

13. DGAW-Wissenschaftskongress Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft am 15. und 16.02.2024, TU Wien – Extended Abstract

Elsa Madleen Jung, Jana Mühlenberg, Claudia Kirsten, Vera Susanne Rotter

Hygienisches Nährstoffrecycling durch thermophile Kompostierung von Trockentoiletteninhalten

Das Projekt zirkulierBAR untersucht das Potenzial der Kompostierung von menschlichen Ausscheidungen aus Trockentoiletten als wertvolle Ressource im nachhaltigen regionalen Nährstoffkreislauf. Hierfür werden in der Region Barnim Methoden zur Herstellung hygienisch sicherer Recyclingdünger erforscht, wobei soziale Akzeptanz, rechtliche Aspekte und die technische Integration in die kommunale Abfallwirtschaft berücksichtigt werden. Forschende des Deutschen Biomasseforschungszentrums (DBFZ) und der Technischen Universität Berlin (TUB) wenden den Standard DIN SPEC 91421:2020 an, um den Gehalt an Nährstoffen, Schwermetallen, organischen Schadstoffen sowie Hygieneparameter zu bewerten. Vorläufige Ergebnisse zeigen eine effektive Entfernung von Krankheitserregern und Verunreinigungen während des zweistufigen Verwertungsprozesses, wobei eine signifikante Reduktion von Bakterienzahlen festgestellt wurde. Es bestehen Optimierungsmöglichkeiten in den Prozessbedingungen und Probenahme-Methoden. Der hergestellte organisch-mineralische Dünger entspricht den geforderten Grenzwerten, bedarf jedoch regulatorischer Anpassungen zur Einbeziehung in Düngemittelvorschriften.

1 Einleitung

Nachhaltiges Management von Nährstoffen ist ein wichtiger Schwerpunktbereich für Forschung und Politik. Viele der derzeitigen Agrarpraktiken haben schädliche Auswirkungen auf die Umwelt, und die Notwendigkeit, den künftigen Zugang zu Düngemitteln sicherzustellen, drängt sich zunehmend auf. Systemanalysen haben wiederholt eine bedeutende, aber oft übersehene Ressource für den Nährstoffkreislauf identifiziert: Sanitärrückstände (Krause et al., 2021a). Insbesondere getrennt gesammelte menschliche Ausscheidungen aus Trockentoiletten gelten als wertvolle Ressource für die integrierte Rückgewinnung von Phosphor, Stickstoff und anderen Nährstoffen in einer regionalen Kreislaufwirtschaft zwischen Landwirtschaft und Konsument:innen. Durch die Nutzung der Inhalte aus Trockentoiletten können der Nährstoff- und Wasserverbrauch reduziert, die Treibhausgasemissionen verringert und die Pflanzenproduktion gesteigert werden (Kraus et al., 2019). Die Minimierung von Krankheitserregern für einen hygienischen Umgang mit den Recyclingdüngern stellt eine bedeutende Voraussetzung für diese Nutzung dar und wurde bereits in anderen Studien nachgewiesen (Häfner et al., 2023).

In der Region Barnim (Brandenburg) wird im Rahmen des Projekts *zirkulierBAR* ein Kreislaflabor zur Herstellung von hygienisch unbedenklichem und qualitätsgesichertem Recyclingdünger, einschließlich Kompost aus festen Materialien und Flüssigdünger aus Urin, eingerichtet. Praktiker:innen entwickeln technische Elemente, um Trockentoiletten und die anschließende Verwertung der gesammelten Inhalte in die kommunale Abfallwirtschaft zu integrieren. Das Projekt untersucht die landwirtschaftlichen, ressourcenbezogenen und sozioökonomischen Anforderungen für die Ausweitung dieses Ansatzes. Darüber hinaus werden die soziale und politische Akzeptanz für die Herstellung von Recyclingdünger aus Trockentoiletteninhalten und deren anschließende Anwendung in der Landwirtschaft evaluiert. Das Projekt *zirkulierBAR* wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Programms *REGION.innovativ* gefördert.

2 Methodik

2.1 Umfassende Analyse und Validierung der Verwertungsmethoden

Forschende des DBFZ und der TUB führen seit 2021 Materialanalysen durch und validieren Analysemethoden, um den Kompostierungsprozess und die Produktqualität zu überwachen. Die erste Kampagne (Untersuchung von fünf Kompostmieten mit je ca. 50 m³) fand von Juli 2021 bis Dezember 2022 in der Pilotanlage der Finizio GmbH und der Kreiswerke Barnim in Eberswalde statt. Eine zweite Kampagne mit weiteren sieben Mieten in 2023 wird derzeit ausgewertet. Der angewandte Kompostierungsprozess besteht aus zwei Schritten: (1) Wärmebehandlung durch aktive Belüftung und mikrobielle Aktivität in einem isolierten und belüfteten Behälter für mindestens sieben Tage bei 70 °C und (2) thermophiler Kompostierungsprozess in offenen Mieten für acht bis zehn Wochen. Die trockene Toiletteninhalte bestehen aus Fäkalien sowie Toilettenpapier und Strohhäcksel, die durch Urin als Perkolat befeuchtet werden. Sie machen etwa die Hälfte der Anlage aus und stammen von Trockentoiletten, die auf verschiedenen Veranstaltungen und öffentlichen Plätzen in Berlin und Brandenburg aufgestellt sind. Weitere Einsatzstoffe für die Kompostanlage sind Stroh und Grünschnitt, Lehmbooden sowie Pflanzenkohle in unterschiedlicher Zusammensetzung. Neben der Verwertung der Trockeninhalte wird in einer separaten Aufbereitungsanlage eine Umwandlung von Perkolat und Reinurin zu stickstoffbetontem Flüssigdünger durchgeführt. Mit Hilfe eines Belebtschlammbeckens zur Nitrifikation, gefolgt von einer Aktivkohlefiltration zur Eliminierung wasserlöslicher Arzneimittelrückstände und einer Destillationsanlage zur Entwässerung und Entkeimung wird ein Flüssigdünger hergestellt. Eine angepasste Probenahme- und Analysestrategie für die Flüssigsubstrate ist derzeit in Arbeit.

2.2 Überwachung des Reifungsprozesses von Kompost und Qualitätssicherungsmaßnahmen

Nach dem Ansetzen wird der Kompost in zunächst kürzeren (1-2 Tage) und später längeren Abständen maschinell gewendet, regelmäßig bewässert und unter einem atmungsaktiven Gewebe gelagert. Temperatur und Kohlendioxidgehalt des Substrats werden gemessen, bis es alle physikalischen, optischen und olfaktorischen Kriterien eines reifen Komposts erfüllt. Die repräsentative Beprobung der Eingangs- und Ausgangssubstrate erfolgt nach der offiziellen Verfahrensrichtlinie LAGA PN 98 (LAGA, 2004). Dazu werden 12 gleichmäßig auf dem Haufen verteilte Proben von je einem Kilogramm gesammelt, auf einer Plane vereinigt und anschließend zerkleinert. Methodisch wird der Standard DIN SPEC 91421:2020 angewendet, der entwickelt wurde, um bestehende Regelungslücken für die Herstellung und Verwendung von qualitätsgesichertem Recyclingdünger aus Trockentoiletten zu schließen. Neben den allgemeinen physikalischen Eigenschaften des Produkts werden u.a. die Gehalte an Nährstoffen, Schwermetallen, organischen Schadstoffen sowie Hygieneparameter und pharmazeutische Kontaminanten analysiert, um die Qualität und Eignung der Recyclingprodukte als Düngemittel zu beurteilen und zu sichern (DIN SPEC 91421, 2020). Die Norm wird im Hinblick auf ihre Umsetzung in der Praxis überprüft und kontinuierlich weiterentwickelt, um die Methodik und die festgelegten Grenzwerte an die realen Bedingungen anzupassen.

3 Vorläufige Ergebnisse

Die angewandte Kompostierungsmethode und die Materialien bilden einen festen Dünger, der den Boden mit ausreichenden und pflanzenverfügbaren Makro- und Mikronährstoffen versorgt (durchschnittlich 1,65 %

TM Gesamtstickstoff, 1,77 % TM Gesamtphosphat, 1,44 % TM Gesamtkaliumoxid). Weiterhin können die Entfernung aller relevanter Schadstoffe und pharmazeutischer Rückstände sowie der meisten Krankheitserreger nachgewiesen werden. Enterokokken, Escherichia coli und Salmonellen sind im Düngemittelprodukt nicht oder nur in vernachlässigbaren Spuren nachweisbar. Zwei von fünf Probenahmekampagnen zeigen jedoch erhöhte Werte bezüglich des anaeroben, sporenbildenden, pathogenen Bakteriums Clostridium perfringens (<10 und 1.500 KBE/g FM, Überschreitung des Grenzwertes von 0 KBE/g FM aus DIN SPEC 91421:2020). Bezüglich der somatischen Coliphagen kann noch keine Aussage über die Hygienisierungsleistung getroffen werden, da in Europa bisher kein akkreditiertes Labor für die Analyse dieses Parameters zur Verfügung steht.

4 Diskussion

Optimierungspotenziale für den Prozess der Verwertung von Trockentoiletteninhalten wurde insbesondere hinsichtlich des Rohstoffverhältnisses, des Umfangs der Bewässerung und der allgemeinen Standortbedingungen identifiziert. Ein entscheidender Faktor ist die Minimierung der anaeroben Zonen im Prozess durch eine ausreichende Belüftung, die durch eine glattere und stärker geneigte Unterkonstruktion erreicht werden könnte. Die Umstellung auf ein halbautomatisches, mehrstufiges, niederschlagsunabhängiges Humusregal anstelle der Kompostierung auf Betonplatten soll in den kommenden Monaten hierbei Abhilfe schaffen. Für die Beprobung der Ausgangssubstrate stellt die Inhomogenität der Inputmaterialien eine Herausforderung dar. Es müssen noch geeignete Probenahmegeräte und -verfahren entwickelt werden, um eine gleichzeitig repräsentative und arbeitsschutzgerechte Probenahme zu gewährleisten.

Die Gehalte an Nähr- und Fremdstoffen entsprechen der Düngemittelverordnung (DüMV) sowie der Bioabfallverordnung (BioAbfV) und zeigen ein Produkt, das die Nachfrage nach nährstoffreichen, bodenverbessernden Düngemitteln in der landwirtschaftlichen Anwendung bedienen könnte (vgl. Häfner et al., 2023). Der fertige Kompost dient als organisch-mineralischer Dünger, dessen Stickstoffgehalt vermutlich durch die Zugabe von Urin während des Kompostierungsprozesses oder die Kombination von flüssigem und festem Dünger später auf dem Feld noch erhöht werden könnte. Die Wechselwirkungen dieser Stoffe und die Auswirkungen auf die Ernteergebnisse müssten jedoch noch untersucht werden.

Erste Vergleiche der Input- und Output-Substrate des Kompostierungsprozesses zeigen eine deutliche Reduktion der Gesamtkeimzahl und relevanter Hygieneparameter. Diese Veränderung wurde auch bei früheren mikrobiellen Analysen von Salmonellen und E. coli aus der thermophilen Kompostierung von menschlichen Fäkalien beobachtet (Werner et al., 2022; Krause et al., 2021b). Weitere Untersuchungen und eine bewusste Keimbeimpfung des Rohsubstrats würden weitere Erkenntnisse über die Effizienz des zirkulierBAR-Verfahrens ermöglichen. Sporen von C. perfringens können gegenüber höheren Temperaturen resistent sein, so dass es auch bei sorgfältiger Prozessführung zu einer Wiederbesiedlung in anaeroben Zonen kommen kann. Die Überschreitung des Grenzwerts für C. perfringens von 0 KBE/g FM erscheint sehr naheliegend, da das Bakterium in der Natur allgegenwärtig ist und als normaler Bestandteil verrrottender Biomasse gefunden werden kann (Kiu und Hall, 2018). Daher stellt das Forschungsteam seine Eignung als Dekontaminationsindikator in anstehenden Überarbeitungen der DIN SPEC 91421 in Frage.

Insbesondere im Hinblick auf den Recycling-Dünger als Ersatz für Klärschlamm und synthetischen Dünger sprechen die Ergebnisse der Qualitätsanalyse für einen Einsatz in der landwirtschaftlichen Praxis. Die Ausweitung der rechtlichen Definition von "Bioabfall" auf menschlichen Urin und Fäkalien sowie die Aufnahme menschlicher Ausscheidungen in die Düngemittelverordnung wären notwendige politische

Schritte, um diese Kreislauflösung zu verwirklichen. Nach den vorläufigen Erkenntnissen ermöglicht die getrennte Sammlung menschlicher Ausscheidungen eine gezielte Behandlung konzentrierter Abfallströme und bietet das Potenzial, Nährstoffdefizite in Böden auszugleichen, doch müssen die derzeitigen rechtlichen Hürden angepasst werden, um eine kommerzielle Handhabung und Verwendung als Recycling-Dünger zu ermöglichen.

Literatur/Quellen

- DIN SPEC 91421:2020-12 (2020): Qualitätssicherung von Recyclingprodukten aus Trockentoiletten zur Anwendung im Gartenbau. Deutsches Institut für Normung e.V.
- Häfner, F., Monzon, Diaz O.R., Tietjen, S., Schröder, C. and Krause, A., (2023): Recycling fertilizers from human excreta exhibit high nitrogen fertilizer value and result in low uptake of pharmaceutical compounds. *Front. Environ. Sci.* 10:1038175.
- Kiu, R., Hall, L. J., (2018): An update on the human and animal enteric pathogen *Clostridium perfringens*. *Emerging Microbes & Infections.* 7 (141): 141.
- Krause, A., von Hirschhausen, C., Schröder, E., Augustin, F., Häfner, F., Bornemann, G., Sundermann, G., Korduan, J., Udert, K.M., Deutsch, L., Reinhardt, M.L., Götzberger, R., Hoffmann, S., Becker-Sonnenschein, S., (2021a): Ressourcen aus der Schüssel sind der Schlüssel – Wertstoffe zirkulieren, Wasser sparen und Schadstoffe eliminieren. Diskussionspapier zur Sanitär- und Nährstoffwende. Berlin, Hamburg, Zürich
- Krause, A., Häfner, F., Augustin, F., et al.. (2021b): Qualitative Risk Analysis for Contents of Dry Toilets Used to Produce Novel Recycling Fertilizers. *Circ.Econ.Sust.* 1, 1107–1146.
- Krause, F., Zamzow, M., Conzelmann, L., Remy, C., Kleyböcker, A., Seis, W., Miehe, U., Hermann, L., Kabbe, C., (2019): Ökobilanzieller Vergleich der P-Rückgewinnung aus dem Abwasserstrom mit der Düngemittelproduktion aus Rohphosphaten unter Einbeziehung von Umweltfolgeschäden und deren Vermeidung. Umweltbundesamt. ISSN 1862-4804
- Landesarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA), (2004): LAGA PN 98 - Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen. Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz.
- Werner, K.A., Poehlein, A., Schneider, D., El-Said, K., Wöhrmann, M., Linkert, I., Hübner, T., Brüggemann, N., Prost, K., Daniel, R. and Grohmann, E. (2022): Thermophilic Composting of Human Feces: Development of Bacterial Community Composition and Antimicrobial Resistance Gene Pool. *Front. Microbiol.* 13:824834.

Kontakt

Elsa Jung, wissenschaftliche Mitarbeiterin
Technische Universität Berlin
Tel.-Nr. +4930 - 314 70109
E-Mail: e.jung@tu-berlin.de
Homepage: <https://zirkulierbar.de/>