Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

Verbundvorhaben: Sequenziell biologisch abbaubare Geotextilien für technisch-biologische Uferbefestigungen an Binnenwasserstraßen (Bioshoreline_II)

Zuwendungsempfänger:

Teilvorhaben 1:
Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.

Teilvorhaben 2:
FKuR Kunststoff GmbH

Förderkennzeichen:

Teilvorhaben 1: 2220NR012A

Teilvorhaben 2: 2220NR012B

Laufzeit:

15.11.2020 bis 15.05.2024

Datum der Veröffentichung:

10.01.2024

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorenschaft.

Inhaltsverzeichnis

I. Kurzbericht 1

1. Aufgabenstellung 1

2. Planung und Ablauf des Vorhabens 1

4. Resümee der wesentlichen Ergebnisse 2

a) Arbeitspakete und Meilensteine 2

b) Zusammenfassung 4

II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse 5

1. Erzielte Ergebnisse 5

Arbeitspaket 17: Regelmäßige Entnahme, Prüfung und Bewertung der Geotextilproben aus dem Freilandversuch am Rhein 5

Arbeitspaket 18: Test und Evaluierung der Durchwurzelbarkeit der Geotextilprotypen in Bewuchskästen 9

Arbeitspaket 19: Entwicklung eines Optimierungskonzepts für die abbaubaren Geotextilien 13

Arbeitspaket 20: Auswahl und Erwerb Naturfasern 13

Arbeitspaket 21: Herstellung der Polymerfasern 13

Arbeitspaket 22: Herstellung von optimierten Geotextilprototypen 13

Arbeitspaket 23: Prüfung und Bewertung der optimierten Geotextilprototypen 14

Arbeitspaket 24: Entwicklung biologisch abbaubare Werkstoffe für extrudierte Bodennägel 18

Arbeitspaket 25: Herstellung extrudierter Bodennägel als Demonstratoren 19

Arbeitspaket 26: Prüfung und Bewertung der hergestellten Bodennägel 22

Arbeitspaket 27: Verbreitung der Projektergebnisse 22

2. Verwertung 22

a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen 22

b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende 22

c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende 23

d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit 23

3. Erkenntnisse von Dritten 23

4. Veröffentlichungen 24

ANHANG 25

Teilvorhaben 1: Bioshoreline – Weiterführung der Langzeituntersuchung 25

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens 25

2. Bearbeitete Arbeitspakete 25

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens 26

Teilvorhaben 2: Entwicklung und Produktion von biologisch abbaubaren Werkstoffen für extrudierte Bodennägel 27

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens 27

2. Bearbeitete Arbeitspakete 27

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens 27

I. Kurzbericht

1. Aufgabenstellung

Das Gesamtziel des Projektes Bioshoreline war die Entwicklung eines neuartigen biologisch abbaubaren Geotextilfilters (im folgenden auch Geotextil) aus nachwachsenden, einheimischen Rohstoffen, der das Anwachsen der Pflanzen in technisch-biologischen Ufersicherungen ermöglicht und sich letztendlich vollständig biologisch abbaut. Geotextilfilter werden in diesen Ufersicherungen eingebaut, um zu verhindern, dass Boden durch schiffsinduzierte Belastungen aus der Böschung ausgetragen wird, bis die Pflanzenwurzeln selbst diese Aufgabe übernehmen können. In dem ersten Teil des Verbundprojektes (FKZ 22000815, 22020815, 22020915) wurden verschiedene Geotextilprototypen hergestellt und ihre technischen Eigenschaften geprüft sowie Durchwurzelungsversuche in Bewuchskästen durchgeführt. An der Versuchsstrecke der BAW am Rhein wurden Anfang 2020 drei verschiedene Geotextilprototypen im Freilandversuch installiert. Mit diesem Freilandversuch wurde in diesem vorangegangenen Projekt Bioshoreline die Entwicklung auf das Technology Readiness Level (TRL) 5 gehoben.

Gegenstand des Folgevorhabens Bioshoreline_II ist neben der weiterführenden Prüfung, Bewertung und Diskussion der Funktionsfähigkeit und Abbaubarkeit der im Freilandversuch installierten Geotextilfilter, die Erhöhung des TRL von 5 auf 8.

Der Freilandversuch lief über die komplette Laufzeit des Forschungsvorhaben und läuft noch darüber hinaus, um nach Projektende Langzeitdaten zum Abbauverhalten der entwickelten Geotextilien zu erhalten. Wissenschaftliches Arbeitsziel für den Freilandversuch ist die Beantwortung folgender Fragen:

- Stimmt der vorhergesagte sequenzielle Abbau und damit der Funktionsverlust des Geotextils mit dem tatsächlichen Abbau bzw. Funktionsverlust im Einsatzbereich überein?
- Der untere, mittlere und obere Böschungsbereich werden unterschiedlich oft und lange eingestaut und belastet. Wie wirkt sich die unterschiedliche Lage des Geotextils auf der Böschung aus?
- Können die Weiden vor Ort unter Wasserstraßenbedingungen das Geotextil ausreichend gut durchwurzeln?
- Reichen drei Vegetationsperioden aus, damit die Pflanzenwurzeln (im Versuch Weiden in Form von Weidenspreitlagen) die Filterfunktion übernehmen können?
- Unterscheidet sich der Abbau bzw. der Funktionsverlust des Geotextils unter Steinmatratzen und unter Weidenspreitlagen?

2. Planung und Ablauf des Vorhabens

Zur Veranschaulichung des gesamten Projektablaufs und des Ineinandergreifens der Arbeitspakete sind in der folgenden Abbildung 1 der Projektablauf skizziert und die Arbeitspakete zugeordnet.

Bei Bioshoreline_II handelt es sich um ein Folgeprojekt des Forschungsvorhabens Bioshoreline, das insgesamt 16 Arbeitspakete umfasste. Zur Abgrenzung und eindeutigen Identifikation beginnt die Nummerierung der Arbeitspakete in Bioshoreline_II daher mit 17.

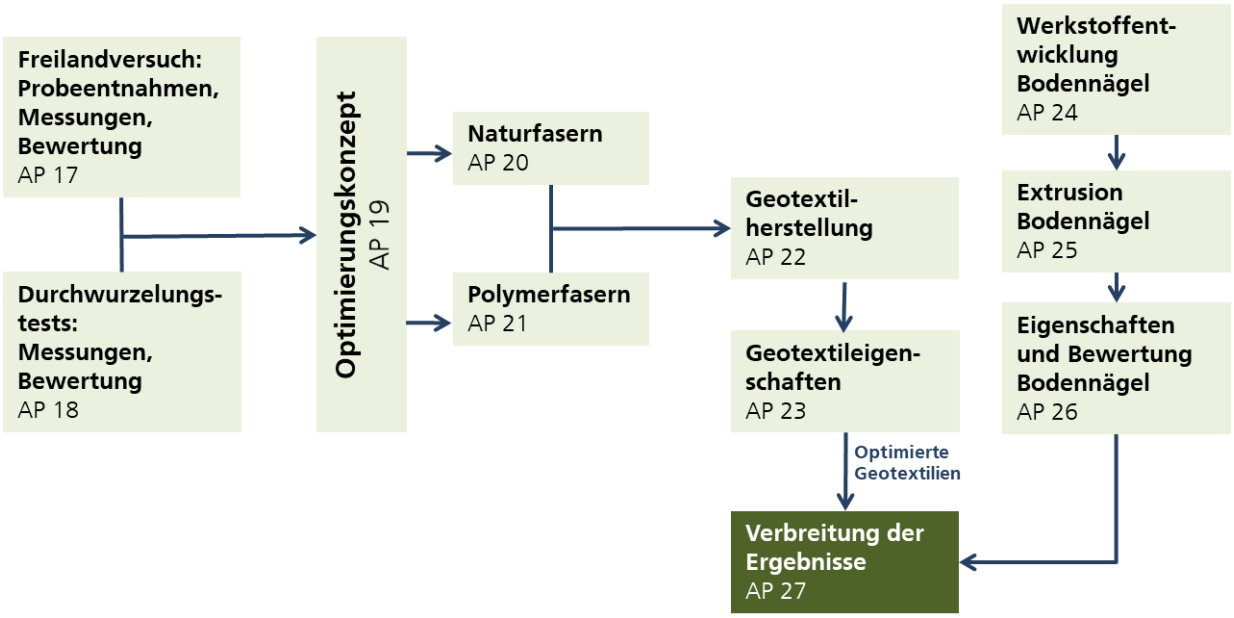


Abbildung 1: Ablaufplan des Projektes und zugeordnete Arbeitspakete

Das Vorhaben ist ein Kooperationsprojekt zwischen dem Industrieunternehmen FKuR Kunststoff GmbH und der Forschungseinrichtung Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT. Begleitet werden die Entwicklungen durch die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) als assoziierter Partner und die beiden Industrieunternehmen BNP Brinkmann GmbH& Co. KG und Indorama Ventures Fibers Germany GmbH (ehemals Trevira GmbH) im Unterauftrag.

Die notwendige Grundlagenforschung und Entwicklung wurden durch Fraunhofer UMSICHT geleistet. Die BAW war für die Anwendungsmöglichkeiten der Geotextilien an Wasserstraßen und die Prüfung der technischen Eigenschaften des Geotextilfilters, die Durchwurzelungsversuche und den Freilandversuch sowie die Beprobung der Versuchsfläche in das Projekt eingebunden. Die Entwicklungsarbeiten im Projekt starteten direkt im kleintechnischen Maßstab. Dies war durch die Beteiligung der Industriepartner aus den Bereichen der Compoundierung (FKuR), der Polymerfaserherstellung (Indorama) und der Geotextilproduktion (BNP Brinkmann) gewährleistet. Ein Unterauftrag an einen Extrudeur (Fa. Ruplex; Geldermalsen, NL) ermöglichte die Herstellung von Bodennägeln zur Verankerung der Geotextilprototypen im Ufer.

3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse

a) Arbeitspakete und Meilensteine

Arbeitspakete (AP) **(lt. Planung im Antrag)**	**Bearbeitungszeitraum** **(lt. Balkenplan im Verlängerungsantrag)**	**Zielerreichung**
AP 0 Projektmanagement	11/2020 bis 05/2024	Insgesamt fanden vier Projekttreffen statt, die online durchgeführt wurden. Daneben fanden verschiedene Gespräche zwischen den Projektpartnern bilateral statt.
AP 17 Regelmäßige Entnahme, Prüfung und Bewertung der Geotextilproben aus dem Freilandversuch am Rhein	11/2020 bis 05/2024	März 2021: Entfernung der Steinmatratzen auf Feld A1 und Einbau einer Weidenspreitlage. Entnahme von Proben. März 2022: Entnahme von 9 Proben auf den Feldern A, B, C, jeweils unten, Mitte und oben – 2 Jahre nach Einbau. März 2023: Entnahme von 9 Proben auf den Versuchsfeldern A, B, C, jeweils unten, Mitte und oben – entnommen - 3 Jahre nach Einbau. Anstelle des entnommenen Geotextils wurde das optimierte Geotextil verlegt. Die technischen Eigenschaften der ausgebauten Geotextilproben wurden im Labor der BAW ermittelt. Zwischen Einbau 2020 und 2022 hatten sich Zugfestigkeit und Stempeldurchdrückkraft nur im Rahmen der Streuung der Messwerte verändert. Die 2023 entnommenen Proben zeigen dagegen eine deutliche Reduzierung dieser beiden Kennwerte. Die für den Zustand 3 Jahre nach Einbau von der BAW geforderten Grenzwerte der mechanischen Eigenschaften (vgl. https://www.fnr.de/index.php?id=11150&fkz=22000815, Schlussbericht erstes Bioshoreline Projekt) werden zum Teil bereits leicht unterschritten. Die Veränderungen zeigen, dass Abbauprozesse begonnen haben. April 2024: Verlegung des optimierten Geotextils an einer weiteren Stelle der Versuchsstrecke unter Weidenspreitlage und Saatgutmatte.
AP 18 Test und Evaluierung der Durchwurzelbarkeit der Geotextilprotypen in Bewuchskästen	11/2020 bis 10/2021; 02/2022 bis 05/2024	Durchwurzelung in Bewuchskästen: Start der 3. Versuchsreihe (erstes Bioshorelineprojekt) der Durchwurzelungstests April 2020 und Begutachtung der Wurzel- und Sprossausbildung April 2021. Die getestete Geotextilen sind grundsätzlich durch-wurzelbar. Die Wurzelbildung in den Kästen mit Geotextil im Vergleich zu den Kästen ohne Geotextil war geringer bezogen auf Wurzelmasse. Die Durchwurzelung wird als ausreichend für die geplante Anwendung eigeschätzt. Durchwurzelung an der Versuchsstrecke: September 2023 im Versuchsfeld A1 Aufgrabung am Rhein in den Uferböschungsbereichen mit und ohne abbaubarem Geotextilfilter. Die Ergebnisse bestätigen die Resultate der bisherigen Durchwurzelungsversuche in den Bewuchskästen. Es zeigt sich auch in-situ, dass das Geotextil einen Einfluss auf das Weidenwachstum hat. In

Arbeitspakete (AP) **(lt. Planung im Antrag)**	**Bearbeitungszeitraum** **(lt. Balkenplan im Verlängerungsantrag)**	**Zielerreichung**
		dem Bereich mit Geotextil wurden am Rhein weniger Wurzeln und oberirdische Sprosse nachgewiesen als im Bereich ohne Geotextil.
AP 19 Entwicklung eines Optimierungskonzepts für die abbaubaren Geotextilien	11/2020 bis 01/2021; 05/2022 bis 07/2022	Ein Optimierungskonzept wurde entwickelt. Zur Verbesserung der Durchwurzelbarkeit wurde die dreilagige Struktur durch eine einlagige ersetzt. Zwei verschieden schnell abbaubare Naturfasern sorgen durch sequenziellen Abbau über den gesamten Querschnitt des Geotextils für mehr Kanäle zur Durchwurzelung und Durchlässigkeit.
AP 20 Auswahl und Erwerb Naturfasern	11/2020 bis 04/2021; 05/2022 bis 10/2022	Nach einer eingehenden Recherche geeigneter marktverfüg-barer Naturfasern wurden zwei verschiedene Naturfasern aus-gewählt und für die Produktion des optimierten Geotextils erworben.
AP 21 Herstellung der Polymerfasern	11/2020 bis 04/2021; 05/2022 bis 10/2022	Für einen Vergleich der Abbaugeschwindigkeiten verschiedener Polymerfasern und für die Herstellung des optimierten Geotextils wurden Polymerfasern hergestellt.
AP 22 Herstellung von optimierten Geotextilprototypen	02/2021 bis 04/2021; 08/2022 bis 01/2023	Ein optimiertes Geotextil wurde produziert und an die BAW für den Einbau an der Versuchsstrecke am Rhein verschickt.
AP 23 Prüfung und Bewertung der optimierten Geotextilprototypen	02/2021 bis 04/2021; 11/2022 bis 01/2023	Die Abbaueigenschaften der von Indorama in AP21 hergestell-ten Filamente wurden in einem Desintegrationstest ermittelt. Bikomponentenfasern aus PBS/PLA und Fasern aus PHA Compound bauten schneller ab als solche aus reinem PLA. Das optimierte Geotextil wurde bei BNP Brinkmann und bei der BAW geprüft. Eine polymerchemische Analyse der eingesetzten PLA-Fasern wurde mittels IR und GPC durchgeführt, um Referenzwerte für spätere Untersuchungen von entnommen Proben aus dem Freilandversuch nach Ende der Projektlaufzeit zu ermitteln.
AP 24 Entwicklung biologisch abbaubare Werkstoffe für extrudierte Bodennägel	11/2020 bis 04/2022	Rezepturen auf Basis von PHA wurden in mehreren Schritten entwickelt. Dabei wurden neu auf dem Markt verfügbare Werkstoffe in bestehende Rezepturen eingesetzt. In mehreren Iterationsschritten wurde die Rezeptur erfolgreich modifiziert, um die Steifigkeit zu erhöhen. Eine industrielle Herstellung des Materials auf Produktionsanlagen wurde erfolgreich durchgeführt.
AP 25 Herstellung extrudierter Bodennägel als Demonstratoren	05/2022 bis 010/2022	Ein Verfahren zur Extrusion der Bodennägel wurde mit einem kommerziell verfügbaren Basiscompound getestet, um die grundsätzliche Prozessfähigkeit zu validieren. In zwei weiteren Up-Scaling-Versuchen wurden zunächst Profile, später auch fertige Bodennägel auf Basis des im Projekt entwickelten Compounds hergestellt.
AP 26 Prüfung und Bewertung der hergestellten Bodennägel	11/2022 bis 10/2023	Die hergestellten Bodennägel waren erst zum Projektende verfügbar und konnten nicht an der Bundeswasserstraße gestestet werden. Die grundsätzliche Eignung wurde anhand der Muster geprüft und im kleinen Maßstab für gut befunden.
AP 27 Verbreitung der Projektergebnisse	11/2020 bis 05/2024	Verschiedene Veröffentlichungen während der Projektlaufzeit (s. II.4)

Meilensteine (M) **(lt. Planung im Antrag)**	**Fälligkeit** **(lt. Balkenplan im Verlängerungsantrag)**	**Zielerreichung**
M 19.1 Optimierungskonzepte sind aufgestellt.	10/2022	Erreicht im September 2022.

Meilensteine (M) **(lt. Planung im Antrag)**	**Fälligkeit** **(lt. Balkenplan im Verlängerungsantrag)**	**Zielerreichung**
M 22.1 Optimierter Geotextil-prototyp ist hergestellt.	04/2023	Erreicht im Februar 2023.
M 25.1 Demonstrator Bodennagel ist hergestellt.	10/2023	Erreicht im Mai 2024.
M 27.1 Workshop zur Verbreitung der Projektergebnisse wurde durchgeführt.	05/2024	Erreicht im Mai 2024.

b) Zusammenfassung

Bereits im ersten Forschungsvorhaben Bioshoreline wurden in mehreren Optimierungsschritten Prototypen der Geotextilfilter hergestellt und charakterisiert, so dass diese den Vorgaben der Bundesanstalt für Wasserbau zur Sicherung der Ufer weitgehend entsprechen. Dazu fand zunächst eine Auswahl geeigneter Rohstoffe statt. Die Verarbeitungseigenschaften und die biologische Abbaubarkeit der synthetischen Fasern mussten dafür angepasst und die Verarbeitungsbedingungen zur Herstellung erarbeitet werden. Für die Auswahl passender Fasern für die Prototypen wurden neben den verschiedenen Zusammensetzungen und den damit einhergehenden unterschiedlichen Abbauzeiten auch die Verarbeitungseigenschaften zu Vliesen untersucht.

Die generelle Durchwurzelbarkeit der hergestellten Geotextilfilter wurde von der BAW mit Weidenspreitlagen als Bepflanzung sowohl in speziellen Versuchskästen als auch im Freiland an der Versuchsstrecke am Rhein nachgewiesen. Dabei wurden in den Pflanzungen mit Geotextil im Vergleich zu denen ohne Geotextil weniger und kürzere Wurzeln und Sprosse festgestellt. Da sich die Durchwurzelbarkeit mit fortschreitendem Abbau des Geotextils kontinuierlich verbessern dürfte, wird die festgestellte geringere Durchwurzelung für den vorgesehenen Zweck jedoch als ausreichend eingeschätzt.

Im Januar 2020 erfolgte der Einbau der verschiedenen Prototypen an der Versuchsstrecke der BAW am Rhein bei Worms auf einem 30 m x 6 m großen Böschungsabschnitt unter Steinmatratzen. Durch wechselnde Wasserstände kann der biologische Abbau bei unterschiedlichen hydraulischen Belastungen ermittelt werden. Nach diesem Einbau wurde die erste Förderphase beendet und die weiteren Arbeiten sind formal der Förderphase Bioshoreline_II zuzuordnen.

Nach ein, zwei und drei Jahren wurden Proben entnommen und geprüft. Dabei zeigt sich, dass sich zwischen dem Einbau Januar 2020 und Probennahme März 2022 die Zugfestigkeit und Stempeldurchdrückkraft des Geotextil sowie die Molmasse der eingesetzten PLA-Fasern nur im Rahmen der Streuung der Messwerte verändert haben. Die 2023 entnommenen Proben zeigen dagegen eine deutliche Reduzierung dieser Kennwerte. Die für den Zustand drei Jahre nach Einbau geforderten Grenzwerte für Zugfestigkeit werden zum Teil leicht unterschritten. Die Veränderungen der Eigenschaften zeigen, dass Abbauprozesse begonnen haben.

Auf Basis der erzielten Erkenntnisse aus Freiland- und Durchwurzelungsversuchen erfolgte eine weitere Optimierung des Geotextils. Ziel dieser Optimierung war eine Verbesserung der Durchwurzelbarkeit. Das optimierte Geotextil wird seit März 2023 unter Steinmatratzen und seit April 2024 unter Weidenspreitlage und Saatgutmatten an der Versuchsstrecke getestet.

II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

1. Erzielte Ergebnisse

Arbeitspaket 17: Regelmäßige Entnahme, Prüfung und Bewertung der Geotextilproben aus dem Freilandversuch am Rhein

Verschiedene Geotextilproben wurden im Januar 2020 auf einem 40 m langen Uferabschnitt am Rhein (km 441,155 bis km 441,195, rechtes Ufer) eingebaut und mit Steinmatratzen abgedeckt. Ziel ist es, langfristig den biologischen Abbau der Geotextilien und deren Durchwurzelbarkeit unter Wasserstraßenbedingungen zu untersuchen und zu dokumentieren.

Eine erste Aktivität erfolgte am 1. und 2. März 2021 im stromab vierten und letzten Geotextilprobefeld. Hier wurden zur Prüfung der Durchwurzelbarkeit des abbaubaren Geotextils vor Ort gewonnene Weidenäste auf einem 4 m breiten und 6 m langen Geotextilstreifen nach Rückbau der Steinmatratzen verlegt und mit Querriegeln und Holzpflöcken befestigt (Abbildung 2).

Abbildung 2: Verlegung der Weidenspreitlage

Daraus entwickelte sich eine Weidenspreitlage als Ufersicherung. Zum Vergleich wurden Weidenäste zusätzlich auf einem 4 m breiten Streifen ohne Geotextil verlegt. Dazwischen blieb ein 2 m breiter Streifen mit Geotextil und Steinmatratze als Trennung. An dem in der Vergleichsfläche entnommenen Geotextil wurden im Prüflabor der BAW die technischen Eigenschaften (Zugfestigkeit, Durchdrückwiderstand, Durchlässigkeit und Filterstabilität BT4) ermittelt. Bei Fraunhofer UMSICHT wurden polymerchemische Analysen der eingesetzten PLA-Fasern durchgeführt.

Am 21.03.2022 wurden – 2 Jahre nach Einbau – neun Einzelproben (je 2 m x 2 m) aus den Versuchsfeldern VF A, B und C jeweils im unteren, mittleren und oberen Böschungsbereich entnommen. Dazu wurde jeweils eine Reihe Steinmatratzen (Breite 2 m) über die Böschungshöhe aufgenommen (Abbildung 3).

Abbildung 3*: links Aufnahme der Steinmatratzen im VF 1, rechts Entnahme der Geotextilproben (Fotos: BAW)*

Am 9.3.2023 wurden – 3 Jahre nach Einbau – in gleicher Weise wie bereits 2022 neun Einzelproben (je 2 m x 2 m) aus den Versuchsfeldern VF A, B und C jeweils im unteren, mittleren und oberen Böschungsbereich

entnommen. Dazu wurde jeweils eine Reihe Steinmatratzen (Breite 2 m) über die Böschungshöhe entfernt (Abbildung 1, links) und drei Geotextilproben entnommen. Nach der Entnahme wurde als Ersatzgeotextil ein optimierter biologisch abbaubarer Prototyp „X.2023“ eingebaut (Abbildung 1, rechts), so dass auch dessen Abbau langfristig im Freilandversuch getestet werden kann.

Abbildung 4: links Entnahme der Geotextilproben, rechts Einbau des optimierten Geotextilprototyps „X.2023“ (Fotos: BAW)

An den Proben wurden die technischen Parameter (Zugfestigkeit, Durchdrückwiderstand, flächenbezogene Masse, Öffnungsweite, Durchlässigkeit, Filterstabilität (Bodentypen A bis C nach TLG (2018), Schichtdicke) im Labor der BAW bestimmt. Innerhalb der ersten drei Jahre nach Einbau soll das Geotextil die vorgegeben technischen Mindestkennwerte einhalten und sich danach vollständig biologisch abbauen. Die bisherigen Prüfergebnisse aus den Jahren 2021, 2022 und 2023 zeigen folgende Ergebnisse:

Zugfestigkeit und Stempeldurchdrückkraft: Zwischen Einbau 2020 und 2022 haben sich die Kennwerte nur im Rahmen der natürlichen Streuung der Messwerte verändert. Die 2023 entnommenen Proben zeigen dagegen eine deutliche Reduzierung dieser beiden Kennwerte. Die größte Reduzierung ist bei dem Prototyp A.2017 (VF B) feststellbar, der im Vergleich zu den anderen Prototypen ohne „Biko[1]“ hergestellt wurde. Die für den Zustand 3 Jahre nach Einbau geforderten Grenzwerte werden bei den Prototypen A.2017 (VF B) und C.2019 (VF A) bereits leicht unterschritten. Nur die Proben C.2017 (VF C) erfüllen nach wie vor die Grenzwerte. Die Probe C.2017 entspricht im Aufbau der Probe C.2019 (ohne „Biko“), ist aber wesentlich fester vernadelt worden. Die Zugfestigkeit beim Einbau war dementsprechend deutlich größer als die der anderen beiden Prototypen. Ein Einfluss der Lage der Einzelproben auf der Böschung (oben, Mitte, unten) und damit der unterschiedlichen Überstauungszeiten ist bisher nicht feststellbar, könnte sich aber mit zunehmendem Abbau längerfristig zeigen. Die Veränderungen der Materialeigenschaften sind vermutlich auf die zunehmenden Abbauprozesse zurückzuführen.

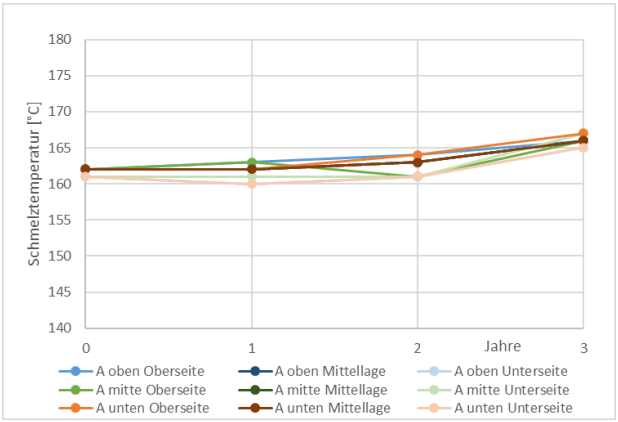
Öffnungsweite und Filterstabilität: Von 2020 (Einbau) bis 2022 konnte eine deutliche Vergrößerung der Öffnungsweite um bis zu 50 % festgestellt werden. Dies könnte auf den relativ schnellen Abbau der natürlichen Fasern (Sisal) im Geotextil zurückzuführen sein, die die Porengröße erhöhen, die Zugfestigkeit aber nicht wesentlich beeinflussen. Bei den 2023 entnommenen Proben setzt sich dieser Trend nicht fort. Die im Versuch ermittelten Öffnungsweiten sind nicht größer als 2022, zum Teil eher wieder kleiner. Hierbei ist zu beachten, dass es nicht möglich ist, vor dem Versuch vollständig den zwischenzeitlich eingetragenen Boden auszuspülen. Dieser verstopft die Poren, so dass tendenziell geringere Öffnungsweiten ermittelt werden. Die mechanische Filterstabilität konnte bei allen Proben nachgewiesen werden. Die erforderliche Durchlässigkeit (hydraulische Filterstabilität) wurde bei den 2023 entnommenen Proben allerdings überwiegend unterschritten, d. h. die Durchlässigkeit war zu gering. Ursache ist vermutlich auch hier der bereits innerhalb der 3 Jahre eingetragene Boden.

Insgesamt ist festzustellen, dass die geforderten Kennwerte hinsichtlich Zugfestigkeit und Stempeldurchdrückkraft 2023, also 3 Jahre nach Einbau leicht unterschritten werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die am Rhein getesteten Prototypen nicht unmittelbar nach Herstellung eingebaut wurden, sondern zwischenzeitlich 1 bzw. 3 Jahre gelagert wurden. In dieser Zeit hatten sich die Zugfestigkeiten bereits drastisch verringert. Die Ausgangswerte für Prototyp C.2019, die in der BAW nach Herstellung ermittelt wurden, waren um bis zu 50 % größer als die direkt vor Einbau ermittelten. Eine abschließende Beurteilung der Eignung der biologisch abbaubaren Geotextilien ist deshalb auf der Grundlage der bisherigen Ergebnisse noch nicht möglich.

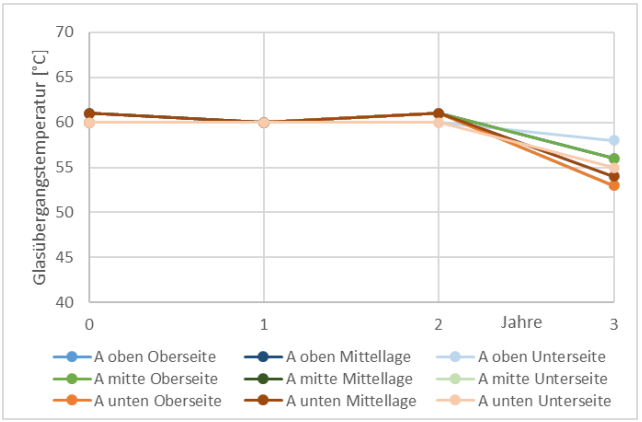
Bei den polymerchmischen Analysen zeigen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Prototypen A.2017, C.2017 und C.2019. Daher werden im Folgenden nur die Ergebnisse der Messungen am Prototyp C.2019 vorgestellt.

[1] Bikomponentenfaser

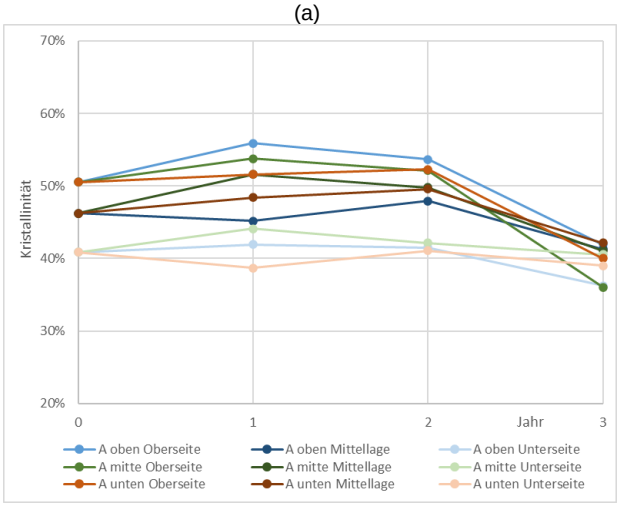
Die über dynamische Differenzkalorimetrie (DSC) ermittelte Schmelztemperatur, Glasübergangs-temperatur und Kristallinität der PLA-Fasern der entnommenen Geotextilien zeigen nach drei Jahren erste Änderungen im Vergleich zur Referenzprobe (s. Abbildung 5). Diese Änderungen können auf einen beginnenden Abbau der PLA-Fasern hindeuten. Signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Schichten des dreilagigen Geotextils (Oberseite, Mittellage, Unterseite) sind nur bei der Kristallinität zu sehen. Die Unterschiede bestanden bereits vor dem Einbau. Die Mittellage, die komplett aus modifiziertem PLA-Fasern besteht, zeigt im Freilandtest keinen Unterschied im Abbau im Vergleich zu den Decklagen (Oberseite, Unterseite), die eine Mischung aus modifizierten und Standard-PLA-Fasern enthalten. Unterschiede zwischen den einzelnen Uferhöhen (oben, Mitte, unten) konnten bislang nicht festgestellt werden.



(a)



(b)



(c)

Abbildung 5: Ergebnisse DSC Messung der PLA-Fasern aus den entnommen Geotextilien aus Feld A: (a) Schmelztemperatur, (b) Glasübergangstemperatur, (c) Kristallinität.

Für die Infrarotspektroskopie (IR) und die Gel-Permeations-Chromatographie (GPC) wurden PLA-Fasern aus dem unteren (Nahe Wasserlinie) und damit feuchteren Bereich der Versuchsfläche sowie mit direktem Bodenkontakt genommen, da für diese der schnellste Abbau erwartet wurde.

Beim Vergleich der IR-Spektren der Referenz mit den entnommenen Proben aus den Jahren 2021, 2022 und 2022 zeigen sich keine eindeutigen Hinweise auf den Abbau des Polymers (Abbildung 6). Auf Hydrolyse unter Freisetzung von Hydroxyl- und Carbonsäureendgruppen weist möglicherweise die Erhöhung der Bande bei ca. 1050 cm^{-1} (C–OH) hin. Das im Spektrum von 2021 beobachtete Tailing bei 3400-2700 cm^{-1} (COOH - H-Brücken) zeigt sich in den späteren Entnahmen nicht mehr. Die Verbreiterung der 1050ziger Bande könnte auf Wechselwirkungen von H_2O mit der C-O-Bindung hindeuten. Im Carbonylbereich bildet sich eine schwache Schulter der C=O Bande von Säureendgruppen (≤ 1700) aus. In Kombination mit den anderen Analysen kann davon ausgegangen werden, dass diese Hinweise tatsächlich auf einen Abbau des Polymers deuten.

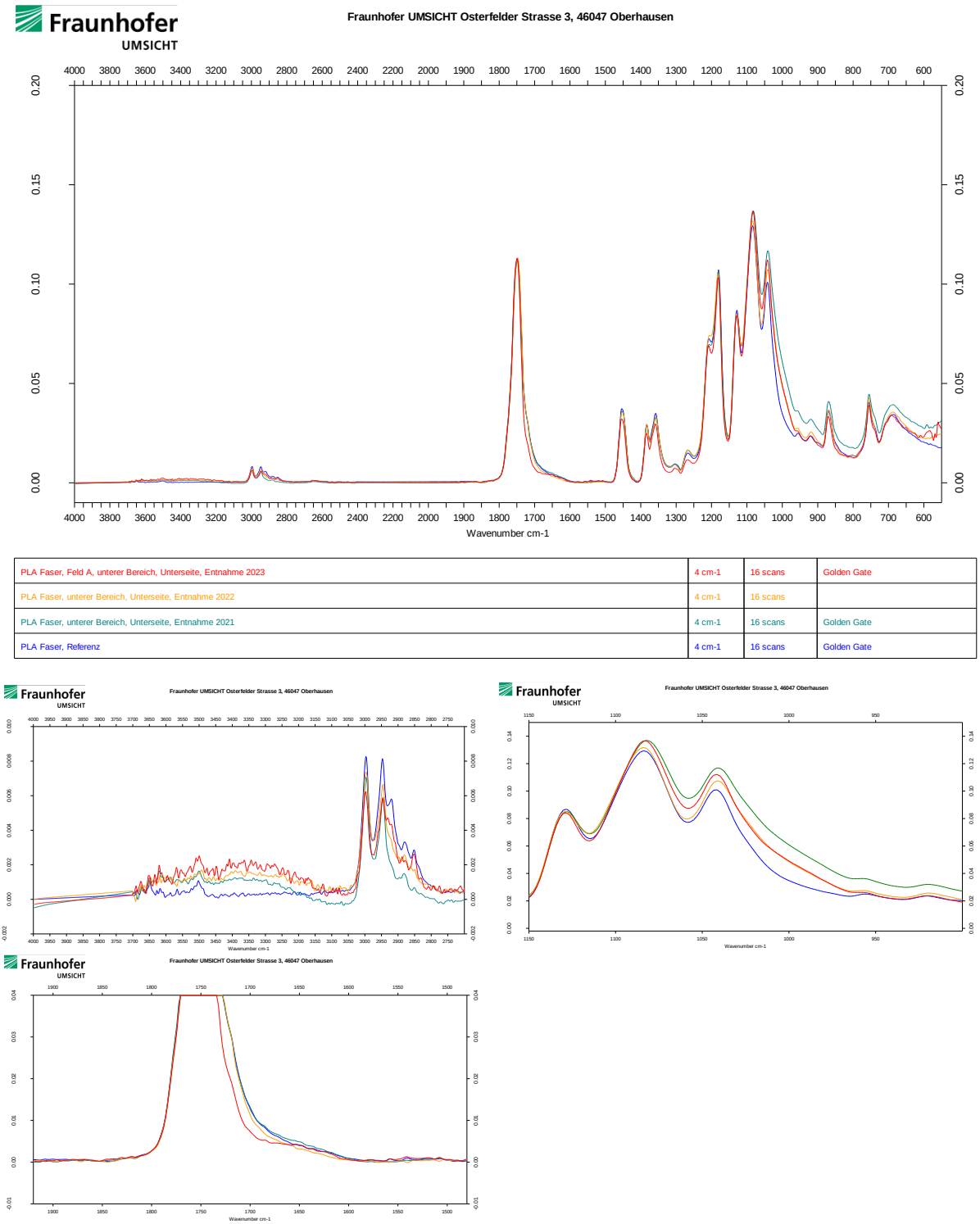


Abbildung 6: IR-Spektren der PLA-Fasern der Referenz und der 2021, 2022 und 2023 entnommenen Proben aus Feld A jeweils aus dem unteren Bereich und der bodennahen Lage des Geotextils sowie Ausschnittsvergrößerungen der Spektren

Auch der Vergleich der Molmassen der entnommenen Proben mit derjenigen der Referenz deuten einen leichten Abbau des Polymers an (s. Abbildung 7).

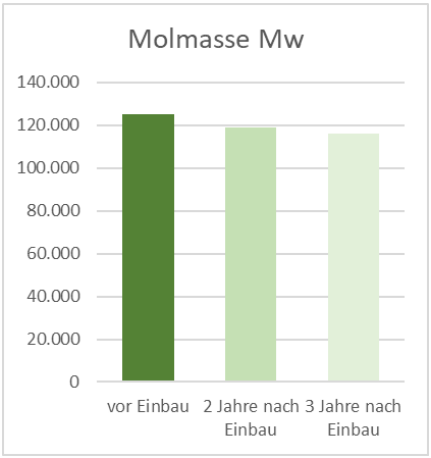


Abbildung 7: Gewichtsmittlere Molmasse Mw der PLA-Fasern der Referenz sowie der 2022 und 2023 entnommenen Proben aus Feld A jeweils aus dem unteren Bereich und der bodennahen Lage des Geotextils

Auf Grund der bisherigen Ergebnisse ist davon auszugehen, dass der Abbau der Geotextilprototypen fortschreitet. Die weitere Entwicklung wird durch die zukünftig vorgesehenen Probennahmen nach Projektende (jeweils fünf und zehn Jahre nach Einbau) dokumentiert werden. Auch für diese Proben sind sowohl mechanische Prüfungen an den Vliesen als auch polymerchemische Untersuchungen an den eingesetzten PLA-Fasern geplant.

Arbeitspaket 18: Test und Evaluierung der Durchwurzelbarkeit der Geotextilprotypen in Bewuchskästen

In verschiedenen Versuchsreihen wurde seit 2018 die Durchwurzelbarkeit der abbaubaren Geotextilproben in Versuchskästen auf dem BAW-Gelände untersucht. Die 3. Versuchsreihe startete im April 2020, die Begutachtung der Wurzel- und Sprossausbildung erfolgte vom 6. bis 9. April 2021. Wie bereits bei den ersten beiden Versuchsreihen wurden in insgesamt 6 Versuchskästen (3 mit und zum Vergleich 3 ohne Geotextil) Weidenäste zur Entwicklung einer Weidenspreitlage auf sandigem Boden eingebaut. Nach einem Jahr wurden die oberirdischen Sprosse vermessen und die Wurzeln freigespült (Abbildung 8) und detailliert untersucht.

Abbildung 8: Freigespülte Wurzeln einer Weidenspreitlage (eingebaut im Versuchskasten auf dem Geotextil)

Die Ergebnisse bestätigen die Resultate der bisherigen Versuchsreihen: Die getesteten Geotextilien sind grundsätzlich durchwurzelbar. Allerdings wurde unabhängig von den generellen Schwankungen in der Wurzelbildung in den einzelnen Versuchsreihen in den Kästen mit Geotextil im Vergleich zu den Kästen ohne Geotextil weniger Wurzelmasse gebildet (Abbildung 9), so dass ein gewisser Einfluss des Geotextils auf das Wurzelwachstum festzustellen ist. Es wird jedoch eingeschätzt, dass dieser Einfluss für die vorgesehene Anwendung nicht signifikant ist.

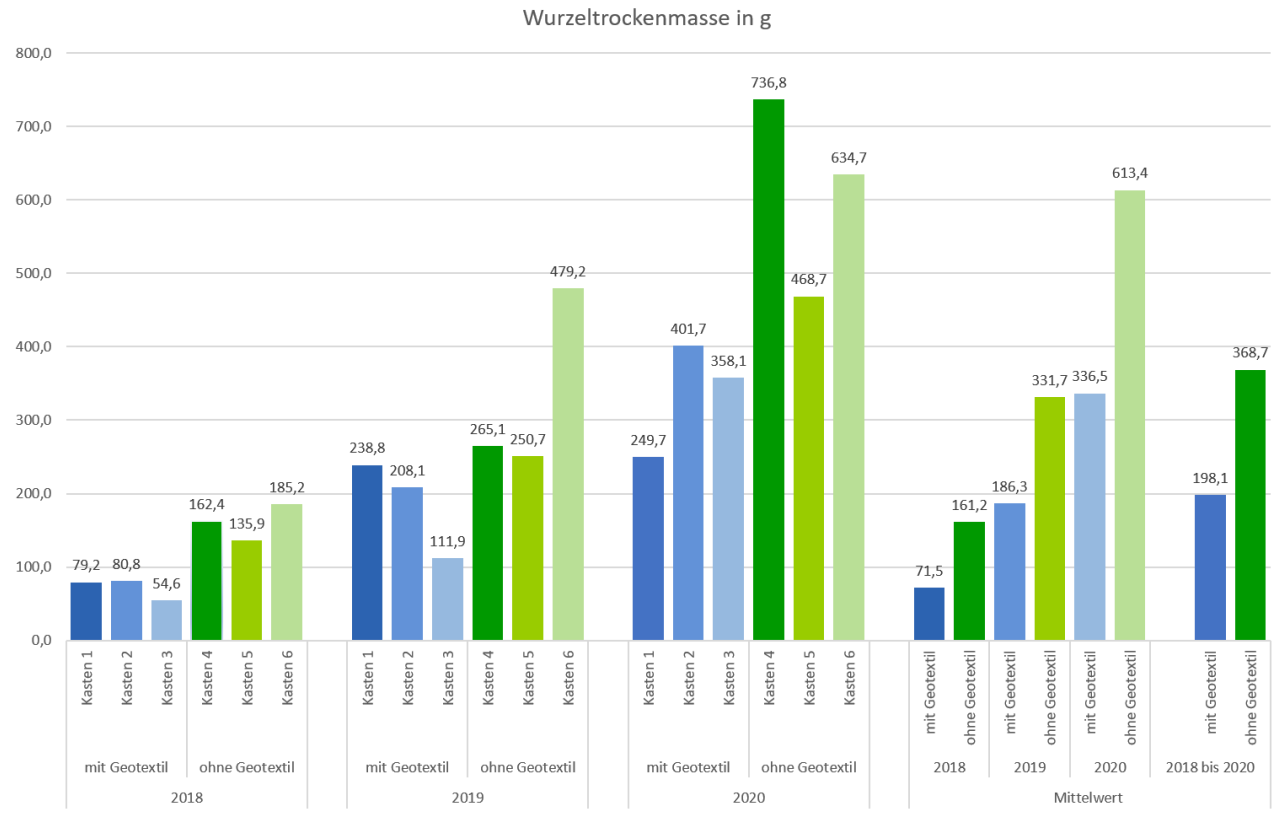


Abbildung 9: Vergleichende Darstellung der in den Versuchskästen mit und ohne Geotextil ermittelten Wurzeltrockenmassen (Ergebnisse aus den Verbundvorhaben Bioshoreline und Bioshoreline_II)

Anfang März 2021 wurden, wie in Arbeitspaket 17 beschrieben, im Versuchsfeld A1 Weidenspreitlagen auf dem abbaubaren Geotextil und zum Vergleich ohne Geotextil direkt auf dem anstehenden Boden eingebaut. Die Größe der beiden Felder betrug jeweils 4 m x 6 m. Das linke und rechte Foto in Abbildung 10 zeigt jeweils auf der rechten Seite den Einbaubereich mit Geotextil und auf der linken Seite ohne Geotextil. Die Entwicklung der Weiden wurde regelmäßig beobachtet. Maßgeblichen Einfluss auf das Weidenwachstum in der kritischen Anfangszeit hatten die Rheinwasserstände. In der wichtigen Entwicklungszeit von Mai bis fast September 2021 war der untere Bereich nahezu durchgängig vollständig eingestaut. Das hat dazu geführt, dass die Weiden sich hier nicht so gut entwickeln konnten und letztendlich abgestorben sind. Der obere Bereich, der weniger lange eingestaut war, hat sich dagegen gut entwickelt, so dass dieser Bereich für die vorgesehenen vergleichenden Untersuchungen zum Wurzel- und Sprosswachstum zur Verfügung stand (Abbildung 10).

Abbildung 10*:* Entwicklung der Weidenspreitlagen, links am 4.5.21 (Foto: WSA Oberrhein), mittig am 26.8.2021 (Foto: BAW), rechts am 6.9.2021 (Foto: WSA Oberrhein)

Die Wurzelausgrabung musste durch zu hohe Wasserstände mehrfach verschoben werden und wurde im September 2023 durchgeführt. Ziel war eine Bewertung des Einflusses des Geotextils auf das Wachstum und die Vitalität der Weiden in situ und damit der Eignung des Geotextils als temporärer Filter für technisch-biologische Ufersicherungen.

Abbildung 11 zeigt die Lage der Versuchsfläche mit (MG) und ohne (OG) Geotextil und die für die Ausgrabung vorgesehenen Flächen (OG Orange, MG grau schraffiert). MG1/ OG1 liegen im unteren, MG2/ OG2 im oberen Böschungsbereich. Die Felder haben eine Größe von 0,45 m^2. Die Unterkante der Felder MG1/ OG1 liegt etwa 1,30 m über Mittelwasser. Darunter war eine Begutachtung nicht möglich, da die Weiden in der Anwuchsphase wie oben beschrieben durch langes Hochwasser zu stark beschädigt wurden.

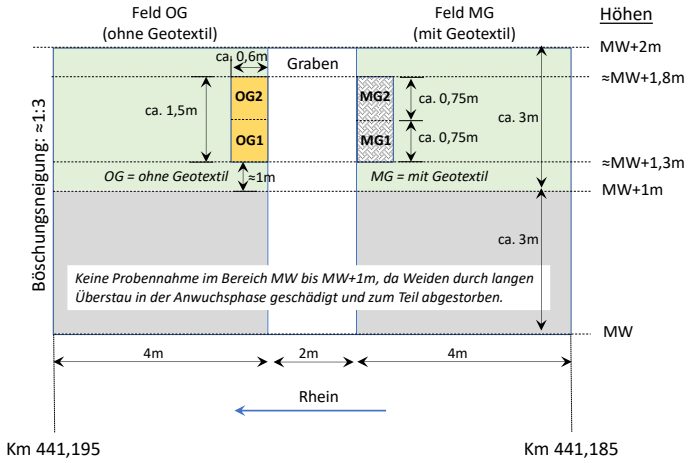


Abbildung 11: Lageskizze der Versuchsfelder am Rhein mit (MG) und ohne (OG) Geotextil für die Wurzelausgrabung.

Die Mitarbeiter vom Außenbezirk Worms-Oppenau des WSA Oberrhein stellten zunächst einen Graben zwischen den Feldern her. Von diesem aus wurden zu beiden Seiten zunächst die Versuchsfelder ausgemessen und abgesteckt (Abbildung 12).

Abbildung 12: Graben mit beidseitig anschließenden Versuchsfeldern (Blick von der Wasserseite)

Im nächsten Schritt wurden die oberirdischen Sprosse in jedem Versuchsfeld entnommen und getrennt vermessen. Anschließend erfolgte in jedem Versuchsfeld die Freispülung der Wurzeln mit einem Wasserschlauch (Abbildung 13). Das gestaltete sich aufgrund der im schluffigen Boden vorhandenen, alten Wasserbausteine sehr schwierig. Es ließ sich nicht verhindern, dass feine Wurzeln zum Teil abgerissen und mit dem Wasser weggespült wurden. Die freigelegten Wurzeln wurden fotografiert und vorsichtig entnommen.

Abbildung 13: Freispülen der Wurzeln im Feld MG1, Untergrund mit alten Wasserbausteinen durchsetzt

Ein Vergleich der freigelegten Wurzeln in den Feldern mit und ohne Geotextil zeigt die Abbildung 14 für den unteren Böschungsbereich und die Abbildung 15 für den oberen Böschungsbereich.

Abbildung 14: Vergleich der freigelegten Wurzeln mit und ohne Geotextil in den unteren Feldern MG1 und OG1

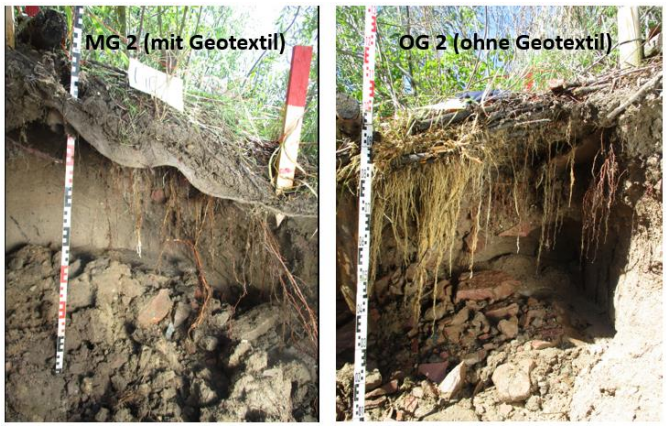


Abbildung 15: Vergleich der freigelegten Wurzeln mit und ohne Geotextil in den oberen Feldern MG2 und OG2

Bereits visuell konnte festgestellt werden, dass in den Feldern ohne Geotextil mehr Wurzeln und Sprosse vorhanden waren als in den Feldern mit Geotextil. Abbildung 16 zeigt die Auswertung der an den entnommenen Proben ermittelten Trockenmassen der Sprosse und Wurzeln in den 4 Versuchsfeldern.

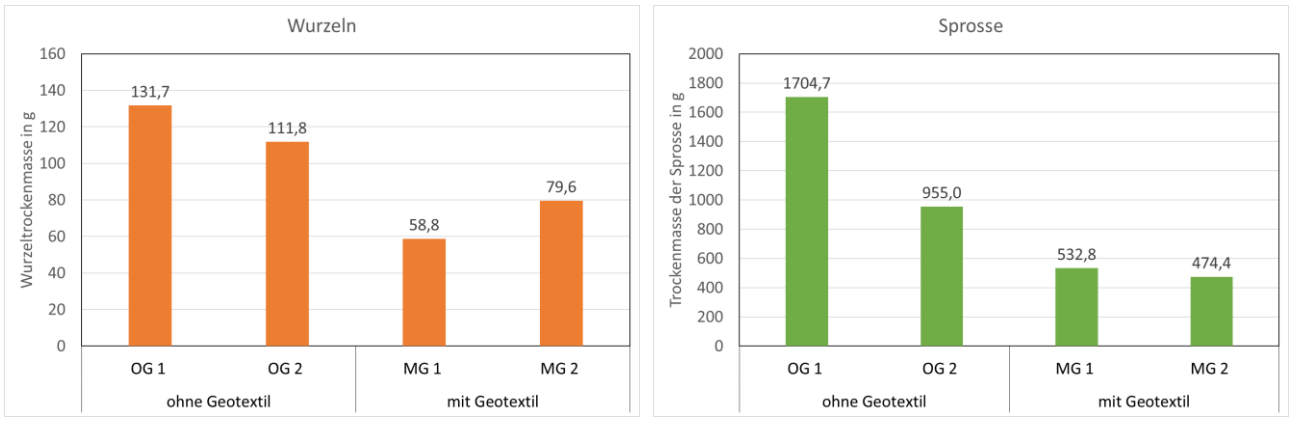


Abbildung 16: Ermittelte Trockenmassen der vor Ort entnommenen Wurzeln und Sprosse (Größe der einzelnen Versuchsfelder: 0,45 m²)

Auch beim Vergleich der Trockenmassen wird deutlich, dass sowohl die Wurzel- als auch die Spross-Trockenmassen in den Versuchsfeldern mit Geotextil geringer sind als in denen ohne Geotextil. Besonders zeigt sich dies im Vergleich der unteren Felder MG1 und OG1. Bei der Auswertung muss jedoch beachtet werden, dass neben dem Geotextil weitere Einflüsse die unterschiedlichen Ergebnisse bestimmen können. Eine Weidenspreitlage entwickelt sich nicht gleichmäßig homogen, sondern es gibt immer Bereiche mit mehr und Bereiche mit weniger Austrieben. Das hängt auch von der Anzahl und dem Zustand der Weidenäste beim Einbau ab. Die Untersuchungsbereiche wurden aus praktischen Gründen an den Grabenrändern gewählt. Für statistisch gesicherte Aussagen müssten wesentlich mehr Felder untersucht werden, was aus Zeit- und Kostengründen (diese Untersuchung war im Projektbudget nicht vorgesehen) nicht möglich war. Hinzu kommt, dass beim Freispülen und der Entnahme möglicherweise einzelne Wurzeln weggespült und dadurch nicht

erfasst werden konnten. Trotz dieser nicht vermeidbaren Unwägbarkeiten kann qualitativ die Aussage getroffen werden, dass das Geotextil zu weniger Wurzel- und Sprossmasse geführt hat. Das entspricht den Ergebnissen der bereits durchgeführten Versuche in den Bewuchskästen auf BAW-Gelände. Unter Beachtung der genannten Einflüsse und der mit fortschreitendem Abbau des Geotextils zunehmenden Durchwurzelbarkeit wird eingeschätzt, dass die ermittelte geringere Durchwurzelung für die vorgesehene Anwendung ausreichend ist.

Arbeitspaket 19: Entwicklung eines Optimierungskonzepts für die abbaubaren Geotextilien

Die bisherigen Ergebnisse des Freilandtests und die Durchwurzelungsuntersuchungen in den Bewuchskästen sowie an der Versuchsfläche am Rhein (s. AP 18) haben gezeigt, dass die eingesetzten Geotextilien die gewünschte Stabilität behalten, dennoch die Durchwurzelung verbessert werden sollte. Um das zu erreichen wurde entschieden, den dreilagigen Aufbau nicht weiter zu verfolgen. Die mittlere Schicht, die nur aus PLA-Fasern besteht, könnte die Durchwurzelung erschweren, da hier im Gegensatz zu den äußeren Schichten keine Kanäle für die Wurzel durch den schnelleren Abbau der Naturfasern entstehen. Durch einen einlagigen Aufbau, der zudem einen höheren Anteil an Naturfasern enthält, soll die Bildung von Wurzelkanälen über den gesamten Vliesquerschnitt und somit die Durchwurzelung erleichtert werden. Für den Erhalt der Stabilität soll weiterhin PLA eingesetzt werden. Da die Fasern aus modifiziertem PLA keine Vorteile im Abbauverhalten gezeigt haben, werden für das optimierte Geotextil Standard-PLA Fasern gewählt.

Arbeitspaket 20: Auswahl und Erwerb Naturfasern

In den im Vorgängerprojekt hergestellten Geotextilprototypen wurden Sisalfasern verwendet. Diese waren nach einer Vegetationsperiode weitgehend abgebaut. Die schnelle Verrottung der Naturfasern hat aber in den ersten beden Jahren nicht zu einem Verlust der geforderten mechanischen Eigenschaften geführt, daher können auch bei den optimierten Prototypen vergleichsweise schnell abbauende Naturfasern eingesetzt werden.

Für die Optimierung wurden die in Europa angebauten Naturfasern Flachs und Hanf gewählt. Beide Naturfasern unterscheiden sich in ihrer Faserfeinheit. Flachs ist eher fein und verrottet innerhalb weniger Monate, Hanf ist etwas grober und verrottet langsamer. Durch die Kombination dieser beiden Fasertypen sollen nach und nach Kanäle für die Durchwurzelung gebildet werden.

Arbeitspaket 21: Herstellung der Polymerfasern

Die in den ersten Prototypen eingesetzten PLA-Fasern bauen unter den an deutschen Wasserstraßen herrschenden Bedingungen nur langsam ab, wie bereits aus der Literatur bekannt ist. Bevor die ersten Ergebnisse aus dem Freilandversuch vorlagen, war nicht gesichert, ob ein schnellerer Abbau der Geotextilien notwendig sei. Der Abbau der Geotextilien kann durch den Einsatz synthetischer Fasern mit einer Kombination von PLA und einem anderen, schneller biologisch abbaubaren Polymer beschleunigt werden. Seit dem Projektbeginn 2016 wurden außerhalb des Projektes Bioshoreline bei Indorama Ventures Fibers Germany GmbH (ehemals Trevira GmbH) Spinnverfahren für die Herstellung von PBS/PLA-Bikofilamenten und Filamenten aus PHA Compound entwickelt. Mit diesen Fasern wurden bei Fraunhofer UMSICHT Abbautests durchgeführt (s. AP 23).

Die Ergebnisse aus dem Freilandversuch zeigten allerdings, dass die Abbaugeschwindigkeit von reinen PLA-Fasern für die Geotextilien passend war. Außerdem zeigten die im ersten Bioshoreline Projekt entwickelten modifizierten PLA-Fasern keine Unterschiede in der Abbaugeschwindigkeit. Daher wurden für die Herstellung der optimierten Geotextilien bei Indorama 566 kg Standard Mono-PLA Fasern (T400) mit 6,7dtex und 60mm Schnittlänge hergestellt.

Arbeitspaket 22: Herstellung von optimierten Geotextilprototypen

Im Februar 2023 wurden bei Brinkmann 250 lfm Krempelvlies aus 50 % PLA-Fasern, 25 % Flachs- und 25 % Hanffasern produziert. Das Flächengewicht des optimierten Geotextils liegt bei etwa 900 g/m².

Der neue Prototyp wurde im März 2023 in den Versuchsfeldern am Rhein eingebaut, um langfristig die Veränderung der Kennwerte und damit den biologischen Abbau zu dokumentieren. Im April 2024 erfolgte die Verlegung des optimierten Geotextils an einer weiteren Stelle der Versuchsstrecke unter Weidenspreitlage und Saatgutmatte. Hier soll die Durchwurzelbarkeit des Geotextils getestet werden.

Arbeitspaket 23: Prüfung und Bewertung der optimierten Geotextilprototypen

Desintegrationstest Polymerfasern

Für Aussagen, welche Filamente aus Sicht des Abbauverhaltens für die Geotextilien am besten geeignet sind, werden die folgenden Fasern und daraus hergestellte Vliese in einem Desintegrationstest untersucht:

- PLA (als Referenz),
- PLA-PBS Bikomponentenfasern (Kern PLA, Hülle PBS),
- PHA-PLA-Compoundfasern.

Die Tests der Filamente und Vliese erfolgen unter folgenden Bedingungen:

- Substrat Mutterboden, 23 °C, 50 % Luftfeuchte, ca. 20 % Bodenfeuchte, Entnahme nach 2, 4, 8 und 12 Wochen,
- Substrat Komposterde, 58 °C, 90 % Luftfeuchte, ca. 50 % Bodenfeuchte, Entnahme nach 3 Tagen, 1, 2 und 4 Wochen.

Bei der Entnahme erfolgten bei Indorama mechanische Prüfungen und bei Fraunhofer UMSICHT optische, thermische und polymerchemische Analysen.

Bei den Aufnahmen im Rasterelekronenmikroskop (REM) zeigen sich bei der Alterung im Mutterboden wenig Änderungen (Abbildung 17). Im Kompost dagegen ist ein deutlicher Unterschied zwischen den verschiedenen Filamenten zu sehen. Während nach vier Wochen bei PLA noch kein Abbau zu erkennen ist (Abbildung 18), sind die Bikofasern bereits leicht und die PHA-Filamente deutlich verändert.

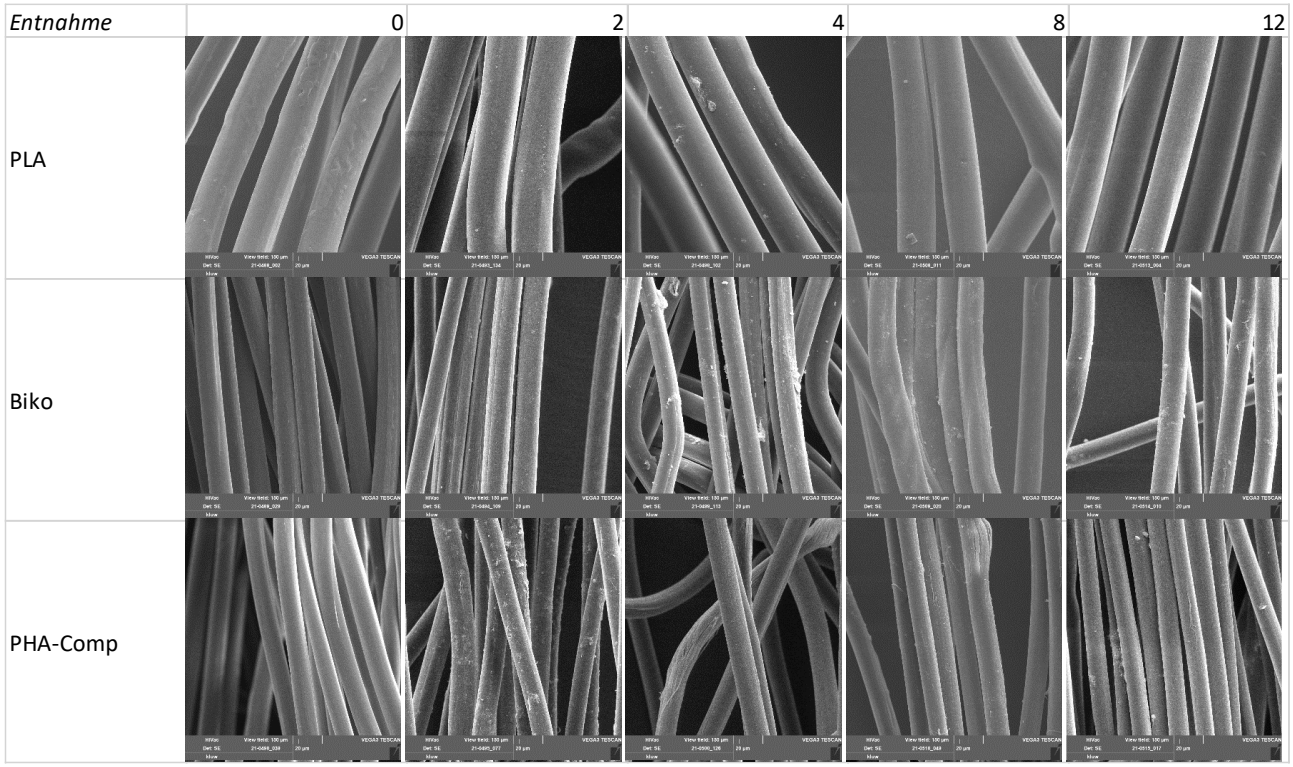


Abbildung 17: REM-Aufnahmen der Filamente nach 0, 2, 4, 8 und 12 Wochen Lagerung in Mutterboden bei 23°C

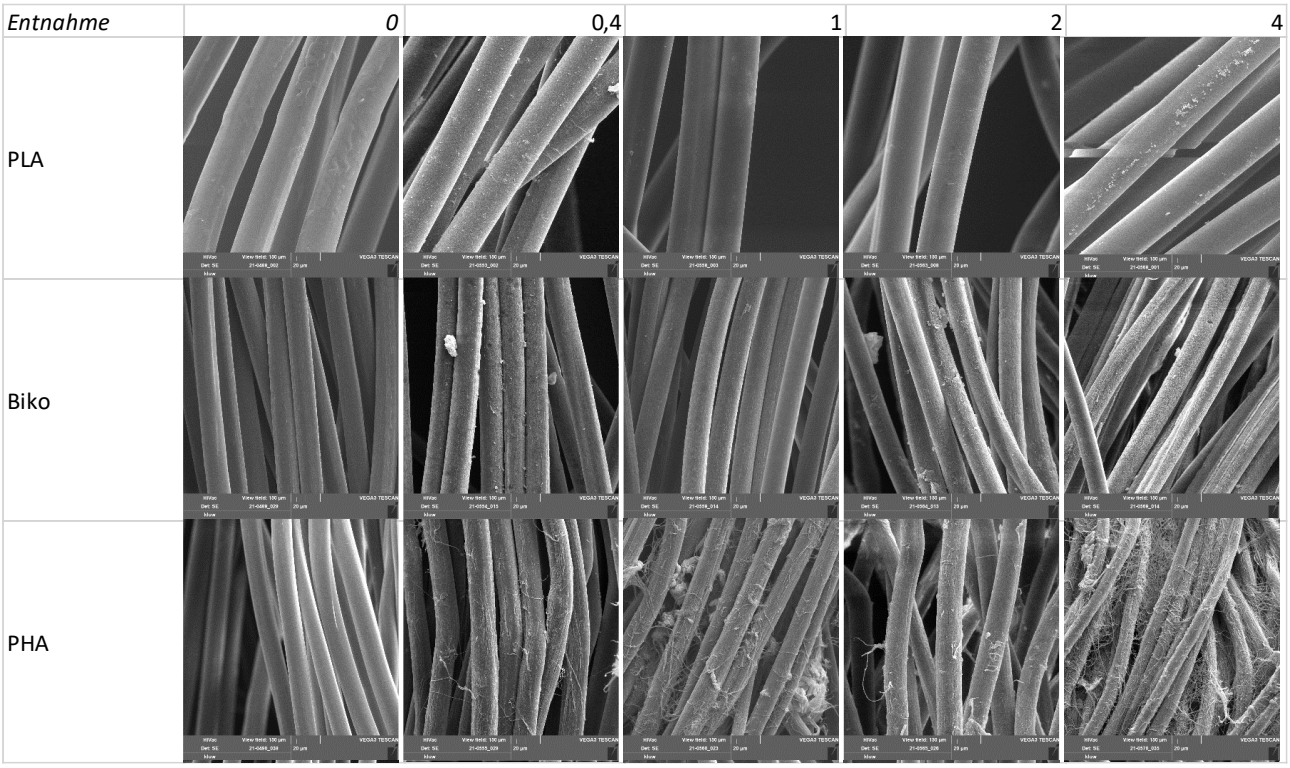


Abbildung 18: REM-Aufnahmen der Filamente nach 0, 0,4, 1, 2 und 4 Wochen Lagerung in Kompost bei 58°C

Die IR-Messungen bestätigen diese Erkenntnisse. Auch hier zeigt sich bei PLA keine Veränderung, aber bei den Bikofasern (Abbildung 19) und den PHA-Filamenten (Abbildung 20).

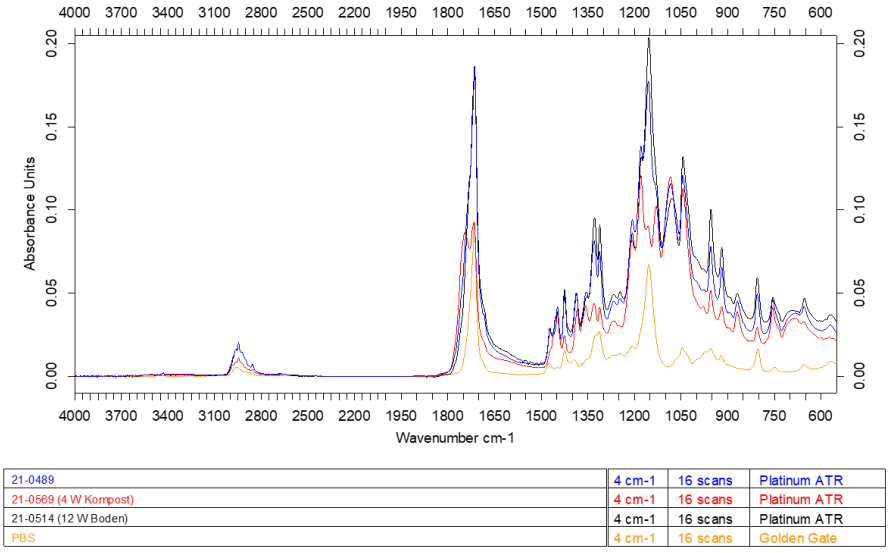


Abbildung 19: IR-Messung der PLA-PBS-Bikofasern nach 12 Wochen Lagerung im Mutterboden und 4 Wochen Lagerung in Kompost im Vergleich mit der Nullprobe und reinem PBS

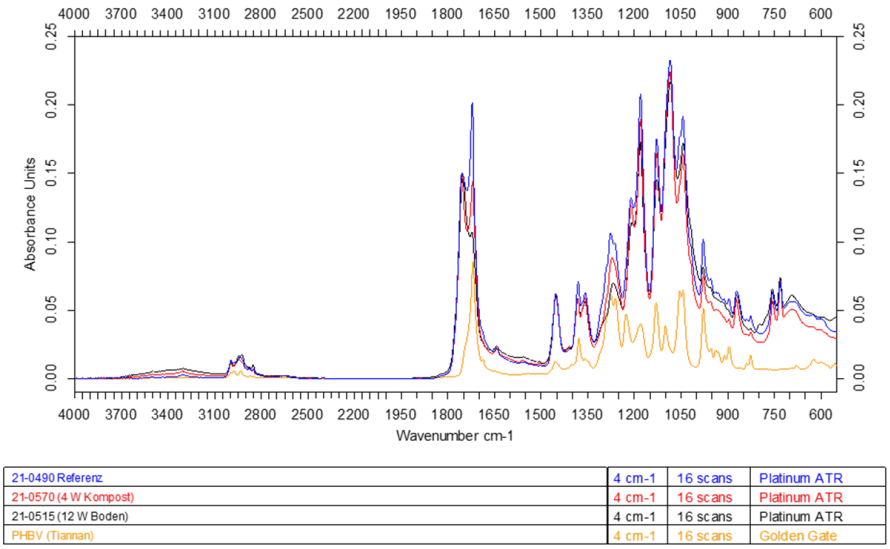


Abbildung 20: IR-Messung der PHA-Filamente nach 12 Wochen Lagerung im Mutterboden und 4 Wochen Lagerung in Kompost im Vergleich mit der Nullprobe und reinem PHBH

Auch die Untersuchungen in der Gel-Permeations-Chromatographie (GPC, Abbildung 21) und Zugprüfung (Abbildung 22) zeigen den schnellsten Abbau bei den PHA-Filamenten, gefolgt von den Bikofasern in Kompost. PLA baut in dem Vergleich am langsamsten ab.

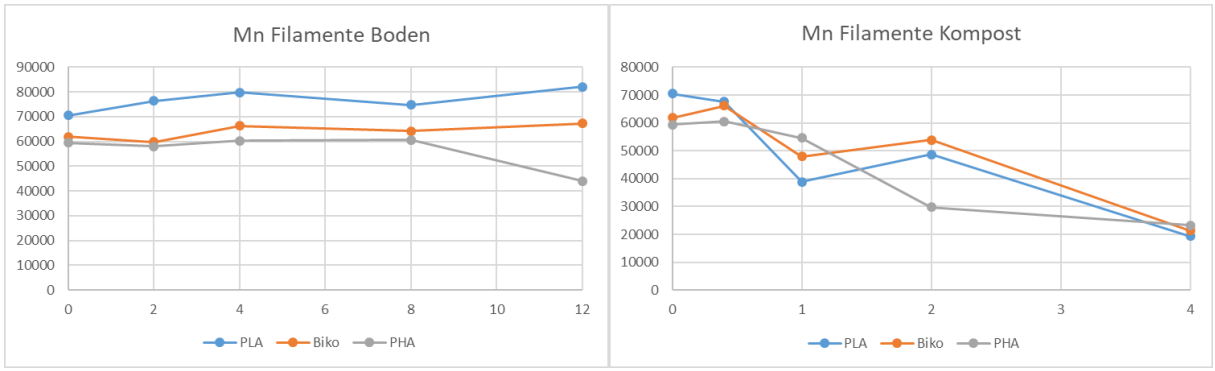


Abbildung 21: Molmasse (M_n) der Filamente nach 0, 2, 4, 8 und 12 Wochen Lagerung in Mutterboden bei 23°C (links) und nach 0, 0,4, 1, 2 und 4 Wochen Lagerung in Kompost bei 58°C (rechts)

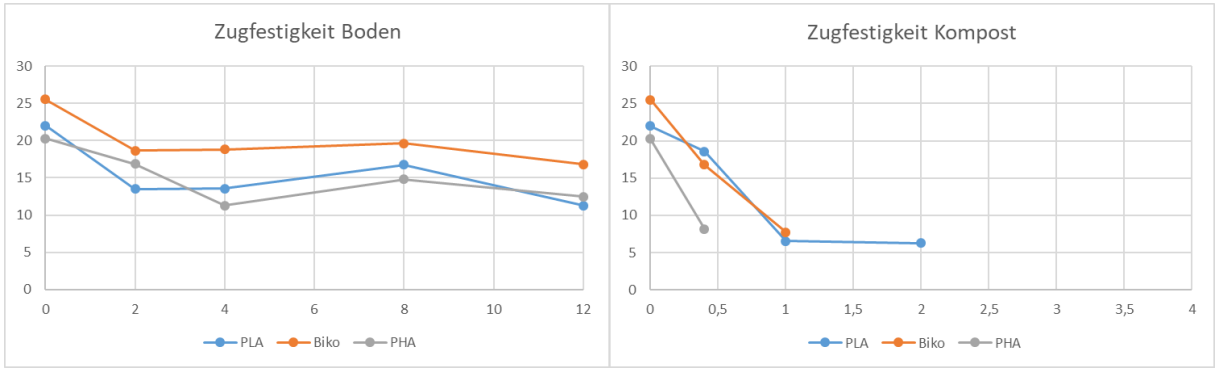


Abbildung 22: Zugfestigkeiten der Filamente nach 0, 2, 4, 8 und 12 Wochen Lagerung in Mutterboden bei 23°C (links) und nach 0, 0,4, 1, 2 und 4 Wochen Lagerung in Kompost bei 58°C (rechts)

Sollte der Freilandversuch ergeben, dass die Abbaugeschwindigkeit der eingesetzten PLA-Fasern zu gering für eine Anwendung ist, liegen mit den Biko- und den PHA-Fasern geeignete Materialien für eine Beschleunigung des Abbauverhaltens vor.

Charakterisierung des optimierten Geotextilprototyps

Die mechanischen Eigenschaften der optimierten Geotextilprototypen wurden durch BNP Brinkmann geprüft (s. Tabelle 1).

Tabelle 1: Eigenschaften des optimierten Geotextilprototypen

Kennwerte	Prüfnormen	Einheit	Sollwert	Sollwert Min.	Sollwert Max.	Istwert (Mittelwert)
Flächengewicht (100 cm²)	DIN EN ISO 9863	g/m²	900	810	990	**984**
Dicke (0,5 kPa Auflast)	DIN EN ISO 29073-2	mm	-	-	-	**10,63**
Höchstzugkraft MD	DIN EN 29073-3	N/5cm	-	400	-	**387**
Höchstzugkraft CD	DIN EN 29073-3	N/5cm	-	400	-	**334**
Höchstzugkraftdehnung MD	DIN EN 29073-3	%	-	-	-	**83**
Höchstzugkraftdehnung CD	DIN EN 29073-3	%	-	-	-	**85**
GRK/Stempeldurchdrückkraft	DIN EN ISO 12236	N	-	1500	-	**2042**

Diese und weitere technische Kennwerte wurden auch im Labor der BAW ermittelt. Die Anforderungen sind mit Ausnahme der Zugfestigkeit erfüllt, bei der die in der BAW ermittelten Werte 10 % bis 35 % unter den geforderten Werten liegen.

Die polymerchemischen Untersuchungen der PLA-Fasern aus den Geotextilien zeigen, dass die Referenzwerte für die PLA-Fasern aus dem optimierten Geotextilprototyp etwas höher liegen als die Werte des ersten Prototyps (C.2019). Das kann daran liegen, dass die Werte des Prototyps von 2019 erst 2021 gemessen wurde und durch Lagerung bereits ein leichter Abbau stattfand. Die Bestimmung der Molmasse war ursprünglich nicht für die Abbauuntersuchungen eingeplant und wurde daher erst nachträglich durchgeführt. Die Messungen der Zugeigenschaften haben ebenso einen Rückgang durch Lagerung gezeigt. Daraus folgt, dass eine Lagerung vor Einbau im Anwendungsfall mit beachtet werden muss.

Tabelle 2: Ergebnisse der GPC-Messung der beiden Prototypen

	Prototyp 2019	Optimierter Prototyp 2023
M_n [g/mol]	78.500	82.700
M_w [g/mol]	125.00	129.000
D	1,595	1,564

Auch das IR-Spektrum des Prototyps von 2019 zeigt im Vergleich mit dem von 2023 mögliche Hinweise auf Hydrolyse (s. Abbildung 23: leichte Verbreiterung der 1050ziger Bande, sehr schwache Schulter der Bande ≤ 1700 cm^{-1}).

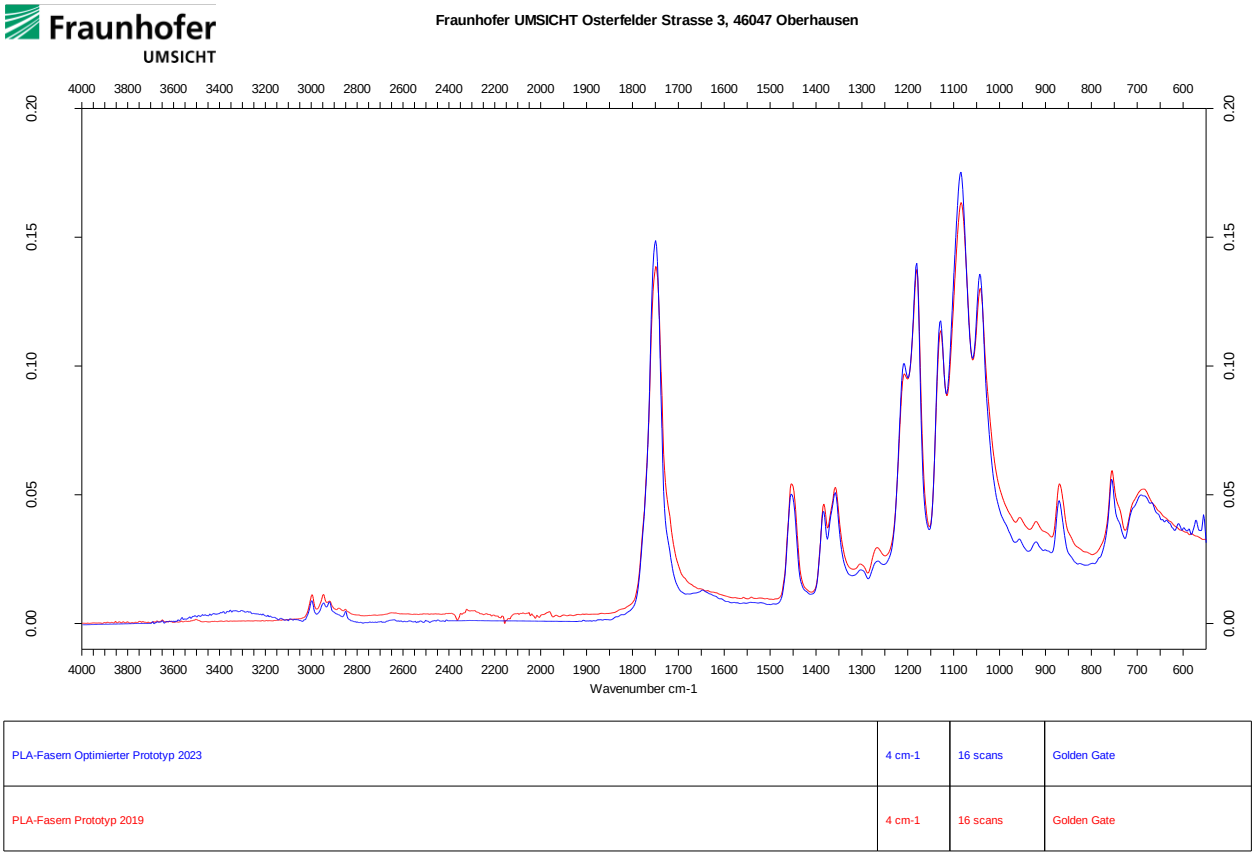


Abbildung 23: IR-Spektren des Prototyps von 2019 und des optimierten Prototyps von 2023

Arbeitspaket 24: Entwicklung biologisch abbaubare Werkstoffe für extrudierte Bodennägel

Wesentliche Anforderungen an den Erdnagel waren ein vollständiger biologischer Abbau nach Anwuchs der Uferbefestigung, sowie eine ausreichende Stabilität im Boden von mindestens drei Jahren. Zudem war eine Eignung des Bodennagels für alle Bodenarten gefordert.

Vor diesem Hintergrund wurde bei der Rohstoffauswahl neben den mechanischen und thermischen Eigenschaften auch das Abbauverhalten beachtet. Es wurde darauf geachtet, dass das daraus resultierende Material die Möglichkeit erhält als bodenabbaubar zertifiziert zu werden. Insbesondere die Polymergruppe der Polyhydroxyalkanoate (PHA) ist für die guten Abbaueigenschaften in allen Umweltkompartimenten bekannt.

Im ersten Schritt wurde aus der Gruppe der PHA ein Polyhydroxybutyrathexanoat (PHBH) mit Lignin und Talkum als Nukleierungsmittel eingesetzt und im Spritzgussprozess verarbeitet. Hierbei zeigte sich, dass sich keine ausreichend schnelle Kristallisation und damit auch Verfestigung des Probekörpers einstellt. In zwei weiteren Versuchsreihen wurden unterschiedliche Anteile an Polybutylenadipat-terephtalat (PBAT) und Polymilchsäure (PLA) zugegeben, um die Kristallisationsgeschwindigleit und die Steifigkeit des Materials zu erhöhen. Die in der dritten Versuchsreihe hergestellten Spritzgussprobekörper zeigen eine deutliche Erhöhung der Bruchdehnung bei gleichbleibend hoher Zugfestigkeit. In einer vierten Versuchsreihe wird das PHBH durch ein Polyhydroxybutyratvalerat (PHBV) substituiert. Ergebnisse der mechanischen Untersuchungen zeigen eine leichte Erhöhung der Zugfestigkeit und weiterhin eine hohe Bruchdehnung.

In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der mechanischen Charakterisierung der in den ersten vier Versuchsreihen hergestellten Compounds.

Tabelle 3: Übersicht der mechanischen Ergebnisse der Versuchreihen 1-4

Versuchs-reihe	Versuchs-nummer	Zug-E-Modul [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Dehnung bei Zugfestigkeit [%]	Bruchspannung [MPa]	Bruchdehnung [%]
V 1	**V 211803**	2381	19.4	0.9	19.2	0.9
V 2	**V 212612**	1312	17.7	3.9	16.1	6.4
V 2	**V 212613**	1124	14.2	3.7	13.9	4.5
V 3	**V 214801**	1354	18.8	4.2	17.7	6.0
V 3	**V 214802**	1181	17.1	5.9	16.5	8.1
V 3	**V 214803**	1083	17.4	7.5	14.8	17.1
V 3	**V 214804**	915.4	16.2	9.6	12.8	25.8
V 3	**V 214805**	891.6	16.3	9.9	9.2	41.3
V 4	**V 220812**	992.8	16.9	8.8	11.5	33.1
V 4	**V 220813**	1225	18.3	5.9	15.0	17.2
V 4	**V 220814**	1069	17.2	7.1	11.5	28.0
V 4	**V 220815**	1439	20.4	4.4	14.9	18.3

Zwar konnte in den ersten vier Versuchsreihen die Verarbeitbarkeit und Steifigkeit verbessert werden, jedoch war das Material insgesamt zu spröde. In einer fünften Versuchsreihe wurde ein bereits als bodenabbaubar zertifiziertes Material mit amorphem Polyhydroxyalkanoat (aPHA) modifiziert. Das daraus resultierende Compound weist sehr flexible Materialeigenschaften bei guter Verarbeitbarkeit auf (s. Tabelle 4).

Tabelle 4: Übersicht der mechanischen Ergebnisse der Versuchsreihe 5

Versuchs-reihe	Versuchs-nummer	Zug-E-Modul [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Dehnung bei Zugfestigkeit [%]	Bruchspannung [MPa]	Bruchdehnung [%]
V 5	**V 214210**	252	15	310	13	330
V 5	**V 225006**	170	15,5	540	14,5	545
V 5	**V 232101**	210	12	500		>500

Im Vergleich zu den bisher entwickelten Materialien zeigt sich eine deutliche Erhöhung der Flexibilität (geringerer Zug-E-Modul), welche auch in einer Erhöhung der Bruchdehnung zu sehen ist.

Daher sollte in einer weiteren Entwicklungsschleife die Steifigkeit wieder erhöht werden. Wie in den ersten Versuchsreihen wurde PHBH und PHBV eingesetzt. Hier zeigte sich ab einer gewissen Menge der Zugabe, dass das resultierende Compound nicht mehr kompatibel ist (Tabelle 5). Es ist zu sehen, dass eine geringe Menge an PHBH oder PHBV in die bereits zertifizierte Matrix eingebettet werden kann, doch sobald die Menge hier einen kritischen Wert übersteigt, zeigt sich eine Delaminierung zwischen den unterschiedlichen Polymeren und damit auch ein Absinken der mechanischen Eigenschaften.

Tabelle 5: Übersicht der mechanischen Ergebnisse der Versuchsreihe 6

Versuchs-reihe	Versuchs-nummer	Zug-E-Modul [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Dehnung bei Zugfestigkeit [%]	Bruchspannung [MPa]	Bruchdehnung [%]
V 6	V 233108	498,1	11,6	12,8	17,5	570,8
V 6	V 233109	694,8	13,7	11,5	16,2	417,6
V 6	V 233110	971,7	15,2	9,1	14,3	354,9
V 6	V 233111	893,3	15,7	7,6	12	50
V 6	V 233112	1418	19	4,2	15	25

Anhand der Ergebnisse, hier insbesondere der Bruchdehnung sowie der Bruchspannung, ist direkt zu sehen, dass bei den Versuchsnummern V 233111 und V 233112 ein zu hoher Anteil an PHBH bzw. PHBV eingesetzt wurde. Daher wurde für ein Up-Scaling auf eine industrielle Anlage die Rezeptur V 233110 ausgewählt.

Ein erster Up-Scaling Versuch wurde auf einer mittelgroßen Produktionsanlage Berstorff ZE50A, einem Doppelschneckenextruder, durchgeführt. Diese Anlage ist für die Verarbeitung von Biokunststoffen mit einem höheren Anteil an mineralischen Füllstoffen ausgelegt. Tabelle 6 zeigt die Unterschiede der Extruder im Labor- und Industriemaßstab.

Tabelle 6: Vergleich zwischen Laborversuch und Produktion

	Labormaßstab	**Produktionsmaßstab**
Durchsatz	11 kg/h	200 kg/h
Stromaufnahme	32 %	58 %
Druck	25 bar	40 bar
Massetemperatur	192 °C	200 °C
MFR 190/2.16	6,2 g/10 min	16,5 g/10 min

Durch den hohen Anteil an mineralischen Füllstoffen konnte auf dem Laborextruder kein, für diesen Extruder üblicher, hoher Durchsatz erzielt werden. Dadurch waren Stromaufnahme und Druck vor der Düse gering. Auf dem Produktionsextruder war eine leichtere Einarbeitung der Füllstoffe möglich, welche ein vergleichsweiser höherer Durchsatz erlaubt. Stromaufnahme und Druck vor der Düse waren hier gestiegen. Da die Polymere, insbesondere PHBH und PHBV sehr scherempfindlich sind, ist der Schmelzindex (MFR) angestiegen.

Arbeitspaket 25: Herstellung extrudierter Bodennägel als Demonstratoren

Ein Verfahren zur Extrusion der Bodenanker wurde mit einem kommerziell verfügbaren Basiscompound getestet, um die grundsätzliche Prozessfähigkeit zu valisieren. Eine Weiterverarbeitung zu Bodennägeln verzögerte sich auf Grund von Kapazitätsengpässen beim Hersteller der Profile (kein Partner des Projektes), wodurch fertige Demonstratoren erst nach Projektende vorlagen.

Bei der Extrusion des Bodenankers wird über ein spezielles Verfahren eine raue Oberfläche generiert, dadurch wird angenommen, dass die Haftung im Boden, sowie die Haltekraft für das Geotextil steigt. Zur Materialeinsparung wurden die Bodenanker als Rohr extrudiert. Aktuell sind als größtmögliche Abmessung ein Durchmesser von 60 mm bei einer Wandstärke von ca. 3-4 mm möglich.

Zum Zeitpunkt der weiteren Up-scaling-Versuche war die Anlage mit einer Runddüse von 10 mm Durchmesser ausgerüstet. Im Anschluss an die Düse folgte nach einer kurzen Abkühlstrecke in Umgebungsluft ein Wasserbad, um das extrudierte Profil abzukühlen. Die Anlage verfügt über keine, für Profilextrusionsanlagen übliche, Kalibrierung, da nur so eine raue Oberfläche generiert werden kann.

Die Verarbeitung des Materials erfolgte mit einer Extrudertemperatur von 150 bis 170 °C; die Extruderdüse wurde auf 165°C eingestellt. Der erste Versuch erfolgte mit dem reinen Material 100 % V 233110. Trotz des hohen Schmelzindexes von 16,5 g/10min ließ sich das Material problemlos verarbeiten. Der extrudierte Strang war anfangs sehr flexibel, erhielt aber bis zur Förder- und Schneideeinrichtung eine ausreichende Steifigkeit, so dass eine Produktion stattfinden konnte. Das Ergebnis zeigt die Abbildung 24 ganz links. Die leichte Braunfärbung des Stabes resultiert aus dem braunen Farbmasterbatch aus der Vorproduktion. Um die Steifigkeit zu erhöhen, wurde im 2. Versuch ein reines PLA zugegeben. Es wurde eine Mischung von 80 % V 233110 mit 20 % PLA extrudiert. Auch dieser Versuch lief automatisch. Die braune Farbe war mittlerweile ausgespült, so dass die Originalfarbe des extrudierten Stranges sichtbar ist (Abbildung 24, 2. von links). Da von dem Material V 233110 auszugehen ist, dass es im Laufe der Zeit weiter kristallisiert und dadurch steifer und spröder wird, erfolgte keine höhere Zugabe des PLA.

Der Extrudeur verfügt über eine geschützte Technologie, um bei extrudierten Profilen die Oberfläche rauer zu gestalten, hierdurch wird aber auch die Struktur des Profiles porös. Zusätzlich wird ein brauner Farbstoff zugegeben, welcher das Material natürlicher aussehen lässt. Mit dieser Technologie erfolgten noch einmal zwei Versuche, bei denen mit der Dosierung variiert wurde. Es ist leicht zu erkennen, dass zunächst eine zu geringe Menge eingesetzt wurde (Abbildung 24, 2. von rechts), da lediglich die Oberfläche leichte Fehlstellen aufweist, aber nicht rau geworden ist. In Abbildung 24 ganz rechts ist ein Profil zu sehen, bei dem überdosiert wurde, hier ist die Oberfläche aufgerissen und das Profil hat innen einzelne große Poren.

Während die beiden Versuche ohne diese Technologie zu einem eher ovalen Strang geführt haben, so ist deutlich zu erkennen, dass sich nun eine eher runde Form eingestellt hat.

Abbildung 24: Extrudierte Profile Up-scaling 1 (von links nach recht: 100 % V 233110; 80 % V 233110 + PLA; 80 % V 233110 + PLA mit zu geringer Rauigkeit; 80 % V 233110 + PLA mit zu hoher Rauigkeit)

In einem weiteren Up-scaling-Versuch wurde die Oberflächenrauigkeit justiert. Das Ziel war es eine Oberflächenrauhigkeit zu erhalten, die einer Baumrinde (z.B. einer Buche) ähnelt. Diese Versuche werden sowohl mit einer runddüse von 8 mm Durchmesser als auch mit einer Düse mit 15 mm Durchmesser durchgeführt. Neben einer gleichmäßigen Oberfläche hat sich auch die Porosität verbessert. Abbildung 25 zeigt links das Ergebnis aus dem zweiten Up-Scaling-Versuch, wärend rechts der Strang aus dem ersten Up-scaling-Versuch zu sehen ist.

Abbildung 25: Porosität der extrudierten Stränge

Das extrudierte Material konnte in einem weiteren Schritt thermisch verformt werden, so dass auch auch das Geotextil vor dem Aufschwimmen gesichert werden kann. Die Abbildung 26 zeigt die fertigen Demonstratoren.

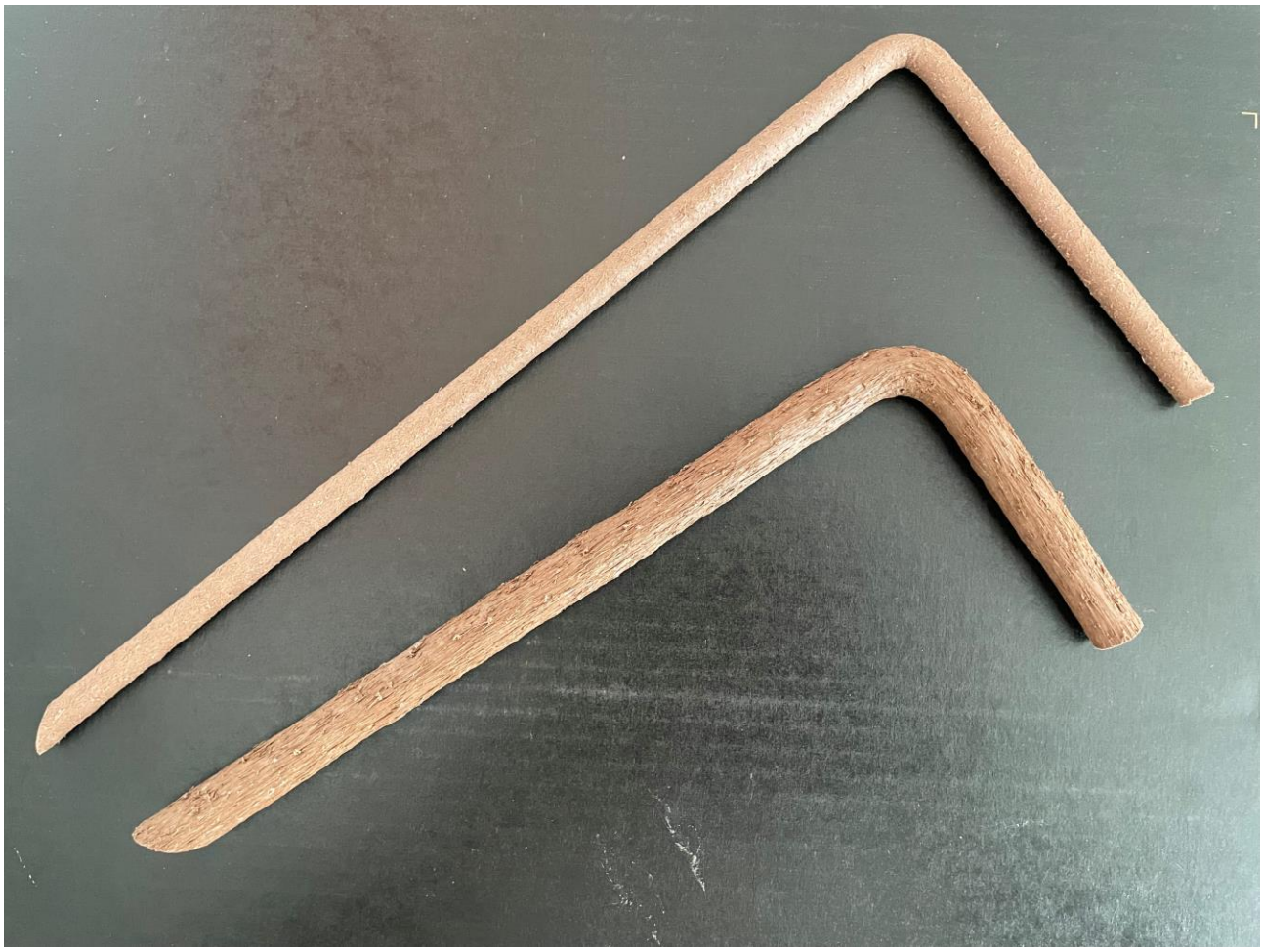


Abbildung 26: Erdnägel aus Material V 233110

Das Material V 233110 enthält nur Bestandteile, welche als abbaubar in der Erde zertifiziert sind. Daher ist davon auszugehen, dass das fertige Compound in der Erde abbauen wird und die für die Zeritifzierung erforderlichen Tests bestehen wird. Die Festigkeit des Erdnagels kann durch die Zugabe von reinem PLA erhöht und das Abbauverhalten verzögert werden. Damit verliert das Produkt zwar die Möglichkeit der Zertifizierung als Bodenabbaubar, jedoch wird angenommen, dass damit auch die Haltbarkeit der Bodennägel

gesteigert werden kann. Ein langfristiger Abbau in Boden wird dadurch jedoch nicht ausgeschlossen (vgl. Lott et al.[2]).

Arbeitspaket 26: Prüfung und Bewertung der hergestellten Bodennägel

Durch die Herstellung der Bodennägel zum Ende der Projektlaufzeit konnten Feldversuche bei den Projektpartnern nicht mehr durchgeführt werden. Vor diesem Hintergrund wurden eigene Tests auf einer Rasenfläche durchgeführt. Diese haben gezeigt, dass die Profile in den Boden eingeschlagen werden konnten und die Oberflächenstruktur zu einer besseren Haftung im Boden führt. Daher können die hergestellten Demonstratoren als technisch einsatzbereit eingestuft werden.

Im Vergleich zu Erdnägeln aus Holz bieten die Erdnägel auf Basis der neuartigen Compounds den wesentlichen Vorteil, dass sie durch Erhitzen zu Haken verformt werden können. Somit sind Grundlagen geschaffen worden, die für die weitere Verwertung dieser Grundrezeptur für die originäre technische Anwendung wesentlich sind. Zudem können auf dieser Basis andere Anwendungen im Bereich der Forstwirtschaft und im Garten- und Landschaftsbau erschlossen werden, bei der klassische fossile Kunststoffe wie PE und PP substituiert und nachhaltige Produkte entwickelt und produziert werden.

Inwieweit die höheren Rohstoffkosten durch diesen Vorteil aufgewogen werden können, muss im Nachgang evaluiert werden.

Arbeitspaket 27: Verbreitung der Projektergebnisse

Die BAW veranstaltete kurz vor Projektende ihr Kolloquium „Technisch-biologische Ufersicherungen – Ein Baustein für ökologisches Bauen an Wasserstraßen“, an dem etwa 100 Stakeholder aus dem Bereich Wasserbau teilnahmen. Auf dieser Veranstaltung wurden die Ergebnisse des Forschungsvorhabens vorgestellt und mit den Teilnehmern diskutiert. Die Vortragsfolien der Veranstaltung stehen auf der Website der BAW (https://ufersicherung-baw-bfg.baw.de/binnenbereich/de/veranstaltungen /kolloquium-2024) und auf der Projektwebsite (https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/projekte/bioshoreline.html) zum Download zur Verfügung.

Zudem ist ein Webinar über die Ergebnisse von Bioshoreline für den Zeitraum der Publikation des Abschlussberichts geplant. Das Konzept für die Veranstaltung sieht die Einbindung von zwei weiteren Referenten zu den Themen Geotextilien und Mikroplastik in der Umwelt sowie eine moderierte Diskussionsrunde vor. Ein passender Termin ist derzeit in Abstimmung.

Als niederschwellige Möglichkeit, um auf die Projektergebnisse aufmerksam zu machen, wurde ein Video erstellt. Das Video ist über die Projektwebsite (https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/projekte/bioshoreline.html) oder den Youtube Kanal von Fraunhofer UMSICHT (https://www.youtube.com/watch?v=FMeE8ReGkRA) abrufbar und wird zusätzlich über soziale Medien (z.B. LinkedIn) verlinkt.

2. Verwertung

a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen

Vliese aus verschieden schnell abbaubaren Werkstoffen und Vliese mit einer Mischung aus Naturfasern und Polymerfasern stellen keine grundsätzliche Neuerung dar. Die im Projekt entwickelten Geotextilien unterscheiden sich in Details wie der genauen Zusammensetzung, dem Aufbau und dem Einsatzgebiet. Eine Schutzrechtsanmeldung wird daher nicht angestrebt. Gegenstand im Projekt ist die Abstimmung all dieser Einflussfaktoren, der biologischen Abbaubarkeit des Vlieses als Funktion und der notwendigen Funktionsdauer im eingebauten Zustand.

b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Gegenwärtig bilden die technischen Deckwerke noch den Hauptteil der Ufersicherungen an Wasserstraßen. Aufgrund der gesetzlichen Vorgaben durch die EU-Wasserrahmenrichtlinie sollen zukünftig verstärkt Ufersicherungen mit Pflanzen zur Anwendung kommen. Die Umgestaltung der Ufer findet über einen langen Zeitraum statt und an Uferbereichen, die nicht übermäßig hydraulisch belastet sind. Der Einsatz von biologisch abbaubaren Geotextilien als temporärer Filter in technisch-biologischen Uferbefestigungen ist daher jeweils im Einzelfall zu prüfen und wird von verschiedenen Faktoren abhängen. Die BAW hat bereits

[2] Lott, Ch.; Stemmer-Rau, K.; Weber, M.: PeToPLA A meta-study on the persistence and toxicity of PLA, and the formation of microplastics in various environments. Technical Summary Report. 2024.06.24_PeToPLA-Metastudy_Technical-Summary_Public.pdf (hollandbioplastics.nl)

Bemessungsgrundlagen dazu geschaffen (Bemessungskonzept (GBB/ DWA-M 519), Merkblatt M-TBU). Hinzu kämen mögliche Anwendungen bei Uferschutzmaßnahmen und Maßnahmen im europäischen Ausland.

Neben der angedachten technisch-biologischen Uferbefestigung an Wasserstraßen können die entwickelten sequenziell biologisch abbaubaren Geotextilien ebenfalls in der Geotechnik an kleineren Fließgewässern, an Küsten sowie im Bereich von Hangbefestigungen z. B. für neu hergestellte Böschungen an Straßen und Bahntrassen oder Halden eingesetzt werden, bei denen die naturnahe Gestaltung im Fokus steht und ein zusätzlicher Erosionsschutz für die Anfangszeit erforderlich ist.

c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Die Projektergebnisse wurden über die in Kapitel 4 beschriebenen Maßnahmen einer breiten Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Weitere Veröffentlichungen wie eine Pressemeldung zu den Ergebnissen und das geplante Webinar finden in den nächsten Monaten statt.

Die veröffentlichten Daten zum Abbauverhalten von Polymerfasern werden die Auswahl von geeigneten Materialien für zukünftige textile Anwendungen erleichtern. Eine Veröffentlichung über das Langzeitverhalten der Geotextilien am Rhein ist für die Zeit nach der Letzten Probeentnahme nach 10 Jahren Versuchsdauer (2030) geplant. Daten zum Abbauverhalten von PLA im Boden über einen solch langen Zeitraum wurden bislang nicht veröffentlicht.

Der Freilandtest am Rhein hat gezeigt, dass die entwickelten Geotextilien grundsätzlich für den Einsatzzweck geeignet sind. Ob die optimierten Vliese, wie geplant, eine bessere Durchwurzelung ermöglichen und dabei gleichzeitig die Filterstabilität gewährleisten, wird sich in den nächsten Jahren zeigen. Eine weitere Anpassung des Geotextils durch den Hersteller BNP Brinkmann zur Optimierung der mechanischen Kennwerte und der Durchwurzelung ist möglich.

d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Durch die Veröffentlichung der Zwischenergebnisse von Bioshoreline ergaben sich bereits während der Projektlaufzeit Kontakte zu anderen Forschungsstellen, aus denen sich neue Projektideen entwickelt haben. Aufbauend auf diesen Ideen wurden verschiedene Projekte bewilligt, die nun bearbeitet werden oder bereits abgeschlossen sind.

Die Erkenntnisse aus Bioshoreline zu den Anforderungen für Geotextilien und zum Abbauverhalten von biologisch abbaubaren synthetischen Fasern flossen in diese Projekte mit ein.

Die wirtschaftliche Anschlussfähigkeit ergibt sich auf verschiedenen Märkten in Verbindung mit den im Vorhaben generierten Erkenntnissen und entwickelten Produkten. Die FKuR Kunststoff GmbH strebt im Rahmen des Projektes die Erweiterung des Produktportfolios an. Die Firma BNP Brinkmann kann mit den im Projekt entwickelten Geotextilien eine neue Produktpalette sequenziell abbaubarer Geotextilen aufbauen und damit zukünftige Absatzmärkte sichern und ausbauen.

3. Erkenntnisse von Dritten

Die nachfolgenden Erkenntnisse anderer Forschergruppen zu Beschleunigung des Abbaus von PLA, zum Abbauverhalten von Vliesen und zur Zusammensetzung von abbaubaren Geotextilien wurden während der Projektlaufzeit analysiert.

Kalita *et al.* konnten nachweisen, dass eine Zugabe von 5 Gew.-% entölter Algenbiomasse in PLA eine Wirkung auf den biologischen Abbau von PLA-Biokompositen zeigte. Der hohe Gehalt an elementarem Stickstoff in der Algenbiomasse beschleunigte den Abbauprozess in den PLA-Biokompositen, indem er das mikrobielle Wachstum ankurbelte. Die Abbauuntersuchen wurden bei 58 ± 2 °C in Kompost durchgeführt.[3]

Antunes *et al.* untersuchten den Einfluss von Korona- und Hochfrequenz (HF)-Oberflächenplasmabehandlung auf die Degradation von PLA in einem beschleunigten Bewitterungstest. Es zeigte sich, dass die Plasmabehandlung den hydrolytischen und UV-Abbau der PLA verstärkte, was durch die Untersuchung der physikalischen, chemischen, mechanischen und thermischen Eigenschaften bestätigt wurde. Darüber hinaus war der Abbau beim mit HF-Plasma behandelten Werkstoff ausgeprägter als beim mit Corona-Plasma behandelten.[4]

[3] Kalita, N. K.; Damare, N. A.; Bhagabati, D. H. P.; Kalamdhad, A.; Katiyar V.: Biodegradation and characterization study of compostable PLA bioplastic containing algae biomass as potential degradation accelerator. Environmental Challenges 3 (2021); https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100067

[4] Antunes, A.; Luyt, A. S.; Kasak, P.; Aljarod, O.; Hassan, M. K.; Popelka A.: Effect of plasma treatment on accelerated PLA degradation. eXPRESS Polymer Letters Vol.15, No.8 (2021) 725–743; https://doi.org/10.3144/expresspolym-lett.2021.60

Prambauer *et al.* haben die Eignung verschiedener bioabbaubarer Polymerfasern (PLA, PBS, PHBV, PBAT und Blends daraus) für saisonale Geotextilien untersucht. Erreicht werden sollte eine Grundstabilität von zwei Jahren mit anschließendem Abbau des Geotextils. Die Alterung der Fasern wurde mittels Schnellbewitterungsverfahren mit UV-Licht und Feuchtigkeit simuliert und die mechanischen Kennwerte ermittelt. Substratkontakt und damit Kontakt zu abbauenden Mikroorganismen bestand in dem Test nicht. PLA-Fasern zeigten sich in der Untersuchung als besonders witterungsbeständig.[5] Eine andere Forschungsgruppe um Prambauer hat in einem Review die Eigenschaften von Natur- und Polymerfasern für Geotextilien zusammengetragen.[6]

Olkhov *et al.* untersuchte den Abbau von Vliesen aus elektrogesponnenen Fasern (PLA-PHB-Blends in unterschiedlichen Mischverhältnissen). Es wurde sowohl der hydrolytische Abbau in einer Phosphatpufferlösung als auch für die reinen PHB-Vliese der Abbau unter nicht näher spezifizierten Bodenabbaubedingungen geprüft. Beim hydrolytischen Abbau zeigt sich, dass die Proben schneller abbauen je höher der PLA-Anteil ist.[7]

Eine umfassende Betrachtung der Natur- und Polymerfasern für Geotextilien haben Marczak *et al.* zusammengestellt.[8]

Die Erkenntnisse der verschiedenen Forschungsgruppen wurden, sofern geeignet, bei der Auswahl der Natur- und Polymerfasern für die optimierten Geotextilien berücksichtigt.

4. Veröffentlichungen

Während der Projektlaufzeit wurden die gewonnenen Erkenntnisse folgendermaßen veröffentlicht:

- Website:
  Aktualisierung der Projektwebsite https://www.umsicht. fraunhofer.de/de/projekte/bioshoreline.html
- Peer review Artikel:
  Fleischer, P.; Borelbach, P.; Duhme, M.; Schlüter, V. (2022): Entwicklung eines biologisch abbaubaren Geotextilfilters für umweltfreundliche Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen. In: Korrespondenz Wasserwirtschaft 15 (3), 163–169; online abrufbar unter https://izw.baw.de/publikationen/alu/0/Fachbeitrag-Wasserbau-und-Wasserkraft-Fleischer.pdf
- Peer review Artikel:
  Borelbach, P.; Kopitzky, R; Dahringer, J.; Gutmann, P. (2023): Degradation behavior of biodegradable man-made fibers in natural soil and in compost. In: Polymers 2023, 15 (13), 2959; online abrufbar unter https://doi.org/ 10.3390/polym15132959
- Vortrag:
  Borelbach, P.: Abbaubare Geotextilvliese als temporäre Filter in TBU. BAW-Kolloquium „Technisch-biologische Ufersicherungen – Ein Baustein für ökologisches Bauen an Wasserstraßen“ am 15.05.2024; online abrufbar unter https://ufersicherung-baw-bfg.baw.de/binnenbereich/de/veranstaltungen/kolloquium-2024
- Messen:
  Exponat auf der K2022 (16.-26.10.2022, Düsseldorf) zur Präsentation erster Zwischenergebnisse aus dem Freilandtest
- Film:
  Übersicht über die Projektergebnisse in Form eines Videos: https://youtu.be/FMeE8ReGkRA

[5] Prambauer, M.; Burgstaller, C.; Eicher, M., Hoffmann, H.: Die Verwendung von bioabbaubaren Polyestern in saisonalen Geotextilien. Geotechnik 43 (2020) Heft 1 26-30; doi:10.1002/gete.201900022

[6] Prambauer, M.; Wendeler, C.; Weitzenboec: Biodegradable geotextiles - An overview of existing and potential materials. Geotextiles and Geomembranes 47 (2019) 48-59; doi:10.1016/j.geotexmem.2018.09.006

[7] Olkhov, A. A.; Mastalygina, E. E.; Iordanskii, A. L.: Biopolymer Geotextiles Based on Mixtures of Polyhydroxybutyrate and Polylactic Acid. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1079 052019 (2021)

[8] Marczak, D.; Lejcus, K.; Misiewicz, J.: Characteristics of biodegradable textiles used in environmental engineering: A comprehensive review. Journal of Cleaner Production 268 (2020) 122129; doi:10.1016/j.jclepro.2020.122129

ANHANG

Teilvorhaben 1: Bioshoreline – Weiterführung der Langzeituntersuchung

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Gesamtziel ist die Entwicklung eines biologisch abbaubaren Geotextilfilters aus nachwachsenden Rohstoffen, der die Filterstabilität und gleichzeitig das Anwachsen der Pflanzen in technisch-biologischen Ufersicherungen ermöglicht und sich letztendlich vollständig biologisch abbaut. Geotextilfilter werden in diesen Ufersicherungen eingebaut, um zu verhindern, dass Boden durch schiffsinduzierte Belastungen aus der Böschung ausgetragen wird, bis die Pflanzenwurzeln selbst diese Aufgabe übernehmen können. In dem ersten Teil des Projektes wurden verschiedene Geotextilprototypen hergestellt und ihre technischen Eigenschaften geprüft sowie Durchwurzelungsversuche in Bewuchskästen durchgeführt. An der Versuchsstrecke der BAW am Rhein wurden drei verschiedene Geotextilprototypen im Freilandversuch installiert. Gegenstand des aktuellen Vorhabens ist die weiterführende Prüfung, Bewertung und Diskussion der Funktionsfähigkeit und Abbaubarkeit der im Freilandversuch und in Bewuchskästen eingebauten Geotextilfilter. Auf Basis dieser Ergebnisse erfolgt eine Anpassung der Prototypen. Ziel ist dabei, den Zeitraum für die notwendige Funktionserfüllung des Geotextilfilters und die Beeinflussung dieser Eigenschaften durch den biologischen Abbau der Textilbestandteile ideal aufeinander abzustimmen.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket 0: Projektmanagement

Organisation (UMSICHT) von vier Projektreffen per TEAMS sowie die jeweilige Teilnahme (UMSICHT, BAW, Brinkmann, Indorama, FKuR).

Mehrere Telefonate, E-Mails zwischen den Projektpartnern (UMSICHT, BAW, Brinkmann, FKuR, Indorama).

Erstellung der Zwischenberichte (UMSICHT, BAW, Brinkmann, Indorama, FKuR).

Arbeitspaket 17: Regelmäßige Entnahme, Prüfung und Bewertung der Geotextilproben aus dem Freilandversuch am Rhein

Ersetzen der Steinmatratzen durch eine Weidenspreitlage im Feld A1 an der Versuchsfläche am Rhein (BAW).

Drei Entnahmen des Geotextil unter Steinmatratzen (BAW). Prüfung der Geotextile und Auswertung der Ergebnisse (BAW, UMSICHT).

Arbeitspaket 18 Test und Evaluierung der Durchwurzelbarkeit der Geotextilprotypen in Bewuchskästen

Auswertung der 2020 begonnenen Durchwurzelungstests (BAW).

Regelmäßige Kontrolle der Weidenspreitlage für den Test auf Durchwurzelung an der Versuchsstrecke (BAW).

Ausgrabungen der Weiden des Durchwurzelungstests an der Versuchsstrecke, Auswertung der Ergebnisse (BAW).

Arbeitspaket 19: Entwicklung eines Optimierungskonzepts für die abbaubaren Geotextilien

Zusammenstellung von Ideen und Entwicklung eines Konzeptes zur Optimierung des Geotextils (UMSICHT, BAW, Brinkmann, Indorama).

Arbeitspaket 20 Auswahl und Erwerb Naturfasern

Recherche der Anbieter geeigneter Naturfasern (Brinkmann).

Auswahl und Erwerb Naturfasern (Brinkmann).

Arbeitspaket 21 Herstellung der Polymerfasern

Herstellung von Fasern aus verschiedenen biologisch abbaubaren Polymeren (Indorama).

Herstellung der PLA-Stapelfasern und Lieferung an Brinkmann für den optimierten Geotextilprototypen (Indorama).

Arbeitspaket 22 Herstellung von optimierten Geotextilprototypen

Überlegungen und Entscheidung zum Aufbau des optimierten Geotextils (Brinkmann, UMSICHT).

Herstellung des optimierten Geotextilprototypen und Lieferung an die BAW (Brinkmann).

Arbeitspaket 23: Prüfung und Bewertung der optimierten Geotextilprototypen

Abbauuntersuchungen der von Indorama hergestellten Polymerfasern und der daraus hergestellten Vliese (UMSICHT).

Mechanische Prüfung des optimierten Geotextilprototypen (Brinkmann, BAW).

Polymerchemische Prüfung des optimierten Geotextilprototypen (UMSICHT).

Arbeitspaket 27: Verbreitung der Projektergebnisse

Überarbeitung der Projektwebsite (UMSICHT).

Erstellung und Veröffentlichung eines Fachbeitrags in der Zeitschrift „Korrespondenz Wasserwirtschaft“ (BAW, UMSICHT).

Erstellung und Veröffentlichung eines Peer review Artikel über Abbauverhalten von Fasern (UMSICHT, Indorama).

Erstellung eines Videos zur Verbreitung der Projektergebnisse (UMSICHT, BAW)

Erstellung und Präsentation eines Vortrags über die Projektergebnisse auf dem BAW Kolloquium (UMSICHT, BAW)

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

- Jährlich Geotextilproben aus dem Freilandversuch entnommen und technische Kennwerte ermittelt und bewertet.
- Chemische und thermische Analyse der entnommenen Proben ausgewertet.
- Naturfasern sind nach einem Jahr weitgehend abgebaut, ohne die Zugfestigkeit und Stempeldurchdrückkraft zu beeinflussen. Alle drei Geotextilprototypen zeigen nach drei Jahren erste Anzeichen für einen Abbau der Polymerfasern.

- Durchwurzelungsversuche in Bewuchskästen ausgewertet.
- Weidenspreitlage am Rhein installiert.
- Wachstum der Weidenspreitlage am Rhein auf den Flächen mit und ohne Geotextil dokumentiert
- Wurzelausgrabungen am Rhein durchgeführt und ausgewertet.
- Beide Durchwurzelungsversuche zeigen schlechtere, aber ausreichende Durchwurzelung beim Einsatz des Geotextils.

- Abbautests für verschiedene biologisch abbaubare Fasern und Vliese durchgeführt und ausgewertet.
- Peer review Artikel über Ergebnisse des Abbautests erstellt und veröffentlicht.

- Konzept für optimiertes Geotextil erstellt.
- Geeignete Polymere ausgewählt und hergestellt.
- Geeignete Naturfasern ausgewählt und erworben.
- Optimiertes Geotextil hergestellt, geprüft und als Ersatz für die entnommenen Flächen am Rhein sowie an einer weiteren Versuchsfläche eingebaut.

Teilvorhaben 2: Entwicklung und Produktion von biologisch abbaubaren Werkstoffen für extrudierte Bodennägel

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Zur Befestigung der Filtervliese sind, bis sich ausreichend Wurzeln entwickelt haben, temporäre Befestigungen wie Bodennägel erforderlich. Daher wird im Projekt ein extrudierbarer, biobasierter Werkstoff für einen Bodennagel, welcher mehr als drei Jahre im Boden stabil ist und insgesamt vollständig biologisch abbaut, entwickelt.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket 0: Projektmanagement

Teilnahme am Projektreffen per TEAMS. Bilaterale Treffen mit Fraunhofer UMSICHT.

Arbeitspaket 24 Entwicklung biologisch abbaubare Werkstoffe für extrudierte Bodennägel

Herstellung erster Compounds auf Basis von PHA und weiteren Komponenten (u.a. Lignin und Naturfüllstoffe) hergestellt. Ermittlung mechanischer Kennwerte an Zugprüfstäben.

Herstellung weiterer Rezepturen in weiteren Versuchsreihen. Mechanische Tests sowie Bewertung der Testergebnisse und nachfolgende Rezepturoptimierung.

Arbeitspaket 25: Herstellung extrudierter Bodennägel als Demonstratoren

Tests zur Herstellung der Bodennägel. Optimierung der Herstellung

Arbeitspaket 26: Prüfung und Bewertung der hergestellten Bodennägel

Hergestellte Bodennägel in Rasenfläche geprüft.

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

- Zur Herstellung der Bodennägel müssen neben PHA noch weitere Polymere eingesetzt werden.
- Einsatz von natürlichen und mineralischen Füllstoffen möglich.
- Mit geeigneter Werkstoffkombination kann die Mechanik und Haltbarkeit des Erdnagels eingestellt werden.
- Es werden Zugfestigkeiten bis 20 MPa bei einer Bruchdehnung von ca. 18% erreicht

- Verfahren zur Herstellung der Bodennägel getestet und optimiert.
- Test der Bodennägel in Rasenfläche erfolgreich.