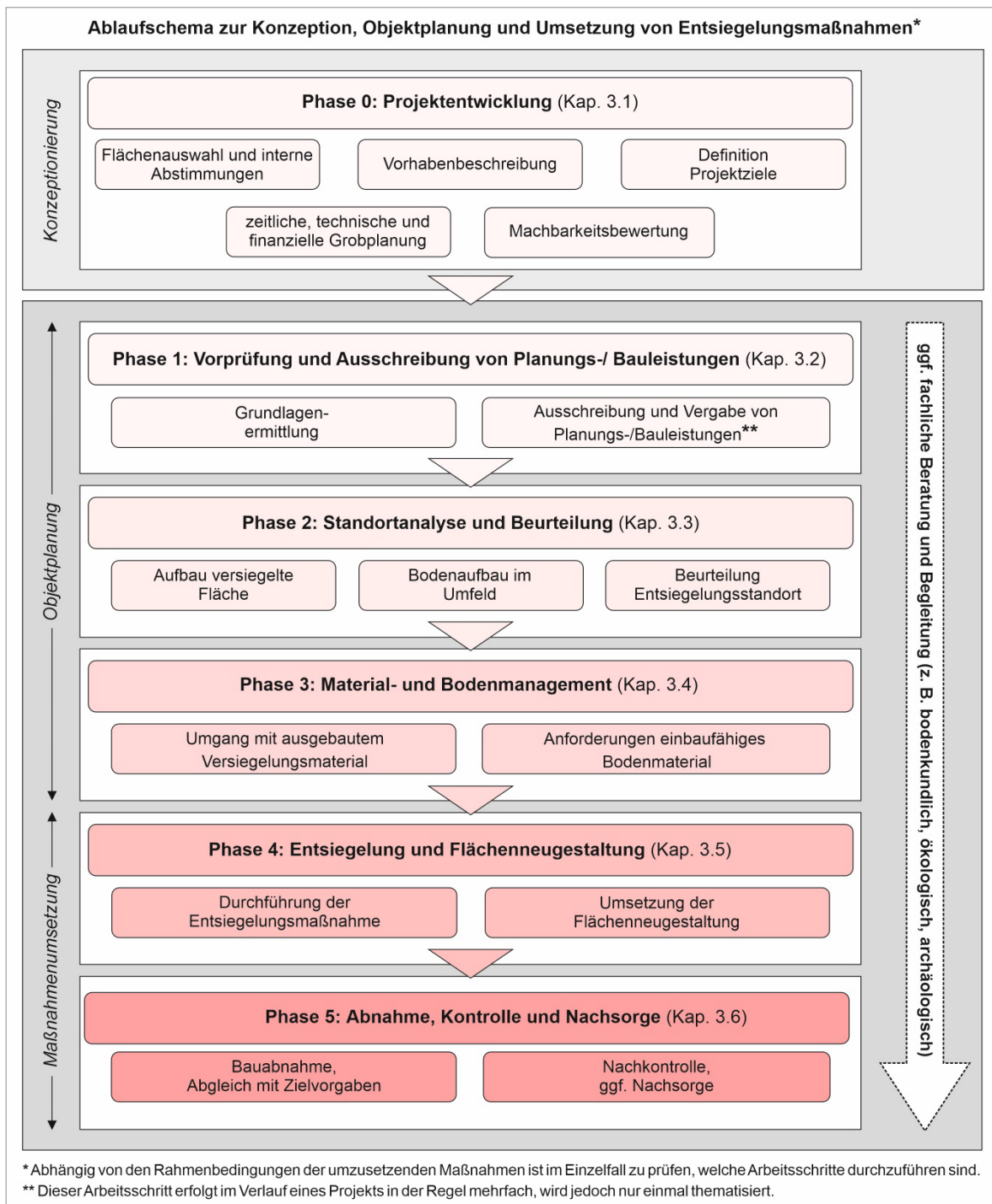


Abb. 25: Phasenmodell für Entsiegelungsmaßnahmen (in Anlehnung an Ablaufschema in SENSTADTUMWELT (2014)).

Warum verdient der Boden besondere Beachtung bei Entsiegelungsmaßnahmen?

Erfolg oder Misserfolg einer Entsiegelungsmaßnahme hängen stark vom Umgang mit dem Boden und der Wiederherstellung der durch ihn bereitgestellten natürlichen Bodenfunktionen ab (Kap. 2.1). Ein unsachgemäßer Umgang z. B. bei der Bodenumlagerung, das Einbringen von ungeeignetem Bodenmaterial, Stoffeinträge oder übermäßige mechanische Belastungen reduzieren die natürlichen Bodenfunktionen. Dadurch kann das Erreichen von Projektzielen, wie z. B. die ausreichende Sicker- und Speicherkapazität des Bodens bei Starkregen, die Verbesserung des lokalen Wasserhaushalts oder die Verringerung von Hitzebelastung und Lufttrockenheit, gefährdet werden.

Dessen ungeachtet wird dem Boden in der Praxis bislang meist zu wenig Beachtung geschenkt. Eine Möglichkeit, hier gegenzusteuern, bietet eine Bodenkundliche Baubegleitung (BBB), die insbesondere bei größeren Vorhaben über die gesamte Laufzeit der Entsiegelungsmaßnahme empfohlen wird. Bei großflächigen Maßnahmen, die eine durchwurzelbare Bodenschicht auf mehr als 3.000 m² beanspruchen, kann für eine Zulassung des Vorhabens aufgrund dessen eine BBB ausdrücklich verlangt werden (BBodSchV nach § 4 Abs. 5). Bei kleineren Entsiegelungsmaßnahmen ist eine BBB nicht in jedem Fall zwingend notwendig. Erfahrungsgemäß empfiehlt es sich jedoch auch in diesen Fällen, den Bauprozess regelmäßig zu begleiten, um auf einen möglichst schonenden Umgang mit dem Schutzgut Boden hinzuwirken und dadurch ein möglichst positives Ergebnis zu erzielen. Hinweise für den behördlichen Vollzug zu diesem Thema bietet der GeoBericht 28 (HAMMERSCHMIDT & STADTMANN 2019).

Die Berücksichtigung des Bodenschutzes bei Entsiegelungs- und anderen Baumaßnahmen verbessert nicht nur die Qualität und das Ergebnis der Arbeiten, sondern hilft auch, Kosten zu vermeiden. Diese entstehen beispielsweise für umfangreiche Rekultivierungsmaßnahmen, Schadensgutachten oder mögliche Sanierungen. Zudem fördert eine bodenschonende Bauweise eine positive Außenwirkung des Projekts und kann dadurch dazu beitragen, Konflikten mit Anwohnern oder Grundstückseigentümern vorzubeugen (FELDWISCH 2024).

3.1. Phase 0 – Projektentwicklung

Kurz gesagt: In der Projektentwicklung werden, unter Beteiligung wesentlicher Akteure und der Nutzung von Vorinformationen, die angestrebten Projektziele festgelegt und die Grundlage für die nachfolgende Objektplanung und Umsetzung geschaffen.

Im Rahmen der Projektentwicklung werden zentrale Themen des angestrebten Projekts bearbeitet. Das Ziel dieser konzeptionellen Phase besteht darin, alle erforderlichen Vorinformatio-

nen zu sammeln, um eine fundierte Entscheidung über die Durchführung der Maßnahme zu treffen. Für eine angestrebte Maßnahme werden im Rahmen der Projektentwicklung die angestrebten Ziele festgelegt, die Verantwortlichkeiten für den weiteren Projektverlauf definiert und mögliche Entwurfsvarianten erstellt. Durch die Projektentwicklung wird folglich die Basis gelegt, an der sich der weitere Planungsprozess orientiert. Folgende projektspezifische Inhalte werden üblicherweise betrachtet:

- Flächenauswahl und interne Abstimmungen,
- Beschreibung und Begründung des geplanten Vorhabens,
- Definition von Projektzielen,

- zeitliche, technische und finanzielle Grobplanung,
- Machbarkeits- und Wirtschaftlichkeitsbewertung.

3.1.1. Flächenauswahl und interne Abstimmungen

Eine mögliche Grundlage für die Auswahl von Entsiegelungsflächen stellt das Niedersächsische Entsiegelungskataster dar (Kap. 1), in dem Entsiegelungspotenziale angezeigt werden. Sofern verfügbar, sollten auch kommunale Entsiegelungskonzepte genutzt werden, in die bereits viel Wissen eingeflossen ist. Sie können die konkrete Flächenauswahl deutlich erleichtern, da wesentliche kommunale Informationen (z. B. Ausschlussbereiche für Entsiegelungsmaßnahmen, Flächenverfügbarkeit) in der Regel in ihrer Erstellung berücksichtigt wurden. Außerdem sind kommunale Informationen und Kartenwerke, z. B. Flächennutzungsplan oder Bebauungspläne, zu bestehenden Grünstrukturen und potenziellen Vernetzungsmöglichkeiten, zur Hitzebelastung, zu bestehenden Frischluftleitbahnen, auch Starkregengefährdungskarten, wichtige Grundlagen, die bei der Flächenauswahl berücksichtigt werden sollten. In diesem Zusammenhang ist es gängige Praxis, dass sich die zuständigen Fachbereiche (z. B. Planung, Umwelt, Bau) frühzeitig intern abstimmen, um mögliche Hindernisse einer avisierten Maßnahme zu erkennen. Dies hilft dabei, möglichst positive Effekte zu erzielen und eventuelle Mehrkosten zu vermeiden, die aufgrund der Nichtbeachtung relevanter Anliegen andernfalls entstehen könnten. Wichtige Hinweise und Empfehlungen aus planerischer und bautechnischer Sicht sowie Verweise auf entsprechende Richtlinien sind u. a. BASEDOW et al. (2021, Kap. 4.3.1ff.) zu entnehmen.

Darüber hinaus besteht bei vielen Baumaßnahmen, auch wenn nicht primär als Entsiegelungsmaßnahme geplant, häufig die Gelegenheit, mit geringem zusätzlichem Aufwand auch Entsiegelungsmaßnahmen umzusetzen (window of opportunity, z. B. bei ohnehin notwendigen Straßenbaumaßnahmen). Besonders wichtig ist es dabei, dass potenzielle Möglichkeiten zur Entsiegelung im Planungsprozess von Anfang an sorgfältig geprüft werden (Sensibilisierung für das Thema Entsiegelung), selbst wenn andere Sachzwänge eine Umsetzung letztendlich verhindern.

3.1.2. Vorhabenbeschreibung

Die Vorhabenbeschreibung skizziert und rechtfertigt die geplante Maßnahme. Dabei ist es entscheidend, die Zielsetzungen und Erwartungen des geplanten Entsiegelungsprojekts zu klären. In Gebieten mit geringerem Nutzungsdruck und vielen versiegelten Flächen (z. B. Stadtrandlagen) können andere Schwerpunkte gesetzt werden (z. B. Rekultivierung und Renaturierung), als beispielsweise in hochverdichteten Innenstädten (z. B. Verbesserung des Lokalklimas, des lokalen Wasserhaushalts und der Aufenthaltsqualität). Die Vorhabenbeschreibung ist wesentliche Grundlage für die Festlegung von Entsiegelungszielen (Kap. 3.1.3).

Ebenfalls zu klären ist die Frage, ob und wie eine umzusetzende Entsiegelungsmaßnahme langfristig erhalten und gesichert werden kann. Das Ziel sollte dabei sein, eine erneute Versiegelung zu vermeiden, sodass temporäre Entsiegelungen die Ausnahme bleiben. Zur dauerhaften Sicherung einer Entsiegelungsmaßnahme gibt es verschiedene rechtliche Möglichkeiten. Eine Sicherung entsprechender Flächen kann über formelle Planwerke erfolgen, z. B. im Flächennutzungsplan (FNP) und in Bebauungsplänen (BBP). Umgesetzte Entsiegelungsmaßnahmen auf Privatgrundstücken können auch durch öffentlich-rechtliche Verträge (z. B. städtebauliche Verträge, Kap. 2.4.2) oder durch Grundbucheinträge gesichert werden (SENSTADTUMWELT 2014, UBA 2021). Zudem kann bei durch öffentliche Fördermittel unterstützten Maßnahmen der langfristige Erhalt durch entsprechende Zweckbindungsfristen in den Förderrichtlinien sichergestellt werden.

3.1.3. Definition von Projektzielen

Wie in Kapitel 2.3 dargestellt, zielen Entsiegelungsmaßnahmen darauf ab, natürliche Funktionen vollständig oder teilweise wiederherzustellen, nicht zuletzt, um daran gekoppelte Ökosystemleistungen (z. B. Wasserspeicherung, Klimaregulierung) zu fördern. Entsiegelung ist für viele kommunale Akteure positiv, deren aktive Projektbeteiligung die Effekte einer Maßnahme ggf. noch verstärken kann. Für fachliche und rechtliche Begründungen eines geplanten Vorhabens wird auf Kapitel 2 verwiesen.

Für das geplante Vorhaben (Kap. 3.1.2) sind übergeordnete Ziele zu definieren, ohne dabei

zwingend sämtliche Detailfragen zu klären. Bereits in dieser frühen Phase des Projekts sollte jedoch beachtet werden, dass für das Erreichen der Ziele bestimmte Bodeneigenschaften erforderlich sind. Tabelle 11 gibt einen Überblick über mögliche Nachnutzungen einer Entsiegelung und Ansprüche, denen ein entsiegelter und rekultivierter Boden diesbezüglich genügen muss. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass die positiven Auswirkungen, die durch eine

Entsiegelungsmaßnahme erzielt werden sollen, gegenüber den Nutzungsanforderungen sowie etwaigen Belangen des Wasser- und Bodenschutzes, des Abfallrechts, des Natur- und Artenschutzes, des Baurechts und des Denkmalschutzes abgewogen und geprüft werden (Kap. 2.4). Eine Gefährdung anderer Schutzgüter (z. B. Grundwasser oder Fließgewässer) oder Konflikte mit der angestrebten Nutzung gilt es zu vermeiden.

Tab. 11: Ausgewählte Ziele möglicher Nachnutzungen einer Entsiegelungsmaßnahme und Ansprüche, die diesbezüglich an den entsiegelten Boden gestellt werden.

Ziele oder geplante Nutzungen	Ausgewählte Ziele der Nachnutzung	Ansprüche an den entsiegelten Boden
Grün-, Park- und Erholungsflächen, Naherholung	<ul style="list-style-type: none"> • Reduzierung bioklimatischer Belastungsfaktoren (z. B. Hitze, Luftschadstoffe), • Wasserrückhalt und -bereitstellung, • Filter und Puffer für Schadstoffe, • Schaffung von Erholungsräumen. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bereitstellung von Kühlfunktionen, • Ausgleichskörper im Wasserhaushalt/ Wasserspeichervermögen, • Filterpotenzial und Puffervermögen.
Naturschutz/ Landschaftspflege	<ul style="list-style-type: none"> • Vernetzung von Schutzgebieten, • Schaffung von Lebensräumen, • Förderung der Biodiversität, • Erhalt der Kultur-/Naturlandschaft. 	<ul style="list-style-type: none"> • Rückgewinnung des Bodens mit seinen Funktionen im Naturhaushalt, • standorttypische Eigenschaften, • Biotopentwicklungspotenzial.
Klimaschutz/ Klimaanpassung	<ul style="list-style-type: none"> • möglichst geringer Temperaturanstieg, • Kohlenstoffspeicherung, • Starkregenvorsorge/Hochwasserschutz, • Wasserrückhalt und -bereitstellung, • Reduzierung bioklimatischer Belastungsfaktoren (z. B. Hitze, Luftschadstoffe). 	<ul style="list-style-type: none"> • humoser Oberboden, • Durchwurzelbarkeit, • aktives Bodenleben, • Ausgleichskörper im Wasserhaushalt/ Wasserspeichervermögen, • Bereitstellung von Kühlfunktion.
Landwirtschaft	<ul style="list-style-type: none"> • Produktion landwirtschaftlicher Erzeugnisse. 	<ul style="list-style-type: none"> • natürliche Bodenfruchtbarkeit, • Nährstoffspeichervermögen, • Ausgleichskörper im Wasserhaushalt/ Wasserspeichervermögen, • Durchwurzelbarkeit.
Forstwirtschaft	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung von klimaangepassten, produktiven, verjüngungsfähigen und vitalen Wäldern, • Holzproduktion. 	<ul style="list-style-type: none"> • natürliche Bodenfruchtbarkeit, • Nährstoffspeichervermögen, • Ausgleichskörper im Wasserhaushalt/ Wasserspeichervermögen, • Durchwurzelbarkeit.
Wasserwirtschaft	<ul style="list-style-type: none"> • Wasserversorgung Bevölkerung, Landwirtschaft, Gewerbe und Industrie in hinreichender Qualität und Quantität, • Grundwasserschutz. 	<ul style="list-style-type: none"> • Filterpotenzial und Puffervermögen, • Ausgleichskörper im Wasserhaushalt/ Wasserspeichervermögen, • hinreichende Versickerungsfähigkeit.

3.1.4. Zeitliche, technische und finanzielle Grobplanung

Ebenfalls in der Projektentwicklung zu klärende Punkte sind die zeitlichen Vorstellungen, technische Rahmenbedingungen und eine Kostenkalkulation für das jeweilige Vorhaben. Es geht in diesem Stadium noch nicht darum, ein genaues Fertigstellungsdatum, die detaillierte Bauausführung oder die exakten Kosten festzulegen, sondern vielmehr darum, einen groben Projektrahmen abzustecken (z. B. Meilensteine

festzulegen). Erste technische Überlegungen (einschließlich erster zeichnerischer Entwurfsvarianten) werden ebenfalls in dieser Phase erstellt und können eine Grundlage für die detailliertere Objektplanung sein. Eine erste Kostenschätzung kann beispielsweise mittels der Arbeitshilfe „Orientierende Kostenschätzungen für Entsiegelungsmaßnahmen“ (SEN-MVKU 2025) überschlägig vorgenommen werden (Tab. 12). Diese entspricht nicht einer Kostenschätzung gemäß DIN 276, erlaubt aber eine grobe Kalkulation.

Tab. 12: Orientierender Kostenansatz (netto) für Entsiegelungsmaßnahmen, gegliedert nach Versiegelungstypen (SEN-MVKU 2025). Grundlage der Berechnungen sind Erfahrungswerte, bei denen die Randbedingungen der Maßnahme nicht über ein besonderes, unübliches Maß hinausgehen. Kosten für eine mögliche Altlastenuntersuchung und -sanierung oder den Biotopschutz sind in der Kalkulation nicht erfasst und können zu deutlich höheren Ausgaben führen.

Versiegelungstyp	überschlägige Nettokosten / m ² [EUR] (einschl. Flächenbefestigung, Deckschicht, Boden, unterirdische Anlagen, ggf. Bauten)
Außenanlagen	
(1) ungebundene Befestigungen z. B. Schotter-, Splitt- oder Kiesflächen ohne Einfassung, keine Entwässerungsleitungen	4,97
(2) Nebenflächen z. B. Parkplatz mit Befestigungen und Einfassung aus Asphalt, Beton oder Pflastersteinen, keine Entwässerungsleitungen	58,03
(3) Straßen z. B. Straßenflächen mit Befestigungen aus Asphalt oder Beton, mit Entwässerungsanlagen	74,61
(4) Gleise stillgelegte Gleise ohne Rückbau von Tragschichten, Entwässerungsanlagen, Kabelanlagen	13,40
(5) Mauern, Einfassungen z. B. massive Grundstückseinfassungen aus Mauerwerk oder Beton mit Pfeilern, Pfosten, Toren und Fundamenten	70,99
(6) Gräben z. B. Grabenbefestigungen aus Beton als Sohl- und Böschungsbefestigung	75,96
Gebäude	
(7) Nebengebäude z. B. eingeschossige, nicht unterkellerte Garage mit Kaltdach, kein Medienanschluss (außer Strom), < 5 m Firsthöhe	178,57
(8) eingeschossige Gebäude z. B. einfach unterkellertes Reihenhaus mit Warmdach und Medienanschlüssen, < 8 m Firsthöhe	290,33
(9) mehrgeschossige Gebäude z. B. einfach unterkellerte Wohngebäude mit Warmdach und Medienanschlüssen, < 22 m Firsthöhe	722,62
(10) Sonderbauten z. B. Bunker, Fabrikhallen, Hochhäuser, Kläranlagen, Kraftwerke	Einzelfallbetrachtung nötig

3.1.5. Machbarkeitsbewertung

Anhand der vorliegenden Informationen wird im Rahmen einer Machbarkeitsbewertung geprüft, inwieweit die Ziele und Möglichkeiten miteinander vereinbar sind. Das Ziel ist es, eine fundierte Grundlage für die Entscheidung über die Realisierbarkeit eines Projektes zu schaffen oder auch zwischen unterschiedlichen Optionen priorisieren zu können. Zentral für die Bewertung einer Maßnahme sind dabei folgende Kriterien:

- organisatorische Umsetzbarkeit,
- wirtschaftliche Machbarkeit (z. B. Kostenrahmen, Finanzierung),
- technische Machbarkeit,
- Ressourcen und Verfügbarkeit (z. B. Personal, Maschinen, Flächen, Material und Zeit),
- zeitliche Umsetzung.

3.2. Phase 1 – Vorprüfung und Ausschreibung von Planungs-/Bauleistungen

Kurz gesagt: Ziel dieser Phase ist es, relevante Detailinformationen einer potenziellen Entsiegelungsfläche zu erfassen und die Vergabe von Planungs- und Bauleistungen zu organisieren.

3.2.1. Grundlagenermittlung

Ergänzend zu den Informationen der Projektentwicklung (Phase 0, Kap. 3.1) wird im Rahmen der Vorprüfung die Eignung einer Fläche geprüft, und hierfür relevante Grundlageninformationen werden zusammengestellt (Kap. 2.3.4, Tab. 9). Dabei wird in der Regel auf bereits vorliegende Bestandsinformationen zurückgegriffen. Die Überprüfung umfasst beispielsweise einen möglichen Kampfmittelverdacht, die Recherche nach Leitungsverläufen, eine mögliche Lage von Bau- und Kunstdenkmälern oder archäologischer Fundstellen im entsprechenden Gebiet, eine Rekonstruktion der Nutzungshistorie, die Recherchen zur vorliegenden Art der Versiegelung oder auch die Durchsicht bereits existierender Gutachten (z. B. Baugrundgutachten). Die Prüftiefe hängt

auch hier von den Zielen und damit vom Einzelfall ab. Teil der Grundlagenermittlung sind üblicherweise fachliche Stellungnahmen verschiedener Fachbereiche und Behörden, die seitens der Objektplanung eingeholt werden. Dabei kann auch auf Planungsentwürfe der Projektentwicklung (Kap. 3.1.4) zurückgegriffen werden.

Sofern am Entsiegelungsstandort ein Baum- bzw. Vegetationsbestand etabliert ist, sollte im Rahmen der Vorprüfung beurteilt werden, inwiefern dieser erhaltungsfähig und -würdig ist (DIN 18920, FGSV 2023) oder die Fläche eine besondere Relevanz für Natur- oder Artenschutz aufweist. Diesbezüglich kann u. a. das kommunale Baumkataster als Informationsgrundlage genutzt werden. Möglicherweise müssen auch Bauzeitenregelungen zur Vermeidung von erheblichen baubedingten Schädigungen bzw. Störungen von Tieren (z. B. Brutzeiten von Vögeln) eingeplant werden (RUNGE et al. 2021).

In stark versiegelten Räumen sind ggf. stoffliche Bodenbelastungen zu erwarten, aus denen sich potenzielle Grundwassergefährdungen ableiten (Kap. 2.2.2). Es ist darum zu prüfen, ob am potenziellen Entsiegelungsstandort ein Anfangsverdacht auf schädliche Bodenveränderungen bzw. altlastenverdächtige Flächen besteht und ggf. geringe Grundwasserflurabstände vorliegen. Teil der Vorprüfung muss folglich die Einsichtnahme in das Altlastenkataster der jeweiligen Unteren Bodenschutzbehörden und, sofern vorhanden, entsprechende bodenkundliche/hydrogeologische Kartenwerke oder Gutachten sein. Ebenfalls ist zu prüfen, ob die zu entsiegelnde Fläche sich im Bereich einer Schadstofffahne befindet und ob diese hydraulisch saniert wird. Durch die Entsiegelung ist es möglich, dass es zu (hydro-)chemischen Milieuveränderungen kommt, die das Schadstoffverhalten in der wasserungesättigten und -gesättigten Bodenzone verändern. Eine Entsiegelung im Bereich einer Schadstofffahne im Grundwasser kann durch die versickernden Niederschlagswässer einen Einfluss auf den Fahnenverlauf nehmen und somit die Wirksamkeit der hydraulischen Sanierung beeinflussen. Anhaltspunkte für die zu erwartenden stofflichen Einträge an dem Standort können aus der aktuellen Nutzung (Tab. 13) sowie aus der historischen Nutzung (Altlastenkataster) abgeleitet werden. Für die Einschätzung der abflussliefernden Flächen im Hinblick auf die zu erwartende Belastung

sind darüber hinaus auch DWA (2024) und DWA (2007) empfehlenswerte Grundlagen.

Das Schadstoffinventar und das abgeleitete Schadstoffemissionspotenzial können aufzeigen, ob eine Entsiegelung zu möglichen Gefährdungen für Boden und Grundwasser führen kann, da Niederschlagswasser auf den entsiegelten Flächen versickern und Schadstoffe mobilisiert und transportiert werden können. Aus dieser Betrachtung kann unter Umständen auch die Bewertung hervorgehen, dass ein Standort

nicht für die Umsetzung einer Entsiegelungsmaßnahme geeignet ist bzw. dass für eine Entsiegelung das Rückhaltepotenzial gegenüber Schadstoffen entsprechend erhöht werden muss (GUNREBEN & SCHNEIDER 2001). Im Allgemeinen empfiehlt es sich, altlastenverdächtige Flächen für Entsiegelungsmaßnahmen zu meiden. Soll eine Maßnahme dennoch zur Umsetzung kommen, sind weiterführende Untersuchungen anzustellen, um eine Gefährdung durch die Ausbreitung von Schadstoffen, z. B. ins Grundwasser, auszuschließen (Kap. 3.3.1).

Tab. 13: Schadstoffemissionspotenzial in Abhängigkeit der aktuellen Bodennutzung (MOHS & MEINERS 1994, GUNREBEN & SCHNEIDER 2001), erweitert.

Bodennutzung	Schadstoffemissionspotenzial in der Regel
<ul style="list-style-type: none"> • begangene Flächen, Bürgersteige, Fußgängerzonen, Höfe von Wohnbauflächen oder Flächen besonderer baulicher Prägung, gering frequentierte Flächen für ruhenden Verkehr: Park- und Stellplätze, • gelegentliche oder dauerhafte Nutzung durch PKW mit geringem LKW-Anteil, • Wohngebiete. 	sehr gering bis gering
<ul style="list-style-type: none"> • mittel bis stark frequentierte Flächen für ruhenden Verkehr: gelegentliche oder dauerhafte Nutzung durch PKW mit hohem LKW-Anteil, • gering frequentierte Flächen für fließenden Verkehr: Anlieger- und Erschließungsstraßen. 	mittel
<ul style="list-style-type: none"> • mittel bis stark frequentierte Flächen für fließenden Verkehr: inner- und überörtliche Straßen mit Verkehrsmengen > 1.000 Kfz/h und Geschwindigkeiten > 50 km/h, • Gewerbe- und Industriegebiete. 	hoch bis sehr hoch

3.2.2. Ausschreibungen und Vergabe von Planungs-/Bauleistungen

Neben der Grundlagenermittlung und der Einholung von fachlichen Stellungnahmen ist die Ausschreibung und Vergabe von verschiedenen Planungs- und Bauleistungen ein essenzieller Schritt in der konkreten Objektplanung, der im Projektverlauf in der Regel mehrfach erfolgt. Zunächst werden Voruntersuchungen zur Ermittlung des Status Quo ausgeschrieben und vergeben (z. B. Kampfmitteluntersuchungen, archäologische Prospektionen, Baugrunduntersuchungen). Diese Untersuchungen sind erforderlich, um die Ausführung der Entsiegelungsmaßnahme im Detail zu planen (Ausführungsplanung). Sie dienen als Grundlage für das Erstellen von Leistungsbeschreibungen und Leistungsverzeichnissen für weiterführende Planungs- und Bauleistungen.

Insbesondere bei flächenhaft in den Boden eingreifenden Bauvorhaben kann es sinnvoll sein, eine fachliche Beratung und Begleitung (Bodenkundliche Baubegleitung) auszuschreiben, um eine Vermeidung oder Minderung von Bodenbeeinträchtigungen zu erreichen (Kap. 3). Zentrale Aufgabe ist im ersten Schritt die Erstellung eines Bodenschutzkonzeptes (DIN 19639). Darin werden u. a. die innerhalb der Baumaßnahme vorkommenden Böden bewertet und die Gefahr von schädlichen Bodenveränderungen durch die geplante Baumaßnahme dargestellt. Außerdem beschreibt das Bodenschutzkonzept den bestmöglichen bodenschonenden Umgang mit den jeweiligen Böden (HAMMERSCHMIDT & STADTMANN 2019). Zu einem späteren Zeitpunkt erfolgt die Vergabe bezüglich der Projektumsetzung (z. B. Architekten-/Ingenieursleistungen, gartenlandschaftsbauliche Arbeiten), in der das Bodenschutzkonzept bzw. Inhalte des Bodenschutzkonzeptes, sofern vorhanden, Berücksichtigung finden sollten.

Berücksichtigung der Bodenschutzbelange in der Ausschreibung von Leistungen

Es ist erforderlich, vorgesehene Bodenschutzmaßnahmen im Rahmen der Ausschreibung zu berücksichtigen, u. a. durch eine entsprechend detaillierte Aufführung im Leistungsverzeichnis und der Baubeschreibung. Dies ist wichtig, damit sich alle Beteiligten über die Anforderungen im Klaren sind und Nachträge, Baubehinderungen und sonstige Probleme im Bauablauf vermieden werden. Liegt ein Bodenschutzkonzept vor, können die darin beschriebenen Inhalte in die Ausschreibung aufgenommen werden.

Im Folgenden werden Beispiele aufgeführt, die je nach Art des Vorhabens bei der Ausschreibung berücksichtigt werden sollten. Einen diesem Textblock zugrundeliegenden Überblick zum Thema bietet FELDWISCH (2024).

- Benennung der relevanten DIN-Normen zum Bodenschutz beim Bauen, vor allem DIN 19639, DIN 18915, DIN 19731. Wurden im Rahmen einer Genehmigung für die Umsetzung relevante Nebenbestimmungen erlassen, sollten sie in die Ausschreibungsunterlagen aufgenommen werden. Wichtig ist darüber hinaus aber die detaillierte Beschreibung der konkreten Anforderungen.
- Ein Baustelleneinrichtungsplan, der neben bautechnischen Belangen auch die bodenschutzfachlichen Anforderungen (z. B. genügend Platz zur getrennten Lagerung von Bodenmaterial) berücksichtigt.
- Beschreibung der erforderlichen Bodenarbeiten, ggf. die Auswahl bodenschonender Maschinen und der Zwischenlagerung von Bodenmaterial in separaten Bodenmieten nach dem getrennten Aushub von Ober- und Unterboden bzw. mehrerer Unterbodenschichten.
- Bodenschonendes Arbeiten bei entsprechenden Bodenfeuchten: Entweder durch eine Beschränkung der Bodenarbeiten auf geeignete Konsistenzbereiche (vgl. o. g. DIN-Normen) oder durch den Ausschluss feuchter Wintermonate (Bauzeitenregelung). Wird letztere Variante gewählt, können sich Baufirmen darauf einstellen, und gleichzeitig kann eine Ausnahmeregelung aufgenommen werden, z. B. für unerwartet trockene Bedingungen. Die rechtzeitige Vorbereitung befestigter Flächen vor Beginn der feuchten Witterung aufzunehmen, ist ebenfalls wichtig.
- Die Gestaltung von Baustelleneinrichtungsflächen und Baustraßen sollte mit den entsprechenden Anforderungen aufgeführt werden.
- Die bodenschonende Rückverfüllung von Böden, die als durchwurzelbare Bodenschicht mit Pflanzenbewuchs dienen sollen (Kap. 3.5.2).
- Die Rekultivierung von temporär beanspruchten Grünflächen, z. B. durch eine fachgerechte Bodenlockerung, für die passende Gerätschaften vorgesehen werden müssten (FELDWISCH 2024: 55).
- Die Zwischenbewirtschaftung von neu aufgebauten Böden, um Bodenstruktur und Porensystem zu etablieren und sie so zu stabilisieren.
- Den Umgang mit überschüssigem Bodenmaterial, entsprechend den rechtlichen und fachlichen Anforderungen (Kap. 3.4).

3.3. Phase 2 – Standortanalyse und Beurteilung

Kurz gesagt: Durch die Standortanalyse wird der Ausgangszustand der zu entsiegelnden Fläche erfasst. Ergänzt durch die Informationen der Vorprüfung erfolgt die Beurteilung des Standorts für die Konkretisierung von Planungsentwürfen.

Bei der Standortanalyse wird der Ausgangszustand der zu entsiegelnden Fläche und deren Umgebung dokumentiert. Ergänzend zu den Grundlageninformationen der Vorprüfung (Phase 1) sind in der Regel Vor-Ort-Untersuchungen notwendig (z. B. Baugrunduntersuchungen, Kampfmittelerkundung, ggf. archäologische Untersuchung oder faunistische Kartierungen), die üblicherweise von beauftragten Fachfirmen durchgeführt werden.

Sehr bedeutsam im Kontext der Klimaanpassung, in der Baupraxis aber vielfach unzureichend berücksichtigt (Abb. 26), ist der Schutz vorhandener Altbaum- und Vegetationsbestände. Es vergehen teils viele Jahre, bis sich Bäume oder andere Vegetationsbestände von etwaigen Beschädigungen erholt haben und vergleichbare Ökosystemleistungen (z. B. Lebensraum, Beschattung, Verdunstung) erbringen können. Auch dauerhafte Ausfälle sind möglich. Dementsprechend sind die Vegetationsstrukturen am Standort zu dokumentieren, damit geeignete Schutzmaßnahmen geplant werden können (Kap. 3.5). Relevante Richtlinien und Normen zum Schutz von Bäumen und Vegetationsbeständen bei Baumaßnahmen sind FGSV (2023) und DIN 18920, die u. a. Daten zum Kronendurchmesser, zum Zustand von Krone, Stamm, Stammfuß und Wurzelbereich sowie eine Beurteilung der Vitalität bzw. Schadstufe vorsehen.

Bei der Entsiegelung werden, je nach Dimension der Maßnahme, größere Mengen an Bodenmaterial und Baustoffen bewegt. Diese müssen ggf. zwischengelagert werden und können teilweise nicht vor Ort verbleiben. Für die Umsetzung der Entsiegelungsmaßnahme sind zudem Baumaschinen notwendig, die Arbeits- und Bewegungsflächen benötigen. Im Rahmen der Standortanalyse sind in diesem Kontext folgende zentrale Fragen zu beantworten:

- Wie ist der Aufbau des Untergrundes der zu entsiegelnden Fläche?
- Liegen stoffliche Belastungen vor?
- Welche Volumina an Bodenmaterial und Baustoffen sind zu erwarten? Können sie im Boden verbleiben, verwertet werden oder sind sie zu entsorgen?
- Wie kann ein möglichst schonender Umgang mit Grund und Boden sowie weiteren Schutzgütern erreicht werden?

Als Grundlage für diese Untersuchungen gibt es bestehende Regelungen und Normen, die in Kapitel 3.4 benannt werden. Die Regelwerke geben auch die Grundlage zur Untersuchung der Materialien vor und bieten Hinweise zu Umgang und Verwertung. Da viele Entsiegelungsflächen anschließend Bodenfunktionen erfüllen und Vegetation tragen sollen, ist bodenschonendes Arbeiten bei (Landschafts-)Bauarbeiten essenziell, um den gewünschten Entsiegelungseffekt zu erreichen (Kap. 3.5).

3.3.1. Aufbau versiegelte Fläche

Schichtabfolge/Horizontierung

Um bestehende Bodenversiegelungen vollständig entfernen zu können, ist die Tiefe und die Intensität des Versiegelungseingriffs am Standort durch Gelände- und ergänzende Laboruntersuchungen zu ermitteln. Üblicherweise werden hierfür Rammsondierungen oder Kleinbohrungen durchgeführt. Folgende Leitfragen sind in diesem Zusammenhang zu beantworten (GUNREBEN & SCHNEIDER 2001, verändert):

- Wurden bei der Versiegelung unterschiedliche Belagsschichten verwendet (z. B. Deckschicht, Tragschicht, Unterbau)?
- Welche Substrate sind für die Versiegelungsdecke eingebaut worden und sind diese ggf. mit Schadstoffen belastet?
- In welcher Tiefe unter der Geländeoberkante steht der natürliche Boden an? Gibt es Hinweise auf deutliche Verdichtungen dieses Bodens?
- Ist unterhalb der Versiegelung noch eine vollständig natürliche Horizontabfolge vorhanden oder sind nur noch Profilreste erhalten? Fehlt ggf. der humose Oberboden?

- Wie ist der anstehende Boden hinsichtlich seiner Versickerungsfähigkeit zu bewerten?

Aspekte, die bei der Untersuchung berücksichtigt werden müssen, ergeben sich aus der BBodSchV (§ 19 Abs. 2–5). Bei der Probenahme ist sicherzustellen, dass die zu untersuchenden Böden oder Materialien, dem Ziel der Untersuchung entsprechend, hinreichend repräsentativ erfasst werden und die jeweiligen Standortverhältnisse ausreichend widerspiegeln. Gleiches gilt auch für den Untersuchungs- und Beprobungsumfang an einem konkreten Standort. Letztlich muss gewährleistet sein, dass der Bodenaufbau des jeweiligen Standorts bis zum Ort der Beurteilung hinreichend erfasst wird, was für den Wirkungspfad Boden – Grundwasser den Übergangsbereich von der wasserungesättigten zur wassergesättigten Bodenzone umfasst. Je nach Einzelfall können deshalb variierende Erfassungstiefen erforderlich sein.

Boden- und Grundwasserverhältnisse

Eine Entsiegelung verändert den Wasserhaushalt des Bodens und damit ggf. auch den Grundwasserstand, da mehr Wasser in den Boden infiltrieren kann (Abb. 5). Um die Auswirkungen dieser Veränderung und den notwendigen Schutz des Grundwassers abschätzen zu können, ist eine Betrachtung der Wasserverhältnisse am jeweiligen Standort erforderlich. In Anlehnung an SENSTADTUMWELT (2014) und BUG et al. (2022) wird empfohlen, die folgenden Parameter zu ermitteln:

- Geländehöhe,
- Grundwasserstand,
- Stauwassereinfluss,
- Vorflutverhältnisse (Oberflächenwasser- und Grundwasserabströmung),
- Infiltrationsleistung.

¹¹ Im Rahmen der orientierenden Untersuchung kann die Prognose der Stoffkonzentrationen am Ort der Beurteilung mittels Transportbetrachtung verbal-argumentativ oder mittels analytischer oder numerischer Berechnungsmethoden (z. B. ALTEX-1D) erfolgen (LABO 2024).

¹² Vertiefte weitere Untersuchung zur abschließenden Gefährdungsabschätzung, die insbesondere der Feststellung von Menge und räumlicher Verteilung von Schadstoffen, ihrer mobilen oder mobilisierbaren Anteile, ihrer

Schadstoffgehalte

Da eine Schadstoffbelastung des zu entsiegelnden Standorts aus der Vorprüfung allein (Kap. 3.2) nicht vollends ausgeschlossen werden kann, ist dieser auf mögliche Schadstoffanreicherungen hin zu untersuchen. Leitet sich daraus ein entsprechender Verdacht auf eine schädliche Bodenveränderung ab, so muss diesem im Rahmen einer orientierenden Untersuchung (§ 12 BBodSchV)¹¹ und unter Umständen einer Detailuntersuchung (§ 13 BBodSchV)¹² nachgegangen werden. Hierbei ist die Zahl und die räumliche Anordnung der Probennahmestellen und Materialuntersuchungen so zu planen, dass eine räumliche Abgrenzung von Schadstoffanreicherungen erfolgen, ein Belastungsverdacht geklärt und eine mögliche Gefährdung von Schutzgütern in Hinblick auf die derzeitige Nutzung und die geplante Nachnutzung bewertet werden kann (BBodSchV § 10, § 19, DIN 19731).

Bestätigt sich der Verdacht auf eine schädliche Bodenveränderung oder Altlast, so ist abzuwägen, ob eine Maßnahme dennoch umgesetzt werden soll. Wird daran trotz bestehender Schadstoffbelastungen festgehalten, kann es notwendig sein, schadstoffspezifische Sickerwasserprognosen¹³ vorzunehmen (LABO 2024). Letztlich muss sichergestellt werden, dass keine relevanten Schadstoffeinträge in tiefere Bodenschichten oder das Grundwasser stattfinden können und auch für Menschen und ggf. Nutzpflanzen eine Gefährdung ausgeschlossen werden kann.

3.3.2. Bodenaufbau im Umfeld

Als Referenz empfiehlt es sich, auch die bodenkundlichen Verhältnisse im Umfeld der zu entsiegelnden Fläche zu erfassen. Dies ermöglicht für die zu entsiegelnden Standorte die Festlegung von Wiederherstellungszielen (Kap. 3.3) und dient darüber hinaus ggf. auch der Verortung bodenkundlich besonders schutzwürdiger

Ausbreitungsmöglichkeiten in Boden, Gewässer und Luft sowie der Möglichkeit ihrer Aufnahme durch Menschen, Tiere und Pflanzen dient (LABO 2024).

¹³ Darunter wird die Abschätzung der zu erwartenden Schadstoffeinträge über das Sickerwasser in das Grundwasser verstanden.

bzw. auch empfindlicher Flächen. Als Grundlage können landesweite Kartenwerke (z. B. Bodenkarte BK50) oder Bohrungen genutzt werden, die kostenfrei auf dem NIBIS® Kartenserver (<https://nibis.lbeg.de/cardomap3/>) zur Verfügung stehen. Die Bodenkarten zeigen im Siedlungsbereich die natürlicherweise zu erwartenden Bodenverhältnisse an. Aufbauend darauf empfiehlt es sich, eine Konkretisierung durch Bodenansprachen im Gelände gemäß bodenkundlicher Kartieranleitung und der bodenkundlichen Auswertungsmethoden des LBEG (BUG et al. 2020) durchzuführen. Folgende Parameter sind für eine bodenkundliche Charakterisierung des Bodenaufbaus mindestens zu erheben:

- Horizonte und Substratschichten, Mächtigkeit Ober- und Unterboden sowie bei geschichteten Unterböden die Mächtigkeit von Schichten mit unterschiedlichen Eigenschaften,
- Feinbodenart (mittels Fingerprobe),
- Grobbodenart und Grobbodenanteil,
- Lagerungs- bzw. Packungsdichte,
- gesättigte Wasserleitfähigkeit (nach BUG et al. 2020),
- Humusgehalt (Gehalt an organischer Substanz),
- Carbonatgehalt (Kalkgehalt) mittels 10%iger Salzsäure (HCl),
- pH-Wert,
- Einfluss von Grundwasser und Staunässe (Vernässungsgrad/-stufe),
- Bodentyp und Informationen zum Ausgangssubstrat der Bodenbildung (z. B. Parabraunerde aus Löss).

Sollte sich aus der Bodenkartierung ein Verdacht auf stoffliche Belastungen des Bodenmaterials ergeben, sind weiterführende Untersuchungen erforderlich (Kap. 3.3.1).

3.3.3. Beurteilung Entsiegelungsstandort

Die in Phase 1 und 2 erzielten Ergebnisse sind unter Beteiligung der involvierten Belange abschließend zu beurteilen. Wenn bei der Beurteilung durch die beteiligten Stellen eine erhöhte Schutzwürdigkeit eines Belanges festgestellt wird, rechtfertigt dies ggf. einen Mehraufwand

bei der Entsiegelungsmaßnahme. Letztlich muss eingeschätzt werden,

- ob durch die Umsetzung einer Entsiegelungsmaßnahme Gefährdungen hervorgerufen werden können,
- ob dies grundsätzlich gegen eine Entsiegelung spricht,
- welche Sicherungsmaßnahmen bzw. Auflagen im Zuge der jeweiligen Entsiegelungsmaßnahme getroffen werden sollten, um eine Beeinträchtigung der Schutzgüter zu vermeiden,
- wie eine Entsiegelungsmaßnahme auszugestalten ist, um die definierten Ziele (Kap. 3.1.3) zu erreichen.

3.4. Phase 3 – Material- und Bodenmanagement

Kurz gesagt: Das bei der Entsiegelung anfallende Material sollte möglichst orts-nah wiederverwertet werden. Damit ein entsiegelter Standort langfristig natürliche Bodenfunktionen erbringen kann, sollte das einzubauende Bodenmaterial klar definierte Kriterien erfüllen, die sich aus den jeweiligen Projektzielen ergeben.

Im Zuge der Entsiegelung wird das versiegelnde Material (z. B. Deckschicht, Tragschicht, Unterbau) in der Regel ausgehoben und anschließend im Zuge der Rekultivierung ein Bodenaufbau (i. d. R. eine durchwurzelbare Bodenschicht gemäß BBodSchV) hergestellt. Grundlage für eine gelungene Umsetzung ist ein intelligentes Material- und Bodenmanagement und damit eine frühzeitige Auseinandersetzung mit dem im Rahmen der Maßnahme anfallenden und benötigten (Boden-)Material. Teil der Planung ist eine Vorerkundung von Boden/Baugrund (Phase 2, Kap. 3.3), für die §§ 18–19 BBodSchV einen Rahmen bieten. So kann eine Kalkulation der Mengen, die anfallen bzw. benötigt werden, vorgenommen werden (THIEME-HACK & FLOSS 2024). Gebiets- oder zeitweise kann die Beschaffung geeigneten Bodenmaterials aufgrund einer Angebotsknappheit erschwert sein.

Das Bodenmanagement im Rahmen von Entsiegelungsmaßnahmen ist bedeutsam, da folgende Punkte miteinander in Einklang gebracht werden müssen:

- leistungsfähige Böden als Grundlage der entstehenden, in Phase 0 definierten Nutzung (Kap. 3.1.3) aufbauen, um einen möglichst positiven Effekt der Entsiegelungsmaßnahme zu erzielen,
- stoffliche Anforderungen an das Material einhalten, um Boden- und Grundwasserschutz zu gewährleisten,
- ressourcenschonender Umgang mit Bodenmaterial und Ersatzbaustoffen,
 - Bei Baumaßnahmen anfallender unbelasteter Bodenaushub ist ein wertvolles und endliches Gut und sollte keinesfalls als Abfall entsorgt, sondern möglichst hochwertig verwertet werden (DIN 19731). Ein Kreislauf, bei dem anfallendes Bodenmaterial aus Vorhaben mit möglichst kurzen Transportwegen hochwertig verwertet wird, sollte das Ziel sein. „Dies kann z. B. durch einen direkten Einbau oder Aufbringung von Bodenmaterial oder Baggergut im Rahmen derselben Baumaßnahme erfolgen. Ist dies nicht möglich, sind hochwertige Verwertungsmöglichkeiten, gegebenenfalls nach Aufbereitung, zu prüfen und durchzuführen“ (DIN 19731).
- möglichst kosteneffiziente Umsetzung des Vorhabens.
 - Auch weil die Entsorgung von Material kostenintensiv ist, sollte ein Fokus darauf gelegt werden, eine Wiederverwendung von Material vor Ort zu ermöglichen bzw. Material aus anderen Baumaßnahmen im Bereich der Kommune zu verwerten.

Herausforderungen sind dabei oftmals:

- kurze Zeitfenster von Baumaßnahmen und somit Zeitdruck bei der Beschaffung von geeignetem Bodenmaterial zur Rekultivierung,
- im urbanen Raum nicht selten vorliegende Belastungen von Bodenmaterial, das somit

ggf. nicht uneingeschränkt außerhalb der Baumaßnahme verwertet werden kann,

- knappe Lagerflächen, was oftmals zur Entsorgung eigentlich hochwertigen Bodenmaterials führt. Einige Kommunen reagieren hierauf mit der Einrichtung von Bodenerlagerflächen oder Bodenaufbereitungsanlagen (THIEME-HACK & FLOSS 2024). Auch „Bodenbörsen“ werden teilweise etabliert.

3.4.1. Umgang mit ausgebautem Versiegelungsmaterial

Mit dem ausgebauten Material (z. B. Straßenauflage, Bauschutt, Bodenmaterial) ist gemäß relevanter Verordnungen zu verfahren (BBodSchV, ErsatzbaustoffV, DIN 19731, LABO 2023). Eine möglichst ortsnahe Wiederverwertung/-verwendung des ausgebauten technischen Materials, z. B. in technischen Bauwerken, ist dabei anzustreben. Kann es nicht in der vorliegenden Form wiederverwendet oder nach Aufbereitung an der Baustelle direkt verwertet werden, ist es z. B. Aufbereitungsanlagen zuzuführen.

3.4.2. Anforderungen an einbaufähiges Bodenmaterial

Die neu hergestellte Bodenschichtung muss entsprechende Anforderungen der zukünftigen Nutzung erfüllen, ebenso wie an die Verwertung von Bodenmaterial bzw. mineralischen Ersatzbaustoffen Anforderungen gestellt werden. Diese sind im Wesentlichen durch die Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) und die Ersatzbaustoffverordnung (ErsatzbaustoffV) geregelt. Die LABO¹⁴ hat hierzu eine Vollzugshilfe erarbeitet, die für Entscheidungsprozesse herangezogen werden sollte (LABO 2023). Fachliche Fragen sollten in der Planung und Ausführung mit der Unteren Bodenschutzbehörde geklärt werden, ggf. unter Mitwirkung der Bodenkundlichen Baubegleitung (BBB).

¹⁴ Die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz, kurz LABO, ist ein Arbeitsgremium der Umweltminister-

konferenz (UMK), in dem die für den Bodenschutz zuständigen obersten Behörden der Länder und des Bundes zusammenarbeiten.

DIN 19731 – Bodenbeschaffenheit: Verwertung von Bodenmaterial und Baggergut

Die Norm zielt darauf ab, Abfall so weit wie möglich zu vermeiden und die Verwertung von Materialien (z. B. Bodenmaterial) so zu gestalten, dass keine nachteiligen Veränderungen für Mensch und Umwelt entstehen (z. B. bezüglich Boden- und Gewässerschutz), einer Anreicherung von Schadstoffen in der Umwelt entgegengewirkt wird und Bodenfunktionen nachhaltig gesichert, verbessert oder wiederhergestellt werden.

Ausdrücklich sind dabei auch Entsiegelungsstandorte genannt, auf denen eine Rekultivierung und damit eine Wiederherstellung der Bodenfunktionen vorgenommen wird. Die DIN 19731 ist damit neben der DIN 18915 und der DIN 19639 eine zentrale Norm für die Umsetzung von Entsiegelungsvorhaben.

Das Bodenmaterial, das für die Wiederherstellung einer durchwurzelbaren Bodenschicht gemäß BBodSchV verwendet werden soll, muss nach DIN 19731 geeignet sein, langfristig natürliche Bodenfunktionen zu erbringen. Zusätzlich sollten die Eigenschaften des Bodenmaterials den natürlichen Gegebenheiten des Einsatzortes möglichst entsprechen (ähnliche Beschaffenheit, „Gleiches zu Gleichem“, vgl. auch DIN 18915 Anhang A, DIN 19639 Anhang B). Auch andere Zielsetzungen (Kap. 3.1.3) können eine Abweichung begründen: „Wird eine Rückführung der Fläche zu einem naturnahen Zustand als Rekultivierungsziel festgelegt, kann der Boden nach den Ansprüchen eines Zielbiotops aufgebaut werden. In diesem Fall empfiehlt sich die frühzeitige Einbindung der zuständigen Bodenschutzbehörde bzw. Naturschutzbehörde“ (DIN 19731).

Bei angeliefertem Bodenmaterial sind die projektbezogenen Anforderungen vorab klar zu benennen. Maßgeblich zu berücksichtigen sind die folgenden Parameter:

physikalische Kennwerte:

- Fein- und Grobbodenart,
- Humusgehalt,
- nutzbare Feldkapazität (nFK) und Luftkapazität (LK) (nach BUG et al. 2020),
- mineralische Fremdbestandteile (z. B. Bauschutt) und Störstoffe (z. B. Holz, Kunststoffe),
- Vernässungsmerkmale (Nassbleichung und Rostfleckigkeit),

chemische Kennwerte:

- pH-Wert,
- Carbonatgehalt (Kalkgehalt),
- Nachweis oder Einschätzung nach Vorerkundung gemäß DIN 19731, dass keine natürlichen oder anthropogenen Stoffanreicherungen vorliegen (DIN 19731, 5.3).

Je nach Projektzielen und Anforderungen können weitere Angaben z. B. zur Frostsicherheit und -empfindlichkeit, Anteil von keimfähigen Pflanzenteilen, Nährstoffgehalten oder Salzgehalt in Form eines Steckbriefs eingefordert werden. Erfahrungsgemäß empfiehlt es sich, angeliefertes Bodenmaterial stichprobenhaft Kontrollprüfungen zu unterziehen und eine entsprechende Dokumentation einzufordern, da die Chargen sehr unterschiedlich sein können. Auch die Belange des Klimaschutzes sind bei der Beschaffung von einbaufähigem Bodenmaterial zu berücksichtigen. Um gesetzte Klimaschutzziele erreichen zu können, sollte der Einsatz von Torfsubstraten, u. a. im Garten- und Landschaftsbau, so weit wie möglich vermieden und alternative Substrate gewählt werden (BMEL 2022). Neben der Freisetzung des klimawirksamen CO₂ kann der Abbau organischer Substrate (wie Torf oder auch Kompost) zudem zu relevanten Setzungen des Bodens führen (BURKHARDT et al. 2022b). Zudem können auch hydrophobe Eigenschaften des trockenen organischen Materials nachteilig auf Filterwirkung und Wasserspeicherung wirken.

Exkurs: Substrate für den Einsatz im urbanen Raum?

An urbane Böden werden sehr viele unterschiedliche Anforderungen gestellt. In intensiv genutzten und durch Schadstoffeinträge geprägten Räumen (z. B. an Straßen) soll auf ihnen hochwertiges Stadtgrün wachsen und Niederschlagswasser möglichst schnell versickern, um Starkniederschläge abzufangen (BURKHARDT et al. 2022a). Zudem müssen sie z. T. sehr stabil gegenüber Tritt und Befahrung oder sogar überbaubar sein. Es können also Situationen vorliegen, in denen natürliche Böden diese Anforderungen nicht erfüllen können oder die Bodenverhältnisse so ungünstig sind, dass keine Entwicklung der Vegetation zu erwarten ist (DIN 18916). An diesen Stellen werden spezielle Substrate eingesetzt, die häufig gemäß landschaftsbaulicher Empfehlungen erstellt werden (FLL 2010).

Boden oder Substrat?

BURKHARDT et al. (2022b) unterscheiden zwischen Böden, die natürlich entstanden sind, und Substraten, die technisch hergestellte Produkte für bestimmte Anwendungen sind und auch künstliche Bestandteile oder Zuschlagsstoffe wie Pflanzkohle oder auch Recyclingbaustoffe enthalten können (BURKHARDT 2022a, FLL 2010). Nicht überbaubare Pflanzsubstrate, die beispielsweise bei der Anlage von offenen Pflanzgruben verwendet werden können, übernehmen jedoch nach Herstellung der durchwurzelbaren Bodenschicht Bodenfunktionen und erfahren eine Bodenentwicklung, sodass sie i. d. R. als Böden zu betrachten sind (z. B. Deposole nach AG BODEN 2024). Entsprechend gilt auch für sie die BBodSchV, in Fällen mit zugesetzten Bodenhilfsstoffen oder Kompost können weitere Regelwerke (z. B. DüV, BioAbfV) relevant sein. Überbaubare Pflanzsubstrate, die als durchwurzelbarer Unterbau einer Verkehrsstragschicht verwendet werden (z. B. Baumgruben unter Verkehrsflächen), sind Teil eines technischen Bauwerks und damit im Regelungsbereich der ErsatzbaustoffV.

Eigenschaften und Leistungen der Substrate

Nach BURKHARDT et al. (2022a,b) werden vor allem Pflanzsubstrate, die in erster Linie als Pflanzenstandort dienen sollen, und Adsorbersubstrate, welche insbesondere zur Filterung von stärker belasteten Straßenabwässern angewendet werden, eingesetzt.

Im Bereich von Verkehrsflächen werden bei Entsiegelungen häufig Pflanzgruben für Bäume angelegt oder andere begrünbare Flächenbeläge etabliert. Die Größe und das verwendete Füllsubstrat orientieren sich in der Regel an bestehenden Richtlinien (DIN 18916, FLL 2010, FLL 2018). Pflanzgrube und Substrat bilden dabei gleichzeitig temporären Wasserspeicher und Wurzelraum, die teilweise mit technischen Anlagen gekoppelt werden (BURKHARDT et al. 2022a).

Insgesamt weisen viele der angebotenen Substrate ähnliche Zusammensetzungen auf. BURKHARDT et al. (2022b) verdeutlichen, dass in der Praxis schwierig zu kontrollieren ist, ob die angelieferten Substrate die diversen angegebenen Eigenschaften im eingebauten Zustand tatsächlich erfüllen. Es wird empfohlen, für Ausschreibungen klar kontrollierbare Parameter auszuwählen und die FLL-Empfehlungen lediglich zur Orientierung zu nutzen (BURKHARDT et al. 2022a,b).

Fortsetzung: Substrate für den Einsatz im urbanen Raum?

Die in den FLL-Empfehlungen (2010) aufgeführten Pflanzsubstrate, aber auch weitere Lösungen wie beispielsweise das sogenannte „Stockholm Substrat“ sind insgesamt durch sandige Feinbodenarten und hohe Grobbodenanteile gekennzeichnet. Dadurch kann Niederschlagswasser schnell versickern und Luft in den Boden eindringen. Gleichzeitig weisen diese Substrate aufgrund der grobkörnigen Textur keine guten Wasserspeichereigenschaften auf (BURKHARDT et al. 2022b). Dies kann dazu führen, dass die Vegetation, insbesondere in jungen Wuchsstadien mit gering ausgeprägtem Wurzelsystem, im Sommer erheblichem Trockenstress ausgesetzt ist, der die Vitalität mindern und auch zum Absterben führen kann (SCHÜTT et al. 2022). Vegetation unter Trockenstress erbringt zudem nur eine unzureichende Kühlleistung, da die Transpiration gemindert ist. Daraus ergibt sich ggf. ein erhöhter Bewässerungsbedarf, der sich im Zuge der klimatischen Veränderungen des 21. Jahrhunderts zukünftig noch weiter erhöhen wird.

Deshalb ist zu prüfen, ob eine angebotene Substratmischung tatsächlich den gewünschten Leistungen und Zielen entspricht. Soll in Bereichen mit im Umfeld erhaltenen natürlichen Böden entsiegelt und ein Bodenaufbau hergestellt werden, sollte der Aufbau eines standorttypischen Bodens das Ziel sein (DIN 19731, DIN 18916, FLL 2010). Dies gilt insbesondere, wenn die Böden hohe Wasserspeicherkapazitäten aufweisen und ggf. Bodenmaterial aus anderen Maßnahmen zur Verfügung steht.

3.5. Phase 4 – Entsiegelung und Flächenneugestaltung

Kurz gesagt: Die Entsiegelung und Flächenneugestaltung sollte möglichst schonend umgesetzt werden, und es sind entsprechende Empfehlungen in der Bauvorbereitung, Bauausführung und Nachsorge zu beachten.

3.5.1. Durchführung der Entsiegelungsmaßnahme

Entsiegelungsmaßnahmen sind Bauvorhaben, und es gelten dementsprechende Normen und Verordnungen des Bauwesens. Im Unterschied zu klassischen Baumaßnahmen, bei dem der Boden vor allem als ein tragfähiger Baugrund fungieren soll, geht es bei der Entsiegelung vorrangig jedoch darum, Böden funktional zu regenerieren und dadurch die daran gekoppelten Ökosystemleistungen wiederherzustellen (Kap. 2.3.2). Dementsprechend ist ein möglichst

schonender Umgang mit dem Boden von zentraler Bedeutung für die erfolgreiche Umsetzung von Entsiegelungsmaßnahmen. Als Herausforderung ist zu sehen, dass die Bauarbeiten häufig unter beengten Platzverhältnissen stattfinden. Eine frühzeitige Planung von Logistikflächen ist deshalb wichtig, um aus der Not heraus entstehende Probleme zu vermeiden (Kap. 3.2.2).

Zeitlicher Ablauf und die technische Umsetzung von Baumaßnahmen sind üblicherweise in Termin- bzw. Ausführungsplänen festgehalten. Am Beginn der Bauausführung stehen bauvorbereitende Maßnahmen. Dazu gehören die Einrichtung der Baustelle (u. a. Ausweisung der Maßnahmenflächen, Zufahrten, Stell- und Lagerflächen, Baucontainer) und die Abgrenzung und Sicherung von Tabuzonen (z. B. Abzäunung von Flächen die nicht befahren oder belastet werden dürfen). Temporäre Flächenbefestigungen sind insbesondere für Lager- und Stellflächen oder Transportwege vorzunehmen (Abb. 26A, B, C). Die zusätzliche Anwendung von lastverteilenden Maßnahmen (z. B. Verlegung von Lastverteilungsplatten) kann im Be-

reich verdichtungsempfindlicher Böden, allgemein bei häufiger Befahrung oder oberhalb von Wurzelbereichen von Bäumen nötig sein.

Ausführliche Empfehlungen zum Schutz von Baum- und Vegetationsbeständen bei Baumaßnahmen sind DIN 18920, FGSV (2023) bzw. ggf. kommunalen Baumschutz-/Gehölzschutzsatzungen zu entnehmen. Sie umfassen u. a. folgende Schutzmaßnahmen:

- Stammummantelungen (Baumschutzmanschetten oder Baumschutzmatten),
- Schutz des Wurzelbereiches (z. B. durch Aussparung, Absaugen bzw. Handschächungen in Wurzelnähe, Abdeckung der Wurzeln mit Strohballen oder die Umwicklung einzelner Wurzeln mit Jute, Nutzung von Wurzelvorhangelementen und Lastverteilungsplatten),
- möglichst grabenlose Verfahren beim Leitungsbau (geschlossene Bauweise),
- Sicherstellung der standortangepassten Wasserversorgung der Bestandsvegetation während der Bauphase, bei der sowohl eine Vernässung als auch ein Wassermangel vermieden wird.



Abb. 26: Beispiele für einen mangelhaften (A und B) und geeigneten (C und D) Schutz von Bäumen und Vegetationsflächen während Baumaßnahmen (Bildrechte: LBEG).

A: Das Abladen von Bauschutt führt zu Bodenverdichtung und teils schadhaften Stoffeinträgen in den Boden.

B: Das Abstellen von Baumaschinen, in diesem Fall mit einem Eigengewicht von ca. 17,5 t, führt ebenfalls zu Bodenverdichtung im sensiblen Wurzelbereich und ist deshalb zu unterlassen.

C: Schutz des Baumbestandes und der Vegetationsfläche durch Abzäunung und Errichtung einer mit Geovlies unterlagerten Baustraße.

D: Fachgerecht montierter Baumschutzkasten zum Stamm- und Wurzelschutz.

Um physikalische und stoffliche Bodenbeeinträchtigungen und daran gekoppelte negative Auswirkungen nach Möglichkeit zu vermeiden, sollten diesbezüglich relevante Normen (DIN 19639, DIN 19731, DIN 18915) sowie baupraktische Hinweise (z. B. BVB 2013) berücksichtigt werden. Einen Leitfaden für den behördlichen Vollzug bietet GeoBericht 28 (HAMMERSCHMIDT & STADTMANN 2019). Der folgende Abschnitt gibt Hinweise und Empfehlungen für einen möglichst bodenschonenden Umgang während der Baumaßnahme.

Vermeidung von Störungen oder Schäden des Bodengefüges

- Auch wenn Bodenverdichtung nicht im eigentlichen Sinne als Versiegelung anzusehen ist (Kap. 2.2.1), so ist ein durch Baufahrzeuge extrem verdichteter Boden ähnlich undurchlässig wie ein versiegelter Boden. Deshalb ist stets ein bodenschonender und maßnahmenangepasster Geräte- und Maschineneinsatz zu beachten, bei dem die mechanische Bodenbelastung möglichst gering ist.
- Humusreiche Böden, Böden mit hohem Ton- und Schluffanteil und nasse Standorte (grund- und staunasse Böden) sind besonders verdichtungsempfindlich. Dementsprechend erfordern Baumaßnah-

men in solchen Gebieten ggf. weiterführende Schutzmaßnahmen (z. B. Lastverteilungsplatten, Nutzung von Baumaschinen mit geringerem Kontaktflächendruck, Bauausführung bei trockener Witterung).

- Die Befahrbarkeit und Bearbeitbarkeit von Böden richtet sich, abhängig von der Bodenfeuchte bzw. Konsistenz, nach DIN 19639 und DIN 19731 (HAMMERSCHMIDT & STADTMANN 2019).
- Die Bodenfeuchte und die Witterungsbedingungen sind bei der Bauausführung zu berücksichtigen und können ggf. auch die Befahrbarkeit und Bearbeitbarkeit von Böden unmöglich machen (temporärer Baustillstand oder Fokus auf andere Bereiche/Arbeiten). Das Risiko hierfür kann deutlich verringert werden, wenn die Maßnahme im Sommer geplant und umgesetzt wird.
- Insbesondere bei größeren Maßnahmen sind Baustraßen, Stellplätze und befestigte Montage- und Lagerplätze einzurichten.
- Das Befahren und Abstellen schwerer Baumaschinen auf nicht dafür vorgesehenen Flächen, beispielsweise auf ungesicherten Grünflächen oder Bodenmieten, ist zu unterlassen (Abb. 26B, 27). Sofern möglich, sollten die Baumaschinen von befestigten Flächen aus arbeiten.



Abb. 27: Beispiele für einen mangelhaften Bodenschutz während Baumaßnahmen (Bildrechte: LBEG).

A: Deutlich sichtbare Fahrspuren auf einer Grünfläche, die ohne Sicherungsmaßnahmen und bei falscher Witterung befahren wurde.

B: Auf einer Bodenmiete ist das Abstellen von Baumaschinen, in diesem Fall mit einem Betriebsgewicht von ca. 16 t, zu unterlassen.

Vermeidung von Vermischung unterschiedlicher Substrate und Schadstoffeinträgen

Die Vermischung von Bodensubstraten und Schadstoffeinträge in den Boden sind zu vermeiden. Folgende Hinweise sollten bei Baumaßnahmen entsprechend Berücksichtigung finden:

- Baubedingte Schadstoffeinträge (flüssig, fest oder gasförmig) in die Umwelt sind zu vermeiden. Typische Quellen, die in diesem Zusammenhang besonders zu beachten sind, stellen Bau- und Bauhilfsstoffe, Treib- und Schmierstoffe, Abfälle (auch Sprüh- und Säge- oder Schleifverlust), Brauchwasser (z. B. aus Sanitäranlagen, Reinigungsvorgängen) und verunreinigtes Niederschlagswasser (z. B. von Verkehrs-, Arbeits-, Lager- und Wartungsflächen) dar (BVB 2013). Indem der Umgang z. B. mit Treib- und Schmierstoffen auf bestimmte befestigte Flächen begrenzt wird, können bereits Probleme vermieden werden.
- Das bei der Entsiegelung anfallende Material (z. B. Straßenaufbruch, Bauschutt, Bodenmaterial) ist getrennt auszubauen, zu lagern und abzutransportieren oder vor Ort zu verwerten (Kap. 3.4.1).
- Bodenmaterial sollte getrennt in Mieten gelagert werden. Für das Bodenmaterial sind maximal zulässige Höhen und Abstände (DIN 19731) zu beachten (Abb. 28A). So ist für humoses Bodenmaterial (z. B. humoser Oberboden) eine Mietenhöhe von höchstens 2 m und für mineralische Unterböden maximal 3 m einzuhalten, damit die Auflast nicht zu hoch wird.
- Unbedeckte Böden (z. B. Bodenmieten) sind vor Erosion zu schützen. Diesbezüglich bieten sich z. B. Begrünungsmaßnahmen an, die sich neben dem Erosionsschutz z. B. auch vorteilhaft auf die Verdunstung oder das Bodenleben auswirken. Insbesondere bei einer Lagerungsdauer von mehr als zwei Monaten ist unmittelbar nach Herstellung der Miete eine Zwischenbegrünung vorzunehmen (DIN 19639).
- Um eine stoffliche Trennung von baurelevanten Materialien und den natürlichen Böden zu gewährleisten, können wasser-durchlässige Trennelemente (z. B. Geotextil oder Geogitter) verlegt werden (Abb. 28B).



Abb. 28: Beispiele für eine mangelhafte Trennung von Böden und Substraten während Baumaßnahmen (Bildrechte: LBEG).

A: In diesem Fall wurden die Mieten zu dicht und zu hoch angelegt. Außerdem wurde das Bodenlager befahren.
B: Fehlende Trennung von baurelevanten Materialien und dem anstehenden Boden (z. B. durch Geovlies), die zu unerwünschten stofflichen Veränderungen der Böden führen können.

3.5.2. Umsetzung der Flächenneugestaltung

Nach Abschluss der Entsiegelungsmaßnahmen ist die beanspruchte Fläche unter Beachtung relevanter Vorgaben (DIN 19639, DIN 18915, DIN 19731) zu rekultivieren. Im Vordergrund steht dabei eine an den Zielen (Kap. 3.1.3) orientierte, bestmögliche Wiederherstellung der natürlichen Bodenfunktionen. Von großer Bedeutung ist diesbezüglich der funktionale Anschluss des aufgetragenen Bodens zum Unterboden und zum tieferen Untergrund. Im Rahmen der Flächenneugestaltung sind insbesondere die folgenden Maßnahmen umzusetzen:

Herstellung einer durchwurzelbaren Bodenschicht

Das gewählte Bodenmaterial (Kap. 3.4.2) wird lagenweise eingebaut. Anders als bei der Vorbereitung eines Baugrundes, ist eine übermäßige Verdichtung zwingend zu vermeiden. In der Praxis hat sich ein lagenweiser Einbau bewährt, bei dem Schichten von 30 bis 40 cm aufgetragen und mit der Baggerschaufel nur ange-drückt werden. Als Zielwert kann die Lagerungs- bzw. Packungsdichte von umliegenden natürlichen Böden gesehen werden (Kap. 3.3.2). Konkret ist darauf zu achten, dass

- wasserstauend wirkende Vorverdichtungen des tieferen Untergrunds vor der

Rekultivierung hinreichend behoben werden (z. B. durch mechanische Lockerung) bzw. Sickerhilfen verbaut werden,

- der Einbau des Bodenmaterials möglichst in einem Arbeitsgang (ohne zwischenzeitliche Befahrung) erfolgt,
- angepasste Maschinen genutzt werden und
- bei trockener Witterung eingebaut wird (BVB 2013).

Zwischenbewirtschaftung

Zur Beseitigung baulich begründeter Verdichtungen und zur Stabilisierung des Bodengefüges ist es grundsätzlich empfehlenswert, nach dem Bodeneinbau übergangsweise zu bepflanzen (Abb. 29, 30) und die neugestaltete Fläche nicht direkt der geplanten Nutzung zuzuführen (BVB 2013). Entsprechende Saatgutmischungen sollten frei von Neophyten sein und Arten mit unterschiedlichen Wurzeltypen, Durchwurzelungsintensitäten und -tiefen enthalten. Empfehlenswert sind gemäß DIN 18915 (Anhang E) besonders Saatgutmischungen mit Luzerne (*Medicago sativa*), Steinklee (*Melilotus officinalis*), Winterweizen (*Triticum aestivum*), Winterroggen (*Secale cereale*), Lupine (*Lupinus spp.*), Senf (*Sinapis alba*), Rübsen (*Brassica rapa*), Kresse (*Lepidium sativum*), Weidelgras (*Lolium multiflorum*), Knäuelgras (*Dactylis glomerata*), Rotschwingel (*Festuca rubra*) und Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea*).



Abb. 29: Zwischenbegrünungsmaßnahmen und Abgrenzungen (Bildrechte: LBEG).

A: Mit Phacelia zwischenbegrüntes Beet, das zu einer angrenzenden Bodenmiete abgegrenzt wurde.

B: Zwischenbegrünte Grünfläche. In der rechten Bildhälfte ist eine gegen unerwünschte Befahrung abgegrenzte Fläche mit frisch aufgetragenem Oberboden zu erkennen.



Abb. 30: Beispiel für fehlende Zwischenbegrünung und Abgrenzung (Bildrechte: LBEG).

A: Maßnahmenfläche nach Rückbau und oberflächlicher Lockerung, allerdings ohne aktive Begrünung und weitere Sicherungsmaßnahmen gegen Befahrung.

B: Dieselbe Fläche mit zeitlichem Abstand. Deutlich zu erkennen sind Fahrspuren und Verdichtungserscheinungen, die auf die Befahrung des Bodens im feuchten Zustand zurückzuführen sind.

3.6. Phase 5 – Abnahme, Kontrolle und Nachsorge

Kurz gesagt: Nach Umsetzung der Bau- und Rekultivierungsmaßnahmen ist das Entsiegelungsergebnis zu dokumentieren, hinsichtlich der Zielvorgaben zu überprüfen und ggf. ein zeitlich gestaffeltes Monitoring (einschließlich Nachsorge) vorzusehen.

3.6.1. Abnahme

Zeitnah nach Abschluss der Maßnahme erfolgt die Abnahme, bei der das Entsiegelungsergebnis beurteilt wird. Dabei sind etwaige Mängel, die z. B. auf die Ausführung der Erdarbeiten zurückzuführen sind, zu dokumentieren und die Möglichkeit einer zeitnahen Nachbesserung zu prüfen. Neben der Abnahme technischer Bauwerke betrifft dies u. a. auch zu erhaltende oder nachgepflanzte Baumbestände und Vegetationsflächen (Kap. 3.2.1). Bodenschutzfachlich sollte bei der Abnahme insbesondere auf folgende Kriterien geachtet werden (BVB 2013):

- baubedingte Verdichtungen und unzureichende Entfernung von Verdichtungen unterhalb der ehemals versiegelten Fläche (Abb. 31),
- Erosionsschäden,
- stoffliche Belastungen oder sonstige Verunreinigungen,
- unzulässige Substratvermischungen oder Einbau unzulässigen Bodenmaterials,
- Vollständigkeit des Ausbaus (sofern vorgesehen), insbesondere auch des Unterbaus der ehemaligen Versiegelung (Abb. 31B).



Abb. 31: Praxisbeispiele (Bildrechte: LBEG).

A: Starke Pfützenbildung im Bereich einer abgeschlossenen Baumaßnahme (Abb. 30), die auf die unsachgemäße Wiederherstellung der durchwurzelbaren Bodenschicht zurückzuführen ist.

B: Beispiel einer unvollständigen Entsiegelungsmaßnahme. Dabei wurde der Oberbau (Pflasterdecke und Tragschicht) bis in eine Tiefe von ca. 30 cm ausgebaut und anschließend mit geeignetem Bodenmaterial aufgefüllt. Die darunterliegende Schottertragschicht (ca. 30 bis 65 cm unter Geländeoberkante) wurde jedoch im Boden belassen, was sich nachteilig z. B. auf die Durchwurzelbarkeit oder Wasserspeicherkapazität auswirkt und entsprechend zu beanstanden ist.

3.6.2. Kontrolle und Nachsorge

Mit zeitlichem Abstand zur Maßnahme empfiehlt sich ggf. eine weitere Nachsorgeuntersuchung. Der Hintergrund ist, dass baubedingte Auswirkungen (z. B. Sackungen oder Minderwuchs gepflanzter Bäume) teilweise erst verzögert erkennbar sind (Abb. 31A). Es gibt keine spezifischen Vorgaben bezüglich des zeitlichen Abstands für Nachsorgeuntersuchungen, daher müssen entsprechende Absprachen projektspezifisch getroffen werden. SENSTADTUMWELT (2014) empfiehlt, abhängig vom Umfang der Entsiegelungsmaßnahme und ggf. geforderten Sanierungsmaßnahmen, Nachsorgeuntersuchungen zur Qualitätssicherung zwei und (optional) fünf Jahre nach Projektabschluss.

4.

FAZIT & AUSBLICK



Entsiegelte Fläche in einem Schutzgebiet.

4. Fazit und Ausblick

Bodenentsiegelung wird derzeit auf verschiedenen Ebenen als wichtige Maßnahme zur Wiederherstellung von Bodenfunktionen diskutiert. Dies unterstreicht die Bedeutung von Entsiegelungsmaßnahmen, insbesondere vor dem Hintergrund der notwendigen Klimaanpassung. Auf europäischer Ebene betonen sowohl die „EU-Bodenstrategie für 2030“ (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2021) als auch der Gesetzesvorschlag für das sogenannte Soil Monitoring Law (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2023), das zentrale Element der EU-Bodenstrategie, die Bedeutung eines Monitorings der Bodenversiegelung und eine entsprechende Förderung von Entsiegelungsmaßnahmen. Auch die EU-Verordnung über die Wiederherstellung der Natur (Nature Restoration Law), als wichtiger Baustein der EU-Biodiversitätsstrategie 2030, kann Impulse zur Entsiegelung von Böden geben. National ist das Thema Entsiegelung seit Langem in unterschiedlichen Fachdisziplinen hinterlegt (Kap. 2.4), wurde aber bislang zu wenig umgesetzt. Die zusätzliche Erwähnung im 2024 in Kraft getretenen Bundes-Klimaanpassungsgesetz (KAnG § 8 (3)) verpflichtet dazu, Entsiegelung bei allen Planungen für Behörden und andere Träger öffentlicher Aufgaben zu berücksichtigen. Auf Landesebene konzentrieren sich die aktuellen Aktivitäten unter anderem auf die Entwicklung von Entsiegelungsstrategien (Brandenburg), die hochauflösende Erfassung versiegelter Flächen (Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen und Hamburg) als Grundlage für die Umsetzung von Entsiegelungsmaßnahmen sowie die Erstellung von Entsiegelungskatastern (Niedersachsen). Mit dem Projekt „Entsiegelungspotenziale in Berlin“ wird dort seit mehr als 10 Jahren die Wiederherstellung von Bodenfunktionen stärker in den Fokus gerückt. Auf kommunaler Ebene sind bereits zunehmende Aktivitäten vorhanden, die auf den übergeordneten Ebenen formulierten Anforderungen zu realisieren. Entsiegelungsprojekte werden umgesetzt und treffen in der Praxis auf unterschiedliche Herausforderungen und Fragestellungen.

Der vorliegende Leitfaden ist ein niedersächsischer Beitrag dazu, Lösungen der Fragestellungen anzubieten, Grundsätze für erfolgreiche Entsiegelungsmaßnahmen zu bieten und diese somit zu fördern. Er bietet eine Zusammenfas-

sung grundlegender Informationen zu den Themen Bodenversiegelung und -entsiegelung, einen Überblick zu relevanten Rechtsgrundlagen und Empfehlungen zur Vorgehensweise bei der Umsetzung von Entsiegelungsmaßnahmen. Daraus ergeben sich folgende zentrale Schlussfolgerungen:

- Bodenversiegelung hat weitreichende, meist negative Konsequenzen für das gesamte Ökosystem. Viele Probleme, wie z. B. der Verlust der Biodiversität, Hochwassergefahren oder überhitzte Städte, hängen direkt mit der Bodenversiegelung zusammen. Deshalb ist eine deutliche Reduzierung der Neuversiegelung notwendig. Zusätzlich muss dort, wo es fachlich sinnvoll ist, auch eine Rückgewinnung von versiegelten Flächen erfolgen. Dies gilt umso mehr angesichts der vielfältigen Herausforderungen, die der Klimawandel mit sich bringt und auf die es sich einzustellen gilt.
- Bodenentsiegelung fördert regulierende Ökosystemleistungen (z. B. Kühlung der Umgebung, Wasserrückhalt in der Landschaft, Speicherung von Treibhausgasen) und kann somit wichtige Beiträge zum Klimaschutz und zur Klimaanpassung leisten. Daher sollten Entsiegelungsaktivitäten deutlich verstärkt werden, um die bestehenden natürlichen Potenziale bestmöglich zu nutzen. Die Reduzierung der Neuversiegelung und Entsiegelung sind damit Teil moderner Stadtentwicklung und Raumplanung.
- Eine strukturierte Planung und fachgerechte Umsetzung ist von entscheidender Bedeutung für den Erfolg von Entsiegelungsmaßnahmen. Dabei müssen viele Belange und Interessen berücksichtigt werden. Wichtig ist der schonende Umgang mit dem Boden und die Wiederherstellung der durch ihn bereitgestellten natürlichen Bodenfunktionen.

Ergänzt wird der vorliegende Teil A des Leitfadens durch einen Teil B. Dieser soll u. a. Möglichkeiten zur Erfassung und Bewertung der Flächenversiegelung in Kommunen (Entsiegelungskataster) und die zu erzielenden Effekte von Entsiegelungsmaßnahmen behandeln sowie Praxisbeispiele aus Niedersachsen präsentieren.

5.

FAQ ENTSIEGELUNG



Stark versiegeltes Schulaußengelände mit großflächigem Entsiegelungspotenzial.

5. Häufig gestellte Fragen (FAQ) im Zusammenhang mit Entsiegelungsmaßnahmen

Das Thema Entsiegelung ist gegenwärtig stark im Fokus. Für die praktische Arbeit ergeben sich viele Fragen sowohl fachlicher als auch organisatorischer Natur. Die folgenden Fragen wurden im Rahmen des vom *Niedersächsischen Kompetenzzentrum Klimawandel (NIKO)* geförderten Projektes *KliBoG* (Klimafolgenanpassung Boden und Grundwasser, Teilprojekt 2) erarbeitet. Sie sind u. a. aus dem Austausch mit niedersächsischen Kommunalvertreter*innen hervorgegangen (z. B. Kommunaler Begleitkreis Entsiegelung). Die Kommentare zu den jeweiligen Fragen sollen Hilfestellungen geben oder mögliche Argumentationslinien aufzeigen. Über die hier aufgeführten FAQ hinaus wird auf der Internetseite des Niedersächsischen Ministeriums für Umwelt, Energie und Klimaschutz eine *FAQ-Sammlung* bereitgestellt, die auch fortgeschrieben wird.

Wer ist in den Kommunen für Entsiegelungsvorhaben zuständig?

Entsiegelung ist eine kommunale Querschnittsaufgabe, und eine allgemeingültige Antwort auf diese Frage ist kaum möglich. Dies ist allein schon dadurch begründet, dass es Unterschiede bei den kommunalen Verwaltungsstrukturen gibt und Entsiegelung im Rahmen unterschiedlichster Vorhaben umgesetzt wird. Eine Abfrage im projektbegleitenden „Begleitkreis Entsiegelung“ sowie weitere Gespräche ergaben, dass bei der Koordinierung eines Entsiegelungsprojekts ein bis fünf Fachbereiche zu beteiligen seien. Oft obliegt die Projektkoordination der Stadt-/Objektplanung (sofern vorhanden), die entsprechende Stellungnahmen bei kommunalen Fachbereichen und Behörden (z. B. Klimaschutz-/anpassung, Stadtplanung, Tiefbau, Untere Naturschutz-, Bodenschutz- oder Wasserbehörden, Denkmalschutz) einholt, Ausschreibungen und Vergabe von Dienstleistungen managt und das Projekt bis zu dessen Abschluss begleitet. In der Praxis existieren jedoch auch Beispiele, in denen die Projektkoordination durch Tiefbauämter, Untere Naturschutzbehörden, das Klimaschutz-/Klimaanpassungsmanagement oder externe Dienstleister ausgeführt

wird. Es ist also vom jeweiligen Einzelfall abhängig.

Welche Faktoren fördern die Berücksichtigung und Umsetzung von Entsiegelungsmaßnahmen im kommunalen Planungsprozess?

Es hat sich gezeigt, dass Entsiegelungsmaßnahmen im kommunalen Planungsprozess insbesondere dann Berücksichtigung finden, wenn es gelingt, den Mehrwert der entsprechenden Maßnahme für unterschiedliche Belange überzeugend darzustellen (Win-Win-Win-Situationen) und die Öffentlichkeit einzubinden. Auch die Aufnahme von Entsiegelungsmaßnahmen in kommunale Planwerke, insbesondere in kommunale Klimaanpassungskonzepte oder integrierte Stadtentwicklungskonzepte, kann förderlich für die erfolgreiche Umsetzung sein.

Wie können Entsiegelungsprojekte finanziert werden?

Die Finanzierung ist eine zentrale Voraussetzung, die für eine Umsetzung von Entsiegelungsmaßnahmen gegeben sein muss. Neben den Investitionskosten müssen in der Planung auch Folgekosten, z. B. für die Pflege und Unterhaltung der Entsiegelungsflächen, berücksichtigt werden. Kommunale Entsiegelungsvorhaben (insbesondere großflächige Maßnahmen) lassen sich aus dem kommunalen Haushalt nur selten finanzieren. Dementsprechend ist die Umsetzung in der Regel an zusätzliche Fördermittel gebunden. Einen Überblick über Fördermöglichkeiten im Bereich der Klimaanpassung geben u. a. die *Förderdatenbanken des Zentrums KlimaAnpassung (ZKA)* und des Niedersächsischen Kompetenzzentrums Klimawandel (NIKO). Sie umfassen Förderprogramme verschiedener Ebenen (EU, Bund, Länder) und werden regelmäßig aktualisiert. Weitere Förderprogramme kann es ggf. regional geben, und Informationen sind auf den jeweiligen Internetseiten der Regionen, Kommunen oder Gemeinden verfügbar.

Wie in Kapitel 3 erwähnt, empfiehlt es sich, im Planungsprozess prinzipiell alle kommunalen Baumaßnahmen hinsichtlich möglicher Entsiegelungen bzw. geringerer Neuversiegelung zu überprüfen, selbst wenn andere Sachzwänge eine Umsetzung letztendlich verhindern. Häufig bieten sich dadurch Gelegenheiten, mit gering-

gem zusätzlichem Kostenaufwand auch Entsiegelung zu fördern (ein window of opportunity). So kann beispielsweise bei anstehenden Straßenerneuerungen und Instandsetzungsarbeiten, quasi im „Huckepackprinzip“, häufig auch Entsiegelung betrieben werden, ohne dass dabei zwingend drastische Mehrkosten entstehen (BURKHARDT 2022b).

Um die Projektkosten zu senken und die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft zu beachten, sollte auch die Möglichkeit eines Verkaufs ausgebauter Versiegelungsmaterialien (z. B. Pflastersteine) geprüft werden, sofern diese nicht für den Eigenbedarf benötigt werden. Diese Maßnahme könnte nicht nur zur Kostensenkung beitragen, sondern auch die Wiederverwendung von Baustoffen unterstützen, Ressourcen schonen und den ökologischen Fußabdruck des Projekts reduzieren.

Müssen niedersächsische Kommunen das im § 19 des Niedersächsischen Klimagesetzes aufgeführte Entsiegelungskataster selbständig erstellen?

Nein, das ist nicht nötig! Das Entsiegelungskataster wird im Auftrag des Niedersächsischen Ministeriums für Umwelt, Energie und Klimaschutz (MU) zentral durch das Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN) erstellt und befindet sich aktuell in der Entwicklung, die bis Ende 2025 abgeschlossen sein wird. Es handelt sich dabei um eine WebGIS-Anwendung, die nach der Fertigstellung an die Kommunen übergeben wird. Die Kommunen überprüfen anschließend die für ihre Zuständigkeitsgebiete ausgewiesenen Entsiegelungspotenziale, konkretisieren diese unter Nutzung kommunaler Informationen und halten das Kataster aktuell.

Entstehen Kosten für die Nutzung des im § 19 des Niedersächsischen Klimagesetzes aufgeführten Entsiegelungskatasters?

Die Nutzung des Entsiegelungskatasters ist kostenfrei. Eine nötige ArcGIS-Online-Lizenz wird Gemeinden und Samtgemeinden ebenfalls kostenfrei bereitgestellt. Für weiterführende Informationen zum Entsiegelungskataster wird auf folgende Homepage verwiesen: <https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/themen/boden/bodenschutz>.

Wo liegen aktuelle Schwerpunkte für die Umsetzung von Entsiegelungsmaßnahmen?

Entsiegelung bzw. Teilentsiegelung wird in vielen Bereichen umgesetzt (Abb. 32), sowohl im öffentlichen Raum, wie auf privaten Grundstücken oder auf Gewerbeflächen. Die Motive hinter den jeweiligen Maßnahmen unterscheiden sich dabei von Fall zu Fall und liegen z. B. in den Bereichen Naturschutz (z. B. Biotopentwicklung, Biodiversitätsförderung), Hochwasserschutz (z. B. Abflussregulation) oder Klimaschutz- und Klimaanpassung (z. B. Reduzierung der Hitzebelastung). Auch die Größenordnungen der Maßnahmen unterscheiden sich stark, wobei gegenwertig vor allem kleinere bis mittelgroße Maßnahmen (< 1.000 m²) umgesetzt werden. Schwerpunktfelder für die Umsetzung von Entsiegelungsmaßnahmen sind vor allem Parkflächen, Wege und Plätze, private und öffentliche Außenanlagen, Straßen oder andere Verkehrswege. Vereinzelt wird auch im Rahmen des Brachflächenrecyclings Entsiegelung betrieben.

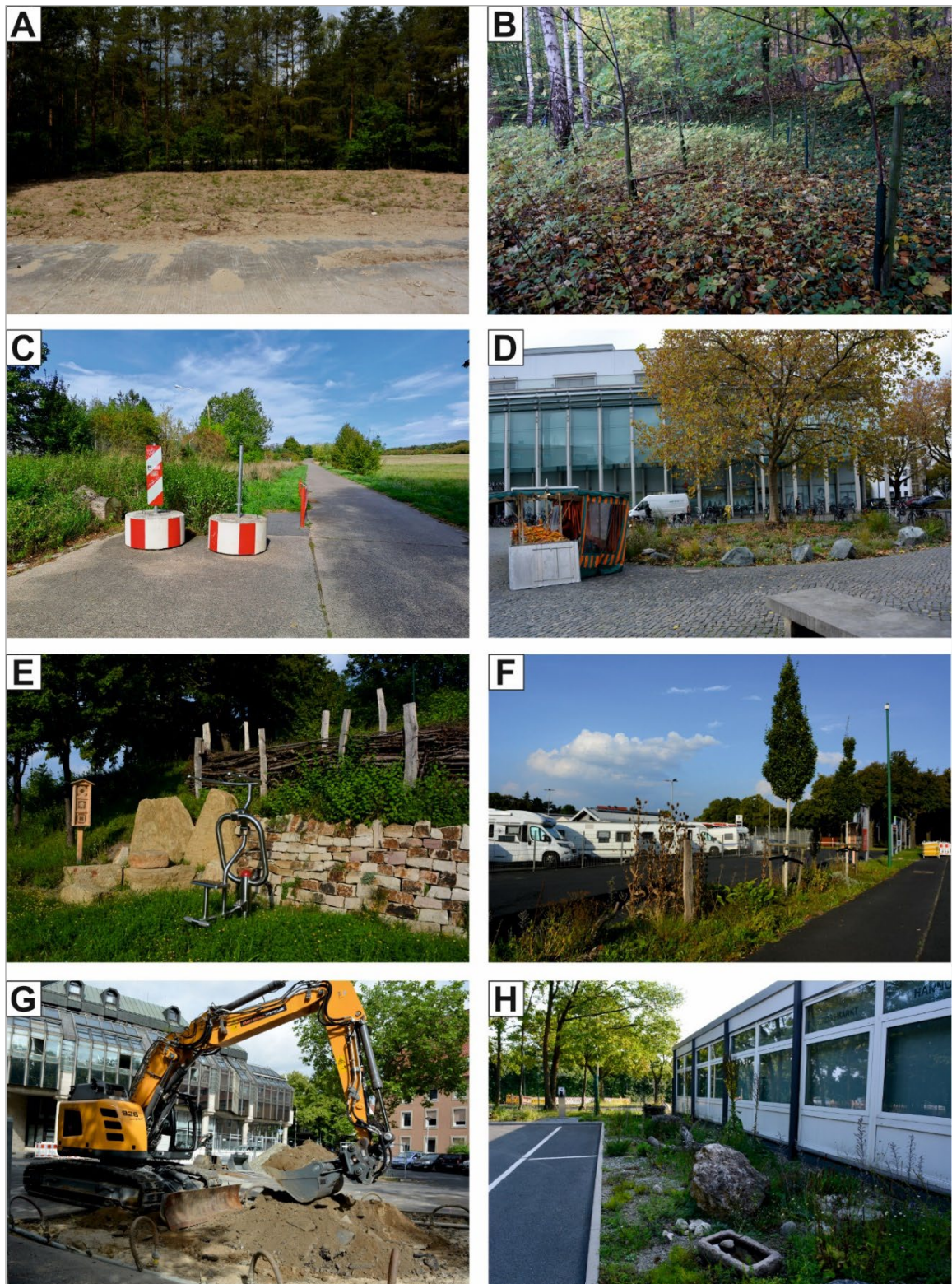


Abb. 32: Entsiegelungsbeispiele aus Niedersachsen (Bildrechte: LBEG). A: Entsiegelung im Bereich eines ehemals militärisch genutzten Gebäudes. B: Entsiegelte Buswendeschleife. C: Teilweise zurückgebaute Panzerstraße. D: Entsiegelung und Anlage eines großzügigen Baumbeets. E: Umgestalteter Randbereich eines Firmengeländes. F: Entsiegelung und Begrünung im Verkehrsraum. G: Entsiegelung einer innerstädtischen Parkfläche. H: Umgestaltung eines Schottergartens im Bereich einer Gewerbefläche zugunsten einer naturnahen und pflege-armen Grünfläche. Weitere Beispiele sind dem GeoBericht 14 (BASEDOW et al. 2021) zu entnehmen.

Welchen Beitrag können versickerungsfähige Beläge leisten?

Beläge, die den Oberflächenabfluss verringern und die Wasserinfiltration ermöglichen, sind ein geeignetes Mittel, um den Bodenwasserrückhalt und ggf. auch die Grundwasserneubildung zu erhöhen. Eine technische Möglichkeit, die insbesondere bei der Flächenumgestaltung bzw. Neuanlage, aber auch im Wegebau in Betracht gezogen werden sollte, ist die Nutzung innovativer Baustoffe. Sicker- und speicherfähige Decken besitzen, abhängig von ihrer spezifischen Konstruktion, deutlich geringere Abflussbeiwerte und entlasten damit bei der Entwässerung. Einen Überblick hierzu bietet u. a. der GeoBericht 14 (BASEDOW et al. 2021). Dadurch kann ein Teil des anfallenden Niederschlagswassers versickern und in den oberen Belagschichten gespeichert werden. Dieses Wasser steht, je nach Belag, beispielsweise auch zur Verdunstung zur Verfügung und kann somit zur kleinflächigen Abkühlung beitragen. Idealerweise geht die Nutzung versickerungsfähiger Beläge, z. B. bei der Umgestaltung von Flächen, mit einer Erhöhung des Grünflächenanteils einher, um durch zusätzliche Beschattung und Pflanzenverdunstung einen noch größeren Kühlungseffekt zu erreichen. Je nach Nutzung können die versickerungsfähigen Beläge einem Alterungsprozess unterliegen (z. B. durch Eintrag von Feinmaterial), sodass die Versickerungsfähigkeit zurückgehen kann. Im Vergleich mit undurchlässigen Belägen weisen sie jedoch deutlich geringere Abflüsse auf (DWA 2007).

Gibt es Gebiete, in denen eine Entsiegelung aufgrund spezifischer Gegebenheiten mit besonderer Vorsicht behandelt werden muss?

Fundierte Kenntnisse über die spezifischen Flächeneigenschaften einer möglichen Entsiegelungsmaßnahme sind nötig, um zu gewährleisten, dass dadurch positive Effekte erzielt werden (Kap. 2.3.4). Deshalb bedarf es immer einer Einzelfallprüfung, bei der die standortspezifischen Randbedingungen überprüft werden. Die folgenden Beispiele stellen Situationen vor, in denen eine Entsiegelung ggf. zu Problemen führen kann und die entsprechende Maßnahmen erfordern:

Entsiegelung in Gebieten mit belasteten Böden

Liegen Bodenbelastungen vor, können durch eine Entsiegelung ggf. Schadstoffe freigesetzt werden und z. B. ins Grundwasser gelangen. Dies ist unbedingt zu vermeiden. Daher müssen bei der Umsetzung von Entsiegelungsmaßnahmen selbstverständlich auch die geltenden bau- und bodenschutzrechtlichen Vorschriften beachtet werden. Dazu gehört u. a. auch die Überprüfung eines Standorts hinsichtlich potenzieller Belastungen. Es ist vor der Maßnahme zwingend das kommunale Altlastenkataster auf etwaige Einträge zu prüfen (Kap. 3.2). Ansprechpartner ist hier die Untere Bodenschutzbehörde. Auch Informationen über die aktuelle (Tab. 13) und historische Nutzung können ggf. Hinweise auf eine Belastung am Standort geben. Liegen am Standort eine Altlast oder großflächige erhöhte Schadstoffbelastungen vor, ist zu klären, ob aktuell und zukünftig eine Gefährdung durch die Ausbreitung von Schadstoffen, z. B. ins Grundwasser, besteht (Kap. 3.3.1). Gefährdungen für Mensch und Umwelt, die durch die Entsiegelung verstärkt oder ausgelöst werden könnten, müssen ausgeschlossen werden. Punktuelle Bodenbelastungen sollten nach Möglichkeit im Rahmen der Entsiegelungsmaßnahme beseitigt werden, z. B. durch einen entsprechenden Bodenaustausch. In Gebieten mit flächenhaften Bodenbelastungen, wie etwa in Bodenplanungsgebieten, ist beim Umgang mit Bodenmaterial besondere Vorsicht geboten. Bei einer Entsiegelung muss darauf geachtet werden, dass keine Kontamination unbelasteter Bereiche erfolgt und dass keine Gefahr für andere Schutzgüter entsteht.

Entsiegelung in Gebieten mit hohem Grundwasserstand

Der Boden bietet eine Schutzfunktion für das darunterliegende Grundwasser. Bei einer Entsiegelung wird der Boden wieder freigelegt und fachgerecht rekultiviert, damit er diese Funktion wieder erfüllen kann. Anschließend kann wieder Wasser in den Boden infiltrieren und, je nach Standort, versickern. Eine Entsiegelung kann somit prinzipiell die Grundwasserneubildung fördern. Je länger die Passage des Sickerwassers durch den Boden dauert, desto größer ist die Schutzwirkung. Neben den Bodeneigenschaften ist dies vor allem von der Mächtigkeit der Bodenschichten über dem Grundwasser sowie von der Menge und Belastung des Sickerwassers abhängig. In Regionen, in denen das

Grundwasser oberflächennah ansteht, könnte bei einer entsprechenden Belastung des Wassers eine Entsiegelung zu einer Verschmutzung des Grundwassers führen. Deshalb sind Mindestmächtigkeiten des Sickerraums oberhalb des mittleren Grundwasserhochstandes (MHGW) in der Praxis etabliert, der grundsätzlich mindestens 1 m betragen sollte. Da die Bodeneigenschaften sowie Menge und Belastung des Sickerwassers unterschiedliche Anforderungen bedeuten können, empfiehlt sich eine Abstimmung z. B. mit der Unteren Wasserbehörde. Bei unbedenklichen Situationen kann auch eine Unterschreitung des Schwellenwerts von 1 m möglich sein.

Entsiegelung im Umfeld von Bauwerken

Entsiegelung verändert die hydrologischen Bedingungen eines Standorts. Eine unüberlegte Entsiegelung, z. B. mit zusätzlicher Versickerung von Niederschlagswasser, kann Feuchtigkeitsschäden an Gebäuden verursachen. Je nach Flächen- und Gebäudegestaltung können Mindestabstände zu Gebäuden oder Nachbargrundstücken sinnvoll sein. Auch Gebäudeabdichtungen können manchmal notwendig sein, um die Bausubstanz entsprechend zu schützen.

Entsiegelung bei eingeschränkter Versickerungsleistung

In Gebieten, in denen der Boden oder der tiefere Untergrund geringe Durchlässigkeit besitzt (z. B. oberflächennah anstehende Tonsteine), kann die Versickerungsleistung eingeschränkt sein. Ein Stau und Abfluss von Niederschlagswasser an der Oberfläche sollte möglichst vermieden werden. Deshalb ist vorab eine Betrachtung der Wasserdurchlässigkeit und weiterer Bodeneigenschaften sinnvoll (z. B. das Wasserspeichervermögen des Bodens). Dabei ist zu berücksichtigen, ob die entsiegelte Fläche ausschließlich den auf sie fallenden Niederschlag aufnehmen soll oder ob auch das Regenwasser von zusätzlichen Flächen dort versickert werden soll. Sollte sich der Untergrund als ungeeignet für die Umsetzung einer Entsiegelungsmaßnahme erweisen, kann dort die Anlage von Versickerungsanlagen oder Wasserspeichern (funktionelle Entsiegelung) ggf. die bessere Lösung sein, um den Wasserrückhalt in diesen Gebieten zu stärken. Für die praktische Umsetzung stehen etablierte Verfahren zur Bewertung der Versickerungseigenschaften des Bodens zur Verfügung.

Entsiegelung in denkmalgeschützten Bereichen

Umbauten, Veränderungen oder auch Sanierungen von denkmalgeschützten Objekten (z. B. Gebäuden oder Plätzen) erfordern in der Regel eine denkmalrechtliche Genehmigung. Insofern sind die zuständigen Denkmalschutzbehörden bei der Planung frühzeitig zu integrieren (Kap. 3.1.1). Sofern beauftragt, ist bei der Bauausführung eine archäologische Baubegleitung einzubinden.

Wie kann der Spagat zwischen Funktionalität und Entsiegelung gelingen?

Kommunale Flächen sind häufig multifunktional und müssen diversen Nutzungsansprüchen gerecht werden. Das wiederum erfordert spezifische Flächeneigenschaften, wie beispielsweise Größe (Stichworte: Veranstaltungs- oder Marktwesen), Oberflächenbeläge (Stichworte: Befahrbarkeit oder Barrierefreiheit) oder auch Ausstattung (Stichworte: Park-/Stellplätze oder Grünflächenanteil). Demzufolge können bestehende Nutzungsansprüche ein Hindernis für eine Entsiegelung sein. Eine gute Kenntnis über die spezifischen Nutzungsansprüche einer Fläche ist deshalb unerlässlich. Dies erfordert eine umfassende Kommunikation und Zusammenarbeit über verschiedene Fachbereiche hinweg, um die verschiedenen Bedürfnisse und Anforderungen möglichst effektiv zu berücksichtigen. Letztlich geht es darum, wie sich die Nutzungsanforderungen und Entsiegelungsziele abzuwägen vereinbaren lassen.

Können Entsiegelungsmaßnahmen als Kompensation angerechnet werden?

Fachgerecht umgesetzte Entsiegelungsmaßnahmen können wesentlich dazu beitragen, die Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushaltes und das Landschaftsbild wiederherzustellen. Damit sind sie als Kompensationsmaßnahme zur Bewältigung von Eingriffsfolgen neuer Eingriffe im Sinne des Naturschutzrechts (BNatSchG § 15) grundsätzlich geeignet. Positive Effekte können sich z. B. auf die Bodenfunktionen, das Grundwasser oder auch das Landschaftsbild ergeben. Bei Neuversiegelungen ist vorrangig zu prüfen, ob eine Kompensation durch Entsiegelung erreicht werden kann (vgl. Kap. 2.4 in diesem Leitfaden und BREUER 2023).

Die Maßnahmen (hier die Entsiegelung) müssen dazu geeignet sein, die Folgen des Eingriffs tatsächlich auch zu bewältigen. Es müssen hierzu die vom Eingriff zerstörten oder erheblich beeinträchtigten Funktionen und Werte der Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushaltes und das Landschaftsbild wiederhergestellt werden. Es ist also eine vergleichende Betrachtung zwischen den voraussichtlichen erheblichen Beeinträchtigungen und dem Effekt, der mit der Entsiegelung erreicht werden kann, erforderlich. Abhängig davon kann es also auch sein, dass die Entsiegelungsmaßnahmen für die Bewältigung der Eingriffsfolgen im Einzelfall ungeeignet oder unzureichend sind. Einschränkend bei Entsiegelungsmaßnahmen im urbanen Raum kann es z. B. sein, dass die Biotope, die im Zuge der Entsiegelung etabliert werden sollen, nicht in der erforderlichen Wertigkeit entwickelt werden können, weil auch andere Nutzungsansprüche bestehen. Auch kann im baulich geprägten Umfeld eine dauerhafte Sicherung der entsiegelten Fläche herausfordernd sein, weil sich Nutzungsansprüche verschieben.

Entsiegelung und Innenentwicklung, wie passt das zusammen?

Beim Bestreben, weniger Flächen auf der „grünen Wiese“ (i. d. R. landwirtschaftliche Nutzflächen) für Siedlung und Verkehr in Anspruch zu nehmen, wird versucht, Entwicklungen im Innenbereich vorzunehmen. Hierbei werden auch Freiflächen in Anspruch genommen („Nachverdichtung“). Gleichzeitig steigen aber die Anforderungen an den Innenbereich hinsichtlich der Erholungsfunktion und auch des Beitrags zur Klimaanpassung (z. B. Reduzierung von Hitze stress). Um diese auf den ersten Blick gegensätzlichen Entwicklungen zu vereinbaren, wird das Konzept der sogenannten „doppelten Innenentwicklung“ verfolgt. Neben der Schaffung von Wohnraum und Gewerbeflächen soll der Innenbereich auch durch die Schaffung oder Weiterentwicklung von Grünflächen aufgewertet werden. Eine Nachverdichtung, bei der keine Flächen für Klimaanpassungsmaßnahmen bereitgestellt werden, führt langfristig zu einer Verschlechterung von Wohlbefinden und Lebensqualität, Wertverlusten von Immobilien und höheren volkswirtschaftlichen Kosten (z. B. für den Bevölkerungsschutz; UBA 2021). Entsiegelung kann hierzu einen Beitrag leisten, indem die Grundlage für Grünflächen geschaffen und der Wasserhaushalt naturnäher gestaltet wird.

Welche Möglichkeiten gibt es, private und gewerbliche Entsiegelung zu unterstützen?

Kommunale Förderprogramme sind ein effektives Instrument, um Entsiegelungsmaßnahmen auf privaten oder gewerblichen Grundstücken zu unterstützen. Es gibt zahlreiche Praxisbeispiele, etwa zur Flächenentsiegelung und Begrünung von Hinterhöfen und Gewerbegebieten. Beispiele hierfür sind das Projekt „Begrüntes Hannover“, „Grün statt Grau“ in Osnabrück und „Außenstelle Natur – Firmengelände naturnah gestalten“ in der Region Hannover. Wie Entsiegelung auch im privaten Bereich gelingen kann, zeigt ein Beispiel aus den Niederlanden: Seit 2021 wird dort der Wettbewerb *Tegelwippen* ausgetragen. Dabei treten Städte und Gemeinden gegeneinander an, um versiegelte Flächen durch Grünflächen zu ersetzen. Seit dem Start wurden insgesamt 9 Mio. Steine durch grüne Infrastrukturen ersetzt. Weitere Maßnahmen, wie vorbildhafte Entsiegelung kommunaler Flächen oder Aufklärungskampagnen, können dazu beitragen, das Bewusstsein für die positiven Auswirkungen von Entsiegelungsmaßnahmen und ihre Bedeutung für die Klimaanpassung zu stärken.

6. Dank

Entsiegelung ist ein Querschnittsthema, bei dem viele unterschiedliche Belange berücksichtigt werden müssen. Ein breiter fachlicher Austausch ist deshalb sehr wichtig. Die Autoren bedanken sich herzlich für die Unterstützung durch folgende Personen und Institutionen:

Besonderer Dank gilt dem „Begleitkreis Entsiegelungskataster“, einer Arbeitsgruppe des Niedersächsischen Kompetenzzentrums Klimawandel (NIKO), in der kommunale und landesweite Akteurinnen und Akteure eng zusammenarbeiten. Unser Dank richtet sich auch an die Kolleginnen und Kollegen aus dem Bereich Naturschutz des Niedersächsischen Landesbetriebs für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN), insbesondere Wilhelm Breuer für hilfreiche Hinweise zur Entsiegelung in der Eingriffsregelung, sowie des Niedersächsischen Landesamts für Denkmalpflege (NLD).

Ebenso danken wir den Kolleginnen und Kollegen des Landesamts für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) aus verschiedenen Referaten, insbesondere Uwe Hammerschmidt, Michael Fler, Dr. Yorck Adrian, Gabriele Ertl, Tobias Mattner und Dr. Jan Bug, für ihre wertvollen Beiträge. Kevin Handke vom Landesamt für Umwelt in Rheinland-Pfalz sei ebenfalls für den fachlichen Austausch gedankt. Abschließend danken wir Jonathan Kühne und allen Vertreterinnen und Vertretern niedersächsischer Kommunen und weiterer Institutionen, mit denen in den letzten zwei Jahren eine produktive Zusammenarbeit stattfand.

7. Quellen

- AD-HOC-AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5). – 5. Aufl., 438 S., 41 Abb., 103 Tab., 31 Listen; Hannover.
- AD-HOC-AG BODEN (2007): Methodenkatalog zur Bewertung natürlicher Bodenfunktionen, der Archivfunktion des Bodens, der Nutzungsfunktion „Rohstofflagerstätte“ nach BBodSchG sowie der Empfindlichkeit des Bodens gegenüber Erosion und Verdichtung. – 2. überarb. und erg. Aufl.
- AG BODEN (2024): Bodenkundliche Kartieranleitung (KA6). Band 1: Grundlagen, Kennwerte und Methoden. Band 2: Geländeaufnahme und Systematik. – 6. Aufl., 552 S., 73 Abb., 160 Tab.; Hannover.
- ALLOWAY, B. J. (1999): Schwermetalle in Böden - Analytik, Konzentrationen, Wechselwirkungen. – Berlin, Heidelberg (Springer).
- AMELUNG, W., BLUME, H.-P., FLEIGE, H., HORN, R., KANDELER, E., KÖGEL-KNABNER, I., KRETZSCHMAR, R., STAHR, K. & WILKE, B.-M. (2018) Scheffer/Schachtschabel - Lehrbuch der Bodenkunde. – 17. Aufl., XXII u. 750 S., 265 Abb.; Berlin, Heidelberg (Springer Spektrum); <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55871-3>.
- ANTHONY, M. A., BENDER, S. F. & V. D. HEIJDEN, M. G. A. (2023): Enumerating soil biodiversity. – PNAS **120** (33); <https://doi.org/10.1073/pnas.2304663120>.
- ARMSON, D., STRINGER, P. & ENNOS, A. R. (2012): The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area. – Urban Forestry & Urban Greening **11** (3): 245–255; <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2012.05.002>.
- AVDAN, U. & JOVANOVSKA, G. (2016): Algorithm for Automated Mapping of Land Surface Temperature Using LANDSAT 8 Satellite Data. – Journal of Sensors, ID 1480307, (Wiley Online Library); <https://dx.doi.org/10.1155/2016/1480307>.
- BABU OJHA, R. & DEVKOTA, D. (2014): Earthworms: 'Soil and ecosystem engineers' - a Review. – World J. Agric. Res. **2**: 257–260; <https://doi.org/10.12691/wjar-2-6-1>.

- BALANY, F., NG, A. W. M., MUTTIL, N., MUTHUKUMARAN, S. & WONG, M. S. (2020): Green Infrastructure as an Urban Heat Island Mitigation Strategy - A Review. – *Water* 2020, **12** (12): 3577; <https://doi.org/10.3390/w12123577>.
- BARDGETT, R. D. & VAN DER PUTTEN, W. H. (2014): Belowground biodiversity and ecosystem functioning. – *Nature* **515**: 505–511; <https://doi.org/10.1038/nature13855>.
- BASEDOW, H.-W., BOLZE, I., ENGEL, N., GUNREBEN, M., HAMMERSCHMIDT, U., PALM, S., SBRESNY, J., STADTMANN, R. & STEININGER, A. (2021a): Flächenneuanspruchnahme und Bodenversiegelung in Niedersachsen. – *GeoBerichte* **14**: 4. Aufl., 84 S., 39 Abb., 13 Tab., 2 Anh.; Hannover (LBEG); DOI 10.48476/geo-ber_14_2021.
- BATJES, N. H. (1996): Total carbon and nitrogen in the soils of the world. – *Eur. J. Soil Sci.* **47** (2): 151–163; <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01386.x>.
- BBodSchV - Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 9. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598, 2716).
- BDB & GALK – BUND DEUTSCHER BAUMSCHULEN E. V. & DEUTSCHE GARTENAMTSLEITERKONFERENZ E. V. (2022): Zukunftsbäume für die Stadt. Auswahl aus der GALK-Straßenbaumliste. – 81 S.; <https://epaper.galk.de/index.html#0>.
- BENDEN, J., BROESI, R., ILLGEN, M., LEINWEBER, U., LENNARTZ, G., SCHEID, C. & SCHMITT, T. G. (2017): Multifunktionale Retentionsflächen. Teil 1: Wissenschaftliche Grundlagen; Teil 2: Fallstudien; Teil 3: Arbeitshilfe für Planung, Umsetzung und Betrieb. – MURIEL Publikation; Teil 1: https://opac.dbu.de/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-32223_01.pdf; Teil 2: https://opac.dbu.de/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-32223_02.pdf; Teil 3: https://opac.dbu.de/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-32223_03.pdf.
- BENEDICT, M. A. & MCMAHON, E. T. (2012): Green Infrastructure. Linking Landscapes and Communities. – 320 S., 60 Abb.; Washington, DC, USA (Island Press); ISBN 978-1-59726-764-9.
- BERARDI, U., GHAFFARIAN-HOSEINI, A. H. & GHAFFARIAN-HOSEINI, A. (2014): State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. – *Appl. Energy* **115**: 411–428; <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.047>.
- BERLEKAMP, L.-R. & PRANZAS, N. (1986): Methode zur Erfassung der Bodenversiegelung von städtischen Wohngebieten. Ein Beitrag zum Hamburger Landschaftsprogramm. – *Natur und Landschaft* **61** (3), 92–95.
- BfN & BMU – BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ & BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT (Hrsg.) (2021): Handreichung zum Vollzug der Bundeskompensationsverordnung, November 2021. – <https://www.bfn.de/sites/default/files/2021-11/Handreichung%20zur%20BKompV.pdf> (aufgerufen am 18.11.2024).
- BKG – BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE (2024a): WMS TopPlusOpen. – <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/wms-topplusopen-wms-topplus-open.html>; Datenlizenz: dl-de/by-2-0, Datenquellen: https://sgx.geodatenzentrum.de/web_public/gdz/datenquellen/datenquellen_topplusopen.html
- BKG – BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE (2024b): Geoportal.de. – https://geoportal.de/Themen/Klima_und_Wetter/1_Hochwasser_und_Starkregen.html.
- BKOMPV – BUNDESKOMPENSATIONSVERORDNUNG (2020): Verordnung über die Vermeidung und die Kompensation von Eingriffen in Natur und Landschaft im Zuständigkeitsbereich der Bundesverwaltung vom 14. Mai 2020 (BGBl. I: 1088). – <https://www.gesetze-im-internet.de/bkompv/BJNR108800020.html>.
- BLUEGREENSTREETS (Hrsg.) (2022): Blue-GreenStreets Toolbox - Teil A: Multifunktionale Straßenraumgestaltung urbaner Quartiere. – Hamburg; <https://repos.hcu-hamburg.de/handle/hcu/638>.
- BLUM, W. E. H. (2018): Role of soils for satisfying global demands as defined by the U. N. Sustainable Development Goals (SDGs). – In: LAL, R., HORN, R. & KOSAKI, T. (Hrsg.) (2018): Soil and sustainable development goals. – *Catena soil sciences*: 1–14; Stuttgart (Schweizerbart), ISBN 978-3-510-65425-3.
- BLUME, H.-P. (1995): Böden städtisch-industrieller Verdichtungsräume. – Erstpublikation in: *Handbuch der Bodenkunde*, Kap. 3.4.4.9; (Wiley-VCH); <https://doi.org/10.1002/9783527678495.hbbk1995009>.

- BLUME, H.-P. (1995): Böden städtisch-industrieller Verdichtungsräume. – Handbuch der Bodenkunde, Kap. 3.4.4.9; (Wiley); <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9783527678495.hbbk1995009>.
- BLUME, H.-P., HORN, R. & THIELE-BRUHN, S. (2010): Handbuch des Bodenschutzes. Bodenökologie und -belastung / Vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen. – 4. Aufl., XXIV u. 758 S., 277 Abb., 203 Tab.; Weinheim (Wiley-VCH), ISBN: 978-3-527-32297-8.
- BMEL – BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (2022): Torffrei gärten, Klima schützen - Die Torfminderungsstrategie des BMEL. – <https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/torfminderungsstrategie.html>.
- BMUV – BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, NUKLEARE SICHERHEIT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (2022): Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz – Eckpunktepapier. – 8 S.; Berlin; https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/aktionsprogramm_natuerlicher_klimaschutz_eckpunkte_bf.pdf.
- BMUV – BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, NUKLEARE SICHERHEIT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (2023): Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz. Kabinettsbeschluss vom 29. März 2023. – Berlin; https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/ank_publikation_bf.pdf.
- BNatSchG - Bundesnaturschutzgesetz vom 29. Juli 2009 (BGBl. I S. 2542), zuletzt geändert durch Artikel 48 des Gesetzes vom 23. Oktober 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 323).
- BÖCKER, R. (1984): Bodenversiegelung. Karten zur Ökologie des Stadtgebietes von Berlin (West), Maßstab 1 : 75.000. – Technische Universität Berlin (Hrsg.).
- BODLE, R., DÜCK, L.-M., HERMANN, A., MILLER, R., STOCKHAUS, H. & VON VITTORELLI, L. (2023): Überarbeitung des Bodenschutzrechts - Diskussionspapier. Ergebnisse zu ausgewählten Rechtsfragen. – Bericht des Umweltbundesamtes; Dessau-Roßlau; <https://www.ecologic.eu/de/19345>.
- BÖLL, S., SCHÖNFELD, P., KÖRBER, K. & HERMANN, J. V. (2014): Stadtbäume unter Stress. – LWF aktuell **98**: 4–8; https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/boden-klima/dateien/a98_stadtbaeume_unter_stress_bf_gesch.pdf.
- BOSOLD, M., BROLL, G., SCHURAT, V., BÜCKEN, F. & BOISSERÉE-FRÜHBUSS, H. (2024): Gestaltungsempfehlungen für eine nachhaltige Entwicklung von Gewerbeflächen unter besonderer Berücksichtigung der Logistikbranche. – 8 S., Praxisprodukt des überregionalen Verbundprojekts Logist.Plus, Wissenschaftsladen Bonn e. V.; Bonn; https://logist-plus.de/images/PDFs/Publikationen/Gestaltungsempfehlungen_LogistPlus.pdf.
- BREUER, W. (2023): Entsiegelung als Kompensationsmaßnahme? – Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen **4/2023**: 259–267; (NLWKN); <https://www.nlwkn.niedersachsen.de/infodienst-download/informationsdienst-naturschutz-niedersachsen-zum-download-195145.html>.
- BUG, J. & HARDERS, D. (2024): Potenzieller mittlerer Zusatzwasserbedarf im Klimawandel. – Geofakten **46.1**: 12 S., 7 Abb., 2 Tab.; Hannover (LBEG); DOI 10.48476/geofakt_46_1_2024.
- BUG, J., HEUMANN, S., MÜLLER, U. & WALDECK, A. (2020): Auswertungsmethoden im Bodenschutz - Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS®). – GeoBerichte **19**: 9. Aufl., 383 S., 36 Abb., 384 Tab.; Hannover (LBEG); DOI 10.48476/geober_19_2020.
- BUG, J., SCHARUN, C., HARDERS, D. & STADTMANN, R. (2022a): Der Wasserhaushalt der Böden in Niedersachsen - Neue methodische Ansätze zur bodenfunktionalen Bewertung. – Geofakten **36**: 17 S., 7 Abb., 5 Tab.; Hannover (LBEG); DOI 10.48476/geofakt_36_1_2022.
- BURGHARDT, W. (1993): Formen und Wirkung der Versiegelung. – In: Symposium Bodenschutz, Heft 2: 111–125 (BARZ, W., BONUS, H., BRINKMANN, B., HOPPE, W. & SCHREIBER, K. F. (Hrsg.)), Symposium Bodenschutz; Münster.
- BURKHARDT, M., KULLI, B. & SALUZ, A. G. (2022a): Schwammstadt im Straßenraum. Herausforderungen und Lösungen für blau-grüne Maßnahmen. – Aqua & Gas **10/2022**: 16–29; <https://digitalcollection.zhaw.ch/items/0e007623-1066-4ba1-ad5e-d462df4c384f>; (letzter Zugriff: 13.08.2024).

- BURKHARDT, M., KULLI, B. & SALUZ, A. G. (2022b): Neue Herausforderungen bei der Strassenentwässerung - Recherche zum Stand des Wissens - Technischer Bericht. – Ostschweizer Fachhochschule (OST) & Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW), im Auftrag von Kanton Zürich, Baudirektion, Tiefbauamt und Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft; <https://digitalcollection.zhaw.ch/items/e563376a-2c76-4470-8eec-4d37e681fa41> (letzter Zugriff: 13.08.2024).
- BVB – BUNDESVERBAND BODEN E. V. (2013): Bodenkundliche Baubegleitung BBB. Leitfaden für die Praxis. – BVB-Merkblatt, Band 2, 116 S.; Berlin (Erich Schmidt); ISBN 978-3-503-15436-4.
- CHARZYŃSKI, P., HULISZ, P., PIOTROWSKA-DŁUGOSZ, A., KAMIŃSKI, D. & PLAK, A. (2018): Sealing effects on properties of urban soils. – In: LAL, R. & STEWART, B. A. (Hrsg.): Urban Soils. Advances in Soil Science Series: 155–174; (CRC Press); https://www.researchgate.net/publication/321387375_Sealing_Effects_on_Properties_of_Urban_Soils.
- CHARZYŃSKI, P., PLAK, A. & HANAKA, A. (2017): Influence of the soil sealing on the geoaccumulation index of heavy metals and various pollution factors. – Environmental Science and Pollution Research **24**: 4801–4811; <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-016-8209-5>.
- CIAIS, P., SABINE, C., BALA, G., BOPP, L., BROVKIN, V., CANADELL, J., CHHABRA, A., DEFRIES, R., GALLOWAY, J., HEIMANN, M., JONES, C., LE QUÉRÉ, C., MYNENI, R. B., PIAO, S. & THORNTON, P. (2013): Carbon and other biogeochemical cycles. – In: Climate change 2013: the physical science basis, contribution of working group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: 465–570; Cambridge (University Press); https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter06_FINAL.pdf.
- DIN 18915 (2018): Vegetationstechnik im Landschaftsbau - Bodenarbeiten. – Ausgabedatum 2018-06, 39 S.; (DIN Media); <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-18915/287389107>.
- DIN 18916 (2016): Vegetationstechnik im Landschaftsbau - Pflanzen und Pflanzarbeiten. – Ausgabedatum 2016-06, 16 S.; (DIN Media); <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-18916/252103828>.
- DIN 18920 (2014): Vegetationstechnik im Landschaftsbau - Schutz von Bäumen, Pflanzenbeständen und Vegetationsflächen bei Baumaßnahmen. – Ausgabedatum 2014-07, 8 S.; (DIN Media); <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-18920/205012976>.
- DIN 19639 (2019): Bodenschutz bei Planung und Durchführung von Bauvorhaben. – Ausgabedatum 2019-09, 55 S.; (DIN Media); <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-19639/309596295>.
- DIN 19731 (2023): Bodenbeschaffenheit - Verwertung von Bodenmaterial und Baggergut. – Ausgabedatum 2023-10, 38 S.; (DIN Media); <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-19731/372246760>.
- DIN 1986-100 (2016): Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke – Teil 100: Bestimmungen in Verbindung mit DIN EN 752 und DIN EN 12056. – Ausgabedatum 2016-12, 101 S.; (DIN Media); <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-1986-100/264064948>.
- DIN 276 (2018): Kosten im Bauwesen. – Ausgabedatum 2018-12, 56 S.; (DIN Media); <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-276/293154016>.
- DWA – DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL E. V. (2005): Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser. – Arbeitsblatt DWA-A **138**; Hennef.
- DWA – DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL E. V. (2007): Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser – Arbeitsblatt DWA-M **153**; Hennef; korrigierte Fassung Dezember 2020.
- DWA – DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL E. V. (2008): DWA-Kommentar zum DWA-Regelwerk Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser. – Kommentar zum Arbeitsblatt DWA-A **138**; Hennef.
- DWA – DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL E. V. (2016): Bodenfunktionsansprache - Teil 1:

- Ableitung von Kennwerten des Bodenwasserhaushaltes. – Arbeitsblatt DWA-A **920-1**, 67 S.; Hennef; Dezember 2016; Stand: korrigierte Fassung Dezember 2017; <https://shop.dwa.de/DWA-A-920-1-Bodenfunktionsansprache-Teil-1-Ableitung-von-Kennwerten-des-Bodenwasserhaushalts-Dezember-2016-Stand-korrigierte-Fassung-Dezember-2017/A-920-T1-BUNDLE-16>.
- DWA – DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL E. V. (2024): Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser – Teil 1: Planung, Bau, Betrieb. – Arbeitsblatt DWA-A **138-1**, 98 S.; Hennef; <https://shop.dwa.de/DWA-A-138-1-Anlagen-zur-Versickerung-von-Niederschlagswasser-Teil-1-Planung-Bau-Betrieb-Oktober-2024/A-138-T1-PDF-24>.
- DYCK, S. & PESCHKE, G. (1995): Grundlagen der Hydrologie. – 532 S.; Berlin (Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften).
- EDMONDSON, J. L., STOTT, I., DAVIES, Z. G., GASTON, K. J. & LEAKE, J. R. (2016): Soil surface temperatures reveal moderation of the urban heat island effect by trees and shrubs. – *Sci. Rep.* **6**: Art. 33708; <https://doi.org/10.1038/srep33708>.
- ENDLICHER, W. (2012): Einführung in die Stadtökologie. – 220 S., 100 Abb.; Stuttgart (Ulmer); DOI: 10.36198/9783838536408; ISBN: 9783825236403.
- ENGEL, N. & PRAUSE, D. (2021): Erhalt und Wiederherstellung von Bodenfunktionen in der Planungspraxis. – *Geofakten* **31**: 2. Aufl., 12 S., 2 Tab.; Hannover (LBEG); DOI 10.48476/geofakt_31_2_2021.
- ENGEL, N. & STADTMANN, R. (2020): Bodenfunktionsbewertung auf regionaler und kommunaler Ebene - Ein niedersächsischer Leitfaden für die Berücksichtigung der Belange des vorsorgenden Bodenschutzes in der räumlichen Planung. – *GeoBerichte* **26**: 2. Aufl., 67 S., 15 Abb., 21 Tab., Anh.; Hannover (LBEG); DOI 10.48476/geober_26_2020.
- ENGEL, N., BUG, J., STADTMANN, R. & HARDERS, D. (2024): Auswirkungen des Klimawandels auf Böden in Niedersachsen. – *Geofakten* **46**: 27 S., 12 Abb., 4 Tab.; Hannover (LBEG); DOI 10.48476/geofakt_46_1_2024.
- ERSATZBAUSTOFFV (2021): Ersatzbaustoffverordnung vom 9. Juli 2021 (BGBl. I: 2598), zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 13. Juli 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 186) – <https://www.gesetze-im-internet.de/ersatzbaustoffv/ErsatzbaustoffV.pdf>.
- ERTL, G., BUG, J., GHALICHEHBAF, S., HAJATI, M.-C., HERRMANN, F., WALDECK, A. & ELBRACHT, J. (2024): Die Grundwasserneubildung und weitere Wasserhaushaltskomponenten von Niedersachsen – Berechnungen mit dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA22. – *GeoBerichte* **51**: 66 S., 30 Abb., 3 Tab., Anh.; Hannover (LBEG); DOI 10.48476/geober_51_2024.
- ESCHENBACH, A. & GRÖNGRÖFT, A. (2020): Bodenschutz und Klimawandel. – *Bodenschutz* **3**: 103–109; <https://doi.org/10.37307/j.1868-7741.2020.03.07>.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (2021): EU-Bodenstrategie für 2030. Die Vorteile gesunder Böden für Menschen, Lebensmittel, Natur und Klima nutzen. – 30 S.; <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021DC0699&from=EN>.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (2023): Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Bodenüberwachung und -resilienz (Bodenüberwachungsgesetz). – <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:52023PC0416> (letzter Zugriff: 29.11.2024).
- EUROPÄISCHE UNION (2024): Verordnung (EU) 2024/1991 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24. Juni 2024 über die Wiederherstellung der Natur und zur Änderung der Verordnung (EU) 2022/869. – https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401991 (letzter Zugriff: 29.11.2024).
- FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (2015): Soil functions. Soils deliver ecosystem services that enable life on Earth - Infographics. – FAO Information Material for the International Year of Soils (IYS 2015); <https://openknowledge.fao.org/items/314d30e5-6b0c-45e7-9246-3e4786155119> (letzter Zugriff: 04.07.2024).

- FAO FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (2023): Soils, where food begins. – ITPS Soil Letters **6**: 8 S.; <https://www.fao.org/3/cc4199en/cc4199en.pdf> (letzter Zugriff: 04.07.2024).
- FELDWISCH, N. (2024): Ausschreibung von Leistungen des Bodenschutzes bei Bauvorhaben. – Bodenschutz **2**/2024: 50–56; <https://doi.org/10.37307/j.1868-7741.2024.02.04>.
- FENOGLIO, M. S., ROSSETTI, M. R. & VIDELA, M. (2020): Negative effects of urbanization on terrestrial arthropod communities: a meta-analysis. – Glob. Ecol. Biogeogr. **29** (8): 1412–1429; <https://doi.org/10.1111/geb.13107>.
- FGSV – FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESSEN (2023): Richtlinien zum Schutz von Bäumen und Vegetationsbeständen bei Baumaßnahmen. – 28 S.; Köln; ISBN: 978-3-86446-373-0.
- FLL – FORSCHUNGSGESELLSCHAFT LANDSCHAFTSENTWICKLUNG LANDSCHAFTSBAU E. V. (2010): Empfehlungen für Baumpflanzungen – Teil 2: Standortvorbereitung für Neupflanzungen; Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterung, Bauweisen und Substrate. – 64 S.; Bonn.
- FLL – FORSCHUNGSGESELLSCHAFT LANDSCHAFTSENTWICKLUNG LANDSCHAFTSBAU E. V. (2018): Richtlinien für Planung, Bau und Instandhaltung von begrünbaren Flächenbefestigungen. – 47 S.; Bonn.
- FRIE, B. & HENSEL, R. (2009): Schätzverfahren zur Bodenversiegelung: Ansatz der Umweltökonomischen Gesamtrechnung der Länder. – In: MEINEL, G. & SCHUMACHER, U. (Hrsg.): Flächennutzungsmonitoring. Konzepte - Indikatoren - Statistik. – Aachen (Shaker), S. 17–45; https://www.ioer-monitor.de/fileadmin/user_upload/monitor/DFNS/2009_1_DFNS/Buchbeitraege/IOER_DFNS_I_2009_S_17-45_PDFA.pdf (Zuletzt aufgerufen am 05.08.2024).
- GEORGIU, K., JACKSON, R. B., VINDUŠKOVÁ, O., ABRAMOFF, R. Z., AHLSTRÖM, A., FENG, W., HARDEN, J. W., PELLEGRINI, A. F. A., POLLEY, H. W., SOONG, J. L., RILEY, W. J. & TORN, M. S. (2022): Global stocks and capacity of mineral-associated soil organic carbon. – Nat. Commun. **13**: Art. 3797; <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31540-9>.
- GOUDIE, A. S. & VILES, H. A. (2016): Geomorphology in the Anthropocene. – Cambridge; <https://doi.org/10.1017/CBO9781316498910> ; [ISBN 9781316498910].
- GRIMM, U. (2018): Digitale Modellierung des innerstädtischen Paläoreliefs von Leipzig mittels öffentlich zugänglicher Daten der Landesämter. – Dissertation, Universität Leipzig; <https://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:15-qucosa2-323965> (letzter Zugriff: 23.01.2024).
- GUNREBEN, M. & SCHNEIDER, J. (2001): Entsiegelung von Böden: Wann und Wie? – Arb.-H. Boden 2001/3: 55–93, 7 Abb., 9 Tab.; Hannover (NLfB).
- HAASE, D. & NUISSL, H. (2007): Does urban sprawl drive changes in the water balance and policy? The case of Leipzig (Germany) 1870–2003. – Landscape and Urban Planning **80** (1-2): 1–13; <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2006.03.011>.
- HALLMANN, C. A., SORG, M., JONGEJANS, E., SIEPEL, H., HOFLAND, N., SCHWAN, H., STENMANS, W., MÜLLER, A., SUMSER, H., HÖRREN, T., GOULSON, D. & DE KROON, H. (2017): More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. – PLoS ONE **12** (10): e0185809; <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0185809>.
- HAMMERSCHMIDT, U. & STADTMANN, R. (2019): Bodenschutz beim Bauen. Ein Leitfaden für den behördlichen Vollzug in Niedersachsen. – GeoBerichte **28**: 2. Aufl., 47 S., 25 Abb., 2 Tab.; Hannover (LBEG); DOI 10.48476/geober_28_2019.
- HANSCHKE, U. & BEDDING, B. (2005): Flächentypen - Eine Beschreibung der im Informationssystem Stadt und Umwelt (ISU) der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung erfassten und verwalteten Struktur- und Flächennutzungskategorien von Berlin. – Bericht der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, III F, 43 S.; Berlin; https://www.berlin.de/umweltatlas/_assets/literatur/isu_flaechentypen_2001.pdf.
- HARNISCHMACHER, S. (2022): Relief aus Menschenhand - Eine Übersicht zur Anthropogeomorphologie. – Geographische Rundschau **74** (7/8): 4–9.

- HARTMANN, C., MOSER-REISCHL, A., RAHMAN, M. A., FRANCESCHI, E., VON STRACHWITZ, M., PAULEIT, S., PRETZSCH, H., RÖTZER, T. & PAETH, H. (2023): The footprint of heat waves and dry spells in the urban climate of Würzburg, Germany, deduced from a continuous measurement campaign during the anomalously warm years 2018–2020. – *Meteorologische Zeitschrift (Contrib. Atm. Sci.)* **32** (1): 49–65; <https://www.waldwachstum.wzw.tum.de/fileadmin/publications/Hartmann.pdf>.
- HENNINGER, S. & WEBER, S. (2019): Stadtklima. – 260 S., 114 Abb., 29 Tab., 51 farb. Abb.; (UTB-Verlag), [ISBN: 9783825248499]; DOI: 10.36198/9783838548494.
- HÖKE, S., LAZAR, S. & KAUFMANN-BOLL, C. (2010): Kompensationsmaßnahmen für Eingriffe in Böden - Entwicklung neuer Bodenmanagement-Strategien, Teil 1 im EU-Projekt URBAN SMS (Projekt-Nr. 6.56), WP 6: Kompensationsmaßnahmen für Eingriffe in Böden. – 54 S.; Stuttgart (Stadt Stuttgart, Amt Umweltschutz).
- HÖPER, H. (2022): Treibhausgasemissionen der Moore und weiterer kohlenstoffreicher Böden in Niedersachsen. – *Geofakten* **38**: 23 S., 1 Abb., 10 Tab., 2 Anh.; Hannover (LBEG); DOI 10.48476/geofakt_38_1_2022.
- HOPKIN, S. P. (1997): *Biology of the Springtails (Insecta: Collembola)*. – 340 S.; Oxford, New York, Tokyo (Oxford University Press), [ISBN: 9780198540847].
- KÄNDLER, G., ADLER, P. & HELLBACH, A. (2011): Wie viel Kohlenstoff speichern Stadtbäume? - Eine Fallstudie am Beispiel der Stadt Karlsruhe. – *FVA-Einblick* **2**: 7–10; https://www.researchgate.net/publication/285375225_Wie_viel_Kohlenstoff_speichern_Stadtbäume_Eine_Fallstudie_am_Beispiel_der_Stadt_Karlsruhe.
- KASIELKE, T. & BUCH, C. (2011): Urbane Böden im Ruhrgebiet. – Online-Veröff., Bochumer Bot. Ver. **3** (7): 67–96; https://www.botanik-bochum.de/publ/OVBBV3_7_Kasielke_Buch_UrbaneBoedenRuhrgebiet.pdf.
- KASTLER, M. & NEITE, H. (2017): Die Bodenkühlleistung als Baustein städtischer Klimaanpassungskonzepte. – *Bodenschutz* **2**; doi.org/10.37307/j.1868-7741.2017.02.03.
- KANG (2023): Bundes-Klimaanpassungsgesetz vom 20. Dezember 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 393). – <https://www.gesetze-im-internet.de/kang/BJNR1890A0023.html>.
- KIM, S. W. & BROWN, R. D. (2021): Urban heat island (UHI) intensity and magnitude estimations: A systematic literature review. – *Sci. Total Env.* **779**: 146389; DOI: 10.1016/1039j.scitotenv.2021.146389.
- KORÁNYI, D., EGERER, M., RUSCH, A., SZABÓ, B. & BATÁRY, P. (2022): Urbanization hampers biological control of insect pests: a global meta-analysis. – *Sci. Total Environ.* **834**: 155396; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722024895?via%3Dihub>.
- KOVATS, R. S. & HAJAT, S. (2008): Heat Stress and Public Health: A Critical Review. – *Annual Review of Public Health* **29**: 41–55; <https://doi.org/10.1146/annurev.publhealth.29.020907.090843>.
- KROMP, B. (1999): Carabid beetles in sustainable agriculture: a review on pest control efficacy, cultivation impacts and enhancement. – *Invertebr. Biodivers. Bioindic. Sustain. Landsc.* **74**: 187–228; <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780444500199500145>.
- KÜCHLER, F. (2011): Probennahme und Qualitätssicherungsmaßnahmen bei Bodenkontaminationen mit sprengstofftypischen Verbindungen. – Dissertation an der FU Berlin; <https://refubium.fu-berlin.de/handle/fub188/1897>.
- KUTTLER, W. (2013): *Klimatologie*. – 2. akt. u. erg. Aufl., UTB 3099: 306 S., 117 Abb., 55 Tab., 18 farb. Abb., zahlr. Info-Kästen; Paderborn (Schöningh); DOI: 10.36198/9783838540597, [ISBN: 9783825240592].
- LABO – BUND/LÄNDER AG BODENSCHUTZ (2023): Vollzugshilfe zu §§ 6–8 BBodSchV - Anforderungen an das Auf- und Einbringen von Materialien auf oder in den Boden. – Stand: 10.08.2023, 108 S.; https://mkuem.rlp.de/fileadmin/14/Themen/Abfall_und_Boden/Bodenschutz/Bodenverwertung/LABO-Vollzugshilfe_Paragr._6-8_BBodSchV_10-08-2023.pdf.
- LABO – BUND/LÄNDER AG BODENSCHUTZ (2024): Arbeitshilfe zur Sickerwasserprognose. – Stand: Mai 2024, 96 S.; https://www.labo-deutschland.de/documents/AH_Sickerwasserprognose_LABO.pdf.

- LABO & LAW – BUND/LÄNDER AG BODENSCHUTZ & BUND/LÄNDER AG WASSER (2016): Verhältnis von Bodenschutzrecht und Wasserrecht. – 10 S.; https://www.labo-deutschland.de/documents/Verhaeltnis_Bodenschutz-_u-_Wasserrecht_22-07-2016_2.pdf (letzter Zugriff: 01.03.2024).
- LANDKREIS OSNABRÜCK (Hrsg.) (2016): Osnabrücker Kompensationsmodell. Arbeitshilfe zur Vorbereitung und Umsetzung der Eingriffsregelung. – 62 S.; Osnabrück; <https://www.landkreis-osnabrueck.de/sites/default/files/2024-08/osnabruecker-kompensationsmodell-2016.pdf>.
- LANUV – LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-WESTFALEN (2015): Kühlleistung von Böden - Leitfaden zur Einbindung in stadtklimatische Konzepte in NRW. – LANUV-Arbeitsblatt **29**: 69 S.; https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/4_arbeitsblaetter/arbla29/LANUV-Arbeitsblatt%2029_web.pdf.
- LANUV – LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-WESTFALEN (2017): Erfassung von Entsiegelungspotenzialen in Nordrhein-Westfalen. – LANUV-Arbeitsblatt **34**: 51 S.; https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/4_arbeitsblaetter/Arbeitsblatt_34_gesichert.pdf.
- LBEG – LANDESAMT FÜR BERGBAU, ENERGIE UND GEOLOGIE NIEDERSACHSEN (2023): Flächeninanspruchnahme und Bodenversiegelung in Niedersachsen. – Webseite des LBEG unter https://www.lbeg.niedersachsen.de/boden_grundwasser/bodenschutz/flaecheninanspruchnahme_und_bodenversiegelung/flaecheninanspruchnahme-und-bodenversiegelung-in-niedersachsen-797.html (letzter Zugriff: 06.10.2023).
- LEHMANN, A. & STAHR, K. (2007): Nature and significance of anthropogenic urban soils. – J. Soil. Sediment. **7**: 247–260; (Springer); <https://link.springer.com/article/10.1065/jss2007.06.235>.
- LFU – LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (2000): Erhebung von Entsiegelungspotenzial in Kommunen. Studie und Verfahrensanleitung am Beispiel der Stadt Ettlingen. – Bodenschutz **7**: 63 S., 5 Anl.; Karlsruhe; https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/52258-Studie_und_Verfahrensanleitung_am_Beispiel_der_Stadt_Ettlingen.pdf.
- LFULG – LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE SACHSEN (Hrsg.) (2021): Bodenfunktionen in der Schwammstadt. – 43 S.; <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa2-767352>.
- LI, G., SUN, G. X., REN, Y., LUO, X. S. & ZHU, Y. G. (2018): Urban soil and human health: a review. – Eur. J. Soil Sci. **69** (1): 196–215; <https://bsssjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ejss.12518>.
- MEUSER, H. (2004): Stadtböden. – in: LITZ, N., WILCKE, W. & WILKE, B.-M.: Bodengefährdende Stoffe, Kap. II-1.4, S. 1–14; Landsberg/Lech (Ecomed); <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9783527678501.bgs2004007>.
- MEUSER, H. (2005): Rekultivierung aufgegebenen Industrie-, Gewerbe- und Verkehrsflächen. – Handbuch der Bodenkunde, Kap. 8.4.3; (Wiley); <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9783527678495.hbbk2005009>.
- MOHS, B. & MEINERS, H.-G. (1994): Kriterien des Bodenschutzes bei der Ver- und Entsiegelung von Boden - Untersuchungsprogramm Bodenversiegelung/-entsiegelung. – Umweltforschungsplan des BMU, Forschungsbericht 10703007/16, UBA-Texte **50/94**.
- MONTANARELLA, L. (2007): Trends in land degradation in Europe. – In: SIVAKUMAR, M. V. K. & NDIAG'UI, N. (Eds.): Climate and land degradation, pp. 83–104; Berlin, Heidelberg (Springer); https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-72438-4_5.
- MÜCKE, H.-G. & MATZARAKIS, A. (2019): Klimawandel und Gesundheit: Tipps für sommerliche Hitze und Hitzewellen. – 20 S., Umweltbundesamt; <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/klimawandel-gesundheit-tipps-fuer-sommerliche-hitze>.
- MUSTAFA, E. K., CO, Y., LIU, G., KALOOP, M. R., BESHAR, A. A., ZARZOURA, F. & SADEK, M. (2020): Study for Predicting Land Surface Temperature (LST) Using Landsat Data: A Comparison of Four Algorithms. – Advances in Civil Engineering: 7363546; <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2020/7363546>.
- NEHLS, T., KLUGE, B. & WESSOLEK, G. (2011): Entsiegelungspotenziale und Entsiegelung von Böden. – In: BLUME, H. P., HORN, R. & THIELE-BRUHN, S. (Hrsg.): Handbuch des Bodenschutzes: 645–648; (Wiley-VCH).

- NIKO – NIEDERSÄCHSISCHES KOMPETENZZENTRUM KLIMAWANDEL (2023): Klimafolgenmonitoringbericht für Niedersachsen 2023. – Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz; <https://niko-klima.de/wp-content/uploads/2023/12/Klimafolgenmonitoringbericht-Nds.-2023.pdf>.
- NLFB – NIEDERSÄCHSISCHEN LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG (1997): Böden in Niedersachsen Online. Profil 31: Bänderparabraunerde aus Geschiebedecksand über glazifluvialen Sand; <https://www.lbeg.de/extras/nlf-book/html/prof0031.htm>.
- NLÖ – NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR ÖKOLOGIE (1994): Naturschutzfachliche Hinweise zur Anwendung der Eingriffsregelung in der Bauleitplanung. – Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen 1/94: 60 S.; Hannover; <https://www.nlwkn.niedersachsen.de/naturschutz/naturschutzfachliche-hinweise-zu-anwendung-der-eingriffsregelung-in-der-bauleitplanung-38954.html>.
- NLT – NIEDERSÄCHSISCHER LANDKREISTAG (Hrsg.) (2011a): Hochspannungsleitungen und Naturschutz. Hinweise zur Anwendung der Eingriffsregelung beim Bau von Hoch- und Höchstspannungsfreileitungen und Erdkabeln. – 2. Aufl., 42 S.; Hannover; <https://www.nlt.de/wp-content/uploads/2021/12/Arbeitshilfe-Hochspannungsleitungen-und-Naturschutz-Stand-Januar-2011.pdf>.
- NLT – NIEDERSÄCHSISCHER LANDKREISTAG (Hrsg.) (2011b): Mobilfunkmasten und Naturschutz Hinweise zur Anwendung der Eingriffsregelung bei der Errichtung von Mobilfunkmasten. – 2. Aufl., 24 S.; Hannover; <https://www.nlt.de/wp-content/uploads/2021/12/Arbeitshilfe-Mobilfunkmasten-und-Naturschutz-Stand-Januar-2011.pdf>.
- NLWKN – NIEDERSÄCHSISCHER LANDESBETRIEB FÜR WASSERWIRTSCHAFT, KÜSTEN- UND NATURSCHUTZ (2006): Beiträge zur Eingriffsregelung V. – darin: BREUER, W.: Ergänzung „Naturschutzfachliche Hinweise zur Anwendung der Eingriffsregelung in der Bauleitplanung“. – Informationsdienst. Naturschutz Niedersachsen 1/2006: 53; <https://www.nlwkn.niedersachsen.de/veroeffentlichungen-naturschutz/beitraege-zur-eingriffsregelung-v-42592.html#bauleitplanung>.
- NNATSchG (2022): Niedersächsisches Naturschutzgesetz vom 19. Februar 2010 (Nds. GVBl.: 104 / VORIS 28100), zuletzt geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 22. September 2022 (Nds. GVBl.: 578).
- NST – NIEDERSÄCHSISCHER STÄDTETAG (Hrsg.) (2013): Arbeitshilfe zur Ermittlung von Ausgleichs und Ersatzmaßnahmen in der Bauleitplanung. – 9. völlig überarb. Aufl., 82 S.; Hannover (Innovative Stadt GmbH).
- OKE, T. R. (1973): City size and the urban heat island. – *Atmos. Environ.* 7 (8): 769–779; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0004698173901406>.
- O'RIORDAN, R., DAVIES, J., STEVENS, C. & QUINTON, J. N. (2021): The effects of sealing on urban soil carbon and nutrients. – *Soil* 7 (2): 661–675; <https://doi.org/10.5194/soil-7-661-2021>.
- PFEIFFER, E.-M., ESCHENBACH, A., MUNCH, J. C. & VEREECKEN, H. (2024): Böden und ihre Funktionen im Klimawandel. – In: BRASSEUR, G. P., JACOB, D. & SCHUCK-ZÖLLER, S. (Hrsg.): Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven: 263–274; doi.org/10.1007/978-3-662-66696-8_20.
- PRETZSCH, H., BIBER, P., UHL, E., DAHLHAUSEN, J., SCHÜTZE, G., PERKINS, D., RÖTZER, T., CALDENTY, J., KOIKE, T., VAN CON, T., CHAVANNE, A., DU TOIT, B., FOSTER, K. & LEFER, B. (2017): Climate change accelerates growth of urban trees in metropolises worldwide. – *Scientific reports* 7: 15403; <https://www.nature.com/articles/s41598-017-14831-w>.
- PRÖSCHEL, B. (2020): Die Rekonstruktion der Paläotopographie des Aachener Kessels. – Dissertation, RWTH Aachen; DOI: 10.18154/RWTH-2020-00916.
- QIU, G. Y., LI, H. Y., ZHANG, Q. T., CHEN, W., LIANG, X. J. & LI, X. Z. (2013): Effects of evapotranspiration on mitigation of urban temperature by vegetation and urban agriculture. – *J. Integr. Agric.* 12: 1307–1315; [https://doi.org/10.1016/s2095-3119\(13\)60543-2](https://doi.org/10.1016/s2095-3119(13)60543-2).
- RAHMAN, M. A., STRATOPOULOS, L. M. F., MOSER-REISCHL, A., ZÖLCH, T., HÄBERLE, K.-H., RÖTZER, T., PRETZSCH, H. & PAULEIT, S. (2020): Traits of trees for cooling urban heat islands: a meta-analysis. – *Building and Environment* 170: 106606; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132319308182>.

- RAHMAN, M. A., FRANCESCHI, E., PATTNAIK, N., MOSER-REISCHL, A., HARTMANN, C., PAETH, H., PRETZSCH, H., RÖTZER, T. & PAULEIT, S. (2022): Spatial and temporal changes of outdoor thermal stress: influence of urban land cover types. – *Sci. Rep.* **12**: 671; <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04669-8>.
- RAHMAN, M. A., MOSER, A., RÖTZER, T. & PAULEIT, S. (2019): Comparing the transpirational and shading effects of two contrasting urban tree species. – *Urban Ecosyst.* **22**: 683–697; <https://doi.org/10.1007/s11252-019-00853-x>.
- REX, W., OBJARTEL, I. & KRETSCHMER, W. (2018): Untersuchung von Böden mit Belastungen durch sprengstofftypische Verbindungen (STV). – *AbfallwirtschaftsFakten* **23**.
- RKI – ROBERT-KOCH-INSTITUT (2023): Auswirkungen des Klimawandels auf nicht-übertragbare Erkrankungen und die psychische Gesundheit - Teil 2 des Sachstandsberichts Klimawandel und Gesundheit. – *Journal of Health Monitoring* **54**; https://www.rki.de/DE/Aktuelles/Publikationen/Journal-of-Health-Monitoring/GBEDownloads/JHealthMonit_2023_S4_Sachstandsbericht_Klimawandel_Gesundheit_Teil2.html.
- ROSENBERGER, L., LEANDRO, J., WOOD, R., RÖTZER, T., & HELMREICH, B. (2024): Influence of age, soil volume, and climate change on water availability at urban tree sites. – *Sustainable Cities and Society* **113**: 105680; doi.org/10.1016/j.scs.2024.105680.
- RUNGE, K., SCHOMERUS, T., GRONOWSKI, L., MÜLLER, A. & RICKERT, C. (2021): Hinweise und Empfehlungen bei Erdkabelvorhaben. – F+E-Vorhaben im Rahmen des Umweltforschungsplanes des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz (FKZ 3518 86 0700), BfN-Schriften **606**: 217 S.; DOI 10.19217/skr606, [ISBN 978-3-89624-367-6].
- SCHNEIDER, J. (1994): Eignung DV-gestützter Verfahren zur bodenkundlichen Datenerhebung in urbanen Räumen. – Dissertation, 129 S., 42 Abb., 13 Tab.; Essen.
- SCHÜTT, A., BECKER, J. N., GRÖNGRÖFT, A., SCHAAF-TITEL, S. & ESCHENBACH, A. (2022): Soil water stress at young urban street-tree sites in response to meteorology and site parameters. – *Urban Forestry & Urban Greening* **75**: 127692; <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127692>.
- SENMVKU – SENATSVORWALTUNG FÜR MOBILITÄT, VERKEHR, KLIMASCHUTZ UND UMWELT (Hrsg.) (2025): Arbeitshilfe Orientierende Kostenschätzung für Entsiegelungsmaßnahmen. – 19 S.; Berlin.
- SENSBW – SENATSVORWALTUNG FÜR STADTENTWICKLUNG, BAUEN UND WOHNEN (2021): 01.16 Entsiegelungspotenziale 2021. – 13 S.; Berlin.
- SENSBW – SENATSVORWALTUNG FÜR STADTENTWICKLUNG, BAUEN UND WOHNEN (2022): Versiegelung 2021. – Umweltatlas; <https://gdi.berlin.de/geonetwork/srv/api/records/2c8a769b-364e-4596-ace4-4c05cd8eb872>.
- SENSTADTUMWELT – SENATSVORWALTUNG FÜR STADTENTWICKLUNG UND UMWELT (Hrsg.) (2014): Teil 2: Arbeitshilfe Wiederherstellung der natürlichen Bodenfunktionen nach einer Entsiegelung. – 42 S.; Berlin.
- SENSTADTUMWELT – SENATSVORWALTUNG FÜR UMWELT, VERKEHR UND KLIMASCHUTZ (Hrsg.) (2020): Anleitung für die bodenkundliche Kartierung im Land Berlin unter besonderer Berücksichtigung anthropogener Böden im urbanen Bereich. – 149 S. u. Anh. A–D; Berlin.
- STEINWEG, B., MAKOWSKY, L. & DOHLEN, M. (2022): Die Technogenen Substrate in der Ersatzbaustoffverordnung. Entstehung, Eigenschaften, Erkennungsmerkmale. – *Bodenschutz* **4**: 108–115; [doi:10.37307/j.1868-7741.2022.04.03](https://doi.org/10.37307/j.1868-7741.2022.04.03).
- STEWART, I. D. & OKE, T. R. (2012): Local Climate Zones for urban temperature studies. – *Bulletin of the American Meteorological Society* **93** (12): 1879–1900; <https://journals.amet.soc.org/view/journals/bams/93/12/bams-d-11-00019.1.xml>.
- STOLZ, C. & MILLER, C. E. (2022): Geoarchäologie. – 445 S.; Berlin, Heidelberg (Springer); DOI 10.1007/978-3-662-62774-7.
- STROHBACH M. W. & HAASE D. (2012): Above-ground carbon storage by urban trees in Leipzig, Germany: Analysis of patterns in a European city. – *Landscape and Urban Planning* **104** (1): 95–104; [doi:10.1016/j.landurbplan.2011.10.001](https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.10.001).

- STULLE, K. & WULFERT, K. (2001): Entwicklung eines kommunalen Entsiegelungskonzeptes. – Nachhaltiges Niedersachsen **16**: 52 S.; Hildesheim (NLÖ).
- SZABÓ, B., KORÁNYI, D., GALLÉ, R., LÖVEI, G. L., BAKONYI, G. & BATÁRY, P. (2023): Urbanization decreases species richness, and increases abundance in dry climates whereas decreases in wet climates: A global meta-analysis. – Science of the Total Environment **859** (1): 160145; doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160145.
- TEEB DE – NATURKAPITAL DEUTSCHLAND (2012): Der Wert der Natur für Wirtschaft und Gesellschaft - Eine Einführung. – Ein Beitrag Deutschlands zum internationalen TEEB-Prozess, 90 S., Ifuplan, München; Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ), Leipzig; Bundesamt für Naturschutz, Bonn; https://www.ufz.de/export/data/global/190499_TEEB_DE_Einfuehrungsbericht_dt.pdf.
- TEEB DE – NATURKAPITAL DEUTSCHLAND (2016): Ökosystemleistungen in der Stadt - Gesundheit schützen und Lebensqualität erhöhen. – Kurzbericht für Entscheidungsträger, 77 S., Technische Universität Berlin; Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ), Leipzig; https://www.ufz.de/export/data/global/190506_TEEB_DE_Broschuere_KF_Bericht3_Stadt_BF.pdf.
- THIEME-HACK, M. & FLOSS, A. (2024): Ressourcenschutz durch intelligentes Bodenmanagement urbaner Kleinbaustellen - ReBoK. – 67 S., BBSR Online-Publikation **90/2024**; Bonn; <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2024/bbsr-online-90-2024.html>; [ISSN 1868-0097].
- THRUM, T., KLEMM, J., KORINTENBERG, M., KOLLMANN, C. & ZEITZ, J. (2023): Kohlenstoff in versiegelten und entsiegelten Böden in Berlin - Ergebnisse des Forschungsprojektes Kosie. – Broschüre (1. Aufl./Version), Humboldt-Universität zu Berlin; DOI: 10.18452/26242.
- TRAPP, J. H. & WINKER, M. (Hrsg.) (2020): Blau-grün-graue Infrastrukturen vernetzt planen und umsetzen - Ein Beitrag zur Klimaanpassung in Kommunen. – 147 S.; <https://backend.repository.difu.de/server/api/core/bitstreams/b4c09613-728c-4ad3-9957-cfd0fe0a6cfd/content>.
- TRESCH, S., FREY, D., LE BAYON, R. C., ZANETTA, A., RASCHE, F., FLIESSBACH, A. & MORETTI, M. (2019): Litter decomposition driven by soil fauna, plant diversity and soil management in urban gardens. – Sci. Total Environ. **658**: 1614–1629; <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.235>.
- UAN – KOMMUNALE UMWELTAKTION E. V. (2024): Kommunale Starkregenvorsorge in Niedersachsen. Praxisleitfaden für Städte und Gemeinden. – Hannover; <https://www.uan.de/service/publikationen-downloads/leitfaden-starkregenvorsorge>.
- UBA – Umweltbundesamt / SCHUBERT, S., BUNGE, C., GELLRICH, A., VON SCHLIPPENBACH, U. & REISSMANN, D. (2019): Innenentwicklung in städtischen Quartieren: Die Bedeutung von Umweltqualität, Gesundheit und Sozialverträglichkeit. – Hintergrundpapier, 26 S., Umweltbundesamt; <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/innenentwicklung-in-staedtischen-quartieren-die> (letzter Zugriff: 09.09.2024).
- UBA – Umweltbundesamt / RÖSEL, L., HILDMANN, C., WALKO, M. & HEINKELE, T. (2020): Anwendungsgrundsätze für Geringfügigkeitsschwellen zum Schutz des Grundwassers (GFS-Werte) am Beispiel der Niederschlagswasserversickerung. – Abschlussbericht, Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften e. V., Finsterwalde im Auftrag des Umweltbundesamtes, UBA-Texte **151**: 132 S.; https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_151-2020_anwendungsgrundsaeetze_fuer_geringfuegigkeitsschwellen_zum_schutz_des_grundwassers_gfs-werte_am_beispiel_der_niederschlagswasserversickerung.pdf (letzter Zugriff: 01.03.2024).
- UBA – Umweltbundesamt / PANNICKE-PROCHNOW, N., KROHN, C., ALBRECHT, J., THINIUS, K., FERBER, U. & ECKERT, K. (2021): Bessere Nutzung von Entsiegelungspotenzialen zur Wiederherstellung von Bodenfunktionen und zur Klimaanpassung. – Umweltbundesamt, UBA-Texte **141**: 360 S.; <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/bessere-nutzung-von-entsiegelungspotenzialen-zur>.
- UBA – Umweltbundesamt / SCHUBERT, S., ECKERT, K., DROSS, M., MICHALSKI, D., PREUSS, T. & SCHRÖDER, A. (2023): Dreifache Innenentwicklung. Definition, Aufgaben und Chan-

- cen für eine umweltorientierte Stadtentwicklung. Ergebnisse aus dem Forschungsfeld urbaner Umweltschutz und dem Forschungsprojekt „Neues Europäisches Bauhaus weiterdenken - AdNEB“ – 2. Aufl., Hintergrundpapier, 20 S., Umweltbundesamt; <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/dreifache-innenentwicklung> (letzter Zugriff: 09.09.2024).
- UBA – UMWELTBUNDESAMT (2024): Siedlungs- und Verkehrsfläche. – <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/flaeche/siedlungs-verkehrsflaeche#anhaltender-flachenverbrauch-fur-siedlungs-und-verkehrszwecke> (letzter Zugriff: 03.09.2024).
- UMWELTZENTRUM HANNOVER E. V.: Außenstelle Natur - Firmengelände naturnah gestalten. – Webseite; <https://ausstellenatur.de/>.
- VAN DER HEIJDEN, M. G. A., BARDGETT, R. D. & VAN STRAALEN, N. M. (2008): The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. – *Ecol Lett.* **11** (3): 296–310; DOI 10.1111/j.1461-0248.2007.01139.x.
- VOLK, R., NABER, E., LÜTZKENDORF, T., BÖHNKE, D., MÖRMANN, K., SCHULTMANN, F. & NORRA, S. (2021): Identifikation und Bewertung von Entsiegelungspotenzialen als Beitrag zur nachhaltigen Quartiersentwicklung: Zwischenergebnisse aus NaMaRes. – In: MEINEL, G., KRÜGER, T., BEHNISCH, M. & EHRHARDT, D. (Hrsg.): Flächennutzungsmonitoring XIII: Flächenpolitik - Konzepte - Analysen - Tools, IÖR Schriften **79**: 209–219; Berlin (Rhombos); DOI 10.26084/13dfns-p019; [ISBN 978-3-944101-79-8].
- WARDLE, D. A., BARDGETT, R. D., KLIRONOMOS J. N., SETÄLÄ, H., VAN DER PUTTEN, W. H. & WALL, D. H. (2004): Ecological linkages between aboveground and belowground biota. – *Science* **304** (5677): 1629–1633; DOI 10.1126/science.1094875.
- WBGU – WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT DER BUNDESREGIERUNG - GLOBALE UMWELTVERÄNDERUNGEN (2023): Gesund leben auf einer gesunden Erde. – Berlin (WBGU); <https://www.wbgu.de/de/publikationen/publikation/gesundleben>.
- WESSOLEK, G. & FACKLAM, M. (1997): Standort-eigenschaften und Wasserhaushalt von versiegelten Flächen. – *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* **160**: 41–46.
- WESSOLEK, G. (1993): Erarbeitung eines Schlüssels zur Abschätzung von Versickerung und Oberflächenabfluss versiegelter Flächen Berlins. – Unveröffentlichter Bericht im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Außenstelle Berlin.
- WESSOLEK, G. (2001): Bodenüberformung und -versiegelung. – In: BLUME, H.-P., STAHR, K., FISCHER, W., GUGGENBERGER, G., HORN, R., FREDE, H.-G. & FELIX-HENNINGSSEN, P. (Hrsg.) Handbuch der Bodenkunde; DOI 10.1002/9783527678495.hbbk2001002.
- WINKLMAYR, C., MATTHIES-WIESLER, F., MÜTHERS, S., BUCHIEN, S., KUCH, B., AN DER HEIDEN, M. & MÜCKE, H.-G. (2023): Hitze in Deutschland: Gesundheitliche Risiken und Maßnahmen zur Prävention. – *J. Health. Monit.* **8** (S4): 3–34; DOI 10.25646/11645.
- WIRTH, C., BRUELHEIDE, H., FARWIG, N., MARX, J. & SETTELE, J. (Hrsg.) (2024): Faktencheck Artenvielfalt. Bestandsaufnahme und Perspektiven für den Erhalt der biologischen Vielfalt in Deutschland. – 1256 S.; München (oekom); <https://doi.org/10.14512/9783987263361>; [ISBN: 978-3-98726-095-7].
- WITTIG, R. (2008): Siedlungsvegetation - Ökosysteme Mitteleuropas aus geobotanischer Sicht. – 252 S.; Stuttgart (Ulmer); <https://www.ulmer.de/usd-1557161/siedlungsvegetation-.html>; [ISBN 978-3-8001-5642-9].
- ZKA – ZENTRUM KLIMAAANPASSUNG (2024): Die ersten 100 Tage als Klimaanpassungsmanager*in. Tipps für einen gelungenen Einstieg. – 31 S.; <https://zentrum-klimaanpassung.de/media/1103/download?inline> (letzter Zugriff: 01.03.2024).

Anhang

Übersichtstabelle zu Rechtsgrundlagen von Entsiegelungsmaßnahmen

Tab. 14: Übersicht zu Rechtsvorschriften mit Verbindung zur Entsiegelung (aus: UBA (2021), verändert).

rechtliche Instrumente	Bezug zur Entsiegelung	räumlicher Anwendungsbereich	Planungs- bzw. Vollzugsbehörden
<i>Bauplanungsrecht</i>			
Bauleitplanung, §§ 1ff. BauGB	Überplanung bestehender Bebauung, Wiedernutzbarmachung von Flächen	gesamtes Gemeindegebiet (FNP), Teile des Gemeindegebietes (BP)	Gemeinden
Rückbaugesuch, § 179 BauGB	Rückbau zur Umsetzung von Bebauungsplänen oder zur Beseitigung städtebaulicher Missstände	gesamtes Gemeindegebiet	Gemeinden
städtebauliche Sanierung, §§ 136ff. BauGB	kleinflächige Entsiegelungsmaßnahmen zu Sanierungszwecken	Teile des Gemeindegebiets	Gemeinden
Stadtumbau, §§ 171aff. BauGB	großflächiger Rückbau, z. B. von Wohngebäuden	Teile des Gemeindegebiets	Gemeinden
Rückbaupflicht im Außenbereich, § 35 Abs. 5 S. 2 BauGB	Rückbau privilegierter Anlagen im Außenbereich nach Nutzungsaufgabe	Außenbereich	Baubehörden
<i>Bauordnungsrecht</i>			
Begrünungsgebote, LBO	Rückbau rechtswidriger Versiegelungen (z. B. Schottergärten)	bebaute Grundstücke im Gemeindegebiet	Bauaufsichtsbehörden
Beseitigungsanordnungen, LBO	Rückbau aus Gründen von Illegalität und Gefahrenabwehr	bebaute Grundstücke im Gemeindegebiet	Bauaufsichts- bzw. Polizeibehörden
<i>Bodenschutzrecht</i>			
Entsiegelungspflicht, § 5 BBodSchG	Entsiegelung zur Wiederherstellung von Bodenfunktionen	grundsätzlich gesamtes Gemeindegebiet, aber subsidiär; Vorschlag: Geltung im Außenbereich	Bodenschutzbehörden
Sanierungspläne, § 13 BBodSchG	Entsiegelung von Gebieten mit Altlasten	grundsätzlich gesamtes Gemeindegebiet	Bodenschutzbehörden
<i>UVP-Recht</i>			
Umweltverträglichkeitsprüfung, Strategische Umweltprüfung, Umweltprüfung	Entsiegelung als Kompensationsmaßnahme, Prüfung von Standortalternativen	räumlicher Bezug zum Vorhaben	Vorhabenzulassungsbehörden

Tab. 14: Übersicht zu Rechtsvorschriften mit Verbindung zur Entsiegelung (aus: UBA (2021), verändert; Fortsetzung).

rechtliche Instrumente	Bezug zur Entsiegelung	räumlicher Anwendungsbereich	Planungs- bzw. Vollzugsbehörden
<i>Wasserrecht</i>			
Maßnahmen zur Erreichung der Ziele der WRRL (§§ 27ff. WHG)	Gewässerrenaturierung, Gewässeroffenlegung	Gewässerkorridor	Wasserbehörden
Maßnahmen des Risikomanagements (§ 75 WHG)	Stärkung der Wasserretention	Gewässerkorridor, Einzugsgebiet	Wasserbehörden
Retentionsraumausgleich, Wiederherstellung von Überschwemmungsgebieten, § 77 WHG	Ausgleich für Retentionsraumverlust, Wiederherstellung von Überschwemmungsgebieten	Überschwemmungsgebiete an Flüssen	Wasserbehörden
Hochwasserentstehungsgebiete, § 78d WHG	Entsiegelungsgebot und Retentionsraumausgleich für Versiegelung an anderer Stelle	Einzugsgebiete im Gewässeroberlauf	Wasserbehörden
Abwasserbeseitigung, §§ 55ff. WHG, LWG	Förderung der Entsiegelung durch Vorrang der Versickerung und Verrieselung, Niederschlagwasserbewirtschaftung	Grundstücke mit Anschluss an die Kanalisation	Gemeinden
Abwassergebühren, KAG der Länder	Anreiz zur Entsiegelung durch Gebührenermäßigung (gesplittete Abwassergebühr)	Grundstücke mit Anschluss an die Kanalisation	Gemeinden
<i>Naturschutzrecht</i>			
Landschaftsplanung, §§ 8ff. BNatSchG	Identifizierung von Entsiegelungspotenzialen, Planungsebenen: Landschaftsprogramm, Landschaftsrahmenplan, Landschaftsplan, Grünordnungsplan	Landesgebiet, Planungsregion oder Landkreis, Gemeindegebiet, Teile des Gemeindegebietes	Umweltministerium, Planungsverbände oder Untere Naturschutzbehörden, Gemeinden
Eingriffsregelung, §§ 13ff. BNatSchG, § 1a Abs. 3 BauGB	Entsiegelung als Ausgleich für Versiegelungen	räumlicher Bezug zum Eingriff, bei § 1a Abs. 3 räumlicher Bezug gelockert	Vorhabenzulassungsbehörden, Naturschutzbehörden, Gemeinden (§ 1a BauGB)
Biotopverbund, § 21 BNatSchG; Schutzgebiete, §§ 22ff. BNatSchG	ökologische Aufwertung von Flächen durch Entsiegelung	räumlicher Zusammenhang mit Schutzgebiet/Biotopverbund	Naturschutzbehörden
<i>Raumordnungsrecht</i>			
Landes- und Regionalplanung, § 13 Abs. 1 ROG	Ziele und Grundsätze mit Bezug zur Entsiegelung	Landesentwicklungsplan, Regionalpläne	Raumordnungsbehörden
Bundesraumordnungsplan Hochwasserschutz, § 17 Abs. 2 ROG	Entsiegelung als Maßnahme des Hochwasserschutzes	Bundesgebiet	für Raumordnung zuständiges Bundesministerium (derzeit BMI)

Tab. 14: Übersicht zu Rechtsvorschriften mit Verbindung zur Entsiegelung (aus: UBA (2021), verändert; Fortsetzung).

rechtliche Instrumente	Bezug zur Entsiegelung	räumlicher Anwendungsbereich	Planungs- bzw. Vollzugsbehörden
<i>Klimarecht</i>			
§ 19 NKlimaG, Entsiegelungskataster	Erfassung von Flächen, für die eine Möglichkeit zur Entsiegelung besteht	Gemeindegebiet, Grundstücke	Gemeinden
§ 8 (3) KAnG	Entsiegelung zur Wiederherstellung von natürlichen Bodenfunktionen	unterschiedlichste Verantwortungsbereiche	Träger öffentlicher Aufgaben

Autorenschaft

- Dr. André Kirchner

<https://orcid.org/0000-0002-6124-8021>

Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie,
Referat L 2.1 Bodenschutz, Bodenkundliche Landesaufnahme,
Stilleweg 2,
30655 Hannover.

- Dr. Robin Stadtmann

<https://orcid.org/0000-0002-6232-4188>

Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie,
Referat L 2.1 Bodenschutz, Bodenkundliche Landesaufnahme,
Stilleweg 2,
30655 Hannover.

ISSN 1864 – 7529