

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Zuwendungsempfänger

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

Titel der Förderung:

Innovationsräume Bioökonomie, eine Initiative des Bundes-ministeriums für
Bildung und Forschung
DegraTex - Biobasierte, High-Performance Geotextilien mit definierter
Abbaubarkeit

Verantwortliche Autoren:

Dr.-Ing. Kira Heins
Fabio Bußmann
Lina Cardozo Solano
Antonia Weltmeyer
Selina Granderath-Miegel

Förderkennzeichen:

031B1210A

„Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor.“

Teil II: Eingehende Darstellung

1. Darstellung der Verwendung der Zuwendung sowie der erzielten Ergebnisse

Arbeitspaket 1 - Erstellung von Lastenheften

Im Rahmen des Projektes wurden drei Anwendungsfälle berücksichtigt, die bewehrte Erde, der Vegetationsschutz sowie der Erosionsschutz. Für jeden Anwendungsfall wurde ein anwendungsspezifisches Lastenheft entwickelt. Zunächst wurden die Anwendungsfälle detailliert beschrieben und die zentralen Materialcharakteristika untersucht. Im Anschluss wurden die relevanten Eigenschaften durch Zahlenbereiche gestützt. Dazu wurden nicht degradierbare Referenzprodukte herangezogen. Folgende Charakterisierungsparameter wurden zur Materialbewertung herangezogen

Textil: die Zusammensetzung in und quer zur Produktionsrichtung, die Fertigungstechnologie, angeschlossenen Veredelungsprozesse, die Textilkonstruktion und -kategorie, die Dicke des Textils, sowie das Flächengewicht, typische Produktionslosgrößen (Breite und Länge der Warenbahn)

Garn: die Position im Textil (Kette und Schuss), die Ausrichtung, der Anteil im Textil, die Feinheit, das Grundmaterial, die Texturierung, die Mischung und Drehrichtung sowie die Anzahl der Einzelfilamente.

Daraus lassen sich für die Materialauswahl und Textilentwicklung folgende zu berücksichtigende Aspekte ableiten

Polymerspezifisch: Dichte; Thermische Eigenschaften (Schmelz-, Glasübergangs-, Kristallisationstemperatur); Mechanische Eigenschaften (Bruchdehnung, E-Modul, Zugfestigkeit)

Filamentspezifisch: Lineare Dichte, Durchmesser, Querschnittsform

Textilspezifisch: Zugfestigkeit und Dehnung in Kett- und Schussrichtung, Abriebsfestigkeit, Flächengewicht

Anwendungsspezifisch: Textil-Erde Verbundbeiwert, pH Beständigkeit, Beständigkeit in und Wirkung auf das Bodenmaterial, UV-Beständigkeit, Feuchteverhalten

Für den Anwendungsfall „**Bewehrungstextil**“ leiteten sich unter Berücksichtigung dieser Kategorien die folgenden Anforderungen und Entwicklungen ab: Die Typische Zugfestigkeit in Kett- und Schussrichtung liegt bei 78 cN/tex bei einer Höchstzugdehnung von 12 %. Das Textil wird als verwirktes biaxiales Gelege auf einer Raschelmaschine hergestellt. Dabei werden Gitteröffnungen von 25 x 25 mm und ein Flächengewicht von 350 g/m² angestrebt. Die Produktion erfolgt auf einer Breite von 500 cm und bei einer Länge je Liefereinheit von 200 m. Entsprechend der Referenzprodukte sollte in Kett- und Schussrichtung ein Multifilamentgarn der Feinheit 1100x8 dtex mit 192 Einzelfilamenten und rundem Querschnitt eingesetzt werden. In Schussrichtung werden Multifilamente mit einer Feinheit von 2200 tex bei rd 348 Einzelfilamenten und rundem Querschnitt benötigt. Nach der Textilproduktion erfolgt im Referenzprozess eine Ausrüstung mit einer chemischen Dispersion bei einem Massenanteil von 37 %. Der Endpreis des Produktes sollte im Bereich von 1,8 EUR/m² für eine gewebte Bewehrung und bei 2,6 EUR/m² für eine Gitterbewehrung liegen.

Eine zentrale Anforderung für Textilien im **Erosionsschutz** ist eine hinreichende Offenheit der Wabenstruktur, um ein Verfüllen mit Erdmaterial zu ermöglichen. Nach der Referenz liegt diese bei ca. 3-5 cm. Zur Verarbeitung auf der Doppelraschelmaschine sollte das Monofilament eine Feinheit von 1000 tex nicht überschreiten. Bei beiden Anwendungen dient das Textil als Bewehrung, somit müssen Rollenware mit der Maschine in einer Breite von 5 m und einer typischen Rollenlänge von bis zu 300 m abgelegt. Die Sicherung der Systeme erfolgt durch das Einbringen von Ankern durch das Textil in das Erdreich. Die Einbautiefe bei bewehrenden Aufgaben erfolgt in der Regel in Tiefen von 20 cm bei Straßenanwendungen oder in Form von Taschen zur Absicherung von Ebenen beim Böschungsaufbau. Die Erosionsschutztextilien werden oberflächennah eingebracht. Dabei sind sie zunächst der UV-Strahlung und zusätzlicher Belastung durch Begehung ausgesetzt, sodass eine hinreichende Robustheit erforderlich ist. Darüber hinaus wird für beide Anwendungsfälle eine Mindestnutzungsdauer von einem Jahr angesetzt. Innerhalb dieser Nutzungsdauer muss die Festigkeit des Textils ohne nennenswerte Verschlechterung der Eigenschaften gewährleistet werden.

Für den Einsatz im **Vegetationsschutz** wurden folgende Aspekte als wesentliche Punkte identifiziert: Geschlossene Struktur mit hoher Oberfläche, Biegesteifigkeit, konfektionierbar zur Einbringung von Durchlüftungsöffnungen. Zudem ist eine Vorrichtung zum Verschließen der Hüllstrukturen vorzusehen. Diese wird über ein Stecksystem, Pfeil und Schlitz, realisiert. Daraus ableitend wird eine vernadelte Vliesstruktur mit Dicken von 2-3 mm für die weitere Entwicklung vorgeschlagen.

Bei den synthetischen Fasern erfolgt im Anschluss eine Aufteilung in (kommerziell) spinnbare und nicht spinnbare Materialien. Für Bewehrungsanwendungen werden Naturfasern auf Grund der sehr schnellen Degradation ausgeschlossen. Da sich das Projekt auf die textilen Flächengebilde konzentriert, werden nur diejenigen synthetischen Materialien in Betracht gezogen, die in industriellem Maßstab ausgesponnen werden können und dementsprechend zum Zeitpunkt des Projektes kommerziell erhältlich sind. Für die überirdische Anwendung als Vegetationsschutz dagegen bieten Blends aus Naturfasern und synthetischen Fasern eine gute Alternative. Dabei werden im Wesentlichen Bastfasern (Hanf, und Flachs) aus lokaler Quelle fokussiert, die mit einem biobasierten und degradierbaren synthetischen Kurzfasermaterial gemischt werden. Die Bastfasern weisen dabei eine höhere Robustheit auf als bspw. Baumwolle und stehen nicht in derart hoher Konkurrenz zur Bekleidungsindustrie. Zusätzlich wird in der Vliesbildung der Hanffaser Schafswolle beigemischt.

Arbeitspaket 2 - Textil- & Prozessentwicklung

Ausgehend von den Referenzen wurden die Strukturen der Textilien festgelegt (vgl. Abb. XXX). Für den **Vegetationsschutz** wird die Nutzung eines Vliesstoffs fokussiert. Auf diese Weise wird eine Dichte Struktur ermöglicht, die gleichzeitig für die Degradation auf (a-)biotischer Ebene nach der Nutzungsdauer eine hinreichend große Angriffsfläche bietet. Zudem kann durch die Art der Verfestigung – hier Vernadelung – und die Vliesstoffdicke die Steifigkeit der Hülle definiert werden. Es wird eine Dicke von bis zu 2 mm gewählt, wodurch die Hülle ohne weitere Stützen aufrecht und formhaltend aufgerichtet werden kann. Es werden Kombinationen aus Hanf und PLA-Kurzfasern sowie Hanf/Wollgemisch mit PLA-Fasern hergestellt. Die PLA-Fasern schmelzen bei der Kalandrierung auf und stabilisieren und verfestigen die Hülle weiter.

Für die **Erosionsschutztextilien** wurden Abstandsgewirke mit einer Wabenstruktur und einer Öffnung von 3 cm und 5 cm sowie einem Decklagenabstand von 3 cm angestrebt. Die Textilien werden zunächst aus petrochemischen Fasermaterialien als Referenz produziert. Anhand dieser wird im AP 4 die ideale Textilgeometrie evaluiert und aus den monofilen PLA-Fasersystemen nachgebildet. Für den Einsatz im Erosionsschutz weisen die kommerziell verfügbaren PLA-Monofilamente eine hinreichende Festigkeit auf.

Auf Grund der hohen Anforderungen an die Festigkeiten des Fasermaterials bei **bewehrenden Anwendungen** wurde zunächst als potentielles Material mit hinreichender industrieller Produktionskapazität PLA (Polymilchsäure) identifiziert. Die tieferegehende Marktrecherche sowie Produzenten- und Händlergespräche ergaben jedoch eine Abweichung zwischen dem Festigkeits- und Titer-Bedarf, der durch den Erdbau generiert wird und den verfügbaren Produktbereichen insbesondere auf Seiten der Multifilamente. Infolgedessen wurden hochfeste Viskosefasern sowie biologisch degradierbares PET (Polyester) als Alternativen identifiziert. Dabei weist Viskose eine vergleichbar schnelle Degradation auf. Dies bedingt in AP2 entweder die Applikation einer Beschichtung, die wiederum langfristige Folgen auf die Umweltverträglichkeit des Gesamtsystems generieren kann oder die Adaption der Bauweise, um die Festigkeitsabnahme über die Zeit durch eine initiale Überbewehrung zu kompensieren. Das degradierbare PET ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht in hinreichender Menge verfügbar.

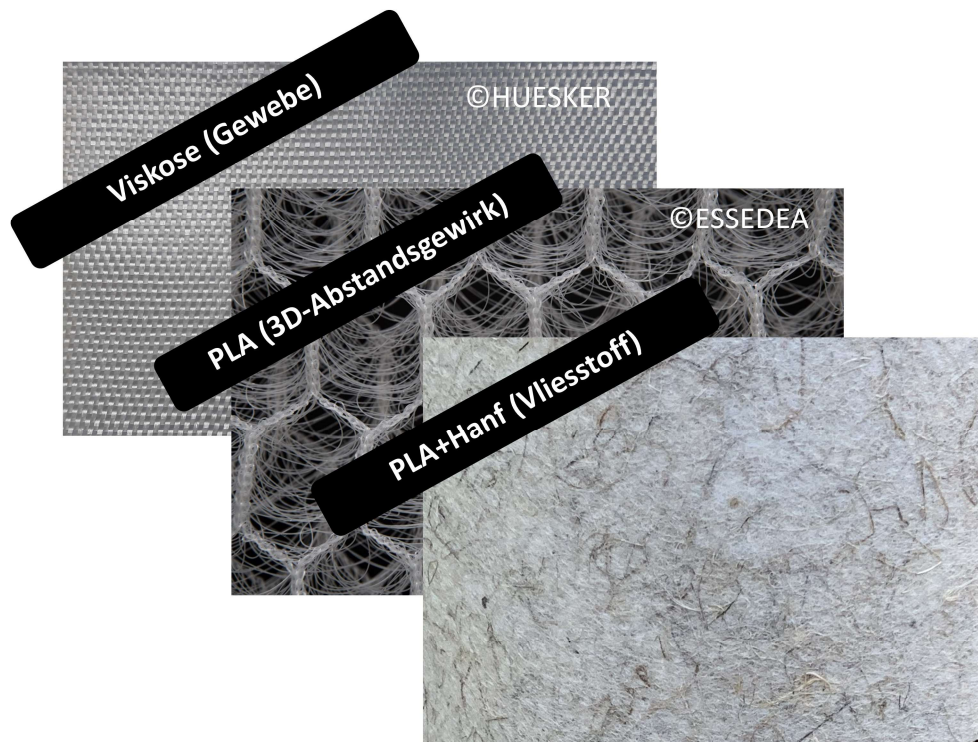


Abbildung 1: Entwickelte Textilstrukturen

Arbeitspaket 3 - Entwicklung und Umsetzung einer Methodik zur Messung der Umweltwirkungen

Zur Ermittlung der Umweltwirkung der entwickelten textilen Lösungen wurden zum einen die Materialien im Labor der Partner UMSICHT, IFER und iAMB den zu erwartenden Umgebungsbedingungen ausgesetzt. Dazu wurden aus den Gebieten der späteren Demonstratoren Erdproben entnommen. Die erste Probenentnahme für den Anwendungsfall „Vegetationsschutz“ erfolgt nach einer Expositionszeit von rund 6 Monaten.

Für die Analyse der Umweltwirkungen wurden zum einen Untersuchungen im Boden durchgeführt, als auch wässrige Eluate der Textilien erstellt, um Mechanismus-spezifische Auswirkungen und Daphnientoxizität zu bestimmen. Die Bodenuntersuchungen wurden im Reproduktionstest mit der Collembola *Folsomia candida* sowie dem Kompostwurm *Eisenia fetida* durchgeführt. Diese Organismen stellen Standard- sowie Stellvertreterorganismen in der terrestrischen Ökotoxikologie dar. Durchführung erfolgte nach den von der OECD (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung) erstellten Guidelines 222 und 232. Kurz zusammengefasst wurden die Organismen dabei in einen vorher exponierten Boden gegeben und für die Zeit mindestens eines Reproduktionszyklus, in beiden Fällen 4 Wochen, exponiert und gefüttert. Da insbesondere der Abbau von bioabbaubaren Geotextilien im Fokus dieses Projektes stand, wurden die kreisrunden Exposition durch Auflage des Textil auf Boden ("K") noch durch die Exposition mit in dem Boden intergrierten Partikeln (1cm² für Regenwurm, 0,25cm² für Collembola) erweitert. Nach Exposition wurden die Tiere aus den Expositionsbehältnissen entfernt und adulte Tiere sowie ihre Nachkommen dokumentiert. In den Tests mit Collembolen wurden keinerlei Effekte festgestellt. Bei den Wurmtests wurden zwar keine erhöhte Mortalität der Adulten beobachtet, allerdings sank das Gewicht bei Applikation verschiedener Textilien (Vliesstoff, Viskose, herkömmliches Abstandsgewirk) teilweise signifikant unter das der Negativkontrollen. Die Reproduktionsergebnisse zeigen hohe Schwankungen zwischen den Replikattagen, aber werden insgesamt als unbedenklich eingestuft.

Die Geotextilien wurden für eine Bearbeitung im wässrigen Medium eluiert, um potentiell schädliche Bestandteile zu detektieren. Diese Elution sollte die natürlichen Gegebenheiten darstellen, weshalb das Geotextil in Wasser leicht geschwenkt wurde. Um potentielle Unterschiede zwischen kurzer Auswaschung (Regenereignis) und langfristiger wässriger Exposition (im Wasser liegend) darzustellen,

wurden drei Elutionszeiträume von 6h, 1d und 30d gewählt, in denen 500mg des Textils in 200mL entionisiertem Wasser bei Dunkelheit und 20°C bei 100rpm geschwenkt wurden. Prozesskontrollen, bestehend aus entionisiertem Wasser, wurden zur Qualitätssicherung zusätzlich bei jedem Elutionsvorgang durchgeführt. Anschließend wurde eine Festphasenextraktion mit Ethylacetat und Methanol sowie anschließende Überführung in Dimethylsulfoxid (DMSO) durchgeführt. DMSO ist ein standardisiertes Trägermittel für Kontaminanten und geeignet für den Einsatz in biologischen aquatischen Testsystemen. Diese waren hier der Mikrokerntest auf Genotoxizität, der MTT-Cytotoxizitätstest, der micro EROD Test auf dioxin-ähnliche Wirksamkeit und der Daphnientest auf Immobilisierung. Ein neu entwickelter Prüfplan zur Umweltbewertung von Kunststoffen schlägt ähnliche Prozesse wie die hier ausgearbeiteten vor, verwendet allerdings leicht niedrigeren Konzentrationen und fokussiert sich auf aquatische Stellvertreterorganismen wie Alge, Daphnie und Fisch¹. Unsere Untersuchungen zielen auf ein Screening mechanistischer Wirkungen ab, welche bei Positivbefunden auf höherer biologischer Ebene weiter untersucht werden können.

Der Mikrokerntest wurde nach dem Standard der ISO 21427-2:2006 (2006) mit der V79-Zelllinie in der höchsten Extrakt-Konzentration angewendet. Er wurde mit simuliertem Metabolismus (+S9) als auch ohne diesen (-S9) durchgeführt. Das S9 wurde von ICCR-Roßdorf GmbH aus mit Phenolbarbital/β-Naphtoflavon induzierten Ratten bezogen. Die Auswertung erfolgte durch Bestimmung der relativen Induktion gegenüber einer Negativkontrolle aus Medium sowie zusätzlich der Prozesskontrolle im Falle einer signifikanten Induktion. In allen Testsystemen wurden mindestens drei natürliche biologische mit jeweils zwei technischen Replikaten untersucht. Cytotoxizität wie sie im micro-EROD Test voruntersucht wurde, ist hier durch visuelle Betrachtung der Zellen vorgenommen worden. Ergebnisse zeigen in Einzelproben eine signifikante Erhöhung der Mikrokerne auf. Alle weiteren Proben sind unauffällig und dementsprechend wird keine der Textilien als potential genotoxisch eingestuft.

Der MTT-Test wurde vor der Untersuchung mit dem Mikro-EROD-Test durchgeführt, um verzerrte Ergebnisse durch Zytotoxizität zu vermeiden. Die Zellen wurden ähnlich wie beim Mikro-EROD-Test behandelt und inkubiert, mit Ausnahme eines anderen Ausplattierungsschemas (kein 2,3,7,8-TCDD-Standard) und der Beendigung des Assays. Nach der regelmäßigen 68-72-stündigen Exposition wird das Expositionsmedium entfernt, die Zellen werden mit 200 µL PBS gewaschen, dann werden 100 µL MTT (Endkonzentration von 500 µg/mL, zubereitet in einem Medium ohne jegliche Zusätze) zugegeben und die Platten werden 1 Stunde lang inkubiert. Die Menge des gebildeten blauen Formazans wird dann durch Absorptionsmessungen mit dem Tecan-Reader gemessen (Absorption 492 nm). Die Menge des blauen Formazans ist proportional zur Menge der lebensfähigen Zellen, so dass der Prozentsatz der lebensfähigen/abgestorbenen Zellen durch Vergleich mit der Negativkontrolle berechnet werden kann. Untersuchung auf Cytotoxizität im MTT Zelltest induzierten eine innerhalb aller Eluate relativ höhere Toxizität von dem Viskose Textil mit einem EC50 von 0,03 mg Textil / mL Medium. Auch eine zusätzliche Vorwaschung der Eluate konnte die Toxizität des Viskosetextils nicht senken, obwohl das Waschwasser eine ähnlich hohe Induktion aufwies. Dies ist in Graph 2 ersichtlich.

¹Bundesanstalt für Gewässerkunde, Bundesanstalt für Straßenwesen, Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt (2024) Bewertung der Freisetzung umweltrelevanter Stoffe aus Geokunststoffen für Böschung- und Sohlensicherungen und den Erdbau der Verkehrsträger Straße, Schiene, Wasserstraße, Stand: 21.03.2024 (Gelbdruck)

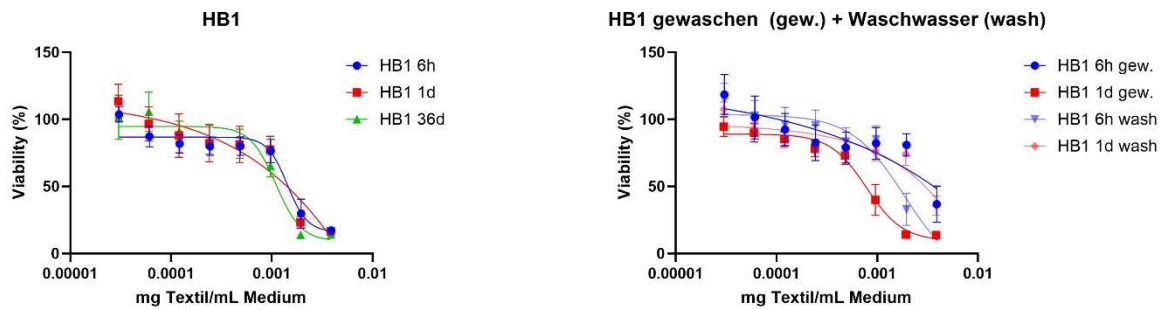


Abbildung 2: Ergebnisse MTT Assay für verschieden lange Elutionszeiträume der Probe HB1 (bioabbaubares Textil von Hüsker auf Viskosebasis) links und der Vergleich mit vor Elution gewaschenen Proben (min in Wasser) rechts.

Der micro-EROD Tests wurde nach dem Protokoll in Schiwy et al. (2015) mit der H4IIE-Zelllinie durchgeführt. Die höchste Konzentration wurde durch die vorher untersuchte Cytotoxizität festgelegt. Falls keine Cytotoxizität vorlag, wurde die empfohlene Höchstmenge von 0,1% DMSO angewendet. Die Auswertung erfolgte durch Errechnung von Toxizitätsequivalenten anhand des bekannten Standards 2,3,7,8-TCDD, also der relativen Aktivität. Es wurde in diesen Tests keinerlei Induktion der Proben detektiert.

Der akute Daphnientest wurde anhand der OECD Guideline 202 durchgeführt. Dafür wurden jeweils 5 Daphnien in 10mL Expositionsmedium inkubiert und nach 24h und 48h auf ihre Immobilität getestet, bevor der Test terminiert wurde. Für das Screening bei Höchstkonzentration von 0,05% DMSO wurden 4 technische Replikate an 3 Testtagen angesetzt. Für das Screening wurden zusätzlich zu 7 zufällig ausgewählten Prozesskontrollen alle Proben in jeweils 6h, 1d und 36d Elutionsstadium untersucht. Auffällige Proben wurden anschließend in einer Konzentrationsreihe untersucht, um toxische Kennwerte zu ermitteln (z.B. NOEC, LOEC, LC50). Auch hier zeigten sich erhöhte Toxizitäten bei Exposition mit dem Viskose Textil. Die Vermutung, dass Produktionsöle verantwortlich sind, wurde durch Wiederholung der Prüfung nach Waschung entkräftet, wie auch in Graph 3 ersichtlich.

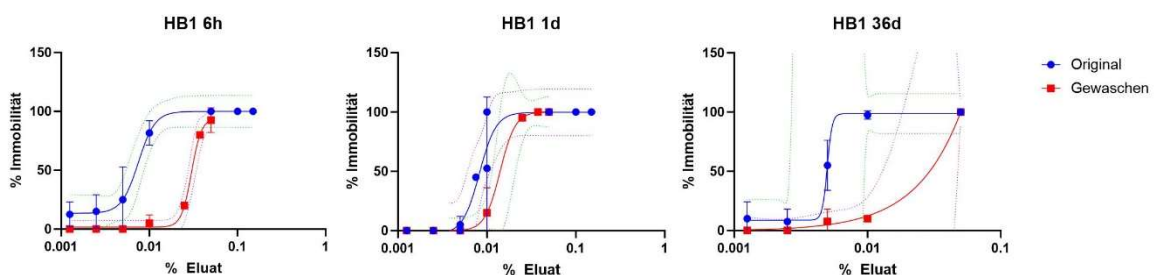


Abbildung 3: Ergebnisse akuter Daphnientest nach 48h Exposition für verschieden lange Elutionszeiträume der Probe HB1 (bioabbaubares Textil von Huesker auf Viskosebasis)

Übergeordnetes Fazit: Eluate der Viskosetextilien zeigen Anzeichen erhöhter Toxizität.

Einflüsse der Geotextilien auf die Bodenrespiration, den pH-Wert des Bodens, sowie die zentralen Nährstoffkreisläufe von Phosphor, Stickstoff und Kohlenstoff im Boden wurden angelehnt an ISO 20130:2018, ISO 15685:2020, OECD 217 und Zhao et al. (2021)² untersucht. Die Textilien wurden mit den Erdproben über einen Zeitraum von 16 Wochen in Mesokosmen inkubiert. Die Probenahme erfolgte nach 1; 2; 4; 8 und 16 Wochen. Die Bodenrespiration wurde anhand des emittierten CO₂ mittels Gaschromatographie gemessen. Die Ermittlung von Einflüssen auf den Phosphor- (P) und Kohlenstoffkreislauf (C) im Boden erfolgten mittels Enzymtests (P: saure Phosphatase (PAC); C: β -

² Zhao, T; et al. (2021). "Microplastics Increase Soil pH and Decrease Microbial Activities as a Function of Microplastic Shape, Polymer Type, and Exposure Time". Front. Environ. Sci., Vol. 9.

Glucosidase, Cellobioside). Nach 16 Wochen wurden die Enzymtests zusätzlich mit den inkubierten Substraten durchgeführt, um Rückschlüsse auf einen mikrobiellen Bewuchs durch erhöhte Enzymaktivitäten zu ziehen. Die Stickstofftransformation wurde ebenfalls am Ende der Inkubationszeit nach 16 Wochen gemessen. Um Änderungen der mikrobiellen Zusammensetzung im Boden zu erörtern, wurden nach vier Wochen Mikrobiomproben entnommen.

Eine erhöhte Bodenrespiration, Veränderung des Boden-pH-Wertes und erhöhte Enzymaktivität an den Substraten nach 16 Wochen konnte im Fall des biologisch abbaubaren Viskosetextils und beider degradierbarer Vegetationsschutz-Textile festgestellt werden (s. Abb. XXX). Eine Erhöhung des Boden-pH-Wertes, der potenziellen Nitrifikationsrate (PNR) nach 16 Wochen Inkubationszeit, sowie eine temporär erhöhte PAC- und β -Glucosidase-Aktivität im Boden nach 14 Tagen wurde für das degradierbare PET festgestellt. Veränderungen des Bodenmikrobioms im Vergleich zum Referenzboden konnten im Falle beider degradierbarer Vegetationsschutz-Textile (Neisser PLA NP; Neisser PLA NS) anhand einer veränderten Beta-Diversität festgestellt werden (s. Abb. XXX). Im Falle der weiteren getesteten Substrate konnten keine wesentlichen Veränderungen des Bodenmikrobioms im Vergleich zum Referenzboden festgestellt werden.

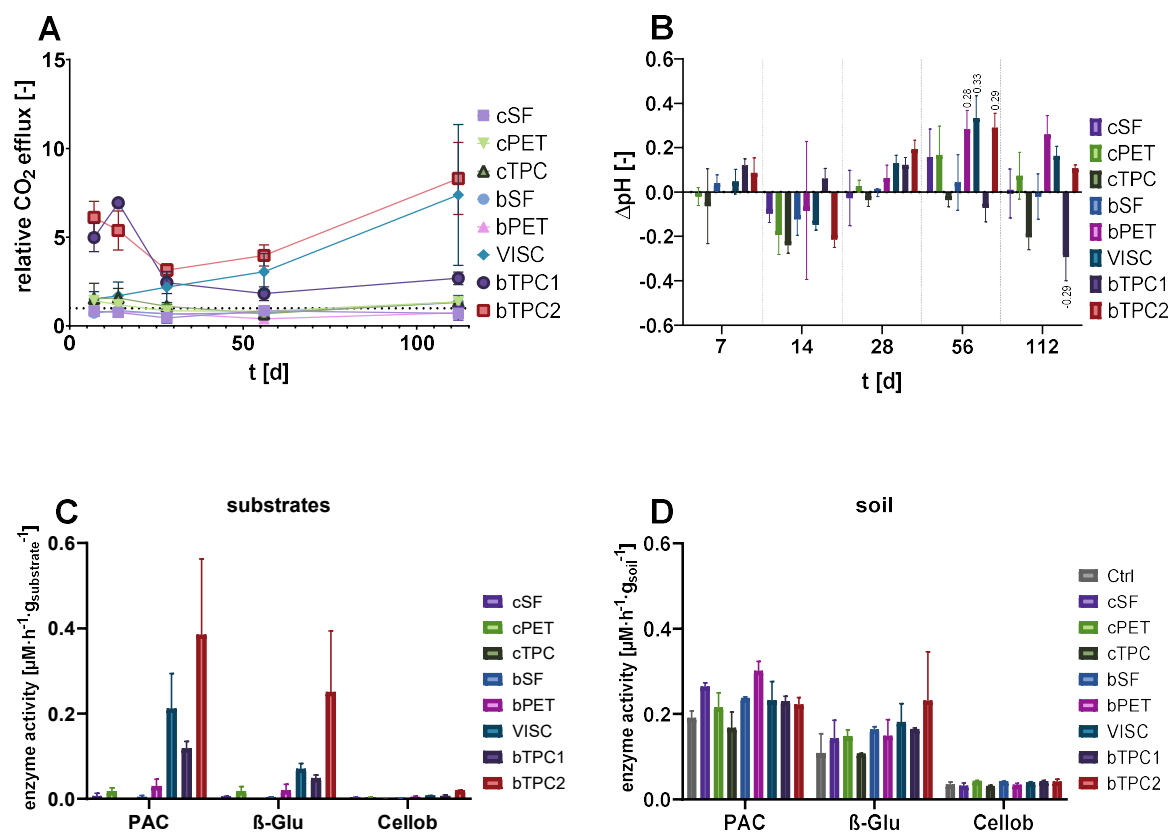


Abbildung 4: Relative Bodenrespiration (A) und Änderungen des pH-Wertes (B) über den gesamten Inkubationszeitraum, sowie die Enzymaktivität an den Substraten (C) und im Boden (D) nach 16 Wochen. cSF – konventionelles Abstandsgewirk; cPET – konventionelles PET-Textil; cTPC – konventionelle Baumschutzhülle; bSF – biobasiertes Abstandsgewirk; bPET – degradierbares PET; VISC – Viskosetextil; bTPC1/2 – degradierbare Vegetationsschutz-Textile

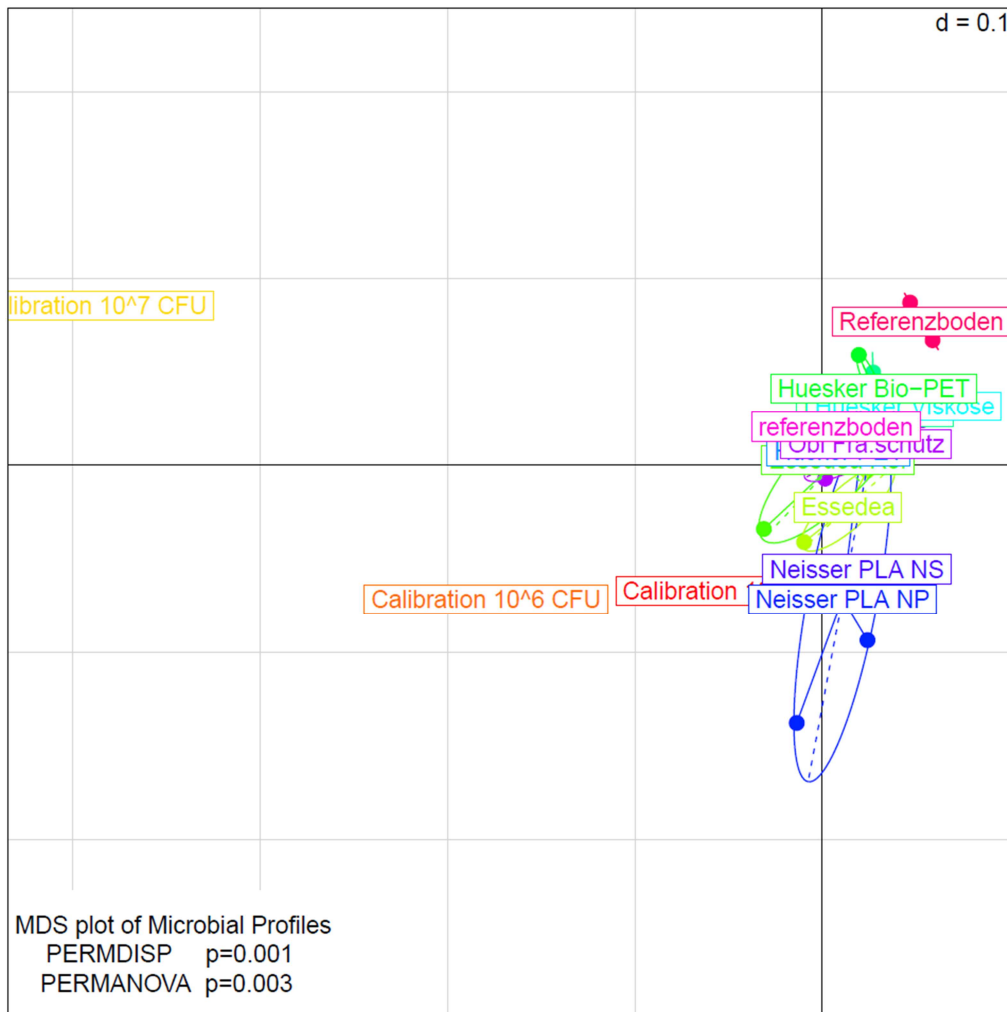


Abbildung 5: Darstellung der Betadiversität des Bodenmikrobioms mittels multidimensionaler Skalierung (MDS)

Übergeordnetes Fazit: Im Vergleich zu den konventionellen Substraten, verursachen die getesteten biologisch abbaubaren Textilien Veränderungen in der Bodenrespiration, den Nährstoffkreisläufen und des pH-Wertes im Boden.

Arbeitspaket 4 - Gebrauchseigenschaften im Bodenkontakt

Zum Abbilden der Gebrauchseigenschaften im Bodenkontakt und des oberen und unteren Spektrums der Bodeneigenschaften wurden ein Kiesboden sowie ein Mutterbodengemisch verwendet. Es ist ein deutlich unterschiedliches Abbauverhalten zu erwarten. Die beiden Bodenarten wurden aus dem Tagebau an der Stelle entnommen, an der die Großdemonstratoren aufgebaut werden (siehe AP 5). Es wurden Versuche in Form von Ausziehversuchen aus definiert verdichtetem und belastetem Boden am Referenzmaterial und an neuem und gealtertem degradierbaren Textil durchgeführt. Die Versuche wurden zunächst an Referenztextilien zur Optimierung der Textilgeometrie durchgeführt. Im Anschluss wurden die Versuche an degradierbaren Textilien in unterschiedlichen Abbauzuständen wiederholt.

Entwicklung der mechanischen Festigkeit des Textils: Um eine Referenz zum Degradationsverhalten aufzubauen, wurden Baumwollproben in den Versuchsböden eingelagert. Die Lagerbedingungen sind A Naturbelassen; B Schotter; C Lehm (mit Drainage), D Lehm + 3% Kompost; E Lehm + 6%Kompost; F Lehm + 10%Kompost; G Lehm (ohne Drainage) Verfahren zur Bestimmung der mikrobiologischen Beständigkeit durch einen Bodeneingravingsversuch; die Zugversuche werden nach DIN EN ISO 13934 durchgeführt. Die Hauptabweichung liegt in der freien Prüflänge zwischen den Klemmen, die auf 50 mm reduziert ist. Die Probenbreite betrug 50 mm. Die Prüfungen wurden auf einer Zugprüfmaschine unter Normklima-Bedingungen nach DIN EN ISO 139 durchgeführt. Die Einspannlänge in der Startposition betrug 50 mm bei einer Vorspannung von 5 N und einer Prüfgeschwindigkeit von 25 mm/min bis zu einer Kraftabschaltsschwelle von 75 % der Höchstlast. Die statistische Auswertung mit einem Signifikanzniveau von 0,05 zeigt einen statistisch signifikanten Unterschied nur zwischen dem

Neumaterial und der Serie B (Lagerung in Kies) sowie dem Neumaterial und der Serie G (Lagerung in Ton ohne Drainage). Basierend auf dieser Referenz wurden die Prüfungen im Rahmen von Grabungsversuchen am Bewehrungstextil wiederholt. Dazu wurden die Textilproben zwei Böden (Lehmboden und Sandboden) eingegraben und unter Realbedingungen unter konstanter Überwachung der Umgebungsbedingungen (Temperatur, Boden-Feuchte und Boden-pH) gealtert. In Regelmäßigen Abständen wurden Proben entnommen und prüftechnisch evaluiert. Dabei zeigte sich eine Abnahme der Höchstzugfestigkeit im weniger aktiven und weniger feuchte-rückhaltenden Sandboden von 30 % im Vergleich zur unbehandelten Referenzprobe. Im feuchteren und aktiveren Lehmboden wurde ein Festigkeitsverlust von 70 % der Ausgangsfestigkeit über einen Zeitraum von 8 Wochen ermittelt (vgl. Abb. 6).

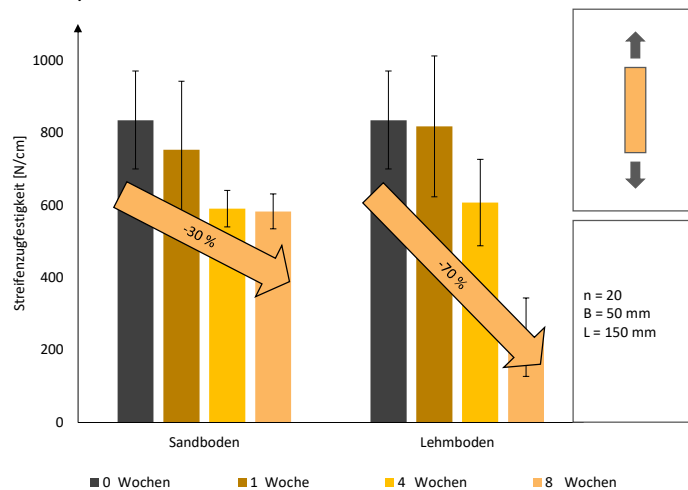


Abbildung 6: Entwicklung der Textilzugfestigkeit über 8 Wochen Grabungsversuche

Bewertung im Bodenkontakt

Um das Abbauverhalten der biobasierten und petrobasierten **Bewehrungstextilien** zu untersuchen, wurden diese für festgestellte Zeiträume im Boden vergraben. Insgesamt wurden acht Abbauprobungen in vier Holzbehältern mit jeweils zwei Kammern und unterschiedlichen Zeitintervallen durchgeführt. (siehe Abbildung 7). Die ursprünglich vorgesehenen Abbauprozesse von drei, sechs, zwölf und 24 Monaten wurden auf Grundlage der durch das ITA festgestellten schnelleren Degradationsrate auf drei, sechs und zwölf Wochen verkürzt.

Die Versuche wurden in zwei Gruppen eingeteilt: Die erste Gruppe bestand aus sechs Abbauständen in einem Sand-Kies-Gemisch. Hier wurden jeweils drei Lagen petro- und biobasierter Geotextilien untersucht, die über unterschiedliche Zeiträume abgebaut wurden. Ziel war es, das Abbauverhalten der Materialien unter ungünstigen Bedingungen im Sand-Kies zu vergleichen (Abbildung 7, oben) In der zweiten Gruppe wurden zwei Abbaustände untersucht, die ausschließlich biobasierte Geotextilien betrafen. Hierbei wurden drei Lagen in Sand-Kies und eine Lage in Mutterboden eingebaut. Ziel dieser Versuche war es, den Einfluss des Mutterbodens auf den Abbauprozess in den darunter liegenden Sand-Kies-Schichten zu bewerten (Abbildung 7, unten).

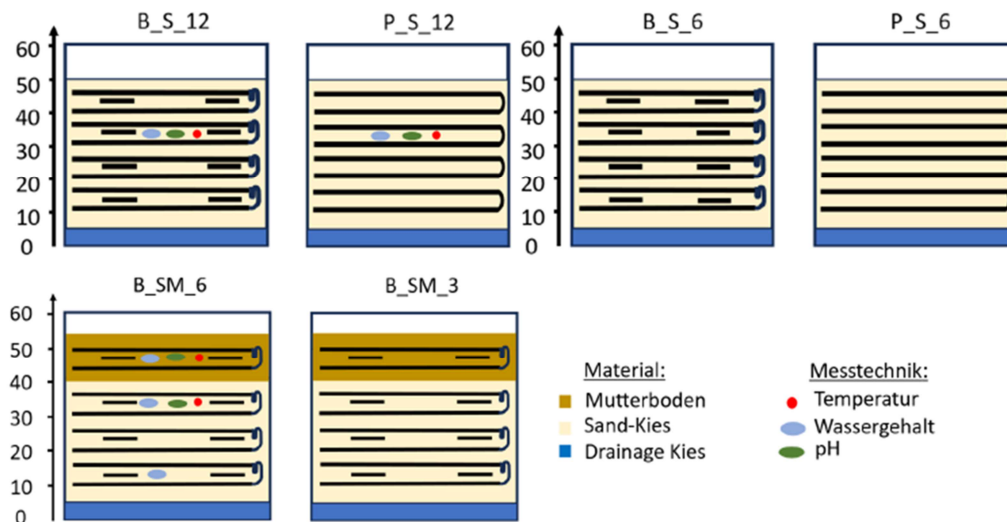


Abbildung 7. Darstellung der Aufbau der Abbauersuche

Der Laborversuchsstand wurde mit einer automatisierten Bewässerungssteuerung entwickelt. Dies ermöglicht die Simulation eines realitätsnahen Abbaus unter kontrollierten Bedingungen. Zur Bewässerung wurde aufgefangenes Regenwasser verwendet, um natürliche Bedingungen besser zu simulieren. Jeder Versuchsstand wurde einmal täglich bewässert.

Wichtige Parameter, wie pH-Wert, Wassergehalt und Bodentemperatur wurden durch integrierte Messgeräte kontinuierlich in den unterschiedlichen Bodenschichten gemessen (siehe Abbildung 8). Der pH-Wert in den Wassertanks, der durch Zugabe von Kohlensäure reguliert wurde, lag bei den meisten Messungen im gewünschten Bereich von pH 5 bis 6. Die Bereiche der optimalen Wassergehalte für eine bestmögliche biologische Aktivität des jeweiligen Bodentyps liegen bei 21 ± 2 % für den Mutterboden und bei 11 ± 2 % für das Sand-Kies-Gemisch. In den durchgeführten Versuchen lagen die Wassergehalte überwiegend im optimalen Bereich oder knapp darüber. Die anhand der Bodentemperatur-Sensoren gemessene Temperatur innerhalb des Bodens schwankt während der Zeit von 12 Wochen hauptsächlich in einem Bereich von etwa 20 bis 22 °C. Im Abbaustand mit Mutterboden (SM) sind die mittleren Temperaturen etwas höher als im Abbaustand mit Sand (S), was auf höhere Außen- und Raumtemperaturen bzw. auf Wärmefreisetzung in der Mutterbodenschicht zurückzuführen ist.



Abbildung 8. Einbau der Messtechnik in den Abbauersuchen

Nach den jeweiligen Abbauzeiten wurden Proben des intakten und des degradierten Geotextils mit verschiedenen Tests geprüft. Das ursprüngliche Versuchsprogramm wurde auf sieben verschiedene Tests erweitert, um die Leistungsfähigkeit und das Degradationsverhalten der Geotextilien umfassend zu bewerten. Es umfasst drei Arten von quantitativen Versuchen: mechanische Versuche zur Bestimmung der Eigenschaften des Textilmaterials (Zugfestigkeits-Dehnungstest) und geotechnische Versuche (Auszieh- und Scherversuche) zur Untersuchung der Wechselwirkung zwischen Textil und Boden. Ergänzend wurden vier Arten qualitativer Tests eingesetzt, darunter Schrumpf- und Gewichtsverlusttests sowie Strukturuntersuchungen (REM, IR) des Fraunhofer UMSICHT. Insgesamt wurden 94 Versuchsreihen mit einer unterschiedlichen Anzahl von Einzelversuchen durchgeführt. Damit konnte eine erste Abschätzung der Leistungsfähigkeit des biobasierten Viskosegeotextils im Hinblick auf Degradation und Bewehrung im Vergleich zum petrobasierten PET-Geotextil vorgenommen werden.

Das Ziel der Herausziehversuch (Pull-out Test) war den Herausziehewiderstand zwischen Boden und Geokunststoff zu bestimmen. Bei diesem Verfahren wird das Geokunststoff zwischen zwei Bodenschichten eingebettet. Zur Durchführung des Versuchs wird auf die obere Bodenschicht eine normale Druckspannung und auf den Geokunststoff eine horizontale Kraft aufgebracht. Die Kraft, die erforderlich ist, um den Geokunststoff aus dem Boden herauszuziehen, wird gemessen und aufgezeichnet.

Aus den Versuchsergebnissen konnte festgestellt werden, dass das biobasierte Geotextil im Vergleich zu den petrobasierten Materialien eine geringere Leistungsfähigkeit zeigte, dies aufgrund eines sehr hohen Festigkeitsverlustes, einer starken Schrumpfung und einer hohen Wasseraufnahme, die zu einer hohen Degradationsrate führen. Nach mehrwöchiger Vergrabung sank die Zugfestigkeit um mindestens 85 %, was die Eignung für temporäre geotechnische Anwendungen mit hohen Festigkeitsanforderungen einschränkt. Trotz der hohen Abbauraten bleibt das Verbund- und Scherverbundverhalten, gemessen an den Herausziehewiderständen und Scherparametern, relativ stabil und scheint vom Abbauprozess wenig beeinflusst zu werden. Trotz hoher Abbauraten bleibt das Verbund- und Scherverhalten stabil, und nach langer Abbauzeit übertreffen die Herausziehewiderstände die Zugfestigkeiten, was eine hohe Leistungsfähigkeit des Verbunds zeigt (Abbildung 9). Die Bewertung der Interaktion von Geotextil und Boden durch die Bestimmung der Reibungs- und Verbundbeiwerte mithilfe des Herausziehversuchs war eingeschränkt, da die Dehnungen der Geotextilien aufgrund des viskoelastischen Schrumpfens nicht korrekt ermittelt werden konnten.

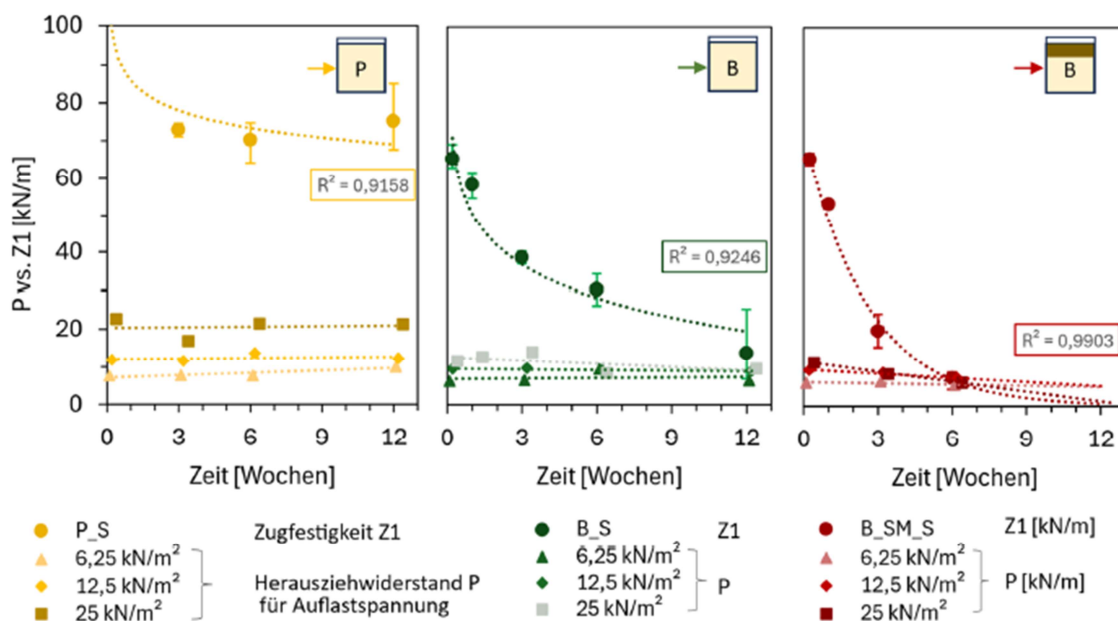


Abbildung 9: Vergleich des Herausziehewiderstands und der Zugfestigkeit (Petrobasiert, biobasiert im Sand, und biobasiert im Sand+Mutterboden).

Bei der REM-Untersuchung (*Fraunhofer Umsicht*) der degradierten Geotextilien konnten auf den biobasierten Textilien Fäden erkannt werden, die auf Pilzhyphen hinweisen. Diese sind vermutlich für die Biofragmentierung des Viskosegeotextils im Sand-Kies verantwortlich. Die im Mutterboden vergabten Textilien wurden wahrscheinlich durch Bakterien an fragmentiert, erkennbar an den Löchern. Es ist möglich, dass neben der enzymatischen Hydrolyse zusätzlich ein enzymatisch oxidativer Abbau stattgefunden hat.

Das Schrumpfmaß des biobasierten Gewebes liegt im erwartbaren Bereich von 20 bis 30 % in Hauptzugrichtung und ist vergleichbar mit dem der Fasern von 30 %, übertrifft jedoch die Standardwerte für Viskose. Im intakten Zustand weisen die biobasierten Geotextilien eine hohe Dehnungsrate von etwa 60 % auf. Dies ist teilweise auf das hohe Schrumpfverhalten zurückzuführen, welches die tatsächliche Dehnung des Materials verfälscht, da das Schrumpfen unter Zugbelastung weitgehend reversibel erscheint.

Übergeordnetes Fazit AP 4: Das biobasierte Geotextil zeigt aufgrund hoher Schrumpfung, Wasseraufnahme und Festigkeitsverluste eine begrenzte Eignung für temporäre geotechnische Anwendungen mit hohen Festigkeitsanforderungen. Der Verbund- und Scherwiderstand bleibt trotz Abbaus stabil, was auf eine gewisse Robustheit des Materials in diesen Aspekten hinweist.

Arbeitspaket 5 - Entwicklung und Umsetzung Großdemonstrator

Als Großdemonstrator der **Anwendung Vegetationsschutz** (vgl. Abb. 10) wurden Baumschutzhüllen unter Realbedingungen eingesetzt. An zwei in Bezug auf Feuchte, Sonneneinstrahlung und umgebende Vegetation unterschiedlichen Standorten wurden auf dem Gelände des Forschungszentrums Jülich je 6 Hüllen aufgebaut. Der erste Standort befand sich auf einer gepflegten Wiesenfläche unter direkter Sonneneinstrahlung und ungeschützt vor Niederschlag und Wind. Der Kontakt zur Umgebung beschränkt sich auf den unteren Bodenkontakt. Der zweite Standort befand sich in einem Waldstück mit einem Abstand von 1-1,5 m zum nächsten ausgewachsenen Baum. Die Hüllen waren vor Sonneneinstrahlung, direktem Niederschlag und Windböen geschützt. Durch die Höhe des umgebenden Bodengewächses bestand direkter Kontakt zur Umgebung bis zu einer Höhe von 15-20 cm.

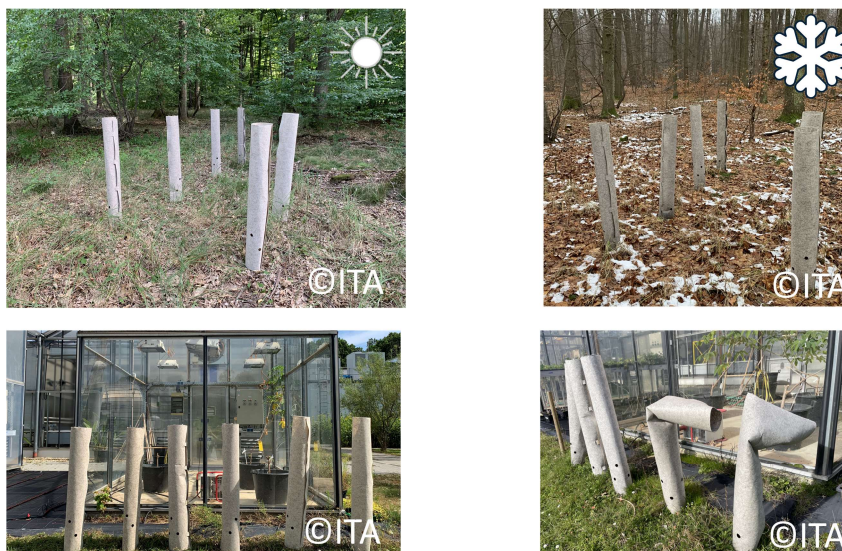


Abbildung 10: Großdemonstrator Vegetationsschutz

Großdemonstratoren im **Bereich der Bewehrung und des Erosionsschutzes** wurden in Abstimmung mit RWE auf dem Tagebaugelände Hambach geplant (vgl. Abb. 11). Ziel war die Umsetzung von zwei Großdemonstratoren, einem unbefestigten Straßenabschnitt und temporären Böschungen aus bewehrter Erde. Die Böschung wurde mit den Maßen 15 m Länge, 5 m Höhe und 10 m Breite geplant. Die Steigung sollte einen Winkel von 45° aufweisen. Der Straßenabschnitt sollte mit 4 m Breite und 21

m Länge errichtet werden. Die Position wurde so gewählt, dass neben PKW auch LKW-Verkehr zu erwarten war, jedoch Spitzenlasten (z.B. Muldenkipper) nicht auftraten. Auf Grund Verzögerungen zu Beginn, die sich durch die Projektlaufzeit fortsetzten, war die Realisierung der Großdemonstratoren im Rahmen der Projektlaufzeit nicht erfolgreich.

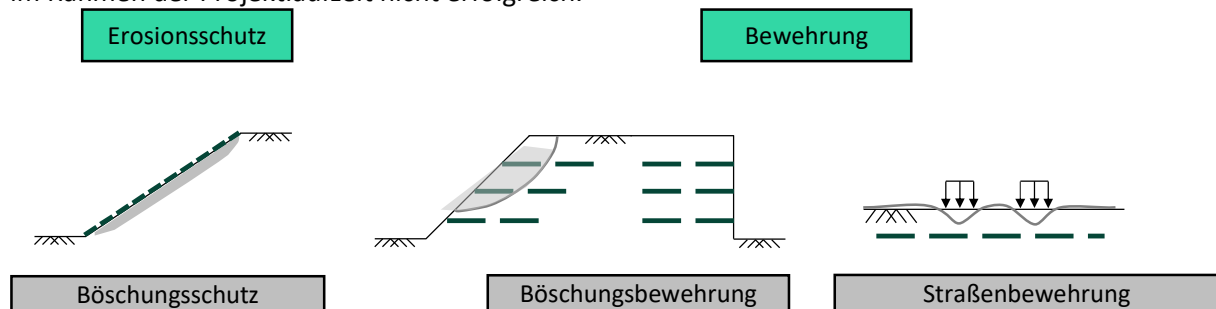


Abbildung 11: Geplante Großdemonstratoren - Schemazeichnung

Als Alternative wurde für den Erosionsschutz ein portabler Demonstrator entwickelt. Dieser besteht in einem reduzierten Böschungsaufbau auf einer Grundfläche von 50 x 50 cm (vgl. Abb. 12)



Abbildung 12: Portabler Kleindemonstrator – Erosionsschutz

Darüber hinaus wurde ein Kleindemonstrator zur Illustration des Abbauverhaltens im Einsatz entwickelt (vgl. Abb. 13). Hier kann durch das Einlegen unterschiedlich degradierter Bewehrungssysteme anschaulich der Abbau der Tragfähigkeit dargestellt werden.

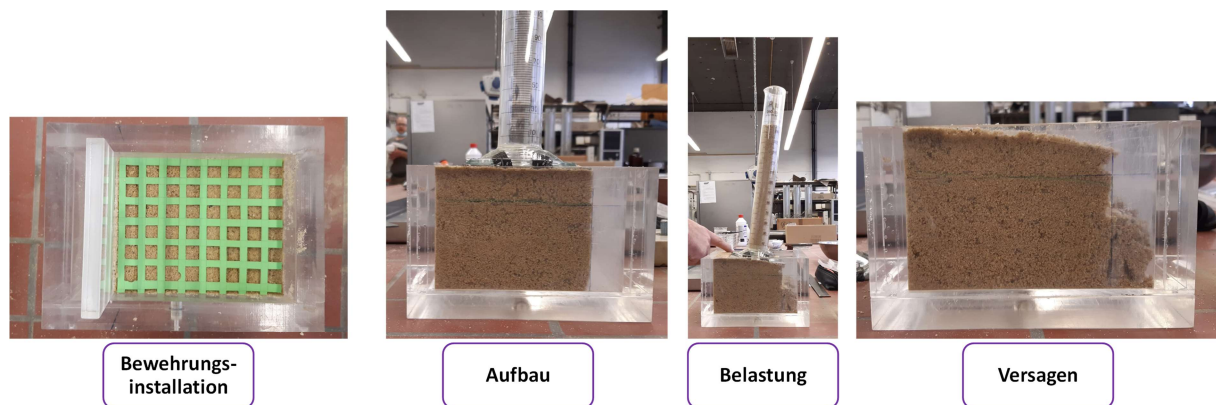


Abbildung 13: Kleindemonstrator - Tragverhalten im Abbau

Arbeitspaket 6 - Entwicklung Bewertungs- und Entscheidungstool

Ziel des Arbeitspaketes war es eine Entscheidungsgrundlage auf Basis von ökologischen, technologischen und wirtschaftlichen Aspekten zu erarbeiten. Für die ökologische Bewertung der biobasierten/bioabbaubaren Materialien wurden Ökobilanzen durchgeführt. Der Vergleich mit petrochemischen Vergleichsprodukten soll Potentiale und Defizite der Nutzung biobasierter/bioabbaubarer Materialien offenlegen. Einzig wurde das biologisch abbaubare Vlies ohne ein petrochemisches Vergleichsprodukt untersucht, da keines vorhanden war. Für die Untersuchung wurden Ökobilanzen nach der DIN EN ISO 14040 und 14044 durchgeführt. Dieses Vorgehen gibt vier Arbeitsschritte zur Durchführung von Ökobilanzen vor. Zunächst wird das Ziel und der Untersuchungsrahmen festgelegt, darauf folgt die Sachbilanz, dann die Wirkbilanz und abschließend eine Auswertung.

Zu Beginn hat eine Recherche zur LCA-Bewertung der Ökotoxizität und des Einflusses der Textilien am Lebensende auf die Umwelt ergeben, dass für die Beurteilung keine Standards herangezogen werden können. Forschende beschäftigen sich zudem eher mit dem Einfluss von biologischen Abbauprodukten im Wasser als an Land. Eine Integration von Ergebnissen aus ökotoxikologischen Untersuchungen in LCAs wurde bisher nicht durchgeführt. Ein Kurz-Workshop im September 2022 half bei der Eingrenzung des gewünschten Untersuchungsrahmens (Phasen, Materialien und Bodenqualität für die biologische Bewertung des Lebensendes) und diente der ersten Einschätzung der Datenverfügbarkeit zu Produktionsdaten bei HUESKER, Essedea und Neisser. In den Untersuchungsrahmen der Ökobilanzen fällt die Herstellung der Geotextilien und deren ökotoxikologische Wirkung nach der Implementierung in den Boden. Dies entspricht einer cradle-to-grave Betrachtung. 1 m² Textil als funktionelle Einheit wird in den Ökobilanzen genutzt. Die Ergebnisse der Ökobilanzen sollten übergeordnet dem Vergleich und Abschätzung der ökologischen Einflüsse zwischen biologisch abbaubaren und konventionell petrochemischen Geotextilien dienen. Darüber hinaus sollte eine Hotspot-Analyse dazu dienen, die Lebensphasen des Geotextils zu identifizieren, welchen den größten ökologischen Einfluss haben. Diese Erkenntnisse des Vergleichs und der Hotspot-Analysen sollen genutzt werden, um Handlungsempfehlungen für den Einsatz und die Herstellung eines ökologischeren Produkts definieren zu können.

In der **Sachbilanz** wurden Stoff- und Energieströme identifiziert und Datenquellen ermittelt. Für die Modellierung der Stoff-, Energie- und Emissionsströme in der Faser- bzw. Filamentherstellung wurden Sekundärdaten verwendet und Primärdaten in Form von Energieverbräuchen und Verschnitt der Geotextil-Hersteller für die Abbildung der Herstellung der textilen Flächen (Siehe Tabelle 1). Die Sekundärdaten der Datenbanken wurden analysiert und bestmöglich auf die betrachteten Anwendungsfälle angepasst. Wodurch der Strommix für die Produktion der synthetischen Filamenten auf hiesige Standorte bezogen wurde.

Tabelle 1: Übersicht der Datenquellen bezogen auf die Lebensphasen der Geotextilien

Lebensphasen		Datenquelle
Rohstoffgewinnung		Datenbank & Literatur
Produktion	Faser- und Filamentherstellung	Datenbank & Literatur
	Produktion der textilen Fläche	Projektpartner
Zersetzung		Biologische Institute
Allgemeine Daten		Datenquelle
Strommix		Datenbank

Als Betrachtungsmethoden wurden die ReCiPe 2016 auf Midpoint-Level und die Methode Cumulative Energy Demand (CED) verwendet. ReCiPe 2016 v1.1 bietet mit 18 Midpoint-Wirkungskategorien eine detaillierte Übersicht der Umweltauswirkungen, ist eine ausführlich beschriebene und häufig verwendete Betrachtungsmethode. Midpoint-Charakterisierungsfaktoren beziehen sich auf Potenziale einzelner Umweltkategorien, wie z.B. Treibhauseffekt, Wasserverbrauch oder Versauerung. Mithilfe der CED-Methode können die Energien, aller Prozessschritte und

Ressourcen kumuliert werden. Im Vergleich der ReCiPe Midpoint-Methode spiegeln die Ergebnisse keine Auswirkungen auf die Umwelt wider, sondern belegen wieviel der Energieressourcen verwendet werden. Der Energieverbrauch ist in Ökobilanzen einer der am häufigsten verwendeten Indikatoren und dient für Vergleiche mit Literaturwerten.

Der Versuch die Ergebnisse der ökotoxikologischen Analysen zu den Auswirkungen des Abbauprozesses der Materialien direkt in die Ökobilanzen zu implementieren ist auf Grund der Prozessabläufe der verwendeten Wirkabschätzungs-Methode nicht realisierbar gewesen. Im Gegensatz zu den Wirkungskategorien der ReCiPe 2016 v1.1, die potenziellen Folgen von Emissionen zusammenfassen, spiegeln die Ergebnisse der ökotoxikologischen Untersuchungen bereits eine Folge bzw. einen Schaden wider. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse der Ökobilanzen durch die ökotoxikologischen Untersuchungen ergänzt und gestützt, sodass mit deren Hilfe die ökologischen Auswirkungen der End-of-Life-Szenarien abgebildet werden können.

Im Folgenden sind die Ergebnisse der **Wirkbilanzen** für die drei Geotextilarten beschrieben und zusammengefasst.

- Bei dem **Vergleich der Abstandsgewirke** aus PES und PLA sind dem PLA-Produkt in 14 der 18 Wirkungskategorien geringere Umweltwirkungen nachzuweisen. Das ist vor allem mit der Materialeinsparung von 38 % im Vergleich zu dem PES-Abstandsgewirk zu begründen. Einen negativen Einfluss hat allerdings die Landwirtschaft in der Rohstoffgewinnung von PLA. Der Einsatz von Dünger, welcher zu einer Versauerung der Umwelt führt und die hohe Land- bzw. Wassernutzung wird durch die Ökobilanz verdeutlicht. Darüber hinaus belegen die ökotoxikologischen Tests, dass keine signifikant toxischen Wirkungen der Abstandsgewirke im Boden nachzuweisen sind.
- Das Ergebnis des **Vergleichs der Gewebe** ist, dass die Anwendung des biologisch abbaubaren Geotextils aus Viskose in 15 der 18 Wirkungskategorien negativere Umweltauswirkungen aufweist als die des PES-Geotextils. Das um 50 % höhere Flächengewicht des Viskose-Gewebes bedingt die höher ausfallenden Umweltwirkungen im Vergleich zu dem PES-Gewebe. Der Anbau des Holzes, welcher in den Datensätzen hinterlegt ist, und die Produktion zur Gewinnung der Viskose-Filamente sind maßgebliche Treiber, die einige der Wirkungskategorien negativ beeinflussen. Zusätzlich hat der Einsatz des Viskose-Gewebes nachweislich toxischen Einfluss auf Mikroorganismen, wie der Immobilitätstest mit Daphnien belegt. (Verweis auf das Kapitel von Antonia). Die weiteren ökotoxikologischen Untersuchungen beider Materialien sind unauffällig.
- Die **Ökobilanz des Vlieses** belegt erklärbare Umweltwirkungen. Die Schafhaltung setzt große Mengen an Treibhausgasen frei. Die Landwirtschaft zur Produktion von Futtermittel, der Hanffasern und des Mais für die PLA-Produktion führen zu Einflüssen auf die Land- und Wassernutzung und die Versauerung. Der erhöht gemessene CO₂-Gehalt ist Indikator für den Beginn des biologischen Abbaus. Die ökotoxikologischen Untersuchungen lassen keine Rückschlüsse auf toxischen Wirkungen ziehen.

Der Energieverbrauch kann als Indikator für Umweltbelastungen verwendet werden. Die Umweltauswirkungen korrelieren oftmals mit dem Energieverbrauch, da ein Großteil auf die Emissionen zu der Stromerzeugung zurückzuführen sind. Die genauen Auswirkungen auf die Umwelt müssen in Verbindung mit dem genutzten Strommix herausgefunden werden. Grundsätzlich gilt jedoch, dass in den betrachteten Fällen die Einflüsse auf die Umwelt reduziert werden können, wenn der Energiebedarf verringert wird. Der Vergleich der Energieverbräuche der konventionell petrochemischen und biologisch abbaubaren Produkte bei gleichen Flächengewicht wurden gegenübergestellt (siehe Abbildung 14). Der kumulierte Energieverbrauch von PES ist höher als der von PLA, aber nur geringfügig größer als der von Viskose. Größer fällt hingegen der Energieverbrauch der Schurwolle, Hanf, PLA-Mischung des Vlieses aus. Im Fall des Gewebes führt die Notwendigkeit von einer größeren Menge des biologisch abbaubaren Materials aufgrund verzeichnenden Abbaus des Materials und gleichzeitiger Funktionserfüllung über einen festgelegten Zeitraum zu einem höheren

Energieverbrauch im Vergleich zu konventionellen Geotextilien. Um die ökologischen Einflüsse eines Textils umfassend abschätzen zu können, ist die genaue Auslegung auf den spezifischen Anwendungsfall in Bezug auf die Materialmenge von entscheidender Bedeutung.

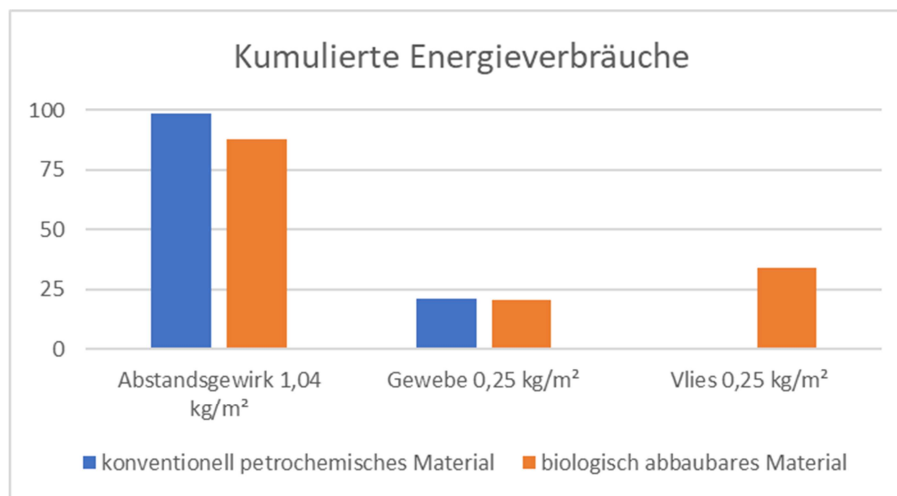


Abbildung 14: Kumulierte Energieverbräuche zur gesamten Herstellung der Geotextilien aus biologisch abbaubaren im Vergleich zu petrochemischem Material bei gleichen Flächengewicht

Zusammenfassung der Ergebnisse:

Eine grundsätzliche Aussage über den ökologischen Einsatz der biologisch abbaubaren Geotextilien kann nicht getroffen werden. Wie die Ergebnisse der Arbeit belegen, müssen die Umweltbelastungen individuell für den zu betrachtenden Fall analysiert und verglichen werden. Wodurch unterschiedliche Schlussfolgerungen zustande kommen können.

Bei biobasierten Polymeren hat die Art der Landwirtschaft einen entscheidenden Einfluss. Der Einsatz von Dünger und die Art von Futter für die Viehhaltung bestimmen die Auswirkungen einiger Wirkungskategorien maßgeblich. Die nachfolgende Abbildung 15 dient zur Übersicht über den ökologischen Einfluss biologisch abbaubarer Materialien, welche in Geotextilien Verwendung finden. Die Angaben der für die Herstellung der Filamente oder Fasern benötigte Energie variieren um bis zu 30%. Mit der Auswahl der Zulieferer können die Umweltwirkungen stark beeinflusst werden, da sie mit bis zu 99 % den größten Anteil am Energiebedarf der Geotextilherstellung ausmachen. Somit können die Hersteller der Geotextilien den größten ökologischen Einfluss mit der Wahl ihrer Zulieferer der Filamente ausüben.

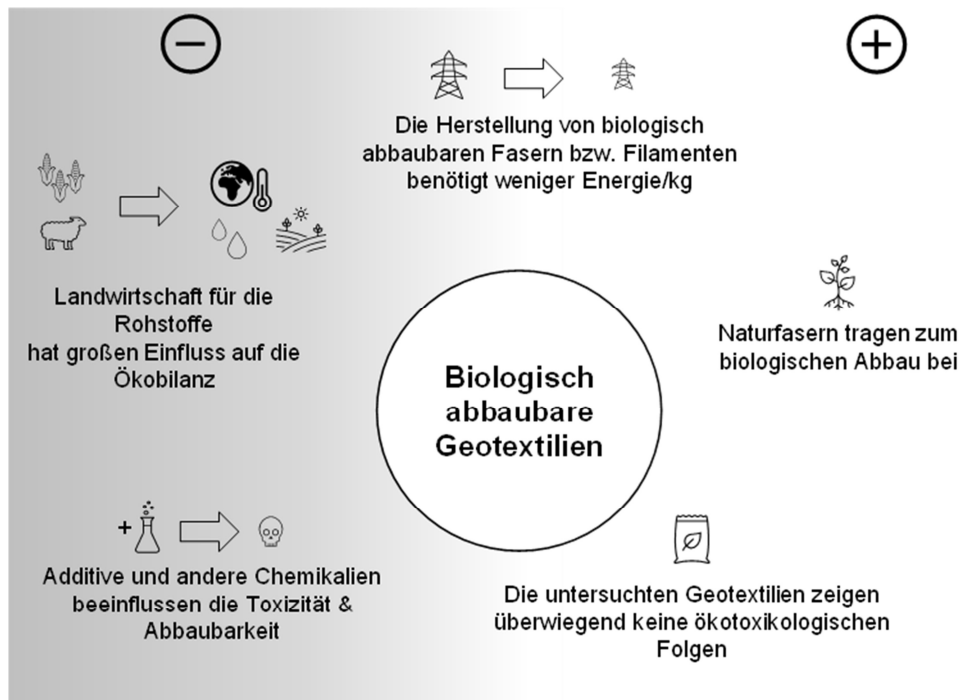


Abbildung 15: Übersicht über die der untersuchten biologisch abbaubaren Geotextilien auf die Umwelt

Die Modelle der Ökobilanzen stellen eine bestmögliche Annäherung an die tatsächlichen Herstellungsprozesse dar. Die Komplexität und Vielzahl der verwendeten Daten und Annahmen bedingen eine gewisse Unsicherheit und Variation der Ergebnisse. Die **Sensitivitätsanalyse** dient der Quantifizierung der Unsicherheiten sowie der Identifikation von Parametern, die einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse ausüben. Die Ergebnisse der Untersuchung legen nahe, dass die Energieverbräuche bei der Produktion sowohl von biologisch abbaubaren als auch von petrochemischen Filamenten einen signifikanten Einfluss auf die Umweltwirkungen haben. Daher wurde eine Parametervariation der Energieverbräuche durchgeführt, um eine präzisere Einschätzung des Einflusses auf die ökologischen Folgen zu ermöglichen. Durch die Berücksichtigung von maximalen und minimalen Werten für den Energieverbrauch bei der Herstellung der Filamente konnte der potenzielle Einfluss dieser Schwankungen auf die Umweltwirkungen quantifiziert werden. Die durchgeführte Analyse hat ergeben, dass die Angaben zum Energiebedarf für die Produktion der Filamente oder Fasern eine Spannbreite von bis zu 30 % aufweisen können. In Anbetracht dessen, dass der Energiebedarf für die Produktion von Geotextilien bis zu 99 % des gesamten Energiebedarfs bei der Herstellung von Geotextilien ausmacht, hat die Auswahl der Zulieferer einen entscheidenden Einfluss auf die ökologischen Auswirkungen. Der Energieverbrauch kann dabei als wichtiger Indikator für die Umweltbelastungen betrachtet werden. Die Korrelation zwischen den Umweltauswirkungen und dem Energieverbrauch ist grundsätzlich hoch, da mit höheren Energieverbräuchen in der Regel auch höhere Emissionen und damit größere Umweltbelastungen einhergehen. Die genauen Auswirkungen auf die Umwelt sind jedoch nicht allein vom absoluten Energieverbrauch abhängig, sondern auch von der Zusammensetzung des für die Energieversorgung genutzten Strommixes. Eine Reduktion der Umweltauswirkungen kann folglich durch eine Verringerung des Energiebedarfs oder die Nutzung eines umweltfreundlicheren Strommixes erzielt werden.

Die Art der Landwirtschaft übt einen entscheidenden Einfluss auf die Ökobilanz aller biologisch abbaubaren Materialien aus. Der Einsatz von Düngemitteln stellt dabei einen wesentlichen Faktor dar, der die Umweltbilanz der auf landwirtschaftlichen Rohstoffen basierenden Produkte maßgeblich beeinflussen kann. Die Verwendung unterschiedlicher Düngemittel kann zu signifikanten Unterschieden in den betrachteten Wirkungskategorien führen, beispielsweise hinsichtlich der Eutrophierung von Gewässern, des Treibhauspotenzials oder der Versauerung der Böden. Die Auswahl des Düngemittels wirkt sich auf die Menge der Nährstoffeinträge in die Umwelt, die Art der Emissionen sowie die Energieintensität der Düngemittelproduktion und -anwendung aus. Hinsichtlich der Art der

Landwirtschaft, welche für die Erzeugung der Rohstoffe, Futtermittel und Viehhaltung der verwendeten Materialien verantwortlich ist, konnten keine Informationen eruiert werden.

Neben der ökologischen Bewertung des Einsatzes von biologisch abbaubaren Filamenten in Geotextilien erfolgt zudem eine technologische sowie wirtschaftliche Bewertung.

Die Verarbeitung von PLA zu einem Abstandsgewirk erweist sich, wie in diesem Projekt ersichtlich, als anspruchsvoll. Im Vergleich zu dem petrochemischen Vergleichsprodukt aus PES weist PLA eine geringere Festigkeit und zusätzlich eine Sprödigkeit auf. Diese Eigenschaften führen bei den prozessbedingten engen Radien beim Wirken zu Schwierigkeiten, da das Prozessfenster sehr klein ist. Im Vergleich zu PES verfügt PLA über eine geringere thermische, mechanische und chemische Stabilität, weshalb das Material sowohl im Prozess als auch in der Lagerung vor den genannten Einflüssen zusätzlich geschützt werden muss.

Bei der Verwendung von Viskose bei der Herstellung von Geweben ist ebenfalls auf die Einwirkung von Feuchtigkeit, UV-Strahlung und Hitze zu achten. Die Herstellung eines Gewebes ist anspruchsvoll an das Material, da die Fäden unter Spannung stehen und eine hohe mechanische Belastung vorliegt. Im Webvorgang kommt es unweigerlich zu Zug- und Reibungsbelastungen. Im Vergleich zu PES-Fasern neigen Viskosefasern zu einer höheren Anfälligkeit für Schäden. Um Schäden oder Fadenbrüche zu reduzieren, ist eine Reduzierung der Prozessgeschwindigkeit bei der Verarbeitung von Viskose erforderlich, da dies zu einer Verringerung der Belastung des Materials führt.

Im Rahmen der Produktion von Vliesstoffen aus PLA in Kombination mit den Naturfasern Baumwolle und Schurwolle sind im Vergleich zu einem reinen PET-Vlies zusätzliche Prozessschritte erforderlich. Diese fallen bei der Aufbereitung der Naturfasern, dem Mischen und Kardieren an. In der Regel ist eine Reinigung und/oder Entholzung der Naturfasern erforderlich. Um eine Homogenisierung der Naturfasern mit den synthetischen PLA-Fasern zu erreichen, ist ein Blending-Prozess erforderlich. Das Kardieren von Naturfasern kann ebenfalls zu Schwierigkeiten führen, da diese sich aufwendiger gleichmäßig verteilen lassen. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Verarbeitung der Biopolymere und Naturfasern zu Geotextilien mit einem höheren Aufwand verbunden ist.

Die Implementierung zusätzlicher Prozessschritte, die Berücksichtigung spezifischer Vorkehrungen oder die Reduzierung der Prozessgeschwindigkeit wirken sich ebenfalls auf die Wirtschaftlichkeit biologisch abbaubarer Materialien aus. Die Rohmaterialpreise von PLA und Viskose liegen grundsätzlich über jenen des PES. In Bezug auf PLA zeigen Literaturwerte eine Schwankungsbreite von 2,50 bis 5,00 €, während die entsprechenden Werte für PES zwischen 1,20 und 2,50 € liegen. Die Preise von Viskose bewegen sich in einer Spannbreite zwischen 1,8 und 3,5 €. Die Verwendung von Mehrmaterial bei den biologisch abbaubaren Geotextilien im Rahmen des Abbauprozesses dient der Gewährleistung der mechanischen Eigenschaften des Produktes für einen temporären Zeitraum, was eine zusätzliche Kostensteigerung zur Folge hat. Infolge der höheren Produktionskosten ist im individuellen Fall eine Verrechnung mit etwaigen ausbleibenden Entsorgungskosten durch den Verbleib der Geotextilien im Erdboden erforderlich. Die Wirtschaftlichkeit ist besonders in den Fällen zu sehen, wo eine Entsorgung eines nicht abbaubaren Geotextils verpflichtend wäre.

2. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Für die durchzuführenden Versuche war ein hoher zeitlicher, maschineller und finanzieller Aufwand entlang der gesamten textilen Wertschöpfungskette bei den unterschiedlichen Partnern notwendig. Die angestrebten Ergebnisse konnten aufgrund der Vielfältigkeit der Aufgaben nur vom Konsortium gemeinsam erbracht werden. Die am Vorhaben beteiligten Unternehmen, Institute und Forschungseinrichtungen waren wirtschaftlich nicht in der Lage, die erforderlichen Entwicklungen ohne Zuwendung zu realisieren. Aufgrund der hohe, auszugsweise im Nachfolgenden beschriebenen,

technischen und wirtschaftlichen Risiken wurde das Vorhaben erst durch die Zuwendung wirtschaftlich vertretbar:

- Hoher Druck/ Relevanz von nachhaltigen Gütern: Öffentliche Förderung befähigt schnelle Umsetzung des Entwicklungsvorhabens in marktfähige, anwendungsbereite Lösungen. (Wirtschaftlich)
- Prozessstabilität und -qualität entlang der Wertschöpfungskette: Die Verfügbarkeit und Eigenschaften der Ausgangsmaterialien stellen ein hohes Risiko dar. Möglicherweise lassen sich in den geplanten Entwicklungsschritten die Zieleigenschaften nicht erreichen. (Technisch/Wirtschaftlich)
- Herausfordernde Prozess-Skalierung auf Industriemaßstab: Durch die Förderung können die Institute durch intensive Technikums-Prozessentwicklung das Risiko der Skalierung senken. (Technisch)

Für die Planung und Durchführung der Versuche sowie fürs Projektmanagement und die Dokumentation wurden wissenschaftliche Mitarbeitende in einem begrenzten Zeitraum innerhalb der Projektlaufzeit benötigt. Die wissenschaftlichen Mitarbeitenden wurde hierbei bei der Versuchsvorbereitung sowie bei Versuchsaufbauten durch erfahrene Techniker unterstützt. Bei den labortechnischen Untersuchungen wurde die wissenschaftlichen Mitarbeitenden bei Bedarf durch erfahrene Laboranten unterstützt. Studentische Hilfskräfte unterstützten die wissenschaftlichen Mitarbeiterenden, die Techniker und die Laboranten nach einer Einweisung bei sich wiederholenden Versuchen und Prüfungen. Der Personaleinsatz war für das Forschungsvorhaben angemessen und notwendig.

Für die Durchführung der Forschungsarbeiten wurden Materialien sowie Versuchskomponenten und Auswertungssoftware benötigt. Der Mitteleinsatz für Verbrauchsmaterial und Investitionen war für das Forschungsvorhaben angemessen und notwendig.

3. Voraussichtlicher Nutzen und Fortschreibung des Verwertungsplans

Die folgenden wesentlichen Schlussfolgerungen und Ergebnisse können abgeleitet werden:

- AP3 (iAMB): Durch das Einbringen degradierbarer Substrate werden verschiedene Parameter und Nährstoffkreisläufe des Bodens beeinflusst. Diese Veränderungen konnten im Vergleich für konventionelle Substrate nicht festgestellt werden. Aufbauend auf den Ergebnissen dieses Projektes, sollten Langzeit-Effekte, über einen Zeitraum von 16 Wochen hinaus, getestet werden.
- Umfangreiche Erkenntnisse des ökologischen Einflusses beim Einsatz von biologisch abbaubaren Textilien, besonders die Relevanz der verwendeten Landwirtschaft
- Verwertungsmaßnahmen:
 - o Einbindung in Vorlesungsreihen
- Erarbeitung von Strategien Probenvorbereitung in der Toxizitätsanalyse, die weiterhin in die Forschung eingebunden werden kann
- Ein besseres Verständnis des Verhaltens von Geotextilien im Allgemeinen und der Prüfverfahren zur Charakterisierung ihrer Eigenschaften im Kontakt mit dem Boden wurde unter anderem durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit während des Projekts ermöglicht.
- Der realistische Einsatz von biobasierten Geotextilien in geotechnischen Projekten wird stark von den Anforderungen an die Dauerhaftigkeit der mechanischen Eigenschaften abhängen.
- Für die weitere Untersuchung von biologisch abbaubaren Geotextilien als Alternative zu herkömmlichen petrobasierten Geotextilien ist es sinnvoll, weitere Materialien und

Herstellungsprozesse zu untersuchen.

- Das GUT-Institut ist weiterhin an in-situ Versuchen interessiert, um die Leistungsfähigkeit der biobasierten Materialien in praxisnahen geotechnischen Anwendungen zu evaluieren.

Die oben genannten vielversprechenden Ergebnisse und Schlussfolgerungen ebnen den Weg für weitergehende Untersuchungen im Zusammenhang mit der weiteren Umsetzung der Idee in der Zukunft. Die Forschungsinstitute der RWTH Aachen University sind öffentliche Einrichtungen und werden daher keine Produkte verkaufen. Die gewonnenen Erkenntnisse werden sowohl zur Unterstützung der Projektpartner als auch zur Öffentlichkeitsarbeit, zur Verbreitung der Ergebnisse und für die Beantragung von Nachfolgeprojekten genutzt. Des Weiteren wurden die gewonnenen Ergebnisse den Grundlagen-Vorlesungen der Institute hinzugefügt, um so Nachwuchsfachkräfte für diesen Forschungsbereich zu gewinnen und für die Industrie auszubilden.

4. Darstellung des während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Vorhabendurchführung sind keine vergleichbaren Tätigkeiten und Ergebnisse bekannt geworden.

5. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NABF/NKBF

Während der Projektlaufzeit wurden folgende Veröffentlichungen vorgenommen:

Artikel

- Tavakoli-Mehrjardi, G.; Fuentes Gutierrez, R.; Heins, K.; Gries, T.: Investigations on degradability of cotton samples buried in different soil conditions (case study); In: Geosynthetics: Leading the Way to a Resilient Planet : Proceedings of the 12th International Conference on Geosynthetics (12ICG), September 17-21, 2023, Roma, Italy / Edited by Giovanni Biondi, Daniele Cazzuffi, Nicola Moraci, Claudio Soccodato; Page(s)/Article-Nr.: 732-738; Boca Raton : CRC Press, Taylor & Francis Group (2023, 2024)

Poster

- Vorstellung des Projektes auf dem BioTexFuture-Forum 2022
- Vorstellung der Ergebnisse des IUF auf der SETAC 2023 in Dublin, Titel: Leachate Effects in Biodegradable and Conventional Geotextiles (Antonia Weltmeyer, Martina Roß-Nickoll)

Vorträge/Präsentationen mit Referenz um Projekt „DegraTex“

- Vorstellung des Projektes auf der BioTexFuture-Pressekonferenz während der TechTextil im April 2024
- Geplant: Vortrag auf der ADD-ITC gemeinsam mit Huesker November 2024