

Die Überprüfung der biologischen Abbaubarkeit von Textilien aus Biobaumwolle als Vorbedingung für die Einrichtung eines Rücknahme- und Verwertungssystems

Auftraggeber: Paptex Textilhandels GmbH
Schillerstraße 4
6850 Dornbirn

Endbericht

Oktober 2021

Erstellt durch: Dr. Sabine Robra

Livia Hökl, BSc.

Universität Innsbruck
Institut für Infrastruktur, Arbeitsbereich Umwelttechnik
Fachgebiet Abfallbehandlung und Ressourcenmanagement
Technikerstraße 13
A-6020 Innsbruck
Fon: (+43)512 507-62170
Fax: (+43)512 507-2911
E-Mail: sabine.robra@uibk.ac.at
Web: <http://www.uibk.ac.at/umwelttechnik>

Innsbruck, 11.10.2020

Kurzfassung

Die Herstellung von Textilien und Bekleidung aus konventionell angebauter und behandelter Baumwolle ist mit vielen negativen Umweltauswirkungen verbunden. Umsatzsteigerungen im Bekleidungssektor wurden durch ständig neue Modetrends angestrebt, wobei die Kleidungsstücke sehr kurzlebig waren. Dies wirkte sich nicht nur auf die steigende Nachfrage nach Rohmaterialien, sondern auch auf die Menge der produzierten Textilabfälle entlang der Wertschöpfungskette und beim Endverbraucher aus. Hochwertige, langlebige Textilien aus kontrolliert biologischem Anbau, die unter Wahrung von hohen Umweltstandards bei der Erzeugung und Verarbeitung hergestellt werden, stellen eine nachhaltige Alternative dar. Im Sinne eines nachhaltigen Umgangs mit Ressourcen und der Kreislaufwirtschaft sollen diese am Ende ihrer Lebensdauer möglichst einer weiteren Nutzungsform zugeführt werden. Hierfür muss ein Sammelsystem zur Verfügung stehen, das diese hochwertigen Textilien sortenrein erfassen kann. Allerdings ist auch bei gut organisierter kaskadischer Nutzung irgendwann, außer der thermischen Nutzung, keine weitere Verwendung mehr möglich und die Fasern gelangen wieder in den Naturkreislauf. Daher sollte vor der Etablierung eines Sammelsystems die Frage geklärt werden, wie sich die Baumwollfasern in der Umwelt verhalten.

Hierzu wurden gewebte Stoffproben aus Biobaumwolle einer Reihe von Laborversuchen anhand entsprechender Normen und Regelwerke aus der Textilprüfung und Bioabfallbehandlung unterzogen. Die aerobe biologische Abbaubarkeit der Stoffproben wurde mit einem Erdeingrabetest nach ÖNORM EN ISO 11721-1 sowie mit einem Atmungsaktivitäts-Test (AT₄, ÖNORM S 2027-4:2012 06 01) untersucht. Mit einem Wässerungstest wurden eventuellen Festigkeitsverluste der Stoffproben überprüft. Zur Ermittlung der anaeroben Abbaubarkeit wurde das Methanpotenzial (GB₂₁, VDI 4630) bestimmt. Die ökotoxikologische Unbedenklichkeit der Erde mit den abgebauten Stoffproben aus den Erdeingrabetests wurde anhand eines Kresstests (ÖNORM S 2210:2019 02 01) überprüft.

Die Ergebnisse des Erdeingrabetests zeigten, dass die untersuchten Stoffproben aus Biobaumwolle nach 35 Tagen soweit abgebaut wurden, dass sie nicht mehr aufzufinden waren. Der Wässerungstest der Stoffproben ergab keine nennenswerten Gewichtsverluste, woraus sich schließen lässt, dass keine künstlich hinzugefügten auslaugbaren Stoffe (z.B. Appreturen) in den untersuchten Stoffproben vorhanden waren. Die Gasbildung nach 21 Tagen ergab die für den anaeroben Abbau von Cellulose zu erwartenden Methanmengen. Die Kresse im offenen wie auch im geschlossenen Kresstest zeigte ein gesundes und üppiges Wachstum in dem Testsubstrat aus dem Erdeingrabeversuch. Die Ergebnisse der Versuche zur biologischen Abbaubarkeit zeigten, dass die untersuchten Textilien aus Biobaumwolle am Ende ihrer Lebensdauer bei entsprechenden Umweltbedingungen in der Erde in kurzer Zeit vollständig abgebaut werden und auch für die anaerobe Vergärung und Biogaserzeugung geeignet sind. Um diese umweltfreundlich hergestellten Fasern für hochwertigere Anwendungen, z.B. aus dem biotechnologischen Bereich, nutzen zu können, sollten innovative Verwertungskonzepte, z.B. im Bereich biobasierte Werkstoffe, entwickelt werden. Für diese Anwendungen muss allerdings eine Vermischung mit Textilien aus anderen Herstellungsprozessen oder aus Fasergemischen vermieden werden. Daher sollte ein Rücknahmesystem exklusiv für diese Textilien aufgebaut werden.

Inhalt

I.	Abkürzungsverzeichnis	I
II.	Abbildungsverzeichnis	II
1	Einleitung	1
1	Problemstellung und Ziel der Untersuchung	2
2	Material und Methoden	3
2.1	Beschreibung der Stoffproben	4
2.2	Vorbereitende Maßnahmen und Untersuchungen für den Erdeingrabetest	4
2.2.1	Herstellung des Testsubstrates	4
2.2.2	Ermittlung der Wasserhaltekapazität WHK_{max} des Testsubstrates	5
2.3	Erdeingrabetest	5
2.4	Analytische Methoden, begleitende und auswertende Untersuchungen	6
2.4.1	Bestimmung von Trockensubstanz und organischer Trockensubstanz	6
2.4.2	Bestimmung von pH und elektrischer Leitfähigkeit des Testsubstrats	7
2.4.3	Wässerungstest	7
2.4.4	Messung der Atmungsaktivität (AT_4)	7
2.4.5	Bestimmung des Methanpotenzials (GB_{21})	8
2.5	Kresstest	8
2.6	Statistische Auswertung	8
3	Ergebnisse und Diskussion	8
3.1	Ergebnisse des Erdeingrabetest	8
3.2	Ergebnisse des Wässerungstests	10
3.3	Entwicklung der oTR-Gehalte im Verlauf des Erdeingrabetests	11
3.3.1	Entwicklung der pH-Werte	12
3.3.2	Elektrische Leitfähigkeit	13
3.3.3	Atmungsaktivität (AT_4)	14
3.3.4	Gasbildungspotenzial (GB_{21})	16
3.4	Kresstest	17
4	Zusammenfassung und Ausblick	19
5	Literaturverzeichnis	21

I. Abkürzungsverzeichnis

AMPTS	Automatic Methane Potential Test System
AT ₄	Atmungsaktivität
BCI	Better Cotton Initiative
bvse	Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V
Ce	Cellulose
EC	Elektrische Leitfähigkeit (<i>Electric Conductivity</i>)
EU	Europäische Union
FLO	Fair Trade Labelling Organization
FM	Frischmasse
GB ₂₁	Gasbildungsvermögen in 21 Tagen
GOTS	Global Organic Textile Standard
IS	Impfschlamm
MSI	Multi-Stakeholder-Initiativen
mL _N	Norm-Milliliter
NRO	Nicht-Regierungsorganisation
SP	Stoffproben
TR	Trockenrückstand
oTR	organischer Trockenrückstand
WHK _{max}	maximale Wasserhaltekapazität
WTO	World Trade Organization

II. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung des weltweiten Anbaus von Bio-Baumwolle seit 2006	2
Abbildung 2: Überblick über die Vorbereitung, Versuchsdurchführung und Analytik zur Ermittlung der biologischen Abbaubarkeit der Textilien aus Biobaumwolle	3
Abbildung 3: Vergrößerte Aufnahme des verwendeten Baumwollstoffes.	4
Abbildung 4: Schema des Erdeingrabetests (links: 1. Durchgang; rechts: 2. Durchgang).....	6
Abbildung 5: Zustand der Stoffproben nach 14, 21 und 28 Tagen im Erdeingrabetest.....	9
Abbildung 6: Mikroskopische Aufnahmen der Stoffproben	9
Abbildung 7: Biologischer Abbau der Stoffproben während des Erdeingrabetests.....	10
Abbildung 8: Entwicklung des Gewichts der Stoffproben während des Wässerungstests.....	11
Abbildung 9: Die Entwicklung der oTR-Gehalte während des Erdeingrabetests	12
Abbildung 10: Entwicklung der pH-Werte.....	13
Abbildung 11: EC-Werte – Mittelwerte und Standardabweichung (n=3)	14
Abbildung 12: AT4 - Spezifischer Sauerstoffverbrauch nach 4 Tagen.....	15
Abbildung 13: Schematischer Aufbau von Baumwollfasern	15
Abbildung 14: Mit dem AMPTS ermittelte kumulierte Brutto-Methanerträge	16
Abbildung 15: Vergleich der Methanerträge in mLN/g oTR von Impfschlamm, mikrokristalliner Cellulose und Stoffproben nach 21 Tagen	17
Abbildung 16: Offener Kresstest - obere Reihe: Kontrolle, untere Reihe: Testsubstrat	18
Abbildung 17: Ergebnis des geschlossenen Kresstests – Links: Kontrolle, Mitte und rechts: Testsubstrat.....	18
Abbildung 18: Entwicklung der oberirdischen Biomasse 5 Tage nach Aussaat. (A) offener Kresstest; (B) geschlossener Kresstest.....	19
Abbildung 19: Nutzungsmöglichkeiten von Alttextilien aus Baumwolle	20

1 Einleitung

Die Textil- und Bekleidungsindustrien zählen zu den weltweit am schnellsten wachsenden Wirtschaftszweigen mit einem der größten Märkte. Im Jahr 2019 wurden weltweit Textilien im Wert von 305 Milliarden US\$ und Bekleidung im Wert von knapp 500 Milliarden US\$ exportiert. China hat mit knapp 31 % den größten Anteil an den weltweiten Exporten an Bekleidung, gefolgt von der Europäischen Union (EU) mit knapp 28 %. Bangladesch, wo der Export von Bekleidung 33 % des gesamten Exportgeschäfts ausmacht, liegt an dritter Stelle der größten Bekleidungsexporteure (WTO 2021). Auf der Importseite steht die EU mit 34 % aller weltweiten Kleidungsimporte, gefolgt von den USA mit gut 18 % und Japan mit knapp 6 %. Bei den Rohstoffen für Textilien und Bekleidung hat Baumwolle einen Anteil von ca. 43 %. Baumwolle ist ein nachwachsender Rohstoff. Bekleidung aus Baumwolle ist robust und weist gute Trageeigenschaften auf. (Gray 2017).

Allerdings wird der Anbau von Baumwolle wegen des hohen Flächen- und Wasserbedarfes sowie des Einsatzes großer Mengen an Mineraldünger und Pflanzenschutzmitteln von den Verbrauchern zunehmend als problematisch angesehen (Šajn 2019). Für umweltfreundliche Anbaumethoden und gerechte Arbeitsbedingungen für die Baumwollbauern sind immer mehr Konsumenten bereit, auch höhere Preise zu bezahlen (Altenbuchner u. a. 2016). Dies schlägt sich in einer ständig steigenden Nachfrage nach Kleidung aus biologisch erzeugter Baumwolle nieder (CBI 2020)

Zu dieser in der Landwirtschaft allgemein zu beobachtenden Entwicklung leisten u.a. international agierende Nicht-Regierungs-Organisationen (NRO) sowie auch Multi-Stakeholder-Initiativen (MSI) ihren Beitrag, indem sie sich für umweltschonendere und nachhaltigere Anbaumethoden einsetzen. Zu den NRO zählen z.B. Friends of the Earth, Greenpeace, Oxfam, Pesticide Action Network (PAN) und der WWF. Die 2006 ins Leben gerufene *Better Cotton Initiative (BCI)* ist eine MSI von führenden Zulieferern, Herstellern, Händlern, Erzeugergemeinschaften und Vertretern aus der Zivilgesellschaft (Better Cotton Initiative 2021). Zur Umsetzung dieser Ziele existieren diverse freiwillige Zertifizierungsprogramme, wie z.B. *Cotton made in Africa (CmiA)* oder auch die *Fair Trade Labelling Organization (FLO)*. Die NROs setzen dabei auf unterschiedliche Anbaustandards, die sich z.B. in der Akzeptanz von Mineraldüngern und Pflanzenschutzmitteln unterscheiden (Partzsch u. a. 2019). In der EU gelten die einschlägigen Verordnungen über die ökologische/biologische Produktion und die Kennzeichnung von ökologischen/biologischen Erzeugnissen für in der EU erzeugte wie auch von außerhalb importierte Produkte (Amtsblatt der Europäischen Union, 2020). Darüber hinaus hat sich der Standard GOTS (Global Organic Textile Standard) für die sozial gerechte und ökologische Erzeugung von Baumwolltextilien über die gesamte Wertschöpfungskette etabliert. Baumwolle aus biologischem Anbau nach GOTS Standard wird ohne synthetische Düngemittel, giftige Spritzmittel und toxikologisch relevante Substanzen kultiviert und verarbeitet; daher ist sie deutlich weniger umweltbelastend (GOTS gGmbH 2017, Delate u. a. 2020). In einer Lebenszyklusanalyse wurden die Umweltwirkungen der Erzeugung von Rohbaumwolle der drei in Indien hauptsächlich praktizierten Anbaumethoden von Baumwolle - konventionell, biologisch und BCI - miteinander verglichen. Im Vergleich mit der Rohbaumwolle der BCI verursachte Rohbaumwolle aus biologischem Anbau deutlich geringere negative Umweltwirkungen: bezogen auf eine Tonne Rohbaumwolle verursachte Biobaumwolle ca. 50% des Treibhausgaspotenzials, ca. 25% des Versauerungspotenzials und ca. 20 % des Eutrophierungspotenzials. Darüber hinaus benötigte Biobaumwolle nur ca. halb so viel Energie wie die Rohbaumwolle der BCI, die allerdings ihrerseits im Vergleich zum konventionellen Anbau ebenfalls erheblich geringere Umweltwirkungen verursachte (Shah u. a. 2018). Wie aus Abbildung 1 ersichtlich ist, wächst trotz der Konkurrenz der BCI-Baumwolle der Anteil an biologisch angebaute Baumwolle nach einem Einbruch in den 2010er Jahren wieder Jahr für Jahr (TextilExchange 2011).

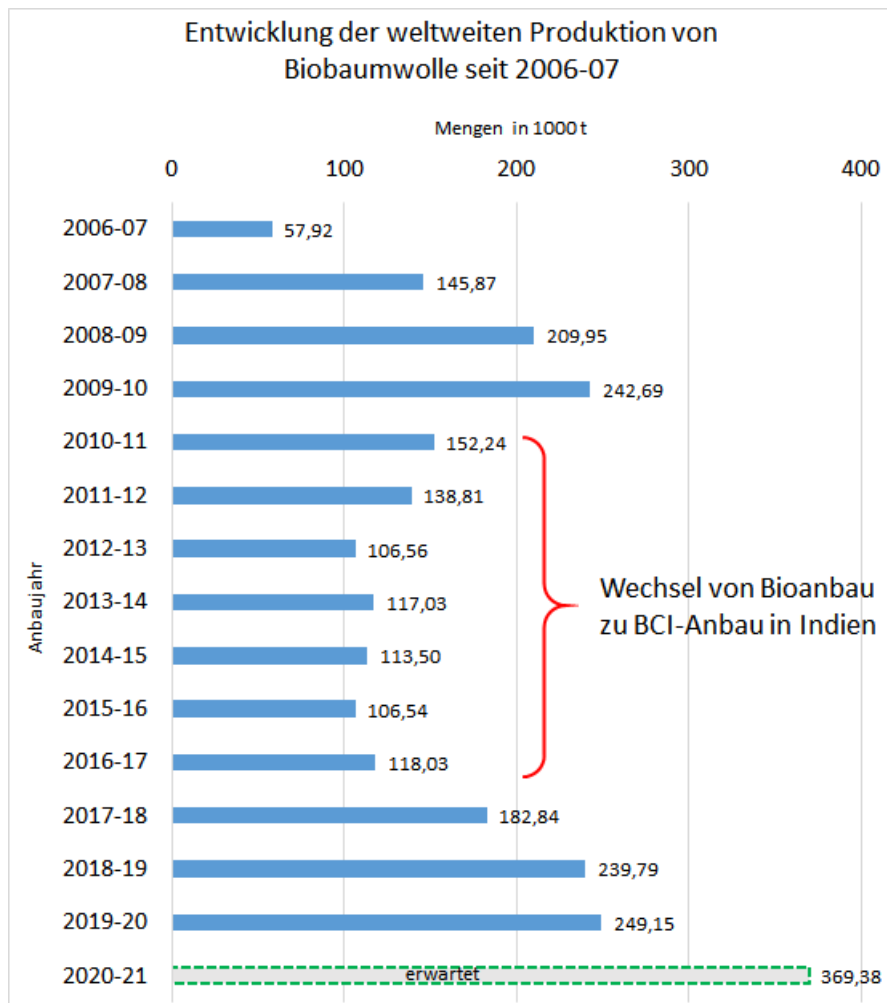


Abbildung 1: Entwicklung des weltweiten Anbaus von Bio-Baumwolle seit 2006
(verändert nach TextilExchange, 2011)

In der EU ist der Kauf von Bekleidung pro Kopf in wenigen Jahrzehnten um 40 % gewachsen. Alljährlich entsorgt jeder EU-Bürger durchschnittlich 11 kg an Textilien (European Environment Agency, 2019). Weniger als die Hälfte der abgelegten Bekleidung wird wiederverwendet oder dem Recycling zu geführt (Šajin 2019). Im Jahr 2018 wurden in Österreich insgesamt rund 222.000 t Textilabfälle erfasst. Hiervon fanden sich 51 % im Restabfall und knapp 29 % im Sperrmüll. Aus der Getrenntsammlung stammten rund 51.000 t (van Eygen u. a. 2021).

1 Problemstellung und Ziel der Untersuchung

Um die Ressourcennutzung zu optimieren und die Emissionen von Klimagasen drastisch zu senken, gibt es zahlreiche Bestrebungen zur nachhaltigeren Gestaltung von Prozessen, Produkten und Dienstleistungen. In diesem Zusammenhang muss auch der derzeitige Konsum von Textilien und Bekleidung sowie der Umgang mit ihnen nach Ende ihrer Nutzung hinterfragt werden (bvse 2020). Die Entwicklung und Anwendung innovativer praktikabler und wirtschaftlicher Alternativen kann hier einen wertvollen Beitrag leisten.

Für Textilien aus Biobaumwolle können eigene Rücknahmesysteme diese hochwertigen Materialien erfassen, bevor sie in den Abfall gelangen. So kann der Sortieraufwand bei gleichzeitig hoher Qualität minimiert werden. Die zurückgenommenen Textilien aus Biobaumwolle können z.B. als hochwertiger Rohstoff für neue Kleidungsstücke, oder im weiteren Verlauf zur Papierherstellung weiterverwendet werden.

Wenn die Zellulosefasern am Ende ihrer Nutzungsdauer für jede weitere Verwendung zu abgenutzt sind, sollten sie vollständig biologisch abbaubar sein, ohne negative Folgen für die Umwelt und möglichst auch unter Nutzung der enthaltenen Energie. Der rückstandsfreie biologische Abbau ist damit die Grundvoraussetzung für die Etablierung eines innovativen Rücknahmesystems für Textilien aus Biobaumwolle. Ziel dieser Studie war daher, Daten über das Verhalten von Textilien aus Biobaumwolle zu gewinnen, wenn sie unbeabsichtigt in die Umwelt gelangen, und damit insbesondere zu ihrem aeroben und anaeroben biologischen Abbauverhalten.

2 Material und Methoden

Der Erdeingrabetest stellte die Hauptkomponente der vorliegenden Arbeit zur Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit von Textilien aus Biobaumwolle dar. Im weiteren Verlauf dieses Berichts werden die Textilproben aus Biobaumwolle als „Stoffproben“ und die Kompostmischung für den Erdeingrabetest als „Testsubstrat“ bezeichnet.

Für die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung des Erdeingrabetests waren verschiedene weitere Versuche und Analysen erforderlich. Diese bestanden aus analytischen Methoden, vorbereitenden Maßnahmen und begleitenden und auswertenden Untersuchungen. Ein Überblick über die einzelnen Teile dieser Untersuchung ist in der Abbildung 2 dargestellt.

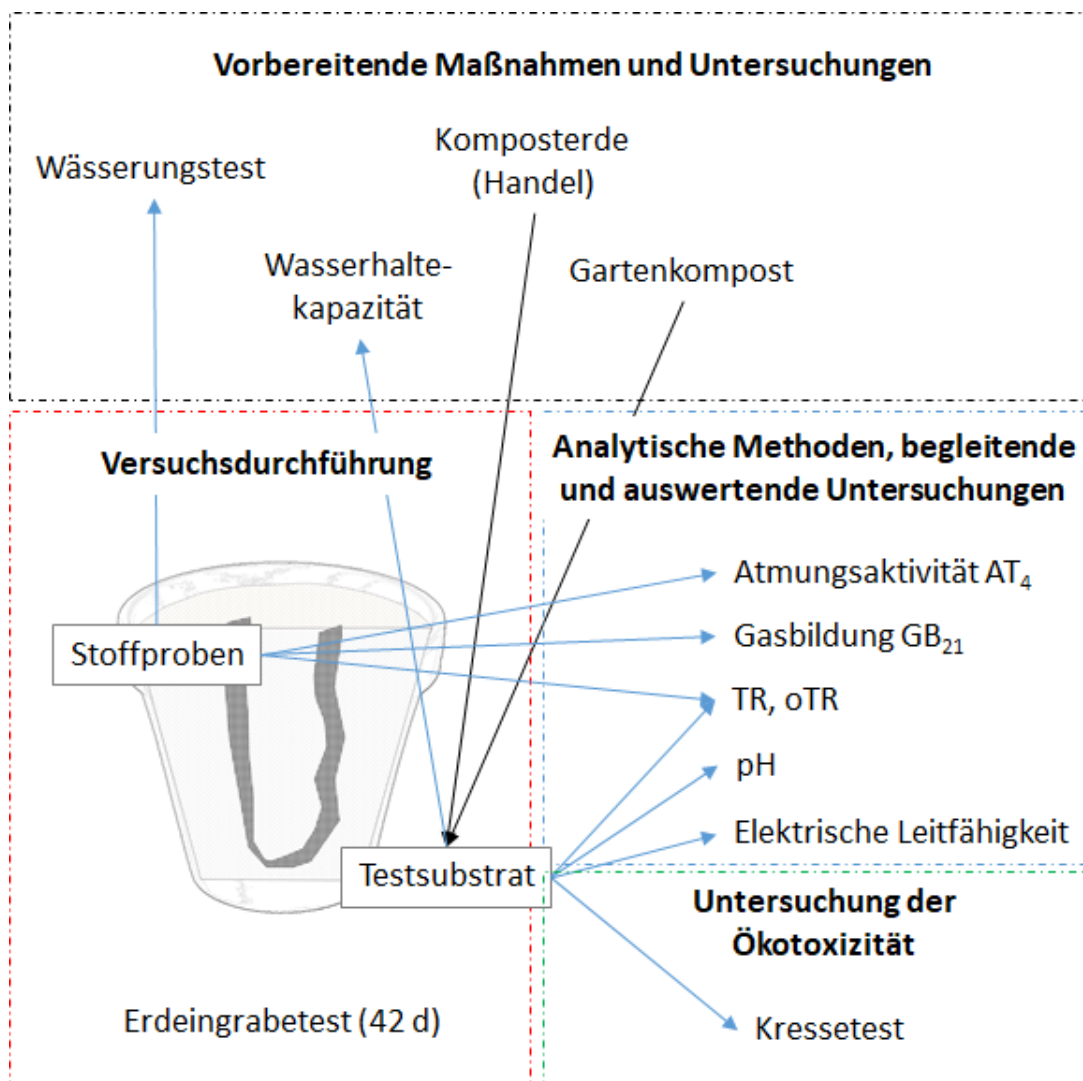


Abbildung 2: Überblick über die Vorbereitung, Versuchsdurchführung und Analytik zur Ermittlung der biologischen Abbaubarkeit der Textilien aus Biobaumwolle

2.1 Beschreibung der Stoffproben

Die verwendeten Stoffproben bestanden aus kontrolliert biologisch angebauter Baumwollbettwäsche. Die Baumwolle für die Bettwäsche stammte aus kontrolliert biologischem Anbau aus der Türkei und wurde nach dem GOTS-Standard verarbeitet, gesponnen, gefärbt und gewebt (Mary Rose 2021), d.h. bei der Verarbeitung der Textilien wurden keine schädlichen Chemikalien, z.B. bei der Stoffausrüstung oder Färbung, eingesetzt.

Der Stoff, ein Buntgewebe in Leinwandbindung (ca. 90 Fäden pro Zentimeter), wies ein eingewobenes, aus durchgefärbten Fäden bestehendes Streifenmuster in Zartrosa, Graublau, Grünlichgrau und Hellgrau auf. Abbildung 3 zeigt eine vergrößerte Aufnahme des Stoffes.

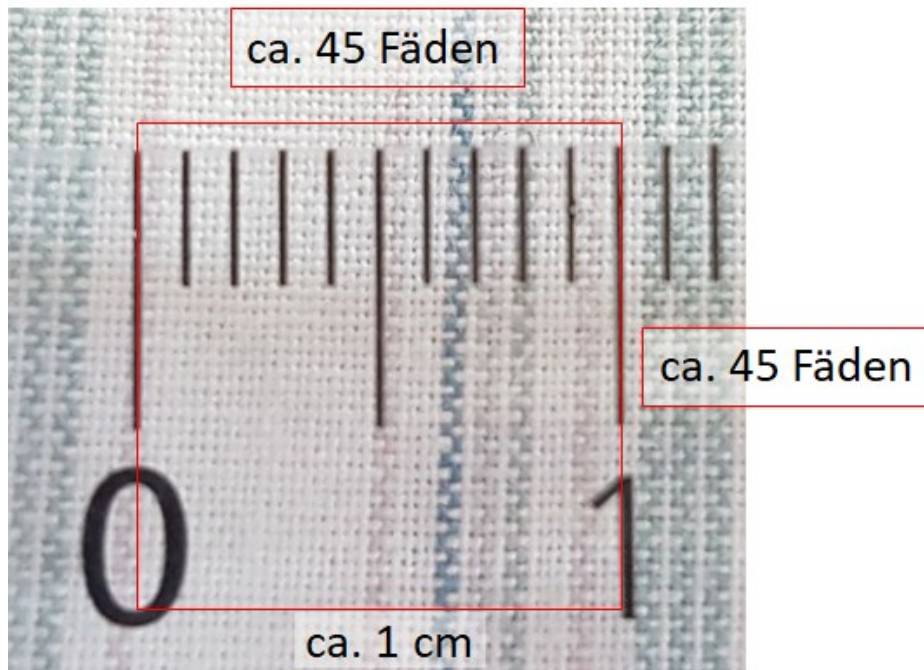


Abbildung 3: Vergrößerte Aufnahme des verwendeten Baumwollstoffes.

2.2 Vorbereitende Maßnahmen und Untersuchungen für den Erdeingrabetest

2.2.1 Herstellung des Testsubstrates

Der biologische Abbau von pflanzlicher und tierischer Biomasse im Boden erfolgt überwiegend durch Mikroorganismen, Bakterien und Pilze $< 200 \mu\text{m}$, die mit einem Anteil von 80 % (bezogen auf die Trockensubstanz) das Bodenleben dominieren (Stöven 2005).

Die Untersuchung des biologischen Abbaus der Textilien im Labor wurde unter standardisierten Bedingungen durchgeführt. Basierend auf der Feststellung von Siu und Reese (1953)

“The organisms attacking fabrics arise principally from the soil and decaying organic matter associated with it.”

erfolgt diese Untersuchung mit dem sogenannten Erdeingrabetest, der in enger Anlehnung an die in der ÖNORM EN ISO 11721-1:2001 (Austrian Standards Institute 2001) und der ÖNORM EN ISO 11721-2:2003 (Austrian Standards Institute 2003) festgelegten Verfahren durchgeführt wurde. Hierbei werden Stoffproben in Erde eingegraben und eventuell auftretende Veränderungen über einen längeren Zeitraum beobachtet.

Das hierfür benötigte biologisch aktive Testsubstrat wurde im Labor des Arbeitsbereiches Umwelttechnik aus handelsüblicher, sterilisierter Komposterde und reifem, unbehandeltem Kompost

aus den Gärten von Labormitarbeitern sorgfältig zusammengemischt. Anschließend wurde die Mischung bei Raumtemperatur aufbewahrt, um eine gleichmäßige Verbreitung der Mikroorganismen aus dem Gartenkompost mit dem gesamten Material zu ermöglichen. Das so gewonnene Testsubstrat wurde in Bezug auf Feuchte und Temperatur für die Mikroorganismen optimal eingestellt.

Das Testsubstrat wurde nach Beendigung des Erdeingrabetests mit dem Originalsubstrat verglichen, um zu überprüfen, ob das zu verrottende Baumwollgewebe das für den Erdeingrabetest verwendete Testsubstrat in irgendeiner Weise beeinflusst hat.

Neben dem Erdeingrabetest wurden weitere in der Abfallwirtschaft übliche Testverfahren, wie die Atmungsaktivität (AT_4) und das Gasbildungspotenzial (GB_{21}), zur Charakterisierung der mikrobiellen Aktivität und der aeroben und anaeroben biologischen Abbaubarkeit herangezogen.

2.2.2 Ermittlung der Wasserhaltekapazität WHK_{max} des Testsubstrates

Die Wasserhaltekapazität WHK_{max} ist ein Maß für die Masse an Wasser, die ein Boden festhalten kann, ohne dass Wasser austritt. Die Mikroorganismen sind bei 50-60 % der WHK_{max} am aktivsten. Die Messung der WHK_{max} dient also dazu, die optimale Wassermenge für das im Erdeingrabetest (Abschnitt 2.3) verwendete Testsubstrat zu ermitteln.

Je 25 g des Testsubstrates wurden in 50 mL Tiegel mit einem Glasfilterboden Größe 3 eingewogen und über Nacht in mit Wasser gefüllten Behältern stehen gelassen, so dass das Testsubstrat sich mit Wasser sättigen konnte. Anschließend wurden die Tiegel entnommen und das in den Behältern verbliebene Wasser mit einer Vakuumpumpe abgesaugt. Die Tiegel wurden gewogen, anschließend bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und nochmals gewogen. Die Gewichts Differenz entsprach der WHK_{max} .

2.3 Erdeingrabetest

Der Erdeingrabetest dient im Prinzip dazu, die verrottungshemmende Ausrüstung von zellulosehaltigen Textilien zu überprüfen. Im Umkehrschluss lässt sich damit jedoch auch die biologische Abbaubarkeit von Baumwolltextilien untersuchen (Latter und Walton 1988). Die Durchführung erfolgte in Anlehnung an die ÖNORM EN ISO 11721-1 (Austrian Standards Institute 2001)

Der Erdeingrabetest erfolgte in zwei Durchgängen. Stoffproben von Bettwäsche aus Biobaumwolle wurden gemäß des in der ÖNORM EN ISO 11721-1_2001 vorgeschriebenen Prüfschemas in Streifen von 3 cm x 30 cm geschnitten und die Ränder ca. 0,5 cm tief ausgefranst. Diese Streifen wurden nach dem Schema in Abbildung 4 in handelsüblichen Tontöpfen von ca. 2 L Inhalt in biologisch aktiver Komposterde U-förmig eingegraben. Im ersten Durchgang wurde so verfahren, dass die beiden Enden gerade eben noch herausragten. Hier wurden insgesamt 48 Töpfe vorbereitet.

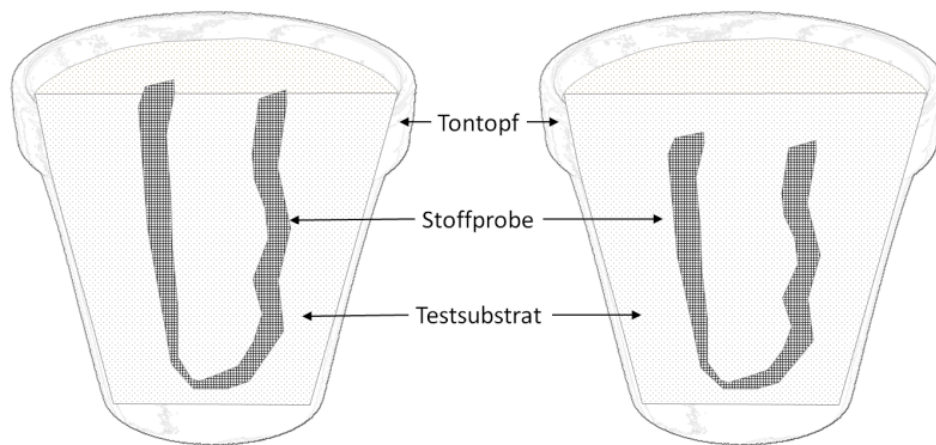


Abbildung 4: Schema des Erdeingrabetests (links: 1. Durchgang; rechts: 2. Durchgang)
(eigene Darstellung)

Aufgrund der Erfahrungen vom ersten Durchgang (vergl. Abschnitt 3.1) wurden für den zweiten Durchgang nur noch 18 Töpfe vorbereitet. Darüber hinaus wurde das Testsubstrat vom ersten Durchgang benutzt. Die Stoffproben wurden nun 2 cm tiefer eingelegt, so dass sie vollständig vom Testsubstrat bedeckt waren. Mit diesem Durchgang sollte eine mögliche Akklimation der Mikroorganismen im Testsubstrat an das Material der Stoffproben untersucht werden.

Die Komposterde wurde mit Leitungswasser auf eine Feuchte von 65 % ihrer WHK_{max} gebracht. Der pH-Wert war mit 6,8 fast neutral. Die Töpfe wurden anschließend in einer Klimakammer bei 30 °C und 70 % Luftfeuchtigkeit inkubiert. In wöchentlichen Abständen wurden jeweils drei Töpfe entnommen und untersucht. Die Stoffproben, bzw. im weiteren Verlauf der Untersuchung die zunehmend verrotteten Reste, wurden vorsichtig aus dem Substrat entnommen, mit Leitungswasser abgespült und 30 Minuten in 70%igem Alkohol gelagert. Anschließend wurden sie bei 30 °C getrocknet. Dann wurden die Stoffproben gewogen, um Gewichtsverluste und damit einen möglichen Abbau während der Versuchszeit quantifizieren zu können. Das Testsubstrat wurde mit den im weiteren Verlauf beschriebenen analytischen Methoden untersucht.

2.4 Analytische Methoden, begleitende und auswertende Untersuchungen

Die Mikroorganismen im Boden sind besonders aktiv, wenn der Gasaustausch gut funktioniert und der Wassergehalt in den Bodenporen optimal ist. Neben der Versorgung mit Wasser und Luft wirken sich auch der pH des Bodens sowie dessen elektrische Leitfähigkeit auf die Lebensbedingungen der Mikroorganismen aus.

2.4.1 Bestimmung von Trockensubstanz und organischer Trockensubstanz

Als Grundlage für den Ansatz von Versuchen zur biologischen Abbaubarkeit muss bekannt sein, wieviel Trockenmasse ein Material enthält, bzw. wie groß der Trockenrückstand ist, und wieviel davon organischer Natur ist, also biologisch abgebaut werden kann. Der Trockenrückstand (TR) wird bestimmt, um eine einheitliche Bezugsgröße für sämtliche weiteren Ergebnisse zu haben. Der Wert „organische Trockensubstanz“ (oTR) beschreibt die Anteile an theoretisch biologisch abbaubarer organischer Masse, bezogen auf die Trockensubstanz.

Die Analysen wurden als Dreifachbestimmung in Anlehnung an die ÖNORM EN 15934:2012 (Austrian Standards Institute 2012b) und ÖNORM EN 15935:2012 (Austrian Standards Institute 2012c) durchgeführt.

Die Bestimmungen erfolgten thermogravimetrisch als Dreifachbestimmung. Jeweils 1 g Stoffproben bzw. 20 g Testsubstrat wurden in Porzellantiegel eingewogen, bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und wiederum gewogen. Der TR wurde mittels der folgenden Formel bestimmt:

$$m_{ges} = m_W + m_T \quad (1)$$

$$TR + W = 100 \quad (2)$$

$$TR = \frac{m_T}{m_{ges}} \times 100 \quad (3)$$

Wobei

m_{ges} : Gesamtmasse der Probe

m_W : Masse des Wassers

m_T : Masse des Trockenrückstandes

W: Wasseranteil

TR: Anteil des Trockenrückstandes

Der oTR wurde als Glühverlust bestimmt. Es wurden jeweils 1 g der getrockneten Stoffproben bzw. 10 g des getrockneten Testsubstrates in Porzellantiegeln bei 550 °C im Muffelofen bis zur Gewichtskonstanz geglüht. Die veraschten Proben wurden zum Abkühlen in einen Exsikkator gestellt und anschließend gewogen. Die Gewichts Differenz, also der Glühverlust, entspricht dem Anteil der theoretisch abbaubaren organischen Trockensubstanz, der verbleibende Ascheanteil entspricht dem Gehalt an nicht biologisch abbaubaren Mineralstoffen.

2.4.2 Bestimmung von pH und elektrischer Leitfähigkeit des Testsubstrats

Die pH-Messungen wurden nach jeder Beprobung nach ÖNORM EN 15933:2012 (Austrian Standards Institute 2012a) durchgeführt. Für die pH-Messungen wurde eine Suspension aus jeweils 12,5 mL 0,01 mol/L CaCl-Lösung und 5 g Testsubstrat hergestellt, gut durchmischt und für mindestens zwei Stunden ruhen gelassen. Anschließend wurde der pH mit einem pH-Messgerät (WTW Multimeter 3620 IDS, pH-Elektrode SenTix 945 P) gemessen.

Die elektrische Leitfähigkeit (EC) wurde nach ÖNORM L 1099:2015 (Austrian Standards Institute 2015) gemessen. Hierzu wurden 5 g des Testsubstrates mit 12,5 mL deionisiertem Wasser versetzt und gut durchmischt. Die Ansätze wurden für zwei Stunden ruhen gelassen. Anschließend wurden die Messungen mit einem WTW Multimeter 3620 IDS (EC-Elektrode WTW TetraCon 925) durchgeführt.

2.4.3 Wässerungstest

Um das Hydrolyseverhalten in Wasser beurteilen zu können, wurde nach einer eigenen Methode vorgegangen: Auf die beschriebene Weise hergestellte Stoffproben wurden 6 Wochen lang in Wasser gelagert. In regelmäßigen Abständen wurden Stoffproben entnommen und für 30 Minuten in Alkohol (70 %) gelagert, anschließend bei 30 °C getrocknet und eventuelle Gewichtsverluste durch Wiegen ermittelt.

2.4.4 Messung der Atmungsaktivität (AT₄)

Die Atmungsaktivität gibt Aufschluss über die Aktivität der Mikroorganismen und dient zur Beurteilung der biologischen Abbautätigkeit unter aeroben Bedingungen. Der Parameter AT₄ misst die massebezogene Menge an Sauerstoff, die die Mikroorganismen über vier Tage durch ihre Abbautätigkeit verbrauchen und wird als O₂ mg/g TR ausgegeben. Die AT₄-Bestimmungen erfolgten nach ÖNORM S 2027-4:2012 (Austrian Standards Institute 2012d) in vier parallelen Ansätzen: Das Testsubstrat, das auf einen optimalen pH und Wassergehalt gebracht worden war, wurde locker in 2,5-L Testflaschen gegeben. Für Ansatz 1 wurden in Dreifachbestimmung jeweils 0,5 g und für Ansatz 2 jeweils 1 g Stoffproben (1 x 1 cm) hinzugefügt. Im dritten Ansatz wurde 1 g mikrokristalline Zellulose als Referenzmaterial verwendet. Der vierte Ansatz, die Nullprobe, enthielt nur das Testsubstrat. Als Reagenz zur Bindung des gebildeten Kohlendioxids wurde Natronkalk verwendet. Nachdem das Reagenz eingefüllt und die Messköpfe aufgeschraubt waren, wurden die Ansätze bei 20 °C bebrütet.

Als Messgeräte wurden WTW Oxitop Sets verwendet, die aus einem Messkopf OxiTop-C und einem Controller bestehen.

2.4.5 Bestimmung des Methanpotenzials (GB₂₁)

Das Gaspotenzial, ausgedrückt als GB₂₁ (Gasbildungspotenzial in 21 Tagen), ist eine Maßzahl für die auf den TR bezogene Menge an Biogas, die über 21 Tage durch mikrobielle Umsetzung gebildet wird. Die Messungen wurden nach Önorm S 2027-3 - Beurteilung von Abfällen aus der mechanisch-biologischen Behandlung - Gasbildung im Gärttest (GB₂₁) (Austrian Standards Institute 2012d) in Dreifachbestimmung durchgeführt. Als Messgerät wurde ein AMPTS II® (*Automatic Methane Potential Test System - BPC Instruments*, Lund, Schweden) verwendet. Als Inokulum wurde Faulschlamm der Kläranlage Zirl verwendet. Es wurden 1 x 1 cm große Stoffstückchen vorbereitet und davon jeweils 3 g in die Messflaschen gegeben, die ca. 300 g Faulschlamm enthielten. Als Referenz diente eine Mischung aus ca. 300 g Faulschlamm und ca. 3 g mikrokristalliner Zellulose. Um die Gasproduktion aus dem Faulschlamm zu ermitteln, wurden Nullproben mit nur ca. 300 g Faulschlamm angesetzt. Anschließend wurden die Ansätze bei 37 °C für 21 Tage bebrütet. Sollte die täglich gebildete Gasmenge schon vor Ablauf dieser Zeit an drei aufeinander folgenden Tagen weniger als 0,5 % der bisher erzeugten Gasmenge betragen, wird der Versuch beendet. Die Menge an entstehendem Gas wurde mittels einer 3 m-NaOH-Lösung vom CO₂ befreit und automatisch gemessen und aufgezeichnet. Der Methananteil wurde von der Software des AMPTS standardmäßig mit 60 % angenommen.

2.5 Kresstest

Um zu überprüfen, ob das Testsubstrat mit den verrotteten Stoffproben Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum hat, wurde ein Kresstest in Anlehnung an ÖNORM S 2021 - Kultursubstrate - Qualitätsanforderungen und Untersuchungsmethoden durchgeführt.

Hierzu wurde das gebrauchte Testsubstrat nach Abschluss des Erdeingrabetests mit Gartenkresse (*Lepidium sativum*) angesät. Anschließend wurde die Keimung und die Bildung von Pflanzenmasse bewertet. Um auch das Wurzelwachstum beobachten zu können, wurden Glasbecher mit ca. 0,5 L Volumen verwendet. Ein Ansatz wurde mit handelsüblicher Einheitserde gefüllt, ein weiterer Ansatz enthielt das Testsubstrat, in dem die Stoffproben verrottet worden waren. Jeder Ansatz erhielt ca. 1 g Kressesamen, die mit etwas Wasser befeuchtet wurden. Die Töpfe wurden an einem hellen Ort bei Raumtemperatur aufgestellt. Nach 5 Tagen wurde das Pflanzenwachstum in den Ansätzen verglichen.

Es wurde sowohl ein offener Test als auch ein geschlossener Test durchgeführt; bei letzterem waren die Töpfe nach der Ansaat mit Parafilm luftdicht verschlossen worden.

2.6 Statistische Auswertung

Die Bearbeitung der Messergebnisse erfolgte mit der Tabellenkalkulationssoftware Microsoft Excel®. Die statistische Auswertung der Messergebnisse erfolgte mit der Statistik-Software STATISTICA. Um statistisch signifikante Abweichungen zwischen den Ansätzen zu ermitteln, wurde jeweils eine Varianzanalyse durchgeführt. Zusätzlich wurde jeweils noch ein Post-hoc-Test (Scheffé-Test) als Signifikanztest verwendet.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Ergebnisse des Erdeingrabetests

Während des Erdeingrabetests wurde der Zustand der Stoffproben wöchentlich begutachtet. Die Ergebnisse deuten auf einen fortschreitenden biologischen Abbau der Stoffproben durch die Mikroorganismen im Testsubstrat hin, wie sich bereits anhand des makroskopischen Aspektes in Abbildung 5 leicht erkennen lässt.



Abbildung 5: Zustand der Stoffproben nach 14, 21 und 28 Tagen im Erdeingrabetest

Der erste visuelle Eindruck des biologischen Abbaus wird durch die mikroskopischen Aufnahmen in Abbildung 6 bestärkt. Im Vergleich zum intakten Gewebe in Woche 0 zeigten sich nach einer Woche erste Läsionen durch Verluste von Fasern. Nach der zweiten Woche waren unter dem Mikroskop bereits größere Fehlstellen erkennbar.

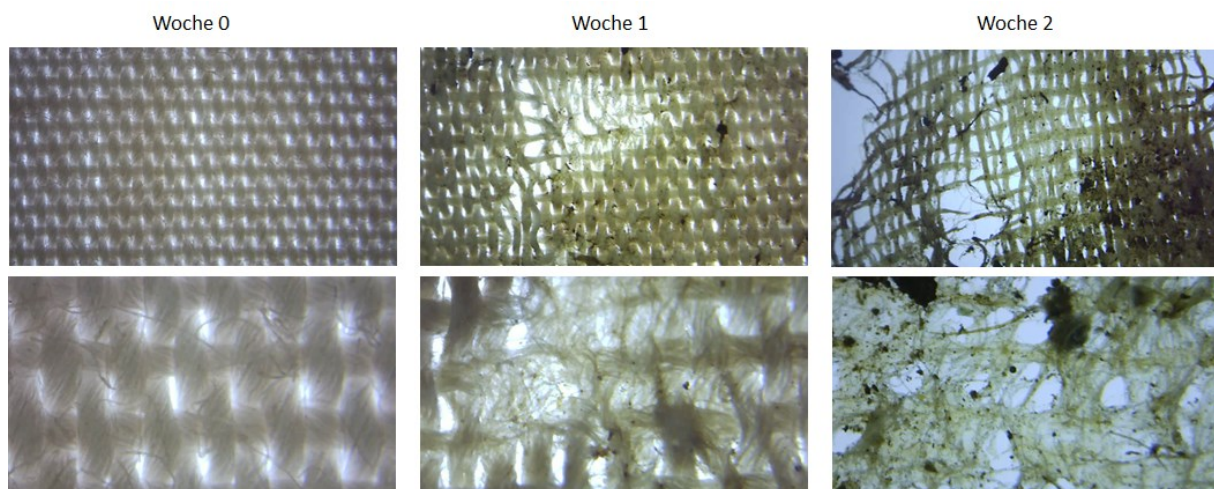


Abbildung 6: Mikroskopische Aufnahmen der Stoffproben

Woche 0: vor dem Erdeingrabetest, nach Woche 1 und nach Woche 2.

Die Entwicklung des Masseverlustes der Stoffproben in den beiden Durchgängen ist in Abbildung 7 dargestellt. Im ersten Durchgang zeigten die Stoffproben nach 40 Tagen einen Masseverlust von ca. 95 %. Allerdings konnte auch nach längerer Verweildauer kein weiterer Abbau festgestellt werden. Dies betraf allerdings hauptsächlich die Endstücke der Stoffproben. Eine Erklärung hierfür kann sein, dass nahe an der Oberfläche, wo sich die Enden der U-förmig eingegrabenen Stoffproben befanden, die Umweltbedingungen für die Mikroorganismen weniger ideal waren, insbesondere den Wassergehalt betreffend. Im Gegensatz hierzu zeigte sich im zweiten Durchgang bereits nach 21 Tagen ein Masseverlust von 95 %. Nach 35 Tagen waren die Stoffproben vollständig zersetzt. Allerdings waren die Abbauraten im zweiten Durchgang nur in der zweiten und dritten Woche signifikant höher ($p < 0,0001$; $p = 0,004$) als im ersten Durchgang.

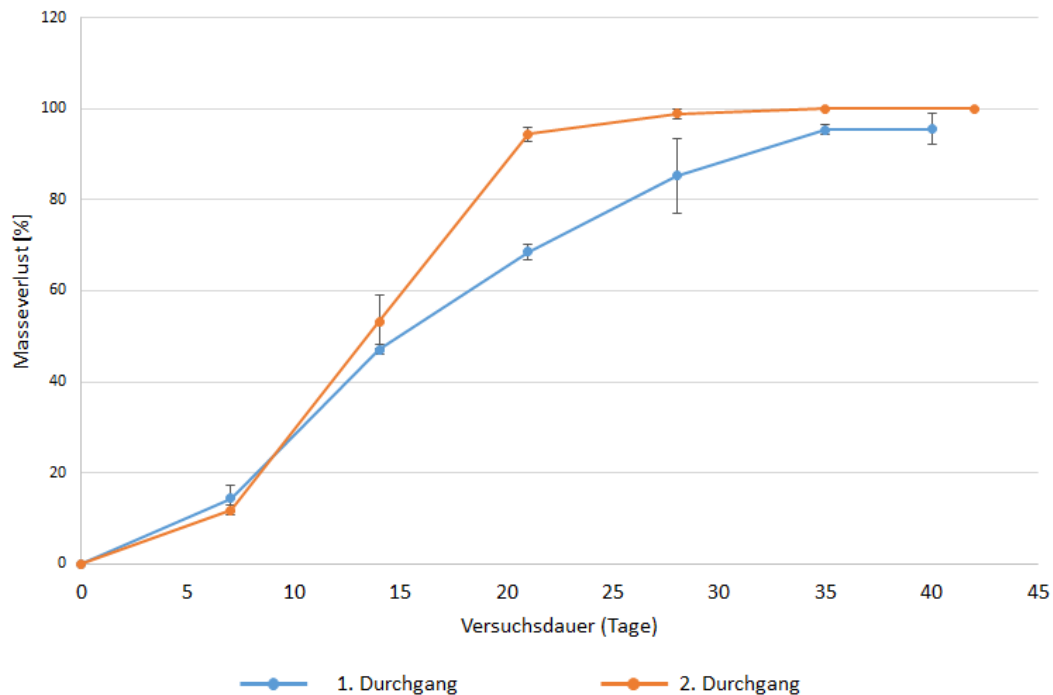


Abbildung 7: Biologischer Abbau der Stoffproben während des Erdeingrabetests
Mittelwerte und Standardabweichung (n = 3).

Der schnellere Abbau der Stoffproben im zweiten Durchgang könnte mit einer Anpassung der Mikroorganismen im Testsubstrat an das Material der Stoffproben erklärt werden. Der vollständige Abbau im zweiten Durchgang kann auf das vollständige Eingraben der Stoffproben im Testsubstrat zurückgeführt werden.

3.2 Ergebnisse des Wässerungstests

Der Gewichtsverlauf der Stoffproben während des Wässerungstests ist in Abbildung 8 dargestellt. Während der ersten drei Wochen des Wässerungstests wurde ein signifikanter Gewichtsverlust von 2 % ($p < 0,0001$) festgestellt, der mit der Auswaschung von geringen Mengen an leicht löslichen Bestandteilen erklärt werden könnte. Ab der vierten Woche stieg das Gewicht wieder, und zwar signifikant um 3 %, und blieb auch während der nächsten Woche auf diesem Niveau. Diese Gewichtszunahme könnte auf die Bildung eines Biofilms auf den Stoffproben zurückzuführen sein. In der sechsten Woche trat wiederum ein signifikanter Gewichtsverlust auf, der mit dem Absterben des Biofilms aufgrund der Erschöpfung der verfügbaren Nährstoffe erklärt werden könnte. Während des sechswöchigen Tests wurde kein signifikanter Abbau der Stoffproben festgestellt.

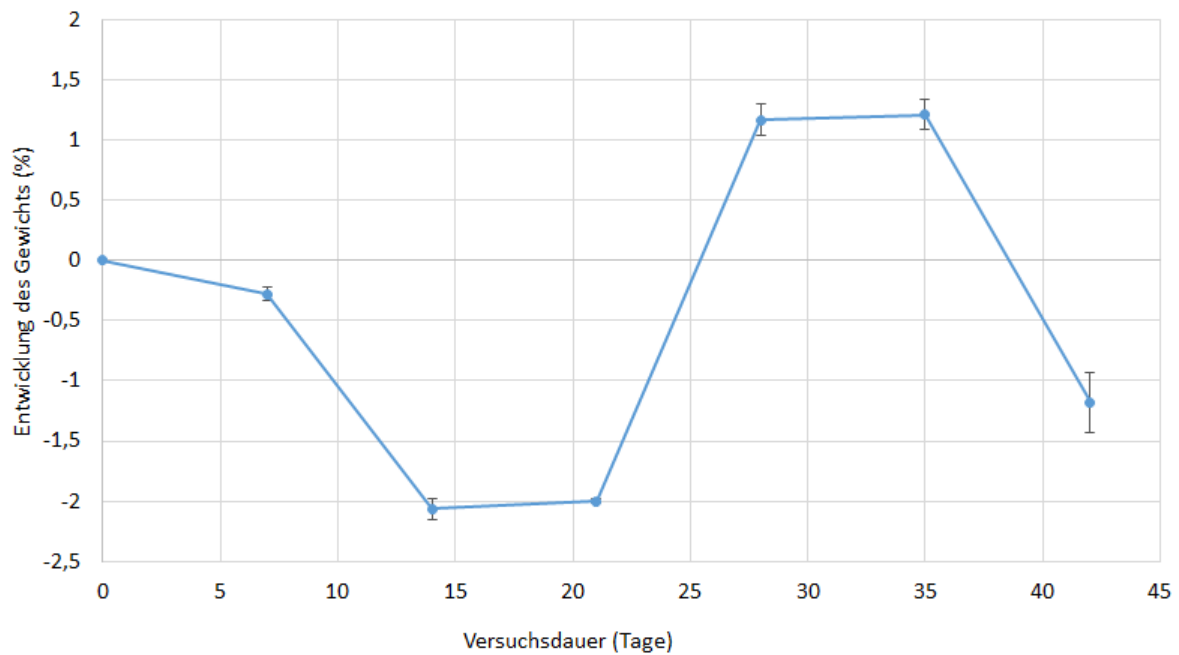


Abbildung 8: Entwicklung des Gewichts der Stoffproben während des Wässerungstests
Mittelwerte und Standardabweichung (n=3)

3.3 Entwicklung der oTR-Gehalte im Verlauf des Erdeingrabetests

Hier sollte untersucht werden, ob sich das Einbringen der Stoffproben in das Testsubstrat auf die oTR-Anteile sichtbar auswirkt. Es muss vorausgeschickt werden, dass zwar einerseits die Kohlenstoffverbindungen der organischen Substanz in einem Substrat während des Abbaus durch die Mikroorganismen im aeroben Milieu unter Sauerstoffverbrauch zu CO_2 umgewandelt werden. Auf der anderen Seite werden aber während des biologischen Abbaus auch neue organische Verbindungen aufgebaut, z.B. Biomasse und Huminstoffe. Außerdem war die Masse der Stoffproben im Verhältnis zur Masse an Substrat sehr gering. Die Aussagekraft der thermogravimetrischen oTR-Bestimmung ist daher begrenzt, zumal mit dieser Methode auch keine Informationen über die Abbaubarkeit oder Stabilität der organischen Substanz geliefert werden. Die Grafik in Abbildung 9 zeigt die Entwicklung der oTR-Gehalte während des Versuchszeitraums. Sie wird der Vollständigkeit halber mit angeführt, auch wenn sie aus den genannten Gründen nur begrenzten informativen Wert hat: Zu Beginn des Erdeingrabetests wurde bei allen untersuchten Gefäßen, auch den Kontrollen, eine geringe Zunahme des oTR beobachtet. Während des Untersuchungszeitraumes von 42 Tagen gab weder bei den Gefäßen mit Stoffproben noch bei den Kontrollen statistisch relevante Veränderungen des oTR ($p > 0,05$).

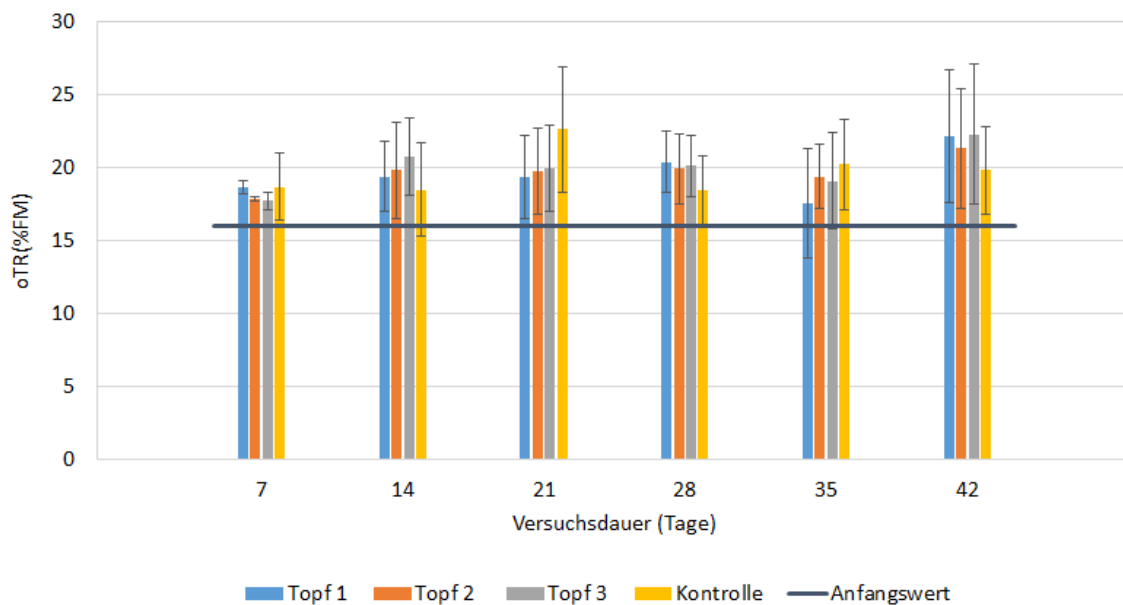


Abbildung 9: Die Entwicklung der oTR-Gehalte während des Erdeingrabetests

Testsubstrate 1-3 mit Stoffproben, Kontrolle ohne Stoffproben. Mittelwerte und Standardabweichungen.

3.3.1 Entwicklung der pH-Werte

Während des biologischen Abbaus von organischer Substanz zeigt der pH-Wert größere Schwankungen. Zu Beginn werden Makromoleküle durch von den Mikroorganismen gebildete hydrolytische Enzyme in ihre Bausteine heruntergebrochen: Proteine in Aminosäuren, Kohlenhydrate in Zucker und Fette in Fettsäuren und Glycerin. In einem weiteren Abbauschritt entstehen flüchtige Fettsäuren, wie Milchsäure, Essigsäure, Propionsäure oder auch Buttersäure. Diese organischen Säuren können den pH bis auf Werte von 4 – 5 senken, werden aber im weiteren Verlauf von den Mikroorganismen verstoffwechselt, wobei der pH wieder bis auf Werte um 8 steigen kann. Mit fortschreitender Reife erreicht der pH im Kompost annähernd neutrale bis leicht basische Werte (Hubbe u. a. 2010). Der pH als Maß für die Azidität bzw. die Alkalinität sollte sich im für die meisten Mikroorganismen optimalen Bereich von 6 - 9 bewegen. Dagegen bevorzugen Pilze ein leicht saures Milieu.

In Abbildung 10 ist die Entwicklung der pH-Werte des Testsubstrates während des Abbaus der Stoffproben dargestellt. Bei den Gefäßen mit Stoffproben ist ein leichter, aber signifikanter ($p < 0,0001$) Abfall des pH zu Beginn des Erdeingrabetests zu erkennen, der bei der Kontrolle ohne Stoffproben nicht auftrat. Dies lässt darauf schließen, dass beim mikrobiellen Abbau der Zellulose auch kurzkettige flüchtige Fettsäuren gebildet wurden. Im weiteren Verlauf stiegen die pH-Werte wieder an und pendelten sich schließlich auf einem stabilen, leicht basischen Niveau ein. Der graduelle Anstieg der pH-Werte der Kontrolle kann mit den Anteilen an Gartenkompost im Testsubstrat erklärt werden, die bereits die ersten Abbauphasen durchlaufen hatten und deren Reifeprozesses schon fortgeschritten war. Diese Beobachtungen über den Verlauf der pH-Werte während der Kompostierung zellulosehaltiger Biomassen wurden auch von Anda u. a. (2008) bei der Kompostierung von Reisschalen und von Hubbe u. a. (2010) in ihrem Überblick über die Kompostierung zellulosehaltiger Biomasse gemacht.

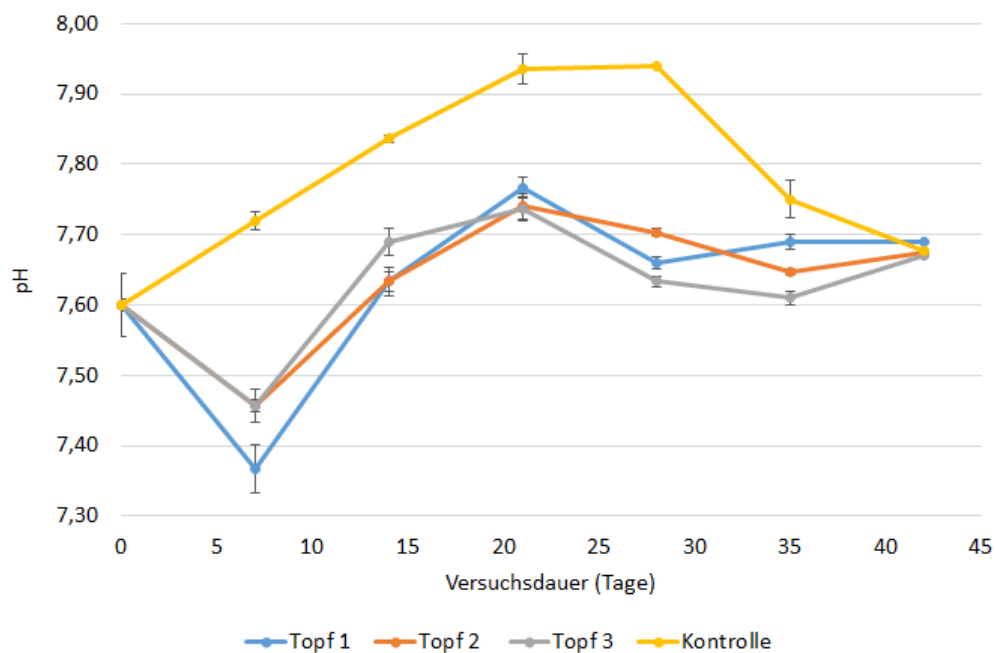


Abbildung 10: Entwicklung der pH-Werte

Gefäße 1-3 mit Stoffproben, Kontrolle ohne Stoffprobe. Mittelwerte und Standardabweichungen (n=3)

3.3.2 Elektrische Leitfähigkeit

Wie der pH-Wert liefert auch der Parameter „Elektrische Leitfähigkeit“ Informationen über die Eigenschaften eines Bodens in Bezug auf das Pflanzenwachstum. Die elektrische Leitfähigkeit (EC-Wert), ausgedrückt als mS/cm (MilliSiemens pro Meter), ist ein Parameter für den Salzgehalt in Böden: Elektrischer Strom wird von Ion zu Ion weitergeleitet - je mehr Ionen vorhanden sind, desto besser ist die Leitfähigkeit. Eine hohe elektrische Leitfähigkeit, d.h., ein hoher Salzgehalt, geht mit einer geringen Anzahl der Mikroorganismen und damit einer geringen mikrobiellen Aktivität einher (Rietz und Haynes 2003). Darüber hinaus reagieren die meisten Kulturpflanzen, je nach Wachstumsphase und Alter, mit Wachstumsstörungen - bis hin zum allmählichen Absterben - auf zu hohe Salzgehalte. So reagieren die meisten Pflanzen mit einer besseren Keimrate auf zu hohe Salzgehalte, zeigen aber im weiteren Wachstum Schäden. Andere Pflanzen, z.B. die Zuckerrübe, keimt schlechter bei höheren Salzgehalten, gedeiht aber später besser. Nur wenige Pflanzen tolerieren höhere Salzgehalte im Boden unbeschadet (Läuchli und Grattan 2007).

Die Messung der elektrischen Leitfähigkeit erfasst alle Ionen in der Lösung, inklusive solcher, die keine Pflanzennährstoffe sind, wie Natrium und Chlorid. Organischen Säuren aus dem Kompost führen ebenfalls zu einem höheren EC-Wert. Die EC-Messung gibt daher nur einen ungefähren Eindruck vom gesamten Salzgehalt, beschreibt aber nicht dessen Zusammensetzung (Schmilewski 2018).

Der Verlauf der EC-Werte über den Versuchszeitraum ist in *Abbildung 11* dargestellt. Nach einem anfänglichen Absinken blieben die EC-Werte in den Töpfen mit Stoffproben während des verbleibenden Versuchszeitraumes stabil und unterschieden sich kaum. Dies könnte daran liegen, dass durch die Zugabe der kohlenstoffreichen und mineralstoffarmen Stoffproben während deren Ab- und Umbau der Salzgehalt allmählich „verdünnt“ wurde. Da zu Beginn des Versuches die Stoffproben noch kaum abgebaut waren, entsprach der EC-Wert dem Anfangswert der Kontrolle. Allerdings lagen die EC-Werte der Kontrolle signifikant ($p < 0,0001$) über den EC-Werten der Testsubstrate mit Stoffproben. Dies könnte daran liegen, dass zu Beginn des Versuches durch die verbesserten Umweltbedingungen in der Klimakammer (30 °C, 70 % Luftfeuchtigkeit) die Mikroorganismen im verwendeten Kompost wieder aktiviert wurden und noch zugängliche organische Substanzen abbauten. Dadurch wurden

organische Säuren gebildet, die aber im weiteren Verlauf des Versuches wieder abgebaut wurden. Alle EC-Werte der Testsubstrate in den beprobten Töpfen lagen unter 2 mS/sec und unterschritten damit deutlich den Höchstwert von 3 mS/cm, der in Anlage 2, Teil 1 der Kompostverordnung¹ vorgeschrieben ist.

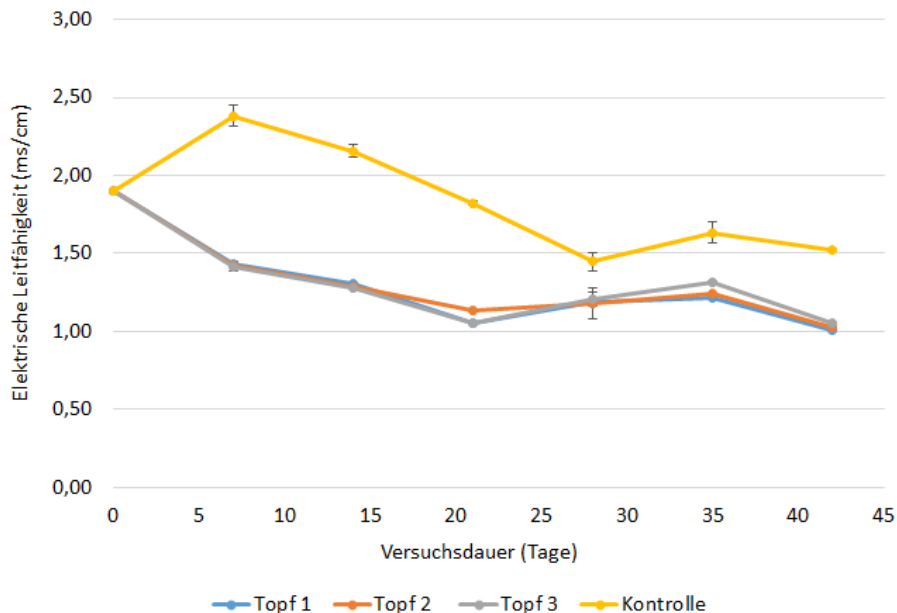


Abbildung 11: EC-Werte – Mittelwerte und Standardabweichung (n=3)

Töpfe 1-3 mit Stoffproben, Kontrolle ohne Stoffproben

3.3.3 Atmungsaktivität (AT₄)

Der Parameter Atmungsaktivität, ausgedrückt als AT₄, stammt aus der Abfallwirtschaft. Er gibt Aufschluss über das Nahrungsangebot eines Substrates für die Mikroorganismen und lässt damit Rückschlüsse auf den Abbaugrad und damit auf die Stabilität von Materialien zu, die auf Deponien abgelagert werden können. Je geringer die Atmungsaktivität, desto weniger gut kann ein Material noch biologisch abgebaut werden. Für die Deponierung von mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfällen schreibt die österreichische Gesetzgebung in der Deponieverordnung² in Anhang 1 – Grenzwerte für die Annahme von Abfällen, Tabelle 9, einen O₂-Verbrauch von höchstens 7 mg/mg TR vor.

Die Ergebnisse der Atmungsaktivitätsmessungen des Testsubstrates (Nullprobe) sowie des Testsubstrates mit unterschiedlichen Mengen an Stoffproben (Ansätze 1 und 2) sowie mit mikrokristalliner Zellulose (Referenz) sind in Abbildung 12 dargestellt. Die Nullprobe zeigte mit einem O₂-Verbrauch von 1,74 mg/mg TR die geringste Atmungsaktivität. Dies deutet auf einen gut ausgereiften Kompost hin. Der Ansatz 1 mit 0,5 g Textilprobe zeigte eine vergleichsweise geringe Atmungsaktivität mit einem O₂-Verbrauch von 2,53 mg/g TR. Der Ansatz 2 mit 1 g Textilprobe, also der doppelten Menge, war mit einem O₂-Verbrauch von 1,51 mg/g TR sogar noch wesentlich niedriger. Im Vergleich hierzu war die Atmungsaktivität der Referenz mit der mikrokristallinen Zellulose mit einem O₂-Verbrauch von 11,89 mg/mg TR annähernd fünf Mal so hoch.

¹ Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Qualitätsanforderungen an Komposte aus Abfällen (Kompostverordnung) StF: BGBl. II Nr. 292/2001

² Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Deponien (Deponieverordnung 2008 – DVO 2008) StF: BGBl. II Nr. 39/2008

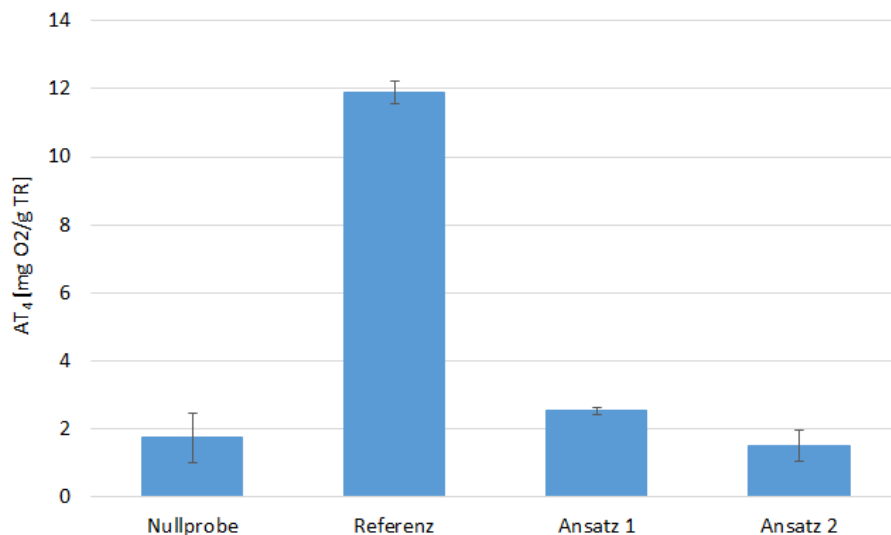


Abbildung 12: AT₄ - Spezifischer Sauerstoffverbrauch nach 4 Tagen

Mittelwerte und Standardabweichungen (n=3) (Nullprobe: nur Testsubstrat; Referenz: 1 g mikrokristalline Cellulose; Ansatz 1: 0,5 g Stoffproben; Ansatz 2: 1 g Stoffproben)

Diese Beobachtungen legen die Schlussfolgerung nahe, dass ein höherer Anteil an Baumwolle von den Mikroorganismen innerhalb von vier Tagen nicht so ohne Weiteres abgebaut werden konnte. Dies resultiert in geringeren Abbauraten, die sich wiederum in einem geringeren O₂-Verbrauch widerspiegeln.

Der Aufbau einer Baumwollfaser ist in Abbildung 13 schematisch dargestellt. Der Zelluloseanteil in Baumwolle liegt in einer hoch polymerisierten Form vor. Er ist daher für die Mikroorganismen schwer zugänglich. In der Regel kann er auch nur durch eine Reihe von synergistischen, aufeinander angepassten Bakteriengruppen abgebaut werden (Ljungdahl und Eriksson 1985). Die mikrokristalline Zellulose wurde dagegen aufgrund ihrer depolymerisierten und damit für die Mikroorganismen leichter zugänglichen Struktur sehr rasch abgebaut.

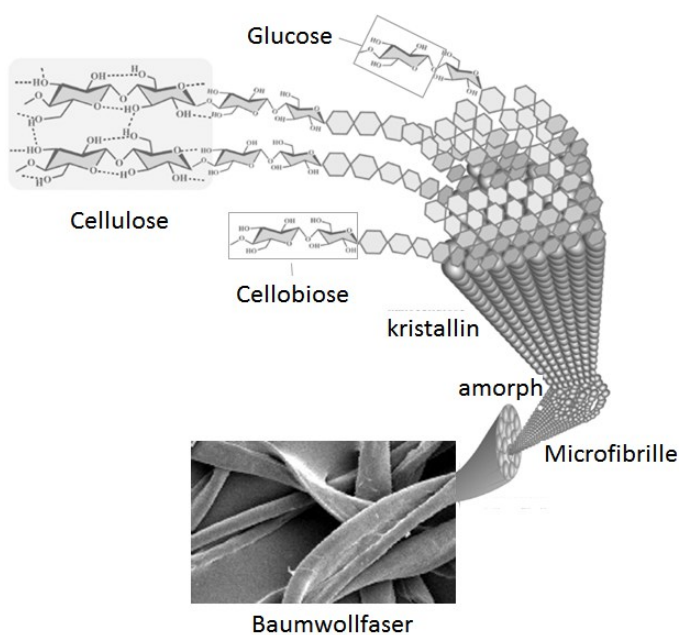


Abbildung 13: Schematischer Aufbau von Baumwollfasern

(eigene Darstellung nach Postnova u. a. 2018)

Darüber hinaus kann vermutet werden, dass die mikrobielle Gemeinschaft im verwendeten Testsubstrat beim ersten Durchgang noch nicht an das Material Baumwolle angepasst war. Diese Vermutung wird durch den beobachteten schnelleren Abbau der Stoffproben beim zweiten Durchgang des Erdeingabetests untermauert

3.3.4 Gasbildungspotenzial (GB₂₁)

Die während des 21-tägigen Biogastests mit dem AMPTS absolut produzierten kumulierten Methanmengen sind in Abbildung 14 dargestellt. Zum Vergleich wurde auch die Gasproduktion des Impfschlammes mit abgebildet. Während die Gasproduktion der mikrokristallinen Cellulose bereits ab dem dritten Tag stark anstieg, folgte die Gasproduktion der Stoffproben nach einer Lag-Periode erst ab dem vierten Tag nach, allerdings mit einem langsameren, dafür länger andauernden Anstieg. Die Gasproduktion der mikrokristallinen Cellulose erfüllte ab dem 21. Tag das in VDI 4630 bestimmte Abbruchkriterium, so dass der Versuch beendet wurde. Die Stoffproben produzierten jedoch bis zum 25. bzw. 26. Tag noch Gasmengen, die um, bzw. etwas oberhalb, des Abbruchkriteriums von 1 % der bis dahin gebildeten gesamten Gasmenge lagen. Dieser etwas langsamere Abbau kann mit der komplexeren Struktur der Baumwolle im Vergleich zur mikrokristallinen Cellulose erklärt werden. In der Praxis sind in mesophilen (35-37 °C) Biogasreaktoren Verweilzeiten von 40-150 Tagen üblich bzw. gesetzlich vorgeschrieben³ (FNR 2016), so dass davon ausgegangen werden kann, dass Textilien aus Baumwolle in diesen Prozessen vollständig abgebaut werden.

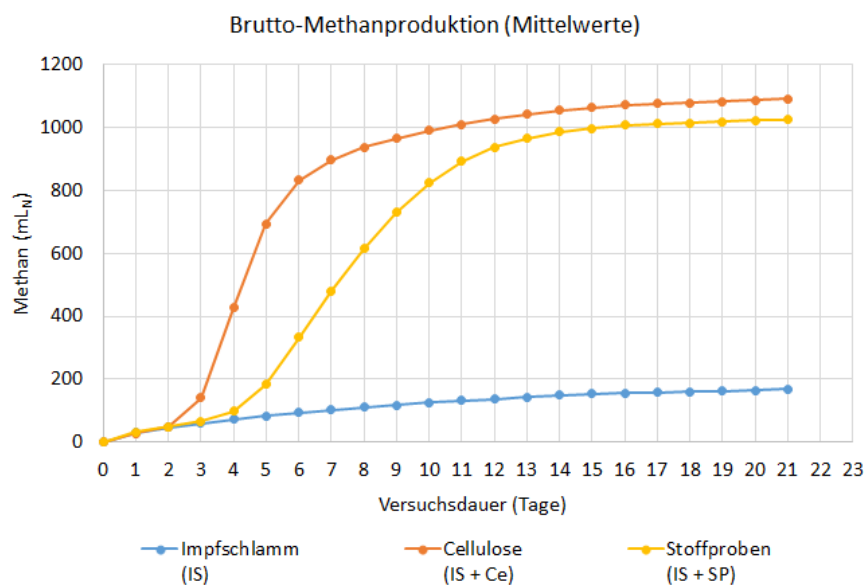


Abbildung 14: Mit dem AMPTS ermittelte kumulierte Brutto-Methanerträge

Impfschlamm [IS], IS + mikrokristalliner Cellulose (Ce, Referenz) und IS + Stoffproben (SP). Mittelwerte (n=3)

In Abbildung 15 werden die Netto-Biomethanmengen von Impfschlamm, mikrokristalliner Cellulose und den Stoffproben miteinander verglichen. Bezogen auf den oTR betrug das Methanpotenzial der Cellulose 313 mL_N/g oTR. Nach VDI 4630 sollte die mit dem Kontrollansatz gebildete Gasmenge nicht mehr als 10 % unter diesem theoretischen Methanertrag liegen und müsste damit theoretisch 336 mL_N/g oTR betragen. Dieser Wert errechnet sich wie folgt: Bei einem vollständigen Umsatz der mikrokristallinen Cellulose könnte stöchiometrisch nach der von Buswell und Boruff (1932) aufgestellten Gleichung eine Biogasmenge von 829,4 mL_N/g oTR gebildet werden. Der Methangehalt im Biogas aus Cellulose beträgt ca. 50 %. Es ergibt sich also eine Methanmenge von 414,7 mL_N/g oTR.

³ Deutschland: Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2021) §9, Absatz 5

Von dieser Methanmenge müssen ca. 10 % abgezogen werden, da der darin enthaltene Kohlenstoff für den Aufbau von Biomasse erforderlich ist (Weiland 2003, Scherer 2008). Damit würde der theoretische Methanertrag ca. 373 mL_N/g oTR betragen. Andererseits hat Fritz (2008) in umfangreichen Ringversuchen Methanmengen von 298 – 355 mL_N/g oTR für mikrokristalline Cellulose gefunden. In der vorliegenden Untersuchung lag das Methanpotenzial der Cellulose eher im unteren Bereich. Dies kann vermutlich auf eine etwas reduzierte biologische Aktivität des Inokulums zurückgeführt werden. Damit wurde mutmaßlich auch das Methanpotenzial der untersuchten Proben unterschätzt. Die Stoffproben, deren Fasern ebenfalls aus Cellulose bestehen, produzierten in 21 Tagen 289 mL_N/g oTR. In einer ähnlichen Untersuchung fanden Bayard et al. (2018) ein mittleres Methanpotenzial von 272 mL_N/g oTR für Textilien aus Baumwolle. Andere Untersuchungen ermittelten Methanpotenziale zwischen 110 mL_N/g oTR (Krause u. a. 2018) und 421 mL_N/g oTR (Zheng u. a. 2013). Es konnte damit gezeigt werden, dass die Stoffproben aus Biobaumwolle problemlos auch anaerob, und daher mit Energiegewinn, abgebaut werden können.

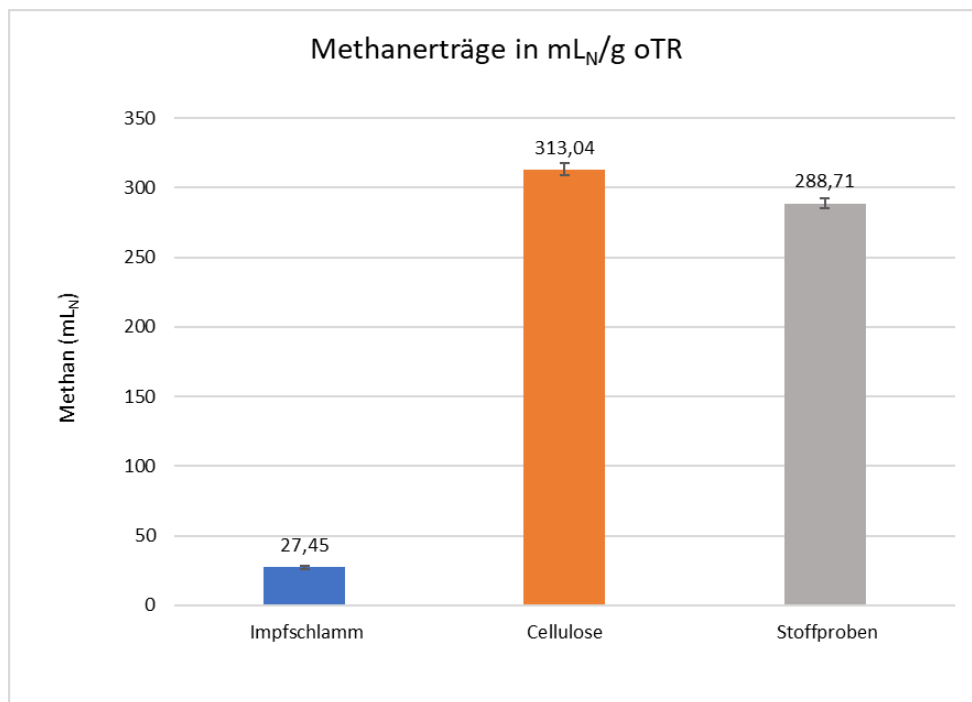


Abbildung 15: Vergleich der Methanerträge in mL_N/g oTR von Impf Schlamm, mikrokristalliner Cellulose und Stoffproben nach 21 Tagen

3.4 Kresstest

Kresse reagiert sensibel auf pflanzenschädliche Substanzen im Boden und ist damit auch ein guter Indikator zur Beurteilung der Kompost- bzw. Bodenqualität. (Smolinska and Leszczynska, 2017). Wie in der Abbildung 16 deutlich zu erkennen ist, zeigte die Kresse auf dem gebrauchten Testsubstrat aus den Erdeingrabetests wie auch auf dem Kontrollboden eine gute ungehemmte Keimung und ein zufriedenstellendes Wachstum. Es kam weder zu Vergilben noch entstand ein fauliger Geruch.



Abbildung 16: Offener Kresstest - obere Reihe: Kontrolle, untere Reihe: Testsubstrat

Die Kresse aus dem geschlossenen Kresstest in Abbildung 17 (links) zeigt in der Kontrollerde ein geringfügig besseres Wachstum, das aber statistisch nicht signifikant war.



Abbildung 17: Ergebnis des geschlossenen Kresstests – Links: Kontrolle, Mitte und rechts: Testsubstrat

Die oberirdischen Trockenmasseerträge des offenen und des geschlossenen Kresstests sind in Abbildung 18, A bzw. B, nebeneinander gestellt. Im offenen Kresstest (A) war der Trockenmasseertrag der Kresse, die im Testsubstrat wuchs, höher als der Trockenmasseertrag der Kresse im Kontrollboden. Allerdings war der Unterschied statistisch nicht signifikant ($p > 0,05$). Dennoch zeigt das Ergebnis, dass durch den mikrobiellen Abbau der Stoffproben keine Schadstoffe oder Phytotoxine in das Testsubstrat gelangt waren. Darüber hinaus schien das Testsubstrat günstigere Wachstumseigenschaften zu haben. Der geschlossene Kresstest (B) zeigte ebenfalls ein zufriedenstellendes Wachstum, auch wenn die Kresse im Testsubstrat etwas langsamer zu wachsen schien. Auch hier waren die Unterschiede nicht signifikant ($p > 0,05$).

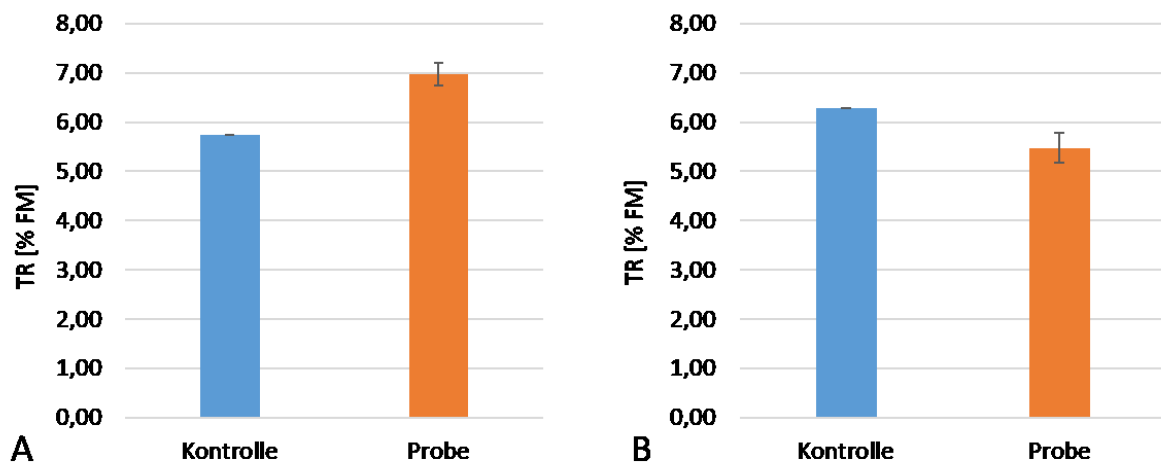


Abbildung 18: Entwicklung der oberirdischen Biomasse 5 Tage nach Aussaat. (A) offener Kressettest; (B) geschlossener Kressettest.

Mittelwerte und Standardabweichungen (n=2)

4 Zusammenfassung und Ausblick

Nachdem alle Möglichkeiten der Wiederverwendung und des Recyclings ausgeschöpft sind, sollten Materialien bzw. Produkte am Ende ihres Lebenszyklus wieder vollständig in den Naturkreislauf zurückführbar sein, ohne negative Umweltauswirkungen zu verursachen oder Deponieraum zu beanspruchen. Am Ende des Lebenszyklus von Textilien aus Naturfasern sollte deren vollständige biologische Abbaubarkeit gewährleistet sein.

Gegenstand dieser Arbeit war daher die Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit von Textilien aus biologisch erzeugter Baumwolle. Um den biologischen Abbau unter aeroben Bedingungen zu untersuchen, wurden Erdeingrabetests durchgeführt. Ein weiterer Test diente der Ermittlung der Atmungsaktivität in vier Tagen (AT_4) beim mikrobiellen Abbau von Stoffproben im Testsubstrat. Der anaerobe Abbau und das Biogaspotenzial der Stoffproben wurde mit einem Biogastest untersucht. Als Testsubstrat für den Erdeingrabetest wurde biologisch aktiver Reifekompost verwendet. Etwaige Auswirkungen der verrotteten Stoffproben aus Biobaumwolle auf das Pflanzenwachstum in dem im Erdeingrabetest verwendeten Testsubstrat wurden mit einem Kressetest überprüft, der sowohl offen als auch geschlossen durchgeführt wurde.

Die Ergebnisse zeigten, dass die untersuchten Stoffproben sowohl aerob als auch anaerob gut biologisch abbaubar waren. Beim aeroben Abbau zeigte sich eine Anpassung der Mikroorganismen an das Material der Stoffproben, da im zweiten Durchgang mit dem im ersten Durchgang benutzten Testsubstrat der Abbau der Stoffproben signifikant schneller erfolgte. Die Untersuchung der anaeroben Abbaubarkeit der Stoffproben mit dem Gasbildungstest innerhalb von 21 Tagen ergab etwas geringere Gasmengen als für die als Referenzsubstrat verwendete mikrokristalline Cellulose; andererseits war aber das Gasbildungspotenzial der Stoffproben nach 21 Tagen noch nicht erschöpft.

Der Kressetest, mit dem das benutzte Testsubstrat aus dem Erdeingrabetest auf Pflanzenverträglichkeit überprüft wurde, zeigte eine gute Keimung und ein gesundes Wachstum der Sämlinge, so dass phytotoxische Einflüsse der verrotteten Stoffproben nicht zu beobachten waren.

Mit den Ergebnissen der Untersuchung konnte gezeigt werden, dass die untersuchten Baumwolltextilien nach Ende ihres Lebenszyklus, ohne Spuren zu hinterlassen, in den Naturkreislauf zurückgeführt werden können, wobei ihre Biomasse im Fall der anaeroben Behandlung auch regenerative Energie in Form von Biogas produziert.

Es kann davon ausgegangen werden, dass z.B. Bettwäsche aus Baumwolle, wenn sie vom Nutzer als nicht weiter tauglich angesehen und daher entsorgt wird, noch mindestens einer weiteren Nutzung

zugeführt werden kann. Eine Übersicht über verschiedene Nutzungsoptionen von Alttextilien aus Baumwolle ist in Abbildung 19 dargestellt

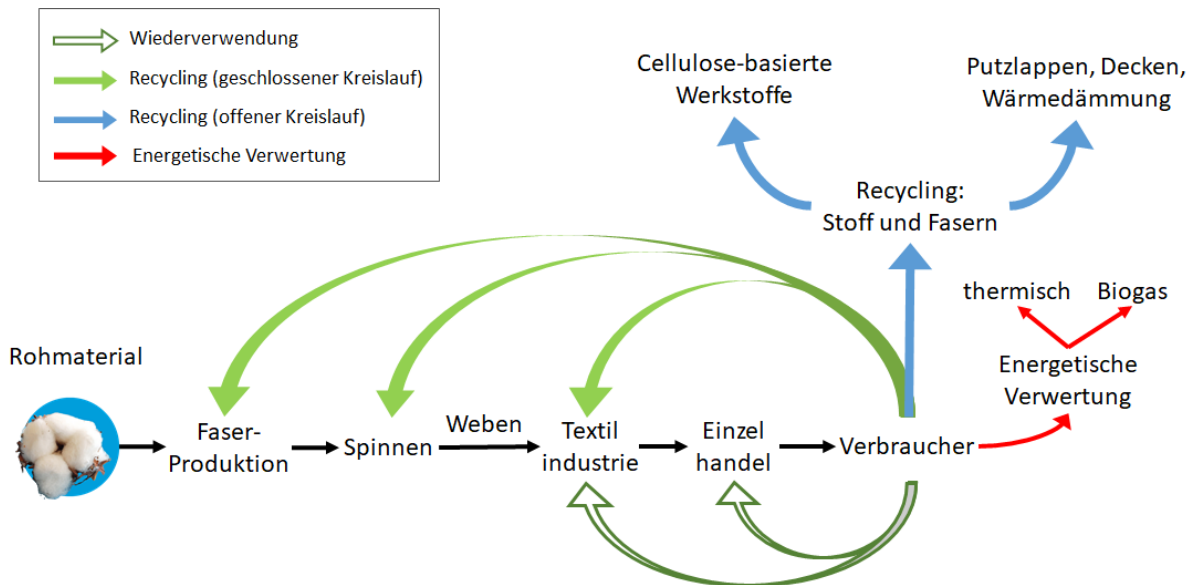


Abbildung 19: Nutzungsmöglichkeiten von Alttextilien aus Baumwolle

Verändert nach Johnson u. a. (2020)

Die weitere Nutzung kann umso hochwertiger sein, je reiner das Rohmaterial ist, da eine Kontamination durch fremde Stoffe ausgeschlossen werden kann und daher entsprechend weniger Aufwand zur Reinigung und Aufbereitung erforderlich ist. Im Fall der Textilien aus Biobaumwolle nach GOTS-Standard kann das Vorhandensein von schädlichen Chemikalien, z.B. bei der Stoffausrüstung oder Färbung, ausgeschlossen werden, und nur Knöpfe, Reißverschlüsse u.ä. sind als leicht abtrennbare Fremdkörper zu erwarten.

Daher würde es sich lohnen, diese Textilien am Ende ihres Lebenszyklus sortenrein zu erfassen, z.B. über ein eigenes Rücknahmesystem, um sie dann als Input für eine weitere Nutzung zur Verfügung zu stellen. Diese kann für die Herstellung von neuen Textilien stofflich in Form von direkter Wiederverwendung noch brauchbarer Stücke erfolgen. Weiterhin können gebrauchte Baumwolltextilien zu regenerierten Cellulosefasern aufgearbeitet, versponnen und zu neuen Stoffen verwoben werden (Liu u. a. 2019). Weiterhin können aufgrund der Hochwertigkeit der Fasern in Bezug auf Schadstofffreiheit spezielle Anwendungen in Frage kommen, z.B. die Herstellung von biokompatiblen Hydrogelen (Kabir u. a. 2018) oder Aerogelen (Long u. a. 2018), z.B. für Produkte im biomedizinischen Bereich. Aber auch eine Vielfalt anderer Anwendungen, wie die Herstellung von Spezialfiltern und -Beschichtungen, können interessante Optionen für die weitere Verwendung der Zellulosefasern der abgelegten Textilien aus Biobaumwolle sein.

Die Wahl der Folgeanwendungen hängt von vielen Faktoren ab; unter anderem sind neben der technischen Reife der ins Auge gefassten Prozesse vor allem auch ökologische und ökonomische Aspekte zu berücksichtigen und gegeneinander abzuwägen.

5 Literaturverzeichnis

- Altenbuchner C, Larcher M, Vogel S (2016) The impact of organic cotton cultivation on the livelihood of smallholder farmers in Meatu district, Tanzania. *Renewable Agriculture and Food Systems* 31: 22–36. <https://doi.org/10.1017/S1742170514000416>
- Anda M, Syed Omar SR, Shamshuddin J, Fauziah CI (2008) Changes in properties of composting rice husk and their effects on soil and cocoa growth. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 39: 2221–2249. <https://doi.org/10.1080/00103620802289117>
- Austrian Standards Institute (2001) ÖNORM EN ISO 11721-1:2001 04 01: Textilien - Bestimmung der Widerstandsfähigkeit zellulosehaltiger Textilien gegen Mikroorganismen - Erdeingrabetest - Teil 1: Nachweis einer verrottungshemmenden Ausrüstung (ISO 11721-1:2001). 14pp.
- Austrian Standards Institute (2003) ÖNORM EN ISO 11721-2 Textilien - Bestimmung der Widerstandsfähigkeit zellulosehaltiger Textilien gegen Mikroorganismen - Erdeingrabetest Teil 2: Nachweis der Langzeitbeständigkeit einer verrottungshemmenden Ausrüstung. 9pp.
- Austrian Standards Institute (2012a) ÖNORM EN 15933:2012 10 01: Schlamm, behandelter Bioabfall und Boden - Bestimmung des pH-Werts. 9pp.
- Austrian Standards Institute (2012b) ÖNORM EN 15934:2012 10 01.
- Austrian Standards Institute (2012c) ÖNORM EN 15935:2012 10 01.
- Austrian Standards Institute (2012d) ÖNORM S 2027-4:2012 Beurteilung von Abfällen aus der mechanisch-biologischen Behandlung - Teil 4: Stabilitätsparameter - Atmungsaktivität (AT4). 20pp.
- Austrian Standards Institute (2015) ÖNORM L 1099_2015-06-15 Bestimmung der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit. 8pp.
- Bayard R, Benbelkacem H, Gourdon R, Buffière P (2018) Characterization of selected municipal solid waste components to estimate their biodegradability. *Journal of Environmental Management* 216: 4–12. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2017.04.087>
- Better Cotton Initiative (2021) Find Members. About BCI. Available from: <https://bettercotton.org/find-members/> (9. September 2021).
- Buswell AM, Boruff CS (1932) The Relation between the Chemical Composition of Organic Matter and the Quality and Quantity of Gas Produced during Sludge Digestion. *Sewage Works Journal* 4: 454–460.
- bvse (2020) Bedarf, Konsum und Wiederverwendung von Bekleidung und Textilien in Deutschland. Available from: https://www.bvse.de/images/pdf/Leitfaeden-Broschueren/150914_Textilstudie_2015.pdf.
- Delate K, Heller B, Shade J (2020) Organic cotton production may alleviate the environmental impacts of intensive conventional cotton production. *Renewable Agriculture and Food Systems*. <https://doi.org/10.1017/S1742170520000356>
- European Environment Agency. (2019) Textiles in Europe's circular economy. Available from: <https://www.eea.europa.eu/publications/textiles-in-europes-circular-economy> (10. September 2021).
- van Eygen E, Stoifl B, Bernhardt A, Brandstätter C (2021) Studie: Aufkommen und Behandlung von Textilabfällen in Österreich - Materialien zum Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2022. Vorläufige Ergebnisse. Wien
- FNR (2016) Leitfaden Biogas - Von der Gewinnung zur Nutzung. Gülzow Available from: www.dbfz.de (11. Oktober 2021).

- Fritz T (2008) Entwicklung, Implementierung und Validierung eines praxisnahen Verfahrens zur Bestimmung von Biogas-bzw. Methanerträgen. Universität Rostock
- GOTS gGmbH (2017) Global Organic Textile Standard Version 5.0. : 36. https://doi.org/10.1007/978-3-658-09701-1_12
- Gray S (2017) Mapping clothing impacts in Europe: the environmental cost. Banbury
- Hubbe MA, Nazhad M, Sánchez C (2010) Composting as a way to convert cellulosic biomass and organic waste into high-value soil amendments: A review. *BioResources* 5: 2808–2854. <https://doi.org/10.15376/biores.5.4.2808-2854>
- Johnson S, Echeverria D, Venditti R, Jameel H, Yao Y (2020) Supply chain of waste cotton recycling and reuse: A review. *AATCC Journal of Research* 7: 19–31. <https://doi.org/10.14504/ajr.7.S1.3>
- Kabir SMF, Sikdar PP, Haque B, Bhuiyan MAR, Ali A, Islam MN (2018) Cellulose-based hydrogel materials: chemistry, properties and their prospective applications. *Progress in Biomaterials* 7: 153–174. <https://doi.org/10.1007/s40204-018-0095-0>
- Krause MJ, Chickering GW, Townsend TG, Pullammanappallil P (2018) Effects of temperature and particle size on the biochemical methane potential of municipal solid waste components. *Waste Management* 71: 25–30. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.11.015>
- Latter PM, Walton DWH (1988) The cotton strip assay for cellulose decomposition studies in soil: history of the assay and development. In: Harrison AF, Latter PM, Walton DWH (Hrsg.), *Cotton strip assay: an index of decomposition in soils: ITE Symposium*, 24. NERC Open Research Archive and Centre for Ecology and Hydrology, Grange-over-Sands, 5. Available from: <http://nora.nerc.ac.uk/4961/> (21. September 2021).
- Läuchli A, Grattan SR (2007) Plant Growth And Development Under Salinity Stress. In: *Advances in Molecular Breeding Toward Drought and Salt Tolerant Crops*. Springer, Dordrecht, 1–32. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5578-2_1
- Liu W, Liu S, Liu T, Liu T, Zhang J, Liu H (2019) Eco-friendly post-consumer cotton waste recycling for regenerated cellulose fibers. *Carbohydrate Polymers* 206: 141–148. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.10.046>
- Ljungdahl LG, Eriksson K-E (1985) Ecology of Microbial Cellulose Degradation. In: Marshall KC (Hrsg.), *Advances in Microbial Ecology*. Springer, Boston, MA, 237–299. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-1-4615-9412-3_6
- Long LY, Weng YX, Wang YZ (2018) Cellulose aerogels: Synthesis, applications, and prospects. *Polymers* 8: 1–28. <https://doi.org/10.3390/polym10060623>
- Mary Rose (2021) GOTS. Unsere Werte. Available from: <https://maryrose.at/unsere-werte/> (29. September 2021).
- Partzsch L, Zander M, Robinson H (2019) Cotton certification in Sub-Saharan Africa: Promotion of environmental sustainability or greenwashing? *Global Environmental Change* 57: 101924. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.05.008>
- Postnova I, Khlebnikov O, Silant'ev V, Shchipunov Y (2018) Dimensionally stable cellulosic aerogels functionalized by titania. *Pure and Applied Chemistry* 90: 1755–1771. <https://doi.org/10.1515/PAC-2018-0706>
- Rietz DN, Haynes RJ (2003) Effects of irrigation-induced salinity and sodicity on soil microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry* 35: 845–854. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(03\)00125-1](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00125-1)
- Šajn N (2019) Environmental impact of textile and clothes industry - What consumers need to know.
- Scherer P (2008) Effizienzüberwachung und Bestimmung der Abbauraten von Biogasanlagen über die

- Bilanzierung der Kohlenstofffracht. In: 17. Jahrestreffen des Fachverbandes Biogas e.V. Eigenverlag Fachverband Biogas, Freising, 137–146.
- Schmilewski GK (2018) Kultursubstrate und Blumenerden-Eigenschaften, Ausgangsstoffe, Verwendung.
- Shah P, Bansal A, Singh RK (2018) Life Cycle Assessment of Organic, BCI and Conventional Cotton: A Comparative Study of Cotton Cultivation Practices in India. In: Benetto E, Gericke K, Guiton M (Hrsg.), Designing sustainable technologies, products and policies. Cham, 67–78.
- Siu RGH, Reese ET (1953) Decomposition of cellulose by microorganisms. *The Botanical Review* 19: 377–416. <https://doi.org/10.1007/BF02861823>
- Stöven K (2005) 286 Landbauforschung Völkerode Kalkung und Bodenleben. Braunschweig
- TextilExchange (2011) Organic cotton market report 2011.
- Weiland P (2003) Biologie der Biogaserzeugung. In: ZNR Biogastagung. Bad Sassendorf-Ostinghausen, 24.
- WTO (2021) Top 10 exporters and importers of textiles and clothing, 2019. In: World Trade Statistical Review 2020. Geneva, 99–100. Available from: www.wto.org/statistics (6. September 2021).
- Zheng W, Phoungthong K, Lü F, Shao LM, He PJ (2013) Evaluation of a classification method for biodegradable solid wastes using anaerobic degradation parameters. *Waste Management* 33: 2632–2640. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.08.015>

Unterschriften

.....
Datum

.....
Unterschrift des Auftraggebers

Paptex Textilhandels GmbH

Schillerstraße 4
6850 Dornbirn

.....
Unterschrift des Auftragnehmers

Universität Innsbruck

Institut für Infrastruktur, Arbeitsbereich Umwelttechnik
Fachgebiet Abfallbehandlung und Ressourcenmanagement
Technikerstraße 13
A-6020 Innsbruck