Abschlussbericht

Zuwendungsempfänger:

Institut für Lebensmittel- und Umweltforschung e.V. (ILU)

Papendorfer Weg 3

14806 Bad Belzig

Vorhabens-Bezeichnung:

Entwicklung eines Pflanzgranulats mit definierter Funktionalität auf Basis von Bau-Reststoffen (GranuGruen) – Teilvorhaben B

Projektleiter:

Prof. Dr. Daniel Pleissner

Förderkennzeichen:

2818903B20

Laufzeit des Vorhabens:

01.05.2022 – 30.04.2025

Beteiligte Kooperationspartner:

Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH (IAB)

IBU-tec advanced materials AG (IBU-tec)

Christoffers Kulturbau GmbH (CKB)

Institut für Lebensmittel- und Umweltforschung e.V. (ILU)

Gefördert durch:

Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat

Projektträger

Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Teil I: Kurzbericht

Der Klimawandel führt zu einer Zunahme von Extremwetterlagen. Neben erheblichen Temperaturschwankungen wechseln sich vor allem im Sommer Starkregenereignisse mit wochenlangen Trockenphasen ab. Diese Wetterextreme stellen insbesondere Städte mit ihren dichten Bebauungen und versiegelten Flächen vor große Herausforderungen. Im Projekt GranuGruen wurde ein offenporiges Pflanzgranulat entwickelt, das im urbanen Bereich zum Einsatz kommt und dort Wasser speichert und zur Bodenverbesserung beiträgt. Im Sinne einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft basiert das Granulat auf recycelten Baustoffen.

Zu Beginn des Projekts befand sich der Technologiereifegrad im Bereich TRL 3, da das allgemeine Prinzip und die Funktionstüchtigkeit von Speichergranulaten bereits nachgewiesen wurden. Die Herausforderung im Rahmen des Projekts lag in der Entwicklung von Granulaten mit den zur Verfügung stehenden Baureststoffen in Kombination mit organischen Ausbrennstoffen sowie der anschließenden funktionsgebenden Beladung der Granulate.

Das Institut für Lebensmittel- und Umweltforschung e.V. (ILU) war mit Teilprojekt B – Granulat-Funktionalisierung betraut. Zu Beginn wurden durch das ILU verschiedene mögliche organische Ausbrennstoffe identifiziert und eine Auswahl an Rohstoffen an den Projektpartner Institut für angewandte Bauforschung gGmbH (IAB) für Ausbrennversuche übergeben. Die vom IAB produzierten, fertigen Granulate wurden durch das ILU in ihren Eigenschaften bewertet und durch Beladung mit Nährstoffen und Mikroorganismen weiter funktionalisiert.

Zunächst wurde die Wasserspeicherung des Granulats unter verschiedenen Umweltbedingungen untersucht. Das Granulat wurde mit verschiedenen Substraten kombiniert und Regen- und Trockenereignisse simuliert. Das Granulat konnte bei den verschiedenen simulierten Regenereignissen etwa 50 % seines Eigengewichts an Wasser speichern. Je nachdem, welches Substrat mit dem Granulat kombiniert wurde, war eine Erhöhung der Wasserspeicherung und eine Verlangsamung der Austrocknung möglich.

Um auszuschließen, dass die Granulate in der Anwendung schädliche Auswirkungen haben, wurden Untersuchungen zur Human- und Phytotoxizität durchgeführt. Die Untersuchungen zur Humantoxizität wurden nach Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung durchgeführt. Im Wirkungspfad Boden – Mensch wurden keine Grenzwerte überschritten. Im Wirkungspfad Boden – Grundwasser wurde ein erhöhter Chromgehalt der Granulate gemessen, welcher jedoch vermutlich durch den Herstellungsprozess und nicht die Ausgangsstoffe bedingt war. Versuche zur Phytotoxizität wurden nach DIN EN 16086 mit Kresse in der Petrischale und Chinakohl im Topf durchgeführt. Eine Keimhemmung trat nicht auf. Im Versuch mit Kresse wurde ein vermindertes Wurzelwachstum festgestellt, was vermutlich durch den hohen pH-Wert der Granulate bedingt ist. Im Versuch mit Chinakohl wurde keine Wachstumshemmung

beobachtet. Das Granulat sollte in der Anwendung mit einem anderen Substrat kombiniert werden, um den pH-Wert zu reduzieren und so negativen Effekten auf das Pflanzenwachstum vorzubeugen. In allen weiteren Pflanzversuchen ergab sich durch das Granulat in Kombination mit Erde keine Hemmung der Keimung oder des Pflanzenwachstums.

Die Beladung der Granulate mit Nährstoffen und Mikroorganismen konnte erfolgreich durchgeführt werden. Die Granulate wurden mit Stickstoff, Phosphor und Kalium beladen. Ein großer Teil der Nährstoffe auf den Granulaten war pflanzenverfügbar. Auch nach Simulation einer Auswaschung mit dem Äquivalent eines Jahresniederschlags verblieb ein Anteil der Nährstoffe auf den Granulaten. Im Pflanzversuch mit weißem Senf zeigte das mit Stickstoff beladene Granulat einen deutlichen positiven Einfluss auf das Pflanzenwachstum. Der Effekt war vergleichbar mit dem von konventionellem KAS-Dünger.

Die Granulate wurden mit zwei verschiedenen Bakterienstämmen, *Bacillus subtilis* und *Paenibacillus polymyxa* beladen. In einem Lagerversuch über fünf Wochen zeigte sich, dass die Bakterien auch über einen längeren Zeitraum auf dem Granulat überleben und sich in Nährmedium wieder weiter vermehren. Im Pflanzversuch erwies sich die Beladung mit den Bakterien mit den Versuchskulturen Ackerschmalwand und Radieschen als förderlich für das Pflanzenwachstum.

Teil II: Ausführliche Darstellung

1. Detaillierte Darstellung der geplanten und durchgeführten Arbeiten

Granulatherstellung - Ausbrennstoffe

In AP1 war das ILU für die Ermittlung, Beschaffung und Charakterisierung von potenziellen Ausbrennstoffen zuständig. Zur Ermittlung des IST-Standes von organischen Ausbrennstoffen wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt. Die Literaturrecherche ergab, dass Ausbrennstoffe momentan vor allem in der Ziegelindustrie verwendet werden und die dabei entstehenden Poren nicht mit den Anforderungen an die Granulate in diesem Projekt übereinstimmen. Die typischerweise verwendeten Ausbrennstoffe waren damit nur bedingt für dieses Vorhaben geeignet.

Folgende Kriterien wurden für die Auswahl der Ausbrennstoffe festgelegt:

1. Reststoff, möglichst ohne wertgebende Alternativverwertung
2. Lokale Verfügbarkeit gegeben, optimalerweise im urbanen Raum
3. Organisches Material mit geringem Aschegehalt
4. Geringer Gehalt an Schadstoffen
5. Hoher Faseranteil

Anhand der dargelegten Kriterien und der allgemeinen lokalen Verfügbarkeit wurden sieben potenzielle Ausbrennstoffe ausgewählt: Stroh, Paludikultur-Biomasse, Heu, Hanf, Laub, Biertreber und Siebüberlauf einer Kompostanlage. Von diesen ausgewählten Stoffen wurden kleine Mengen akquiriert und an den Projektpartner Institut für angewandte Bauforschung gGmbH (IAB) für Ausbrennversuche übergeben.

Die Zusammensetzung der Ausbrennstoffe wurde untersucht. Die Stoffe bestanden zum Großteil aus Lignozellulose, mit einem hohen Anteil an Zellulose und Hemicellulose. Der Aschegehalt lag meist deutlich unter 10 M.-% (mit Ausnahme von Laub und Siebüberlauf mit 12 bzw. 21 M.-%) und der Proteingehalt unter 5 M.-% (abgesehen von Biertreber mit mehr als 20 M.-%). Es kann somit von einem hohen organischen Anteil und einem hohen Fasergehalt ausgegangen werden. Die Schwermetallgehalte lagen in allen Proben auf sehr niedrigem Niveau, weit unter den Vorgaben aus der Düngemittel- oder Bioabfallverordnung.

Bestimmung der Wasserspeicherkapazität

In AP2.1 wurde durch das ILU die Wasserspeicherkapazität der Granulate ermittelt und verschiedene Wetterbedingungen simuliert. Es wurden sowohl Regen- als auch Trockenereignisse simuliert. Zunächst wurde die allgemeine Wasserspeicherkapazität der Granulate mit einem simplen Eintauchverfahren bestimmt. Die durchschnittliche

Wasseraufnahme bei Einweichen betrug bei den verschiedenen Granulat-Prototypen, die vom IAB gesendet wurden, zwischen 39 und 73 M.-%, wobei der höchste Wert in dem Prototyp gemessen wurde, welcher auch für die Simulation von Regen- und Trockenereignisse sowie für die weiteren Pflanzversuche verwendet wurde.

Simulation von Regenereignissen

Für die Simulation von Regenereignissen wurde eine Regensimulationsanlage gebaut. Die Anlage besteht aus einem Metallgerüst, an dessen oberen Ende (auf etwa 2,5 m) sich eine Tropferebene mit 16 Gartentropfern auf einer Fläche von 25x25 cm befindet. Über eine Pumpe werden die Tropfer mit Wasser versorgt und ein Durchflussmesser erlaubt die Regulierung der Intensität. Das Substrat befindet sich am unteren Ende der Anlage in einem Plexiglasbehälter, welcher unten perforiert ist, so dass nicht zurückgehaltenes Wasser in einen weiteren Behälter abfließen kann. Durch Wägung der Behälter vor und nach dem Regenereignis lässt sich die Wasseraufnahme bestimmen.

Für die Auswahl der zu untersuchenden Regenereignisse wurde sich an den Daten des Deutschen Wetterdienstes (Deutscher Wetterdienst, 2016) orientiert. Es wurden drei Regenereignisse unterschiedlicher Intensität, Dauer und Wiederkehrintervall ausgewählt:

1) 24 mm/h für 1 Stunde, Wiederkehrintervall 1 Jahr
2) 48 mm/h für 1 Stunde, Wiederkehrintervall 10 Jahre
3) 60 mm/h für 15 min, Wiederkehrintervall 1 Jahr

Im Rahmen der Regen- und Trockensimulation wurden drei verschiedene Substrate untersucht: lehmiger Sand von einem brandenburgischen Acker, reiner Sand und Anzuchterde aus dem Baumarkt. Für jedes Substrat wurden drei verschiedene Varianten getestet: reines Substrat, eine Mischung aus 80 M.-% Substrat und 20 M.-% Granulat und reines Substrat mit einer Schicht Granulat auf der Oberfläche. Für jede Variante wurde jedes Regenereignis doppelt durchgeführt und der Mittelwert gebildet. Es wurden insgesamt 60 Regenereignisse simuliert. Nach der Beregnung wurde das feuchte Substrat getrocknet und für kommende Versuche weiterverwendet.

In allen drei simulierten Regenereignissen konnte das pure Granulat etwa 45 bis 50 % seines eigenen Gewichts an Wasser speichern. Der Wasserrückhalt von Sand und lehmigem Sand lag bei 18 - 20 M.-%, die Anzuchterde speicherte zwischen 90 und 120 % ihres eigenen Gewichts zusätzlich an Wasser. In allen drei Ereignissen wurde die gravimetrische Wasserspeicherung bei Sand und lehmigen Sand durch eine Zugabe von 20 M.-% Granulat gesteigert. Die Steigerung lag zwischen 2 und 7 %. Bei der Verwendung von Anzuchterde als Hauptsubstrat kam es teilweise zur Steigerung und teilweise zur Verringerung der Wasserspeicherung. Die Zugabe von Granulat auf der Oberfläche bewirkte bei allen

Simulationen eine Verringerung des gravimetrischen Wasserrückhalts bei Anzuchterde und wiederum eine Steigerung zwischen 1 und 5 % bei Sand und lehmigem Sand.

Bezogen auf die volumetrische Wasserspeicherung ergab sich eine deutlich geringere Streuung der Ergebnisse. Die Wasserspeicherung lag bei allen untersuchten Substratkombinationen und Regenereignissen um 0,3 cm^3/cm^3. Das Granulat allein hatte die geringste Speicherung von 0,25 - 0,28 cm^3/cm^3. Der lehmige Sand speicherte zwischen 0,27 und 0,33 cm^3/cm^3, die Anzuchterde 0,26 – 0,34 cm^3/cm^3 und der reine Sand zwischen 0,30 und 0,32 cm^3/cm^3. Durch die Zumischung von 20 M.-% Granulat wurde die Wasserspeicherung bei allen Substraten in den Ereignissen 24 mm/h und 48 mm/h erhöht, bei dem Ereignis 60 mm/h hingegen verringert. Die Zugabe von Granulat auf der Oberfläche führte bei allen Ereignissen und allen Substraten zu einer Verringerung des volumetrischen Wasserrückhalts.

Bei der Verwendung von lehmigem Sand kam es bei fast allen Simulationen zu einer Verschlämmung der Oberfläche infolge derer eine Infiltration des Regens nicht mehr möglich war und sich eine Wasserschicht auf der Oberfläche bildete. Diese Verschlämmung trat zum Teil auch mit Granulat auf der Oberfläche auf, nicht aber bei der Zumischung von 20 M.-% Granulat. Die Beigabe von Granulat scheint demnach dazu beizutragen, dass das Wasser besser abfließen kann. Bei der Anzuchterde kam es bei keiner Simulation zur kompletten Durchfeuchtung des Substrats. Das eingetragene Wasser floss schnell über präferenzielle Pfade ab. Dementsprechend ergab sich eine recht hohe Streuung der Wasserhaltekapazitäten.

Simulation von Trockenperioden

Als Gegenstück zur Simulation von Regenereignissen wurden Trockenperioden simuliert, um zu ergründen, wie sich das Granulat bei Ausbleiben von Niederschlag und gleichzeitiger Wärmeeinwirkung verhält. Hierzu wurde ein simpler Versuchsaufbau gewählt: die zu untersuchenden Pflanztöpfe befanden sich unterhalb von einer Infrarot-Heizplatte und wurden von dieser angestrahlt. Die Temperatur in den Töpfen wurde zwischen 27 und 29°C eingestellt. Die Töpfe wurden mit den gleichen Substratkombination wie bei der Regensimulation befüllt und mit Wasser gesättigt. Ein simuliertes Ereignis hatte eine Dauer von 6 bis 8 Stunden. Durch Wiegen der Töpfe vor und nach den Ereignissen wurde der Wasserverlust bestimmt. Für jede Variante wurden fünf Töpfe als Replikate verwendet.

Ausgangspunkt der Trockensimulation war die maximale Wasserspeicherung gegen die Schwerkraft. Es ergab sich eine Wasserhaltekapazität von etwa 250 % des Eigengewichts bei Anzuchterde und von etwa 20 % bei Sand und lehmigen Sand. Dies verdeutlicht, dass die Anzuchterde in den Regensimulationen nur ansatzweise mit Wasser gesättigt wurde. Durch die Zugabe von Granulat wurde die Wasserspeicherkapazität der Anzuchterde um 50 – 70 %

gesenkt. Bei lehmigem Sand und Sand wurde die Speicherung durch Beimischung des Granulats um 5 bis 6 % erhöht. Die Zugabe von Granulat auf der Oberfläche führte zu einer geringeren Steigerung von 2 bis 3 %.

Die Trockensimulation mit lehmigem Sand wurde nach 7 Trockenereignissen beendet, in den Töpfen ohne Granulatzugabe war zu diesem Zeitpunkt kein Wasser mehr vorhanden. In den Varianten mit Granulat als Beimischung und auf der Oberfläche verblieben noch etwa 20 % der ursprünglichen Wassermenge. Die Töpfe mit Granulat auf der Oberfläche verloren das Wasser anfangs etwas schneller als die mit Granulatbeimischung. Zum Ende der Simulation glichen sich die Wassergehalte wieder an. Der absolute Wasserverlust war für alle drei Varianten im gleichen Bereich.

Die Trockensimulation mit Anzuchterde wurde nach 10 Trockenereignissen beendet. In den Töpfen verblieben zwar noch 30-40 % des ursprünglich vorhandenen Wassers, der Wasserverlust pro Ereignis war jedoch zum Ende sehr gering und lag bei lediglich 2 g. Der absolute Wasserverlust war in den Töpfen mit Granulatzugabe deutlich geringer als in den Töpfen ohne Granulat. Prozentual gesehen war der Wasserverlust bei Granulatbeimischung am höchsten, gefolgt von reiner Anzuchterde und mit größerem Abstand Granulat auf der Oberfläche.

Die Trockensimulation mit Sand wurde nach 9 Trockenereignissen beendet, zu diesem Zeitpunkt war kein Wasser mehr in den Töpfen mit reinem Sand und mit Granulat auf der Oberfläche vorhanden. In den Töpfen mit Granulatbeimischung hingegen waren noch etwa 17 % der ursprünglich gespeicherten Menge enthalten. Absolut gesehen lag der Wasserverlust bei reinem Substrat und Sand mit 20 M.-% Granulat bei etwa 100 g und bei Granulat auf der Oberfläche deutlich höher bei 120 g pro Topf.

Fazit zur Simulation von Regen- und Trockenereignissen

Die Ergebnisse der Regen- und Trockensimulation zeigen, dass eine Verbesserung der Wasserspeicherung durch den Einsatz von Granulat nur möglich ist, wenn das ursprüngliche Substrat eine geringere Wasserspeicherung hat als das Granulat. Die jeweilige Erhöhung der Wasserspeicherung ergibt sich einerseits aus der Differenz der Wasserhaltekapazität und andererseits aus der eingesetzten Menge an Granulat. Die Wasserspeicherung der Anzuchterde ist bereits um das Vielfache höher und wird damit durch die Zugabe von Granulat eher reduziert. Im Falle von lehmigem Sand und Sand kann durch die Zugabe von 20 M.-% Granulat durchschnittlich eine Steigerung der gravimetrischen Wasserspeicherung um 5 % von 200 g/kg auf etwa 250 g/kg erreicht werden. Diese Steigerung zeigte sich bei allen simulierten Regenereignissen. Die Verwendung von Granulat auf der Oberfläche hatte einen weniger ausgeprägten positiven Effekt. In Bezug auf die volumetrische Wasseraufnahme

bewirkte eine Beimischung des Granulats teilweise eine leichte Steigerung und teilweise eine leichte Verringerung. Die Zugabe von Granulat auf der Oberfläche führte bei allen Substraten und Regensimulationen zu einer Verringerung der volumetrischen Wasserspeicherung.

Bei der Trockensimulation zeigten sich beim absoluten Wasserverlust meist keine bedeutenden Unterschiede in Abhängigkeit von der Granulatzugabe. Da durch das Granulat bei lehmigem Sand insgesamt eine höhere Menge Wasser aufgenommen wurde, verblieben zu Versuchsende noch 20 % des Wassers in den Töpfen, während die Kontrolltöpfe ohne Granulatzugabe bereits komplett trocken waren. Bei reinem Sand konnte dieser Effekt auch für die Beimischung von 20 M.-% Granulat beobachtet werden, die Töpfe mit Granulat auf der Oberfläche verloren jedoch deutlich mehr Wasser und waren zum Ende der Trockensimulation ebenso wie die Kontrolltöpfe komplett ausgetrocknet. Bei der Anzuchterde verloren die Töpfe mit Granulatbeigabe deutlich weniger Wasser als die reine Anzuchterde. Da der Wassergehalt zu Beginn bereits deutlich geringer war, war die prozentuale Abnahme im Endeffekt bei Granulatuntermischung trotzdem höher als bei reiner Anzuchterde. Eine Verringerung des Wasserverlusts bei Trockenperioden durch das Granulat konnte durch die Versuche nicht eindeutig gezeigt werden. Die Beimischung von 20 M.-% Granulat hat sich in Bezug auf die Wasseraufnahme und -abgabe im Vergleich zur Verwendung des Granulats auf der Oberfläche als wirksamer erwiesen.

Die durchgeführten Versuche geben die Möglichkeit, eine erste Einschätzung über die Wasserspeicherung der Granulate zu treffen. Um die Wasserspeicherung unter realen Bedingungen zu evaluieren, sollten in einem Folgevorhaben weiterführende Feldversuche im Freiland durchgeführt werden.

Funktionalisierung durch Nährstoffe

Nährstoffbeladung und Abgabe

In AP 2.2 wurden durch das ILU Möglichkeiten zur Nährstoffbeladung erforscht. In AP 2.3 sollte die Abgabe der beladenen Nährstoffe vom Granulat an die Umgebung geprüft werden.

Zur Beladung der Granulate mit Nährstoffen wurde eine Eintauchmethode verwendet. Es wurde eine Nährlösung hergestellt und die Granulate über Nacht in dieser gelagert. Die Trocknung der Granulate erfolgte an der Luft. Der Fokus lag bei der Beladung auf den drei Hauptpflanzennährstoffen Phosphor, Kalium und Stickstoff, welche in Form von Kaliumnitrat und Kaliumdihydrogenphosphat in Lösung gebracht wurden.

Zur Testung der Nährstoffauswaschung wurde ein Säulenversuch durchgeführt. Eine Glas-Filtersäule wurde mit ca. 30 g beladenem, trockenem Granulat befüllt. Die Glassäule wurde vier Mal mit jeweils 125 mL Wasser versetzt und das abgelaufene Wasser aufgefangen. Die

zugegebene Wassermenge entspricht in Bezug auf die Fläche circa einem durchschnittlichen Jahresniederschlag in Deutschland. Die Konzentrationen von Kalium, Nitrat und Phosphat wurden in den aufgefangenen Flüssigkeiten bestimmt. Zusätzlich wurden nach der Beladung und nach der Auswaschung die pflanzenverfügbaren Nährstoffe bestimmt. Zur Bestimmung des pflanzenverfügbaren Phosphats und Kaliums wurde VDLUFA-Methode 3.7.2.1 und für die Bestimmung des pflanzenverfügbaren Nitrats VDLUFA-Methode 3.7.1.1 verwendet.

Die Konzentration von Phosphat und Nitrat wurde photometrisch bestimmt. Für Phosphat wurde die Ascorbinsäure-Methode und für Nitrat die Salicylsäure-Methode verwendet. Die Bestimmung von Kalium erfolgte mittels ionensensitiver Elektrode. Aus den gemessenen Werten wurde eine Massenbilanz erstellt.

Eine Bestimmung der tatsächlich aufgenommenen Menge an Nährstoffen im Granulat war labortechnisch nicht möglich. Stattdessen wurde die Aufnahme rechnerisch anhand der Menge der absorbierten Nährlösung bestimmt, unter der Annahme, dass alle Ionen aus der absorbierten Lösung beim Trocken an das Granulat angelagert werden. Die Bestimmung der abgegebenen Gehalte an N, P und K durch die Elution erfolgte in den Auslaugflüssigkeiten. Die Ergebnisse werden somit als prozentuale Auswaschung durch Auslaugung in Bezug auf die theoretische Nährstoffaufnahme angegeben. Im Folgenden werden die Messwerte der verschiedenen untersuchten Granulat-Prototypen zusammengefasst besprochen.

Bei Phosphat lag die Auswaschung zwischen 0.5 und 2.8 %. Das aufgenommene Phosphat scheint in der Matrix gebunden zu sein und wird kaum durch Wasser ausgelaugt. Bei Nitrat und Kalium betrug die Auswaschung hingegen zwischen 10 und 70 %. Hier zeigte sich für beide Nährstoffe eine große Variabilität der verschiedenen Granulate sowohl hinsichtlich der verschiedenen Prototypen als auch innerhalb eines Prototyps. Dies lässt auf eine hohe Heterogenität der hergestellten Granulate schließen. Es zeigt sich, dass unter Umständen ein beträchtlicher Anteil der aufgenommenen Nährstoffe durch Wasser in untere Schichten verlagert werden kann und den Pflanzen anschließend nicht mehr zur Verfügung steht. Die hohe Variabilität der Werte lässt eine eindeutige Prognose jedoch nicht zu.

Bei Kalium und Phosphat lag der durchschnittliche Anteil pflanzenverfügbarer Nährstoffe bei über 100 %. Da die unbeladenen Granulate keine Nährstoffe beinhalteten, ist es möglich, dass abgesehen von der Absorption noch ein weiterer Prozess der Nährstoffanlagerung stattfindet. Die Nährstoffe könnten zusätzlich direkt aus der Lösung an der Oberfläche adsorbiert werden. Dies wurde jedoch nicht weitergehend untersucht. Eine weitere Erklärungsmöglichkeit ist die hohe Heterogenität der Granulate, die zu starken Schwankungen in den Messergebnissen führen kann.

Da das Phosphat durch Elution nicht ausgewaschen wird, ist der pflanzenverfügbare Anteil auch nach der Auswaschung noch sehr hoch. Kalium hingegen wird zum Teil aus den Granulaten ausgewaschen, so dass der pflanzenverfügbare Anteil nach der Auswaschung deutlich geringer ist. Bei Nitrat scheinen nur 30 – 70 % der theoretisch aufgenommenen Nährstoffe pflanzenverfügbar zu sein. Hiervon wird ein beträchtlicher Teil durch Elution ausgewaschen, so dass der pflanzenverfügbare Anteil nach der Auslaugung deutlich geringer ist.

Bei allen untersuchten Granulaten verbleiben auch nach der Auslaugung pflanzenverfügbare Nährstoffe im Granulat. Unter Anbetracht der Tatsache, dass das Volumen, welches zum Auslaugen verwendet wurde, einem Jahresniederschlag entspricht, kann also davon ausgegangen werden, dass die Nährstoffe auch über einen längeren Zeitraum verfügbar sind und nicht direkt nach dem ersten Regenfall ins Sickerwasser übergehen.

Pflanzversuche zur Nährstoffbeladung

Um die Pflanzenverfügbarkeit der Nährstoffe auf den Granulaten zu bewerten, wurden Pflanzversuche durchgeführt. Es wurde beschlossen, sich zunächst auf den Hauptpflanzennährstoff Stickstoff zu beschränken. Als Versuchspflanze wurde weißer Senf (*Sinapis alba*) ausgewählt, eine schnellwachsende Kultur, die oft für wissenschaftliche Untersuchungen verwendet wird. Es wurden zwei Pflanzversuche durchgeführt. Im ersten Versuch wurde die Stickstoffkonzentration zu hoch angesetzt und dadurch die Keimung der Pflanzen stark beeinträchtigt. Im Folgenden werden daher nur die Durchführung und Auswertung des zweiten Pflanzversuchs dargestellt.

Für den Pflanzversuch wurde ein vollfaktorielles Versuchsdesign mit zwei Faktoren (Granulatgabe und Düngung) mit jeweils zwei Stufen (ja/nein) verwendet. Daraus ergeben sich vier verschiedene Varianten:

- Kontrolle (K) 100 M.-% Substrat
- Granulat (G) 80 M.-% Substrat + 20 M.-% Granulat
- Dünger (D) 100 M.-% Substrat + KAS-Dünger
- Beladenes Granulat (BG) 80 M.-% Substrat + 20 M.-% Granulat beladen mit Nitrat

Pro Variante wurden 8 Replikate (insgesamt 32 Töpfe) verwendet. Als Substrat wurde wie bei der Regen- und Trockensimulation lehmiger Sand verwendet. Die Düngegabe lag bei 0,1 g N pro Topf. Für Variante D wurde Kalkammonsalpeter-Dünger verwendet, die Granulate für BG wurden mit Calciumnitrat beladen. Die Pflanzversuche wurden in einer Pflanzkammer (Faithful, FGP250) unter folgenden Bedingungen durchgeführt:

- Temperatur: 22°C

- Luftfeuchtigkeit: 60-70 %
- Tag/Nachtrhythmus: 16/8 h
- Licht: Stufe 5/10

Für die Anordnung der Töpfe wurde ein blockweise randomisiertes Design verwendet. Die Töpfe wurden nach Bedarf gewässert und bei jeder Wässerung rotiert. Nach Versuchsende wurden alle Pflanzen an der Bodenoberfläche abgeschnitten und Länge sowie Frischmasse ermittelt. Zur Ermittlung der Trockenmasse wurden die Pflanzen über Nacht im Trockenschrank getrocknet. Die statistische Auswertung der Daten erfolgte mittels zweifaktorieller Varianzanalyse (two-way ANOVA) mit einem Signifikanzniveau von $p<0,05$. Als Faktoren wurden die Granulatgabe und die Düngung getestet. Zusätzlich wurden die einzelnen Varianten paarweise miteinander verglichen, dazu wurde der Tukey-Test verwendet. Zur Auswertung und Datendarstellung wurde das Programm GraphPad Prism, Version 8.0.2 verwendet.

In Abbildung 1 ist das Aussehen der Senfpflanzen zum Versuchsende exemplarisch für jeweils eine Pflanze pro Variante dargestellt. Eine Keimhemmung durch das Granulat selbst konnte nicht beobachtet werden. Bei den gedüngten Varianten trat teilweise eine zeitlich verzögerte Keimung auf, was zu einer erhöhten Streuung in Pflanzenhöhe und -gewicht führte. Im Gegensatz zu konventionellem Dünger wiesen die Pflanzen, die mit beladenem Granulat behandelt wurden, eine homogenere Entwicklung auf.

Abbildung 1: Aussehen der Pflanzen nach Versuchsende. Von links nach rechts: Kontrolle, Granulat, Dünger, beladenes Granulat.

Eine Auswahl der Ergebnisse ist in Abbildung 2 zusammengefasst, links ist die Höhe und rechts die Frischmasse pro Pflanze aufgetragen. Im Hinblick auf Pflanzenwachstum und Biomasseentwicklung zeigte sich, dass das unbehandelte Granulat in allen gemessenen Parametern etwas schlechter abschnitt als die Kontrolle. Abgesehen von der Pflanzenhöhe wurden diese Unterschiede jedoch als statistisch nicht signifikant eingestuft. Deutlich bessere Ergebnisse im Vergleich zur Kontrolle und zum unbehandelten Dünger wurden sowohl für das beladene Granulat als auch für den konventionellen Dünger beobachtet. Zwischen dem

beladenen Granulat und dem konventionellen Dünger zeigten sich keine signifikanten Leistungsunterschiede, was auf eine vergleichbare Düngewirkung beider Varianten hindeutet.

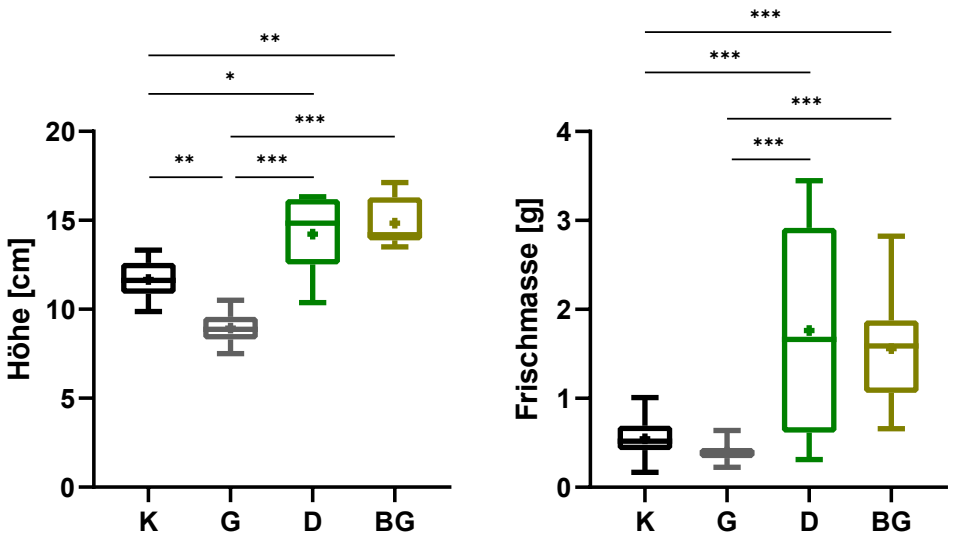

Abbildung 2: Links: Höhe, rechts: Frischmasse der geernteten Versuchspflanzen. K = Kontrolle, G = Granulat, D = Dünger, BG = beladenes Granulat. Das Plus innerhalb des Boxplots zeigt den Mittelwert an. Die horizontalen Striche geben signifikante Unterschiede zwischen den Varianten wieder, die Anzahl der Sterne das jeweilige Signifikanzniveau aus dem Tukey-Test (p<0,05, ** p<0,01, *** p<0,005).*

Die Analyse des Stickstoffgehalts vor und nach dem Versuch bestätigte den Verbrauch des zugeführten Nährstoffs. Am Ende der Versuchsdauer war nur noch eine geringer Nitratgehalt im Substrat bei G und BG nachweisbar. Der pH-Wert des Substrats wurde durch die Zugabe des Granulats nur leicht erhöht und blieb im neutralen Bereich.

Fazit zur Beladung mit Nährstoffen

Die Granulate wurden erfolgreich mit Phosphor, Kalium und Nitrat beladen. Ein Großteil der aufgebrachten Nährstoffe ist pflanzenverfügbar gemäß VDLUFA 3.7.1.1 und 3.7.2.1. Kalium und Nitrat werden durch Wasser zum Teil aus den Granulaten ausgewaschen, Phosphor hingegen nicht.

Die Beladung des Granulats mit Stickstoff hat im Pflanzversuch einen wachstumsfördernden Effekt erzielt. Dieser Effekt entsprach dem von konventionellem Dünger. Darüber hinaus scheint das beladene Granulat Vorteile hinsichtlich einer gleichmäßigeren Pflanzenentwicklung aufzuweisen.

Die durchgeführten Pflanzversuche erlaubten jedoch lediglich die Beobachtung eines begrenzten Zeitraums unter kontrollierten Bedingungen. Aufgrund des geringen Volumens der Pflanztöpfe war die maximal einsetzbare Düngermenge limitiert. Es ist anzunehmen, dass bei größerem Bodenvolumen eine höhere Beladung des Granulats möglich wäre, was wiederum einen verlängerten Düngeeffekt zur Folge haben könnte. Um das Potenzial des beladenen Granulats weiter zu evaluieren, sind weiterführende Versuche notwendig – idealerweise unter

Gewächshausbedingungen mit längerer Versuchszeit oder direkt im Freiland unter praxisnahen Bedingungen.

Prüfung der Human- und Phytotoxizität

In AP 2.4 wurde durch das ILU die Human- und Phytotoxizität der Granulate geprüft. Hierzu wurden Untersuchungen nach Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) in Auftrag gegeben und Keim- und Wachstumstest mit Kresse und Chinakohl am ILU durchgeführt.

Untersuchungen nach BBodSchV

Zur Ermittlung der Humantoxizität wurden Untersuchungen nach BBodSchV (vom 09. Juli 2021) durch ein akkreditiertes Labor durchgeführt. Betrachtet wurden dabei der Wirkungspfad Boden-Grundwasser und der Wirkungspfad Boden-Mensch. Aufgrund der anorganischen Zusammensetzung des Granulats wurde beschlossen, lediglich die anorganischen Schadstoffe (Schwermetalle), und die polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK), vertreten durch Benzo(a)pyren, welche bei unvollständigen Verbrennungsprozessen entstehen können, zu untersuchen. Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse der Untersuchungen für den letzten Granulat-Prototypen, welcher auch in den weiteren Versuchen verwendet wurde. Der Übersichtlichkeit halber sind für den Wirkungspfad Boden - Mensch nur die strengsten Grenzwerte, für die Nutzung als Kinderspielflächen, angezeigt.

In Bezug auf den Wirkungspfad Boden – Mensch lagen die Schwermetallgehalte aller untersuchten Granulat-Prototypen unterhalb der Grenzwerte. Für den Wirkungspfad Boden – Grundwasser traten teilweise Grenzwertüberschreitungen auf. In allen untersuchten Proben lagen die Chromgehalte deutlich über dem Grenzwert. In jeweils einer Probe wurde ein erhöhter Gehalt an Molybdän und PAKs festgestellt. Eine Untersuchung des Ausgangsmaterials, des Recyclingbetons, in Auftrag gegeben durch das IAB ergab jedoch keine erhöhten Schwermetallgehalte. Möglich wäre eine Kontamination des Granulats im Verlauf des Produktionsprozesses durch bspw. Abrieb der verwendeten Geräte.

Tabelle 1:Grenzwerte und Untersuchungsergebnisse nach BBodSchV für den Wirkungspfad Boden – Mensch und Boden – Grundwasser.

Parameter	Wirkungspfad Boden - Mensch		Wirkungspfad Boden - Grundwasser	
	Grenzwert [mg/kg]	**Granulat** [mg/kg]	**Grenzwert** [µg/L]	**Granulat** [µg/L]
Benzo(a)pyren	0.5	< 0,05	5	< 5
Antimon	50	6,1	10	< 3
Arsen	25	5,9	10	< 1
Blei	200	12,7	1000	8
Cadmium	10	< 0,5	3	< 0,3
Chrom-gesamt	200	25,1	50	193
Chrom VI	130	< 1	8	< 10
Kobalt	300	17,6	10	< 5
Kupfer	-	-	50	23
Molybdän	-	-	35	81
Nickel	70	12,9	20	< 0,5
Quecksilber	10	< 0,06	1	< 0,1
Selen	-	-	10	< 5
Zink	-	-	600	15
Fluorid	-	-	1500	< 500
Thallium	5	< 1	-	-
PAK15	-	-	0,2	0,2
Naphthalin + Methylnaphthaline	-	-	2	0,55

Keimversuche mit Kresse (DIN EN 16086-2:2011)

Die Wirkung des Granulats auf Pflanzen wurde zunächst anhand der Modellpflanze Kresse nach DIN EN 16086-2: 2011 geprüft. DIN EN 16086-2:2011 beschreibt Verfahren zur Bestimmung des Einflusses von Bodenverbesserungsmitteln und Kultursubstraten oder deren Bestandteile auf die Keimung und frühe Wurzelentwicklung von Kresse. Es werden zwei verschiedene Verfahren beschrieben, das Kontakt-Verfahren und das Extrakt-Verfahren. Da das Pflanzgranulat eine grobkörnige Struktur hat, wurde das Extrakt-Verfahren verwendet.

Zur Bewertung wird der Munoo-Liisa-Vitalitätsindex (MLV) verwendet. Der MLV berechnet das Produkt der Samenkeimung und der mittleren Wurzellänge im Vergleich zur Kontrollprobe in Prozent. In der Verordnung werden keine Grenz- oder Orientierungswerte angegeben, ab wann eine toxische Wirkung vorliegt. In der wissenschaftlichen Literatur werden Werte zwischen 60 und 80 % als Grenzwert diskutiert (Campos et al., 2022; González-Fernández et al., 2015; Maunuksela et al., 2012; Prasad & Foster, 2023). Für die verschiedenen Granulat-Prototypen, die vom IAB zur Testung bereitgestellt wurden, wurden jeweils zwei unabhängige Versuche durchgeführt.

Die Keimrate lag bei allen getesteten Granulaten zwischen 97 und 100 %, eine Keimhemmung wurde nicht beobachtet. Das Wurzelwachstum wurde durch die Granulatextrakte jedoch teilweise deutlich reduziert. Der MLV lag zwischen 52 und 97 % und somit zum Teil im Bereich einer toxischen Wirkung. Es ist wahrscheinlich, dass dies durch den hohen pH-Wert des Granulates (zwischen 9 und 12) bedingt ist. In späteren Pflanzversuchen in Kombination mit Bodensubstrat wurde der hohe pH-Wert deutlich abgepuffert und es konnten keine negativen Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum festgestellt werden.

Wachstumsversuche mit Chinakohl (DIN EN 16086-1:2011)

Zusätzlich zu den Keim- und Wurzelwachstumsversuchen mit Kresse wurden Versuche zum oberirdischen Pflanzenwachstum mit Chinakohl als Modellpflanze durchgeführt. Die Versuche erfolgten in Anlehnung an DIN EN 16086-1:2011 „Wachstumstest mit Chinakohl im Topf“. Für grobkörnige Proben wird ebenso wie beim Kressetest das Extrakt-Verfahren verwendet. Die Wachstumsversuche wurden lediglich mit zwei Granulat-Prototypen durchgeführt, von denen ausreichend Material für den Versuch zur Verfügung stand. Die Pflanzen wurden über drei bis vier Wochen kultiviert und anschließend oberhalb der Bodenoberfläche abgeschnitten. Ausgewertet wurden die Keimrate, die Pflanzenmorphologie und die oberirdische Biomasse.

Die Keimrate lag in einem Versuch etwas höher als die der Kontrolle und im anderen Versuch etwas niedriger. Da die Abweichungen unter 10 % betragen, wird davon ausgegangen, dass es keine eindeutigen Auswirkungen auf die Keimrate gibt. Ein wachstumshemmender Effekt durch das Granulat hat sich nicht gezeigt. Im Gegensatz zur Kresse scheint der hohe pH-Wert der Extrakte sich nicht negativ auf das Wachstum von Chinakohl auszuwirken. In beiden Versuchen war die Biomassebildung sogar etwas höher als in den Kontrolltöpfen. In Bezug auf die Pflanzenmorphologie waren keine Unterschiede zwischen Granulat und Kontrolle erkennbar.

Fazit zur Bewertung der Human- und Phytotoxizität:

Bei den Untersuchungen nach BBodSchV wurden keine Überschreitungen der Grenzwerte im Wirkungspfad Boden - Mensch festgestellt. Im Wirkungspfad Boden – Grundwasser wurden teilweise erhöhte Schwermetallgehalte gemessen, welche die Grenzwerte überschreiten, insbesondere in Bezug auf Chrom. Eine Untersuchung des Ausgangsmaterials hat jedoch keine Belastung mit Schwermetallen ergeben. Es ist denkbar, dass im Laufe des Herstellungsprozesses eine Kontamination durch die verwendeten Geräte stattgefunden hat. Diesem Umstand sollte vor einer Aufskalierung des Prozesses nachgegangen werden.

In den durchgeführten Pflanzversuchen mit unterschiedlichen Pflanzen konnte kein negativer Einfluss auf die Keimung festgestellt werden. Im Petrischalentest mit Kresse wurde ein verringertes Wurzelwachstum beobachtet, welches vermutlich durch den hohen pH-Wert

bedingt ist. Bei allen weiteren Pflanzversuchen im Topf, die im Rahmen des Projekts durchgeführt wurden, haben sich keine eindeutigen negativen Einflüsse auf das Pflanzenwachstum oder die Biomassebildung gezeigt. Durch die starke Pufferwirkung der Erde fällt der hohe pH-Wert der Granulate nicht mehr so stark ins Gewicht.

Anhand der Ergebnisse der Untersuchungen nach BBodSchV und den angewandten Pflanzversuchen wird davon ausgegangen, dass keine human- oder phytotoxische Gefahr von dem entwickelten Pflanzgranulat ausgeht.

Funktionalisierung durch Mikroorganismen

In AP 3.2 sollte wurde vom ILU untersucht, ob sich ein zusätzliches Inokulieren der Granulate mit Bodenbakterien positiv auf das Pflanzenwachstum auswirkt. Dazu wurde zunächst getestet, ob die Bakterien sich auf den Granulaten ansiedeln und anschließend die Wirkung in Pflanzversuchen überprüft.

Auswahl der Bakterien

Zur Auswahl der zu untersuchenden Bakterien wurde zuerst eine ausführliche Literaturrecherche über pflanzenstärkende Mikroorganismen durchgeführt. Anhand der Recherche wurden drei verschiedene Stämme ausgewählt und beim Leibniz-Institut DSMZ (Deutsche Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen) bestellt: *Bacillus subtilis* (DSM 1090)*, Paenibacillus polymyxa* (DSM 741) und *Streptomyces lydicus* (DSM 40461). Nach einer ersten Kultivierung im Labor wurde beschlossen, sich auf *Bacillus subtilis* und *Paenibacillus polymyxa* zu fokussieren. Die Bakterien wurden in Kryokulturen überführt, aus denen für die folgenden Versuche die Bakteriensuspensionen angesetzt wurden.

Bacillus subtilis hat in verschiedenen Studien pflanzenstärkende Effekte gezeigt, die zur Steigerung des Pflanzenwachstums und Biomasseentwicklung sowie zu erhöhten Frucht- und Getreideerträgen geführt haben (Radhakrishnan et al., 2017). Viele *Bacillus*-Arten werden bereits kommerziell als Phytostimulatoren oder Biodünger eingesetzt (Borriss, 2020).

Paenibacillus spp. haben eine Vielzahl potenzieller pflanzenstärkender Wirkmechanismen wie etwa Phosphor- und Kaliumsolubilisierung, Produktion von Phytohomornen wie dem Wachstumsregulator Auxin oder die Produktion von Siderophoren, die bei der Eisenbindung und -aufnahme helfen (Grady et al., 2016). Auch bewirken diese Mikroorganismen eine höhere Resistenz gegenüber Salzstress und haben eine Kontroll-Wirkung gegenüber Schaderregern durch die Produktion von biozidalen Substanzen (Patowary & Deka, 2020).

Beladung der Granulate

Zur Beladung wurden die Granulate zunächst mittels Autoklavierens sterilisiert. Anschließend wurden sie in eine Bakteriensuspension eingelegt, abgegossen und trocknen gelassen. Für die Bakteriensuspension wurden die beiden Bakterien jeweils aus der Kryokultur in Peptonwasser vorkultiviert. Die Versuche haben gezeigt, dass das Granulat erfolgreich mit den beiden untersuchten Bakterienstämmen beladen werden konnte. Bei erneutem Einlegen der getrockneten Granulate in flüssiges Nährmedium konnten sich die Bakterien wieder vermehren.

In einem Lagerversuch wurde das getrocknete Granulat fünf Wochen gelagert und jede Woche eine Probe wieder in Nährmedium gegeben. Nach einer Inkubationszeit von zwei Tagen wurde jeweils eine Probe entnommen und die DNS mit einem Extraktionskit extrahiert (NucleoSpin Food, Macherey-Nagel). Anschließend wurde eine PCR mit spezifischen Primerpaaren durchgeführt und die gebildeten Produkte mittels Gel-Elektrophorese untersucht.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Bakterien auch nach längerer Lagerzeit wieder reaktiviert werden konnten. Beide verwendete Bakterien bilden Endosporen, die das Überleben unter extremen Bedingungen wie Trockenheit und Hitze ermöglichen. In den Lagerversuchen und auch der Kontrolle wurden jeweils beide Bakterienstämme nachgewiesen. Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass die getrockneten Granulate offen nebeneinander gelagert wurden. Die Sporen der Bakterien können sich auch über die Luft verbreiten. Für die Pflanzversuche wurde darauf geachtet, die Granulate mit unterschiedlicher Beladung räumlich getrennt voneinander zu lagern, um die Effekte getrennt betrachten zu können.

Pflanzversuche mit Modellpflanze *Arabidopsis thaliana*

Um die Auswirkungen der ausgewählten Bakterien und der beladenen Granulate auf das Pflanzenwachstum zu ermitteln, wurden verschiedene kleinskalige Pflanzversuche durchgeführt. Zunächst wurden Versuche mit Ackerschmalwand (*Arabidopsis thaliana*), einer gängigen Modellpflanze in der Biologie und Genetik, durchgeführt. Mit *A. thaliana* wurden insgesamt vier verschiedene Versuche in unterschiedlicher Skalierung durchgeführt:

1. Versuch im Kolben in Flüssigkultur
2. Versuche in der Petrischale auf Phytoagar
3. Versuch mit Anzuchterde in der Pflanzenkammer
4. Versuch mit Anzuchterde auf der Fensterbank

Im ersten Versuch fand in allen untersuchten Varianten kein Wachstum statt. In der Petrischale fand kein Wachstum der Pflanzen bei Granulatzugabe statt, unabhängig von der Bakterienbeladung. Vermutlich ist dieser Effekt erneut auf den hohen pH-Wert der Granulate

zurückzuführen. Im dritten Versuch in der Pflanzenkammer kam es nach etwa zwei Wochen zu einer Stagnation des Wachstums bei allen Varianten ohne Bakterienzugabe. Alle drei Versuche wurden frühzeitig abgebrochen und werden hier nicht weiter beschrieben.

Im vierten und letzten Versuch mit *Arabidopsis thaliana* erfolgte die Kultivierung in einem Zimmergewächshaus auf der Fensterbank im Labor mit natürlichem Licht und einer konstanten Temperatur von 22°C. Folgende sechs Varianten wurden untersucht:

1. K – Kontrolle, ohne weitere Zusätze
2. G – Zusatz von 20 M.-% unbeladenem Granulat
3. BS – Zugabe von 2 mL *Bacillus subtilis* Suspension ($2x10^8$ KBE/mL)
4. G+BS - Zusatz von 20 M.-% Granulat, beladen mit *Bacillus subtilis*
5. PP- Zugabe von 2 mL *Paenibacillus polymyxa* Suspension (KBE/mL n.b.)
6. G+PP- - Zusatz von 20 M.-% Granulat, beladen mit *Paenibacillus polymyxa*

Pro Variante wurde jeweils eine Pflanzschale (bestehend aus sechs einzelnen Töpfen) eingesetzt und mit Anzuchterde befüllt. Die Schalen wurden nach Bedarf bewässert und bei jeder Wässerung rotiert. Der Versuch lief über einen Zeitraum von sechs Wochen. Zur Auswertung des Versuchs wurde das Gewicht (Frischmasse), der Rosettendurchmesser sowie die Blattfläche bestimmt. Die Bestimmung der Blattfläche erfolgte mittels der Software IMAGE J. Die statistische Auswertung der Daten erfolgte mittels zweifaktorieller Varianzanalyse (two-way ANOVA) mit einem Signifikanzniveau von $p<0,05$. Als Faktoren wurden die Granulatgabe und die Bakteriengabe getestet. Als post-hoc Test wurde der Tukey-Test verwendet. Zur Auswertung und Datendarstellung wurde das Programm GraphPad Prism, Version 8.0.2 verwendet.

Das Granulat hatte keine negativen Auswirkungen auf die untersuchten Parameter, sondern hat tendenziell eher zu etwas höheren Werten im Vergleich zur Kontrolle geführt. Die ANOVA ergab für alle drei untersuchten Parameter einen statistisch signifikanten Unterschied abhängig von der Granulatgabe und der Bakterienbeladung. Die Effekte des Granulats und der Bakterienbeladung sind in Abbildung 3 beispielhaft an der Pflanzenfrischmasse gezeigt. Durch die Zugabe der Bakterien *B. subtilis* und *P. polymyxa* konnte die Pflanzenperformance in Bezug auf Wachstum und Biomasseentwicklung deutlich gesteigert werden. Eine weitere Verbesserung der Performance ergab sich durch den Einsatz von 20 M.-% an beladenem Granulat. Die Zugabe von *P. polymyxa* erzielte einen stärkeren positiven Effekt als die Zugabe von *B. subtilis*.

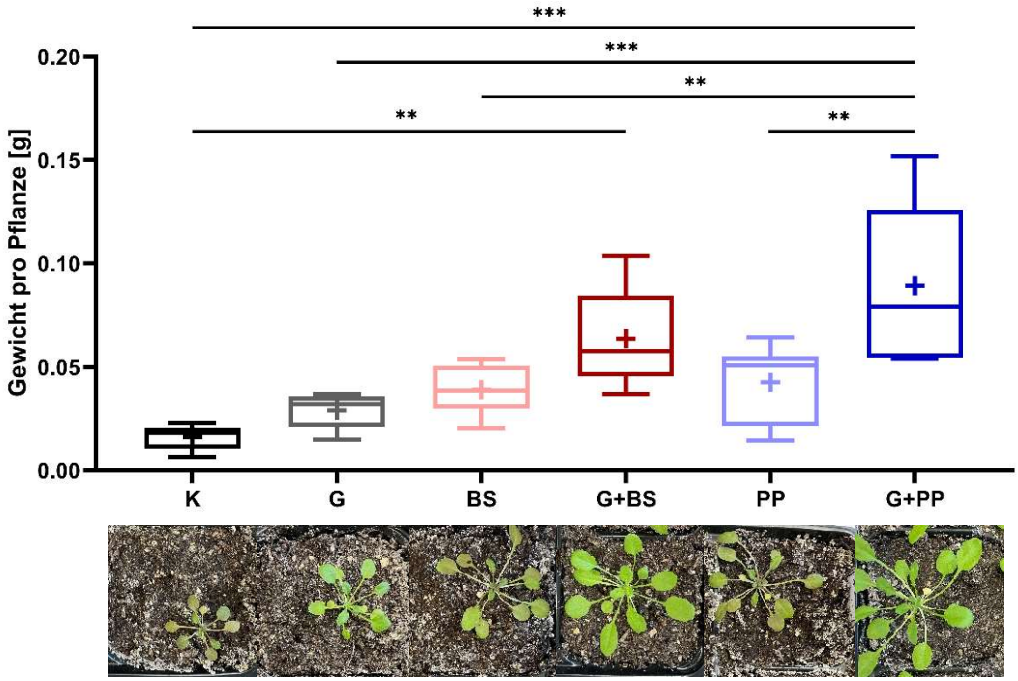

Abbildung 3: Oben: Frischmasse der geernteten Versuchspflanzen. K = Kontrolle, G = Granulat, BS = Zugabe von Bacillus subtilis, G+BS = Zugabe von Granulat, beladen mit Bacillus subtilis. PP = Zugabe von Paenibacillus polymyxa, G+PP = Zugabe von Granulat, beladen mit Paenibacillus polymyxa. Das Plus innerhalb des Boxplots zeigt den Mittelwert an. Die horizontalen Striche geben signifikante Unterschiede zwischen den Varianten wieder, die Anzahl der Sterne das jeweilige Signifikanzniveau (p<0,05, ** p<0,01, *** p<0,005). Unten: Beispielhafte Darstellung der Pflanzen zu Versuchsende.*

Pflanzversuche mit gartenbaulich relevanten Kulturen

Zusätzlich zu den orientierenden Versuchen mit *Arabidopsis thaliana* als Modellpflanze wurden Pflanzversuche mit gartenbaulich relevanten Kulturen durchgeführt. Für den ersten Versuch wurden Tomaten verwendet und für den zweiten Versuch Radieschen. Da die Kultivierungsbedingungen im Versuch mit Tomatenpflanzen nicht optimal waren, stagnierte das Wachstum nach etwa zwei Wochen und der Versuch musste abgebrochen werden. Eine genauere Beschreibung und Auswertung erfolgen daher hier nicht.

Im Versuch mit Radieschen wurden folgende sechs verschiedene Varianten untersucht:

1. K – Kontrolle, ohne weitere Zusätze
2. G – Zusatz von 20 M.-% unbeladenem Granulat
3. BS – Zugabe von 10 mL Bacillus subtilis Suspension (KBE/mL n.b.)
4. G+BS - Zusatz von 20 M.-% Granulat, beladen mit Bacillus subtilis
5. PP- Zugabe von 10 mL Paenibacillus polymyxa Suspension (7x107 KBE/mL)
6. G+PP- Zusatz von 20 M.-% Granulat, beladen mit Paenibacillus polymyxa

Pro Variante wurden fünf Töpfe eingesetzt. Als Substrat wurde Anzuchterde verwendet. Der Pflanzversuch wurde in der Pflanzkammer unter folgenden Bedingungen durchgeführt:

- Temperatur: 18°C / 20°C
- Tag-/Nachtrhythmus: 9 / 15 h
- Luftfeuchtigkeit: 60%

- Licht: Stufe 5/10 (120 µmol m^{-2} s^{-1})

Für die Anordnung der Töpfe wurde ein blockweise randomisiertes Design verwendet. Die Töpfe wurden nach Bedarf gewässert und bei jeder Wässerung rotiert. Der Versuch erstreckte sich über einen Zeitraum von fünf Wochen. Nachdem das Wachstum nach etwa drei Wochen stagnierte, wurden die Pflanzen mit jeweils 20 mL Flüssigdünger (Keyzers® Bio-Dünger für Obst & Gemüse, Dosierung: 10 mL/L Wasser) behandelt. Nach Versuchsende wurden die Pflanzen geerntet und ihre Höhe sowie das ober- und unterirdische Gewicht bestimmt. Die statistische Auswertung erfolgte analog zum Pflanzversuch mit *A. thaliana.*

Zur Bestimmung der Mikrobiomzusammensetzung wurden zu Beginn und Ende des Versuchs Bodenproben aus jeweils drei Töpfen pro Variante genommen. Die DNS der genommenen Bodenproben wurde mittels Extraktionskit (E.Z.N.A.® Soil DNS Kit) extrahiert und anschließend zu einem externen Dienstleister zur Sequenzierung versendet.

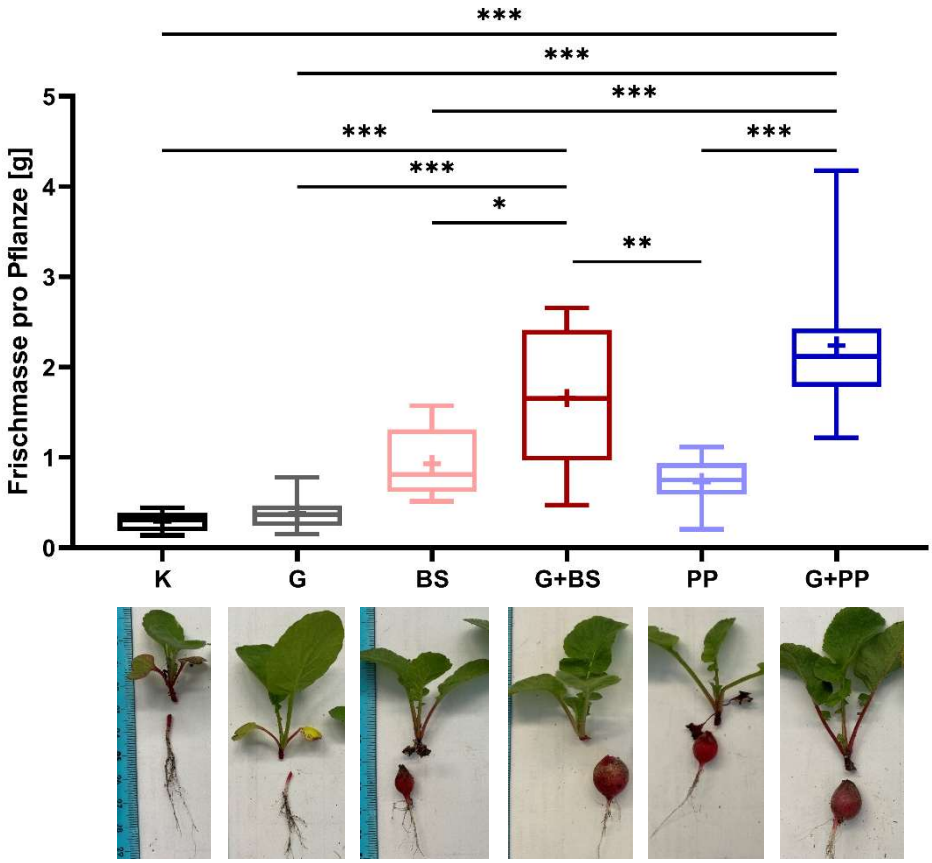

Abbildung 4: Oben: Summe der ober- und unterirdischen Frischmasse der Radieschen-Pflanzen zu Versuchsende. K = Kontrolle, G = Granulat, BS = Zugabe von Bacillus subtilis, G+BS = Zugabe von Granulat, beladen mit Bacillus subtilis. PP = Zugabe von Paenibacillus polymyxa, G+PP = Zugabe von Granulat, beladen mit Paenibacillus polymyxa. Das Plus im Boxplot zeigt den Mittelwert an. Die horizontalen Striche geben signifikante Unterschiede zwischen den Varianten wieder, die Anzahl der Sterne das jeweilige Signifikanzniveau (p<0,05, ** p<0,01, *** p<0,005). Unten: Beispielhafte Darstellung der Pflanzen zu Versuchsende.*

Die Ergebnisse des Versuchs sind in Abbildung 4 beispielhaft für die Pflanzenfrischmasse gezeigt, hierbei wurde die Summe aus der ober- und unterirdischen Biomasse gebildet. In den Varianten ohne Bakterienzugabe (K und G) haben sich keine oder nur sehr kleine Radieschen

ausgebildet. In den Varianten mit direkter Bakterienbeladung sind kleinere Radieschen gewachsen, in denen mit beladenem Granulat deutlich größere. Auch haben sich unter Zugabe von beladenem Granulat deutlich größere Blätter ausgebildet. Die Varianzanalyse ergab für alle untersuchten Parameter einen statistisch signifikanten Unterschied abhängig von der Granulatgabe und der Bakterienbeladung. Auch die Interaktion der beiden erwies sich als signifikant. Im Vergleich zur Kontrolle führten alle anderen Varianten zu einer besseren Pflanzenperformance. Wie auch bei den Versuchen mit *A. thaliana* konnte die Biomasseentwicklung durch die Zugabe der beiden Bakterien deutlich gesteigert werden. Durch die Zugabe von beladenem Granulat fand ein weiterer deutlicher Zuwachs statt. Auch hier war der Effekt durch *P. polymyxa* stärker ausgeprägt als der durch *B. subtilis.*

Die Untersuchung des Mikrobioms ergab, dass weder in der unbehandelten Kontrolle noch in den Töpfen mit unbeladenem Granulat *Bacillus subtilis* oder *Paenibacillus polymyxa* nachgewiesen werden konnten. Beide Bakterienstämme waren jeweils nur in den dafür vorgesehenen Behandlungen vorhanden, jedoch nie gleichzeitig nachweisbar. Hier scheint die räumliche Trennung der Granulate eine gegenseitige Kontamination verhindert zu haben. Während bei der direkten Bakterienzugabe zu Versuchsbeginn höhere Konzentrationen messbar waren (BS: 2,5-11,1%, PP: 0,5-1,8%), konnten die Bakterien zu Versuchsende nicht mehr nachgewiesen werden. Die Verwendung von beladenem Granulat führte zwar zu geringeren Anfangskonzentrationen (BS: 0,1-1,1%, PP: 0,5-2%), jedoch verblieben hier auch zu Versuchsende noch messbare Anteile der Bakterien (BS: 0,0-0,2%, PP: 0,2-0,5%). Daraus ergibt sich, dass das beladene Granulat möglicherweise einen längerfristigen positiven Effekt durch die Zugabe der Bakterien bewirken kann.

Fazit zur Beladung mit Mikroorganismen

Die Granulate stellen ein geeignetes Trägermaterial für pflanzenstärkende Bodenbakterien dar. Sie konnten erfolgreich mit den Bakterien *Paenibacillus polymyxa* und *Bacillus subtilis* beladen werden. Auch nach längerer Lagerzeit der Granulate konnten sich die Bakterien in Nährmedium wieder vermehren.

In den durchgeführten Pflanzversuchen hat der Einsatz von beladenen Granulaten einen deutlichen positiven Einfluss auf die Pflanzenentwicklung genommen, wobei der Effekt durch *P. polymyxa* stärker ausgeprägt war als der durch *B. subtilis*. Im Rahmen der Versuche konnte nicht bestimmt werden, welche Menge an Bakterien durch die Zugabe von beladenen Granulaten eingebracht wurde. Ein direkter quantitativer Vergleich zwischen der Zugabe der Bakterien als Suspension und der Zugabe als Biofilm auf den Granulaten ist somit nicht möglich. Weitere Versuche könnten sich mit dem Einfluss unterschiedlich starker Beladung und Konzentration des Granulats sowie dem Einfluss auf abiotische Stressfaktoren wie Trocken- oder Salzstress beschäftigen. Die Granulate wurden vor der Beladung sterilisiert, um

den Einfluss der ausgewählten Bakterienstämme isoliert betrachten zu können. In der tatsächlichen Anwendung stellt dies einen hohen Energie- und Kostenaufwand dar. Es sollte daher noch untersucht werden, ob dieser Schritt tatsächlich notwendig ist.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Personalkosten waren mit ca. 145.000 € mit Abstand die wichtigste Position des zahlenmäßigen Nachweises. Etwa 12.400 € wurden für die Anschaffung von Verbrauchsmitteln verwendet. Weitere 4000 € fielen für Analysen durch externe Dienstleister an.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit

Alle durchgeführten Arbeiten wurden für die Bewertung und Funktionalisierung des Pflanzgranulats als notwendig und angemessen bewertet. Einige Arbeiten brachten im ersten Anlauf nicht das erwartete Ziel und mussten modifiziert und wiederholt werden, dies ist jedoch Bestandteil wissenschaftlicher Forschung.

4. Voraussichtlicher Nutzen

Die Untersuchungen im Rahmen dieses Teilprojekts haben gezeigt, dass das entwickelte Pflanzgranulat zum einen sicher in der Umwelt eingesetzt werden und zum anderen wichtige Funktionen erfüllen kann. Das Granulat konnte erfolgreich mit Mikroorganismen und Nährstoffen beladen werden und kann unter bestimmten Umständen einen zusätzlichen Wasserspeicher darstellen. Das langfristige Ziel ist nun, den Granulatprototypen zur Marktreife zu bringen. Dazu muss das Granulat unter Praxisbedingungen getestet und mögliche Hersteller identifiziert werden. In der näheren Zukunft soll zunächst ein Gebrauchsmuster angemeldet werden.

5. Fortschritte im Themengebiet bei anderen Stellen

Der Zuwendungsempfänger hat im Rahmen des Vorhabens eine kontinuierliche Sichtung der relevanten Literatur durchgeführt. Es konnte kein signifikanter Fortschritt im Themengebiet bei anderen Stellen festgestellt werden.

6. Veröffentlichungen und Konferenzteilnahmen

Veröffentlichung	Titel	Journal/Veranstaltung	Datum
Vortrag	Brauchen wir neues Material für klimaresiliente Böden für Grünflächen und (urbanen) Gartenbau? Kann Bauschutt eine Lösung sein?	Onlineveranstaltung im Rahmen der Woche der Klimaanpassung	16.09.2022
Posterpräsentation	GranuGruen – Bodenverbesserung mit Baureststoffen	2. Berlin-Brandenburger Alleentagung 2023	31.03.2023
Veröffentlichung	Recyclingbeton speichert Wasser	VDI energie+umwelt	28.02.2025
Veröffentlichung	Bäume in der Stadt: Wasser speichern mit „GranuGruen“	Baumzeitung taspo	19.03.2025

7. Literatur

Borriss, R. (2020). Bacillus. In *Beneficial Microbes in Agro-Ecology: Bacteria and Fungi* (pp. 107–132). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823414-3.00007-1

Campos, L., Seixas, L., Dias, S., Peres, A. M., Veloso, A. C. A., & Henriques, M. (2022). Effect of Extraction Method on the Bioactive Composition, Antimicrobial Activity and Phytotoxicity of Pomegranate By-Products. *Foods*, *11*(7). https://doi.org/10.3390/foods11070992

Deutscher Wetterdienst. (2016). *Starkniederschläge in Deutschland*.

González-Fernández, J. J., Galea, Z., Álvarez, J. M., Hormaza, J. I., & López, R. (2015). Evaluation of composition and performance of composts derived from guacamole production residues. *Journal of Environmental Management*, *147*, 132–139. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.09.016

Grady, E. N., MacDonald, J., Liu, L., Richman, A., & Yuan, Z. C. (2016). Current knowledge and perspectives of Paenibacillus: A review. In *Microbial Cell Factories* (Vol. 15, Issue 1). BioMed Central Ltd. https://doi.org/10.1186/s12934-016-0603-7

Maunuksela, L., Herranen, M., & Torniainen, M. (2012). Quality Assessment of Biogas Plant End Products by Plant Bioassays. *International Journal of Environmental Science and Development*, *3*(3).

Patowary, R., & Deka, H. (2020). Paenibacillus. In *Beneficial Microbes in Agro-Ecology: Bacteria and Fungi* (pp. 339–361). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823414-3.00017-4

Prasad, M., & Foster, P. (2023). Comprehensive Evaluation and Development of Irish Compost and Digestate Standards for Heavy Metals, Stability and Phytotoxicity. In *Environments - MDPI* (Vol. 10, Issue 10). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/environments10100166

Radhakrishnan, R., Hashem, A., & Abd Allah, E. F. (2017). Bacillus: A biological tool for crop improvement through bio-molecular changes in adverse environments. *Frontiers in Physiology*, *8*(SEP). https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00667