

Sorption von urbanen Schadstoffen an holzbasierten Pflanzenkohlen zur Verbesserung des Schadstoffrückhalts in Bodenfiltern

Anett Georgi¹, Xiangyu Ji², Katrin Mackenzie¹, Hauke Harms², Lukas Y. Wick²

¹ Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ,
Department Technische Biogeochemie, Leipzig, Deutschland

² Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ,
Department Angewandte Mikrobielle Ökologie, Leipzig, Deutschland

Kurzfassung: Boden und Substrat in blau-grünen Infrastrukturen kommt eine wichtige Aufgabe für den Rückhalt von urbanen Schadstoffen zum Schutz von Wasserressourcen zu. Kohlenstoffbasierte Materialien wie Pflanzenkohlen sind in der Lage typische organische Schadstoffe zu binden, zeigen jedoch in Abhängigkeit von ihren physikochemischen Eigenschaften spezifische Unterschiede in der Schadstoffaufnahme. Pflanzenkohle nach Gasaktivierung kann aufgrund erweiterter Poren Schadstoffe wesentlich schneller ins Korninnere transportieren und besitzt eine höhere Sorptionskapazität. Anhand charakteristischer, experimentell bestimmbarer Sorptionsparameter für das Schadstoff-Adsorbens-System konnte unter Verwendung frei zugänglicher Softwaretools das Rückhaltevermögen einer durchflossenen Pflanzenkohleschüttung für einen Modellschadstoff gut vorhergesagt werden. Ein Aufbau für Pilotversuche zum Schadstoffrückhalt in Baumrigolensystemen mit Pflanzenkohlezusatz wird vorgestellt.

Key-Words: Schadstoffrückhalt, Pflanzenkohle, Substrate, Rigolen

1 Einleitung

Blau-grüne Infrastrukturen, wie z. B. Versickerungszonen und Baumrigolen, spielen in Schwammstadtkonzepten eine wichtige Rolle zur Anpassung an den Klimawandel. Straßen- und Oberflächenabläufe sind allerdings durch stark schwankende Volumenströme (z. B. Starkregen) und chemische Belastungen gekennzeichnet, die natürliche Rückhalte- und Abbauprozesse (z. B. durch mikrobielle Transformation) überfordern und zur Verlagerung von Schadstoffen ins Grundwasser führen können. Die Ergänzung von Bodenfiltern durch kohlenstoffbasierte, hochporöse Materialien kann den Rückhalt von Schadstoffen insbesondere in Zeiten hoher Belastung verbessern. Im Idealfall können mikrobielle Prozesse organische Schadstoffe im Laufe einer nachfolgenden, kontinuierlichen und langsamen Schadstoff-Freisetzung transformieren und damit die Aufnahmekapazität der Adsorbentien regenerieren. Für

besonders persistente Schadstoffe, wie z. B. per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (PFAS) muss hingegen ein langfristig wirksamer Rückhalt zur Vermeidung von Grundwasserkontaminationen gewährleistet werden.

Pflanzenkohle auf Holzbasis wird als nachhaltiges und kostengünstiges Sorptionsmittel betrachtet und wird inzwischen mit reproduzierbarer Qualität großtechnisch hergestellt. Pflanzenkohle wird in Baumsubstraten bisher vorwiegend zur Verbesserung der Wasser- und Nährstoffspeicherfähigkeit eingesetzt während ihre Funktion für den Rückhalt von Schadstoffen bisher wenig betrachtet wurde. Das Design von blau-grünen Infrastrukturen erfordert daher Prognosen zur kurz- und langfristigen Wirksamkeit von optimierten Substratgemischen bzw. -schichtungen um z. B. über die Notwendigkeit einer Rückholung beladener Substrate zu entscheiden. Notwendige Grundlagen hierfür sind vertiefte Kenntnisse zur Rolle physikochemischer Eigenschaften von Pflanzenkohle hinsichtlich der Aufnahme und Freisetzung von Schadstoffen durch reversible Sorptionsprozesse, die Bestimmung von Prozesskenngrößen sowie geeignete Prognosemodelle.

2 Ziele und Vorgehen

In dieser Arbeit wurde das Sorptionsverhalten von vier typischen urbanen Schadstoffen an unbehandelter Pflanzenkohle (BC) untersucht, die durch Pyrolyse von Holzsägewerksabfällen hergestellt wurde. Gleichzeitig wurde auch die daraus hergestellte aktivierte Pflanzenkohle (BAC, nach Gasaktivierung bei hohen Temperaturen) untersucht. BC und BAC wurden von der Firma Inkoh AG, Schweiz zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus wurden frei zugängliche Softwarelösungen (Abschnitt 3.2) zur Modellierung des Schadstoffrückhalts getestet, indem die Vorhersagen mit Daten aus kleinskaligen Säulenversuchen verglichen wurden. Als Modellschadstoffe wurden auf Basis ihrer Relevanz sowie ihrer verschiedenen physikochemischen Eigenschaften Naphthalin (NAPH), Methyl-*tert*-butylether (MTBE), 1,3-Diphenylguanidin (DPG) und Perfluoroktansäure (PFOA) ausgewählt.

3 Ergebnisse

3.1 Vergleich des Adsorptionsverhaltens von BC und BAC im Batch-Versuch

Abbildung 1 zeigt für eine für den Einsatz in Substratmischungen übliche Korngröße von 1-2 mm die nach 7 Tagen (168 h) Äquilibrierungszeit erreichten operationellen Sorptionsisothermen. Sie sind ein Maß für die Sorptionsleistung unter praktisch relevanten Bedingungen, die für alle untersuchten Schadstoffe durch die Aktivierung von BC zu BAC drastisch verbessert wurde. Diese Verbesserung geht weit über das auf Basis der Vergrößerung in der spezifischen Oberfläche (Faktor 2,4 von 375 m²/g auf 918 m²/g) zu erwartende Maß hinaus. Gleichzeitig zeigen sich erhebliche Unterschiede innerhalb der untersuchten Schadstoffe mit identischer Abstufung in der Sorptionsneigung für BC und BAC, was für ähnliche zugrundeliegende

Wechselwirkungen mit der Kohlenstoffoberfläche spricht. Insgesamt ist die Vorhersage der Sorption von geladenen Molekülen wie DPG und PFOA auf Basis tabellierter Stoffdaten bisher schwer möglich.

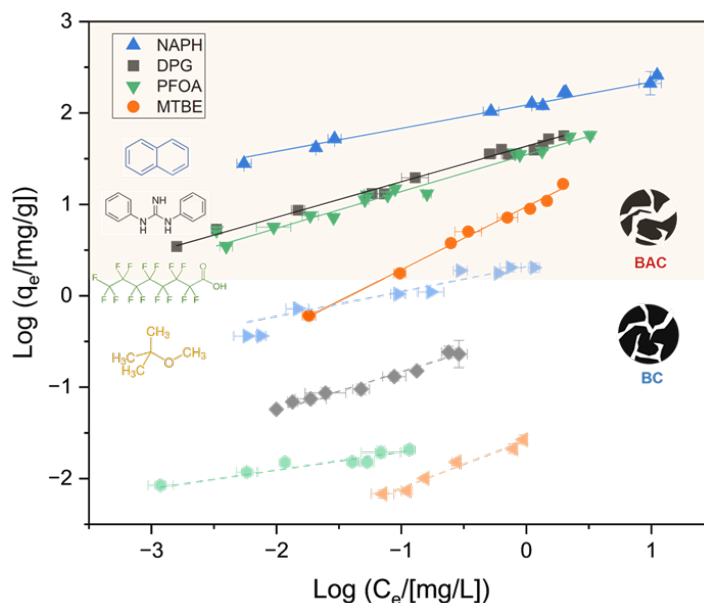


Abbildung 1: Operationelle Sorptionsisothermen für die untersuchten Schadstoffe an BC (gestrichelte Linie) und BAC (durchgezogene Linie), Korngröße: 1-2 mm, Äquilibrium: 7 d, pH: 6,5-7,5 in 10 mM Na_2SO_4).

Die detaillierte Untersuchung der Adsorptionskinetik der Schadstoffe zeigte eine stark verzögerte Adsorption an BC gegenüber BAC, wie am Beispiel von NAPH in Abb. 2 gezeigt ist. Das Erreichen des Sorptionsgleichgewichts erfordert ca. 7 d für BAC während die Adsorption an BC auch nach 7 Wochen noch weiter läuft. Die Ursache dafür ist in der Porengrößenverteilung zu sehen. Während das Holzpyrolyseprodukt BC ausschließlich Mikroporen ($< 2 \text{ nm}$) aufweist, führt die Aktivierung von BC zu BAC zur Erweiterung der Poren und einem signifikanten Mesoporenanteil (2-10 nm), der den Transport der Schadstoffe in das Partikelinnere drastisch erleichtert. Aus den experimentellen Daten wurden Oberflächendiffusionskoeffizienten (D_s) bestimmt, die charakteristisch für den Stofftransport in das Partikelinnere für ein Schadstoff-Adsorbens-System sind und als Eingangsparameter für die in Abschnitt 3.2. diskutierten Modelle verwendet werden.

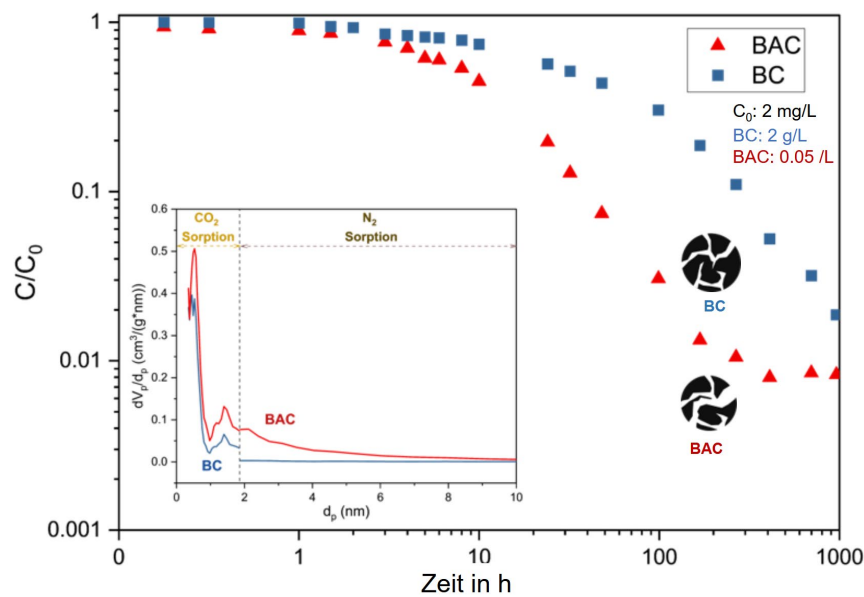


Abbildung 2: Zeitaufgelöste Abnahme der Konzentration von NAPH in der Wasserphase durch Sorption an BC bzw. BAC sowie Porengrößenverteilung (innenliegend) der Materialien

3.2 Schadstoffrückhalt in der durchströmten Schüttung

Die Softwaretools FAST 2.0 (2025) sowie AdDesignS (2025) sind online frei verfügbar und wurden ursprünglich zur Vorhersage von Durchbruchkurven von organischen Schadstoffen in wassergesättigten Schüttungen mit gekörnten Adsorbentien entwickelt. In beiden Modellen wird die Kombination von Filmdiffusion durch den unbewegten Wasserfilm um die Partikel sowie die Intrapartikeldiffusion des Schadstoffs als relevante Schritte zugrunde gelegt. Als essentielle Eingabeparameter dienen die experimentell bestimmten Isothermenparameter sowie D_s -Werte (Abschnitt 3.1) für Schadstoff und Adsorbens. Damit können Durchbruchkurven für verschiedene Szenarien vorhergesagt werden, da alle weiteren Parameter vor allem durch die Prozessbedingungen und Eigenschaften der Schüttung bestimmt werden. Dies beinhaltet die Schadstoffkonzentration, die Flussrate des Wassers, die Dimension und das Feststoff/Wasser-Verhältnis der Adsorbentenschüttung sowie die Korngröße des Feststoffs. Hieraus können auch Filmdiffusionskoeffizienten über die Berechnung dimensionsloser Kennzahlen abgeschätzt werden.

Die für DPG an BC erhaltenen experimentellen Durchbruchkurven (Abb. 3, links) für 10 cm Schüttung sind charakteristisch für eine schnelle Adsorption an der äußeren Oberfläche der BC-Körner, die eine sehr gute Abreinigung des Wassers in der Anfangsphase des Schadstoffzustroms bewirkt. Der langsame Abtransport der Schadstoffe ins Partikelinnere bedingt allerdings eine schnelle Abnahme der Reinigungsleistung innerhalb weniger Stunden (ca. 20 h bzw. 40 ausgetauschte Porenvolumina (PV)). Dennoch bleibt eine langfristig verfügbare Aufnahmekapazität erhalten (Verhältnis von Abfluss- und Zuflusskonzentration $C_{out}/C_{in} = 0,7$). Beide

Modelle (AdDesignS und FAST 2.0) können auf Basis der Isothermendaten sowie D_s -Werte aus dem Batchversuch den Verlauf des Durchbruchs prinzipiell gut vorhersagen, mit einer leichten Unterschätzung des kurzfristigen und Überschätzung des langfristigen Aufnahmevermögens. Für BAC wird aufgrund der besseren Sorptionsleistung über den Durchsatz von 500 ausgetauschten Porenvolumina ein konstanter Abreinigungsgrad von 70% für die Schüttung von nur 10 cm vorhergesagt (Abb. 3, rechts), der Vergleich mit Säulenversuchen steht noch aus.

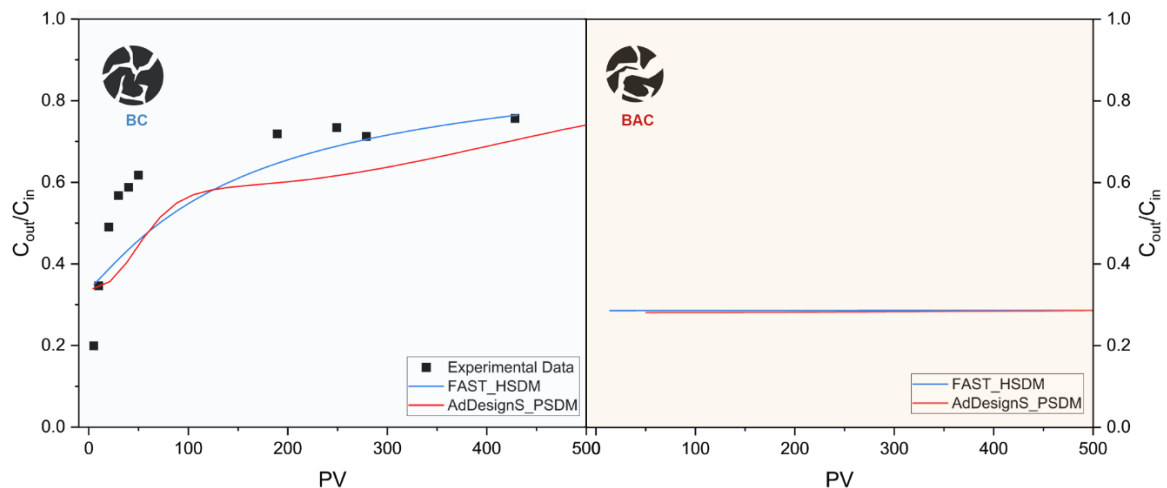


Abbildung 3: Relative DPG-Konzentration im Abfluss bezogen auf den Zufluss (C_{out}/C_{in} , $C_{in} = 0,1 \text{ mg/L}$ in $10 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, pH: 6,5-7,5, $u = 20 \text{ cm/h}$) in Säulen ($d = 1,1 \text{ cm}$, $L = 10 \text{ cm}$) mit granulärem (1-2 mm) BC sowie Ergebnisse der Vorhersagen mit FAST 2.0 und AdDesign für BC (links) und Vorhersage für BAC (rechts).

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die bisherigen Untersuchungen zeigten, dass das durch Gasaktivierung erhaltene Produkt (BAC) gegenüber der ausschließlich durch Pyrolyse hergestellten holzbasierten Pflanzenkohle (BC) eine drastisch verbesserte Sorptionsleistung aufweist, was vor allem durch eine Aufweitung der Poren und verbesserte Zugänglichkeit des inneren Porenraumes der Körner zurückzuführen ist. Die Modellierungstools AdDesign und FAST 2.0 konnten das Schadstoffrückhaltevermögen von Pflanzenkohle-Schüttungen im Säulenversuch anhand von operationellen Isothermen- und kinetischen Parametern gut beschreiben. Diese Modelle können Vorhersagen zum Schadstoffrückhalt für verschiedene Szenarien wie unterschiedliche Intensität von Starkregenereignissen und andere Schüttungseigenschaften (Korngrößen, Schütthöhe) für durchflossene Systeme liefern. Sie bieten somit potenziell Unterstützung bei der Planung und Optimierung von technischen Filtern zur Vorreinigung von Straßenabläufen oder Versickerungszonen, die stark mit Pflanzenkohle angereicherte Substratschichten enthalten. Hierzu besteht weiterer Forschungsbedarf. Gleiches gilt für das Zusammenspiel des Rückhalts der

Schadstoffe an (aktivierten) Pflanzenkohlen im Boden und ihres langfristigen mikrobiellen Abbaus. Die unterschiedlichen Transportgeschwindigkeiten für die Schadstoffaufnahme in die Partikel könnte hier zu unterschiedlichen Wirkungen von reinen Pflanzenkohlen und gasaktivierten Produkten führen.

Aktuell werden auf dem Campus des UFZ Pilotversuche zum Schadstoffrückhalt in Baumrigolen mit 1 m³ Substrat und jungen Linden vorbereitet. Dabei wurde die oberste Schicht (15 cm) als Mischung von Oberboden und BC bzw. BAC aufgebaut (Abb. 4).

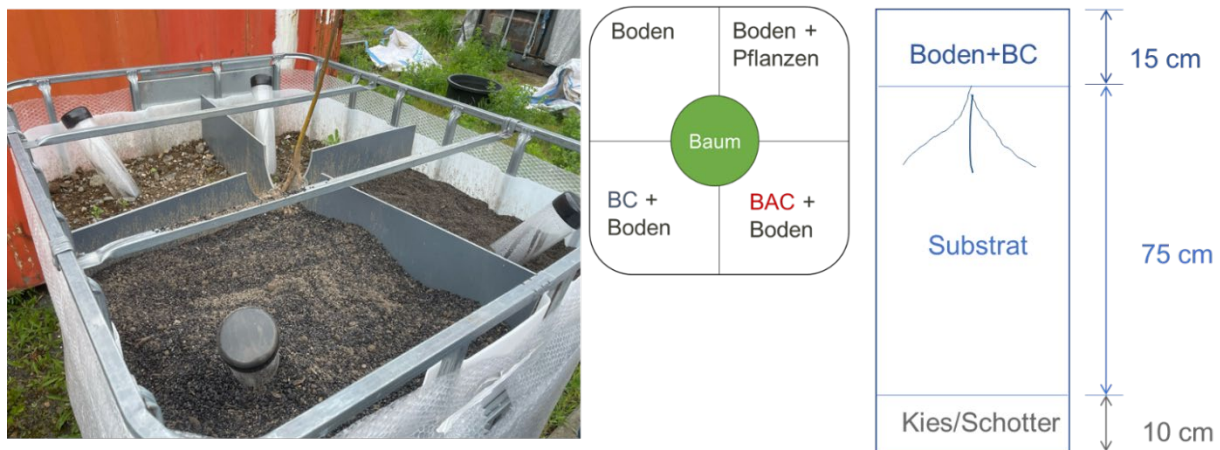


Abbildung 4: Pilot-Baumrigole mit verschiedenen Deckschichten von Oberboden mit/ohne Zusatz von BC oder BAC im Masseverhältnis 1:4

5 Literatur

FAST 2.0 (2025) Fixed-bed Adsorption Simulation Tool, <http://www.fast-software.de/index.html>, zuletzt aufgerufen am 31.7.2025.

AdDesignS (2025) Adsorption Design Software for Windows (AdDesignS) Version 1.0, <https://github.com/USEPA/Environmental-Technologies-Design-Option-Tool>, zuletzt aufgerufen am 31.7.2025.

Korrespondenz an:

Dr. Anett Georgi
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ, Permoserstr. 15,
04318 Leipzig, Deutschland
Telefon: +49 34160251405
E-Mail: anett.georgi@ufz.de