

# Schlussbericht

## zum Verbundvorhaben

Thema:

### **Sequentiell biologisch abbaubare Geotextilien für technisch-biologische Uferbefestigungen an Binnenwasserstraßen (Bioshoreline)**

Zuwendungsempfänger:

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

**Teilvorhaben 2: Trevira GmbH**

**Teilvorhaben 3: FKUR Kunststoff GmbH**

Förderkennzeichen:

**Teilvorhaben 1: 22000815**

**Teilvorhaben 2: 22020815**

**Teilvorhaben 3: 22020915**

Laufzeit:

**01.07.2016 bis 31.03.2020**

Monat der Erstellung:

**07/2020**

Veröffentlichung:

**8. Oktober 2020**

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 beim Autor.

# SCHLUSSBERICHT

I.	Ziele	2
I.1	Aufgabenstellung	2
I.1.1	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse, Nebenergebnisse, Erfahrungen	2
I.1.2	Planung und Ablauf des Vorhabens	3
I.2	Stand der Technik	5
I.3	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	9
II.	Ergebnisse	11
II.1	Erzielte Ergebnisse	11
II.2	Verwertung	40
II.3	Erkenntnisse von Dritten	41
II.4	Veröffentlichungen	41
III.	ANHANG	43
III.1	Teilvorhaben 1	43
III.2	Teilvorhaben 2	46
III.3	Teilvorhaben 3	47

## I. Ziele

### I.1 Aufgabenstellung

#### I.1.1 Wissenschaftlich-technisches Ergebnisse, Nebenergebnisse, Erfahrungen

Ein tabellarisches Anforderungsprofil an die Geotextilfilter wurde im Konsortium nach den Vorgaben der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) für die Anwendung in technisch-biologischen Ufersicherungen erstellt. Entsprechend den Anforderungen fand zunächst eine Auswahl geeigneter Rohstoffe statt. Für die Auswahl passender Fasern für die Prototypen wurden neben den verschiedenen Zusammensetzungen und den damit einhergehenden unterschiedlichen Abbauezeiten auch die Verarbeitungseigenschaften zu Vliesen berücksichtigt.

Für die Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit der synthetischen Fasern wurde nach eingehenden Recherchen die Methode nach ISO 17556 (Bestimmung der vollständigen aeroben biologischen Abbaubarkeit von Kunststoffmaterialien im Boden durch Messung des Sauerstoffbedarfs in einem Respirometer oder der Menge des entstandenen Kohlendioxids) ausgewählt. Zur Anpassung an Flusssufer wurde als Bodenmatrix im Test Auelehm<sup>1</sup> vom rechten, oberen Rheinufer nahe Worms eingesetzt.

Verschiedene Rezepturen für die Polymerfasern wurden getestet. Die drei vielversprechendsten Rezepturen wurden für das Hochskalieren ausgewählt und jeweils in einer Menge von 200 kg auf einer industriellen Anlage hergestellt. Die Herstellung der Polymerfasern aus diesen Compounds war nicht möglich. Vermutete Ursache sind kleinste Verunreinigungen, die bei der Compoundierung entstanden sind. Daher wurde entschieden, statt Compounds Dryblends, die zwei von Fraunhofer UMSICHT entwickelten Rezepturen entsprechen, zum Schmelzspinnen einzusetzen.

Aus den Dryblends konnten erfolgreich Filamente auf einer Pilotanlage im Schmelzspinnverfahren hergestellt werden. Die hergestellte Spinnware wurde entsprechend den Anforderungen für die Vliesherstellung zu Stapelfasern weiterverarbeitet (verstreckt, gekräuselt, fixiert und geschnitten). Eine Übertragung auf eine kommerzielle Produktionsanlage ist möglich.

Aus den beiden entwickelten Fasertypen, Standard-PLA, Bikomponentenfasern<sup>2</sup> (Biko) und Sisal wurden drei Varianten dreilagiger Krempelvliese produziert. In der BAW wurden zunächst zwei Geotextilprototypen hinsichtlich der vereinbarten Anforderungen geprüft – diese entsprachen beide im Aufbau der Variante B nach Tabelle 8:

Decklage 1: PLA, Sisal, modifiziertes PLA; Kernlage: modifiziertes PLA,

Decklage 2: PLA Biko, Sisal, modifiziertes PLA) – eine Probe ohne thermische Verfestigung (B.2017 – BAW-Bezeichnung: B), eine Probe thermisch verfestigt (B.1.2017 - BAW-Bezeichnung: B.1).

Mit Ausnahme der im Filterversuch geforderten Durchlässigkeit des bodenbesetzten Geotextils erfüllten die Proben alle Anforderungen. Um auch die Durchlässigkeit zu verbessern, wurden in zwei Optimierungsschritten weniger stark vernadelte Geotextilprototypen hergestellt (A.2018 und C.2019, BAW-Bezeichnung: B.2 und B.3). Diese entsprechen im Aufbau den Varianten A bzw. C. Die hydraulische Filterstabilität dieser Prototypen verbesserte sich mit zunehmend weniger Vernadelung, der Grenzwert konnte allerdings nicht ganz erreicht werden. Aufgrund des geringen Abstandes zum Grenzwert wurde festgelegt, dass weitere Optimierungen erst im Folgeprojekt Bioshoreline2 erfolgen werden, das sich derzeit in Beantragung befindet. Dabei wird auch die Auswahl der eingesetzten Fasern kritisch hinterfragt werden.

Die generelle Durchwurzelbarkeit der hergestellten Geotextilfilter wurde mit Weidenspreitlagen als Bepflanzung in speziellen Versuchskästen bei der BAW und bei Fraunhofer UMSICHT nachgewiesen. Allerdings wurden dabei mit Geotextil im Vergleich zu den Kästen ohne Geotextil etwas weniger Wurzeln und Sprosse innerhalb von sechs bzw. neun Monaten festgestellt. In den Versuchskästen von Fraunhofer UMSICHT wurde zusätzlich der Einfluss der Uferneigung mit je zwei verschiedenen Hangneigungen (1:2 und 1:3) und der Substrate (Sand und Mutterboden) untersucht. Sensoren erfassten kontinuierlich Bodenfeuchtigkeit, Temperatur und UV-Eintrag. Zudem wurde der pH-Wert des Bodens bestimmt.

Eine Installation dreier verschiedener Geotextilprototypen an der Versuchsstrecke der BAW am Rhein bei Worms fand im Januar 2020 statt. Eines davon ist der bereits von der BAW geprüfte und für anwendbar befundene Prototyp der Variante C.2019 (BAW-Bezeichnung: B.3). Zusätzlich wurden die Prototypen A.2017 und C.2107 (selber Aufbau wie C.2109) eingebaut. Hier werden die neuen Vliese unter Wasserstraßenbedingungen getestet. In regelmäßigen Zeitabständen werden in einem Folgeprojekt die Geotextilproben hinsichtlich der technischen Eigenschaften und des biologischen Abbaus untersucht. Zudem

<sup>1</sup> Bodenart: vorwiegend pelitisches (d.h. Korngrößen unter 0,02 mm) Lockergestein im Überschwemmungsgebiet ständig fließender Gewässer

<sup>2</sup> Bikomponentenfasern sind hier Faserkonstruktionen, die im Kern und im Mantel aus unterschiedlichen PLA-Typen mit verschiedenen Schmelzeigenschaften bestehen.

erfolgt auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse aus Freiland- und Durchwurzelungsversuchen eine weitere Optimierung der Geotextilfilter.

Neben der Entwicklung der Geotextilfilter wurde im Projekt auch ein Werkstoff für biologisch abbaubare Bodennägel, die zur Befestigung der Geotextilien benötigt werden, entwickelt. Der Einfluss verschiedener Blendpartner, Additive, mineralischer und natürlicher Füllstoffe auf die Werkstoffeigenschaften wurde ermittelt. Die getesteten Verarbeitungshilfsmittel haben einen positiven Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften. Dieses kann auf eine verbesserte Verarbeitung der Materialien zurückgeführt werden. Besseres Füllen der Form und leichteres Entformen verringern die Belastung und die Spannungen im Bauteil. Bei den Füllstoffen scheint die Verstärkung mit Holzfasern besonders vielversprechend zu sein.

Im Zuge des Projektes sollten biologisch abbaubare Erdnägel im Spritzgießverfahren hergestellt werden. Hier wurde jedoch nicht in Betracht gezogen, dass bei der Uferbefestigung Holzpflocke eingesetzt werden, welche ca. 1 Meter Länge haben und dementsprechend weit in den Boden getrieben werden. Dieses macht eine weitere Überlegung in der Entwicklung nötig. Eine Herstellung solcher Erdnägel wird im Spritzgießverfahren nicht wirtschaftlich möglich sein, da hierfür Spritzgießmaschinen mit einem großen Schussgewicht nötig sind. Auch müssen hohe Kosten für Spritzgießwerkzeuge aufgewendet werden.

Daher wird die weitere Entwicklung sich auf einen Werkstoff fokussieren, der für eine Profilextrusion geeignet ist. Die Anbindung der Fasern an die Matrix zur Verstärkung des Werkstoffs muss weiter untersucht werden, da bei der Herstellung in der Profilextrusion andere Fließverhältnisse der Schmelze vorhanden sind.

### **I.1.2 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Das Vorhaben ist ein Kooperationsprojekt zwischen drei Industrieunternehmen, einer Bundesbehörde und einer Forschungseinrichtung (s. Abbildung 1):

- Trevira GmbH
- BNP Brinkmann GmbH & Co. KG (im Unterauftrag)
- FKUR GmbH
- Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) (als assoziierter Partner)
- Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT

Die notwendige Grundlagenforschung und Entwicklung wird durch Fraunhofer UMSICHT geleistet. Begleitet wird die Forschung durch die BAW, die hauptverantwortlich für die Prüfung der technischen Eigenschaften der entwickelten Geotextilien, für den Freilandversuch und für die Beprobung der Versuchsfläche in das Projekt eingebunden ist. Die Entwicklungsarbeiten im Projekt starten direkt im kleintechnischen Maßstab. Dies ist durch die Beteiligung der Industriepartner aus den Bereichen der Compoundierung (FKUR), der Polymerfaserherstellung (Trevira) und der Geotextilproduktion (Brinkmann) gewährleistet.



Abbildung 1: Projektstruktur, AP-Leiter sind unterstrichen

Die gesamte ursprüngliche Projektplanung umfasste fünf Jahre, von denen in einer ersten Projektphase drei bewilligt wurden. Diese erste Projektphase umfasste die Arbeitspakete 1 bis 8, sowie Teile der Arbeitspakete 9 und 11. Durch verschiedene Verzögerungen im Projekt kam es zu einer kostenneutralen Verlängerung von 9 Monaten.

Entgegen der ursprünglichen Planung ließen sich die im Scale-up entwickelten Compounds (Teilvorhaben 3, AP 3) nicht im Schmelzspinnverfahren verarbeiten. Aus den im Projekt gewonnenen Erkenntnissen ließ sich ableiten, dass eine Compoundierung der Rohpolymere vor der Faserherstellung nicht zielführend ist und wurde im Projekt daher nicht weiterverfolgt.

Zur Befestigung der Filtervliese, zum Beispiel in Kombination mit Pflanzmatten oder Weidenspreitlagen, sind zusätzlich temporäre Befestigungen wie Pflöcke und Querriegel erforderlich. Genau wie die Geotextilien werden die Befestigungen nur so lange gebraucht, bis sich ausreichend Wurzeln entwickelt haben. Bisher werden Befestigungen bestehend aus Tot- oder Lebendholz verwendet, die die Funktion teilweise erfüllen können, aber oft nicht ausreichend tief einbaubar sind und wenig Spielraum für unterschiedliche Formen der Befestigungen geben. Deshalb sollten im Teilvorhaben 3 (AP 16) Befestigungen aus alternativen biologisch abbaubaren Stoffen entwickelt werden, aus denen, je nach Anforderung, verschiedene Abmessungen und Formen von Pflöcken bzw. Bodennägeln zum Beispiel mit Widerhaken oder ähnlichem gestaltet werden können. Analog zu den Filtervliesen müssen auch diese die technischen Anforderungen für mindestens drei Jahre erfüllen und sich dann biologisch vollständig abbauen.

## I.2 Stand der Technik

Im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsprojektes der BAW (Bundesanstalt für Wasserbau) und BfG (Bundesanstalt für Gewässerkunde) werden an einer Versuchsstrecke am Rhein verschiedene technisch-biologische Ufersicherungsmaßnahmen oberhalb Mittelwasser getestet, die als naturnähere Alternative zur losen Steinschüttung in gleicher Weise wie diese den Uferschutz gewährleisten sollen. Die Maßnahmen am Ufer werden vor allem durch den Auflauf der schiffsinduzierten Wellen und die Wiederauffüllungsströmung belastet. Bei höheren Wasserständen sind die Ufersicherungen je nach Wasserstand unterschiedlich hoch eingestaut und werden zusätzlich durch Auftrieb, Wasserspiegelabsenk (Porenwasserüberdrücke im Boden), Rückströmung und natürliche Strömungen beansprucht.

Nach fünfjähriger Anwuchszeit zeigte sich 2018, dass die Wurzeln der in verschiedenen Maßnahmen eingesetzten Weiden, Kräuter und Gräser das Ufer gut stabilisieren konnten.<sup>3</sup> Die Pflanzen können diese Funktion erst mittel- und langfristig (nach etwa drei Jahren) mit zunehmendem Wachstum vollständig übernehmen, so dass für eine Übergangszeit zusätzliche Maßnahmen notwendig sind. Diese Maßnahmen (z. B. Befestigungen und Filtermatten) unterstützen primär die lokale Standsicherheit der Uferböschung, die Filterstabilität und die Erosionsstabilität. Es muss gewährleistet werden, dass diese temporären Uferkomponenten das Pflanzenwachstum ermöglichen und nicht behindern, dass sie durch gängige Landschaftsbauverfahren eingebaut werden können und dass sie das Ufer in den ersten Jahren stabilisieren. Im Versuch wurde festgestellt, dass verfügbare Geotextilien aus Kunststoff oder natürlichen Materialien wie Schafwolle oder Kokos diese Anforderungen in unterschiedlichem Maße nicht erfüllen. Die Materialien sind unter den gegebenen Bedingungen z. B. nicht ausreichend fest und stabil, können die Erosions- und Filterstabilität nicht gewährleisten oder bauen sich zu schnell ab. Biologisch abbaubare Geotextilien, die alle gestellten Anforderungen erfüllen, sind derzeit nicht verfügbar.

Als biologisch abbaubar wird ein Kunststoff dann bezeichnet, wenn er durch Mikroorganismen aerob in Kohlenstoffdioxid, Wasser, mineralische Salze und Biomasse bzw. anaerob in Kohlenstoffdioxid, Methan, mineralische Salze und Biomasse zersetzt werden kann. Dieser Vorgang hängt stark von den Umgebungsbedingungen und den vorhandenen Mikroorganismen ab, wodurch keine allgemein gültige Aussage zur Abbaubarkeit getroffen werden kann, die für alle Umweltkompartimente gilt. In einer ausführlichen Literaturrecherche, die im Rahmen einer UBA-Studie<sup>4</sup> durchgeführt wurde, wurden Ergebnisse von biologischen Abbauprüfungen der verschiedenen kommerziell verfügbaren Biokunststoffe zusammengestellt.

In der Literatur sind kaum Ergebnisse zum biologischen Abbau von Kunststoffen unter Bedingungen der „Gartenkompostierung“, d.h. bei Temperaturen von maximal 30 °C, zu finden. Die Polymere PHA und fossil basierte aliphatische und aliphatisch-aromatische Polyester waren nach sechs bis sieben Monaten vollständig abgebaut.<sup>5,6</sup> Im Gegensatz zum industriellen Kompostierungsprozess mit thermophiler Phase erfolgt der Abbau von PLA in Kompost und Boden unter Umgebungsbedingungen (<30 °C) sehr langsam.<sup>7,8</sup> Die für den biologischen Abbau erforderliche Hydrolyse des Polymers erfolgt in erster Linie physikalisch-chemisch und wird beschleunigt durch höhere Temperaturen. Der amorphe Bestandteil gilt als leichter biologisch abbaubar als der kristalline Teil eines Polymers.

Im wässrigen Milieu zeigen einige Polymere deutlich schnellere Abbauezeiten im Vergleich zum Abbau im Boden. Im Süßwassermilieu sind thermoplastische Stärke, Stärkeblends und die Polymere PHA und PCL<sup>9</sup> gut

<sup>3</sup> Fleischer, Petra: Back to the roots Wurzelaufgrabungen an Weidenspreitlagen und Pflanzmatten Teil 2: Bewertung der Wurzelentwicklung hinsichtlich Uferschutz. In: Technisch-biologische Ufersicherungen an der Versuchsstrecke am Rhein – Chancen und Herausforderungen hinsichtlich Uferschutz und Ökologie, 18. und 19. Juni 2018, Worms

<sup>4</sup> Burgstaller, M.; Potrykus, A.; Weissenbacher, J.; Kabasci, S.; Merrettig-Bruns, U.; Sayder, B.: Gutachten zur Behandlung biologisch abbaubarer Kunststoffe. TEXTE 57/2018, Umweltbundesamt (Hrsg.) (2018)

<sup>5</sup> Gómez, E.; Michel, F.: Biodegradability of conventional and bio-based plastics and natural fiber composites during composting, anaerobic digestion and long-term soil incubation. In: Polymer Degradation and Stability 98 (12), 2013, S. 2583–2591. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2013.09.018

<sup>6</sup> Solaro, R.; Corti, A.; Chiellini, E.: A New Respirometric Test Simulating Soil Burial Conditions for the Evaluation of Polymer Biodegradation. In: Journal of Environmental Polymer Degradation 6 (4), 1998, S. 203–208

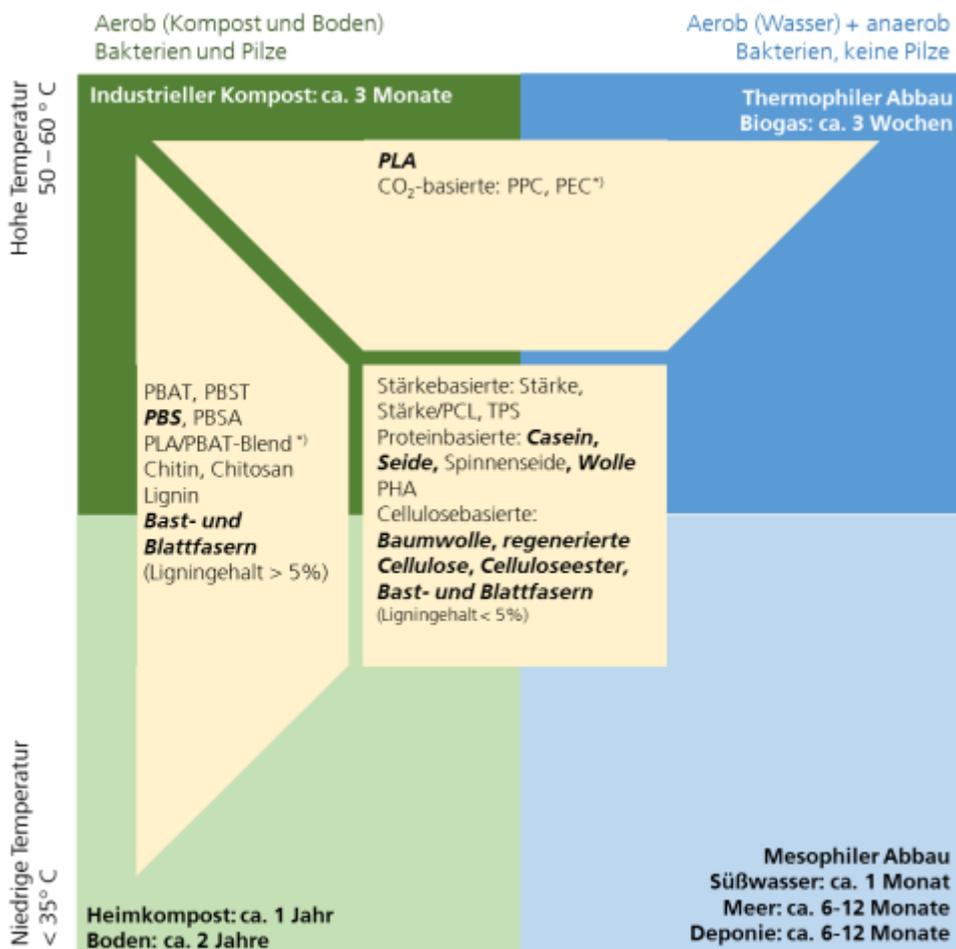
<sup>7</sup> Tokiwa, Y.; Calabria, B.: Biodegradability and biodegradation of poly(lactide). In: Applied microbiology and biotechnology 72 (2), 2006, S. 244–251. DOI: 10.1007/s00253-006-0488-1

<sup>8</sup> Ohkita, T.; Lee, S.: Thermal degradation and biodegradability of poly (lactic acid)/corn starch bio-composites. In: J. Appl. Polym. Sci. 100 (4), 2006, S. 3009–3017. DOI: 10.1002/app.23425

<sup>9</sup> Nicht biobasiert

abbaubar und werden innerhalb von vier bis acht Wochen mineralisiert.<sup>10,11,12</sup> PBS wird in etwa 3 Monaten abgebaut, das Co-Polymer PBSA sogar schneller<sup>13</sup>. Bei PLA zeigt sich auch im Süßwasser die Temperaturabhängigkeit des biologischen Abbaus. Während bei 20 °C nach 180 Tagen kaum Abbau zu verzeichnen ist, ist PLA bei 60 °C nach 120 Tagen vollständig mineralisiert<sup>14</sup>. Das Co-Polymer PBAT wird im wässrigen Milieu ebenfalls nur sehr langsam abbauen.

Abbildung 2 zeigt eine Übersicht über das Abbauverhalten verschiedener Kunststoff- und Naturfasern.



Als Fasermaterial verfügbare Rohmaterialien sind fett und kursiv gedruckt.

<sup>\*)</sup> nicht endgültig nachgewiesen

**Abbildung 2: Abbauverhalten von biologisch abbaubaren Polymeren in verschiedenen Umgebungen**

Aufgrund der Verarbeitungseigenschaften ist nur ein Teil der verfügbaren biobasierten Polymere für das Schmelzspinnverfahren geeignet. Die Extrusion im Schmelzspinnprozess ist begrenzt auf Polymere, die gegenüber den Verarbeitungstemperaturen thermisch stabil sind und es somit im Prozess zu keiner Degradation kommt. Kommerziell verfügbar sind Fasern aus PLA<sup>15</sup>. Schmelzgesponnene Fasern aus PLA, PEF (Polyethylenfuranoat), PBAT, PBS, PLA/PBS-Blends sind in verschiedenen Forschungsvorhaben

<sup>10</sup> Bastioli, C: Properties and applications of Mater-Bi starch-based materials. In: Polymer Degradation and Stability 59, 1998, S. 263–272

<sup>11</sup> KANEKA Corporation (2014): Aonilex Bio-based biodegradable polymer. Online verfügbar unter [www.kaneka.co.jp](http://www.kaneka.co.jp)

<sup>12</sup> Massardier-Nageotte, V.; Pestre, C.; Cruard-Pradet, T.; Bayard, R.: Aerobic and anaerobic biodegradability of polymer films and physico-chemical characterization. In: Polymer Degradation and Stability 91 (3), 2006, S. 620–627. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2005.02.029

<sup>13</sup> Showa Denko K.K. (2015): Bionolle™ aliphatic polyester. Produktflyer

<sup>14</sup> Itävaara, M.; Karjomaa, S.; Selin, J.: Biodegradation of polylactide in aerobic and anaerobic thermophilic conditions. In: Chemosphere 46 (6), 2002, S. 879–885. DOI: 10.1016/S0045-6535(01)00163-1

<sup>15</sup> <https://www.trevira.de/de/textilien-stoffe-markenfasern-trevira/nonwovens-vliesstoffe-hygiene.html>, Zuletzt besucht am 23.09.2018

erfolgreich hergestellt worden<sup>16,17</sup>. Li et al. konnten im Schmelzspinnverfahren erfolgreich Fasern aus PBST herstellen<sup>18</sup>. PHBH ist zu Fasern verarbeitbar, wenn es als Blendpartner eingesetzt wird<sup>19</sup>. Eine der Herausforderungen ist die Neigung zur Kristallisation.

## Patentrecherche

Die Ergebnisse der Patentrecherche aus dem Zwischenbericht 2018 wurden aktualisiert (s. Tabelle 1). Dazu wurden die gleichen Suchbegriffe verwendet, aber das Veröffentlichungsdatum aus 2018 und 2019 beschränkt. Für die Patentrecherche wurde das Portal PatBase (<http://www.patbase.com/>) verwendet.

**Tabelle 1: Suchbegriffe und Ergebnisse der Patentrecherche**

Suchbegriff deutsch	Ergebnisse	relevant	Suchbegriff englisch	Ergebnisse	relevant
Geotextil	72	0	geotextile	1133, davon 127 geprüft, Einschränkung Technologie, DE, EP und WO	1
Geotextil bioabbaubar	0	-	geotextile biodegradable	1	0
Geotextil abbaubar	0	-	geotextile degradable	0	-
Erosionsschutz	11	0	erosion protection	76	0
Erosionsschutz bioabbaubar	0	-	erosion protection biodegradable	0	-
Erosionsschutz abbaubar	0	-	erosion protection degradable	0	-
Geotextilfilter	0	-	geotextile filter	21	0
Ufersicherung	0	-	bank protection	617, nur China, Korea	nicht geprüft
			embankment protection	11	0

Es haben sich zwölf relevante Treffer ergeben, die einer detaillierteren Begutachtung unterzogen wurden (Tabelle 2). Insgesamt gesehen können alle als möglicherweise relevant identifizierten Patente von den Entwicklungen im Rahmen des vorliegenden Projektes abgegrenzt werden.

<sup>16</sup> AiF-Cornet Projektbericht mit IGF-Vorhaben Nr. 165 EN Bewertung des Potentials von Polybutylensuccinat in Textilanwendungen (PBSTex) Berlin, 2018

<sup>17</sup> Dolmans, R.: Bewertung von Biopolymeren für die Herstellung schmelzgesponnener Filamentgarne  
Doktorarbeit am Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University, Shaker Verlag, Aachen, 2013

<sup>18</sup> Li, F.; Luo, S.; Yu, J.: Mechanical, thermal properties and isothermal crystallization kinetics of bio-degradable poly(butylene succinate-co-terephthalate) (PBST) fibers. In: Journal of Polymer Re-search, (3) 2010, Volume 17, Issue 2, S. 279–287. DOI: 10.1007/s10965-009-9315-6

<sup>19</sup> Hufenus, R.; Reifler, F.; Maniura-Weber; K; Zinn, M.; Spierings, A.; Hänggi, U.: Biodegradable Fibers from Renewable Sources: Melt Spinning of Polyhydroxyalkanoates (PHAs). Presented at the Fiber society spring 2013 technical conference. Geelong, Victoria, Australia.

Tabelle 2: Auflistung der relevanten Patente

Patent	Abstract (teilweise übersetzt)	Abgrenzung
DE 000002321362 A <i>Erosionsschutzmatte</i> Naue KG Anmeldedatum: 27.04.1973	Gegenstand der Erfindung ist eine Erosionsschutzmatte dadurch gekennzeichnet, dass eine voluminöse Wirrfasermatte aus gekrollten und/oder spiralgekräuselten, mechanisch und/oder chem. gebundenen Natur- oder Chemiefasern oder Gemischen daraus eine Struktur aufweist, die die Ablagerung von Feststoffen fördert und festhält, aber Wasser durchlässt und die auf der Unterseite mit einem verrottungsfesten, aber wasserdurchlässigen Gewebe, Gewirke, Faservlies oder dergl. fest verbunden ist.	Unterseite des Vlieses nicht abbaubar
DE 000002431043 C2 <i>Erosionsschutzmatte für Böschungen im Wasserbau</i> Naue KG Anmeldedatum: 27.06.1974	Beim Bau von Wasserwerken ist eine Schutzmatte erforderlich, um die Oberfläche der Staumauer gegen Wassererosion zu schützen. Dies wird durch eine sandwichartige Konstruktionsmatte mit beidseitigem Fasermaterial erreicht, wobei die Wasserbeständigkeit auf der den Wasserwellen zugewandten Seite größer ist als auf der Landseite. Dies hat zur Folge, dass die möglicherweise erosiven Sand- oder Sandpartikel abgebremst werden und gleichzeitig das Wasser nach dem Zurückweichen jeder Welle frei zurückströmen kann. Die Schichten sind durch einen zentralen Abschnitt aus großporigem Material verbunden. Der normale ruhige Wasserstand ist idealerweise Teil der Matte.	Aufbau aus Schichten mit unterschiedlich großen Poren
DE 000003817480 C2 <i>Vlies, Herstellung des Vlieses und Vorrichtung zur Herstellung des Vlieses für biologische Flächenbehandlung</i> B & J Vliesstoff GmbH Anmeldedatum: 21.05.1988	Es wird vorgeschlagen, ein Vlies aus biologisch abbaubaren Materialien mit anwendungsorientierten Fremdkomponenten herzustellen. Dieses Vlies dient in erster Instanz zur biologischen Flächenbehandlung und kann z.B. als geschlossene Erosionsschutzmatte auf gefährdete Flächen aufgebracht werden.	Zusammensetzung mit Fremdkörpern (wie Samen oder Dünger) und Einsatzzweck biologische Flächenbehandlung
DE 000003932877 A1 <i>Erosionsschutz- und/oder Untergrundstabilisationsmatte</i> Akzo Patente GmbH Anmeldedatum: 02.10.1989	Geotextil, beispielsweise Erosionsschutz- oder Untergrundstabilisationsmatte, zumindest überwiegend bestehend aus synthetisch hergestellten Polymeren, dadurch gekennzeichnet, dass die Polymere zumindest überwiegend abbaubare synthetische Polymere sind.	Zusammensetzung nur aus synthetischen Polymeren, keine Naturfasern
DE 000003943288 A1 <i>Geotextilmaterial und seine Herstellung</i> Hoechst AG, 65929 Frankfurt Anmeldedatum: 29.12.1989	Das Gewebe zur Stabilisierung von Bodenschichten oder für Drainagefilter besteht aus Filamenten mit einer max. Zugfestigkeit von 60-80 cM / tex, max. Zugdehnung von weniger als 10% und eine Thermoschrumpfung von weniger als 10%, gemessen in heißer Luft bei 200 ° C. nach DIN 53 866. Das Gewebe ist gewebt, gestrickt, ein Vlies oder eine Matte, Raschelware oder eine Kombination von Typen mit einem nicht-gleitenden Charakter. Die Filamente haben eine max. Zugfestigkeit von 70-80 cM / tex, eine max. Zugdehnung von 6-10% und eine Thermoschrumpfung von 2-9%, gemessen bei 200 ° C. Vorzugsweise werden Filamente aus Polyester, insbesondere Polyethylenterephthalat, eingesetzt.	Mechanische Kennwerte stark abweichend, keine Naturfasern
DE 000004015505 A1 <i>Geotextiles Filtermaterial</i> Hoechst AG Anmeldedatum: 15.05.1990	Beschrieben wird ein geotextiles Filtermaterial, bestehend aus einem oder enthaltend einen Vliesstoff aus Synthesefasern, wobei zumindest ein Teil der Synthesefasern Hohlfasern sind.	Zusammensetzung nur aus synthetischen Polymeren, teilweise als Hohlfasern, keine Naturfasern
DE 000069805578 T2 <i>Geotextile Filterstruktur</i> BIDIM GEOSYNTHETICS S.A. Anmeldedatum: 07.08.1998	Geotextile Bodenfilterstruktur, dadurch gekennzeichnet, dass sie folgendes umfasst: - eine untere Schicht aus geotextilem Filtermaterial, die in der Dicke eine Anzahl n Verengungen aufweist, die zwischen 15 und 40 liegt, und mit synthetischen Filamenten oder Fasern mit einer Feinheit D (Dezitet) ausgeführt ist; und - eine obere Schicht aus geotextilem Material zum mechanischen Schutz, die in der Dicke Verengungen aufweist, die eine größere Weite haben als die der unteren Schicht, und die mit synthetischen Filamenten oder Fasern mit einer Feinheit von wenigstens 2D ausgeführt ist, wobei die obere mit der unteren Schicht fest verbunden ist.	Zusammensetzung nur aus synthetischen Polymeren, keine Naturfasern

EP 000000390755 A3 <i>Mehrschichtiges Geotextil aus Verbundwerkstoff mit niedriger Verformbarkeit und hohem Filtrations- bzw. Drainagevermögen</i> SAVAL SRL Anmeldedatum: 27.03.1990	Ein laminiertes Verbund-Geotextil mit einer guten Filter-Drainage-Kapazität und einer Dehnbarkeit von mindestens 50% weniger als die von herkömmlichen Geotextilien oder bekannten Verbundstoffen mit ähnlicher Zugfestigkeit. Das Geotextil wird aus einer Vielzahl von miteinander verbundenen Schichten gebildet, die unterschiedliche Funktionen erfüllen.	Zusammensetzung als laminiertes Verbund
EP 000001753919 B1 <i>Erosionsschutzmatte mit Fasermatrix auf Cellulosebasis und Verfahren zur Herstellung von Erosionsschutzmatte mit Fasermatrix auf Cellulosebasis</i> COLBOND BV, Anmeldedatum: 21.05.2005	Dreidimensionales Gebilde bestehend aus einer dreidimensionalen Matte aus synthetischen Filamenten und einer Matrix aus überwiegend natürlichen Fasern, die auf und innerhalb der dreidimensionalen Matte verteilt vorliegt, dadurch gekennzeichnet, dass der Zusammenhalt zwischen den ungeordneten Fasern der Matrix untereinander sowie der Zusammenhalt zwischen den ungeordneten Fasern der Matrix und den Fasern aus synthetischen Filamenten der Matte durch Vermischen der Fasern gegeben ist und dass die Fasermatrix in ihrer Form der Oberflächenkontur der dreidimensionalen Form der Matte aus synthetischen Filamenten folgt, indem sie den überwiegenden Teil der Oberflächen zwischen den synthetischen Filamenten, die die Oberflächenkontur bilden, bedeckt und dass die Fasermatrix Öffnungen enthält.	Gegenstand ist der genaue Aufbau der Erosionsschutzmatte aus Fasermischungen
EP 000002439342 B1 <i>Bewehrungsmatte</i> NAUE GMBH & CO KG Anmeldedatum: 06.10.2010	Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf Bewehrungsmatten, umfassend wenigstens eine Trägerschicht und wenigstens eine Deckschicht, wobei die Trägerschicht und/oder die Deckschicht hydrophob ausgerüstet sind, Verfahren zu deren Herstellung und die Verwendung von erfindungsgemäß hergestellten Bewehrungsmatten für Bewehrungsaufgaben im Wasserbau und Küstenschutz.	Hydrophobe Ausrüstung der Deckschicht
WO 002014137497 A1 <i>Geosynthetisches Komposit zur Filtration und Entwässerung von feinkörnigen Geomaterialien</i> GSE LINING TECHNOLOGY INC Anmeldedatum: 21.01.2014	Ein Geoverbundstoff mit Geonet und Geotextil. Das Geotextil weist eine Vliesstoffschicht und eine Gewebeschicht auf, wobei der Vliesstoff durch Vernadeln mit dem Gewebe verbunden ist, wobei sich Fasern des Vliesstoffes durch und über das Gewebe und das Gewebe und die Fasern des Vliesstoffes erstrecken sich durch das Gewebe erstrecken, sind mit einer Seite des Geonets verbunden.	Aufbau mit Geonet, Gewebe und Vlies
EP 3 385 434 A1 <i>NONWOVEN CELLULOSE FIBER FABRIC WITH MERGED FIBERS</i> LENZING AG Anmeldedatum: 03.04.2017	Vliesstoff aus Cellulosefasern, insbesondere direkt hergestellt aus Lyocell-Spinnlösung, wobei der Stoff ein Netzwerk von im Wesentlichen endlosen Fasern umfasst und wobei mindestens ein Teil der Fasern an Zusammenführungspositionen integral zusammengeführt wird..	Der Vliesstoff besteht aus Cellulosefasern.

### I.3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) begleitete das Forschungsvorhaben als assoziierter Partner. Die BAW ist eine technisch-wissenschaftliche Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Sie ist der zentrale Dienstleister für die Beratung und Unterstützung des Ministeriums und der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) im Rahmen ihrer verkehrswasserbaulichen Aufgaben, insbesondere deren bauaufsichtliche Verantwortung dafür, dass alle Anlagen und Einrichtungen der Bundeswasserstraßen den Anforderungen von Sicherheit und Ordnung genügen.

Das Referat Erdbau und Uferschutz der Abteilung Geotechnik beschäftigt sich seit Jahren sehr intensiv u. a. mit der Bemessung und Ausführung von Uferschutzmaßnahmen an Wasserstraßen. Folgende Aufgaben wurden von der BAW im Forschungsvorhaben übernommen:

- Definition der technischen Anforderungen an die zu entwickelnden Geotextilien
- Prüfung und Bewertung der hergestellten Geotextilien hinsichtlich der Erfüllung der technischen Anforderungen
- Beratung bei der Optimierung der Geotextilprototypen
- Testen von drei ausgewählten Geotextilprototypen an der Versuchsstrecke der BAW am Rhein
- Testen der Durchwurzelbarkeit von Geotextilprototypen in Bewuchskästen.

Die Auswahl und Beschaffung der Naturfasern, die Herstellung der Geotextilien und eine Qualitätsprüfung erfolgte im Unterauftrag bei der Firma BNP Brinkmann GmbH. Brinkmann startete vor einigen Jahren die

Entwicklung von Vliesstoffen mit biobasierten Polymerfasern und Naturfasern (Wolle, Sisal, Jute, Flachs, Hanf, Baumwolle), so dass ideale Voraussetzungen für die Beteiligung am Forschungsvorhaben gegeben waren.

Muster der Geotextilien wurden im Rahmen des Projekts »EcoDike« im November 2018 und im April 2019 in der Wellenanlage des Ludwig-Franzius-Instituts für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen der Leibniz Universität Hannover getestet. Im Rahmen des öffentlich geförderten Vorhabens »EcoDike« wird die Stabilität verschiedener alternativer ökologischer Küstenschutzdeichbegrünungen bei Sturmfluten untersucht. Ziel ist die Steigerung des ökosystemaren Werts von Deichen und Deckwerken unter gleichzeitiger Beachtung der Deichsicherheit. Auch im Deichbau könnte das im Forschungsvorhaben »Bioshoreline« entwickelte, abbaubare Geotextil im kritischen Anfangszustand, bis die Bepflanzung ausreichend Wurzeln gebildet hat, Schutz bieten. Nach Abschluss eines Vertrages zwischen dem Projektkonsortium und dem Ludwig-Franzius-Institut, der die Veröffentlichungs- und Verwertungsrechte des BMEL/FNR-Vorhabens schützt, wurden Geotextilien für EcoDike zur Verfügung gestellt. Die Versuche haben ergeben, dass eine Optimierung der Geotextilfilter für den Einsatz im Deichbau erforderlich wäre.



**AP 2 Auswahl der Naturfasern sowie Werkstoffauswahl und -entwicklung für Polymerfasern**

*Auswahl der Naturfasern*

Die Auswahl der Naturfasern erfolgte in enger Absprache und Diskussion mit den Naturfaserherstellern sowie der Berücksichtigung von Erfahrungen aus der technischen Verarbeitung. Mit einzubeziehen sind neben dem Preis und den verfügbaren Mengen die werkstofflichen Eigenschaften. Die mechanischen Eigenschaften von Naturfasern schwanken je nach Aufbereitung, Dicke und Produktionsjahr (bei Einjahrespflanzen). Die Verarbeitungseigenschaften der Fasern zu technischen Textilien (hier Vliese) sind dabei von herausragender Bedeutung<sup>20</sup>. Zum Beispiel kann über die Vernadelung (Einbindung und Verknotung) bei der Vliesherstellung der Abbau der Naturfasern beeinflusst werden.

Bereits in der Vorhabenbeschreibung ist ein möglicher Aufbau der Geotextilfilter mit mehr als einer Lage Vlies benannt. Aus den bisherigen Recherchen und Diskussionen kristallisierte sich heraus, dass ein mehrlagiger Aufbau der Geotextilfilter zielführend ist. In der folgenden Tabelle 2 sind das Geotextilfilterkonzept und die damit verbundene Faserauswahl zusammengestellt.

**Tabelle 4: Tabellarische Darstellung des Geotextilfilterkonzeptes und der damit verbundenen Faserauswahl.**

Faserauswahl Decklagen oben / unten		
Naturfasern	Optionen: Kokos, Sisal, Bambus	Gründe für die Auswahl: Hoher Ligninanteil, 3-5 Jahre beständig, durchwurzelbar
Stützfasern	PLA-Fasern (weilweise modifiziert oder Bikomponentenfasern)  (Werkstoffentwicklung in AP 2)	Zugfasern für die Naturfasern (in der Vliesanlage)
Weitere Optionen sind die Auswahl von Zweikomponentenfasern oder das Verdichten in der Vliesanlage.		
Faserauswahl Kernlage		
Hauptanteil	Modifizierte PLA-Fasern  (Werkstoffentwicklung in AP 2)	Erreichen der Mindestanforderungen nach drei Jahren
Naturfasern	keine	Haltbarkeit über die Standzeit nicht gewährleistet.

Als Naturfaser wurde Sisal gewählt. Sisal hat einen hohen Ligninanteil und ist bis zu 5 Jahren beständig. Im Gegensatz zu Kokos- und Bambusfasern, die auch in der Recherche in AP2 betrachtet wurden, sind Sisalfasern als verarbeitbare Naturfasertypen als Stapelware verfügbar und krepelfähig. Bei dem verwendeten Sisal handelt es sich um gerissenes Material, das bunte Nahtstreifen aus Polyestergergarn hatte. Diese sind als bunte Fäden in den Decklagen zu sehen (Abbildung 3).



**Abbildung 3: Geotextilprototyp Variante A**

*Werkstoffauswahl und -entwicklung für Polymerfasern*

Bei PLA Typ1 handelt es sich um ein besonders für die Herstellung von Polymerfasern geeignetes Material. PLA Typ1 wird kommerziell von Trevira zur Herstellung von Polymerfasern eingesetzt. Aufgrund der erwiesenen Verarbeitbarkeit dient dieses Material als Referenzpolymer. Brinkmann und Trevira haben eine gekräuselte Faser aus diesem Polymer mit 6,7 dtex<sup>21</sup> als Referenzfaser definiert. Die Fasertypen sind auf der Vliesanlage von Brinkmann verarbeitbar.

<sup>20</sup> J. Müssig 2010: Industrial Applications of Natural Fibres, Structure, Properties and Technical Applications. John Wiley & Sons, Chichester, p. 538.

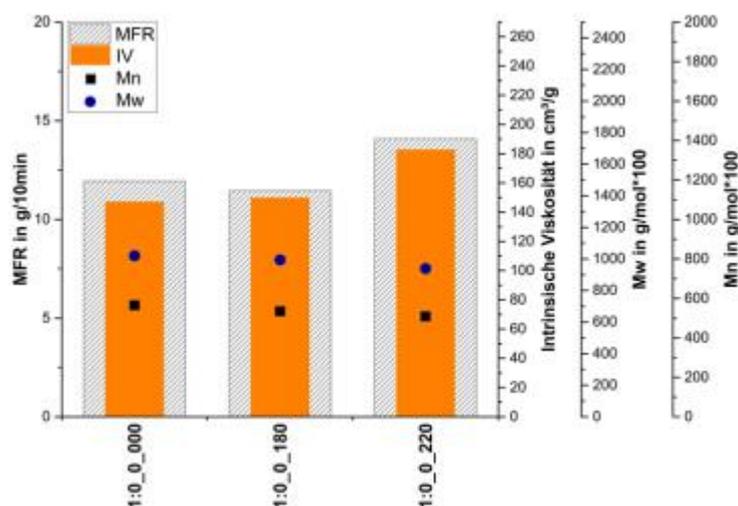
<sup>21</sup> dtex = 10.000 x Masse (in g) / Länge (in m)

Grundsätzlich sollen die Polymerwerkstoffe und die Fasern über eine veränderte Kristallinität und Polymerkettenlänge unterschiedliche Abbauleistungen zeigen. Die Polymerfaserherstellung selbst eröffnet neben der Möglichkeit zur Einstellung der Kristallinität insbesondere über Variationen der Faserdicke Optionen zur Einstellung der Abbaugeschwindigkeit (siehe AP3).

Das Ziel der weiterführenden Werkstoffentwicklung für die Polymerfaserherstellung ist die Einstellung unterschiedlicher Abbaugeschwindigkeiten an kommerziell verfügbaren PLA-Typen durch die Compoundierung. Die neu entwickelten Werkstoffformulierungen sollen dabei verkürzte Abbaugeschwindigkeiten zeigen und gleichzeitig schmelzspinnbar bleiben. Der Ansatz ist die Veränderung der Polymerkettenlänge. Bei der Compoundierung sollen durch thermischen Abbau Transesterifizierungen ausgelöst werden. Unterschieden werden dabei u. a. der intermolekulare Abbau zu monomeren und oligomeren Lactiden (zyklische Moleküle) und der intramolekulare Abbau zu monomeren und oligomeren Estern<sup>22</sup>. Die Herausforderung besteht darin, die Polymerketten soweit einzukürzen, dass möglichst wenige Monomere und zyklische Moleküle entstehen. Beides stört den Prozess des Schmelzspinnens. Eine weitere Möglichkeit zur Veränderung der Polymerkettenlänge bietet die Anwesenheit von Wasser bei der Compoundierung, wodurch insbesondere bei höheren Temperaturen Hydrolyse ausgelöst wird. Vom Hersteller werden Feuchtegehalte von unter 50 ppm empfohlen, um die Viskosität und andere Eigenschaften nicht negativ zu verändern.

Die Abbaugeschwindigkeit wird unter anderem von der Kristallinität der Werkstoffe beeinflusst. Diese wird bei PLA unter anderem durch das Verhältnis von D- und L-Milchsäure im Polymer bestimmt. PLA Typ1 hat einen geringen D-Milchsäureanteil. Die Kristallinität des gelieferten Rohpolymers ist 45,2 % (bestimmt in einer DSC Messung, 1.Heizkurve). Die folgende Abbildung 4 zeigt an einigen Versuchen mit PLA Typ1 den Einfluss der Compoundierparameter auf die Polymereigenschaften. Die Probenbezeichnung setzt sich aus dem Verhältnis des PLA Typ1 zu einem Blendpartner, der Zugabe von Wasser in parts per hundred (pph) bezogen auf den Blendpartner und die Temperatur bei der Compoundierung jeweils getrennt durch einen Unterstrich zusammen.

Die intrinsische Viskosität (IV), das Molekulargewicht (Gewichtsmittel (Mw), zahlenmäßiges Mittel (Mn)) und der Schmelzflussindex (MFR) werden nur gering beeinflusst. Eine erhöhte Verarbeitungstemperatur zeigt entsprechend der Erwartung ein gering vermindertes Molekulargewicht (Mn, Mw) und einen leicht gesteigerten MFR und eine leicht gesteigerte IV.



**Abbildung 4: Einfluss der Compoundierparameter auf den MFR, die intrinsische Viskosität, das zahlenmäßige und das gewichtmäßige Mittel des Molekulargewichtes von PLA Typ1.**

PLA Typ2 ist eine Type, die für reaktive Extrusion empfohlen wird. Die Kristallinität des gelieferten Materials liegt nur bei 34,9 %, was unter anderem durch den höheren Anteil D-Milchsäure im Vergleich zu PLA Typ1 hervorgerufen wird. Diese Type wurde als Blend-Partner für die Werkstoffformulierungen ausgewählt. Eine mögliche chemische Reaktion bei der Compoundierung mit erhöhter Temperatur und Wasser kann, neben den bereits genannten Auswirkungen, auch die Vernetzung der Polymerketten sein. Eine Vernetzung ist jedoch für die Schmelzspinnbarkeit nachteilig zu bewerten, da hier eine Parallelisierung der Polymerketten in der Spinnöse notwendig ist. Ziel ist die Reduzierung der Polymerkettenlänge bei ähnlicher intrinsischer Viskosität ohne starke Vernetzung der Polymerketten. Das Entscheidungskriterium für Trevira in Bezug auf die Scale-Up Versuche ist vorwiegend die intrinsische Viskosität.

PLA Typ2 ist nach Herstellerangaben zur Produktion von Fasern geeignet. Beide Typen haben eine Zulassung gemäß FDA für Lebensmittelverpackungen und unterliegen daher hohen Qualitätsstandards, die eine negative

<sup>22</sup> Lim et al. 2008: Processing technologies for poly(lactic acid). Progress in Polymer Science 33, 820–852.

Beeinflussung der Umwelt am Einsatzort Flusssufer wenig wahrscheinlich machen. Insgesamt wurden folgende Blends mit verschiedenen Temperaturen getestet:

- PLA Typ1
- PLA Typ2
- PLA Typ2 mit Wasser
- PLA Typ1 und PLA Typ2 in verschiedenen Gewichtsanteilen
- PLA Typ1 und PLA Typ2 mit Wasser in verschiedenen Gewichtsanteilen

Die Entwicklung der Compounds erfolgte auf dem gleichläufigen Doppelschneckenextruder Coperion ZSK 25 (s. Abbildung 5). Die geometrischen Abmessungen und die wesentlichen Betriebsparameter können wie folgt zusammengefasst werden:

- Schneckendurchmesser 25 mm
- Verfahrenslänge  $40 \times D \rightarrow 1000$  mm
- Seitendosierung
- Umgebungsdruckentgasung
- 8 Heizzonen mit separater Temperatursteuerung
- 2-Loch Düse
- Wasserbad



**Abbildung 5: Doppelschneckenextruder mit Seitendosierung**

Bei der verwendeten Polymerschnecke wurden fördernde und mischende Elemente eingesetzt. Das Schneckendesign wurde spezifisch für eine schonende Verarbeitung von biobasierten Polyestern zusammengestellt. Die beiden PLA-Typen wurden in einem Granulatrockner bis auf einen Restfeuchtegehalt von  $\leq 0,05$  % vorgetrocknet.

Die Dosierung von PLA Typ1 bzw. PLA Typ2 erfolgte über den Hauptdosierer in den Haupteinzug. Für die Blends aus beiden Typen wurde PLA Typ2 über den Seitendosierer (Spiralschnecke, Austragsrohr  $D_1 = 25,5$  mm), ebenfalls in den Haupteinzug, gefördert. Bei einigen Rezepturen wurde Wasser zugegeben. Das Wasser wurde auf  $40$  °C temperiert und mit einem Schlauch über den Haupteinzug in den Extruder geleitet. Die Nachfolgeeinheiten der Extrusionslinie bestanden aus einem Wasserbad und einem Granulator Scheer SGS-50E. Die Verarbeitung erfolgte jeweils bei zwei Temperaturprofilen („Normal“  $180$  °C und „Heiß“  $220$  °C, s. Tabelle 5). Die Compoundierung der unterschiedlichen Werkstoffformulierungen verlief ohne Auffälligkeiten.

**Tabelle 5: Temperaturprofile des Extruders**

Profil	Temperaturzone Extruder							
	Einzug	2/3	4	5/6	7	8	9/10	Austrag
Normal	60	160	170	180	180	180	180	170
Heiß	60	200	210	220	220	220	220	210

Im Folgenden werden die Analyseergebnisse zusammengefasst dargestellt, auf deren Grundlage die Auswahl der Formulierungen für das Scale-Up getroffen wurde. Abbildung 6 zeigt den MFR, die intrinsische Viskosität und das zahlenmäßige sowie gewichtsmäßige Mittel des Molekulargewichts von unbehandelter PLA Typ1 und PLA Typ2 sowie den Einfluss der Compoundierbedingungen auf PLA Typ2. Im Vergleich der unbehandelten PLA-Typen wird deutlich, dass die intrinsische Viskosität,  $M_n$  und  $M_w$  der PLA Typ2 höher und dass der MFR niedriger sind. Auch nach der Prozessierung mit Wasserzugabe und  $220$  °C Compoundiertemperatur waren die Eigenschaften der PLA Typ2 nicht ausreichend an diejenigen von PLA Typ1 angepasst, um in einem Schmelzspinnprozess verarbeitbar zu sein. Daher wurden PLA-Blends aus beiden Typen hergestellt. Einige Analyseergebnisse sind in Abbildung 7 dargestellt. Die Proben 4:1\_0\_180, 3:2\_0\_180 und 3:2\_5\_180 haben

eine ähnliche intrinsische Viskosität wie das Referenzpolymer und wurden daher für die Scale-Up Versuche ausgewählt.

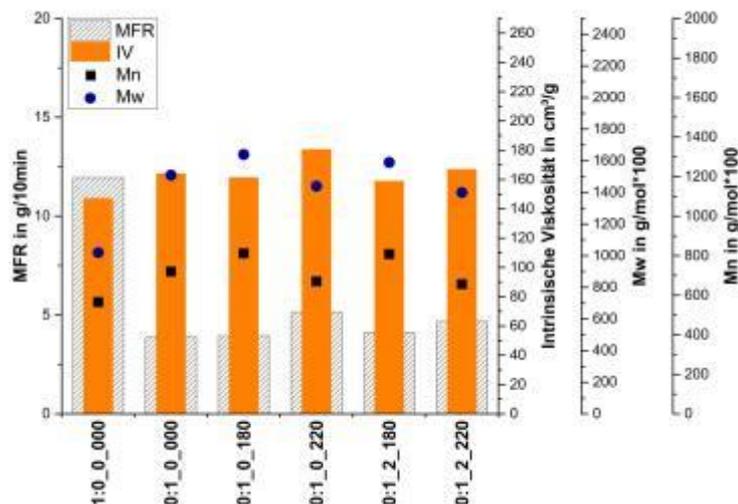


Abbildung 6: Einfluss der Compoundierparameter auf den MFR, die intrinsische Viskosität, das zahlenmäßige und das gewichtmäßige Mittel des Molekulargewichtes (Mn, Mw) von PLA Typ2.

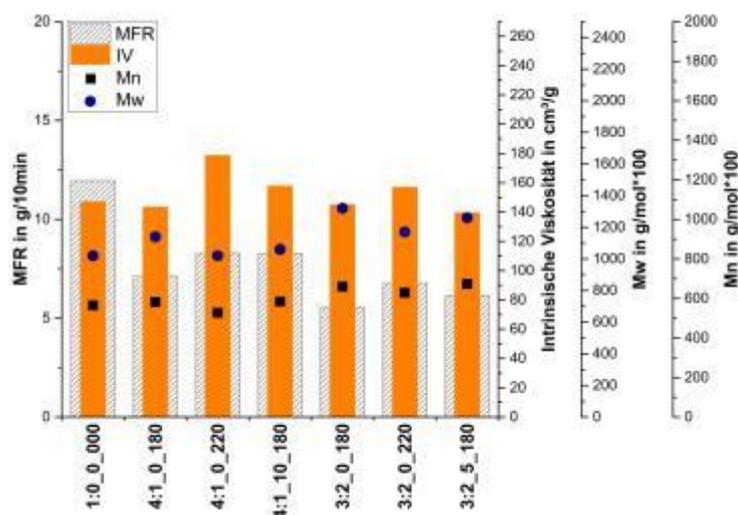


Abbildung 7: Einfluss der Compoundierparameter auf den MFR, die intrinsische Viskosität, das zahlenmäßige und das gewichtmäßige Mittel des Molekulargewichtes (Mn, Mw).

Neben der Messung der MFR war es vorgesehen, weitere rheologische Untersuchungen zur Werkstoffcharakterisierung durchzuführen. Insbesondere Messungen mit dem Rheotens wurden durchgeführt. Hierzu wurde nach anfänglichen Schwierigkeiten erfolgreich ein Verfahren entwickelt, mit dem reproduzierbare Ergebnisse erzeugt werden konnten. Da in den anschließend bearbeiteten Arbeitspaketen keine Polymerfasern produziert wurden, werden die Rheotensmessungen erst bei Optimierung der Geotextilprototypen nach Beendigung des Freilandversuchs erfolgen. Das AP 13 (Entwicklung von Optimierungskonzepten für die abbaubaren Geotextilien) liegt in der 2. Förderphase, die derzeit beantragt wird.

### AP 3 Herstellung der Polymerfasern und Erwerb der Naturfasern

#### Scale-up Compoundierung

Von den in AP 2 ausgewählten Werkstoffrezepturen 4:1\_0\_180, 3:2\_0\_180 und 3:2\_5\_180 wurden bei FKUR jeweils ca. 200 kg hergestellt. Die Herstellung der Compounds erfolgte auf einem gleichläufigen Doppelschneckenextruder mit den folgenden Parametern:

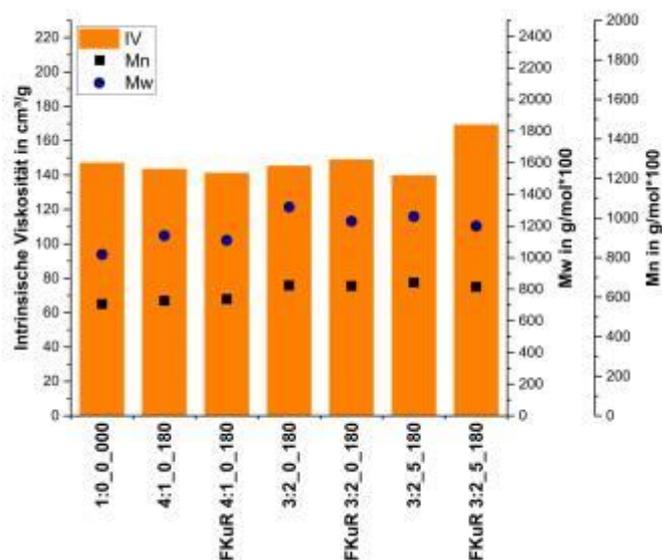
- Schneckendurchmesser 25 mm
- Verfahrenslänge 40xD → 1000 mm
- offene Entgasungsöffnung

- Düsenplatte 1-Loch, 3 mm
- Unterwassergranulierung (UWG)

Die Prozessparameter der Versuche in AP 2 wurden übernommen. Durch die Verwendung einer Unterwassergranulierung (UWG) wurde im Gegensatz zu den in AP 2 hergestellten Proben mit einem höheren Schmelzedruck vor der Austragsdüse gearbeitet.

Bei der Herstellung der Rezeptur 3:2\_5\_180 wurde das Wasser über eine Flüssigdosierung mit in den Haupteinzug gegeben. Der Durchfluss der Flüssigdosierung mittels Schlauchpumpe wurde vor dem Versuch mehrfach bestimmt. Dabei ist aufgefallen, dass die Durchflussmenge mit dem Höhenunterschied zwischen Vorratsbehälter und Aufgabestelle variiert. Für die Produktion wurde ein Höhenunterschied festgelegt und der Füllstand des Vorratsbehälters möglichst gleich gehalten.

Die Produktion der drei Chargen verlief ohne Auffälligkeiten. Jeweils 200 kg wurden zu Trevira zur Polymerfaserherstellung und 5 kg zu UMSICHT zur Materialcharakterisierung gesendet. In Abbildung 8 sind die intrinsischen Viskositäten und die Molekulargewichte der Vorversuche im Vergleich zu den Proben des Scale-Up dargestellt. Die Ergebnisse legen nahe, dass eine Polymerfaserherstellung aus diesen Compounds möglich ist.



**Abbildung 8:** Einfluss der Compoundierparameter auf die intrinsische Viskosität, das zahlenmäßige und das gewichtmäßige Mittel des Molekulargewichtes (Mn, Mw) von Blends aus PLA Typ1 und PLA Typ2.

### Polymerfaserherstellung

Trevira führte vor den Verarbeitungsversuchen eine tiefgehende Analyse der Rohstoffe durch (Tabelle 6).

**Tabelle 6:** Ausgewählte Eigenschaften der Compounds im Vergleich zum Referenzmaterial PLA 6202D

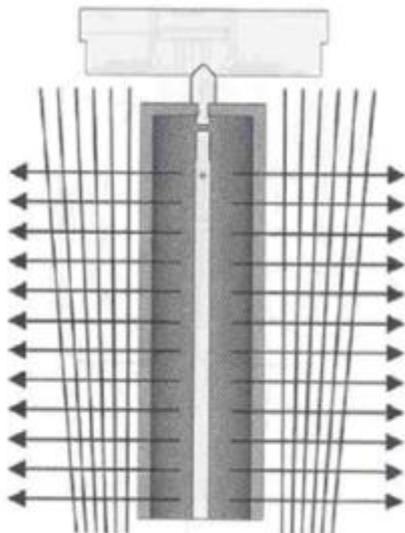
	Einheit	Referenz PLA Typ1	FKuR 4:1_0_180 80 % PLA Typ1 20 % PLA Typ2	FKuR 3:2_0_180 60 % PLA Typ1 40 % PLA Typ2	FKuR 3:2_5_180 58,75 % PLA Typ1 39,25 % PLA Typ2 2 % Wasser
Lactidgehalt	%	0,32	0,35	0,36	0,36
Anteil L-Milchsäure	% (F/F)	98,53	97,58	97,19	97,17
Anteil D-Milchsäure	% (F/F)	1,47	2,43	2,81	2,83
Glasübergangstemperatur $T_g$	°C	67,9	60,1	62,2	61,6
Kristallisationstemperatur $T_c$	°C	-	126,9	126,8	130,4
Schmelzpunkt $T_m$	°C	167,3	163,2	163,0	163,2

Der höhere Anteil von D-Milchsäure in den Compounds korreliert mit dem Anteil PLA Typ2. Die Glasübergangstemperatur und der Schmelzpunkt der Compounds sind niedriger als beim Referenzmaterial.

Vor dem Verspinnen wurden die Granulate in einem Taumeltrockner für 20 h bei 70°C getrocknet, um einem weiteren Abbau des Polymers während des Verspinnens vorzubeugen.

Die Versuche zur Herstellung der Fasern erfolgten in einer Schmelzspinnanlage zur Herstellung von Homopolymerfasern mit einer Runddüse und einer Innen-Außen-Anblasung (OFQ Anblasung, s. Abbildung 9):

- Lochzahl: 280 / 0,4 mm Bohrungsdurchmesser
- Abzug: 1.300 m/min
- Förderung: 630 g/min
- Spinntiter: 17,31 dtex
- Spinn temperatur (Soll): 250°C



**Abbildung 9: OFQ-Anblasung**

Verschiedene Filter und Festkörper im Spinnpack haben die Aufgabe, die Polymerschmelze zu filtrieren und führen zu einer gleichmäßigen Druckverteilung vor der Spinndüse. Wird der Druck zu hoch ( $> 200$  bar), erfolgt aus Sicherheitsgründen eine automatische Trennung der Spinnpumpe. Bei allen drei Rohstoffen wurde unmittelbar nach dem Einsetzen des Spinnkörper (Pack) ein erhöhter Druck unmittelbar vor der Spinndüse (Packdruck) festgestellt. Üblicherweise bewegt sich dieser Druck im Bereich zwischen 60 und 100 bar. Jedoch war bei diesen Rohstoffen ein Druck von über 150 bar mit einer steigenden Tendenz festzustellen. Ein Gegensteuern über die Temperatur bis 290°C ergab keine Reduzierung des Druckanstiegs. Diese Temperaturerhöhung führt letztendlich auch zu einem deutlich schlechteren Spinnverhalten durch den Abbau des Polymers. Somit musste bei allen drei Versuchsrohstoffen der Spinnversuch abgebrochen werden.

Da beide PLA-Typen, die in den Blends eingesetzt wurden, laut Hersteller für das Schmelzspinnverfahren geeignet sind, verändert vermutlich die Compoundierung die Eigenschaften der Polymere. Die Polymerstruktur der im Scale-Up hergestellten Proben wurde in weiteren Analysen untersucht, konnte aber den hohen Druckaufbau vor der Spinndüse nicht erklären.

Daher wurde entschieden, für weitere Versuche auf den Zwischenschritt der Compoundierung zu verzichten. Die beiden PLA-Typen wurden während des Trocknungsvorgangs gemischt und als Dryblend direkt dem Verspinnen zugefügt. Dazu wurden von der FKUR Kunststoff GmbH 360 kg PLA Typ1 und 160 kg PLA Typ2 zur Verfügung gestellt. Aus dem Granulat wurden im Taumeltrockner entsprechend der Rezepturen aus der Materialentwicklung PLA-Mischungen Typ1/Typ2 im Verhältnis 80/20 (N-17-5160/D) sowie 60/40 (N-17-5170/0) hergestellt. Die getrockneten Granulatmischungen wurden in einer Schmelzspinnanlage zur Herstellung von Homopolymerfasern mit einer Runddüse und einer Innen-Außen-Anblasung verarbeitet. Die Temperatur an der Düse betrug 240 °C und der Druck 80 – 100 bar. Der Prozess verlief bei beiden Mischungen stabil.

Nach dem Spinnen wurden die Fasern mit einer Avivage versehen und verstreckt. Die eingesetzte Avivage für die PLA Fasern ist biologisch abbaubar und auf Pflanzenbasis. Nach dem Verstrecken erfolgte die Kräuselung und Fixierung für die Vliesherstellung. Die Kräuselung für die beiden Fasern wurde entsprechend den Anforderungen an die Weiterverarbeitung angepasst. Folgende textiltechnologische Eigenschaften wurden an den Fasern ermittelt (Tabelle 7):

Tabelle 7: Eigenschaften der hergestellten PLA-Fasern

Eigenschaft	Einheit	N-17-5160/0	N-17-5170/0
Verhältnis Typ1/Typ2		80/20	60/40
Feinheit	dtex	7,0	6,9
Festigkeit	cN/tex	32,6	34,0
Dehnung	%	65,3	62,3
Schrumpf (110°C)	%	0,1	0,4
Kräuselung	Bg/cm	4,3	4,7
Finish	%	0,24	0,20

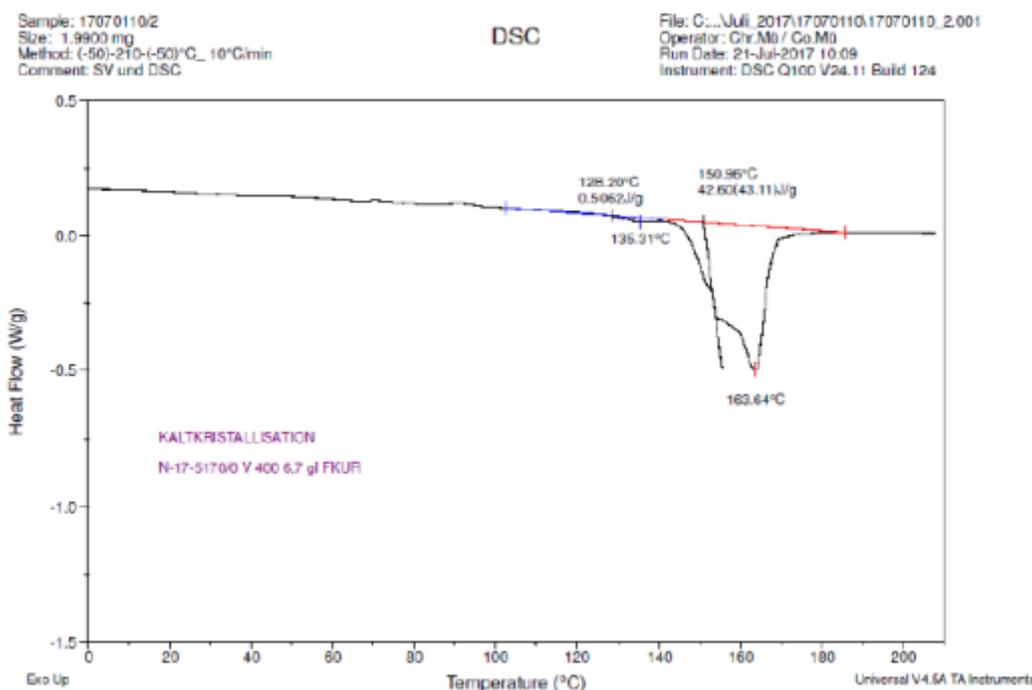
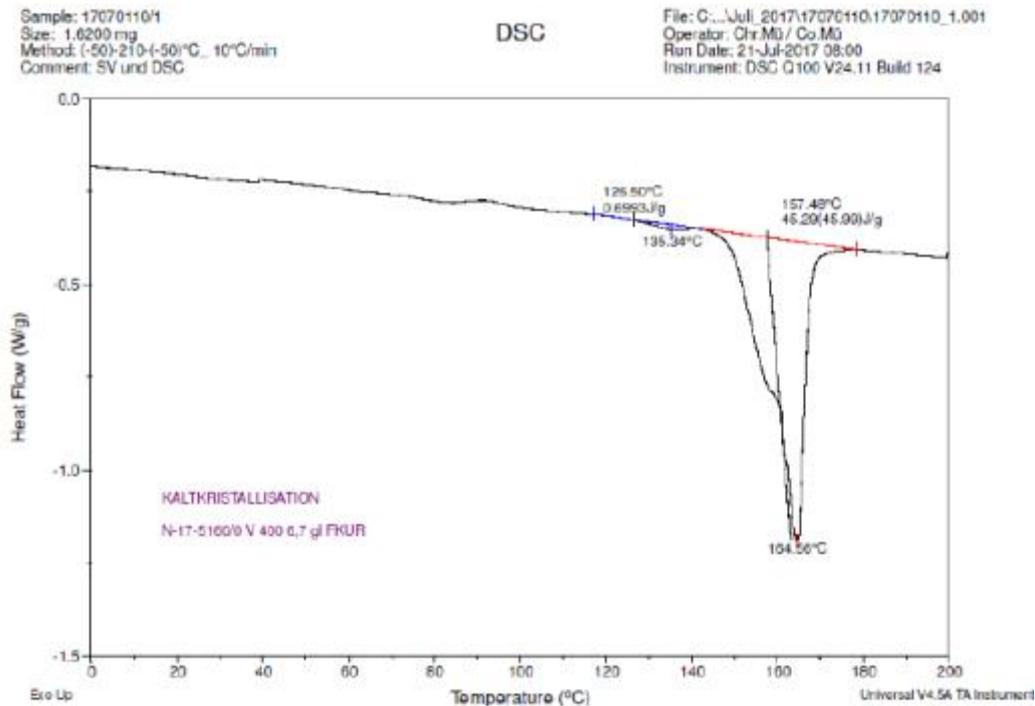


Abbildung 10: DSC Messung der hergestellten PLA-Fasern

Generell ist festzuhalten, dass durch den Einsatz des Dryblends vergleichbare Fasereigenschaften zu der Standardtype T 400, 6,7 dtex von Trevira erreicht wurden. Die Kräuselung wurde in Absprache mit BNP

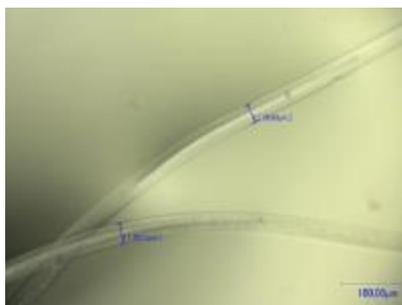
Brinkmann angepasst, da die Fasern auf einer speziellen Vliesanlage weiterverarbeitet werden sollten, die eine andere Kräuselcharakteristik als die Referenzfasern benötigt.

Abbildung 11 zeigt die digitalen Lichtmikroskopieaufnahmen der neuen Fasertypen im Vergleich zu Standard-PLA-Fasern. Auffällig ist, dass in der Fasermitte der Probe N-17-5170/0 entlang der Faserachse Linien zu sehen sind. In dieser Probe ist ein höherer Anteil des PLA Typ2 als in Probe N-17-5160/0, bei der keine Linien erkennbar sind. Solche Linien können durch Entmischung der beiden Polymertypen oder durch Veränderungen in der Kristallisation auftreten. Nach Erfahrungen des Projektpartners Trevira ist es wahrscheinlicher, dass Kristallinitätsänderungen die Ursache sind, da dies bei PLA-Blends häufiger vorkommt. Ein Nachweis der Kristallinitätsänderungen kann mit den im Projektplan vorgesehenen Analysen nicht erfolgen. In Abhängigkeit der Ergebnisse der Untersuchungen der Geotextilprototypen wird gegebenenfalls später die Kristallinität der Fasern genauer untersucht werden.

PLA N-17-5160/0



PLA N-17-5170/0



PLA Typ1



**Abbildung 11: Aufnahmen der neuen Fasertypen im Vergleich zu Standard PLA-Fasern mit einem digitalen Lichtmikroskop**

Die aus den Fasern hergestellten Geotextilprototypen erfüllten nur einen Teil der Anforderungen der BAW zur hydraulischen Filterstabilität (s. AP5). Daher wurde im Konsortium und in Absprache mit der FNR entschieden, weniger stark vernadelte Vliese herzustellen. FKur stellte für die neue Produktion der Polymerfasern 260 kg PLA Typ2 zur Verfügung, Trevira das benötigte PLA Typ1. Die Fasern wurden aus Dryblendmischungen wie zuvor im Verhältnis Typ1/Typ2 80/20 (N-18-5020/0) bzw. 60/40 (N-18-5030/0) hergestellt.

#### AP 4 Herstellung der Geotextilprototypen

Wie bereits unter AP 2 erläutert, ergab sich aus den Recherchen und Diskussionen, dass ein mehrlagiger Aufbau der Geotextilfilter zielführend ist.

Für die Herstellung der Kernlage wurden beide in AP 3 hergestellten, modifizierten PLA-Fasern N-17-5160 und N-17-5170 gemischt und zu einem Krempelvlies mit einem Flächengewicht von 400 g/m<sup>2</sup> verarbeitet. Die Deckvliese wurden mit unterschiedlichen PLA-Fasertypen hergestellt. Neben der Standardtype und den im Projekt entwickelten Typen N-17-5160 und N-17-5170 wurden bei BNP Brinkmann vorhandene Bikomponentenfasern (Biko) eingesetzt. Deckvlies 1 besteht aus 40 % Sisal, 40 % modifizierte PLA-Fasern (N-17-5160) und 20 % Standard-PLA. Deckvlies 2 besteht aus 40 % Sisal, 40 % modifizierte PLA-Fasern (N-17-5170) und 20 % Biko-Fasern. Die Flächengewichte der Decklagen betragen je 250 g/m<sup>2</sup>.

Zur Herstellung der Geotextilienprototypen wurden die beiden Decklagen und die Kernlagen in unterschiedlicher Zusammensetzung kombiniert und so drei verschiedene gekrempelte Vliese produziert (Tabelle 8). Von jeder Variante wurden 100 m<sup>2</sup> hergestellt. Schon bei der Vliesherstellung mit anschließender Temperung schrumpfen die Decklagen mit den Biko-Fasern. Ein Teilstück der Variante B wurde durch eine zusätzliche Wärmebehandlung weiter verfestigt (Variante B.1 –B.1.2017).

**Tabelle 8: Aufbau der Geotextilprototypen**

Variante	Deckschicht	Kernlage	Deckschicht	Gesamtgewicht	Gewicht - Deckschicht
A	Deckvlies 1: PLA / Sisal / mod.PLA (N-17-5160)	mod. PLA	Deckvlies 1: PLA / Sisal / mod.PLA (N-17-5160)	900 g/m <sup>2</sup>	250 g/m <sup>2</sup>
B	Deckvlies 1: PLA / Sisal / mod.PLA (N-17-5160)	mod. PLA	Deckvlies 2: PLA Biko / Sisal / mod.PLA (N-17-5170)	900 g/m <sup>2</sup>	250 g/m <sup>2</sup>
C	Deckvlies 2: PLA Biko / Sisal / mod.PLA (N-17-5170)	mod. PLA	Deckvlies 2: PLA Biko / Sisal / mod.PLA (N-17-5170)	900 g/m <sup>2</sup>	250 g/m <sup>2</sup>

Die mechanischen Eigenschaften der Geotextilprototypen wurden durch BNP Brinkmann geprüft (s. Tabelle 9). Die Anforderungen aus AP 1 wurden durch die Prototypen erfüllt. Zur weiteren Prüfung wurden Proben der Variante B (B.2017 – nicht thermisch verfestigt (BAW-Bezeichnung: B), B.1.2017 - thermisch verfestigt (BAW-Bezeichnung: B.1), der Variante A (A.2018, BAW-Bezeichnung: B.2) und der Variante C (C. 2019, BAW-Bezeichnung: B.3) an die BAW versandt. Dabei war die Probe A.2018 etwas weniger dicht vernadelt als die Probe B.2017 und die Probe C.2019 nochmals etwas weniger vernadelt als die Probe A.2018, um die Durchlässigkeit des bodenbesetzten Geotextils zu erhöhen und damit auch die Anforderung hinsichtlich der Filterwirksamkeit zu erfüllen.

**Tabelle 9: Eigenschaften der Geotextilprototypen**

Kennwerte	Prüfnormen	Einheit	Sollwert	Variante A	Variante B	Variante C
Gewicht	DIN EN 29073-1	g/m <sup>2</sup>	900 ± 10%	890	923	911
Dicke	DIN EN ISO 9073-2	Mm	-	5,6	5,7	5,8
Höchstzugkraft MD	DIN EN 29073-3	N/5cm (kN/m)	> 400 (> 8)	621 (12,4)	684 (13,7)	685 (13,7)
Höchstzugkraft CD	DIN EN 29073-3	N/5cm (kN/m)	> 400 (> 8)	848 (16,9)	881 (17,6)	900 (18,0)
Höchstzugkraftdehnung MD	DIN EN 29073-3	%	-	75	77	77
Höchstzugkraftdehnung CD	DIN EN 29073-3	%	-	79	81	80
Stempeldurchdrückkraft	DIN ISO 12236	N	> 1 500	2 240	2 300	2 552

Wie in AP 5 ausgeführt, wurden die Anforderungen an die hydraulische Filterstabilität durch die geprüften Geotextilprototypen B.2017 (BAW-Bezeichnung: B) und B.1.2017 (BAW-Bezeichnung: B.1) nicht für alle Bodentypen erfüllt. Im April 2018 wurde daher ein verbesserter Prototyp entsprechend Variante A (A.2018, BAW-Bezeichnung: B.2) mit einer Menge von 18 lfm hergestellt.

Die Prüfung der Probe A.2018 zeigt, dass die Durchlässigkeit des Geotextilfilters noch nicht ausreichend war. Aus diesem Grund wurde im März 2019 ein weiterer Geotextilprototyp entsprechend Variante C (C.2019, BAW-Bezeichnung: B.3) hergestellt, der nochmals weniger vernadelt und damit weniger dicht war. Folgende Mengen wurden produziert:

- 2 Rollen mit 2 x 50 lfm
- 1 Kurzrolle mit 47 lfm
- 1 Kurzrolle mit 10 lfm

Tabelle 10 zeigt die von BNP Brinkmann gemessenen Eigenschaften des Geotextilprototyps C.2019 (BAW-Bezeichnung B.3)

**Tabelle 10: Eigenschaften des Geotextilprototyps C.2019**

Kennwerte	Prüfnormen	Einheit	Sollwert	Variante C.2019
Gewicht	DIN EN 29073-1	g/m <sup>2</sup>	900 ± 10%	897
Dicke	DIN EN ISO 9073-2	Mm	-	7
Höchstzugkraft MD	DIN EN 29073-3	N/5cm (kN/m)	> 400 (> 8)	687 (13,7)
Höchstzugkraft CD	DIN EN 29073-3	N/5cm (kN/m)	> 400 (> 8)	814 (16,3)
Höchstzugkraftdehnung MD	DIN EN 29073-3	%	-	71
Höchstzugkraftdehnung CD	DIN EN 29073-3	%	-	93
Stempeldurchdrückkraft	DIN ISO 12236	N	> 1.500	2 711

## AP 5 Prüfung und Bewertung der hergestellten Geotextilprototypen

### *Labortest zur Bestimmung der biologischen Abbaubarkeit*

Die Prüfung der biologischen Abbaubarkeit in Böden wurde mit vier verschiedenen Fasermaterialien mit unterschiedlicher Kristallinität nach ISO 17556 bei 20 °C durchgeführt. Bei den Proben handelte es sich um folgende Muster, die im Wesentlichen aus PLA bestehen:

- Trevira Typ 400; 1,7 dtex 38 mm; Nr. 2804  
Labor-Nr. 2016/007 11224
- Trevira Typ 400; 6,7 dtex 60 mm; Nr. 2808  
Labor-Nr. 2016/007 11225
- Trevira Typ 430; 1,5 dtex rd. 6 mm; Nr. 2835  
Labor-Nr. 2016/007 11226
- Trevira Typ 450; 2,2 dtex rd. 6 mm; Nr. 4697  
Labor-Nr. 2016/007 11227

Bei den Prüfmaterialien wurden die Fasern manuell auseinandergezupft und als Fasern im Abbautest eingesetzt. Als gut abbaubares Referenzmaterial wurde kristalline Cellulose in Pulverform verwendet.

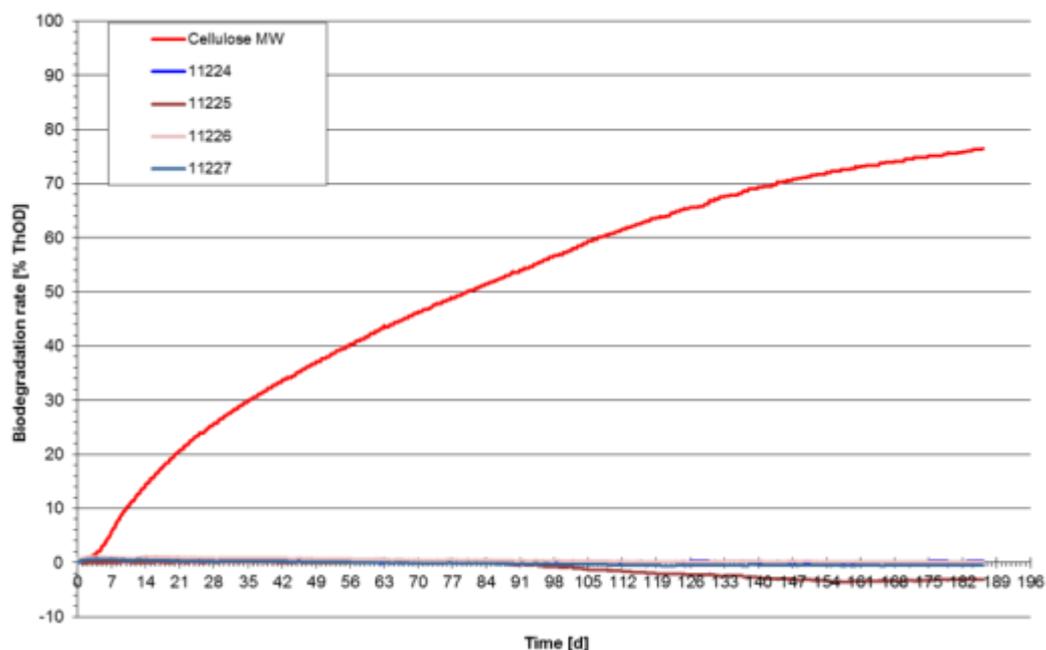
Als Prüfboden wurde von der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, Auelehm von rechtem Rheinufer (km 441,6) zur Verfügung gestellt. Der Boden wurde chemisch-physikalisch charakterisiert (Tabelle 11).

**Tabelle 11: Charakterisierung des Prüfbodens**

Parameter	Messwert
Trockenmasse - TM:	99,2%
Glühverlust:	1,6% (TM)
Wasserhaltekapazität - WHK:	37,6 g H <sub>2</sub> O/100 g Boden (TM)
pH-Wert:	7,9

Der Boden war sehr trocken und zeigte einen geringen Gehalt an organischer Substanz. Für die Abbauprüfung wurde gemäß Empfehlung der Norm eine Wasserhaltekapazität von 60 % mit deionisiertem Wasser eingestellt.

Die Prüfung erfolgte mittels eines Respirometers (Sapromat®). Die biologischen Abbauraten nach sechs Monaten Prüfzeit zeigt Abbildung 12.



**Abbildung 12: Ergebnisse der Abbauprüfung gemäß ISO 17556**

Das Referenzmaterial Cellulose erreichte nach 180 Tagen einen Abbaugrad von über 75 %. Die PLA-Fasern zeigten Abbaugrade unter 1 % und waren unter den gewählten Versuchsbedingungen nach sechs Monaten nicht biologisch abgebaut. Die PLA-Fasern sollen in den Geotextilprototypen die Funktionserfüllung insbesondere für die ersten 3 Jahre nach Installation gewährleisten, weshalb der nach sechs Monaten nicht nachzuweisende Polymerabbau die Werkstoffauswahl unterstützt.

Die biologische Abbaubarkeit gemäß Norm stellt nur einen Teil der Einflüsse des biologischen Abbaus dar. Wechselnde Feuchtigkeit im Boden, Licht (insbesondere UV-Einstrahlung) und Tauwasserwechsel stellen zusätzliche, entscheidende Einflüsse in der realen Umgebung dar, die zur Simulation der realen Bedingungen in die Tests zur biologischen Abbaubarkeit integriert werden sollten. Daher sieht die Gestaltung der angepassten biologischen Abbaubarkeitstests zunächst die UV-Bestrahlung mittels UV-Lampe und die wechselweise Temperierung über den Wassertaupunkt hinaus vor. Die Integration der UV-Bestrahlung und Tauwasserwechsel ist im Respirometer selbst nicht möglich, weshalb der Test im Respirometer zum eigentlichen biologischen Abbau nachgeschaltet wird. Zudem erfolgt jeweils die angepasste Bodenauswahl (je nach Produktstandort) und veränderte Probenpräparation (Vereinzelung der Fasern anstelle einer Vermahlung). Nach den Versuchen in den Durchwurzelungskästen (vgl. AP 11) hat sich herausgestellt, dass eine Beobachtung unter Bewuchs und tatsächlichen Umwelteinwirkungen für die Praxis relevantere Aussagen lieferte als die Laborversuche. Im Folgeprojekt wird daher der Ansatz eines simulierten Tests in einem Respirometer nicht weiterverfolgt.

#### *Prüfung und Bewertung der hergestellten Geotextilprototypen*

Beim Projekttreffen im September 2017 wurde beschlossen, dass bei der BAW zunächst die Variante B sowie die wärmebehandelte Variante B (Variante B.1) untersucht werden. Bei den beiden Varianten sind die größten Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften und der Filterwirkung zu erwarten. Tabelle 12 zeigt die Ergebnisse der Prüfungen der BAW im Vergleich zu den Prüfungen bei BNP Brinkmann.

**Tabelle 12: Prüfung der Mindestanforderungen an den hergestellten biologisch abbaubaren Vliesstoff-Prototypen B.2017 und B.1.2017 (BAW-Bezeichnung: B und B.1) für den Einsatz als Filter in technisch-biologischen Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen**

Eigenschaften	Mindestanforderung	Ergebnisse BNP Brinkmann B.2017	Ergebnisse BAW B.2017	Ergebnisse BAW B.1.2017 (Thermisch verfestigt)
Zugfestigkeit $T_{max}$ (DIN EN ISO 10319, 2008)  Weiterreißfestigkeit	$\geq 8$ kN/m	17,6 kN/m  13,6 kN/m	18,8 kN/m  12,9 kN/m	19,4 kN/m  14,2 kN/m
Durchdrückwiderstand Stempeldurchdrückkraft $F_p$ (DIN ISO 12236, 2006)	$\geq 1,5$ kN (GRK3) GRK = Geotextilrobustheits- klasse	2,3 kN	2,9 kN (GRK 4)	2,9 kN (GRK 4)
Flächenbezogene Masse $M_A$ (DIN EN ISO 9864, 2005)	$\geq 400$ g/m <sup>2</sup>	923 g/m <sup>2</sup>	951 g/m <sup>2</sup>	970 g/m <sup>2</sup>
Durchlässigkeit $k_{10}^{-1}$ (DIN EN ISO 11058, 2010)	$\geq 8 \cdot 10^{-4}$ m/s	-	$2,4 \cdot 10^{-3}$ m/s (BAW-Anlage)	$1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s (BAW-Anlage)
Filterstabilität (RPG, 1994) Öffnungsweite (DIN EN ISO 12956, 2010)  Bodendurchgang (DIN EN ISO 10772, 2012)  Durchlässigkeit $k_{10}^{-1}$ Bodenbesetztes Geotextil (DIN EN ISO 11058, 2010)	0,09 ± 0,01 mm  -  $\geq 8 \cdot 10^{-4}$ m/s (TLG 2008) $\geq 1 \cdot 10^{-3}$ m/s (Neue TLG 2017)	-  -  -	0,053 mm  BT 4 erfüllt  $k_v = 3,6 \cdot 10^{-4}$ m/s (BAW-Anlage)	0,063 mm  BT 4 erfüllt  $k_v = 3,4 \cdot 10^{-4}$ m/s (BAW-Anlage)
Schichtdicke (DIN EN ISO 9863-1, 2014)	keine	5,7 mm (0,5 kPa)	5,5 mm (2 kPa)	4,7 mm (2 kPa)

Die Prototypen B.2017 und B.1.2017 (BAW-Bezeichnung: B und B.1) erfüllten die in AP1 festgelegten Anforderungen an die Festigkeitseigenschaften. Die mechanische Filterstabilität wurde erfüllt, die hydraulische Filterstabilität nicht. Die Durchlässigkeit des bodenbesetzten Geotextils muss größer sein als die Durchlässigkeit des Bodens, der geschützt werden soll, um einen Wasseraufstau unter dem Geotextil zu vermeiden. Der geforderte k-Wert für die hydraulische Filterstabilität gegenüber den Bodentypen (BT) 1-4 wird bei beiden Proben nicht erreicht. Das heißt, diese Geotextilien wären für folgende Böden nicht anwendbar: BT 1 und 2 nach TLG (2008), bzw. BT A nach TLG (2017, in Bearbeitung). Damit sind diese geprüften Geotextilfilter nicht für kiesige Sande wie sie z.B. am Rhein auch im Bereich des geplanten Naturversuchs zu finden sind, geeignet.

Die Erhöhung der Durchlässigkeit des Geotextils kann durch eine geringere Vernadelung der Vliese erreicht werden. Dies würde vermutlich auch die notwendige Durchwurzelbarkeit verbessern. Gemeinsam mit der FNR wurde im Projektkonsortium beschlossen, neue Geotextilprototypen mit einer höheren Durchlässigkeit herzustellen. Diese optimierte Variante A (Probe A.2018, BAW-Bezeichnung: B.2) lieferte bessere Ergebnisse als die Variante B.2017, BAW-Bezeichnung: B). Die Durchlässigkeit des bodenbesetzten Geotextils war aber immer noch etwas zu klein. Alle anderen Werte wurden erfüllt.

BNP Brinkmann stellte daraufhin einen weiteren Geotextilprototyp her, der nochmals weniger vernadelt und damit weniger dicht war. Auch diese Variante C.2019 (BAW-Bezeichnung: B.3) erreichte noch nicht ganz die Anforderungen für die Durchlässigkeit (siehe Tabelle 13).

**Tabelle 13: Prüfung der Mindestanforderungen an den hergestellten biologisch abbaubaren Vliesstoff-Prototypen A.2018 und C.2019 (BAW-Bezeichnung: B.2 und B.3) für den Einsatz als Filter in technisch-biologischen Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen**

Eigenschaften	Mindestanforderung	Ergebnisse BAW A.2018	Ergebnisse BAW C.2019
Zugfestigkeit $\tau_{\max}$ (DIN EN ISO 10319, 2008)  Weiterreißfestigkeit	$\geq 8$ kN/m	19,9 kN/m  18,4 kN/m	19,3 kN/m  14,1 kN/m
Durchdrückwiderstand Stempeldurchdrückkraft $F_P$ (DIN ISO 12236, 2006)	$\geq 1,5$ kN (GRK3) GRK = Geotextilrobustheits- klasse	3,4 kN (GRK 4)	3,2 kN (GRK 4)
Flächenbezogene Masse $M_A$ (DIN EN ISO 9864, 2005)	$\geq 400$ g/m <sup>2</sup>	926 g/m <sup>2</sup>	981 g/m <sup>2</sup>
Durchlässigkeit $k_{10}^{(1)}$ (DIN EN ISO 11058, 2010)	$\geq 8 \cdot 10^{-4}$ m/s	$3,2 \cdot 10^{-3}$ m/s (BAW-Anlage)	$3,4 \cdot 10^{-3}$ m/s (BAW-Anlage)
Filterstabilität (RPG, 1994) Öffnungsweite (DIN EN ISO 12956, 2010)  Bodendurchgang (DIN EN ISO 10772, 2012)  Durchlässigkeit $k_{10}^{(1)}$ Bodenbesetztes Geotextil (DIN EN ISO 11058, 2010)	0,09 $\pm$ 0,01 mm  -  $\geq 8 \cdot 10^{-4}$ m/s (TLG 2008) $\geq 1 \cdot 10^{-3}$ m/s (Neue TLG 2017)	0,112 mm  BT 4 erfüllt  $k_v = 5,2 \cdot 10^{-4}$ m/s (BAW-Anlage)	0,061 mm  BT 4 erfüllt  $k_v = 5,3 \cdot 10^{-4}$ m/s (BAW-Anlage)
Schichtdicke (DIN EN ISO 9863-1, 2014)	keine	6,3 mm (2 kPa)	6,8 mm (2 kPa)

#### AP 6 Auswahl von drei Geotextilprototypen

Die geforderte Durchlässigkeit wurde von keinem der hergestellten Geotextilprototypen vollständig erreicht, die Abweichung vom Grenzwert war aber bei der zuletzt geprüften Probe C.2019 (BAW-Bezeichnung: B.3) nur noch sehr gering. Deshalb gab die BAW die Zustimmung, diese Probe im Naturversuch zu testen. Das Abbauverhalten der Geotextilien wird im Freilandversuch am Rhein untersucht. Um Auswirkungen der Biko-Fasern und der verschiedenen Vernadelungen zu testen, wurden die folgenden Prototypen für den Freilandversuch ausgewählt:

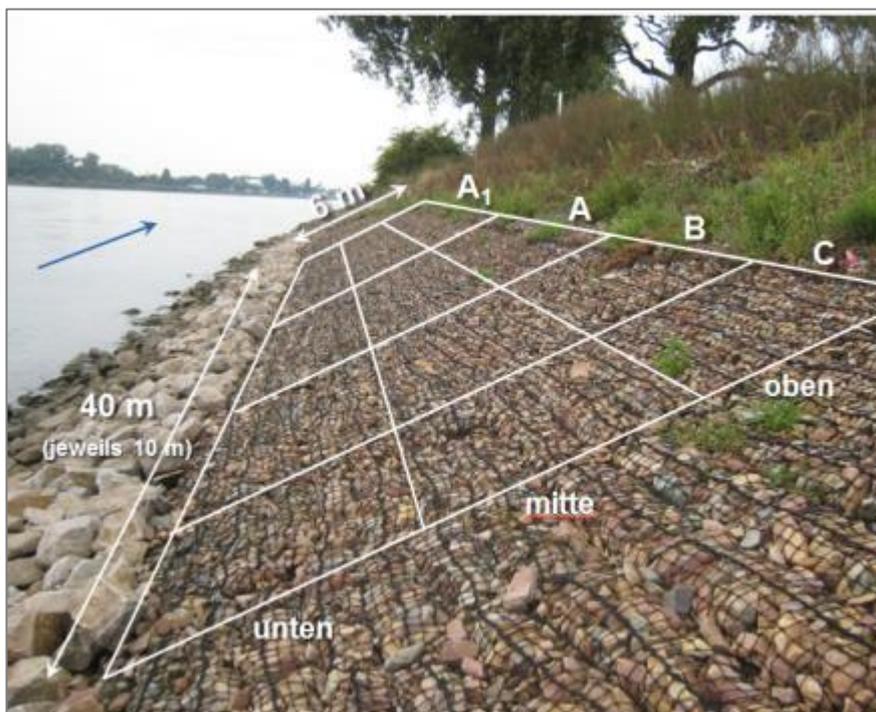
- Versuchsfeld A und A1: Geotextilprototyp C.2019, BAW-Bezeichnung B.3 (Variante C: Decklage 2 + Kernlage + Decklage 2, wenig vernadelt)
- Versuchsfeld B: Geotextilprototyp A.2017 (Variante A: Decklage 1 + Kernlage + Decklage 1, stark vernadelt)
- Versuchsfeld C: Geotextilprototyp C.2017 (Variante C: Decklage 2 + Kernlage + Decklage 2, stark vernadelt) – entspricht im Aufbau Geotextilprototyp C.2019

(Die Proben A.2017 und C.2017 wurden nicht in der BAW geprüft.)

#### AP 7 Erarbeitung eines Konzeptes zur Durchführung des Freilandversuchs an einer Wasserstraße, Planung der Tests auf Durchwurzelbarkeit

##### *Konzept zur Durchführung des Freilandversuchs an einer Wasserstraße*

Für den Freilandversuch wurden von der BAW in Abstimmung mit dem Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Oberrhein ein Bereich in der bereits bestehenden Versuchsstrecke zum Testen verschiedener technisch-biologischer Ufersicherungen festgelegt (Rhein, km 441,170 bis km 441,200, rechtes Ufer) und ein Konzept für die Durchführung erstellt. Die Größe der Fläche beträgt 40 m x 6 m. Die Verlegung erfolgt auf vier Feldern entsprechend Abbildung 13. Auf dem Feld A1 wird die Steinschüttung später durch eine Weidenspreitlage ersetzt.



**Abbildung 13: Bereich für den Freilandversuch am Rhein**

Zur Verlegung der Geotextilien wurden zunächst die vorhandene Steinschüttung oberhalb Mittelwasser entfernt und ein Planum im Unterauftrag durch einen Baubetrieb oder ein Garten- und Landschaftsbauunternehmen hergestellt. Die zu prüfenden Geotextilprototypen wurden auf dem Planum verlegt. Darüber wurden als Ufersicherung flächendeckend Steinmatratzen eingebaut, um eine Probenentnahme gewährleisten zu können. Die Fußsicherung erfolgt durch die unterhalb Mittelwasser verbleibenden Wasserbausteine. Um in verschiedenen Zeitabständen lokal Geotextilproben entnehmen zu können, wird die Größe der einzelnen Steinmatratzen an die zu entnehmende Probengröße (ca. 1 bis 2 m<sup>2</sup>) angepasst. So können Steinmatratzen einzeln aufgenommen und Geotextilproben entnommen und hinsichtlich der technischen Eigenschaften und des Abbauprozesses untersucht werden. Die Fehlstelle wird mit einem normalen Geotextil geschützt und die Steinmatratzen werden wieder eingebaut. Die Durchwurzelbarkeit der Geotextilproben wird mittels Weidenspreitlage in einem gesonderten Feld (A1) untersucht.

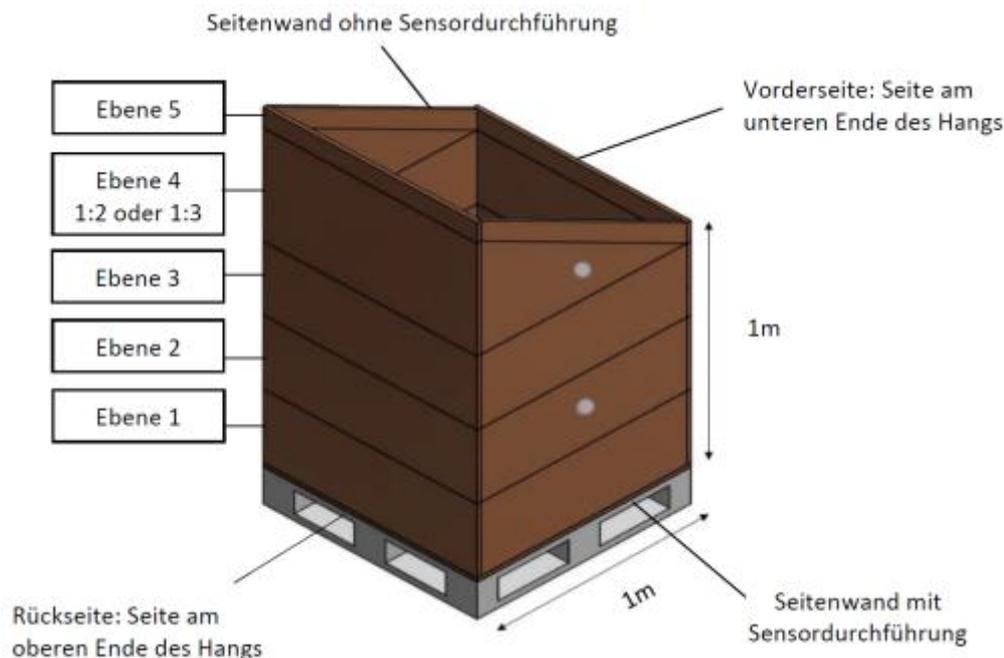
#### *Konzept der Tests auf Durchwurzelbarkeit*

Auf dem Gelände der BAW wurden drei Versuchskästen mit Boden gefüllt, an der Oberfläche wurde jeweils eine Geotextilprobe und darüber Weidenäste verlegt (s. Abbildung 14). Zum Vergleich wurden parallel drei Versuchskästen ohne Geotextil hergestellt. Aus den Weidenästen wuchsen flächig Weiden auf. Um den Boden zu durchwurzeln, müssen die Wurzeln das Geotextil durchdringen. Es wurde untersucht, ob dies möglich war bzw. wie sich die Pflanzen im Vergleich zu den Kästen ohne Geotextil entwickelten. Dazu wurde u. a. die Wurzeltrockenmasse nach einer Vegetationsperiode bestimmt. Die oberirdische Pflanzenmasse wurde zusätzlich ermittelt. Die wieder ausgebauten Geotextilien wurden hinsichtlich des Erhaltungszustandes bzw. der Abbauprozesse begutachtet und deren Zugfestigkeit ermittelt.



**Abbildung 14: Beispielhafte Pflanzkästen für die Tests auf Durchwurzelbarkeit**

Zusätzlich wurden bei Fraunhofer UMSICHT Bewuchskästen für eigene Durchwurzelungsversuche konstruiert, die insbesondere den Einfluss der Hanglage und des Substrats auch hinsichtlich des biologischen Abbaus berücksichtigen sollten. Es wurde eine größere Grundfläche der Kästen von  $1 \times 1 \text{ m}^2$  gewählt, um mehr Volumen für die Wachstumsausbreitung der Weidenspreitlage bereitzustellen. Durch unterschiedliche Dimensionierung wurden Hanglagen mit unterschiedlichen Steigungen nachgestellt, die denen am Rhein vorkommenden entsprechen. Drei Kästen hatten eine Steigung von 1:3 und zwei Kästen hatten eine Steigung von 1:2. Um das an Ufern vorkommende Substrat für den Versuch zu verwenden, wurden drei Kästen mit Rheinsand (0 mm - 2 mm) befüllt. Zwei weitere Kästen enthielten Mutterboden, damit der Einfluss einer höheren biologischen Aktivität und Wasserhaltekapazität des Bodens auf die Durchwurzelung nachgebildet werden. Abbildung 15 zeigt einen Bewuchskasten mit einer Steigung von 1:2.



**Abbildung 15: Konstruktionszeichnung eines Bewuchskastens**

In der zweiten und vierten Etage in jedem Bewuchskasten wurden Temperatur- und Feuchtigkeitssensoren eingebaut, um einen zeitlichen Verlauf von Temperatur- und Feuchtigkeitsentwicklung und einen möglichen Verlauf von Veränderungen an zwei Ebenen im Kasten aufzuzeigen. An einem der Kästen wurden außen zusätzliche Sensoren zur Messung der Umgebungsbedingungen Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck und Photonenstromdichte angebracht. Die Photonenstromdichte beschreibt das nutzbare Licht, welches den Pflanzen für Photosynthese und Wachstum zur Verfügung steht. Bodenproben zur Bestimmung des pH-Werts wurden regelmäßig manuell entnommen.

## AP 8 Vergabe und Bauausführung der Uferbefestigung unter Verwendung der Geotextilprototypen auf einer Versuchsfläche an der Wasserstraße

Für den Freilandversuch am Rhein (km 441,155 bis km 441,195, rechtes Ufer) wurde im Januar / Februar 2019 von der BAW ein Konzept erstellt und an Fraunhofer UMSICHT versendet. Auf dieser Grundlage wurde von Fraunhofer UMSICHT in Zusammenarbeit mit der BAW das Leistungsverzeichnis für die Ausschreibung des Freilandversuchs erstellt. In diesem sind die einzelnen Arbeiten für die Vergabe der Leistung detailliert beschrieben (Aufnahme der vorhandenen Steinschüttung, Herstellung des Planums (1:3), Verlegung der Geotextilprototypen, Verlegung der Steinmatratzen, Kennzeichnung der Versuchsfelder). Die Arbeiten wurden von der BAW mit dem für den Uferabschnitt zuständigen Außenbezirk Worms/Oppenheim des WSA Oberrhein abgestimmt. Die Ausschreibung erfolgte im 3. Quartal 2019, die Vergabe im Dezember an die BSD Baustoff und Gewässersanierungs GmbH. Aufgrund des Wasserstands am Rhein konnte die Verlegung erst im Januar 2020 erfolgen.

Gemäß der Planung (s. AP6, AP7) wurden an der Versuchstrecke die folgenden Geotextilprototypen eingebaut:

- Versuchsfeld A und A1: Geotextilprototyp C.2019, BAW-Bezeichnung B.3 (Variante C: Decklage 2 + Kernlage + Decklage 2, wenig vernadelt)
- Versuchsfeld B: Geotextilprototyp A.2017 (Variante A: Decklage 1 + Kernlage + Decklage 1, stark vernadelt)
- Versuchsfeld C: Geotextilprototyp C.2017 (Variante C: Decklage 2 + Kernlage + Decklage 2, stark vernadelt) – entspricht im Aufbau Geotextilprototyp C.2019

(Die Proben A.2017 und C.2017 wurden nicht in der BAW geprüft.)

Die Beaufsichtigung und Abnahme der Verlegung erfolgte durch das WSA Oberrhein, der BAW und Fraunhofer UMSICHT. Abbildung 16 zeigt Eindrücke von der Verlegung.



Uferbereich vor der Verlegung



Verlegung der Steinmatratzen auf Versuchsfeld A1



Verlegung des Geotextils in Versuchsfeld C



Gesamte Versuchsfläche

### Abbildung 16: Verlegung der Geotextilprototypen an der Versuchsstrecke am Rhein

Bei Fläche A1 sollen die Steinmatratzen noch durch eine Weidenspreitlage ersetzt werden. Im Frühjahr 2020 war das durch den hohen Wasserstand (seit Anfang Februar durchgängig über Mittelwasser) nicht möglich. Von 1. März bis zum 30. September dürfen keine Gehölze schnitten werden. Die Weidenspreitlage kann also frühestens im Oktober 2020 angelegt werden.

### AP 9 Regelmäßige Entnahme und Prüfung von Geotextilproben

Da die Verlegung erst kurz vor Ende des Forschungsvorhabens stattfand, wurde das AP 9 komplett in das Folgeprojekt verschoben.

### AP 10 Evaluierung der Uferbefestigung hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften und der biologischen Abbaubarkeit der Geotextilprototypen

Dieses Arbeitspaket war nicht Teil der ersten Projektphase, die in diesem Forschungsvorhaben bearbeitet wurde.

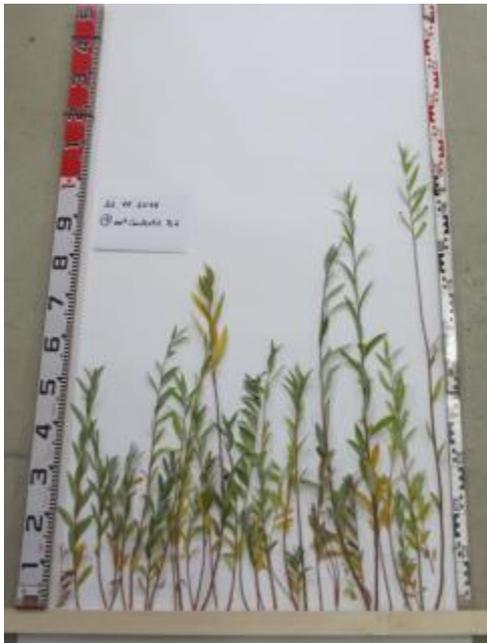
### AP 11: Durchführung der Tests zur Durchwurzelbarkeit der Geotextilprototypen

Am 28.5.2018 erfolgte auf dem Gelände der BAW der Einbau des Geotextilprototyps A.2018 (BAW-Bezeichnung B.2) in Versuchskästen zur Untersuchung der Durchwurzelbarkeit dieses abbaubaren Geotextils. Dazu wurden 6 Versuchskästen (Grundfläche 50 cm x 50 cm, Höhe 1 m) mit kiesigem Sand gefüllt und an der Oberfläche in 3 Kästen Weidenäste (Purpurweide) für Weidenspreitlagen verlegt und wenige cm übererdet. In 3 weiteren Kästen wurde auf dem Boden zunächst das Geotextil B.2 und darüber die Weidenäste eingebaut und übererdet. Die Versuchskästen wurden regelmäßig bewässert und die Entwicklung der Weiden monatlich fotografisch dokumentiert.



**Abbildung 17: Versuchskästen am 23.8.2018 (3 Monate nach Einbau) – Kasten 1 bis 3 mit Geotextil, Kasten 4 bis 6 ohne Geotextil**

Vom 20.11. bis 3.12.2018 wurden die Weiden ausgebaut und begutachtet. Die oberirdischen Sprosse wurden vermessen und fotografiert. In den Probekästen wurde der kiesige Sand ausgespült und die Wurzeln fotografisch und messtechnisch aufgenommen. Die Trockenmasse der Wurzeln und Sprosse wurde für jeden Versuchskasten ermittelt.

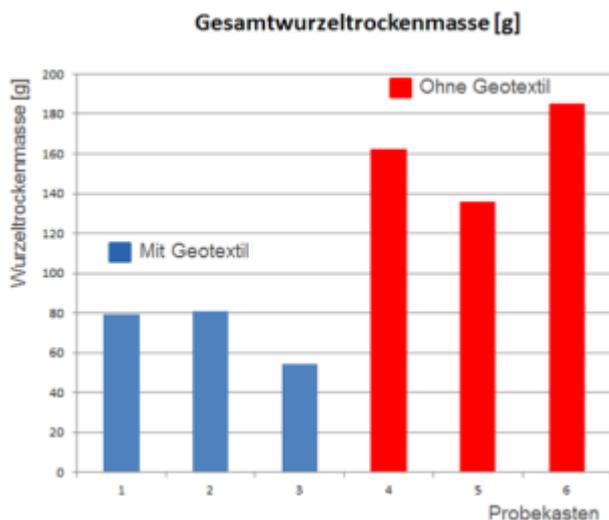


**Abbildung 18: Auswertung Kasten 1 (mit Geotextil), Oberirdische Sprosse, vermessen 5 Monate nach Einbau**



**Abbildung 19: Auswertung Kasten 1 (mit Geotextil): Freigespülte Wurzeln, oberirdische Sprosse wurden vorher abgeschnitten und vermessen, links: die verlegten Äste sind noch über dem Geotextil vorhanden, rechts: Blick auf die Unterseite des Geotextils – Wurzeln durchdringen von oben das Geotextil**

Im Ergebnis ist festzustellen, dass das Geotextil prinzipiell durchwurzelt ist. Allerdings wurden in den Kästen mit Geotextil im Vergleich zu den Kästen ohne Geotextil weniger und kürzere Wurzeln und Sprosse gebildet. Die Grafik zeigt einen Vergleich der ermittelten Wurzel-trockenmassen.



**Abbildung 20: Wurzeltrockenmasse der Weiden in den Probekästen mit und ohne Geotextil**

An den ausgebauten Geotextilproben wurde im Labor der BAW nochmals die Zugfestigkeit des Geotextils ermittelt. Dabei wurde nach 6 Monaten Lagerung im Boden und Durchwurzelung Werte ermittelt, die je nach Zugrichtung etwa 92 % bzw. 97 % der Werte des neuen Geotextils betragen.

2019 wurde der Versuch von der BAW mit dem weniger dicht vernadelten Geotextil C.2019 (BAW-Bezeichnung B.3) wiederholt. Dabei wurde derselbe Versuchsaufbau wie 2018 gewählt, sodass wieder drei Kästen mit Geotextil und drei Kästen ohne Geotextil verglichen werden konnten. Abbildung zeigt die ähnlich gute Entwicklung der Weiden in den einzelnen Kästen Anfang August.



**Abbildung 21: Entwicklung der Weiden in den Versuchskästen am 09.08.2019 (eingebaut am 27.3.2019); Kästen 1 – 3 mit Geotextil; Kästen 4 – 6 ohne Geotextil**

Die Untersuchung der Sprosse und Wurzeln erfolgte im März 2020. Es wurden Anzahl, Länge, Durchmesser und Trockenmasse der oberirdischen Sprosse sowie Anzahl und Dicke der Wurzeln und deren Trockenmasse tiefenabhängig bestimmt.

Bei der Auswertung der Daten ist zu berücksichtigen, dass das Wachstum der Weiden aus den verlegten Weidenästen auch bei identischen Randbedingungen eine große Varianz aufweist. Ursache sind mögliche Unterschiede der Weidenäste beim Einbau – z. B. durch unterschiedliche Entwicklung, unterschiedliche Formen (unterschiedlich gekrümmt oder mehr gerade), durch Vorschädigung oder auch dadurch, ob sie mehr

vom basalen oder oberen Ende stammen. Dadurch können sich unabhängig vom Geotextil bereits andere Wurzel- und Sprossentwicklungen ergeben. Bei der Interpretation ist daher immer zu berücksichtigen, dass gemessene Unterschiede auch durch diese zufällige Streuung der Werte entstanden sein können. Deshalb sind mehrere Versuchsreihen erforderlich, um den Einfluss des Geotextils auf das Wachstum der Weiden sicher zu bestimmen.



**Abbildung 21: Freigespülte Wurzeln; Kästen 1 – 3 mit Geotextil; Kästen 4 – 6 ohne Geotextil**



**Abbildung 22: Wurzeln unterhalb der Geotextile der Kästen 1 – 3 bzw. unterhalb der Äste bei Kasten 4**



**Abbildung 23: Ungewöhnliche Wurzelformen oberhalb des Geotextiles**

Das Wachstum der oberirdischen Sprosse war in den Kästen mit Geotextil kaum schlechter als in den Referenzkästen ohne Geotextil. Im Mittel wurde eine etwas geringere Anzahl, Länge und Masse der Sprosse in den Kästen mit Geotextil detektiert. Aufgrund der große Streuung der Einzelwerte lässt sich jedoch statistisch weder bestätigen noch ausschließen, dass das Geotextil Ursache für die geringeren Werte ist. Genauso gut können die Unterschiede durch die Verwendung verschiedener Weidenäste entstanden sein.

Ein Freispülen der Kästen zeigte, dass in allen Kästen der Boden bis zur Unterkante gut durchwurzelt war (Abbildung 21, die maximalen Wurzellängen betrug dementsprechend über 90 cm. Bei den Kästen mit Geotextil waren die Wurzeln augenscheinlich weniger dicht und weniger verästelt als in den anderen Kästen. Die Geotextile waren gleichmäßig durchwurzelt (Abbildung 22).



Abbildung 24: Wurzelform nach Durchdringen des Geotextils

In den meisten Fällen durchwuchsen die Wurzeln das Geotextil direkt. Einzelne Wurzeln wuchsen zunächst waagrecht auf dem Geotextil, bevor sie das Geotextil durchdrangen. Auffällig war, dass die Wurzeln häufig direkt vor dem Eintritt in das Geotextil und nach dem Austritt auf der Unterseite Verdickungen ausgebildet hatten (Abbildung 23). Innerhalb des Geotextils waren die Wurzeln hingegen vergleichsweise dünn (Abbildung 24). Durch die beidseitigen Verdickungen entsteht eine feste Verbindung zwischen der Pflanze und dem Geotextil. Dadurch hält das Geotextil nicht nur den Boden zurück, sondern stabilisiert auch die Pflanzen.

Nicht alle verlegten Äste trieben aus, manche starben ab, ohne auszutreiben – unabhängig davon, ob sie mit oder ohne Geotextil eingebaut waren. Die Dicke der Äste (1,3 cm bis 3,3 cm) hatte keine feststellbare Auswirkung auf deren Austriebfähigkeit.

Abbildung 25 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt die Anzahl der Wurzeln. Im Mittel haben sich mit Geotextil nur geringfügig weniger Wurzeln ausgebildet. Auch hier kann der Unterschied durch die Varianz der Stichprobenwerte oder durch das Geotextil entstanden sein. Gezählt wurden die Wurzeln direkt an der Asteinlage. Die Anzahl sagt somit noch nichts darüber aus, wie sich die Wurzeln nach unten weiter verzweigen, d. h. wie stark der Boden insgesamt durchwurzelt wurde. Genauer ist die Ermittlung der Trockenmasse der Wurzeln (Abbildung 26).

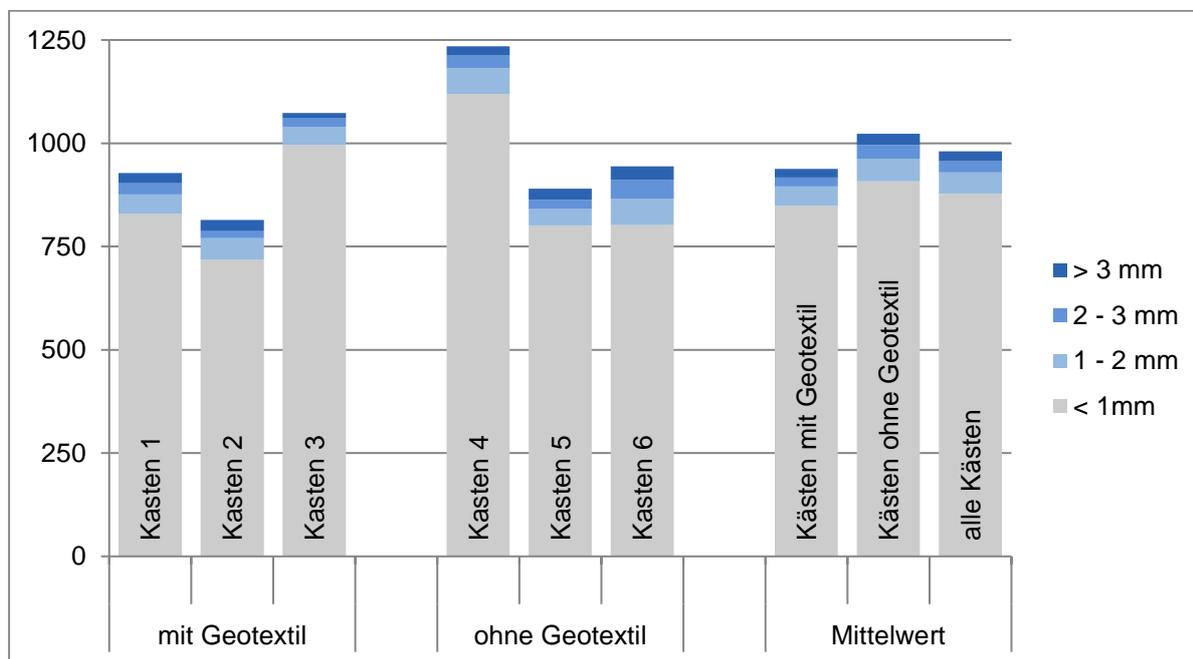


Abbildung 25: Anzahl der Wurzeln, ermittelt an der Asteinlage, unterteilt nach Wurzelstärke

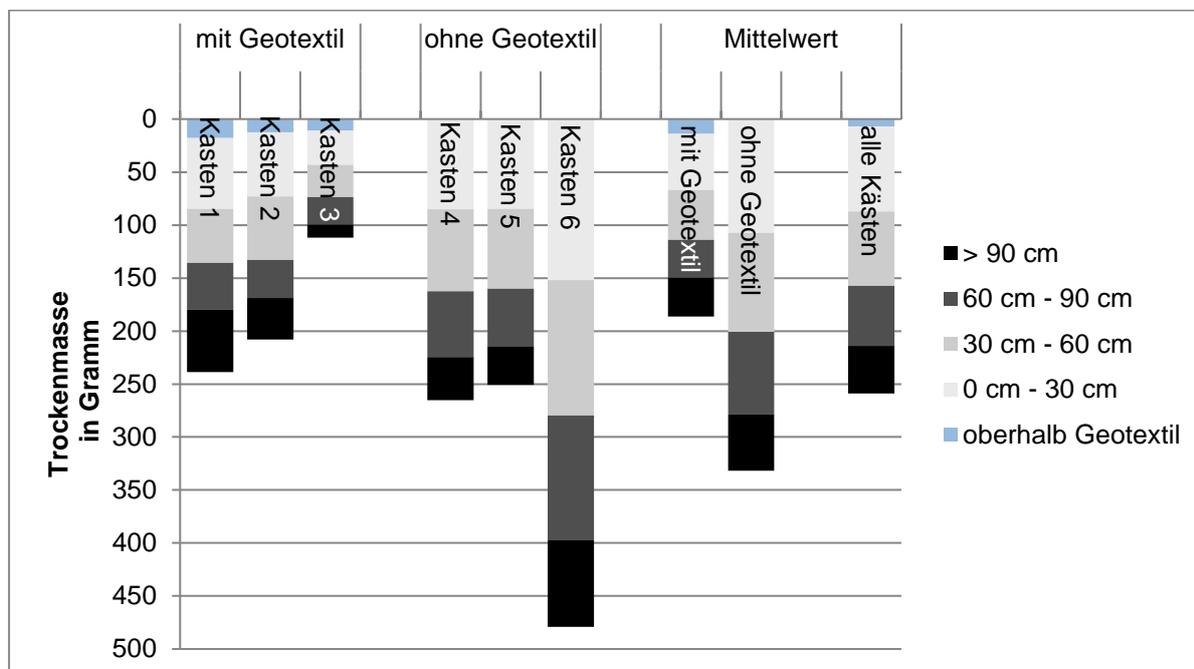


Abbildung 26: Trockenmasse der Wurzeln in den unterschiedlichen Tiefen unter der Asteinlage

Wie bereits bei den Untersuchungen von 2018 zeigte die Auswertung der Wurzelmasse deutliche Unterschiede. Im Mittel war die Wurzel-Trockenmasse in den Kästen mit Geotextil um 44 % geringer als in den Kästen ohne Geotextil. Aufgrund des erheblichen Unterschiedes der Werte ist es trotz des Einflusses der Varianz der Weidenäste wahrscheinlich, dass der Einsatz des Geotextils zu einer geringeren Wurzelmassenbildung geführt hat. Die Irrtumswahrscheinlichkeit liegt hier statistisch unter 10 %.

Bemerkenswert ist ferner, dass sich in allen Kästen besonders viele feine Wurzeln mit Durchmesser kleiner als 1 cm im Bereich der Asteinlage gebildet haben und hier ein feines Wurzelgeflecht ausbilden. Dieses könnte langfristig mit zunehmendem Abbau des Geotextils selbst wie ein Filtervlies wirken und Bodenaustrag verhindern.

Insgesamt bestätigen diese Untersuchungen grundsätzlich die Ergebnisse der bereits 2018 durchgeführten: Das Geotextil ist durchwurzelbar und damit für den vorgesehenen Zweck anwendbar. Allerdings ist davon auszugehen, dass sich mit Geotextil innerhalb der ersten Vegetationsperiode weniger Wurzelmasse bildet als ohne Geotextil. Zusätzliche Versuche sollen die Datenlage weiter verbessern. Die BAW hat daher 2020 mit dem Geotextilprototyp C.2019 (BAW-Bezeichnung: B.3) eine weitere Versuchsreihe gestartet.

Bei Fraunhofer UMSICHT wurden im Mai 2019 fünf Bewuchskästen nach der Konstruktion in AP 7 entsprechend **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** installiert (Abbildung 27). Getestet wurde der Prototyp C.2019 (UMSICHT-Bezeichnung: A.3, BAW-Bezeichnung B.3) (Variante C: Decklage 2 + Kernlage + Decklage 2, wenig vernadelt). Im Gegensatz zu den Versuchen der BAW liegen in jedem Kasten andere Bedingungen (Hangneigung, Substrat) vor. Die Wurzel- und Triebentwicklung hängt auch von den verlegten Weidenästen selbst ab. Diese können sehr unterschiedlich sein, beispielsweise gekrümmt oder mehr gerade, vorgeschädigt, mehr vom basalen oder oberen Ende stammend. Die Versuchsergebnisse können daher nur eingeschränkt verglichen werden.

Tabelle 14: Ausstattung der Bewuchskästen

	Kasten 1	Kasten 2	Kasten 3	Kasten 4	Kasten 5
<b>Steigung</b>	1:3	1:3	1:3	1:2	1:2
<b>Substrat</b>	Sand	Mutterboden	Sand	Mutterboden	Sand
<b>Geotextil</b>	ja	ja	nein	ja	ja
<b>Asteinlage</b>	42 Äste	44 Äste	42 Äste	44 Äste	43 Äste

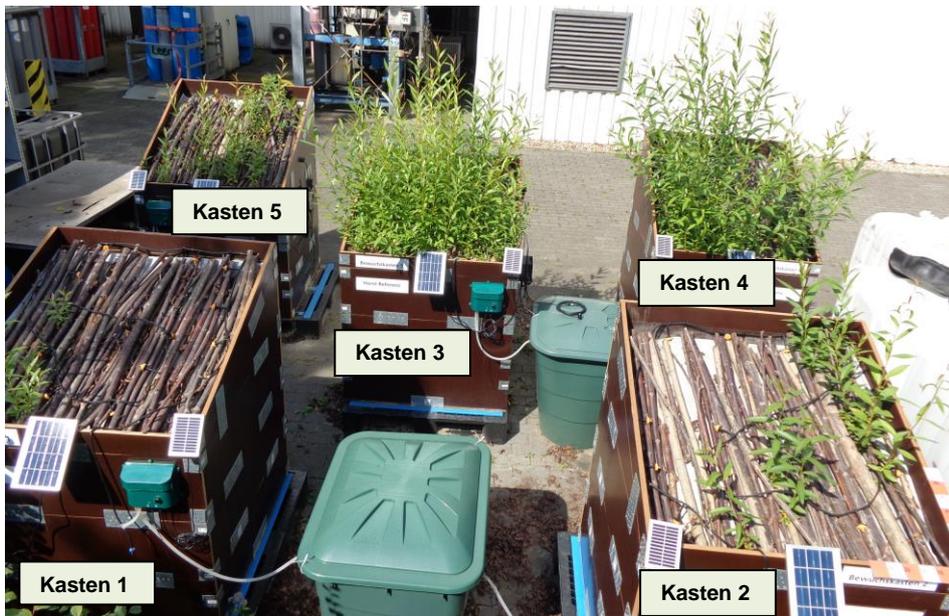


Abbildung 27: Bewuchskästen 1 bis 5 – Einbau am 29.05.2019, Foto vom 22.06.2019

Die Weidenäste wurden im Gegensatz zu den Versuchen der BAW nicht übererdet, da am Rhein bei Überstauung ein Verbleib der Erde nicht gewährleistet werden kann. Da einige Äste der Weiden leicht gekrümmt waren, konnte teilweise, vor allem im oberen Hangbereich, kein flächiger Kontakt zum Geotextil hergestellt werden. Resultierend daraus konnten in allen Bewuchskästen außer bei Kasten 3 (Referenz ohne Geotextil) wenige Äste Triebe ausbilden. Abbildung 28 zeigt die Anzahl der gewachsenen Triebe nach 36 Wochen Versuchsdauer und Abbildung 29 die Triebtrockenmasse, jeweils aufgeteilt nach Bewuchskästen.

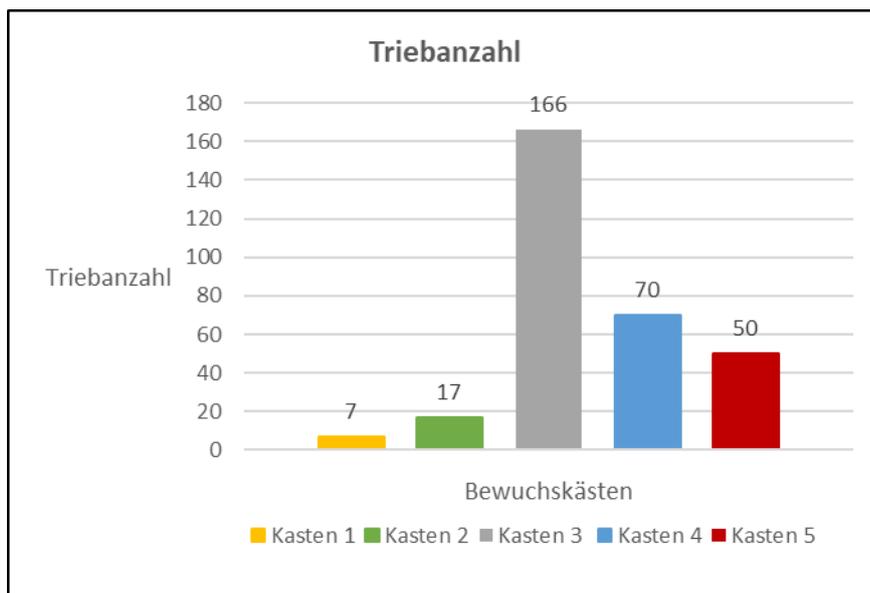
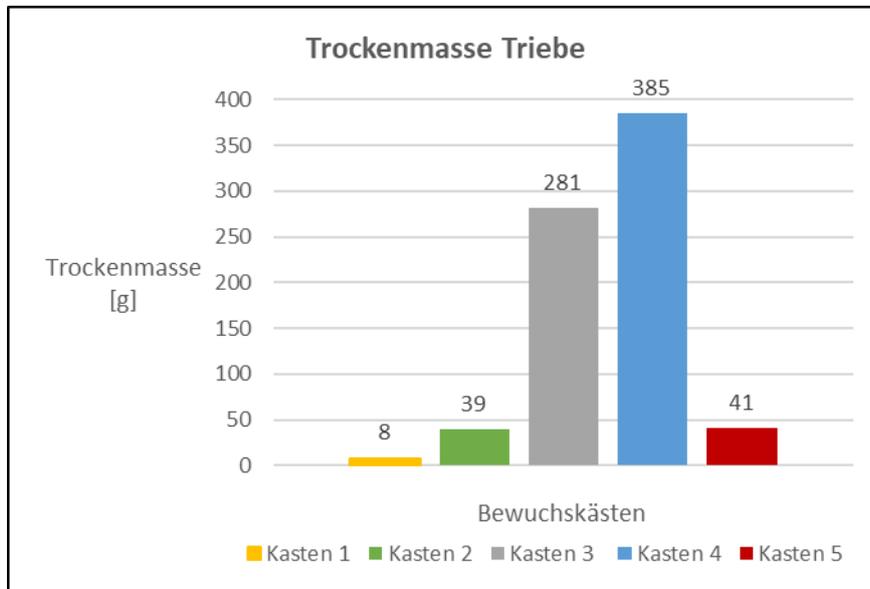


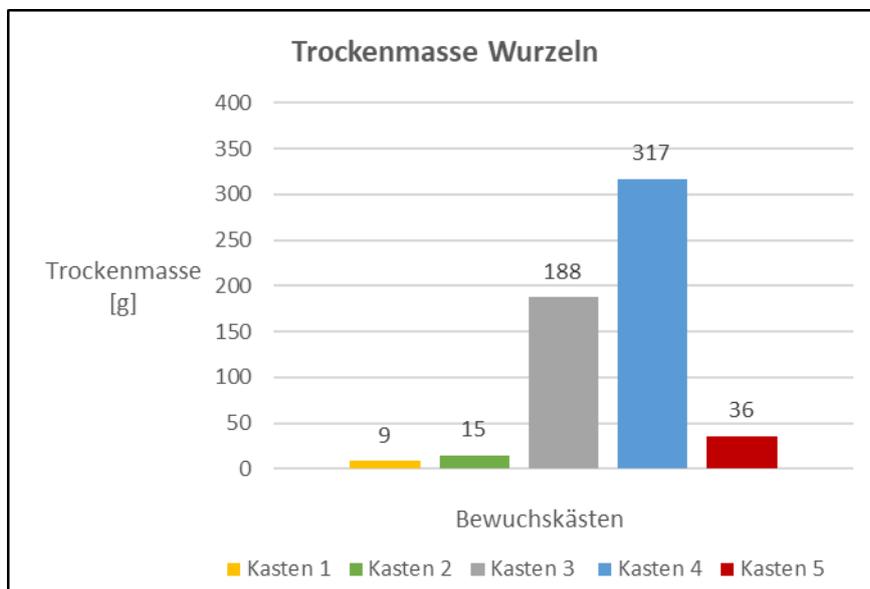
Abbildung 28: Anzahl der gewachsenen Triebe in den Bewuchskästen



**Abbildung 29: Trockenmasse der gewachsenen Triebe in den Bewuchskästen**

Bei den Wurzelgrabungen konnte festgestellt werden, dass sich die Wurzeln in Kasten 4 überwiegend im direkten Substratkontakt gebildet hatten, da sich das Geotextil wahrscheinlich schon bei der Installation des Kastens verschoben hatte. Die Daten aus Kasten 4 werden daher bei der Auswertung nicht berücksichtigt.

In den mit Sand befüllten Kästen wurden mehr Wurzelhaare und zusätzliche Feinwurzeln gebildet als in den Kästen mit Mutterboden. Sandige Böden besitzen genügend Hohlräume, die für eine gute Durchlüftung und Wasserbeweglichkeit sorgen und von Wurzeln gut durchwurzelt werden können. Aufgrund von teilweise abgerissenen Wurzeln konnten die gewachsenen Längen nicht gemessen werden. Es wurde nur die Trockenmasse der Wurzeln je Bewuchskasten bestimmt (Abbildung 30). Wie bei den Versuchen der BAW zeigte sich, dass in den Kästen mit Geotextil im Vergleich zu den Kästen ohne Geotextil weniger Wurzeln und Triebe gebildet wurden.



**Abbildung 30: Trockenmasse der gewachsenen Wurzeln in den Bewuchskästen**

Die genaue Betrachtung der Wurzeln zeigt, dass das Dickenwachstum der Wurzeln dort, wo die Wurzeln unmittelbar vom Geotextilfilter umgeben waren, eingeschränkt wurde. Eine mögliche Ursache könnte sein, dass der Geotextilfilter noch nicht begonnen hat sich abzubauen. Dadurch ist die Zugfestigkeit der Filamente uneingeschränkt hoch und die Wurzeln müssen durch das Dickenwachstum die Kraft aufbringen, die Zugfestigkeit der Filamente zu überschreiten (siehe Abbildung 31).



(a) Wurzeln, gewachsen durch den Geotextilfilter (Bewuchskasten 1)

(b) Wurzeln, gewachsen durch den Geotextilfilter (Bewuchskasten 2)

(c) Wurzeln, gewachsen durch den Geotextilfilter (Bewuchskasten 4)

**Abbildung 31: Durch den Geotextilfilter gewachsene Wurzeln in den Bewuchskästen**

Anhand der eingebauten Temperatursensoren konnte festgestellt werden, dass der Geotextilfilter keinen expliziten Einfluss auf die Temperaturentwicklung in den Bewuchskästen hatte. Bei der Bodenfeuchtheitsmessung wurde festgestellt, dass das Substrat in den Bewuchskästen während der Versuchslaufzeit in allen Kästen sehr feucht war.

Als Zusammenfassung aller Durchwurzelungsversuche lässt sich sagen, dass mit den verschiedenen Versuchen nachgewiesen werden konnte, dass das Geotextil durchwurzelbar ist. Dabei verwachsen die Wurzeln mit dem Geotextil und bilden so eine kraftschlüssige Verbindung. Gleichzeitig bilden die Weiden mit Geotextil im Vergleich zum Einbau ohne Geotextil während der ersten Vegetationsperiode weniger Wurzelmasse aus. Die Durchwurzelungsversuche von Fraunhofer UMSICHT zeigten zudem, dass sich die Weiden auf einem Geotextil ohne Übererdung deutlich schlechter entwickelten. Der notwendige Bodenkontakt ist in diesem Fall nicht gegeben. Das ist ein wichtiger Hinweis für die Praxis. Für eine Aussage, wie sich die Bodenart und die Böschungsneigung ggf. auf das Wachstum und die Durchwurzelbarkeit des Geotextils auswirken, reicht die bisherige Datenmenge nicht aus. Hier sind weitere Versuche mit mehr Versuchskästen erforderlich.

#### **AP 12 bis AP 15**

Diese Arbeitspakete waren nicht Teil der ersten Projektphase, die in diesem Forschungsvorhaben bearbeitet wurde.

#### **AP 16 Entwicklung biologisch abbaubarer Werkstoffe für spritzgegossene Bodennägel**

Das Ziel ist es, ein spritzgießfähiges Material zu entwickeln, welches zunächst über einen Zeitraum von einem Jahr stabil ist und dann im Erdboden vollständig verrottet. Ein geeignetes Basispolymer ist das PHA, welches unter Heimkompostbedingungen verrottet. Es wird davon ausgegangen, dass ein biologischer Abbau auch im Erdboden stattfindet. Dieser wird nur dementsprechend langsamer stattfinden.

##### *Werkstoffentwicklung*

Auf Grund des knappen zeitlichen Rahmens wurden mehrere Entwicklungsziele gleichzeitig geplant und parallel durchgeführt. Eine Auswertung sowie die Zusammenführung der Ergebnisse wurden in einem zweiten Durchgang durchgeführt werden.

Folgende Entwicklungsziele wurden betrachtet:

- Untersuchung von unterschiedlichen Additiven zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit beim Spritzgießen sowie zur Stabilisierung des Materiales hinsichtlich seines Abbaus
- Einfluss von verschiedenen mineralischen Füllstoffen auf die mechanischen Eigenschaften und die Langzeitstabilität
- Einfluss von natürlichen Füllstoffen (Holz) auf die mechanischen Eigenschaften

Die geplanten Untersuchungen basieren auf den Erkenntnissen der Entwicklung eines Materials für die Flachfolienextrusion.

##### Untersuchung von unterschiedlichen Additiven

In einem Gemisch aus drei Polymeren, davon überwiegend PHA, sowie einem mineralischen Füllstoff, werden Additive (s.

Tabelle 15) zugegeben.

Tabelle 15: Additivzugabe

V 184104	Nullprobe
V 184105	Antioxidant und Langzeitstabilisator
V 184106	Geruchsfänger
V 184107	Slip- und Antiblock
V 184108	Mold release
V 184109	Hydrolysestabilisator
V 184110	Kombi aus allen Additiven

Die Rezepturen wurden auf einem Laborextruder gefertigt und dann mittels Spritzgießen zu Probekörpern verarbeitet. Die so hergestellten Zugstäbe wurden untersucht und die Ergebnisse aufbereitet.

Durch die Zugabe von Geruchsfänger, Slip- und Antiblock, sowie dem Mold release konnte die Steifigkeit des Materials verbessert werden, ohne die Zähigkeit signifikant zu verschlechtern. Abbildung 32 zeigt beispielhaft die Vergleiche des Zugmoduls, der Schlagzähigkeit und der Kerbschlagzähigkeit.

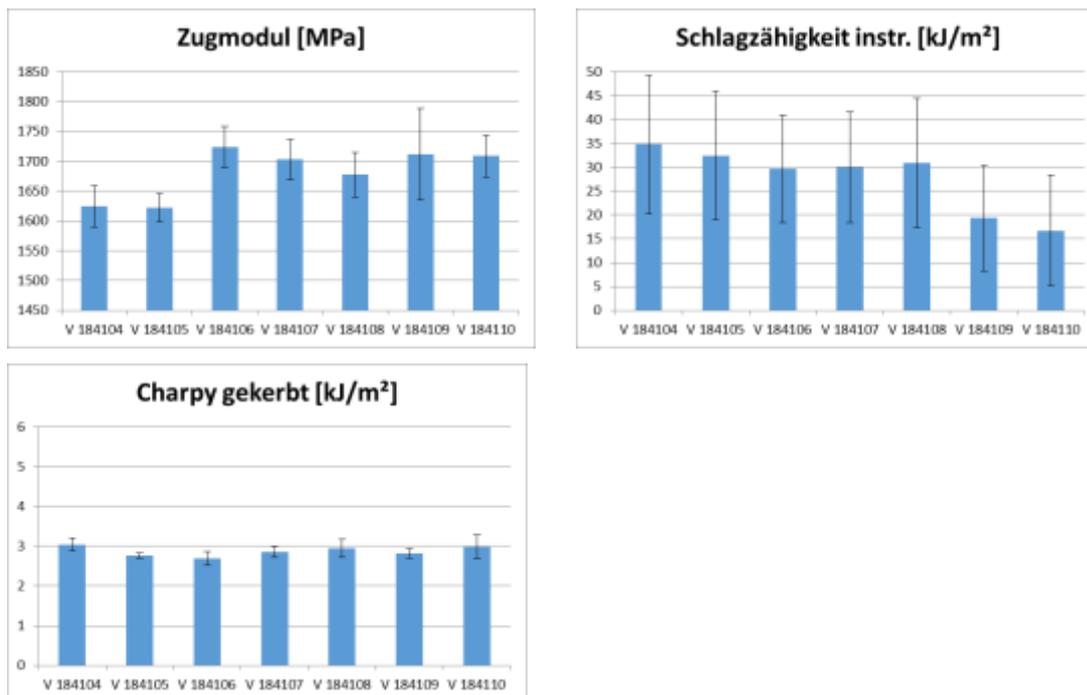


Abbildung 32: Einfluss der Additive auf die Eigenschaften

#### Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher mineralischer Füllstoffe

Dieses Thema wird mit zwei Polymermischungen betrachtet. In der Mischung aus drei Polymeren werden die Füllstoffe Talkum und Kreide miteinander verglichen. In einem System aus reinem PHA wird der Einfluss eines Talkums mit unterschiedlicher Korngröße betrachtet (s. Tabelle 16).

Tabelle 16: Einfluss mineralischer Füllstoffe

V 184104	3-Polymere + feines Talkum
V 184111	3-Polymere + Kreide
V 184121	3-Polymere + grobes Talkum
V 184112	PHA + grobes Talkum
V 184113	PHA + feines Talkum

Bei der Auswertung der Versuche sind deutliche Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften zu erkennen. Die 3-Polymer-Systeme zeigen eine wesentlich höhere Zähigkeit, welche auf die beiden zusätzlichen Polymere zurückzuführen ist. Die besten Eigenschaften werden im 3-Polymer-System mit grobem Talkum erreicht (Abbildung 33). Hier kann das Modul verbessert werden ohne deutliche Verschlechterung von Bruchspannung und Bruchdehnung.

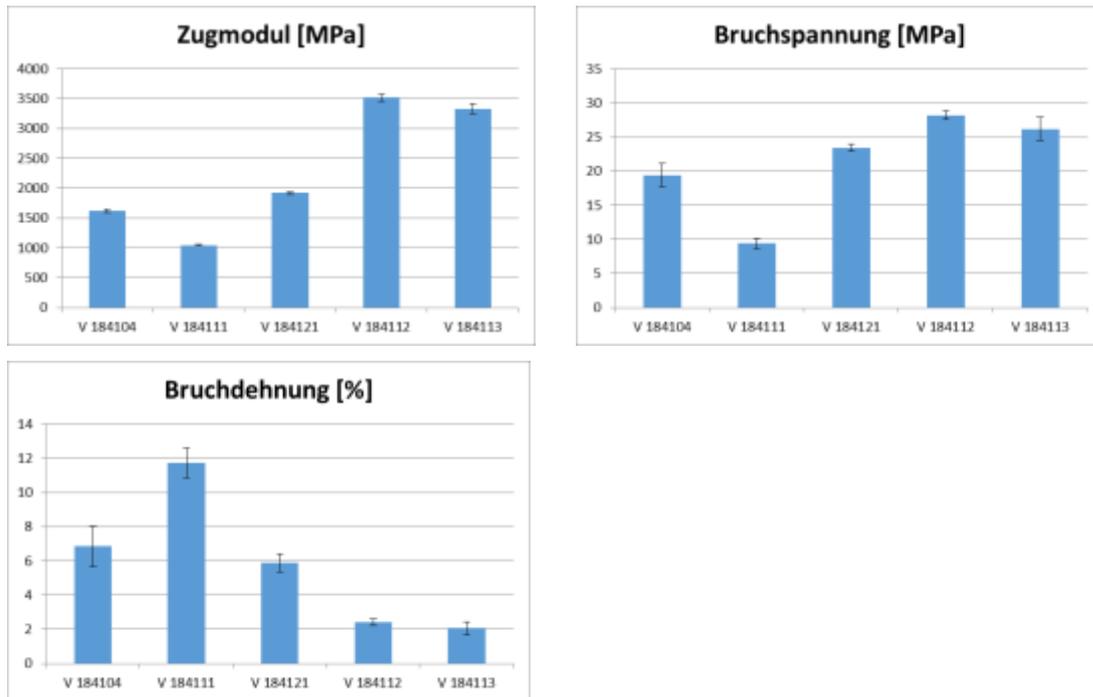


Abbildung 33: Einfluss der mineralischen Füllstoffe auf die Eigenschaften

#### Untersuchung des Einflusses von natürlichen Füllstoffen (Holz)

Um den natürlichen Charakter des Erdnagels zu unterstreichen wird der eingesetzte mineralische Füllstoff durch eine Holzfaser ersetzt. Zusätzlich werden verschiedene Additive zur Anbindung der Holzfaser an die Polymermatrix geprüft (Tabelle 17).

Tabelle 17: Einfluss natürlicher Füllstoffe

V 184112	PHA + grobes Talkum
V 184114	PHA + Holzfaser
V 184115	PHA + Holzfaser + 1% Koppler 1
V 184116	PHA + Holzfaser + 3% Koppler 1
V 184117	PHA + Holzfaser + 1% Koppler 2

Durch die Zugabe der Holzfaser kann sowohl die Festigkeit als auch die Schlagzähigkeit des Materials erhöht werden. Am deutlichsten ist die Verbesserung an dem Versuchsmaterial V 184117 zu erkennen. Hier steigen die Festigkeiten (Modul und Spannungswerte, Abbildung 34) an, ohne geringere Bruchdehnung und Schlagzähigkeit.

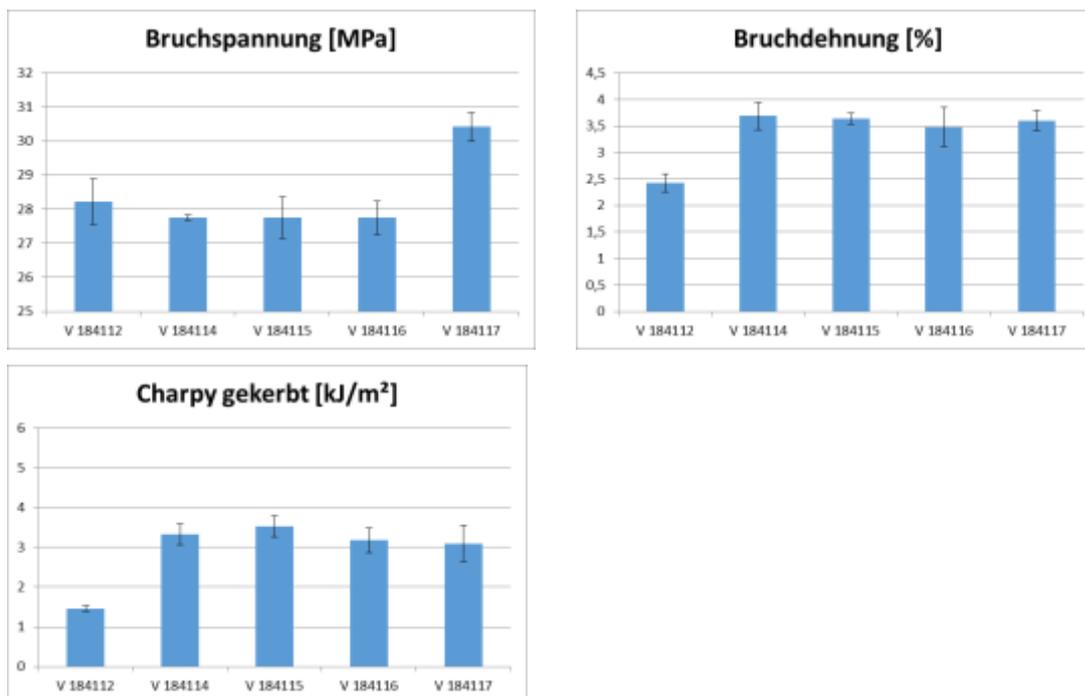


Abbildung 34: Einfluss der natürlichen Füllstoffe auf die Eigenschaften

#### Herstellung von Erdnägeln

Mit dem Material V 184104 wurden im Spritzgießverfahren Erdnägel hergestellt. Die Versuche wurden auf einer Arburg 270M 500-90 (Schließkraft 50 t) durchgeführt. Es handelt sich um eine ältere Maschine., So gibt es beispielsweise keine Anzeige des Einspritzdruckes, was die Optimierung des Prozesses erschwerte. Für die Erdnägel stand ein Kaltkanalverteilerwerkzeug mit 8 Kavitäten zur Verfügung, welches normalerweise mit ABS betrieben wird und nicht ausbalanciert ist. Im Zylinder standen ca. 3-4 Schuss plastifiziertes Material, die Zykluszeit lag bei knapp 60 Sekunden. Dies ist für das thermisch sehr empfindliche PHA bereits am Limit, was sich durch die typische leichte Geruchbildung äußerte. Nichtsdestotrotz konnte mit dem Material ein stabiler, vollautomatischer Spritzgießprozess erreicht werden. Das fertige Bauteil ist in Abbildung 35 zu sehen.



Abbildung 35: Erdnagel aus PHA-Compound

An der Oberseite des Teils sind leichte Spritzfehler in Form von Einfallstellen erkennbar. Diese konnten durch die Variation verschiedener Parameter verbessert werden. Die Zylindertemperaturen wurden dabei stets unverändert gelassen, weil ansonsten die sehr geringe Zersetzungstemperatur des PHA bereits überschritten wird. Der Nachdruck konnte aufgrund der genannten Unkenntnis des Einspritzdruckes nicht sinnvoll eingestellt werden, die ermittelte Einstellung erschien aber praktikabel. Die Parameter in Tabelle 18 erweisen sich in der Studie als optimal.

Tabelle 18: Parameter für die Herstellung der Erdnägel

Zylindertemperatur (Einzug bis Düse)	150 – 170 °C
Werkzeugtemperatur düsenseitig	30 °C
Werkzeugtemperatur auswerferseitig	15 °C
Kühlzeit	40 s
Nachdruckhöhe	400 bar
Nachdruckzeit	4 s
Einspritzgeschwindigkeit	15 – 20 cm³/s

### *Fazit und Ausblick*

Die Verarbeitungshilfsmittel wie Slip-Antiblock und Mold Release haben einen positiven Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften. Dieses kann auf eine verbesserte Verarbeitung der Materialien zurückgeführt werden. Besseres Füllen der Form und leichteres Entformen verringern die Belastungen und die Spannungen im Bauteil, was einen positiven Effekt hat.

Die Untersuchung der mineralischen Füllstoffe macht deutlich, dass die Zugabe von weiteren Polymeren einen deutlichen Einfluss auf die Eigenschaften hat. Da die Faserverstärkung gegenüber der mineralischen Verstärkung bessere Ergebnisse geliefert hat, werden weitere Untersuchungen nur noch die Faserverstärkung betrachten.

Für die Erdnagelanwendung erscheint das V 184104 aufgrund zu geringer Mechanik (Steifigkeit / Zähigkeit) zu flexibel zu sein. Es ist zu erkennen, dass durch die Zugabe von Holzfasern und/oder mehr Talkum die Steifigkeit zunimmt was für die gewünschte Funktion von Vorteil ist.

Im Zuge des Projektes wurden Erdnägel im Spritzgießverfahren hergestellt. Hier wurde jedoch nicht in Betracht gezogen, dass bei der Uferbefestigung Holzpflocke eingesetzt werden, welche ca. 1 Meter Länge haben und dementsprechend weit in den Boden getrieben werden. Dieses machte eine weitere Überlegung in der Entwicklung nötig. Eine Herstellung solcher Erdnägel wird im Spritzgießverfahren nicht wirtschaftlich möglich sein, da hierfür Spritzgießmaschinen mit einem großen Schussgewicht nötig sind. Auch müssen hohe Kosten für Werkzeuge aufgewendet werden.

Daher wird die weitere Materialentwicklung im Folgeprojekt auf ein Material fokussiert, welches für eine Profilextrusion geeignet ist. Es ist davon auszugehen, dass lediglich die ausgewählte Type des PHA sowie der weiteren Polymere auf eine solche Verarbeitung abgestimmt werden müssen. Die Anbindung der Fasern an die Matrix zur Verstärkung des Werkstoffs muss weiter untersucht werden, da bei der Herstellung in der Profilextrusion andere Fließbedingungen der Schmelze vorhanden sind.

## **II.2 Verwertung**

Das Forschungsvorhaben Bioshoreline war ursprünglich für fünf Jahre geplant, von denen in einer ersten Projektphase drei Jahre bewilligt wurden. Derzeit wird das Folgeprojekt BioShoreline2 beantragt, in dem die zweite Projektphase bearbeitet werden soll. Die Ergebnisse in der ersten Projektphase sind vielversprechend, aber für eine weitergehende Verwertung noch nicht geeignet. Hierzu müssen erst die Ergebnisse aus dem Freilandversuch und den weiteren Optimierungen abgewartet werden, die im Folgeprojekt generiert werden sollen. Die technischen und wirtschaftlichen Erfolgsaussichten können daher nur abgeschätzt werden.

Nach Vorgabe der EU-Wasserrahmenrichtlinie sollen Ufersicherungen möglichst durch die Verwendung von Pflanzen natürlich gestaltet werden und somit einen Beitrag zur Biodiversität leisten. In Deutschland gibt es 7.350 km Binnenwasserstraßen, von denen ca. 75 % Flüsse und 25 % Kanäle sind. Unter der Annahme, dass 1 % bis 5 % dieser Ufer aufgrund der Randbedingungen mit einer technisch-biologischen Ufersicherung unter Einsatz des neu zu entwickelnden, sequentiell abbaubaren Geotextilfilters befestigt werden können, ergibt sich daraus eine Uferlänge von 147 km bis 735 km. Wird eine Böschungsbreite von im Durchschnitt 4 m angenommen, ergeben sich daraus 588.000 m<sup>2</sup> bis 2.940.000 m<sup>2</sup> technisch-biologisch zu sichernde Ufer.

Neben der angedachten technisch-biologischen Uferbefestigung an Wasserstraßen können die erfolgreich entwickelten sequentiell biologisch abbaubaren Geotextilien ebenfalls in der Geotechnik im Bereich der Küstenbefestigung und als 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. Hierfür bietet sich eine Produktreihe von Geotextilien an, die teilweise oder ganz biologisch abbaubar sind und die Begrünung von Hängen begünstigen und gleichzeitig einen ausreichenden Erosionsschutz bieten. Für die Hersteller von Naturfasern und biobasierten Polymerfasern ergibt sich dadurch ein neuer, attraktiver Markt.

Ein Grundbaustein für den Aufbau einer Produktreihe von Geotextilien für unterschiedliche Einsatzgebiete ist die Erarbeitung von verschiedenen Anforderungsprofilen. Aufgrund der langen Standzeiten für Ufersicherungen und Hangsicherungen ist eine lange Testphase notwendig, die durchaus bis zu 10 Jahre dauern kann. Die notwendige werkstoffliche Entwicklung wird voraussichtlich nach fünf Jahren im Anschluss an das Projekt abgeschlossen sein. Eine mögliche Umsetzung der Polymerfaserherstellung und Geotextilproduktion mit den entwickelten Werkstoffen wird rund zwei weitere Jahre benötigen.

Technische Ergebnisse sollen soweit möglich durch die Anmeldung von Schutzrechten gesichert werden. Die nun vorliegenden, ersten Projektergebnisse werden (unter Wahrung der patentrechtlich notwendigen Geheimhaltung), falls es weitere Lockerungen der Vorschriften zur Vermeidung der Ausbreitung des Coronavirus zulassen, auf nationalen wie internationalen Konferenzen und Symposien bekannt gemacht. Dabei werden die verschiedenen betroffenen Anwendungsgebiete (Biobasierte Werkstoffe, Geotextilien und Geotechnik sowie Wasserbau) bedacht und durch die Vorstellung von Ergebnisse auf so unterschiedlichen Veranstaltungen wie „Grüne Woche Berlin“, „GEC Geotechnik - expo & congress“, „Aachen-Dresden

International Textile Conference“ und „Kolloquium zur Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit: Forschung und Entwicklung zur Qualitätssicherung von Maßnahmen an Bundeswasserstraßen“ abgedeckt. Des Weiteren sind Veröffentlichungen in nationalen und internationalen Fachzeitschriften geplant.

Eine wissenschaftliche Anschlussfähigkeit ergibt aus der Werkstoffentwicklung für Fraunhofer UMSICHT dahingehend, dass die erarbeiteten Erkenntnisse der rheologischen Zusammenhänge zwischen den Werkstoffrezepturen und der Verarbeitbarkeit beim Schmelzspinnen neu sind. So lassen sich diese Erkenntnisse für das Schmelzspinnen auch von anderen Biokunststoffen in weiteren Anwendungen in Form neuer Projekte und Produkte verwerten. Die grundlegenden rheologischen Erkenntnisse lassen sich darüber hinaus auch auf Kunststoffe in anderen Verarbeitungsverfahren übertragen. Diese Erkenntnisse helfen dabei, diese Kunststoffe zielgerichtet zu entwickeln. Die Schmelzeigenschaften sind für alle Kunststoffverarbeitungsverfahren mit thermoplastischen Kunststoffen entscheidend.

Die Bundesanstalt für Wasserbau wird die wissenschaftliche Bewertung der im Freilandversuch installierten Geotextilprototypen über die Laufzeit des Projektes hinaus weiterführen. Geplant sind Probenentnahmen nach 1,5, 3, 5 und 10 Jahren. Diese Ergebnisse werden in neue Einbaukonzepte für technisch-biologische Ufersicherungen umgesetzt. Die Untersuchung der Umweltverträglichkeit der neu entwickelten Geotextilien insbesondere hinsichtlich der Fauna ist als gemeinsames Projekt mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) an das Folgeprojekt angedacht.

Die wirtschaftliche Anschlussfähigkeit ergibt sich auf verschiedenen Märkten in Verbindung mit den im Vorhaben generierten Erkenntnissen und entwickelten Produkten. FKUR strebt im Rahmen des Projektes die Erweiterung des Produktportfolios an. Eine Absatzmenge von 5 t ist für FKUR ausreichend für die Kommerzialisierung. Ein wirtschaftlicher Anschluss für Trevira ergibt sich für eine erste kommerzielle Produktion von 10 t Fasern. Bei Trevira wird eine Polymerfasermenge von mindestens 100 t/a für eine mittelfristige Markteinführung angestrebt. Die Firma Brinkmann kann mit den im Projekt entwickelten Geotextilien eine neue Produktpalette sequentiell abbaubarer Geotextilien aufbauen und damit zukünftige Absatzmärkte sichern und ausbauen.

### II.3 Erkenntnisse von Dritten

Seit einigen Jahren untersuchen die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) und die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsprojekts die Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen technisch-biologischer Ufersicherungen an Wasserstraßen. Es wird erforscht, welche Pflanzen mit ihren Wurzeln und oberirdischen Teilen den Uferschutz an Wasserstraßen dauerhaft gewährleisten können und wie dies erfolgt. Auf der Grundlage von bereits vorliegenden praktischen Erfahrungen und zusätzlichen Labor-, Modell- und Freilandversuchen von neuen Ufersicherungsmethoden erarbeiten sie Anwendungsempfehlungen, Merkblätter und Bemessungsgrundlagen für die Anwendung von technisch-biologischen Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen. 2018 wurde unter anderem das Kennblatt Weidenspreitlage<sup>23</sup> herausgegeben. In der Veranstaltung „Technisch-biologische Ufersicherungen an der Versuchsstrecke am Rhein – Chancen und Herausforderungen hinsichtlich Uferschutz und Ökologie“<sup>24</sup> der BAW, die am 18. und 19. Juni 2018 in Worms stattfand, wurde in den Vorträgen über die Ergebnisse verschiedener technisch-biologischer Ufersicherungen an der Versuchsstrecke am Rhein berichtet. Die Erfahrungen der BAW und der BfG mit technisch-biologischen Ufersicherungen wurden bei der Entwicklung der Geotextilprototypen und bei der Konzipierung des Freilandversuchs mitberücksichtigt.

Die Veröffentlichung des Projektstarts in der Fachpresse hatte zu mehreren Anfragen aus Industrie und Forschung geführt. Aus einer der Anfragen hat sich eine Projektidee entwickelt, die in dem 2019 bewilligten Projekt „DegraFib“ (FZK 22023618) gemeinsam mit dem Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen bearbeitet wird. In dem Projekt werden der Einfluss der Kristallinität und der Oberfläche auf das Abbauverhalten untersucht. Außerdem werden Abbautests für Filamente und Vliese entwickelt. Die Erkenntnisse aus diesem Projekt werden in die Optimierung der Geotextilienprototypen im Bioshoreline-Folgeprojekt mit einfließen.

### II.4 Veröffentlichungen

Der Projektstart wurde über Pressemeldungen von Fraunhofer UMSICHT und der FNR veröffentlicht. Diese Veröffentlichung führte neben interessierten Anfragen aus Industrie und Forschung auch zu einem Interview des Deutschlandfunks, das im Rahmen des Beitrags „Vom zweifelhaften Nutzen der Biokunststoffe“ am 23.

<sup>23</sup> BAW und BfG (2018): Technisch-biologische Ufersicherung an Binnenwasserstraßen – Kennblatt Weidenspreitlage. Hrsg.: Bundesanstalt für Wasserbau und Bundesanstalt für Gewässerökologie, Karlsruhe und Koblenz, (2018) [https://izw.baw.de/publikationen/alu/0/KB\\_Weidenspreitlagen\\_FEB-2018\\_\(V2\)\\_DT\\_a.pdf](https://izw.baw.de/publikationen/alu/0/KB_Weidenspreitlagen_FEB-2018_(V2)_DT_a.pdf)

<sup>24</sup> Der Tagungsband und die Einzelvorträge zur Veranstaltung sind auf den Websites der BAW veröffentlicht: <http://ufersicherung.baw.de/de/veranstaltungen/kolloquium-2018>.

Juli 2017 ausgestrahlt wurde. Auf der Homepage von Fraunhofer UMSICHT wurde September 2018 ein Projektsteckbrief zu Bioshoreline in Deutsch und Englisch veröffentlicht, der regelmäßig aktualisiert wird.<sup>25</sup>

Ein Poster zum Projekt und erste Produktmuster wurden auf der Biocomposites Conference Cologne am 6. und 7. Dezember 2017 und auf der Biobased Material Conference in Köln am 14. und 15. Mai 2018 ausgestellt. Für die K-Messe in Düsseldorf (16. bis 23. Oktober 2019) wurde ein Exponat gestaltet, mit dem das Geotextil und die Anwendung an der Wasserstraße präsentiert wurde (Abbildung 36). Das Exponat wurde auch auf der Biobased Material Conference in Köln am 15. und 16. Mai 2019 ausgestellt. Insgesamt war das Interesse an der Geotextilentwicklung auf allen Veranstaltungen groß.



**Abbildung 36: Ausstellungsexponat für Bioshoreline**

Eine Veröffentlichung der bisherigen Projektergebnisse erfolgte 2019 und 2020 durch die BAW in ihrer eigenen Veröffentlichungsreihe Forschung Xpress.<sup>26</sup> Weitere Veröffentlichungen sind im Folgeprojekt Bioshoreline2 geplant.

<sup>25</sup> <https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/referenzen/bioshoreline.html>

<sup>26</sup> Fleischer P. (2019): Entwicklung definiert abbaubarer Geotextilien zur Anwendung als temporäre Filter in technisch-biologischen Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen. In: Forschung Xpress, 66/2019. Hrsg.: Bundesanstalt für Wasserbau. Karlsruhe, (2019) [https://izw.baw.de/publikationen/forschung-xpress/0/66-November\\_2019\\_ForschungXpress\\_BAW.pdf](https://izw.baw.de/publikationen/forschung-xpress/0/66-November_2019_ForschungXpress_BAW.pdf)

### III. ANHANG

#### III.1 Teilvorhaben 1

##### Entwicklung von Werkstoffen für Polymerfasern, Test der Bioabbaubarkeit, Koordination (UMSICHT)

#### 1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Ein Ziel des Teilvorhabens ist die Entwicklung von schmelzspinnbaren Biokunststoffcompounds mit angepassten biologischen Abbaugeschwindigkeiten. Dazu erfolgen eine Vorauswahl von bioabbaubaren Rohstoffen und Additiven, die grundsätzlich an Gewässern eingesetzt werden können, und eine Beurteilung der Datenbasis zum Abbau dieser Eingangsmaterialien.

Mechanische und rheologische Eigenschaften der entwickelten Rezepturen werden bestimmt. Auf der Basis dieser Kennwerte erfolgt die Auswahl der geeignetsten Werkstoffe und die Weitergabe der Rezepturen und der Verarbeitungsbedingungen auf Labordoppelschneckenextrudern an FKUR zum Scale-Up sowie die Weitergabe der charakteristischen Materialdaten an Trevira.

Für Auswahl und Erwerb der Naturfasern und für die Geotextilherstellung wird ein Unterauftrag an die Firma BNP Brinkmann vergeben. Die Geotextilprototypen können aus mehreren Lagen unterschiedlicher Vliese mit verschiedenen Flächengewichten bestehen. Brinkmann stellt drei bis neun Nonwovens her, aus denen sie dann drei bis acht Geotextilprototypen zusammensetzen, wobei die Durchwurzelbarkeit für die vollständigen Geotextilprototypen erfüllt sein muss. Hausinterne Qualitätsmessungen der Geotextilprototypen werden durchgeführt. Dabei werden folgende Eigenschaften ermittelt: Flächengewicht, Dicke, Höchstzugkräfte in Längs- und Querrichtung, Dehnung längs und quer, Stempeldurchdruckkraft und evtl. Pyramiden-Durchdruckwiderstand. Weitere Parameter wie die Durchlässigkeit und die Filterstabilität, insbesondere die Öffnungsweite, werden durch den assoziierten Partner Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) ermittelt.

Ein weiteres Ziel des Teilvorhabens ist der Entwurf eines Labortests zur Bestimmung der biologischen Abbaubarkeit auf Basis von DIN EN ISO 17556. Die Prüfung der Einzelkomponenten der Geotextilprototypen erfolgt in natürlichem Boden bei voraussichtlich 20 bis 25 °C. Die Fasern werden mit dem Boden vermischt und dem aeroben Abbau im Respirometer ausgesetzt. Der Test dauert circa 6 Monate und pro Ansatz können unter Berücksichtigung von Doppelbestimmungen 4 Fasertypen getestet werden. Als Standardmaterial wird vergleichend Cellulosepulver mit getestet.

Daneben führt UMSICHT das Projektmanagement und die jährliche Berichterstattung federführend durch. Dafür wird zu Projektbeginn ein Projektmanagementplan verfasst, der den Projektpartnern beim Kick-Off Meeting vorgestellt wird. UMSICHT koordiniert zudem die Veröffentlichungen der Ergebnisse unter Berücksichtigung von möglichen Schutzrechten.

#### 2. Bearbeitete Arbeitspakete

##### *AP 0: Projektmanagement*

- Organisation (UMSICHT) des Projektstarttreffens in Hörstel-Bevergern, des Projekttreffens in Bobingen und mehrerer Telefonkonferenzen sowie die jeweilige Teilnahme (UMSICHT, Brinkmann, BAW).
- Erstellung eines Projektmanagementplans (UMSICHT).
- Erstellen (UMSICHT) und Durchsicht (BAW, Brinkmann) verschiedener Texte zur Öffentlichkeitsarbeit zum Projekt.
- Erstellung eines Posters zum Projekt sowie dessen Präsentation auf der Ausstellung der Biocomposites Conference Cologne (UMSICHT).
- Diskussion mit FKUR und BAW über die Entwicklung bioabbaubarer Bodennägel / -anker als Alternative zu Herstellung der Compounds im Projekt (UMSICHT).
- Einfordern (UMSICHT) und Erstellen (UMSICHT, Brinkmann, BAW) von Berichten.
- Diskussion mit Brinkmann und BAW über die weitere Herstellung von Geotextilprototypen (UMSICHT).

##### *AP 1: Definition Anforderungsprofil an die Geotextilien*

- Mitwirkung bei der Festlegung des Anforderungsprofils für die Geotextilien

##### *AP 2: Auswahl der Naturfasern sowie Werkstoffauswahl und -entwicklung für Polymerfasern*

- Entwicklung verschiedener Rezepturen.
- Auswahl der Rezepturen gemeinsam mit Trevira.

- Auswahl der Naturfasern durch Brinkmann (Unterauftrag)

*AP 3: Herstellung der Polymerfasern und Erwerb Naturfasern*

- Ermittlung der Eigenschaften der Compounds aus dem Scale-up (UMSICHT).
- Recherche der Anbieter geeigneter Naturfasern und Erwerb von Sisalfasern (Brinkmann).
- Entwicklung eines Verfahrens zu Prüfung der Polymere mittels Rheotens (UMSICHT).

*AP 4: Herstellung der Geotextilprototypen*

- Konzeptionierung und Herstellung von Geotextilprototypen in drei Varianten (Brinkmann).
- Zweimalige erneute Herstellung eines jeweils optimierten Geotextilprototyps (Brinkmann).
- Prüfung der mechanischen Eigenschaften der Prototypen (Brinkmann).

*AP 5: Prüfung und Bewertung der hergestellten Geotextilprototypen*

- Recherche, Auswahl und Anpassung eines Tests zur biologischen Abbaubarkeit (UMSICHT).
- Durchführung und Auswertung der Tests zur biologischen Abbaubarkeit (UMSICHT).
- Prüfung der Mindestanforderungen an biologisch abbaubare Vliesstoffe beim Einsatz als Filter in technisch-biologischen Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen an verschiedenen Geotextilprototyp (BAW).

*AP 6 Auswahl von drei Geotextilprototypen*

- Diskussion der Ergebnisse der Materialprüfungen (UMSICHT, BAW, Brinkmann).
- Auswahl der Geotextilprototypen für den Freilandversuch (UMSICHT, BAW, Brinkmann)

*AP 7 Erarbeitung eines Konzeptes zur Durchführung des Freilandversuchs an einer Wasserstraße, Planung der Tests auf Durchwurzelbarkeit*

- Konzept zur Durchführung des Freilandversuchs (BAW)
- Konzept zur Durchführung des Durchwurzelungstests (UMSICHT, BAW)

*AP 8 Vergabe und Bauausführung der Uferbefestigung unter Verwendung der Geotextilprototypen auf einer Versuchsfläche an der Wasserstraße*

- Erstellung der Ausschreibungsunterlagen zur Vergabe der Verlegung der Geotextilien an der Versuchsstrecke am Rhein (UMSICHT, BAW)
- Durchführung der Ausschreibung und Vergabe (UMSICHT)
- Überwachung der Durchführung (UMSICHT, BAW)

*AP 11: Durchführung der Tests zur Durchwurzelbarkeit der Geotextilprototypen*

- Bau der Bewuchskästen (UMSICHT, BAW)
- Einbau der Geotextilprototypen (UMSICHT, BAW)
- Auswertung der Durchwurzelungsversuche (UMSICHT, BAW)

### **3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens**

- Zur Messung der biologischen Abbaubarkeit wurde ein Testverfahren ausgewählt und angepasst.
- Die Tests zur biologischen Abbaubarkeit wurden durchgeführt. Die Proben aus PLA zeigen auch nach 180 Tagen bei 20 °C keinen Abbau.
- Verschiedene Compounds wurden hergestellt.
- An den entwickelten Rezepturen und den Referenzmustern wurden mechanische und rheologische Kennwerte gemessen. Für ausgewählte Muster wurde auch die Molmasse bestimmt.
- Drei Rezepturen wurden gemeinsam mit Trevira ausgewählt. Die Rezepturen und die Verarbeitungsbedingungen wurden an FKUR weitergeben.
- Aus den beiden entwickelten Fasertypen sowie der Standard-PLA, Biokomponentenfasern und Sisal wurden drei Varianten dreilagiger Krempelvliese produziert.
- Die Geotextilprototypen aus der ersten Produktion wurden hinsichtlich der vereinbarten Anforderungen geprüft. Mit Ausnahme des geforderten k-Werts für die hydraulische Filterstabilität gegenüber allen Bodentypen nach TLG (2018) wurden alle Anforderungen erfüllt.

- Es wurde daher im Projektkonsortium in Absprache mit der FNR beschlossen, die Geotextilien durch eine weniger dichte Vernadelung zu optimieren.
- Ein verbesserter Prototyp wurde im April 2018 (A.2018, BAW-Bezeichnung: B.2) hergestellt und zur Prüfung an die BAW versandt.
- Die Geotextilprototypen aus der zweiten Produktion wurden hinsichtlich der vereinbarten Anforderungen geprüft. Es wurde ein etwas größerer k-Wert erreicht. Aber der geforderte k-Wert für die hydraulische Filterstabilität für alle Bodentypen wurde auch hier nicht erreicht.
- Es wurde daher im Projektkonsortium in Absprache mit der FNR beschlossen, eine weitere, weniger stark vernadelte Variante Geotextilien herzustellen.
- Ein optimierter Prototyp wurde im März 2019 (C.2019, BAW-Bezeichnung: B.3) hergestellt und von der BAW hinsichtlich der Durchwurzelbarkeit geprüft. Der k-Wert des bodenbesetzten Geotextils hatte sich erwartungsgemäß weiter vergrößert, aber der geforderte k-Wert wurde auch hier noch nicht erreicht. Da der Abstand zum Grenzwert jedoch nur noch gering war, wurde an dieser Stelle auf eine weitere Optimierung verzichtet.
- Der Geotextilprototyp (A.2018, BAW-Bezeichnung: B.2) wurde 2018 in den Bewuchskästen der BAW getestet. Eine Durchwurzelung ist möglich, das Pflanzenwachstum und die Wurzelmasse waren aber im Vergleich zum Wachstum ohne Geotextil etwas geringer.
- 2019 wurde der Geotextiltyp (C.2019, BAW-Bezeichnung: B.3) in gleicher Weise in Bewuchskästen der BAW hinsichtlich der Durchwurzelbarkeit geprüft. Die Ergebnisse von 2018 wurden weitestgehend bestätigt.
- 2020 wurden die Geotextiltypen C.2019 (BAW-Bezeichnung: B.3), C. 2017 und A.2017 im Naturversuch am Rhein eingebaut, um den Abbau der Geotextilien unter Wasserstraßenbedingungen zu testen. Erste Probennahmen durch die BAW sind 2022 vorgesehen.

## III.2 Teilvorhaben 2

### Polymerfaserherstellung (Trevira)

#### 1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Ziel dieses Teilvorhabens ist die Herstellung der Polymerfasern für die anschließende Geotextilherstellung. Als Unterstützung der Entwicklung der Compounds durch Fraunhofer UMSICHT definiert Trevira die Eigenschaften, die die Werkstoffe zur Herstellung von Polymerfilamenten erfüllen müssen. Nach der von Fraunhofer UMSICHT entwickelten Rezeptur fertigt Trevira Polymerfasern aus Dryblends und sendet diese Fasern an Brinkmann.

#### 2. Bearbeitete Arbeitspakete

##### *AP 0: Projektmanagement*

- Teilnahme am Projektstarttreffen in Hörstel-Bevergern, am Projekttreffen in Bobingen und an mehreren Telefonkonferenzen.
- Durchsicht verschiedener Texte zur Öffentlichkeitsarbeit zum Projekt.
- Erstellen von Berichten.

##### *AP 1: Definition Anforderungsprofil an die Geotextilien*

- Mitwirkung bei der Festlegung des Anforderungsprofils für die Geotextilien.

##### *AP 2: Auswahl der Naturfasern sowie Werkstoffauswahl und -entwicklung für Polymerfasern*

- Mitwirkung bei der Werkstoffauswahl, Festlegung der Faserparameter.

##### *AP 3: Herstellung der Polymerfasern und Erwerb Naturfasern*

- Untersuchungen zu den Compounds.
- Planung des Verspinnens der Compounds zu Stapelfasern.
- Versuche zur Herstellung von Polymerfasern aus den bei FKUR hergestellten Werkstoffen.
- Herstellung von je zwei verschiedenen Polymerfasern aus einem Dryblend.
- Verstreckung und Kräuselung der Fasern.
- Ermittlung der Eigenschaften der Fasern.

##### *AP 6 Auswahl von drei Geotextilprototypen*

- Durchsicht der entsprechenden Unterlagen sowie Teilnahme an Diskussion der Ergebnisse der Materialprüfungen und der Auswahl der Geotextilprototypen für den Freilandversuch.

#### 3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

- Vor den Verarbeitungsversuchen wurden die wesentlichen Kennwerte für die Faserherstellung an den gelieferten Werkstoffen bestimmt.
- Aus den durch FKUR produzierten Compounds konnten keine Fasern hergestellt werden.
- Die Dryblends aus PLA Typ1 und Typ2 konnten zu Fasern versponnen werden.
- Die daraus hergestellte Spinnware ließ problemlos zu entsprechenden Stapelfasern weiterverarbeiten.
- Die Kräuselung wurde entsprechend den Anforderungen angepasst.
- Eine Übertragung auf eine kommerzielle Produktionsanlage ist möglich.

### III.3 Teilvorhaben 3

#### Produktion von entwickelten Werkstoffen für die Biopolymerfaserherstellung (FKuR)

##### 1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Ursprüngliches Ziel dieses Teilvorhabens war das Scale-up der Werkstoffrezepturen aus AP 2. Bereits bei der Entwicklung der Polymercompounds durch Fraunhofer UMSICHT unterstützt FKuR beratend, um die notwendige Skalierbarkeit der Rezepturen zu gewährleisten. Zudem werden verschiedene PLA-Typen für die Entwicklungsarbeiten zur Verfügung gestellt. Im Scale-up werden aus ausgewählten Werkstoffrezepturen jeweils etwa 200 kg hergestellt und an Trevira zur Herstellung der Polymerfasern geliefert.

Da die Compoundierung des Werkstoffs vor der Faserherstellung nicht zielführend war, wurde das Ziel des Teilvorhabens 3 in Absprache mit dem Projektkonsortium und der FNR geändert.

Zur Befestigung der Filtervliese sind zusätzliche temporäre Befestigungen wie Pflöcke und Querriegel erforderlich. Wie die Geotextilien werden die Befestigungen nur so lange gebraucht, bis sich ausreichend Wurzeln entwickelt haben. Die bisher eingesetzten Befestigungen bestehend aus Tot- oder Lebendholz und bieten wenig Spielraum für unterschiedliche Formen der Befestigungen. Ziel des neuen Arbeitspaketes AP 16 ist die Entwicklung eines biologisch abbaubaren Werkstoffes für die Herstellung von Bodennägeln. Analog zu den Filtervliesen müssen auch diese die technischen Anforderungen für mindestens 3 Jahre erfüllen und sich dann biologisch vollständig abbauen.

##### 2. Bearbeitete Arbeitspakete

###### *AP 0: Projektmanagement*

- Teilnahme am Projektstarttreffen in Hörstel-Bevergern, am Projekttreffen in Bobingen und an mehreren Telefonkonferenzen.
- Diskussion der Entwicklung von bioabbaubaren Bodennägel / -anker als Alternative zu Herstellung der Compounds im Projekt.
- Durchsicht verschiedener Texte zur Öffentlichkeitsarbeit zum Projekt.
- Erstellen von Berichten.

###### *AP 1: Definition Anforderungsprofil an die Geotextilien*

- Mitwirkung bei der Festlegung des Anforderungsprofils für die Geotextilien.

###### *AP 2: Auswahl der Naturfasern sowie Werkstoffauswahl und -entwicklung für Polymerfasern*

- Beratung bei der Auswahl der Rohstoffe, Bereitstellung zweier PLA-Typen.

###### *AP 3: Herstellung der Polymerfasern und Erwerb Naturfasern*

- Herstellung von je 205 kg von drei ausgewählten Rezepturen.
- Versand an Trevira (200 kg) und UMSICHT (5 kg).
- Lieferung von PLA Typ1 und PLA Typ2 an Trevira für die Produktion der Polymerfasern.

###### *AP 6 Auswahl von drei Geotextilprototypen*

- Durchsicht der entsprechenden Unterlagen sowie Teilnahme an Diskussion der Ergebnisse der Materialprüfungen und der Auswahl der Geotextilprototypen für den Freilandversuch.

###### *AP 16 Entwicklung biologisch abbaubarer Werkstoffe für spritzgegossene Bodennägel*

- Herstellung verschiedener Rezepturen.
- Prüfung der Werkstoffe.
- Herstellung eines spritzgegossenen Bodennagels.

##### 3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

- Von den in AP 2 ausgewählten Rezepturen wurden jeweils 205 kg hergestellt. Die Verarbeitungsbedingungen wurden an industrielle Rahmenbedingungen angepasst.
- Da die Compounds nicht im Schmelzspinnverfahren verarbeitbar waren, wurde Trevira PLA Typ1 und PLA Typ2 als Rohmaterial für die Dryblends zur Verfügung gestellt.

- Da wegen der Verkürzung der Produktionskette entschieden wurde, das ursprüngliche Ziel des Teilprojekts 3 Produktion von entwickelten Werkstoffen für die Biopolymerfaserherstellung nicht weiter zu verfolgen, wurden Alternative Ziele für Teilvorhaben 3 diskutiert. Nach Absprache mit der FNR wurde die Entwicklung von bioabbaubaren Bodennägel / -anker als neues Ziel von der FKUR angestrebt. Die Umwidmung der Mittel wurde bei der FNR beantragt.
- Der Einfluss verschiedener Blendpartner, Additive, mineralische und natürliche Füllstoffe auf die Werkstoffeigenschaften wurde ermittelt.
- Besonders vielversprechend schien die Verstärkung mit Holzfasern zu sein.
- Bodennägel wurden erfolgreich im Spritzgiessverfahren hergestellt.
- Die mechanischen Eigenschaften der Bodennägel waren noch nicht ausreichend.
- Aufgrund der notwendigen Länge der Bodennägel wurde festgestellt, dass eine Herstellung in einer Profilextrusion sinnvoller ist.