



Kohlenstoff in versiegelten und entsiegelten Böden in Berlin

Ergebnisse des Forschungsprojektes Kosie



Impressum

DOI: 10.18452/26242
<https://hu.berlin/kosie>

Bearbeitung

Tina Thrum
Juliane Klemm
Margarete Korintenberg
Carlotta Kollmann
Prof. Dr. Jutta Zeitz

Kontakt

Prof. Dr. Jutta Zeitz
Humboldt-Universität zu Berlin
Lebenswissenschaftliche Fakultät
Albrecht Daniel Thaer-Institut für Agrar-
und Gartenbauwissenschaften
Fachgebiet Bodenkunde und Standortlehre

Albrecht-Thaer Weg 2
14195 Berlin-Dahlem
E-Mail: jutta.zeitz@agrار.hu-berlin.de

Layout und Grafik

eschdesigns
Schloßstraße 41a
12165 Berlin

Titelbild oben links

trattiertratti – stock.adobe.com

Druck

Druckerei der Humboldt-Universität zu Berlin
Dorotheenstraße 26
10117 Berlin

Zitiervorschlag

Thrum, T.; Klemm, J.; Korintenberg, M.; Kollmann, C.;
Zeitz, J. (2023): Kohlenstoff in versiegelten und ent-
siegelten Böden in Berlin – Ergebnisse des Forschungs-
projektes Kosie. Broschüre (1. Auflage/Version).
Humboldt-Universität zu Berlin. DOI: 10.18452/26242

Förderhinweis

Das Vorhaben „Kohlenstoff in ver- und entsiegelten
Böden (Kosie)“ (Projektlaufzeit: 11/2019 bis 05/2023)
wurde im Berliner Programm für Nachhaltige Entwick-
lung (BENE) gefördert aus Mitteln des Europäischen
Fonds für Regionale Entwicklung und des Landes Berlin
(Förderkennzeichen 1280-B5-O).

Berlin, 01.04.2023



HUMBOLDT-UNIVERSITÄT ZU BERLIN



Kohlenstoff in versiegelten und entsiegelten Böden in Berlin

Ergebnisse des Forschungsprojektes Kosie

Inhalt

Einführung	05
Worum geht es?	05
Was ist bereits bekannt?	07
Vorgehensweise	09
Definitionen	09
Auswahl und Lage der Untersuchungsstandorte	10
Untersuchung der Böden	12
Datenauswertung	14
Forschungsergebnisse	15
Eigenschaften ver- und entsiegelter Stadtböden	15
Organische Kohlenstoffspeichermenge	16
Parameter zur Berechnung der organischen Kohlenstoffspeichermenge	18
Herausforderung in Stadtböden: Künstlicher organischer Kohlenstoff	20
Versiegelte Böden: Natürliche organische Kohlenstoffspeichermenge	22
Entsiegelte Böden: Natürliche organische Kohlenstoffspeichermenge	26
Resümee und Empfehlungen	29
Quellenverzeichnis	32

Einführung

Worum geht es?

Die natürlichen terrestrischen Kohlenstoffspeicher – Vegetation und Böden – stehen im Zusammenhang mit dem atmosphärischen Treibhausgas Kohlendioxid (CO₂). Böden können einerseits CO₂ freisetzen, und andererseits als CO₂-Senke wirken, indem sie langfristig organischen Kohlenstoff in Form von Humus binden und so der Atmosphäre entziehen. Der Schutz und die Förderung von natürlichen Kohlenstoffspeichern in Böden ist ein gesellschaftlicher Beitrag zum Klimaschutz. Das Land Berlin leistet durch die Unterstützung des Forschungsprojektes „Kohlenstoff in versiegelten und entsiegelten Böden Berlins (Kosie)“ im Berliner Programm für Nachhaltige Entwicklung (BENE) einen solchen Beitrag.

Gespeicherter organischer Kohlenstoff in Berlin

in Millionen Tonnen [2] [3]

Pflanzen	3,3
unversiegelter Boden	5,5
Moorboden	1,1

Bedeutung der Kohlenstoffspeicher von Böden

Weltweit spielen Böden mit einem Kohlenstoffspeicher von ca. 1.700 Milliarden Tonnen im oberen Meter eine entscheidende Rolle im Klimasystem. Sie speichern fast doppelt soviel Kohlenstoff wie die Atmosphäre und die Landpflanzen zusammen [1]. Im Stadtgebiet Berlins sind 3,3 Millionen Tonnen Kohlenstoff in der oberirdischen Vegetation, insbesondere in den Stadtbäumen, gespeichert. Die doppelte Menge an Kohlenstoff, mit ca. 6,6 Millionen Tonnen, befindet sich in unversiegelten Böden, einschließlich der Berliner Moore [2] [3].

Städte und ihre Rolle für das Klima

Ein Haupttreiber des Klimawandels sind die CO₂-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger. Urbane Räume sind eine Quelle von mehr als 70 % der weltweiten CO₂-Emissionen, da durch sie mehr als zwei Drittel der weltweit produzierten Energie verbraucht werden [4]. In Deutschland wohnen 32 % der Bevölkerung in Großstädten mit mehr als 100.000 Einwohnern. Diese urbanen Räume nehmen 3,9 % der deutschen Landesfläche ein [5]. In Berlin betragen die CO₂-Emissionen allein im Bereich des Endenergieverbrauches 2021 rund 15 Millionen Tonnen CO₂ [6]. Berlin ist sowohl die flächengrößte, als auch die einwohnerstärkste Stadt der BRD. Städte, wie Berlin, haben damit eine besondere Verantwortung, Strategien zum Klimaschutz und zur Klimaanpassung zu entwickeln und umzusetzen, beispielsweise durch das Management von natürlichen Kohlenstoffspeichern.





Städte und ihre Böden

In urbanen Räumen besteht ein besonderer Bedarf, unterschiedlichste Nutzungen zu gewährleisten. Dies führt dazu, dass ehemals natürliche Böden durch künstliche Materialien in der Tiefe und an der Oberfläche verändert werden. In Städten entwickeln sich Böden häufig auf menschlich umgelagertem Material. Prominenteste Beispiele der Stadt Berlin sind die Trümmerberge. Insgesamt prägen „anthropogene Böden“ mindestens 56 % der Stadtfläche [7]. Viele Böden sind durch eine Oberflächenversiegelung verändert, wodurch unterschiedliche Funktionen des Bodens weitgehend unterbunden werden [8]. Dies betrifft beispielsweise die freie Versickerung von Wasser, die biologische Aktivität oder den Gasaustausch der Böden. In Berlin lag der Versiegelungsgrad 2021 bei 34 % [9]. In urbanen Räumen steht das Management von Böden im Sinne des Klimaschutzes und der Klimaanpassung durch die fortschreitende Urbanisierung und Flächeninanspruchnahme vor besonderen Herausforderungen.



Böden in der Klimaschutzpolitik Berlins

Die Klimaschutzziele des Landes Berlin beinhalten die Reduzierung der landesweiten CO₂-Emissionen bis spätestens 2045 um 95 % im Vergleich zu 1990 (EWG Bln, Novelle 2021). Der Berliner Senat hat sich verpflichtet, Strategien und Maßnahmen zu entwickeln, um diese Ziele zu erreichen. Im Umsetzungskonzept des Berliner Energie- und Klimaschutzprogramms 2030 (BEK) wird auch das Handlungsfeld Boden thematisiert. Der Sicherung und Entwicklung von CO₂-Senken, insbesondere in Wald- und Moorböden, wird ein hoher Stellenwert zugesprochen [10]. Auch der Schutz der endlichen Ressource Boden durch Vermeidung weiterer Bodenversiegelung ist im Berliner Bodenschutzgesetz verankert (Bln BodSchG, Novelle 2019) [11].

Einsatz der Forschungsergebnisse des Projektes „Kosie“

Die Ergebnisse des Projektes „Kosie“ sind Teil der Umsetzung des Berliner Energie- und Klimaschutzprogramms 2030 (BEK) für den Zeitraum 2022 bis 2026 [10]. Durch die Integration der Ergebnisse des Projektes in die Bodenpunktdatenbank des Landes Berlin wird die bodenbezogene Datengrundlage erweitert und verbessert. Die Ergebnisse werden in die Planungshinweise zum Bodenschutz [12] einfließen, indem sie die Bewertung der Schutzwürdigkeit von Böden unterstützen.

Ziele des Projektes „Kosie“: Wissensbasiertes Management

Um natürliche C-Speicher in einer Stadtplanung berücksichtigen zu können, sind Kenntnisse der Verteilung und Ausprägung dieser entscheidend. Das Projekt „Kosie“ umfasst erstmals gezielte Untersuchungen an ver- und entsiegelten Berliner Böden. Diese Datenbasis ergänzt die bodenkundlichen Erkenntnisse für den bisher nicht berücksichtigten, versiegelten Bereich Berlins, der 34 % des Stadtgebietes umfasst. Ziel der vorliegenden Broschüre ist es, einen Einblick in die Vielfalt der ver- und entsiegelten Böden Berlins zu geben und ihre unterschiedlichen Eigenschaften hinsichtlich des organischen Kohlenstoffs zu beleuchten.

Was ist bereits bekannt?

Kohlenstoffspeicher der Stadtböden

Die Höhe des organischen Kohlenstoffs (C_{org}) in Böden wird durch die menschliche Nutzung beeinflusst [13]. Dies zeigt sich insbesondere bei Stadtböden. Hier wird beispielsweise offener Boden beim Straßenbau durch Asphalt- oder Betondecken versiegelt. Dadurch können sich die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Bodens verändern [14]. Auch wird bei der Bauausführung der Boden vor der Versiegelung oft abgetragen, verdichtet und mit grobkörnigem Material aufgefüllt [15]. Durch die anschließend aufgetragene Versiegelung findet der Gasaustausch des Bodens mit der Atmosphäre nur noch eingeschränkt statt [8]. Der Abschluss des Bodens von Luft und Wasser bewirkt zudem ein Absterben der Bodenfauna. Dies hat direkten Einfluss auf die C-Speicherfähigkeit des Bodens. Die Annahme, dass versiegelte Böden somit eine geringere C-Speichermenge aufweisen als unversiegelte Böden, wurde bereits durch mehrere empirische Studien belegt.

Kohlenstoffspeicher der versiegelten und entsiegelten Böden

In einigen internationalen Studien wurden bereits Daten zu den Kohlenstoffspeichern von Stadtböden erhoben. Darin wurden bisher jedoch nur selten versiegelte Böden, zumeist mit einer geringen Probenzahl und unterschiedlichen Beprobungstiefen, untersucht. Zudem sind bisher keine Studien zu den Kohlenstoffspeichern von entsiegelten Böden durchgeführt worden.

Beispiele organischer Kohlenstoffspeicher von Stadtböden

Quelle	Stadt/Land	Typ	Anzahl untersuchter Böden	Bodentiefe [cm]	C_{org} -Speicher [kg/m ²]
	Paris/France	unversiegelt	593	0 – 30	9,9 ± 3,9
		versiegelt	9	0 – 30	3,4 ± 1,2
Cambou et al. [16]	New York City/USA	unversiegelt	58	0 – 30	11,3 ± 11,5
		versiegelt	8	30 – 100	14,5 ± 34,7
Wei et al. [17]	Nanjing City/China	unversiegelt	7	0 – 20	4,5
		versiegelt	14	0 – 20	2,4
Edmondson et al. [18]	Leicester/ U.K.	unversiegelt	25	0 – 100	20,2
		versiegelt	12	40 – 100	6,7
Du et al. [19]	Guangzhou City/China	unversiegelt	72	0 – 20	2,6 ± 1,3
Klingenfuß et al. [2]	Berlin/BRD	unversiegelt	231	0 – 100	5,2 – 13,2
Vasenev et al. [20]	Moskau/ Russland	unversiegelt	155	0 – 150	3,3 ± 1,9

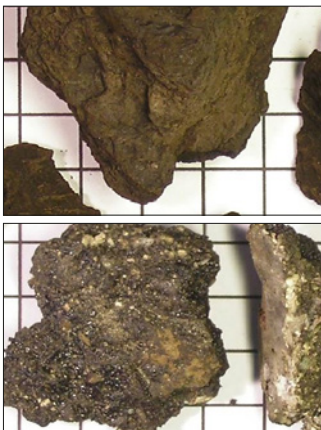


Im Projekt „NatKoS“ wurden umfangreiche Untersuchungen zum organischen C-Speicher der unversiegelten Berliner Böden durchgeführt [2].
<https://hu.berlin/natkos>

Gesamter organischer Kohlenstoff (C_{org})



Die organische C-Speichermenge in Stadtböden setzt sich aus humusbürtigen und technogenen Anteilen zusammen. Nur der humusbürtige Anteil ist als schutzwürdig zu bewerten.



Kohlen (oben) und deren Verbrennungsprodukte, sowie Straßenaufbruch (unten) sind zwei in Stadtböden häufig vorkommende technogene Materialien, die organischen C beinhalten [23].

Herausforderung bei der Untersuchung von Stadtböden: Anteile von künstlichen Kohlenstoffverbindungen

In Stadtböden kommt häufig künstlich erzeugtes und abgelagertes (sog. technogenes) Material vor, wie z. B. Aschen, Kohleprodukte, Bauschutt, Hausmüll. Nach Auswertungen von Makki & Thestorff [21] ist etwa die Hälfte der Berliner Böden durch technogene Bildungen beeinflusst, welche dort entweder in reiner Form oder als Gemisch mit natürlichen Substraten vorliegen. Nicht nur der Bodenumus, sondern auch diese künstlichen Materialien können Kohlenstoff beinhalten [22] [23]. Da der technogene organische Kohlenstoff im Boden jedoch kaum oder gar nicht in den natürlichen globalen Kohlenstoffkreislauf eingebunden ist, leistet er keinen Beitrag zum Klimaschutz im Sinne der Aufnahme und Speicherung von atmosphärischem CO₂. Diesen Beitrag leistet nur der humusbürtige organische Kohlenstoff. Generell ist davon auszugehen, dass sich technogene Kohlenstoffverbindungen im Boden anders verhalten, z. B. indem sie teilweise langsamer abgebaut werden als der humusbürtige Kohlenstoff [24]. Darüber hinaus enthalten viele technogene Materialien auch Schadstoffe, wie PAK und Schwermetalle [25] [26] [27].

Problematisch ist, dass übliche Labormethoden zur Bestimmung des organischen Bodenkohlenstoffs nicht zwischen humusbürtigen und technogenen Anteilen unterscheiden können [28] [29]. Das heißt, dass der so ermittelte gesamte organische Kohlenstoff auch Anteile des technogenen organischen Kohlenstoffs beinhaltet. Zur differenzierten Bewertung der C-Speichermenge vor dem Hintergrund des Klimaschutzes ist jedoch aus o. g. Gründen eine Auftrennung des organischen Kohlenstoffs unbedingt vonnöten.

Die Bestimmung der humusbürtigen und technogenen Mengenanteile am gesamten organischen Kohlenstoff ist eine laboranalytische Herausforderung und noch Gegenstand aktueller Forschungen. In bisherigen Studien kamen z.T. unterschiedliche Methoden zum Einsatz, weshalb deren Ergebnisse nicht immer direkt miteinander vergleichbar sind. Die verfügbaren Zahlen belegen jedoch die Relevanz des technogenen organischen C, besonders in durch den Mensch veränderten Böden. Im Forschungsprojekt „Kosie“ wurde für die Stadt Berlin eine erste systematische Studie mit über 100 Proben zu diesem Thema durchgeführt.

Beispiele für Mengenanteile des technogenen organischen Kohlenstoffs in Stadtböden

Quelle	Stadt/Land	Anzahl	Anteil des technogenen C am gesamten organischen C
Azzolina et al. [30]	New York/USA	24 (Böden)	Oberboden: 5 – 53 % Unterboden (UB): 7 – 100 %
Edmondson et al. [31]	England	55 (Böden)	28 – 39 %
Lehmann et al. [32]	Deutschland	74 (Proben)	natürlicher UB: 30 % menschlich beeinfl. UB: 60 %
Rawlins et al. [33]	Coventry, Stoke-on-Trent, Glasgow/UK	30 (Proben)	16,4 % 12,4 % 32,8 %
Lorenz et al. [34]	Stuttgart/BRD	7 (Böden)	18 – 73 %

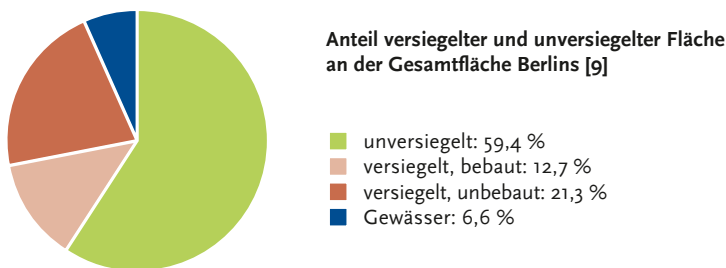
Vorgehensweise

Definitionen

Im Projekt „Kosie“ wurden die organischen C-Speicher von ver- und entsiegelten Böden innerhalb der administrativen Grenzen Berlins untersucht und bewertet. Vor Auswahl der Untersuchungsstandorte musste zunächst entschieden werden, wie ver- und entsiegelte Böden im Projekt definiert werden. Anschließend wurden die Standorte nach weiteren fachlichen Kriterien ausgewählt und möglichst gleichmäßig über das Stadtgebiet verteilt (Karte Seite 11).

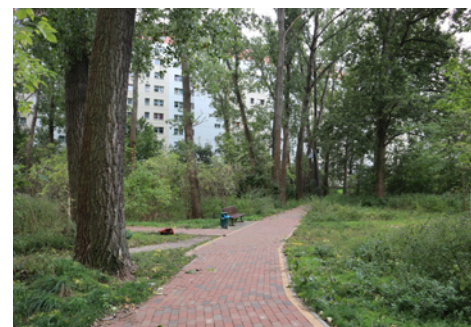
Versiegelte Böden

Unter versiegelten Böden werden im Projekt „Kosie“ solche Böden verstanden, die an der Oberfläche mit festen Materialien bedeckt sind. Diese Definition geht auf den Umweltatlas Berlin zurück. Aktuell sind 34 % (30.246 ha) der Fläche Berlins versiegelt [9]. Versiegelte Flächen werden nochmals in „unbebaut versiegelt“ und „bebaut versiegelt“ unterschieden. Im Projekt wurden ausschließlich unbebaut versiegelte Standorte untersucht, die mit unterschiedlichen Belagsarten entweder voll- oder teilversiegelt sind. Der Anteil unbebaut versiegelter Flächen an der Berliner Gesamtfläche beträgt 21,3 %. Böden, deren Oberflächen ausschließlich verdichtet sind, wie beispielsweise Schotterflächen oder wassergebundene Decken, waren nicht Teil der Untersuchung.



Entsiegelte Böden

Unter entsiegelten Böden werden solche Böden verstanden, an denen in der Vergangenheit Entsiegelungsmaßnahmen durchgeführt worden sind. Das heißt, von diesen Böden wurde eine oberflächige Versiegelungsschicht entfernt. Im Umweltatlas Berlin sind derzeit 223 Flächen mit insgesamt 84 ha verzeichnet, von denen 46 Flächen (ca. 20 ha) bereits voll- oder teilentsiegelt wurden (Stand 2021). Die Karte der Entsiegelungspotenziale gibt einen Überblick hierzu [35].



Unbebaut versiegelte Untersuchungsstandorte in Berlin
Oben: Teilversiegelter Fußweg in einer Grünanlage in Hellersdorf
Unten: Vollversiegelte Asphaltstraße im Grunewald



Links: Ehemalige Buswendeschleife vor der Entsiegelungsmaßnahme [36]
Rechts: Gleiche Fläche als Grünanlage nach der Entsiegelung [37]

Auswahl und Lage der Untersuchungsstandorte



Einflussfaktor auf den organischen C-Speicher der versiegelten Böden
Belagsarten mit verschiedenen Versiegelungsgraden

Die Auswahl der **versiegelten Untersuchungsstandorte** basiert auf Standorteigenschaften, welche die organische C-Speichermenge im Boden potentiell beeinflussen, wie z.B. Nutzung, Belagsart, Versiegelungsgrad, Geologie, Grundwasserflurabstand, Vegetationsbedeckung sowie Stadtstruktur- und Flächentyp. Es wurde eine möglichst ausgeglichene statistische Verteilung der Standorte auf die typischen Ausprägungen dieser unterschiedlichen Einflussfaktoren angestrebt. Zudem wurde auf eine gleichmäßige räumliche Verteilung im gesamten Stadtgebiet geachtet, um eine Flächenrepräsentativität für Berlin zu erreichen und um charakteristische Ausprägungen des Stadtgebiets abzubilden.

Bei den **entsiegelten Untersuchungsstandorten** war eine solche fachliche Vorauswahl nur eingeschränkt möglich, da nur wenige Flächen für Bodenuntersuchungen verfügbar und zugänglich waren. Es konnten jedoch verschiedene Nutzungstypen berücksichtigt werden. Die Untersuchungsstandorte sind nicht gleichmäßig auf das Berliner Stadtgebiet verteilt, da viele Entsiegelungsmaßnahmen in den Randbezirken durchgeführt wurden.

Eine wichtige Quelle zum Auffinden geeigneter Flächen waren die Entsiegelungspotentiale im Umweltatlas Berlin [35], über den allein 14 Standorte mit entsiegelten und 9 mit versiegelten Böden akquiriert werden konnten. Weitere Standorte wurden durch direkte Anfragen bei Bauleiter:innen offener Baustellen, städtischen Institutionen und Privatpersonen gefunden.

Anzahl untersuchter Standorte und Bodenprofile

	Standorte	Bodenprofile
versiegelt	40	47
entsiegelt	20	20
insgesamt	52	67

Insgesamt konnten 52 Standorte untersucht werden. Wenn ein versiegelter Standort eine große Heterogenität aufwies, wurden hier zwei Bodenprofile aufgenommen. An acht „teilentsiegelten“ Standorten konnte gleichzeitig ein ver- und ein entsiegelter Boden in unmittelbarer Nähe beprobt werden.

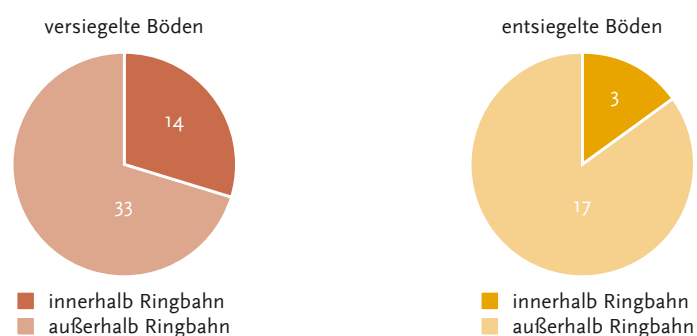
Die Böden verteilen sich auf 12 Stadtbezirke. 50 Böden befinden sich außerhalb und 17 innerhalb der Berliner Ringbahn. Insbesondere in der Gruppe der entsiegelten Böden dominieren Standorte außerhalb des S-Bahn-Rings. Die untersuchten Nutzungstypen umfassen Forst, Grünanlage, Kleingarten, Siedlung, Verkehr, Industrie und Landwirtschaft.

Anzahl untersuchter Böden nach Nutzungstypen

Nutzung	versiegelte Böden	entsiegelte Böden
Forst	5	7
Grünanlage	9	10
Kleingarten	4	1
Siedlung	9	2
Verkehr	18	-
Industrie	1	-
Landwirtschaft	1	-

Bei den versiegelten Böden wurden insgesamt 10 verschiedene Belagsarten untersucht, darunter Asphalt- und Betondecken, verschiedene Plattenbeläge sowie Pflastersteinarten und -größen. 23 Böden waren voll- und 24 teilversiegelt.

Anzahl der untersuchten Böden inner- und außerhalb der Berliner Ringbahn



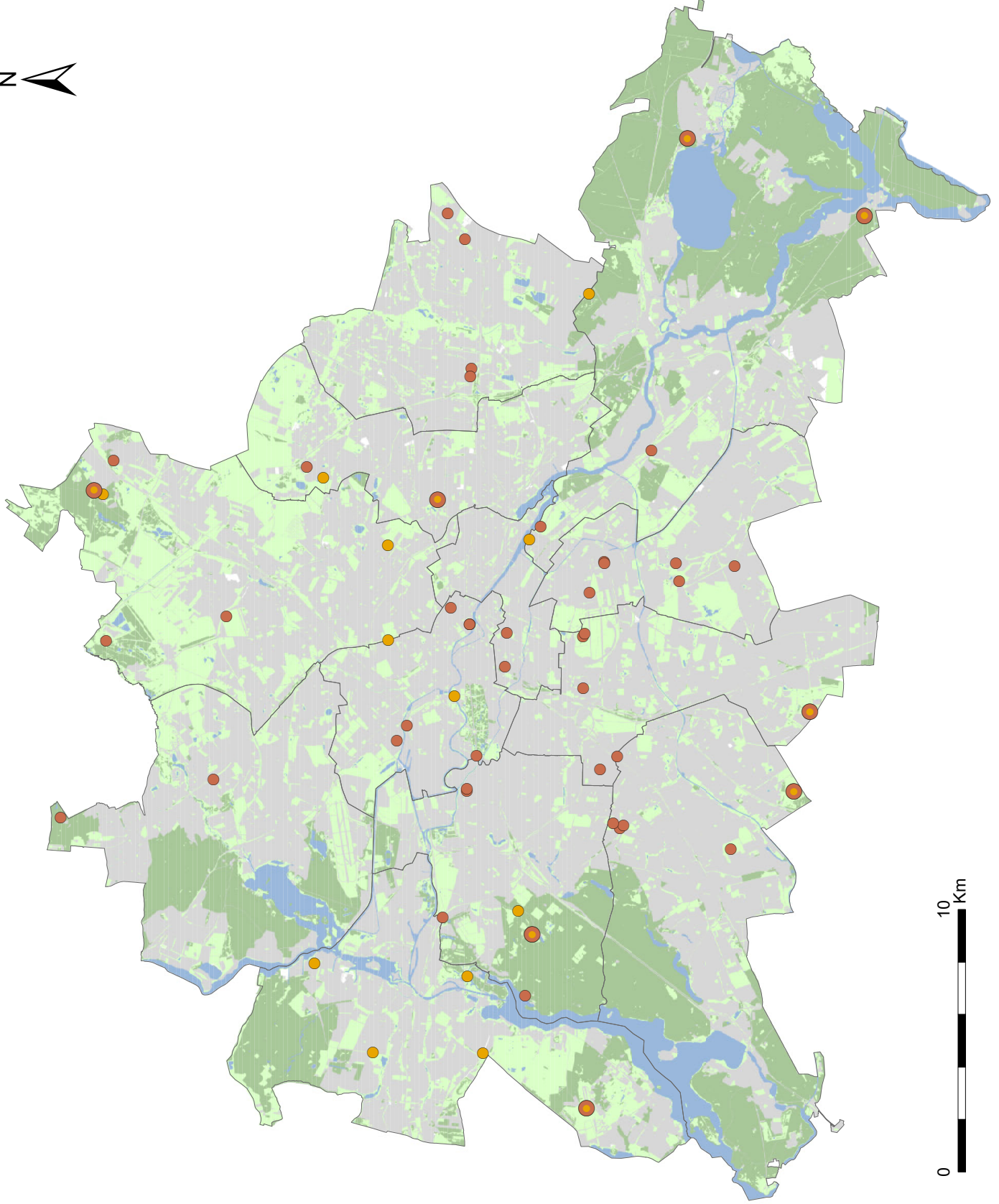
Lage der Untersuchungsstandorte im Projekt „Kosie“

Bodenprofile

- entsiegelt
- versiegelt
- ver- und entsiegelt

Topographie

- Grünflächen
- Forst
- Gewässer
- Siedlung
- Bezirksgrenzen



Datengrundlage
Umweltatlas Berlin /
Reale Nutzung 2020,
Geoportal Berlin /
Ortsteile von Berlin



Bodenuntersuchung an offenen Baustellen im Straßenbereich



Probenvorbereitung im Labor

Untersuchung der Böden

Bodenuntersuchung am Standort

An den ausgewählten Standorten wurde eine Grube von mindestens 1 m Tiefe ausgehoben. Wenn dies nicht möglich war, wurde mit einem speziellen Handbohrer gearbeitet. Anschließend wurde das Bodenprofil an einer der Seitenwände der Grube nach den Richtlinien der Bodenkundlichen Kartieranleitung [38] und der „Anleitung für die bodenkundliche Kartierung im Land Berlin“ [21] aufgenommen. Am Standort wurden u.a. folgende Bodeneigenschaften notiert, die für die Berechnung bzw. Schätzung der C-Speichermenge nötig sind:

- Abfolge der Bodenhorizonte und deren Tiefenstufen,
- Bodenfarbe (MUNSELL-Farbwert),
- Durchwurzelungsintensität,
- Humus- und Carbonatgehalt,
- Feinbodenart und Volumenanteil des Grobbodens,
- Informationen über anthropogen abgelagerte Schichten und den Gehalt an künstlichen Beimengungen (z.B. Scherben, Mörtel, Ziegel, Kohle).

An den entsiegelten Standorten wurden zusätzlich Kurzprofile (30 cm Tiefe) an flächenrepräsentativen Punkten in der Nähe des „Hauptprofils“ untersucht. Sie dienen der Abschätzung der kleinräumigen Heterogenität der obersten humosen Bodenhorizonte.

Entnahme von Bodenproben

An den Bodenprofilen wurden horizontweise repräsentative Volumen- und Mischproben entnommen. Die dem Mineralboden aufliegende Humusschicht (Auflagehumus) wurde flächenbezogen mittels Stechring (Ø 28 cm) an vier regelmäßig um das Bodenprofil verteilten Stellen beprobt, um der kleinräumigen Heterogenität gerecht zu werden.

Bodenuntersuchung im Labor

Die Probenlagerung, -aufbereitung und Analysen folgten standardisierten Methoden (VDLUF, DIN, ISO, GAFA). Die folgende Tabelle zeigt den Umfang der im Labor untersuchten Parameter und die Anzahl der analysierten Proben.

Parameter	Probenumfang
gesamter Kohlenstoff [%]	334
gesamter Stickstoff [%]	334
gesamter organischer Kohlenstoff [%]	334
technogener und humusbürtiger Kohlenstoff [%]	137
pH-Wert	294
Dichte des Feinbodens [g/cm ³]	394
Carbonatgehalt [%]	286
Korngrößenverteilung	101



Bodenuntersuchung vor Ort. (1) An entsiegelten Standorten wurden die Bodengruben überwiegend selbst ausgehoben. (2) An versiegelten Standorten wurden die Profile entweder an der Seitenkante der Versiegelungsdecke gegraben oder es wurden offene Baustellengruben genutzt, die häufig eine mittige Positionierung des Profils innerhalb der versiegelten Fläche ermöglichten. (3) Im Wald und gelegentlich in Siedlungsbereich befindet sich eine Humusschicht an der Oberfläche des Mineralbodens (Humusauflage). Diese wurde mit einem Stechring beprobt. (4) Wenn eine Grabung nicht möglich war, beispielsweise aufgrund starker Verdichtung oder sehr hohen Grobbodengehaltes, wurde ein Handbohrer genutzt. Mit ihm konnten die Tiefenlage und charakteristische Eigenschaften der tiefer liegenden Horizonte bestimmt werden. (5) Für die Berechnung der organischen C-Speichermenge pro Volumeneinheit wurden Stechzylinderproben benötigt. Die Stechzylinder wurden mit einem Hammer in den Boden getrieben, händisch herauspräpariert und in Becher abgefüllt. Hiermit wird die Bodendichte bestimmt.



Recherche von Archivdaten

Historische Karte von 1948 (oben), Luftbildaufnahmen von 1992 (mitte) und 2022 (unten) einer Fläche im Osten Berlins mit den Untersuchungspunkten 60 und 61 [39] [40].

C-Speichermenge im Boden in kg/m²

$$= \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{C_{Hi}}{100} \right) \cdot M_{Hi} \cdot \rho_{Hi} \cdot \left(1 - \frac{V_{Hi}}{100} \right) \right]$$

n = Anzahl der Bodenhorizonte

C_{Hi} = organischer C-Gehalt für Bodenhorizont i [%]

M_{Hi} = vertikale Horizontmächtigkeit für Bodenhorizont i [cm]

ρ_{Hi} = Dichte des Feinbodens für Bodenhorizont i [g/cm³]

V_{Hi} = Volumenanteil des Grobbodens für Bodenhorizont i [%]

Datenauswertung

Recherche von Standortdaten und Archivdaten zur historischen Flächennutzung

Im Rahmen einer detaillierten Recherche wurden bereits vorhandene Informationen zu den potentiellen Einflussfaktoren der organischen C-Speichermenge im Boden geprüft und, je nach Datenverfügbarkeit, ergänzt. Als Quelle wurde das Geoportel Berlin [39] genutzt.

Weiterhin wurde die historische Flächennutzung der untersuchten Standorte recherchiert. So konnten weitere potentielle Einflussfaktoren, wie die prägende Vornutzung, die Dauer der aktuellen Nutzung und/oder des aktuellen Versiegelungszustandes identifiziert werden. Hierfür wurden vor allem Luftbilder aus den Jahren 1928 bis 2022 des Geoportals Berlin, GoogleEarth-Aufnahmen von 1943 bis 2021 und GoogleStreetView ab 2008 sowie historische Karten [39] [40] ausgewertet. Auch in Interviews mit Flächenbetreuer:innen, Förster:innen, Mitarbeitenden der Bezirksämter oder Anwohner:innen konnten historische Daten erfasst werden.

Speicherung der Daten

Alle erhobenen Daten aus den Bodenuntersuchungen am Standort, den Laboranalysen und den Recherchearbeiten wurden in einem mehrstufigen Prozess qualitätsgesichert und in einer Datenbank mit Microsoft Access 2016 erfasst.

Berechnung der organischen Kohlenstoffspeichermenge im Boden

Die organische C-Speichermenge wurde horizontweise berechnet, sowie für den Oberboden (bis 30 cm), den Unterboden (30–100 cm) und für die gesamten Bodenprofile (bis 100 cm). In die Berechnungsformel fließt für jeden Horizont dessen organischer C-Gehalt, dessen Mächtigkeit sowie die Dichte des Feinbodens und der Volumenanteil des Grobbodens ein (Seite 19). Die organischen C-Speichermengen der einzelnen Horizonte wurden für die verschiedenen Tiefenstufen entsprechend aufsummiert. Die Angabe der organischen C-Speichermenge erfolgt im Projekt bodenprofilbezogen in Kilogramm Kohlenstoff pro Quadratmeter [kg/m²].

Die Bodendichte und der organische C-Gehalt wurden für die Mehrheit der Bodenhorizonte im Labor bestimmt. Für die restlichen Horizonte wurde der organische C-Gehalt auf Basis der Parameter Farbe und Bodenart abgeleitet und die Bodendichte mittels einer Pedotransferfunktion anhand des organischen C-Gehaltes bestimmt.

Statistische Auswertung

Für die statistische Datenauswertung, Fehlerkontrolle, Validierung und Bewertung der erhobenen Standort- und Bodendaten wurden die Software R (R Core Team 4.2.2) und Microsoft Excel 2016 verwendet.

Forschungsergebnisse

Eigenschaften ver- und entsiegelter Stadtböden

Berlin ist eine Stadt voller Wandel und Umbrüche, was sich auch in ihrem Untergrund widerspiegelt. Stadtböden kennzeichnet, dass der Mensch der dominierende bodenbildende Faktor ist. Durchmischung und/oder Überlagerung des natürlichen Ausgangsmaterials mit unterschiedlichsten Substraten prägen urbane Böden. Dies trifft insbesondere für die Böden dieser Forschungsarbeit zu, denn aktuell und ehemals versiegelte Flächen sind besonders beeinflusst durch bauliche Veränderung. Maßnahmen, wie Bodenabtrag, Materialauftrag und Versiegelung, werden durchgeführt, um die Verkehrstauglichkeit und Tragfähigkeit einer Fläche zu gewährleisten und eine Nivellierung der Geländeoberfläche zu erreichen. Zusätzlich dienen unbebaut versiegelte Bereiche, insbesondere Straßen und Wege, auch als Orte der unterirdischen Infrastruktur, so dass hier der Boden in regelmäßigen, z.T. relativ kurzen zeitlichen Abständen wiederholt umgelagert oder aufgefüllt wird, um Verlegung und Wartung von Versorgungsleitungen zu gewährleisten.

Alle 67 Böden dieser Forschungsarbeit sind durch menschliche Veränderungen gekennzeichnet. Hierbei handelt es sich vornehmlich um Aufträge von Baumaterialien, wie Sande, Bauschutt sowie die oftmals technogenen Materialien der Versiegelungsschicht. Diese bilden in allen untersuchten Böden im Mittel die oberen 66 cm, wobei 33 Böden im obersten Meter komplett aus umgelagertem Material bestehen. Typisch für Berlin ist, dass in 13 untersuchten Böden auch Trümmerschutt vorkommt, der hier im Mittel unterhalb von 25 cm ansteht. Solche Böden befinden sich vorwiegend auf den prominenten Trümmerschuttbergen sowie im innerstädtischen Bereich. Des Weiteren stammen Teile des umgelagerten und aufgetragenen Materials in 23 der untersuchten Böden aus der Umgebung des Standortes. Diese meist sandigen Substrate lagen im Mittel dort zwischen 20 und 57 cm Tiefe vor. Einige, oft im Randbereich der Stadt liegende Standorte weisen im Unterboden auch natürliche Bodenhorizonte auf, die nicht menschlich gestört oder verändert wurden. 32 ver- und entsiegelte Böden verfügen über solche Relikte von ehemaligen natürlichen Böden, die sich dort im Mittel unterhalb von 46 cm Tiefe befinden. Sie bestehen mehrheitlich aus Schmelzwasser- und Geschiebedecksanden.



Trümmerschutt im Untergrund eines entsiegelten Forstweges im Grunewald

Nur die oberen 5 cm des Bodens bestehen nicht aus Trümmerschutt, sondern aus dem seit der Entsigelung vor Ort gebildeten Auflagehumus.



Boden unter einem versiegelten Zufahrtsweg einer ehemaligen Gärtnerei in Marienfelde

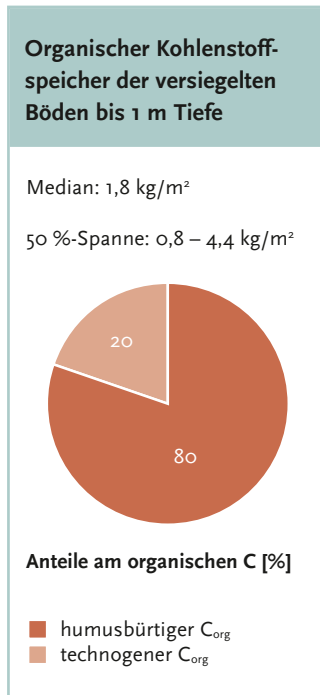
Das aufgeschüttete Material der oberen 47 cm überlagert Relikte des natürlichen Bodens aus Geschiebedecksanden.

Organische Kohlenstoffspeichermenge

Versiegelte Berliner Böden

Die versiegelten Berliner Böden speichern im Mittel $1,8 \text{ kg/m}^2$ organischen C bis 1 m Tiefe. Damit ordnen sich die Speichermengen eher im unteren Bereich vergleichbarer internationaler Ergebnisse ein (Tabelle, Seite 7). Ein Grund hierfür ist, dass im Projekt „Kosie“ in die Berechnung der C-Speichermenge eines Profils auch der versiegelte Bereich mit einfließt. Diese Horizonte enthalten kaum oder keinen organischen C. Viele Studien schließen diesen Bereich eines Profils aus und die Oberkante der Bodenaufnahme setzt erst unterhalb der Versiegelungsdecke an, wodurch sich der potentielle Speicher erhöht. Auch im Vergleich zu den von Klingenfuß et al. [2] untersuchten unversiegelten Böden Berlins sind die Speichermengen der versiegelten Böden niedriger. Die Hälfte der versiegelten Böden speichern zwischen $0,8 - 4,4 \text{ kg/m}^2$. Die hohe Streuung der Werte von 0 bis zu über 32 kg/m^2 weist auf die große Heterogenität der versiegelten Böden hin – ein Ergebnis, welches sich mit dem anderer Untersuchungen zu Stadtböden deckt.

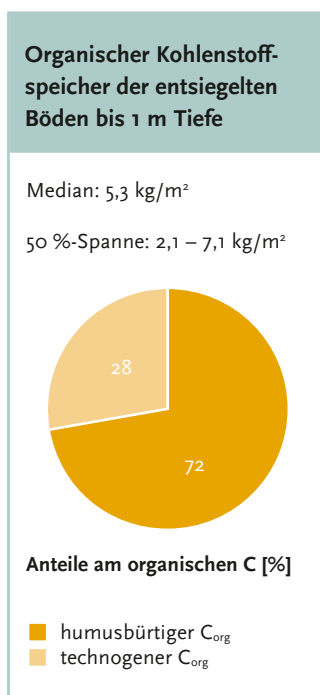
Die organische C-Speichermenge setzt sich in Stadtböden aus einem humusbürtigen und einem technogenen Anteil zusammen (Seite 8). Im Mittel 20 % des gesamten organischen C-Speichers der versiegelten Böden und 28 % des Speichers der entsiegelten Böden Berlins sind technogenen Ursprungs. Das bedeutet, dass der organische C-Speicher zur Bestimmung des humusbürtigen und schützenswerten Anteils um diesen technogenen Anteil korrigiert werden muss. In der internationalen Literatur variieren die technogenen organischen C-Anteile stark, wobei die Ergebnisse im Projekt „Kosie“ innerhalb dieser großen Spanne liegen (Tabelle, Seite 8).



Entsiegelte Berliner Böden

Die entsiegelten Böden speichern im Mittel $5,3 \text{ kg/m}^2$ organischen C bis 1 m Tiefe. Die Spannweite beträgt zwischen $0,1 - 10,6 \text{ kg/m}^2$, wovon die Hälfte der entsiegelten Böden zwischen $2,1 - 7,1 \text{ kg/m}^2$ organischen C enthalten. Da aktuell keine publizierten Studien zu entsiegelten Böden vorliegen, können die erhobenen Daten nur mit unversiegelten Stadtböden verglichen werden. In diesem Vergleich zeigt sich, dass die Speichermenge der entsiegelten Berliner Böden im unteren Bereich der Literaturwerte liegt (Tabelle, Seite 7). Ein Grund hierfür ist u.a. die stärkere anthropogene Beeinflussung durch die ehemalige Versiegelung und anschließende Entsiegelungsmaßnahme, die den natürlichen Humusgehalt beeinträchtigen kann.

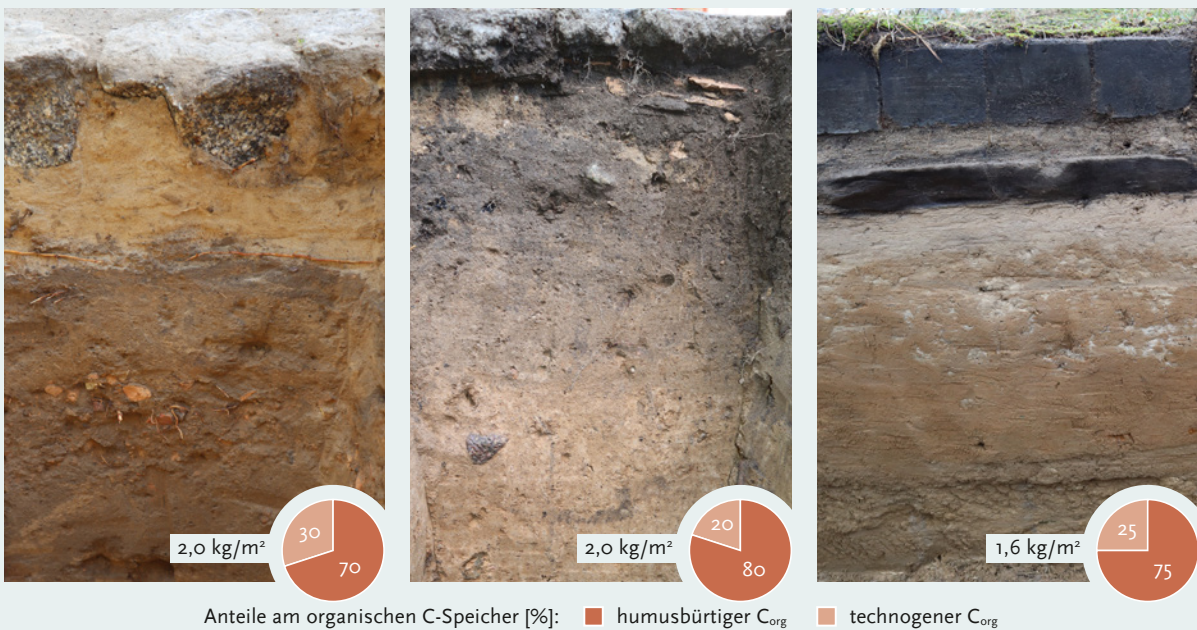
Die entsiegelten Böden weisen eine signifikant höhere mittlere organische C-Speichermenge auf, als die versiegelten Böden. Gründe hierfür sind u.a., dass die Versiegelungsschicht wenig oder oftmals auch gar keinen organischen C speichert und in den versiegelten Böden die Zufuhr humusbildender Biomasse stark eingeschränkt oder nicht vorhanden ist. Zudem sind viele versiegelte Böden unter intensiver Nutzung und damit tiefgreifend durch vergangene Baumaßnahmen und insbesondere kohlenstoffarme Aufschüttungen beeinflusst.



Beispiele versiegelter und entsiegelter Berliner Böden mit mittleren organischen Kohlenstoffspeichermengen

Trotz einer ähnlichen organischen C-Speichermenge sind diese beispielhaft ausgewählten Böden in ihrem Aussehen sehr unterschiedlich ausgeprägt. Sie unterscheiden sich z. B. in der Anordnung und den Eigenschaften ihrer Bodenhorizonte sowie den Substraten, aus denen diese bestehen. Die Horizonte, die organischen C enthalten, sind meist etwas dunkler gefärbt. In den Beispielen befinden sich diese mächtigen oder schmalen Horizonte in unterschiedlichen Tiefen der Bodenprofile. In allen Böden setzt sich der organische C-Speicher bis 1 m Tiefe aus einem humusbürtigen und einem technogenen Anteil zusammen.

Versiegelte Böden und ihre organischen C-Speichermengen bis 1 m Tiefe



Entsiegelte Böden und ihre organischen C-Speichermengen bis 1 m Tiefe



Parameter zur Berechnung der organischen Kohlenstoffspeichermenge

Die Berechnung der organischen Kohlenstoffspeichermenge, sowie ihrer humusbürtigen und technogenen Anteile, basiert auf den organischen C-Gehalten, Bodendichten und Grobbodengehalten, welche für die einzelnen Bodenhorizonte ermittelt wurden (Seite 14).

Organische Kohlenstoffgehalte

Die mittleren organischen C-Gehalte im mineralischen Oberboden (0 – 30 cm) unterscheiden sich mit 0,4 und 0,6 % nur geringfügig zwischen ver- und entsiegelten Böden und liegen deutlich unter den Gehalten unversiegelter Böden Berlins, welche C-Gehalte zwischen 1,0 – 2,8 % aufweisen [2]. Im Unterboden (30 – 100 cm) sind die mittleren C-Gehalte bei ver- und entsiegelten Böden mit 0,1 % gleich, aber geringer als im Oberboden. Sie liegen damit etwas unter den C-Gehalten unversiegelter Berliner Böden [2].

Es fällt auf, dass die entsiegelten Böden etwas höhere humusbürtige als technogene organische C-Gehalte im Oberboden aufweisen. Bei den versiegelten Böden ist dieser Unterschied kaum ausgeprägt. Im Unterboden unterscheiden sich die technogenen und humusbürtigen organischen C-Gehalte zwischen ver- und entsiegelten Böden kaum.

Zudem wurden insgesamt 19 Proben der Humusaufgabe analysiert, von denen 14 an entsiegelten und 5 an versiegelten Standorten entnommen wurden. Ihr organischer C-Gehalt liegt im Mittel bei 33,2 %.

Organische C-Gehalte der mineralischen Horizonte im Ober- und Unterboden

Tiefenstufe	C_{org}	technogener C_{org}^{*}	humusbürtiger C_{org}^{*}	
				Median [Masse-%] 50 %-Spanne [Masse-%] Anzahl der Horizontproben (n)
versiegelte Böden	0 – 30	0,4 0,1 – 1,2 n = 78	0,3 0,2 – 0,6 n = 52	0,4 0,2 – 1,2 n = 52
	30 – 100	0,1 0 – 0,3 n = 114	0,3 0,2 – 0,5 n = 40	0,2 0,1 – 0,6 n = 40
entsiegelte Böden	0 – 30	0,6 0,3 – 2,2 n = 38	0,4 0,2 – 0,7 n = 30	0,9 0,3 – 1,9 n = 30
	30 – 100	0,1 0 – 0,5 n = 30	0,3 0,2 – 0,5 n = 11	0,3 0,3 – 0,8 n = 11

*Messung nur an Proben mit $C_{org} > 0,2$ Masse-%



Vollversiegelter Mineralboden
Boden in Berlin-Köpenick mit organischen C-Gehalten im Ober- und Unterboden. Im Oberboden ist auch ein geringer Gehalt von 0,1 Masse-% technogenem C_{org} zu finden.



Mächtige Humusaufgabe auf einem entsiegelten Boden im Grünwald
Humusaufgaben enthalten meist keinen technogenen organischen Kohlenstoff.

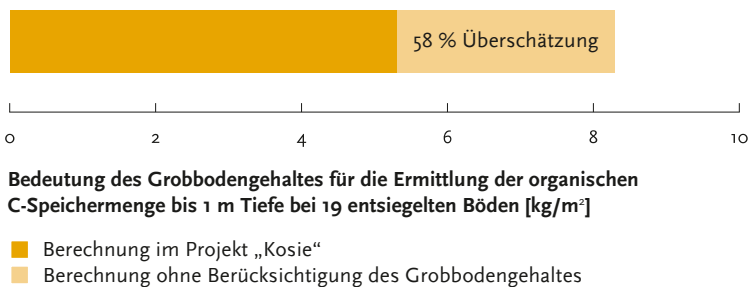
Bodendichten

Die gemessenen Dichten in ver- und entsiegelten Böden unterscheiden sich im Mittel nicht voneinander und liegen sowohl im Ober- als auch im Unterboden bei 1,6 g/cm³. Sie sind damit im oberen Bereich der unversiegelten Berliner Böden einzuordnen [2]. Diese weisen je nach Nutzungstyp mittlere Dichten zwischen 1,1 – 1,6 g/cm³ im Oberboden und 1,4 – 1,7 g/cm³ im Unterboden auf.

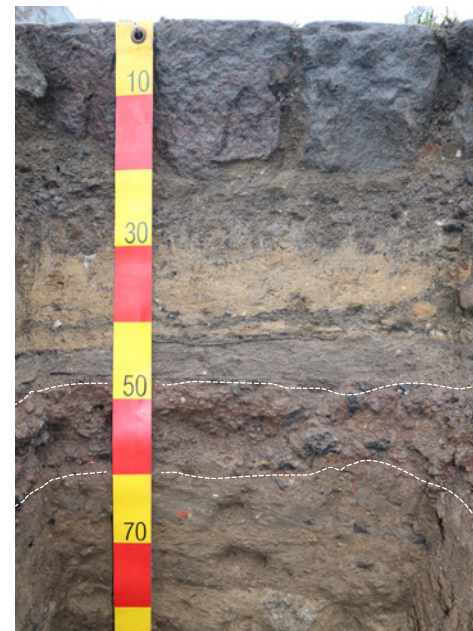
Bei der Bodenuntersuchung am Standort wurden in fünf Böden sehr dichte, manchmal auch verkittete Horizonte vorgefunden, die teilweise wasserstauende Eigenschaften zeigten. Diese verfestigten Horizonte konnten nicht beprobt werden. Für sie wurde die im Gelände geschätzte Dichte von 1,9 g/cm³ für die Berechnung der organischen C-Speichermenge verwendet.

Grobbodengehalte

Im Grobboden (Bodenteilchen ≥ 2 mm) sind natürliche Kiese und Steine, in Stadtböden häufig aber auch künstliche Materialien, wie z. B. Versiegelungsschichten, Mörtelstücke, Ziegelbruch und Müllbestandteile, enthalten. Diese speichern keinen natürlichen organischen C und müssen daher bei der Berechnung der C-Speichermenge vom gesamten Bodenvolumen abgezogen werden (Seite 14). Wird der Grobbodengehalt hierbei nicht berücksichtigt, kann es zur starken Überschätzung der C-Speichermenge kommen, wie am Beispiel des C-Speichers der entsiegelten Böden zu sehen ist:



In den versiegelten Oberböden wurde ein mittlerer Grobbodengehalt von 80 Vol.-% erfasst. Dieser hohe Mittelwert wird stark durch das Vorkommen der Versiegelungsschichten beeinflusst, die beispielsweise bei einer Asphaltdecke aus 100 Vol.-% Grobboden bestehen. Die Hälfte der versiegelten Oberböden weisen Grobbodengehalte zwischen 4 – 100 Vol.-% auf. Die entsiegelten Böden zeigen mit mittleren 5 Vol.-% und einer 50 %-Spanne von 2 – 11 Vol.-% deutlich geringere Grobbodengehalte im Oberboden. Die Grobbodengehalte im Unterboden liegen sowohl bei den ver- als auch bei den entsiegelten Böden im Mittel bei 3 Vol.-%. Sie sind bei den entsiegelten Böden leicht geringer und bei den versiegelten sehr viel geringer als im Oberboden. Mit Ausnahme der versiegelten Oberböden liegen die ermittelten Grobbodengehalte damit in ähnlichen Wertebereichen wie bei den unversiegelten Böden Berlins [2].



Starke Verdichtung in Stadtböden
Versiegelter Boden mit einem verkitteten Horizont aus Asche zwischen 50 und 60 cm.



Entsiegelter Boden mit hohen Trümmerschnittgehalten
Würde der Grobboden in diesem Profil nicht berücksichtigt, käme es zu einer 15-prozentigen Überschätzung des organischen C-Speichers; das entspricht 1,2 kg/m² bis 1 m Tiefe.

Herausforderung in Stadtböden: Künstlicher organischer Kohlenstoff

Erläuterungen zur Methode

Im Unterschied zu vielen vorangegangenen Studien an Stadtböden (Seiten 7 – 8), wurde im Projekt „Kosie“ eine Auftrennung des gesamten organischen Kohlenstoffs in technogene und humusbürtige Mengenanteile mittels der DIN 19539 [41] durchgeführt. Aus methodischen Gründen konnte diese Analyse jedoch nur für Horizonte mit einem Mindestgehalt des gesamten organischen C von 0,2 % durchgeführt werden. Außerdem wird durch die gewählte Methode ein bestimmter Anteil „sehr stabiler hocharomatischer und hochkondensierter Kohlenstoffverbindungen“ [41] erfasst und im Projekt „Kosie“ als **technogener organischer Kohlenstoff** definiert. Manche technogene Kohlenstoffverbindungen, die dieser methodischen Definition nicht entsprechen, wurden hier u. U. nicht abgetrennt bzw. können sich im humusbürtigen organischen C wiederfinden. Die folgenden Daten sind unter Beachtung dieser methodischen Einschränkungen zu interpretieren. Eine Weiterentwicklung und Validierung der Methode an typischen und standardisierten Substraten von Stadtböden wird empfohlen.

Technogener organischer Kohlenstoffspeicher in ver- und entsiegelten Böden bis 1 m Tiefe

Median: 0,6 kg/m²

50 %-Spanne: 0,1 – 1,7 kg/m²

Technogene organische Kohlenstoffspeichermenge in ver- und entsiegelten Böden

Die technogene organische C-Speichermenge der im Projekt untersuchten 67 ver- und entsiegelten Böden beträgt im Mittel 0,6 kg/m² bis 1 m Tiefe. Die Hälfte weist eine technogene organische C-Speichermenge zwischen 0,1 – 1,7 kg/m² auf. Einige versiegelte Böden zeigen jedoch auch deutlich höhere Werte bis zu 12,3 kg/m².

Zunächst überraschend erscheint, dass die entsiegelten Böden im Mittel (1,5 kg/m²) mehr technogenen organischen C enthalten als die versiegelten Böden (0,5 kg/m²). Dies darf jedoch nicht als stärkere „Belastung“ der entsiegelten Böden mit technogenen Materialien interpretiert werden. Es liegt darin begründet, dass das gesamte Feinbodenvolumen der versiegelten Böden aufgrund der Versiegelungsschicht im Oberboden deutlich reduziert ist. Da nur der Feinboden organischen C speichert, ist die gesamte organische, die humusbürtige organische und eben auch die technogene organische C-Speichermenge in diesen versiegelten Horizonten und Böden im Vergleich zu den entsiegelten Böden reduziert.

Anteil des technogenen C am gesamten organischen C-Speicher der ver- und entsiegelten Böden bis 1 m Tiefe

Median: 23 % des C_{org}

50 %-Spanne: 7 – 33 % des C_{org}

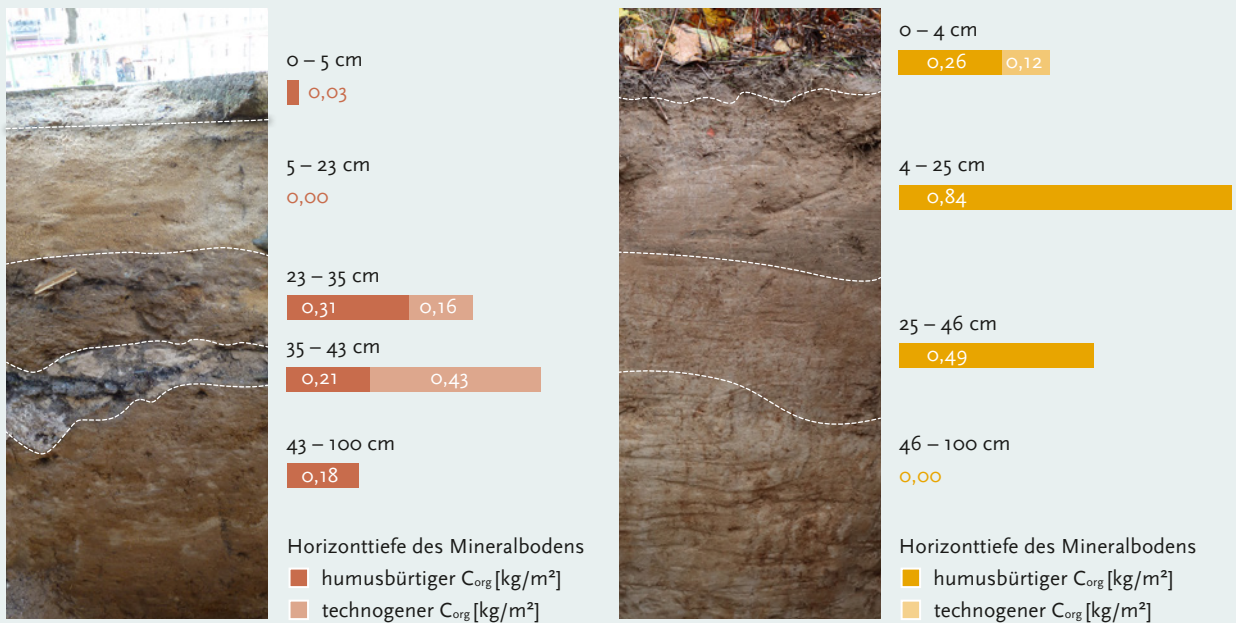
Anteile des technogenen Kohlenstoffs am gesamten organischen Kohlenstoffspeicher

Der technogene organische C-Anteil (% der organischen C-Speichermenge) ist dem gegenüber besser geeignet, um Böden mit unterschiedlicher organischer C-Speichermenge miteinander vergleichen zu können. Eine Auswertung dieses relativen Parameters ergab, dass sich versiegelte und entsiegelte Böden bezüglich ihres technogenen organischen C-Anteils im Mittel nicht voneinander unterscheiden.

Der technogene C-Anteil der ver- und entsiegelten Böden beträgt im Mittel 23 % ihres gesamten organischen C-Speichers. Die Hälfte der Böden weist einen technogenen C-Anteil zwischen 7 – 33 % auf. Der technogene C hat bei den meisten Böden somit einen geringeren Anteil an ihrem gesamten organischen C, als der humusbürtige C. Die Spannweite ist dabei jedoch relativ groß. Sie beträgt zwischen 0 – 64 % der gesamten organischen C-Speichermenge bis 1 m Tiefe.

Beispiel eines versiegelten und entsiegelten Bodens mit unterschiedlichen Anteilen des technologenen und humusbürtigen organischen Kohlenstoffs am gesamten organischen Kohlenstoffspeicher

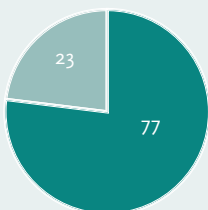
Der technologene organische C weist in dem versiegelten Boden (links) einen überdurchschnittlichen Anteil (45 %) an dessen gesamtem C_{org} -Speicher bis 1 m Tiefe auf. Dies ist bedingt durch mehrere geschüttete Schichten, welche neben humosem Material auch Kohle, Bauschutt und Müll beinhalten. Der entsiegelte Boden (rechts) ist dagegen nur wenig durch menschliche Eingriffe beeinflusst. Nur im Oberboden zeigt dieser Standort umgelagerte, jedoch naturnahe Substrate. Der Anteil des technologenen C am gesamten C_{org} -Speicher bis 1 m Tiefe ist hier mit 7 % vernachlässigbar gering.



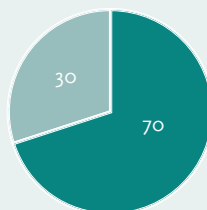
Auswirkung der menschlichen Prägung von Bodenhorizonten auf den technologenen Anteil ihrer gesamten organischen Kohlenstoffspeichermenge

Zwischen der Höhe des technologenen organischen C-Anteils (% von C_{org}) in den 137 untersuchten Bodenhorizonten und der anthropogenen Prägung der Horizonte besteht ein Zusammenhang. Je stärker die menschliche Veränderung der Bodenhorizonte durch Mischung und Aufschüttung von Substraten und durch Einbringung technogener Materialien (links nach rechts), desto höher stellt sich ihr technologener C-Anteil im Mittel dar. Demnach eignet sich eine gründliche Untersuchung der Bodenhorizonte und Beschreibung der Materialien am Standort, um auf technologene C-Anteile am gesamten organischen C schließen und deren Höhe grob abschätzen zu können.

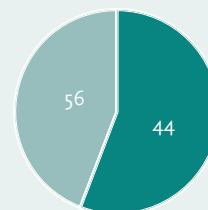
natürlich entstandene Bodenhorizonte
Anzahl = 24



umgelagerte Horizonte aus > 90 % natürlichem Material
Anzahl = 58



umgelagerte Horizonte mit > 10 % technologenem Material
Anzahl = 55



Mittlere Anteile am organischen C [%]
■ humusbürtiger C_{org}
■ technologener C_{org}

Versiegelte Böden: Natürliche organische Kohlenstoffspeichermenge

Humusbürtiger organischer Kohlenstoffspeicher der versiegelten Böden bis 1 m Tiefe

Median: 1,4 kg/m²

50 %-Spanne: 0,8 – 3,0 kg/m²

0 bis 30 cm

Median: 0,3 kg/m²

50 %-Spanne: 0,1 – 0,9 kg/m²

Anzahl der Böden: 47

30 bis 100 cm

Median: 0,8 kg/m²

50 %-Spanne: 0,5 – 1,4 kg/m²

Anzahl der Böden: 46

Mittlere Verteilung des humusbürtigen organischen C-Speichers im Ober- und Unterboden der versiegelten Standorte



Boden unter der Fahrbahn der Havelchaussee im Grunewald
Der humusbürtige organische C-Speicher bis 1 m Tiefe beträgt 1,4 kg/m² und liegt fast ausschließlich im Unterboden.

Kohlenstoffspeicher der versiegelten Böden

Die versiegelten Böden speichern im Mittel 1,4 kg/m² humusbürtigen organischen Kohlenstoff im ersten Meter (Spannweite: 0 – 19,2 kg/m²). Dieser natürliche organische Kohlenstoff umfasst den humusbürtigen Anteil des organischen Kohlenstoffs und wird im Weiteren als humusbürtiger organischer Kohlenstoff bezeichnet. Der Beitrag der 70 cm mächtigen Unterböden zum humusbürtigen organischen C-Speicher ist mit 0,8 kg/m² fast dreimal so hoch, wie der der oberen 30 cm, die im Mittel nur 0,3 kg/m² humusbürtigen organischen C speichern.

Einflussgrößen der humusbürtigen organischen Kohlenstoffspeichermenge

Verschiedene Faktoren können die Höhe des Bodenkohlenstoffspeichers beeinflussen, daher wurden Eigenschaften des Standortes, z.B. die Lage in der Stadt, sowie Eigenschaften der Böden, z.B. deren Profilaufbau, hinsichtlich ihres Einflusses auf die Kohlenstoffspeichermenge analysiert (Seite 10). Im Folgenden wird kurz auf eine Auswahl der Einflussgrößen eingegangen.

Aktuelle Nutzung am versiegelten Standort

Der Straßenraum Berlins umfasst 9,3 % der Stadtfläche. Auf dieser Fläche wurden 18 Böden untersucht, welche einen mittleren humusbürtigen organischen C-Speicher von 0,8 kg/m² bis 1 m Tiefe aufweisen. Die restlichen unbebaut versiegelten Flächen Berlins, beispielsweise im Siedlungsbereich oder den Forsten, nehmen 12,0 % der Stadtfläche ein. Im Projekt „Kosie“ wurden 29 Böden auf diesen Bereichen untersucht. Sie weisen sich durch einen mittleren humusbürtigen organischen C-Speicher von 1,8 kg/m² bis 1 m Tiefe aus. Eine einfache Hochrechnung dieser Mittelwerte liefert eine Abschätzung des potentiell gespeicherten humusbürtigen organischen Bodenkohlenstoffs: Für die unbebaut versiegelte Fläche Berlins, die 21,3 % der Stadtfläche umfasst, kann ein Speicher von etwa 255.000 Tonnen humusbürtigem organischem C im oberen Meter der Böden angenommen werden.

Historische Nutzung des Standortes vor der Versiegelung

Auch die Nutzung eines Standortes vor seiner Versiegelung kann sich noch viele Jahre später im Aufbau der Böden widerspiegeln und somit einen Einfluss auf deren C-Speichermenge haben. Die vorliegende Untersuchung zeigt, dass insbesondere Böden unter ehemaliger landwirtschaftlicher oder kleingärtnerischer Nutzung gegenüber anderen versiegelten Böden höhere humusbürtige organische C-Speicher aufweisen (Seite 24).

Einfluss der Versiegelungsgrade

Eine **Vollversiegelung** weist den höchsten Versiegelungsgrad von 100 % auf. Unter dieser Bedingung sind die Bodenfunktionen sowie die natürliche Akkumulation von organischem Kohlenstoff stark eingeschränkt. Im Projekt „Kosie“ wurden 23 vollversiegelte Böden unter Asphalt- oder Betondecken untersucht. Diese Böden speichern nur vergleichsweise geringe Mengen an humusbürtigem organischen C; in drei Fällen liegt der humusbürtige organische C-Speicher bis 1 m Tiefe unter $0,3 \text{ kg/m}^2$. In diesen vollversiegelten Böden findet, wenn überhaupt, eine Humusakkumulation nur entlang von Wurzeln und durch abgestorbene Wurzelreste statt. Hier spielen insbesondere die Wurzeln von Stadtbäumen eine Rolle, die seitlich unter die Versiegelung in den Boden einwachsen können. An einigen, weniger intensiv genutzten versiegelten Standorten war außerdem die Entwicklung eines neuen, gering mächtigen Bodens auf der Versiegelungsdecke zu beobachten.

Auch **teilversiegelte Standorte mit hohen Versiegelungsgraden über 90 %** zeichnen sich durch geringe natürliche Humusakkumulation aus. So haben beispielsweise Standorte mit Verbundpflaster oder Gehwegplatten sehr kleine Fugen und damit gegenüber naturnahen Böden ein stark vermindertes Vermögen Humus im Oberboden zu akkumulieren. Die 14 hier untersuchten, teilversiegelten Böden mit hohem Versiegelungsgrad weisen einen mittleren humusbürtigen organischen C-Speicher von $0,2 \text{ kg/m}^2$ in den oberen 30 cm auf.

An **teilversiegelten Standorten mit geringem Versiegelungsgrad unter 80 %**, wie z.B. bei Kopfstein- oder Mosaikpflaster, ist eine natürliche Humusbildung im Oberboden eher möglich. In dieser Untersuchung speichern die zehn teilversiegelten Böden mit geringem Versiegelungsgrad im Mittel $0,7 \text{ kg/m}^2$ humusbürtigen organischen C in den oberen 30 cm (Seite 25). Ihre Oberböden zeichnen sich außerdem durch eine höhere Durchwurzelungsintensität aus.

Die Anzahl und Größe der Fugen hat damit nicht nur den bekannten, positiven Einfluss auf die Infiltrationsfähigkeit des Bodens für Wasser [42], sondern auch auf dessen Vermögen Kohlenstoff der Atmosphäre zu entziehen und im Boden langfristig zu binden.



Versiegelter Boden auf dem Tempelhofer Feld

Über zwei Versiegelungsschichten hat sich ein neuer humoser Bodenhorizont gebildet, während im Unterboden aktuell kein Humus akkumuliert wird. Abgebildet sind die oberen 40 cm.



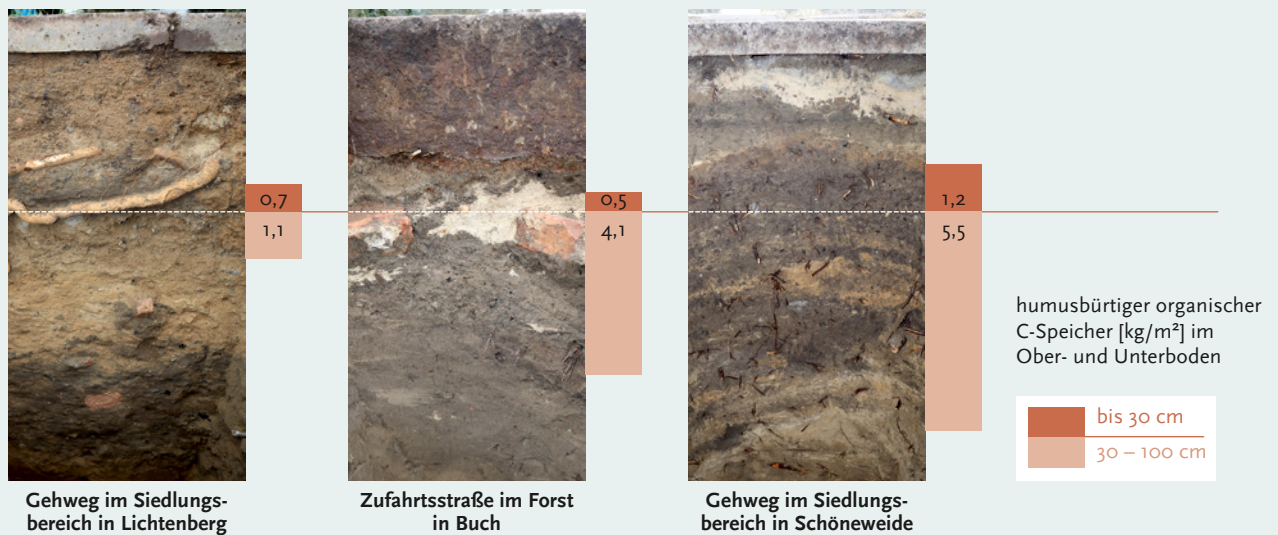
Intensive Durchwurzelung unterhalb der Versiegelung

Dieser vollversiegelte Zufahrtsweg in Köpenick weist eine hohe Durchwurzelungsintensität bis in 70 cm Tiefe auf. Dies begünstigt mittelfristig die natürliche Humusakkumulation.

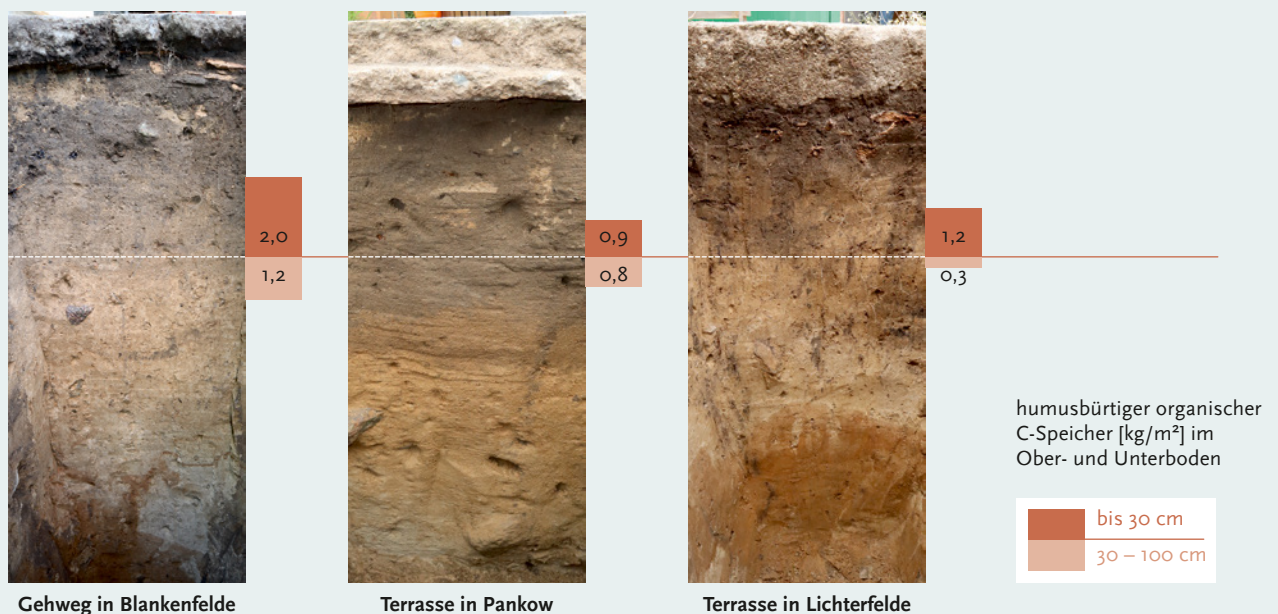
Beispiele versiegelter Berliner Böden und ihrer humusbürtigen organischen Kohlenstoffspeicher: Einfluss der historischen kleingärtnerischen oder landwirtschaftlichen Nutzung

Böden unter kleingärtnerischer oder landwirtschaftlicher Nutzung haben im Vergleich zu Böden unter anderer Nutzung hohe organische C-Speicher [2]. Dies zeigt sich auch an versiegelten Standorten, die ehemals derartig genutzt wurden. Zum einen wurden manche Böden der ehemaligen Kleingärten oder Landwirtschaft beim Bau der Versiegelung vor Ort umgelagert und neu aufgeschüttet. Die humusreichen Substrate dienen dann z. B. als Unterbau der Versiegelungsschicht, wie in den oberen Beispielen auf dieser Seite zu sehen ist: Diese Böden bestehen bis mind. 1 m Tiefe aus umgelagertem humosem, meist sandigem Material und weisen deshalb einen relativ hohen humusbürtigen organischen C-Speicher im Ober- und Unterboden auf. Zum anderen zeigt sich in den unteren Beispielen auf dieser Seite, dass unter versiegelten Flächen in aktuellen Kleingartenanlagen oft wertvolle natürliche Böden mit erhöhten humusbürtigen organischen C-Speichern anzutreffen sind.

Versiegelte Böden mit tiefgründiger Umlagerung von humosem Substrat



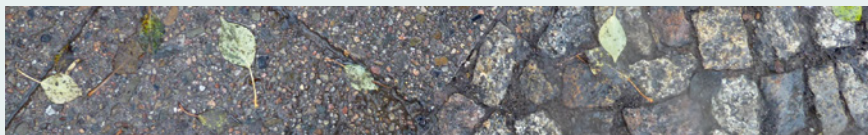
Versiegelte Böden in Kleingärten mit naturnaher Lagerung der Substrate



**Beispiele versiegelter Berliner Böden und ihrer humusbürtigen organischen Kohlenstoffspeicher:
Einfluss unterschiedlicher Versiegelungsgrade**

Ein Gehweg in Neukölln mit unterschiedlichen Belagsarten

Unter den Gehwegen der Saaletraße (Neukölln) wurden zwei zehn Meter voneinander entfernte Böden untersucht, die sich jedoch in ihren Belagsarten unterscheiden. Der eine Boden (linkes Foto) unter Gehwegplatten hat einen hohen Versiegelungsgrad; die Fugen machen hier nur ca. 3 % der Oberfläche aus. Der andere Boden (rechtes Foto) hat dagegen einen geringeren Versiegelungsgrad; die Fugen des Mosaikpflasters machen etwa 37 % der Oberfläche aus. In den oberen Dezimetern dieses Bodens hat sich, im Gegensatz zum Boden unter Gehwegplatten, humusbürtiger organischer Kohlenstoff sowohl in den Fugen als auch in dem darunterliegenden Horizont akkumuliert. Auch zeigt dieser Boden eine deutlich stärkere Durchwurzelung.



Horizonttiefe (Grobodengehalt)
■ humusbürtiger organischer C-Speicher



0 – 5 cm (98 Vol.-%)
■ 0,03 kg/m²

5 – 13 cm (1 Vol.-%)
0,00 kg/m²



0 – 8 cm (90 Vol.-%)
■ 0,08 kg/m²

8 – 16 cm (8 Vol.-%)
■ 0,39 kg/m²

Böden mit geringem Versiegelungsgrad unter Kopfsteinpflaster

Die beiden Standorte zeigen mindestens 70 Jahre alte Straßen aus Kopfsteinpflaster, welches sich durch einen geringen Versiegelungsgrad auszeichnet. Links ist eine Fahrbahn im Mahlsdorfer Wohngebiet zu sehen; hier machen die Fugen circa 56 % der Oberfläche aus. Rechts ist ein Zufahrtsweg im Forst in Frohnau abgebildet, bei dem die Fugen etwa 71 % der Oberfläche ausmachen. Beide teilversiegelten Böden kennzeichnet, dass in den obersten Horizonten – trotz ihres hohen Grobodengehaltes – eine relevante Menge des humusbürtigen organischen Kohlenstoffs gespeichert ist.



Horizonttiefe (Grobodengehalt)
■ humusbürtiger organischer C-Speicher



0 – 19 cm (80 Vol.-%)
■ 0,28 kg/m²

19 – 37 cm (4 Vol.-%)
0,00 kg/m²



0 – 10 cm (95 Vol.-%)
■ 0,14 kg/m²

10 – 25 cm (100 Vol.-%)
0,00 kg/m²

Entsiegelte Böden: Natürliche organische Kohlenstoffspeichermenge

Humusbürtiger organischer Kohlenstoffspeicher der entsiegelten Böden bis 1 m Tiefe

Median: 3,6 kg/m²

50 %-Spanne: 1,8 – 4,8 kg/m²

0 bis 30 cm

Median: 2,4 kg/m²

50 %-Spanne: 0,9 – 3,9 kg/m²

Anzahl der Böden: 20

30 bis 100 cm

Median: 1,2 kg/m²

50 %-Spanne: 0,4 – 1,7 kg/m²

Anzahl der Böden: 19

Mittlere Verteilung des humusbürtigen organischen C-Speichers im Ober- und Unterboden der entsiegelten Standorte



Beispiel eines kürzlich entsiegelten, ehemaligen Zufahrtsweges
Hier wurde im Rahmen der Entsiegelungsmaßnahme 30 cm Mutterboden aufgebracht.

Kohlenstoffspeicher der entsiegelten Böden

Die entsiegelten Böden speichern im Mittel 3,6 kg/m² humusbürtigen organischen Kohlenstoff bis 1 m Tiefe (Spannweite: 0,1 – 7,6 kg/m²). In den entsiegelten Oberböden befindet sich, mit mittleren 2,4 kg/m², ein vergleichbarer Speicher des humusbürtigen organischen C gegenüber des doppelt so mächtigen Unterbodens, der einen mittleren Speicher von 1,2 kg/m² aufweist.

An sechs entsiegelten Böden wurde eine dem Mineralboden aufliegende Humusschicht vorgefunden. Diese sechs Humusaufgaben speichern im Mittel 0,3 kg/m² organischen C. Der Auflagehumus kann für den jeweiligen Boden einen hohen Beitrag zu dessen humusbürtigem organischen C-Speicher leisten. Beispielsweise besitzt ein untersuchter Standort im Grunewald allein in der Humusaufgabe einen organischen C-Speicher von 1 kg/m², was 31 % des gesamten organischen C-Speichers dieses Bodens bis 1 m Tiefe ausmacht.

Einflussgrößen der Verteilung der humusbürtigen organischen C-Speichermenge: Durchführung der Entsiegelungsmaßnahme und aktuelles Flächenmanagement

Im Rahmen des Projektes „Kosie“ wurde eine erste systematische Studie an 20 entsiegelten Böden Berlins durchgeführt. Es wurden unterschiedliche aktuelle und ehemalige Flächennutzungen einbezogen. Die ausgewählten Standorte repräsentieren Flächen aus der Datenbank „Entsiegelungspotenziale“ des Umweltatlas Berlin [35]. An allen Böden wurde im Zuge der Entsiegelungsmaßnahme die Versiegelungsdecke entfernt und eine ebene Geländeoberfläche hergestellt. In 11 Fällen wurde danach ein humoser Mutterboden aufgetragen und an 17 Standorten durch Aufforstung oder das Aufbringen von Samenmischungen eine Vegetation etabliert. Es zeigt sich, dass die Verteilung des humusbürtigen organischen C-Speichers maßgeblich durch die Durchführung der Entsiegelungsmaßnahme bestimmt wird. Eine klare Gruppierung lässt sich anhand des aktuellen Managements der entsiegelten Grünflächen bilden: Intensiv genutzte Grünanlagen (**Park**), extensiv genutzte, offengehaltene Grünanlagen (**extensive Wiese**) und forstlich genutzte Standorte (**Forst**) (Seite 28).

Bei den intensiv genutzten Grünanlagen handelt es sich vor allem um **Parks** in dicht besiedelten Gebieten, wie den westlichen Mauerpark. Sie erfordern intensive gärtnerische Pflege, um möglichst permanent eine intakte Rasenfläche aufrecht zu erhalten. Hier wurden im Rahmen der Entsiegelungsmaßnahme mächtige humose Mutterböden aufgetragen. Ihre humusbürtigen organischen C-Speicher im Oberboden sind aus diesem Grund signifikant höher als die der beiden anderen Gruppen, an denen kaum humoses Material aufgebracht wurde. Die Unterböden dieser entsiegelten Standorte sind stark durch anthropogene Umlagerungen und Verdichtungen geprägt; so bestehen fünf der sieben untersuchten Böden in Parks unterhalb von 25 bis 50 cm aus Trümmer- bzw. Bauschutt.

Die extensiv genutzten, offengehaltenen Grünanlagen liegen in den Randbereichen der Stadt mit geringerer Bevölkerungsdichte und repräsentieren Naherholungsflächen, die in bestehende Grünanlagen integriert sind oder werden sollen. Diese **extensiven Wiesen** unterstehen geringer landschaftsgärtnerischer Pflege, die der Offenhaltung dieser Standorte dient. Ihre Böden zeichnen sich durch einen geringeren humusbürtigen organischen C-Speicher aus, insbesondere gegenüber den Parkanlagen. Die Unterböden sind gekennzeichnet durch humusarme, anthropogen umgelagerte Sande. Im Vergleich zu den entsiegelten Böden der Parks und Forsten besitzen diese Böden unterhalb von 30 cm Tiefe die geringsten humusbürtigen organischen C-Speicher.

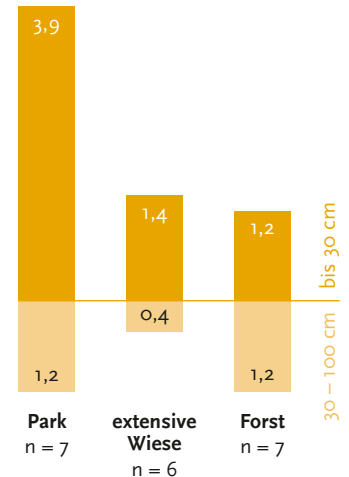
Wie die extensiv genutzten Wiesen, befinden sich auch die entsiegelten **forstlich genutzten Standorte** in den Randbereichen der Stadt. Ihre Böden sind durch vergleichsweise geringe anthropogene Umlagerung bzw. Störung gekennzeichnet: Mit Ausnahme der untersuchten Standorte an den Trümmerbergen, bestehen bei den restlichen fünf Böden im Mittel nur die oberen 30 cm aus umgelagertem Material. In den meist natürlichen Unterböden befinden sich z.T. begrabene humose Oberbodenhorizonte, deren organischer C-Speicher unter Standortbedingungen vor der Versiegelung akkumuliert wurde.

Dauer der Entsiegelung und neue Humusakkumulation im Oberboden

Alle entsiegelten Böden weisen eine neue Humusakkumulation unterschiedlicher Mächtigkeit und Ausprägung im Oberboden auf, die vor Ort seit der Entsiegelung gebildet wurde. In Oberböden wird durch Streufall und biologische Aktivität Humus fixiert. Auch begünstigt eine gute Durchwurzelung die mittelfristige Humusakkumulation, was sich z.B. in Form von humusgefüllten, ehemaligen Wurzelbahnen zeigt. In dieser Untersuchung wurden Standorte berücksichtigt, deren Entsiegelung zwischen wenigen Monaten und 20 Jahren zurücklag. Je länger ein Standort entsiegelt ist, desto mehr humusbürtiger organischer C kann im Oberboden ermittelt werden und desto tiefer und ausgeprägter ist die Durchwurzelung des Bodens (Seite 28).

Hohe humusbürtige organische C-Speichermengen in wasserbeeinflussten Böden

Berlin ist aufgrund der Tallage und der eiszeitlichen Formung der Landschaft in vielen Bereichen der Stadt durch grundwassernahe Verhältnisse geprägt. Ein untersuchter entsiegelter Standort befand sich mit einem Wasserstand von 40 cm unter Geländeoberkante im Bereich der grundwasserbeeinflussten Böden. Er verfügt mit 6,4 kg/m² im Oberboden über den höchsten humusbürtigen organischen C-Speicher der vorliegenden Untersuchung. Dieses Beispiel verweist damit auf das sehr hohe Vermögen von wasserbeeinflussten Böden humusbürtigen organischen Kohlenstoff zu speichern.



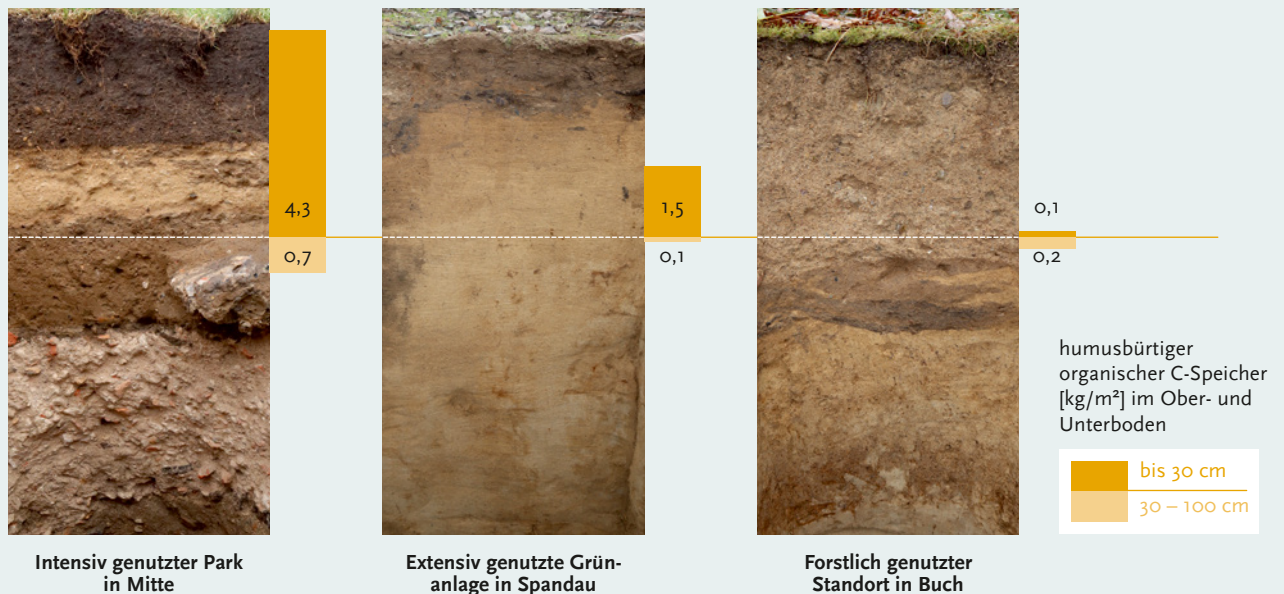
Mittlere humusbürtige organische C-Speicher [kg/m²] der entsiegelten Böden, differenziert nach aktuellem Flächenmanagement
n = Anzahl der Böden



Wasserbeeinflusster Boden in den Tiefwerder Wiesen in Spandau
Dieser Boden ist seit sieben Jahren entsiegelt und besitzt einen sehr hohen humusbürtigen organischen C-Speicher infolge seiner wassergesättigten Verhältnisse. Im Foto steht das Wasser bei 40 cm Tiefe an.

Beispiele entsiegelter Berliner Böden und ihrer humusbürtigen organischen Kohlenstoffspeicher unter unterschiedlichem Flächenmanagement

Im intensiv genutzten Park wurde nach Entsiegelung humoser Mutterboden aufgeschüttet, wodurch dieser Standort einen hohen humusbürtigen organischen C-Speicher im Oberboden aufweist. Die Böden unter der extensiv genutzten Grünanlage und der forstlichen Nutzung zeigen im Unterboden einen natürlicheren Aufbau und im Oberboden keine künstliche Humusaufschüttung. Beide Standorte befinden sich in weniger dicht besiedelten Bereichen Berlins. Im Oberboden dieser beiden Profile ist eine neue, natürliche Humusbildung erkennbar.



Natürlicher Humusaufbau an einem entsiegelten Standort

Der Boden besteht unterhalb von 30 cm Tiefe aus Trümmerschutt, der dort in den 60er Jahren des letzten Jahrhunderts aufgeschüttet wurde. Bis zur Entsiegelung wurde der Standort als gepflasterter Parkplatz genutzt. Bei der Entsiegelungsmaßnahme in den 90er Jahren wurden die Pflastersteine entfernt und mit dem vorhandenen, sandigen Unterbaumaterial der ehemaligen Versiegelungsschicht eine ebene Geländeoberfläche hergestellt. Der Standort wurde seit 20 Jahren der Sukzession überlassen, und es bildet sich dort ein Laubwald aus. In der Humusaufgabe und im mineralischen Oberbodenhorizont zwischen 0 und 4 cm Tiefe haben sich bereits 0,8 kg/m² humusbürtiger organischer C akkumuliert.



Ehemalige Parkplatznutzung des Standortes am Drachenberg (Grünwald)



Humusakkumulation im Oberboden 20 Jahre nach der Entsiegelung

humusbürtiger organischer C-Speicher [kg/m²]

Resümee und Empfehlungen

Böden und Vegetation erfüllen als „natürliche Kohlenstoffspeicher“ eine Klimaschutzfunktion. Allerdings wird diese in Städten vor allem durch den hohen Versiegelungsgrad beeinträchtigt. So ist etwa ein Drittel der Gesamtfläche Berlins versiegelt. Um die Leistungs- und Funktionsfähigkeit der Stadtnatur auch im Sinne der Klimaanpassung zu erhalten, strebt Berlin eine „Netto-Null-Versiegelung“ bis 2030 an [10]. Dafür müssen v.a. größere Anstrengungen unternommen werden, um die Neuversiegelung von Böden zu vermeiden. Daneben kann die Entsiegelung von dauerhaft nicht mehr genutzten Flächen als Ausgleich für unvermeidbare Neuversiegelung einen Beitrag leisten.

Vor diesem Hintergrund werden einerseits wissenschaftlich fundierte Argumente und Informationen benötigt, die zur Verringerung bzw. Kompensation von Neuversiegelung beitragen, und die eine fachlich geeignete Umsetzung von Entsiegelungsmaßnahmen unterstützen. Andererseits setzt ein gezieltes Management der natürlichen Kohlenstoffspeicher in der Stadt zunächst genauere Kenntnisse zu deren Eigenschaften und Verteilung voraus. Speziell zu versiegelten und entsiegelten Böden im Raum Berlin lagen jedoch bisher keinerlei Informationen vor.

Im Forschungsprojekt „Kosie“ wurde eine wissenschaftliche Datenbasis zu den Eigenschaften und Kohlenstoffspeichermengen von versiegelten und entsiegelten Böden in Berlin geschaffen. Es handelt sich weltweit um die erste systematische Studie zu dem Thema mit diesem Stichprobenumfang. Die gewonnenen Zahlen und Informationen ermöglichen eine differenzierte Bewertung der ver- und entsiegelten Stadtböden hinsichtlich ihrer Klimaschutzfunktion.

Für die Anwendung der Ergebnisse gilt der Grundsatz: Je größer der humusbürtige organische Kohlenstoffspeicher eines Bodens, desto höher ist sein Schutzwert. Anhand der erhobenen Daten kann gezeigt werden, dass die Größe des humusbürtigen organischen Kohlenstoffspeichers der ver- und entsiegelten Böden durch bestimmte Faktoren begünstigt wird:

- niedriger Versiegelungsgrad des Oberflächenbelages bei versiegelten Böden,
- geringe Mengen von Schutt und künstlichen Substraten im Boden,
- humusfördernde aktuelle Flächennutzung,
- humusfördernde historische Flächennutzung,
- langer Zeitraum seit dem letzten baulichen Bodeneingriff,
- hoher Grundwasserstand bzw. wasserbeeinflusste Böden,
- viel, insbesondere verholzte Vegetation neben/auf ver-/entsiegelten Flächen.

Aus den Ergebnissen des Projektes „Kosie“ lassen sich Empfehlungen für das Management der Kohlenstoffspeicher der Berliner Böden im Sinne einer klimafreundlichen Stadtentwicklung ableiten. Sie ergänzen die Empfehlungen und Instrumente aus dem vorangegangenen Projekt „NatKoS“ [43]. Die vorgeschlagenen Maßnahmen haben zum Ziel, die vorhandenen humusbürtigen Kohlenstoffspeicher der Böden zu schützen sowie das Kohlenstoffspeichervermögen dieser Böden zu verbessern, um somit mittel- bis langfristig eine Vergrößerung des Bodenkohlenstoffspeichers durch Humusakkumulation zu erreichen.





Empfehlungen zum Thema Versiegelung

Bodenversiegelung führt zu einer deutlichen Reduzierung des natürlichen Kohlenstoffspeichers und zu einem verringerten Kohlenstoffspeichervermögen der Böden. Für den Klimaschutz, der mit der Erhaltung und Förderung der natürlichen Kohlenstoffspeicher der Böden verbunden ist, müssen deshalb stärkere Anreize geschaffen werden, die auf die **Vermeidung von Neuversiegelung** abzielen. Ist eine Neuversiegelung jedoch unvermeidbar, so empfehlen wir im Rahmen städtebaulicher Projekte bestimmte Maßnahmen gezielt zu fördern, die v.a. der Umsetzung eines **möglichst niedrigen Versiegelungsgrades** der Böden dienen:

- Die Größe zusammenhängender Versiegelungsflächen sollte möglichst minimal gehalten werden.
- Oberflächenbeläge mit dem niedrigst möglichen Versiegelungsfaktor (möglichst große Fugen) sollten bevorzugt werden.
- Fugen im Oberflächenbelag sollten nicht verschlossen werden.
- Die Störung und Umlagerung von natürlichen bzw. in situ gewachsenen Bodenhorizonten sollte im Rahmen der Bautätigkeiten minimal gehalten werden.
- Verdichtungen und Verkittungen sowie weitere Versiegelungsschichten im Ober- und Unterboden sollten vermieden bzw. minimal gehalten werden.
- Versiegelte Flächen sollten von Bereichen mit möglichst viel verholzter Vegetation unterbrochen bzw. umgeben sein, da die seitlich einwachsende Durchwurzelung zur Humusakkumulation unter den versiegelten Flächen führt.

Empfehlungen zum Thema Entsiegelung

Stadtböden sind aufgrund ihrer oft starken menschlichen Prägung im Zuge langjähriger intensiver Nutzung auch kleinräumig sehr unterschiedlich in ihrem Aussehen und ihren Eigenschaften. Sie können z.B. Unterflurversiegelungen, Verdichtungen, Aufschüttungen und begrabene humose Horizonte aufweisen. Wir empfehlen deshalb bei der **Planung einer Entsiegelungsmaßnahme** folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Oberstes Ziel einer Entsiegelungsmaßnahme sollte es sein, die natürlichen Bodenfunktionen wiederherzustellen, wie z.B. Lebensraum für Tiere und Pflanzen und Infiltrations- und Speicherfähigkeit für Wasser und Nährstoffe. Denn dies ist die Voraussetzung dafür, dass Böden ihre Funktion als Kohlenstoffspeicher überhaupt adäquat wahrnehmen können.
- Der bauliche und landschaftsgärtnerische Aufwand einer geplanten Maßnahme hängt von der angestrebten Nutzung der jeweiligen Fläche und den standörtlichen Gegebenheiten der Fläche ab. Es sollte geklärt werden, ob die Ziel-Nutzung mit den Boden- und Standorteigenschaften überhaupt harmonisiert und ggf. Anpassungen vorgenommen werden.
- Die vorhandenen standörtlichen und bodenkundlichen Informationen (Kartengrundlagen u. a.) der versiegelten Fläche sollten geprüft werden, z.B. die historische Flächennutzung, der (ehemalige) Grundwassereinfluss oder die Verbreitung von Aufschüttungen auf der Fläche.

- Versiegelte Böden unter ehemaliger landwirtschaftlicher oder kleingärtnerischer Nutzung und grundwasserbeeinflusste Böden besitzen oft hohe natürliche Kohlenstoffspeicher bzw. ein großes Potenzial, organischen Kohlenstoff zu akkumulieren. Sie sollten deshalb bei der Auswahl von zu entsiegelnden Flächen priorisiert werden.
- Eine bodenkundliche Vor-Ort-Untersuchung der versiegelten Fläche sollte durchgeführt werden, da nur so die Ausprägung der Böden auf der Fläche sicher beurteilt werden kann. Die Untersuchung sollte bis mindestens 1 m Tiefe erfolgen und unter Beachtung von Kartierstandards umgesetzt werden; hierbei kann für eine erste Einschätzung der Höhe des organischen Kohlenstoffspeichers im Boden die NatKoS-Kartierungstafel verwendet werden [2] [43].

Bei der **Durchführung einer Entsiegelungsmaßnahme** empfehlen wir die folgenden Aspekte zu beachten:

- Die oberflächige Versiegelungsdecke und weitere ggf. vorhandene Verdichtungen, Verkittungen oder Unterflurversiegelungen sollten vollständig entfernt bzw. aufgelockert werden.
- Vorhandene humose Bodenhorizonte sind als Kohlenstoffspeicher wertvoll und sollten deshalb erhalten bleiben bzw. durch den baulichen Eingriff möglichst nicht gestört werden.
- Das Aufbringen von neuem, ggf. humosem Bodenmaterial ist aus Sicht des Boden- und Klimaschutzes nicht in jedem Fall sinnvoll. Soll dennoch neues Bodenmaterial aufgebracht werden, so sollte dessen Menge und Art (z. B. Humusgehalt, Substrateigenschaften etc.) standorttypisch sein, d. h. naturnahen Böden an vergleichbaren Standorten ähneln.
- Zur Gewährleistung einer mittel- bis langfristigen Humusakkumulation und zum Schutz vorhandener Bodenkohlenstoffspeicher sollte auf Dauer eine vollständige Vegetationsbedeckung des Bodens sicher gestellt werden. Dazu ist die Etablierung einer an die Standortbedingungen der Fläche angepassten Vegetation notwendig.
- Die Planung und Durchführung der Entsiegelungsmaßnahmen sollte einheitlich, umfassend und transparent dokumentiert werden, da dies die Grundlage für eine Qualitätskontrolle und ein Monitoring des Zustandes entsiegelter Flächen darstellt.

Kohlenstoffspeicherpotenzial durch Entsiegelung

Das Kohlenstoffspeicherpotenzial von entsiegelten Böden in der Stadt kann darüber hinaus durch die Berücksichtigung folgender Aspekte maximiert werden:

- Wahl einer Ziel-Nutzung, welche sich nachgewiesenermaßen durch relativ große natürliche Kohlenstoffspeicher auszeichnet, z. B. Forst, Kleingarten, extensiv genutzte Grünanlagen [2] [43],
- Etablierung eines Maximums an standortangepasster und vorwiegend mehrjähriger, verholzter Vegetationsbiomasse (Bäume, Sträucher, Stauden),
- Schaffung möglichst großer Flächenanteile, auf denen Streu über das ganze Jahr am Boden verbleiben kann.



Bereits realisierte Entsiegelungsprojekte in Berlin

Oben: Der asphaltierte Zufahrtsweg auf dem Teufelsberg (Grunewald) wurde 2014 teilentsiegelt und wird heute als Wanderweg genutzt.
Unten: Der gepflasterte Zufahrtsweg einer ehemaligen Gärtnerei in Marienfelde wurde 2022 vollständig entsiegelt und soll als Freifläche genutzt werden.

Quellenverzeichnis

- [1] Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Pirani, A.; Connors, S. L.; Péan, C.; Berger, S. et al. (2021): Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change 2.
- [2] Klingenfuß, C.; Fell, H.; Thrum, T.; Klein, D.-P.; Klemm, J.; Zeitz, J. (2019): Planungsinstrument für das CO₂-Management der natürlichen Kohlenstoffspeicher Berlins. Forschungsprojekt, Abschlussbericht. Humboldt-Universität zu Berlin. Online verfügbar unter https://www.berlin.de/sen/uvk/_assets/umwelt/foerderprogramme/berliner-programm-fuer-nachhaltige-entwicklung-bene-bene-projekte/1095-b5-0-abschlussbericht_natkos_2v.pdf.
- [3] Klingenfuß, C.; Möller, D.; Heller, C.; Thrum, T.; Köberich, K.; Zeitz, J. (2015): Berliner Moorböden im Klimawandel. Entwicklung einer Anpassungsstrategie zur Sicherung ihrer Ökosystemleistungen. UEPIL-Forschungsprojekt, Abschlussbericht. Humboldt-Universität zu Berlin.
- [4] Revi, A.; Satterthwaite, D. E.; Aragón-Durand, F.; Corfee-Morlot, J.; Kiunsi, R.B.R.; Pelling, M. et al. (2014): Urban areas. In: C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir et al.: Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A. Cambridge, United Kingdom and New York NY, USA: Cambridge University Press, S. 535–612. Online verfügbar unter https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIAR5-Chap8_FINAL.pdf.
- [5] Statistisches Bundesamt (2022): Ranking der Großstädte mit der größten Fläche in Deutschland am 31. Dezember 2021 (in km²) [Graph]. Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1233769/umfrage/flaeche-der-grossstaedte-deutschlands/>, zuletzt aktualisiert am 31.01.2023.
- [6] Amt für Statistik Berlin-Brandenburg (2022): Statistischer Bericht E IV 5 – j / 21: Energie- und CO₂-Daten in Berlin 2021. Online verfügbar unter https://download.statistik-berlin-brandenburg.de/358c216828d03891/8f51cfc4db/SB_E04-05-00_2021j01_BE.pdf.
- [7] Mohamed, M. A. (2018): GIS-gestützte Interpretation der Genese und räumlichen Verteilung von Böden in Metropolregionen im Vergleich. In: Konglomerat Geographischer Arbeiten 121, S. 113–133.
- [8] Umweltbundesamt (2023): Bodenversiegelung. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/boden/bodenversiegelung>, zuletzt aktualisiert am 23.01.2023.
- [9] Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Bauen und Wohnen (2021): Umweltatlas Berlin / 01.02 Versiegelung (Ausgabe 2021). Online verfügbar unter https://www.berlin.de/umwelt-atlas/_assets/boden/versiegelung/de-texte/k102_2021.pdf.
- [10] Der Senat von Berlin (2023): Berliner Energie- und Klimaschutzprogramm, Umsetzungszeitraum 2022 bis 2026. Vorlage zur Beschlussfassung. Hg. v. Abgeordnetenhaus von Berlin (Drucksache 19/0778). Online verfügbar unter <https://www.parlament-berlin.de/ad0s/19/IIIPlen/vorgang/d19-0778.pdf>.
- [11] Senatsverwaltung für Umwelt, Mobilität, Verbraucher- und Klimaschutz (2022): Monitoring-Bericht zur Umsetzung des Berliner Energie- und Klimaschutzprogramms (BEK 2030). Berichtsjahr 2021. Online verfügbar unter https://www.berlin.de/sen/uvk/_assets/klimaschutz/klimaschutz-in-der-umsetzung/das-berliner-energie-und-klimaschutzprogramm-bek/broschuere_bek_monitoring-2021.pdf.
- [12] Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz (2021): Planungshinweise zum Bodenschutz. Leitbild und Maßnahmenkatalog für den vorsorgenden Bodenschutz in Berlin. Online verfügbar unter https://www.berlin.de/sen/uvk/_assets/umwelt/bodenschutz-und-altlasten/leitfaden_leitbild_massnahmenkatalog_vorsorgender_bodenschutz_2021.pdf.
- [13] Chien, S. C.; Krumsin, J. A. (2022): Natural versus urban global soil organic carbon stocks: A meta-analysis. In: Science of The Total Environment 807, 150999.
- [14] Charzyński, P.; Hulisz, P.; Piotrowska-Długosz, A.; Kamiński, D.; Plak, A. (2018): Sealing effects on properties of urban soils. In: R. Lal und B. A. Stewart (Hg.): Urban Soils: CRC Press (Advances in Soil Science Series), S. 155–174.
- [15] Blume, H.-P.; Felix-Henningsen, P.; Frede, H.-G.; Guggenberger, G.; Horn, R.; Stahr, K. (1996): Böden städtisch-industrieller Verdichtungs-räume. In: Handbuch der Bodenkunde. Landsberg (Lech): Ecomed.
- [16] Cambou, A.; Shaw, R. K.; Huot, H.; Vidal-Beaudet, L.; Hunault, G.; Cannavo, P. et al. (2018): Estimation of soil organic carbon stocks of two cities, New York City and Paris. In: Science of The Total Environment 644, S. 452–464.
- [17] Wei, Z.-Q.; Wu, S.-H.; Zhou, S.-L.; Li, J.-T.; Zhao, Q.-G. (2014): Soil organic carbon transformation and related properties in urban soil under impervious surfaces. In: Pedosphere 24 (1), S. 56–64.
- [18] Edmondson, J. L.; Davies, Z. G.; McHugh, N.; Gaston, K. J.; Leake, J. R. (2012): Organic carbon hidden in urban ecosystems. In: Scientific Reports 2, 963.
- [19] Du, J.; Yu, M.; Cong, Y.; Lv, H.; Yuan, Z. (2022): Soil organic carbon storage in urban green space and its influencing factors: A case study of the 0–20 cm soil layer in Guangzhou City. In: Land 11 (9), 1484.
- [20] Vasenev, V. I.; Stoorvogel, J. J.; Vasenev, I. I. (2013): Urban soil organic carbon and its spatial heterogeneity in comparison with natural and agricultural areas in the Moscow region. In: CATENA 107, S. 96–102.
- [21] Makki, M.; Thestorff, K. (2020): Anleitung für die bodenkundliche Kartierung im Land Berlin unter besonderer Berücksichtigung anthropogener Böden im urbanen Bereich. Hg. v. Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz. Online verfügbar unter https://www.berlin.de/sen/uvk/_assets/umwelt/bodenschutz-und-altlasten/bodenkundliche_kartieranleitung_berlin_gesamtdokument-4.pdf.
- [22] Meuser, H. (2010): Contaminated urban soils. 1. Aufl. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer (Environmental Pollution, 18).
- [23] Meuser, H.; Konen, L. (2011): Katalog technogener Substrate. Abbildungen, Eigenschaften, Gefährdungspotential. Hochschule Osnabrück, Fakultät Agrarwissenschaften und Landschaftsarchitektur, Studiengang Bodennutzung und Bodenschutz.
- [24] Vasenev, V.; Kuzyakov, Y. (2018): Urban soils as hot spots of anthropogenic carbon accumulation: Review of stocks, mechanisms and driving factors. In: Land Degradation & Development 29 (6), S. 1607–1622.
- [25] Hiller, D. A. (1996): Schadstoffeträger in urbane Böden. In: Arbeitskreis Stadtböden der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft (Hg.): Urbaner Bodenschutz. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 45–56.
- [26] Meuser, H. (1996): Technogene Substrate als Ausgangsgestein der Böden urban-industrieller Verdichtungs-räume - dargestellt am Beispiel der Stadt Essen. Kiel (Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 35).
- [27] Norra, S.; Cheng, Z. (2017): Urban soils contamination. In: M. J. Levin, K. J. Kim, J. L. Morel, W. Burghardt, P. Charzynski und R. K. Shaw (Hg.): Soils within cities. Global approaches to their sustainable management - composition, properties, and functions of soils of the urban environment. Stuttgart: Catena-Schweizerbart, S. 35–42.
- [28] DIN EN 15936:2012-11: Schlamm, behandelter Bioabfall, Boden und Abfall – Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) mittels trockener Verbrennung.

- [29] Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Versuchs- und Forschungsanstalten e.V. (2016): A 4.1.3.2 Direkte Bestimmung von organischem Kohlenstoff durch Verbrennung bei 550°C und Gasanalyse. 7. Teilfig. 4. Auflage. Darmstadt: VDLUFA-Verlag (VDLUFA-Methodenbuch, 1).
- [30] Azzolina, N. A.; Kreitinger, J. P.; Skorobogatov, Yelena; Shaw, R. K. (2016): Background concentrations of PAHs and metals in surface and subsurface soils collected throughout Manhattan, New York. In: *Environmental Forensics* 17 (4), S. 294–310.
- [31] Edmondson, J. L.; Stott, I.; Potter, J.; Lopez-Capel, E.; Manning, D. AC.; Gaston, K. J.; Leake, J. R. (2015): Black carbon contribution to organic carbon stocks in urban soil. In: *Environmental Science & Technology* 49 (14), S. 8339–8346.
- [32] Lehmann, A.; Billen, N.; Lange, F.-M.; Willbold, S.; Höke, S.; Hädicke, A. (2015): Humusstabilität in urbanen Unterböden – Konsequenzen für deren Umlagerung. Jahrestagung der DBG 2015: Unsere Böden - unser Leben, 05.-10.09.2015, München.
- [33] Rawlins, B. G.; Vane, C. H.; Kim, A. W.; Tye, A. M.; Kemp, S. J.; Bellamy, P. H. (2008): Methods for estimating types of soil organic carbon and their application to surveys of UK urban areas. In: *Soil Use & Management* 24 (1), S. 47–59.
- [34] Lorenz, K.; Preston, C. M.; Kandeler, E. (2006): Soil organic matter in urban soils. Estimation of elemental carbon by thermal oxidation and characterization of organic matter by solid-state ¹³C nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy. In: *Geoderma* 130 (3-4), S. 312–323.
- [35] Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Bauen und Wohnen (2022): Umweltatlas Berlin / Entsiegelungspotenziale. Online verfügbar unter <https://fbinter.stadt-berlin.de/fb>, zuletzt aktualisiert am 15.03.2022.
- [36] GoogleStreetView (GoogleMaps) (2008): Ribnitzer Straße 42, 13051 Berlin. Online verfügbar unter <https://t1p.de/wokpg>, zuletzt aktualisiert im Aug. 2008.
- [37] Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Bauen und Wohnen (2022): Umweltatlas Berlin / Entsiegelungspotenziale, Nummer 3, Foto 4, aufgenommen Okt. 2013. Online verfügbar unter https://fbinter.stadt-berlin.de/fb/geoservice/alphanumeric-service/map_alphadata_show_image.jsp?ID=Foto%204&img=http://fbinter.stadt-berlin.de/fb_daten/fotos/Entsiegelung/00003_016p.jpg, zuletzt aktualisiert am 15.03.2022.
- [38] Ad-hoc-AG Boden (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung*. 5. Aufl. Stuttgart: Schweizerbart
- [39] Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen (2018): Geoportal Berlin. Online verfügbar unter <https://fbinter.stadt-berlin.de/fb/index.jsp>, zuletzt aktualisiert am 01.01.2018.
- [40] Landesarchiv Berlin, Beuth Hochschule für Technik Berlin: HistoMap Berlin. Online verfügbar unter <http://histomapberlin.de/histomap/de/index.html>.
- [41] DIN 19539:2016-12: Untersuchung von Feststoffen – Temperaturabhängige Differenzierung des Gesamtkohlenstoffs (TOC₄₀₀, ROC, TIC₉₀₀).
- [42] Wessolek, G.; Facklam, M. (1997): Standorteigenschaften und Wasserhaushalt von versiegelten Flächen. In: *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 160, S. 41–46.
- [43] Klungenfuß, C.; Klein, D.-P.; Thrum, T.; Fell, H.; Klemm, J.; Zeitz, J. (2019): *Natürliche Kohlenstoffspeicher in Berlin. Ergebnisse des Forschungsprojektes NatKoS*. Broschüre. Humboldt-Universität zu Berlin. DOI: 10.18452/20027.2



Ein Haupttreiber des Klimawandels sind CO₂-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger. Städte sind Hotspots anthropogener Emissionen mit einem Anteil von mehr als 70 % weltweit. Sie besitzen daher eine besondere Verantwortung für die Umsetzung von Maßnahmen und Strategien zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen.

Böden und Vegetation erfüllen als „natürliche Kohlenstoffspeicher“ eine Klimaschutzfunktion, denn sie besitzen das Potenzial CO₂ aufzunehmen. So bindet Stadtgrün CO₂ aus der Luft in seiner Biomasse. Ein Teil dieses gespeicherten Kohlenstoffs gelangt beim Abbau der Biomasse in den Boden und bleibt dort in Form von Humus langfristig erhalten. Die Mengen an Kohlenstoff, welche im Boden unter verschiedenen urbanen Nutzungen und in urbanen Vegetationsstrukturen gespeichert sind, können den Klimaschutzwert von Boden und Vegetation in der Stadt quantifizieren.

Die Klimaschutzfunktion der Stadtböden wird allerdings durch einen hohen Versiegelungsgrad beeinträchtigt. So ist etwa ein Drittel der Gesamtfläche Berlins versiegelt. Die Bodenversiegelung führt dazu, dass kaum bis keine Interaktion zwischen Atmosphäre, Vegetation und Boden mehr möglich ist. Einen Beitrag zu Erreichung der politischen Klimaschutzziele kann die Vermeidung von Neuversiegelung und die Entseiegelung von dauerhaft nicht mehr genutzten Flächen leisten.

Um das Potential solcher Maßnahmen aufzuzeigen, wurden im Forschungsprojekt „Kosie“ erstmals gezielte Untersuchungen an versiegelten und entsiegelten Berliner Böden durchgeführt und deren Kohlenstoffspeicher quantifiziert. In der vorliegenden Broschüre sind die wesentlichen Ergebnisse des Forschungsprojektes dargestellt und anwendungsorientiert aufbereitet.

Das Vorhaben „Kohlenstoff in ver- und entsiegelten Böden (Kosie)“ (Projektlaufzeit: 11/2019 bis 05/2023) wurde im Berliner Programm für Nachhaltige Entwicklung (BENE) gefördert aus Mitteln des Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung und des Landes Berlin (Förderkennzeichen 1280-B5-O).

