

Auswirkungen von Nass-Trocken-Zyklen auf die Hydraulik und den Rückhalt gelöster Schadstoffe aus Niederschlagswasser in mit Pflanzenkohle angereicherten Böden

Natalie Páez-Curtidor¹, Dominik Meier¹, Brigitte Helmreich¹

¹*Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft, Technische Universität München, Deutschland*

Kurzfassung: Pflanzenkohle kann gelöste Schadstoffe aus Niederschlagswasser entfernen. Ihre Eignung als Zusatzstoff für Versickerungsmulden muss jedoch noch geprüft werden, insbesondere in Bezug auf ihre Wirkung auf die hydraulischen Eigenschaften der bewachsenen Bodenzone sowie auf den Einfluss von Nass-Trocken-Zyklen. Zu diesem Zweck wurden Säulenversuche zum Rückhalt der gelösten Schwermetalle Kupfer und Zink sowie der Biozide Diuron, Mecoprop und Terbutryn mit intermittierender Bewässerung mit synthetischem Niederschlagswasser durchgeführt. Dabei wurde Pflanzenkohle zu 5 % w/w in zwei Bodentypen eingemischt: eine Oberboden- und eine Unterboden-Mischung. Die Pflanzenkohle wies eine signifikante Verbesserung des Rückhalts von Bioziden in beiden getesteten Böden auf, unabhängig von den Nass-Trocken-Zyklen. Obwohl die mit Biokohle angereicherten Säulen im Vergleich zu den nicht angereicherten Säulen eine geringere hydraulische Leitfähigkeit aufwiesen, konnte in allen angereicherten Säulen eine ausreichend hohe Entwässerungssicherheit gewährleistet werden. Die Zumischung von Pflanzenkohle ist damit eine vielversprechende Option zur Verbesserung des Biozidrückhalts in Versickerungsmulden.

Key-Words: Pflanzenkohle, Bodenmischungen, Versickerungsmulden, gelöste Schadstoffe, Nass-Trocken-Zyklen

1 Einleitung

Die Versickerung von Niederschlagswasser durch die bewachsene Bodenzone von Versickerungsmulden ist eine Möglichkeit, Schadstoffe zu entfernen (Ekka et al., 2021). Während partikelgebundene Schadstoffe sehr effektiv durch Filtration entfernt werden, können manche gelösten Schadstoffe nur unzureichend zurückgehalten werden (Boehm et al., 2020; Bork et al., 2021). Um den Rückhalt gelöster Stoffe zu verbessern, wurde in einigen Studien die Fähigkeit von Pflanzenkohle untersucht. Dabei zeigte sich ein guter Rückhalt einer Vielzahl gelöster Schwermetallen wie Kupfer und Zink sowie organischer Spurenstoffe wie PAKs, PCBs und Biozide (Biswal et al.,

2022; Spahr et al., 2022). Bei den meisten dieser Studien wurde die Pflanzenkohle isoliert oder mit Materialien wie Sand gemischt untersucht, die nicht mit der üblichen Zusammensetzung bewachsener Bodenzonen in Versickerungsmulden vergleichbar sind (Kaya et al., 2022). In den meisten der verfügbaren Säulenstudien wird die Leistung der Pflanzenkohle bei kontinuierlicher oder aufwärts gerichteter Strömung untersucht (Pritchard et al., 2023; Spahr et al., 2022), was die Bewertung von Nass-Trocken-Zyklen bei der Schadstoffmobilität außer Acht lässt und die tatsächlichen Betriebsbedingungen in Versickerungsmulden nicht widerspiegelt. Darüber hinaus hat die Zugabe von Pflanzenkohle nachweislich Auswirkungen auf die hydraulischen Eigenschaften von Böden, indem sie deren Schüttdichte, Porosität und gesättigte hydraulische Leitfähigkeit verändert (Boehm et al., 2020). Diese Charakteristiken sind relevant für die Bewertung ihrer Anwendbarkeit von Pflanzenkohle als Zusatzstoff in Versickerungsmulden.

Um diese Forschungslücke zu füllen, wurden Säulenversuche zum Rückhalt der Schwermetalle Kupfer und Zink sowie der Biozide Diuron, Mecoprop und Terbutryn mit intermittierender Bewässerung mit synthetischem Niederschlagswasser durchgeführt. Diese Stoffe sind repräsentativ für Niederschlagswasser von Dächern und Fassaden. Darüber hinaus wurden die hydraulischen Eigenschaften der Böden, einschließlich ihrer Schüttdichte, Porosität und hydraulischen Leitfähigkeit, bewertet.

2 Material und Methoden

Holzbasierte Pflanzenkohle (BC), die bei 850°C pyrolysiert und von einem lokalen Anbieter mit der Europäischen Pflanzenkohle-Zertifizierung (EBC) bezogen wurde, wurde mit einem Anteil von 5 % w/w in zwei verschiedenen Böden gemischt: eine Oberboden Mischung (TS) und eine Unterboden-Mischung (SubS) (Abbildung 1).

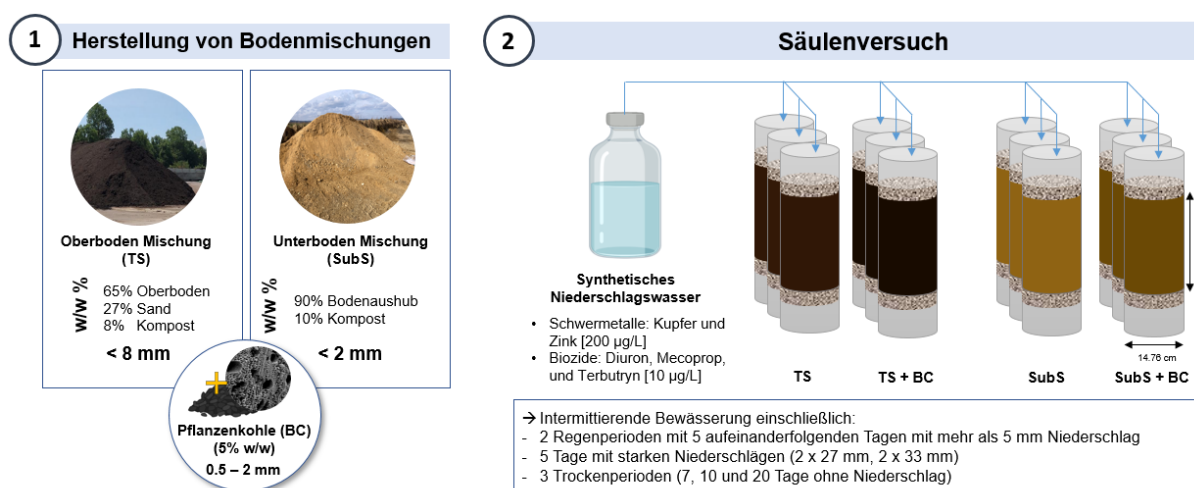


Abbildung 1: Schema des Versuchsplans.

Die Bodenmischungen wurden mit einem Proctorhammer in Säulen bis zu einer bestimmten Schüttdichte nass verdichtet. Die Säulen wurden mit Trinkwasser gesättigt und anschließend wurde die hydraulische Leitfähigkeit bei konstanter Wasserhöhe gemessen. Die effektive Porosität der Böden wurde gravimetrisch unter Verwendung des Trockengewichts des verdichteten Bodens und des Sättigungsgewichts bestimmt. Die Säulen wurden über einen Zeitraum von 19 Wochen mit schadstoffhaltigem synthetischem Niederschlagswasser bewässert. Insgesamt wurde eine Niederschlagsmenge von 510 mm aufgebracht, verteilt auf verschiedene Nass- und Trockenzyklen. Die Gesamtmenge der Bewässerung entspricht der mittleren Niederschlagssumme von Mai bis August in München. Der Biozid- und Schwermetallrückhalt wurde bei 25 Regenereignissen (Zulauf und Ablauf) gemessen.

3 Ergebnisse

3.1 Bodenparameter

Bei beiden Bodentypen wiesen die mit Pflanzenkohle angereicherten Böden eine geringere Schüttdichte und hydraulische Leitfähigkeit auf als die nicht angereicherten Böden. Im Falle der Unterbodenmischung nahm die Infiltrationsrate zwar im Laufe der Zeit in allen Säulen ab, doch blieb die hydraulische Leitfähigkeit der meisten mit Pflanzenkohle angereicherten Säulen während der simulierten Niederschlagsereignisse ausreichend hoch, und keine Säule zeigte Anzeichen von Verstopfung. Von den nicht angereicherten Unterbodensäulen wies eine Säule (C4) nach 44 Tagen Bewässerung eine Verstopfung auf, während eine weitere Säule (C1) gegen Ende des Versuchs eine signifikant reduzierte hydraulische Leitfähigkeit ($k\text{-Faktor} < 10^{-7} \text{ m/s}$) aufwies. Bei den Oberbodensäulen wurden keine Anzeichen von Kolmation festgestellt, die hydraulische Leitfähigkeit lag während des gesamten Bewässerungszeitraums innerhalb der DWA-138-1-Vorgaben.

3.2 Wirkung von Pflanzenkohlezusätzen auf die Entfernung gelöster Schadstoffe

Der Einfluss der Pflanzenkohle auf die Entfernung gelöster Schadstoffe war bei den Bioziden, insbesondere bei Mecoprop, am deutlichsten. Obwohl in der Unterbodenmischung zwischen dem 10. und 30. Tag ein Durchbruch von 20 % beobachtet wurde (Abbildung 2), zeigten die mit Pflanzenkohle angereicherten Säulen eine konsistente Rückhaltung von Mecoprop von mindestens 98 %, unabhängig von den Nass-Trocken-Zyklen. Erhöhte Ausflusskonzentrationen von Mecoprop wurden auch in den Oberbodensäulen ab etwa Tag 19 beobachtet (Abbildung 3), während in den angereicherten Säulen keine Ausflusskonzentration über $0.1 \mu\text{g/L}$ festgestellt wurde. Insgesamt war die maximale Mecoprop-Ausflusskonzentration im nicht angereicherten Oberboden deutlich niedriger als im nicht angereicherten Unterboden, was mit einer höheren Sorptionsaffinität von Mecoprop an die organische

Bodensubstanz in der Oberbodenmatrix zusammenhängen könnte (Paradelo et al., 2018).

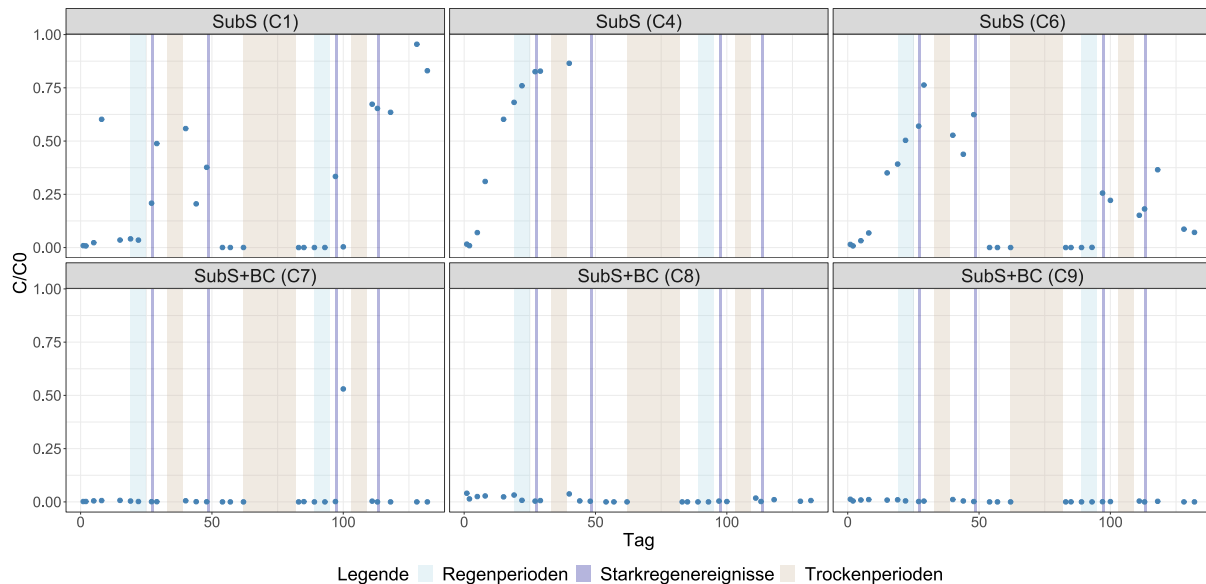


Abbildung 2: Normalisierte Mecoprop-Abflusskonzentration (c/c_0) in der Unterbodenmischung (obere Reihe) und der mit Pflanzenkohle angereicherten Unterbodenmischung (untere Reihe).

Im Falle von Diuron und Terbutryn überschritt keine Ausflusskonzentration die Bestimmungsgrenze ($0.01 \mu\text{g/L}$) in den mit Pflanzenkohle angereicherten Säulen, unabhängig von der Bodenmatrix und den Wassersättigungsbedingungen. Die Auswirkung der Nass-Trocken-Zyklen auf die Biozidmobilität ist am deutlichsten in den unveränderten Oberboden zu erkennen, wo die meisten Säulenabflüsse nach der langen Trockenperiode von 20 Tagen eine erhöhte Konzentration von Mecoprop und Diuron aufwiesen. In den nicht angereicherten Unterbodensäulen wurde eine erhöhte Mecoprop-Konzentration bei den starken Regenereignissen nach einer Regenperiode festgestellt.

Die Wirkung der Beimischung von Pflanzenkohle war bei der Rückhaltung von Schwermetallen weniger effektiv. Im Säulenexperiment wurde in keiner der Unterbodensäulen ein Durchbruch eines der Schwermetalle beobachtet, unabhängig von der Pflanzenkohlezugabe. Im Fall der Oberbodensäulen gab es während des gesamten Versuchs in allen Säulen eine quantifizierbare Zinkkonzentration im Abfluss mit einem Höchstwert von $28 \mu\text{g/L}$, was mit der Auswaschung aus der Oberbodenmatrix zusammenhängen könnte. Die Zinkkonzentration im Abfluss nahm im Laufe der Zeit sowohl in den unveränderten als auch in den veränderten Oberboden-Säulen ab, jedoch wurden nach allen Trockenperioden erhöhte Werte beobachtet. Kupfer im Ablauf des nicht angereicherten Oberbodens wurde zu Beginn des Versuchs und bis zum ersten Starkregenereignis nachgewiesen. Im weiteren

Verlauf wurde eine gelegentliche Auslaugung von Kupfer ohne erkennbares Muster lediglich in unveränderten Oberbodensäulen beobachtet.

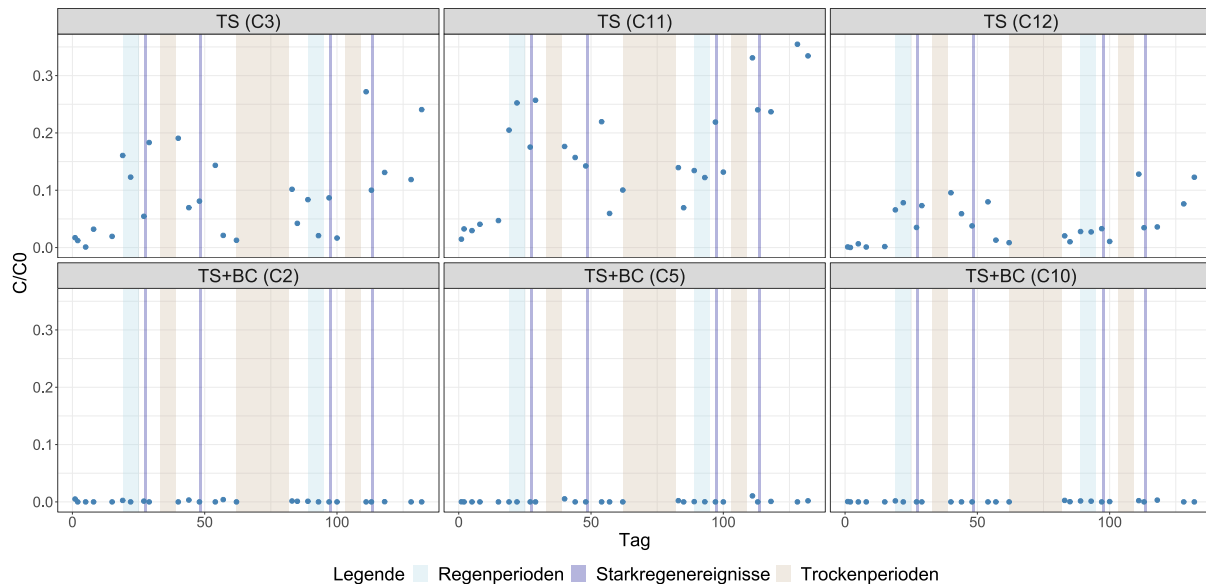


Abbildung 3: Normalisierte Mecoprop-Abflusskonzentration (c/c_0) in der Unterbodenmischung (obere Reihe) und der mit Pflanzenkohle angereicherten Unterbodenmischung (untere Reihe).

4 Schlussfolgerungen

Die Zumischung von holzbasierte, Hochtemperatur-Pflanzenkohle hatte eine signifikante Auswirkung auf die Entfernung von Bioziden in beiden getesteten Böden. Dieser Effekt gilt unabhängig von der Bodenart unter verschiedenen Wassersättigungsbedingungen. In beiden Bodentypen konnte kein signifikanter Unterschied in der Schwermetallrückhaltung zwischen angereicherten und nicht angereicherten Mischungen festgestellt werden. Obwohl die mit Pflanzenkohle angereicherten Säulen im Vergleich zu den unveränderten Säulen eine geringere hydraulische Leitfähigkeit aufwiesen, konnte in allen angereicherten Säulen während des gesamten Versuchs eine ausreichend hohe Drainage gehalten werden, im Gegensatz zu zwei nicht angereicherten Unterbodensäulen, die Anzeichen von Verstopfung aufwiesen. Diese Ergebnisse deuten auf die gute Eignung von Pflanzenkohle sowohl für die Entfernung von Bioziden als auch für die Aufrechterhaltung der hydraulischen Funktionalität der geänderten Böden hin.

5 Finanzierung

Das Projekt wird dankenswerterweise von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Graduiertenkollegs „Urbane Grüne Infrastruktur – Wissenschaftliche Ausbildung kommender Expert*innen integrierter Stadtplanung“ (GRK 2679/1) finanziert.

6 Literatur

- Biswal, B. K., Vijayaraghavan, K., Tsen-Tieng, D. L., & Balasubramanian, R. (2022). Biochar-based bioretention systems for removal of chemical and microbial pollutants from stormwater: A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 422, 126886. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126886>
- Boehm, A. B., Bell, C. D., Fitzgerald, N. J. M., Gallo, E., Higgins, C. P., Hogue, T. S., Luthy, R. G., Portmann, A. C., Ulrich, B. A., & Wolfand, J. M. (2020). Biochar-augmented biofilters to improve pollutant removal from stormwater – can they improve receiving water quality? *Environmental Science: Water Research & Technology*, 6(6), 1520–1537. <https://doi.org/10.1039/D0EW00027B>
- Bork, M., Lange, J., Graf-Rosenfellner, M., Hensen, B., Olsson, O., Hartung, T., Fernández-Pascual, E., & Lang, F. (2021). Urban storm water infiltration systems are not reliable sinks for biocides: Evidence from column experiments. *Scientific Reports*, 11(1), 7242. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86387-9>
- Ekka, S. A., Rujner, H., Leonhardt, G., Blecken, G.-T., Viklander, M., & Hunt, W. F. (2021). Next generation swale design for stormwater runoff treatment: A comprehensive approach. *Journal of Environmental Management*, 279, 111756. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111756>
- Kaya, D., Croft, K., Pamuru, S. T., Yuan, C., Davis, A. P., & Kjellerup, B. V. (2022). Considerations for evaluating innovative stormwater treatment media for removal of dissolved contaminants of concern with focus on biochar. *Chemosphere*, 307, 135753. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135753>
- Paradelo, R., Conde-Cid, M., Martín Abad, E., Nóvoa-Muñoz, J. C., Fernández-Calviño, D., & Arias-Estévez, M. (2018). Retention and transport of mecoprop on acid sandy-loam soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 148, 82–88. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.10.007>
- Pritchard, J. C., Hawkins, K. M., Cho, Y.-M., Spahr, S., Struck, S. D., Higgins, C. P., & Luthy, R. G. (2023). Black Carbon-Amended Engineered Media Filters for Improved Treatment of Stormwater Runoff. *ACS Environmental Au*, 3(1), 34–46. <https://doi.org/10.1021/acsenvironau.2c00037>
- Spahr, S., Teixidó, M., Gall, S. S., Pritchard, J. C., Hagemann, N., Helmreich, B., & Luthy, R. G. (2022). Performance of biochars for the elimination of trace organic contaminants and metals from urban stormwater. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 8(6), 1287–1299. <https://doi.org/10.1039/D1EW00857A>

Korrespondenz an:

Natalie Páez-Curtidor
Am Coulombwall 3, D-85748 Garching, Deutschland
Telefon: +49 89 28913704
E-Mail: natalie.paez@tum.de