

# URBANE SCHADSTOFFE ENTFERNEN

## HOLZBASIERTE PFLANZENKOHLE ZUR VERBESSERUNG DES SCHADSTOFFRÜCKHALTS IN BODENFILTERN

Anett Georgi; Xiangyu Ji; Katrin Mackenzie; Hauke Harms; Lukas Y. Wick  
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Leipzig

### RÉSUMÉ

#### POLLUANTS URBAINS – CHARBON VÉGÉTAL À BASE DE BOIS POUR AMÉLIORER LA RÉTENTION DES POLLUANTS DANS LES FILTRES DE SOL

Le sol et le substrat des infrastructures bleues et vertes ont un rôle important à jouer dans la rétention des polluants urbains afin de préserver les ressources en eau. Les matériaux à base de carbone tels que les charbons végétaux sont capables de fixer les polluants organiques typiques, mais présentent des différences spécifiques dans l'absorption des polluants en fonction de leurs propriétés physicochimiques. Le charbon végétal activé au gaz peut transporter les polluants beaucoup plus rapidement vers l'intérieur des grains en raison de pores élargis et possède une capacité de sorption plus élevée. À l'aide de paramètres de sorption caractéristiques, déterminés expérimentalement pour le système adsorbant de polluants, il a été possible, en utilisant des outils logiciels en libre accès, de prédire correctement la capacité de rétention de l'eau d'un tas de charbon végétal traversé par un polluant modélisé. Une structure destinée à des essais pilotes de rétention de polluants dans des systèmes de fosses d'arbres à impluvium avec ajout de charbon végétal est présentée.

### 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 Adsorbenzien 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

Kontakt: A. Georgi, [anett.georgi@ufz.de](mailto:anett.georgi@ufz.de)

mit reproduzierbarer und hoher Qualität grosstechnisch hergestellt. In der Praxis wird Pflanzenkohle in Baumsubstraten bisher vorwiegend zur Verbesserung der Wasser- und Nährstoffspeicherfähigkeit eingesetzt. Ihre Funktion für den Rückhalt von Schadstoffen wird hingegen bisher wenig berücksichtigt. 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.

## ZIELE UND VORGEHEN

In dieser Arbeit wurde das Sorptionsverhalten von vier typischen urbanen Schadstoffen an unbehandelter Pflanzenkohle (BC) untersucht, die durch Pyrolyse aus Abfällen von Holzsägewerken hergestellt wurde. Gleichzeitig wurde auch die daraus hergestellte aktivierte Pflanzenkohle (BAC, nach Gasaktivierung bei hohen Temperaturen) untersucht.<sup>1</sup> Darüber hinaus wurden frei zugängliche Softwarelösungen 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.

## ERGEBNISSE

### VERGLEICH DES ADSORPTIONSVERHALTENS VON BC UND BAC IM BATCH-VERSUCH

Insgesamt ist die Vorhersage der Sorption von geladenen Molekülen wie DPG und PFOA auf Basis tabellierter Stoffdaten bisher schwer möglich, so dass die experimentelle Bestimmung von Sorptionsparametern erforderlich ist. Zunächst wurden in Batch-Versuchen operationelle Sorp-

tionsisothermen für die untersuchten Schadstoffe an BC- und BAC-Partikeln mit einer für den Einsatz in Substratmischungen üblichen Korngrösse von 1-2 mm nach sieben Tagen (168 h) Äquilibrierungszeit ermittelt. *Figur 1* zeigt die daraus berechneten Sorptionskoeffizienten  $K_d$  als Verhältnis von Beladung auf dem Adsorbens ( $q_e$  in  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) und Konzentration in der Wasserphase ( $C_e$  in  $\mu\text{g}/\text{l}$ ). Die Adsorptionskoeffizienten sind ein Mass für die Sorptionsleistung, 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  $375\text{ m}^2/\text{g}$  auf  $918\text{ m}^2/\text{g}$ ) 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 Koh-

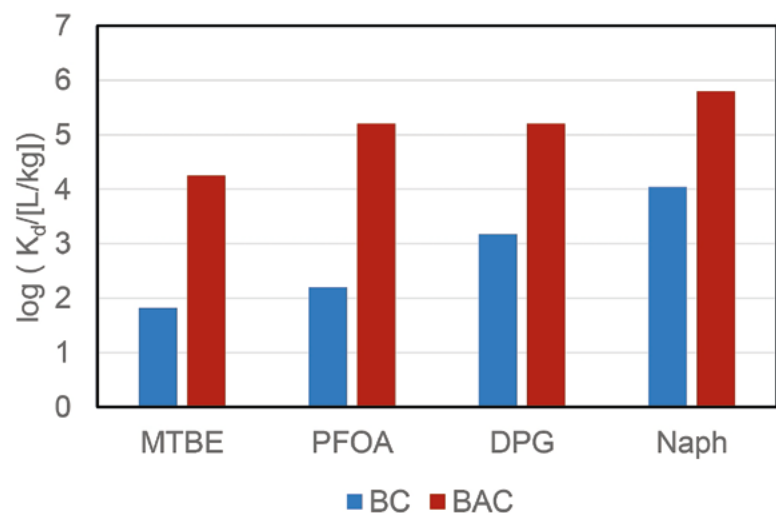


Fig. 1 Operationelle Sorptionskoeffizienten ( $\log K_d$ ) bei einer Wasserphasenkonzentration der Schadstoffe von  $100\text{ }\mu\text{g}/\text{l}$  für BC und BAC, Korngrösse: 1–2 mm, Äquilibrierung: 7 d, pH: 6,5–7,5 in  $10\text{ mM Na}_2\text{SO}_4$ .

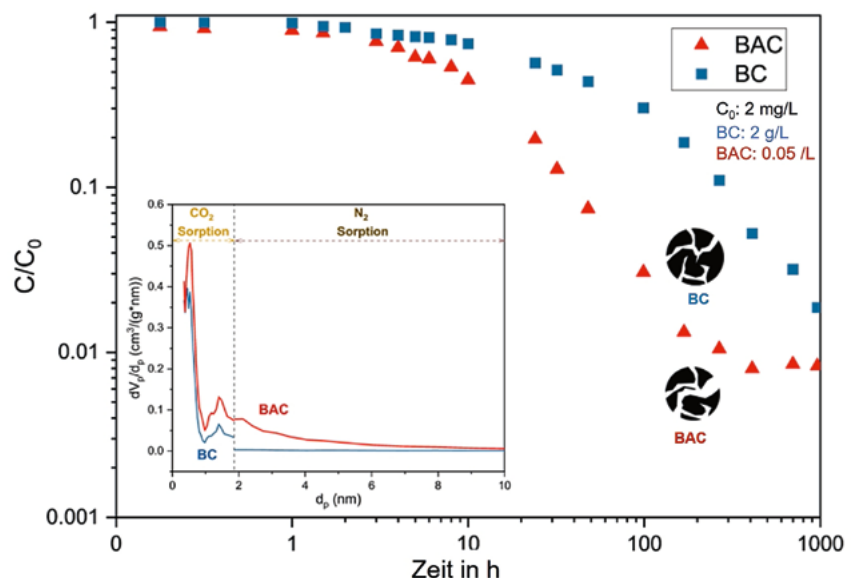


Fig. 2 Zeitaufgelöste Abnahme der Konzentration von NAPH in der Wasserphase durch Sorption an BC bzw. BAC sowie Porengrössenverteilung (innenliegend) der Materialien.

<sup>1</sup> BC und BAC wurden von der Schweizer Firma Inkoh AG zur Verfügung gestellt.



## VERWENDETE ABKÜRZUNGEN

BAC	gasaktivierte Pflanzenkohle
BC	unbehandelte Pflanzenkohle
DPG	1,3-Diphenylguanidin
MTBE	Methyl- <i>tert</i> -butylether
NAPH	Naphthalin
PFAS	per- und polyfluorierte Alkylverbindungen
PFOA	Perfluoroktansäure

lenstoffoberfläche spricht. Die detaillierte Untersuchung der Adsorptionskinetik der Schadstoffe zeigte eine stark verzögerte Adsorption an BC gegenüber BAC, wie am Beispiel von NAPH in *Figur 2* gezeigt ist. Das Erreichen des Sorptionsgleichgewichts erfordert ca. sieben Tage für BAC während die Adsorption an BC auch nach sieben Wochen noch weiter läuft. Die Ursache dafür ist in der Porengrößenverteilung zu sehen. Während das Holzpyrolyseprodukt BC ausschliesslich Mikroporen (< 2 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 im kommenden Abschnitt diskutierten Modelle verwendet werden.

## SCHADSTOFFRÜCKHALT IN DER DURCHSTRÖMTEN SCHÜTTUNG

Die Softwaretools *FAST 2.0* (2025)<sup>2</sup> sowie *AdDesignS* (2025)<sup>3</sup> sind online frei verfügbar und wurden ursprünglich zur Vorhersage von Durchbruchskurven 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 (s. *Abschnitt oben*) für Schadstoff und Adsorbens. Damit können Durchbruchskurven für verschiedene Szenarien vorhergesagt werden, da alle weiteren Parameter vor allem durch die Prozessbedingungen und Eigenschaften der Schüttung bestimmt werden. Dies beinhaltet die Schadstoff-

konzentration, die Flussrate des Wassers, die Dimension und das Feststoff/Wasser-Verhältnis der Adsorbentschüttung sowie die Korngrösse des Feststoffs. Hieraus können auch Filmdiffusionskoeffizienten über die Berechnung dimensionsloser Kennzahlen abgeschätzt werden.

Um die Sorptionseigenschaften der C-basierten Adsorbentien im Durchfluss über einen hohen Wasserdurchsatz (Anzahl an ausgetauschten Porenvolumina [PV]) zu untersuchen, wurden kleinskalige Säulenversuche (10 cm Säulen) mit einer Schütthöhe von 2,4 cm BC (0,6 g) eingebettet in eine Glaskugelschüttung am Eingang und Ausgang durchgeführt. Die für DPG an BC erhaltenen experimentellen Durchbruchskurven (*Fig. 3, links*) 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 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 Durch-

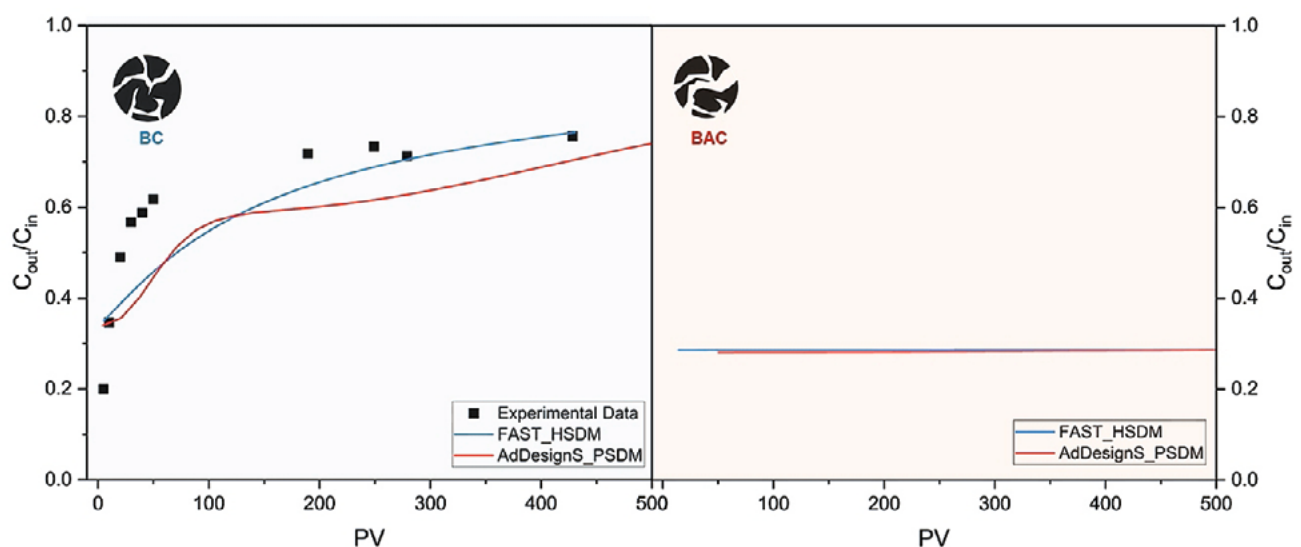


Fig. 3 Relative DPG-Konzentration im Abfluss bezogen auf den Zufluss ( $C_{out}/C_{in}$ ,  $C_{in} = 0,1 \text{ mg/l}$  in  $10 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$ , pH: 6,5–7,5,  $u = 20 \text{ cm/h}$ ) in Säulen ( $d = 1,1 \text{ cm}$ ,  $l = 10 \text{ cm}$ ) mit granulärem (1–2 mm) BC (0,6 g, 2,4 cm Schütthöhe, sowie Ergebnisse der Vorhersagen mit *FAST 2.0* und *AdDesign* für BC (links) und Vorhersage für BAC für die gleiche Adsorbensmenge von 0,6 g (rechts).

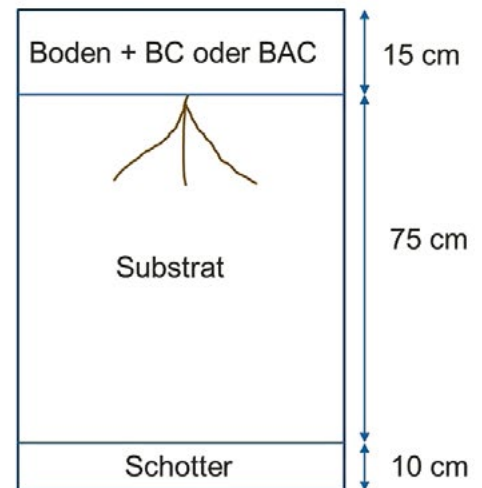
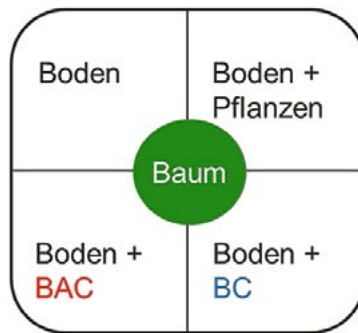


Fig. 4 Pilot-Baumrigole mit verschiedenen Deckschichten von Oberboden mit/ohne Zusatz von BC oder BAC im Masseverhältnis 1:4.

bruchs 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 BAC-Schüttung von nur ca. 3 cm vorhergesagt (Fig. 3, rechts), der Vergleich mit Säulenversuchen steht noch aus.

## 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 beiden Modellierungstools konnten das Schadstoffrückhaltevermögen von Pflanzenkohle-Schüttungen im Säulenversuch anhand von operationellen Sorptionsisothermen 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 UFZ-Campus Pilotversuche zum Schadstoffrückhalt in Baumrigolen mit 1 m<sup>3</sup> Substrat und jungen Linden durchgeführt. Dabei wurde die oberste Schicht (15 cm) als Mischung von Oberboden und BC bzw. BAC aufgebaut (Fig. 4).

**GEO BOX**

Ihre smarte Lösung für die  
Verwaltung von Leitungskataster  
und Strasseninfrastrukturen!

