

## Zusammenfassung

Im Vorhaben wurden faserbewehrte Baustoffe auf der Basis von Mutterboden, feinkörnigem Erdaushub bzw. Recyclingmaterial im Labormaßstab entwickelt und der Nachweis der Verstärkungswirkung der eingesetzten Fasern an Probekörpern geführt. Das neuartige Baustoffsystem zeichnet sich dadurch aus, dass:

- Fasern in das Stoffsystem eingebracht werden und durch eine gleichmäßige Verteilung der eingemischten Fasern eine Bewehrung des Stoffsystems Boden/Recyclingmaterial erzielt wird,
- die mechanischen und bodenmechanischen Eigenschaften, insbesondere Scherfestigkeit und Schwind-/Quellverhalten des Baumaterials, sich verbessern,
- die Entstehung bzw. Ausbreitung von Rissen sich stark reduziert,
- die Beständigkeit der Fasern für den jeweilige Anwendungsfall gegeben ist und ein biologischer Abbau der Fasern unter definierten Bedingungen trotzdem garantiert werden kann,
- die Verwertung von minderwertigen Baumaterialien bzw. Abprodukten aus dem Baubereich in neuen Einsatzgebieten möglich wird.

Für die Faserbewehrung wurde besonderes Augenmerk auf zeitlich begrenzt verrottungsbeständige Naturfasern (z. B. Sisalfasern) bzw. gezielt abbaubare Kunststoffe (Basis: Polylactid) gelegt. Die Herstellung der Materialkombinationen Bodenaushub bzw. Recyclingmaterial und Fasern erfolgte im Rahmen dieses Projekts zunächst durch Misch- und Einbauversuche im Labor. Aufgrund der nachgewiesenen Verstärkungswirkung der Faserbewehrung werden die Boden-Faser-Gemische für den Einsatz bei der Böschungssicherung bzw. beim Böschungsbau breite Anwendung finden. Indem für verschiedene Boden-Faser-Gemische eine Verstärkungs- und Bewehrungswirkung durch die ausgewählten Fasern und PLA-Strukturelemente unter Laborbedingungen nachgewiesen werden konnte, wurde das Ziel des Projektes erreicht. Weiterführende Untersuchungen der beprobten neuen Baustoffgemische im Labor- und Feldmaßstab zur Einführung in die Praxis und zum Nachweis der Praxistauglichkeit sind notwendig.

Das Projekt wurde als IGF-Forschungsvorhaben aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWT) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungseinrichtungen (AiF) gefördert.

### Forschungsvorhaben

Faserbewehrter Boden - Faserbewehrung von feinkörnigen Recyclingmaterialien und Aushubböden für eine Verwertung im Erd- und Tiefbau



Inhalt

<b>1</b>	<b>Forschungsthema</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>Forschungsziel</b>	<b>2</b>
<b>4</b>	<b>Stand der Wissenschaft und Technik</b>	<b>2</b>
4.1	Bauabfälle und deren Verwertung	2
4.2	Geotextilien und deren Einsatz	4
4.3	Fasern für die Bewehrung einer Baustoffmatrix aus feinkörnigem Recyclingmaterial bzw. Erdaushub	5
4.3.1	Naturfasern	5
4.3.2	Fasern aus biologisch abbaubaren Kunststoffen	7
4.3.3	Preisentwicklung von Fasermaterialien	8
4.4	Auswahl geeigneter Recyclingbaustoffe und Aushubböden	9
4.5	Einsatzgebiet für faserbewehrte Baustoffe auf Basis feinkörniger Recyclingbaustoffe und Aushubböden	10
<b>5</b>	<b>Materialauswahl, Materialaufbereitung und Materialcharakterisierung</b>	<b>11</b>
5.1	Allgemeines	11
5.2	Fasern	12
5.2.1	Naturfasern	12
5.2.2	Herstellung der PLA-Strukturelemente (PLA-Fasern)	15
5.2.3	Optische Analyse der Fasermaterialien	19
5.2.4	Wasseranteil der Fasermaterialien	22
5.2.5	Flüssigkeitsaufnahme der Fasern	23
5.2.6	Dichte der Fasermaterialien	24
5.2.7	Prüfung der biologischen Abbaubarkeit der Fasern	24
5.3	Böden	27
5.3.1	Versuche zur Auslaugung der Böden	31
<b>6</b>	<b>Entwicklung faserbewehrter Böden - Versuchsdurchführung</b>	<b>32</b>
6.1.	Versuchsplan	32
6.2.	Trocknung	33
6.3	Proctorversuche	33
6.4	Einmischverhalten der Fasern in die Bodenmaterialien	35
6.5.	Scherversuche	36
<b>7</b>	<b>Entwicklung faserbewehrter Böden - Untersuchungsergebnisse</b>	<b>37</b>
7.1	Faserbewehrung Flachsschäben	37
7.1.1.	Einbauverhalten	37
7.1.2	Bodenmechanische Untersuchungen - Scherparameter	38
7.2	Faserbewehrung Bambus	38

7.2.1	Einbauverhalten	38
7.2.2	Bodenmechanische Untersuchungen - Scherparameter	39
7.3	Faserbewehrung Sisal	39
7.3.1	Einbauverhalten	39
7.3.2	Bodenmechanische Untersuchungen - Scherparameter	40
7.4	Faserbewehrung Polylactid (PLA) - Fasern	40
7.4.1	Einbauverhalten	40
7.4.2	Bodenmechanische Untersuchungen - Scherparameter	41
<b>8</b>	<b>Gegenüberstellung von Ergebnissen und Zielsetzung</b>	<b>41</b>
<b>9</b>	<b>Verwendung der Zuwendungen</b>	<b>46</b>
<b>10</b>	<b>Wissenschaftlich-technischer Nutzen</b>	<b>46</b>
<b>11</b>	<b>Wirtschaftlicher Nutzen für KMU</b>	<b>47</b>
<b>12</b>	<b>Innovativer Beitrag der Ergebnisse zu industriellen Anwendungsgebieten</b>	<b>47</b>
<b>13</b>	<b>Veröffentlichungen im Rahmen des Vorhabens</b>	<b>48</b>
13.1	Vorträge	48
13.2	Veröffentlichung in Fachzeitschriften und Tagungsbänden	48
13.3	Teilnahme an Messe- und Informationsveranstaltungen	48
<b>14</b>	<b>Ausblick</b>	<b>49</b>
<b>15</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>49</b>
<b>Anlage</b>		<b>55</b>

## 1 Forschungsthema

### **Faserbewehrter Boden – Faserbewehrung von feinkörnigen Recyclingmaterialien und Aushubböden für eine Verwertung im Erd- und Tiefbau**

## 2 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Mehr als die Hälfte der Abfälle in Deutschland entstehen auf der Baustelle. Durch die Entwicklung neuer Baustoffsysteme und Bauverfahren ist die Vermeidung und Verwertung von Bauabfällen in der Vergangenheit ständig verbessert worden. Insbesondere im Erdbau konnten durch die Entwicklung z. B. der Geotextilien viele Materialien wiedereingebaut und vollkommen neue Bauweisen entwickelt werden. Im Bereich der Bodenbewehrung und Erosionssicherung werden heute ca. 35 % der hergestellten Geotextilien eingesetzt. Bestanden die Geotextilien zunächst nur aus verschiedenen Kunststoffen, wurden inzwischen technische Textilien auch aus nachwachsenden Rohstoffen entwickelt. Im Bereich der Kunststoffe konnte die Beständigkeit der Geotextilien in der Bodenmatrix nachgewiesen werden. Dagegen werden aufgrund ihres Abbauverhaltens Naturfasern derzeit nur dort eingesetzt, wo eine begrenzte Lebensdauer der Bewehrung, z. B. bei Begrünungsmatten, ausreicht bzw. gefordert wird [Bürger-1995]. Eine direkte Faserbewehrung mittels Kurz- und Langfasern einer Bodenmatrix scheiterte bisher einerseits an den Problemen des Einbringens und der gleichmäßigen Verteilung der Fasern in der Bodenmatrix und andererseits an geeigneten umweltverträglichen Fasermaterialien, die eine Langzeitbewehrung des Bodens garantieren, aber trotzdem nach einer definierten Zeit bzw. infolge einer Behandlung biologisch abbaubar sind.

Eine bereits im Projektantrag durchgeführte Abschätzung zeigt, dass beträchtliche Mengen an Böden und Recyclingmaterialien jährlich zur Nutzung der erarbeiteten Forschungsergebnisse in Frage kommen. Entsprechend den „Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen“ [LAGA 2003, 2004b u. 2004c] müssen neue Verwertungswege für bisher nur auf Deponien abgelagerte mineralische Baustoffe erschlossen werden. Ein erster Schritt dazu war die Entwicklung der „Eckpunkte (EP) der LAGA für eine Verordnung über die Verwertung von mineralischen Abfällen in technischen Bauwerken“ [LAGA 2004a] sowie die „Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts“ vom 27. April 2009 [DeponieV-2009]. Zur weiteren rechtlichen Absicherung des Einsatzes von Recyclingstoffen und damit von grundlegender Bedeutung für die Umsetzung der in diesem Projekt erreichten Forschungsergebnisse wurde am 13.11.2007 ein 1. Arbeitsentwurf der „Ersatzbaustoffverordnung“ vorgelegt [Arbeitsentwurf ErsatzbaustoffV-2007], deren verbindlicher Erlass nach Überarbeitung erwartet wird [Stracke-2009, Frisch-2009].

### 3 Forschungsziel

Gesamtforschungsziel ist die Entwicklung eines faserbewehrten Baustoffes auf der Basis von feinkörnigem Erdaushub bzw. Recyclingmaterial und der Nachweis der Verstärkungswirkung der eingesetzten Fasern. Das neuartige Baustoffsystem zeichnet sich dadurch aus, dass:

- Fasern in das Stoffsystem eingebracht werden und durch eine gleichmäßige Verteilung der Fasern eine Bewehrung des Stoffsystems Boden/Recyclingmaterial garantiert wird,
- die mechanischen und bodenmechanischen Eigenschaften, insbesondere Scherfestigkeit und Schwind-/Quellverhalten des Baumaterials verbessert werden,
- das Entstehen bzw. die Ausbreitung von Rissen verhindert bzw. stark reduziert wird,
- die Beständigkeit der Fasern für den jeweilige Anwendungsfall gegeben ist und ein biologischer Abbau der Fasern trotzdem garantiert werden kann,
- die Verwertung von minderwertigen Baumaterialien bzw. Abprodukten aus dem Baubereich in neuen Einsatzgebieten möglich wird.

Im Rahmen dieser Studie wurden erste Laboruntersuchungen zum Erreichen dieser Ziele durchgeführt. Für die Faserbewehrung lag besonderes Augenmerk auf verrottungsbeständigen Naturfasern (z. B. Sisalfasern) bzw. gezielt abbaubaren Kunststoffen (Basis: Polylactid). Die Herstellung der Materialkombinationen Bodenaushub bzw. Recyclingmaterial und Faser wurde zunächst durch Misch- und Einbauversuche im Labormaßstab realisiert. Neben den bodenmechanischen Eigenschaften ist dabei die Umweltverträglichkeit, Langzeitbeständigkeit, Auslaugbarkeit und die Untersuchung der möglichen Interaktionen der eingesetzten Baumaterialien untereinander von entscheidender Bedeutung.

### 4 Stand der Wissenschaft und Technik

#### 4.1 Bauabfälle und deren Verwertung

Zur bundesweit eindeutigen Regelung der Verwertung von mineralischen Baustoffen im Erd- und Straßenbau wurden durch die Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) technische Regeln, die die Belange des Gewässer- und Bodenschutzes sowie der Gesundheit berücksichtigen, ausgearbeitet. Das LAGA-Merkblatt „Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen, Technische Regeln“ [LAGA-2003] enthält Anforderungen an die Verwertung von mineralischen Abfällen, um unvermeidbare Umweltbeeinträchtigungen hierdurch auszuschließen. Die Einhaltung dieser Anforderungen bildet die Basis für das zu entwickelnde Baustoffsystem und sind im Ergebnis der Projektbearbeitung in der Diskussion mit den Umweltämtern z. B. für den Einsatz im Deichbau entsprechend anzupassen bzw. zu erweitern. Um auch in diesem Bereich eine klare rechtliche Regelung zu erhalten, wurde die „Ersatzbaustoffverordnung“ entwickelt, deren 1. Arbeitsentwurf am 13.11.2007 [Arbeitsentwurf ErsatzbaustoffV-2007] vorgelegt wurde. Für die Erarbeitung eines verbesserten 2. Entwurfes durch das BMU sind vor allem die Fragen der Analytik, die

Güteüberwachung, die Probenahme, der Untersuchungsparameter und der geogen bedingten Hintergrundbelastungen zu klären, damit ein ausgewogener Interessenausgleich zwischen Grundwasser-/Bodenschutz und Kreislaufwirtschaft erfolgen kann [Frisch-2009]. Nach Erhebungen der Baustoff-Recycling-Verbände stehen nach heutigen Anforderungen 87 % der anfallenden Mengen mit der Qualität LAGA M20 Z1.1 [LAGA-2003] einer Verwertungsmöglichkeit offen [Frisch-2009].

Auf dem Bundeskongress „Baustoff-Recycling Baureststoffe« am 18.06.04 in Travemünde verwies der damalige Bundesminister für Verkehr, Bauen- und Wohnungswesen, Dr. Manfred Stolpe, darauf, dass mit 252 Mio. Tonnen Bauabfällen im Jahr 2000 mehr als die Hälfte aller jährlich anfallenden Abfallstoffe (ca. 450 Mio. Tonnen) auf der Baustelle entstanden sind. Davon konnten 68,5 Mio. Tonnen als Recyclingbaustoffe wieder aufbereitet werden. Vorrangiges Ziel sei es daher auch weiterhin, eine Minimierung des Abfallaufkommens im Bauwesen zu erreichen. Die umweltfreundliche Verwertung von Baureststoffen und Straßenaufbruch sei ein bedeutender Beitrag zur Ressourcenschonung. Durch neue Techniken und Verfahren können hochwertige Baustoffe aus Bauschutt, Straßenaufbruch und Bodenaushub hergestellt werden. Im Sinne der Nachhaltigkeit sind diese Verwertungsquoten weiter zu steigern und Baustoffe aus Altmaterialien zu entwickeln, die den hohen technischen Anforderungen an Bauprodukte gerecht und einer höherwertigen Verwendung zugeführt werden aber gleichzeitig durch ihre Wirtschaftlichkeit überzeugen [BMVB-2004].

Neben den umweltrelevanten Anforderungen werden für die Baustoffe auch im Tief- und Erdbau je nach Anwendungsgebiet spezielle technische Eigenschaften gefordert. Diese Eigenschaften können häufig nur durch entsprechend aufbereitete Recycling- und Aushubmaterialien in Verbindung mit angepassten Bauweisen realisiert werden. In der Vergangenheit wurden deshalb verschiedene Bodenverfestigungs- und Bodenstabilisierungsverfahren entwickelt, mit denen eine Verdichtung und der Wiedereinbau von nicht verdichtbaren Ausgangsmaterialien bei unterschiedlichsten Anwendungen (z. B. Straßenunterbau) möglich wurden. Eine Weiterentwicklung dieser Verfahren stellen die fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllmaterialien auf der Basis von Aushub- und Recyclingmaterialien (Recyclinganteil ca. 93 %) zum verdichtungslosen Verfüllen von Leitungsgräben, Hohlräumen oder Hinterfüllungen dar.

Für diese und andere Baustoffe können durch geeignete Bewehrungen die mechanischen und bodenmechanischen Eigenschaften soweit angepasst werden, dass neuartige Anwendungsfelder mit diesen neuen Bauverfahren erschlossen (z. B. im Bereich der Oberflächenabdichtung von Deichen oder Deponien) und existierende Bauweisen qualitativ verbessert (z. B. Böschungsbau und -sicherung) werden können. Durch die Bewehrung und die damit einhergehende Stabilisierung der Bodenmatrix kann hier ein quantitativer und qualitativer Sprung erreicht werden.

Im Jahr 2002 wurden nach Erhebungen des Statistischen Bundesamtes [SBD-2004] von insgesamt in Deutschland anfallenden Bauabfällen 59,8 Mio. Tonnen Bau- und Abbruchabfälle nach der Aufbereitung in deutschen Bauschuttzubereitungsanlagen als Recyclingbaustoffe wieder eingesetzt, das waren 8,7 Mio. Tonnen oder knapp 13

% weniger als im Jahr 2000. Dieses Aufkommen bestand größtenteils aus Bauschutt (55 %), Straßenaufbruch (21 %), Bodenaushub (12 %) und gemischtem Bauschutt und Bodenaushub (10 %). Der Rest (3 %) entfiel auf Baustellenabfälle sowie Bau- und Abbruchholz. Bis zum Jahr 2008 verringerte sich das Gesamtaufkommen an wieder aufbereitetem Material nochmals auf ca. 51 Mio. Tonnen ([Stracke-2009]).

Für das Forschungsvorhaben relevante Böden und Recyclingmaterialien sind grundsätzlich aus den Gruppen „Bodenaushub“ und „gemischtem Bauschutt und Bodenaushub“ generierbar. Unter Betrachtung dieser zwei Gruppen ergibt sich ein Gesamtanteil von ca. 20 %, was einer Gesamtmenge von etwa 10 Mio. Tonnen entspricht. Unter der Annahme, dass ca. 10 % der Böden hinsichtlich der Umweltverträglichkeit Einsatz finden können, liegt die zur Verfügung stehende Menge an Böden und Recyclingmaterialien, die zur Nutzung der erarbeiteten Forschungsergebnisse in Frage kommen, in der Größenordnung von ca. 1 Mio. Tonnen pro Jahr.

Recycling-Baustoffe werden durch Zerkleinerung mit Backen- und/oder Prallbrecher, Sortierung und Klassierung in Korngrößenabgestuften Mineralstoffgemische aufbereitet. Für den Wegebau sowie der Garten- und Landschaftsbau werden aufgrund geringerer Schichtdecken Mineralgemische mit kleineren Korngrößen bevorzugt (0/8 mm und 0/32 mm). Je nach Herkunft, technischen Anforderungen für die Verwendung und der eingesetzten Verfahrenstechnik unterscheiden sich die Recycling-Baustoffe in ihrer Zusammensetzung. Die Hauptbestandteile können Naturstein, Beton und Mauerwerksbaustoffe wie Ziegel und Mörtel sein.

Am 25. Juli 2005 hat die Bundesregierung die Deponieverwertungsverordnung erlassen [DepVerwV-2005]. Somit dürfen auf einer Deponie nur solche Abfälle Verwendung finden, die nachweislich als Baumaterial eingesetzt werden. Randbedingungen zum Einsatz von Böden/Bauschutt zur Modellierung von Deponieoberflächen werden mit der Verordnung streng eingegrenzt, so dass die Menge der auf Deponien ausbringbaren Böden bzw. Recyclingmaterialien erheblich reduziert wurde. Mit der Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts vom 27. April 2009 (DepV-2009) wurden die Bedingungen der Aufbringung des Materials nochmals neu geregelt und verschärft, d. h. neue innovative Verwertungen für Böden und RC-Material in neuen Baustoffsystemen müssen aufgezeigt werden.

## **4.2 Geotextilien und deren Einsatz**

Die ersten Geotextilien wurden in Deutschland 1965/75 versuchsweise eingebaut. Die Skepsis war groß [Schmalz-2003]. Heute ist die Verwendung von Geotextilien und Geomembranen, häufig auch Geokunststoffe genannt, bei Straßen-, Eisenbahn- und Wasserbau eine Selbstverständlichkeit, auf die aus Kostengründen nicht mehr verzichtet werden kann.

Laut DIN EN 13251/A1 sind Geotextilien „ein in Kontakt mit dem Boden und anderen Baustoffen im Bauwesen verwendetes wasser- und luftdurchlässiges textiles Flächengebilde“. Sie werden zum Bewehren, Trennen, Filtern, Dränen, Schützen und Verpacken im Garten-, Landschafts-, Straßen-, Wasser- und Tiefbau verwendet [DIN-2004].

Aufgrund der meist hohen Anforderungen an die Langzeitbeständigkeit werden Geotextilien vorwiegend aus Elastomeren oder Polymeren, wie Polypropylen, Polyethylen, Polyacrylnitril, Polyamid, Polyvinylchlorid und Polyester hergestellt. Die Langzeitbeständigkeit der einzelnen Rohstoffe kann durch den Einsatz von Stabilisatoren verbessert werden, und mit zunehmender Faserdicke nimmt außerdem die Schädigungsmöglichkeit ab [Murray-2004, Saathoff-2004]. Geotextilanwendungen ersetzen und ergänzen früher übliche Bauweisen, bei denen mineralische Baustoffe verwendet wurden. Aufwändige konstruktive Maßnahmen, ein Bodenaustausch oder der Einbau einer zusätzlichen Bodenschicht können durch den Einsatz von Geotextilien vermieden werden. Für diese Geofasern wurden folgendes Anspruchsprofil formuliert [Schnegelsberg-1999]: Geofasern sollen mengenmäßig technisch herstellbar oder natürlich in ausreichenden Mengen erschließbar sein, sie sollen für den Einsatz wirtschaftlich günstiger sein, die Fasern sollen umweltverträglich sein, die Fasern müssen einen den Feinbestandteilen des Bodens angeglichene Feinheit haben und zwischen Faser und Lockermaterial muss sich ein Verbundsystem bilden können, dass die Baugrundfestigkeit und das Bodenverformungsvermögen nachhaltig positiv beeinflusst. Gleiche Anforderungen stehen auch für eine Bewehrung mit losen Fasern. Die weitere Expansion technischer Textilien, insbesondere bei Geo-, Agrar-, Bau- und Schutztextilien, basiert auf der Schaffung von Systemlösungen für verschiedene Einsatzgebiete [Dummis-2002, Göbel-2002, Saathoff-1994].

Von den derzeitigen Anwendungsgebieten der Geotextilien nehmen der Erosionsschutz und das Verstärken/Schützen einen Anteil von ca. 35 % ein. Dabei werden vorrangig Geokunststoffe und Verbundstoffe mit dreidimensionaler Struktur im Bereich des Erosionsschutzes verwendet. Ca. 74 % der insgesamt in Europa eingesetzten Geotextilien werden in Form von Vliesstoffen eingesetzt [Zanzinger-2001]. Ein Einsatzgebiet der Boden-Faser-Gemische kann ebenfalls dieser Bereich als Ersatz bzw. Ergänzung zu den Geotextilien sein.

### **4.3 Fasern für die Bewehrung einer Baustoffmatrix aus feinkörnigen Recyclingmaterial bzw. Erdaushub**

#### **4.3.1 Naturfasern**

Eine natürliche Rohstoffbasis für Fasern und Geotextilien sind verrottbare Naturstoffe wie Flachs, Hanf, Jute oder Kokos. Diese Naturfasern weisen nur eine begrenzte Verrottungsstabilität in der Bodenmatrix auf und werden deshalb dort eingesetzt, wo nur zeitlich begrenzte Bewehrungen erforderlich sind. Aus diesem Grund finden sie im Bereich der Geo- und Agrartextilien bisher nur in speziellen Einsatzfällen Anwendung (z. B. zum Schutz in der Anwachsphase von zu begrünenden Flächen oder Böschungen und bei ummantelten Dränrohren).

Für Geotextilien aus Naturfasern als Erosionsschutz für Neupflanzungen an Problemlagen (Begrünungsmatten) zum Schutz der Ansaat bzw. der jungen Pflanzen finden z. B. Jute, Kokosgewirke und Kokos-Stroh-Gemische erfolgreich Verwendung. Dabei weist die bereits gut untersuchte Kokosfaser eine für Naturfasern relativ hohe mechanische Festigkeit auf und verrottet nur verhältnismäßig langsam (ca. 5 Jahre) in der Bodenmatrix. In lehm- und zementhaltigen Mörteln werden Naturfasern (Hanf, Flachs, Sisal, Kokos) als Bewehrungsfasern bereits eingesetzt und als Granulat oder Pellets der Mischung zugegeben [Lützkendorf-2003, Patent-2002, Mieck-1995, Reußmann-2003, Schmalz-1999]. Die Verwendung von Produkten aus Flachs-

/Hanffasern im Boden sind mehr diskutiert als realisiert worden. Im Hanfbereich wurden in bisherigen Untersuchungen vornehmlich die Eigenschaften, z. B. von Hanfnadelfilzen mit dem potenziellen Einsatzgebiet des Erd- und Wasserbaus am nicht eingebauten Produkt untersucht. Ergebnisse haben gezeigt, dass Hanfnadelfilze durch Mischung mit z. B. Woll- oder Polypropylenfasern zum Teil die hohen Anforderungen an Textilien für den allgemeinen Erdbau erfüllen [Lützkendorf-2003, Mieck-2000, Müssig-2005].

Zurzeit im Fokus stehende Fasern, wie Bambus- und Sisalfasern, zeichnen sich durch eine hohe Verrottungsbeständigkeit in der Bodenmatrix aus. Diese Fasern stellen natürliche Produkte dar und sind somit ökologisch vollständig unbedenklich. Gleichzeitig weisen diese Fasern gute mechanische und morphologische Eigenschaften auf. Nachfolgend sind einige Bambuseigenschaften zusammengestellt:

- hohe Zugfestigkeit: 260 bis 270 N/mm<sup>2</sup> bis 400 N/mm<sup>2</sup>
- hohe Biegefestigkeit: bis 240 MPa
- hohe Elastizität: 9 bis 10 % Bruchdehnung
- durch Längsspaltung lange Faserbündel erzielbar
- geringe Wasseraufnahmen und damit kaum quellend
- chemisch neutral und alkalibeständig
- hoher Entflammungswiderstand



Bild 1 Bambusfasern

Die Bambusfaser ist zunehmend als Bewehrungsfaser in Beton und Kunststoff erfolgreich in Anwendung, wobei sie die Glasfaser substituiert. Für die Faserbewehrung von Böden und den avisierten Einsatz im Bereich des Böschungsbaus und der Böschungssicherung stellen diese verrottungsbeständigen Naturfasern eine ideale Basis dar. Voraussetzung dafür ist, dass durch die Faserverteilung und den Faser-Bodenverbund, was im Projekt nachzuweisen war, die Eigenschaften der Ausgangsmaterialien erheblich verbessert werden können.

Zum jetzigen Zeitpunkt werden Naturfasern zur Bodenbewehrung meist nicht direkt, sondern nur in Form von Textilien eingesetzt. Bei den Recherchen zu Einsatzgebieten von Naturfasern, die insbesondere direkt zur Bodenstabilisierung (Verbesserung bodenmechanischer Eigenschaften) oder Verhinderung der Rissausbreitung (Bewehrung) eingesetzt werden, konnte für Vergleiche lediglich die Arbeit von

[Rodatz-1994] ermittelt werden, die allerdings nur die Einmischung von Kunststofffasern in Böden betrachtet.

### **4.3.2 Fasern aus biologisch abbaubaren Kunststoffen**

In der jüngeren Vergangenheit wurden auf Basis von Polylactid Fasermaterialien entwickelt, die grundsätzlich für den geplanten Einsatzfall (Bewehrung und Verhinderung der Ausbreitung von Rissen in Bodenmaterialien) einsetzbar sind [Koch-2003, Raininger-2003]. Polylactid ist ein Polyester auf Basis von Milchsäure und biologisch abbaubar; ebenso wie Polyvinylalkohol (PVA), welches ebenfalls als Faser in der Bodenmechanik (Dichtwände) einsetzbar ist [Preiß-2004].

Ein großes Einsatzgebiet von PLA sind Verpackungen. Dabei werden neben der biologischen Abbaubarkeit insbesondere die Eigenschaften Aromaresistenz, Öl- und Fettbeständigkeit sowie Wasserdampf- und Sauerstoffdurchlässigkeit von PLA genutzt. Beispiele für Verpackungen aus PLA sind Folien, die auch heißversiegelt werden können, Schalen, Behälter, Blister, Ölfaschen, Flaschen für Milch und Fenstertüten für Backwaren.

Das zweite große Anwendungsgebiet von PLA sind die Fasern. Hier bietet PLA insbesondere Vorteile bei den Feuchtigkeitstransporteigenschaften und der Stabilität der Fasern. Beispiele für den Einsatz von PLA-Fasern sind Bekleidungsstoffe, insbesondere Sportkleidung, Füllung für Kissen, Deckbetten, Matratzenauflagen und Teppiche. In Europa werden etwa 70 % des PLA im Verpackungsbereich eingesetzt. Davon gehen etwa 55 bis 60 % in Thermoformanwendungen und ca. 40 bis 45 % in Folienanwendungen. In Asien sieht die Verteilung ähnlich aus, dagegen gehen in den USA ca. 50 % des PLA in Faseranwendungen ein [Klein-2003].

In dem IGF-Vorhaben 15494 BG, das diesem Projekt vorgelagert war, wurden die PLA-Elemente zur Faserbewehrung entwickelt.

PLA hat eine geringere Dichte als Naturfasern, daher können Stoffe mit geringeren Flächengewichten erzeugt werden. Die Festigkeit von PLA ist höher als die von den meisten Naturfasern und das Rückstellverhalten ist besser als das aller anderen betrachteten Fasern. PLA-Faserelemente sind also auch für Anwendungen geeignet, bei denen das Material stark beansprucht wird. Durch den geringen Feuchtigkeitsgehalt in den PLA-Faserelementen wird ein hydrolytischer Abbau des Werkstoffs vermieden.



Bild 2 PLA-Element Nr. 6

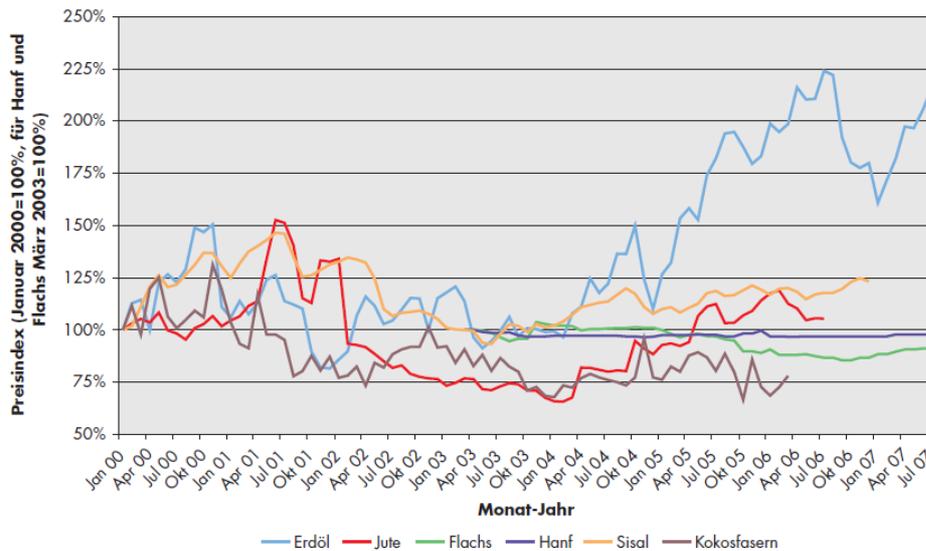
Herausragende Eigenschaften zeigt PLA bei der Beständigkeit gegen UV-Licht. Hierbei übertrifft PLA sogar PET und Wolle. Durch den niedrigen Brechungsindex von PLA zeigt die Faser nach der Einfärbung besonders intensive Farben. Der niedrige Benetzungswinkel, verglichen mit PET, zeigt die besseren Eigenschaften im Feuchtigkeitstransport. PLA gibt Feuchtigkeit schneller ab als PET. Tests zeigen, dass sich PLA hinsichtlich des Feuchtigkeitstransports sich ähnlich verhält wie die atmungsaktive Polyester-Faser Coolmax® [Agarwal-2002]. Die generelle Verarbeitung von PLA und medizinische Anwendung wie das Tissue Engineering sind zurzeit Gegenstand von wissenschaftlichen Arbeiten [Gupta-2007, Lim-2008]. Es ist zu prüfen, wie die beschriebenen Eigenschaften für verschiedene Anwendungen genutzt werden können und Vorteile für eine Bewehrung einer Bodenmatrix mit sich bringen.

#### 4.3.3 Preisentwicklung von Fasermaterialien

In Bild 3 ist die Preisentwicklung von Fasermaterialien auf Basis von nachwachsenden und erdölbasierten Rohstoffen dargestellt.

Das Preisniveau der Naturfasern ist im Vergleich zu erdölbasierten Fasern in den letzten Jahren weitgehend konstant geblieben. In den nächsten Jahren ist mit weiter steigenden Erdölpreisen zu rechnen. Daher ist der Einsatz von Naturfasern und Fasern basierend auf nachwachsenden Rohstoffen im Vergleich mit der im Projekt untersuchten PLA auch wirtschaftlich zu betrachten.

Möglicherweise stellen auch Kombinationen aus Natur- und Kunststofffasern (PLA-Fasern) eine Lösung hierfür dar. Dazu sind weiterführende Untersuchungen zwingend erforderlich.



Grafik: Nova-Institut

Bild 3 Preisentwicklung von Naturfasern und Erdöl von 2000 bis 2007 [Carus-2008].

#### 4.4 Auswahl geeigneter Recyclingbaustoffe und Aushubböden

Für die Faserbewehrung eignen sich vorrangig feinkörnige Recyclingbaustoffe. Bei der Bauschutttaufbereitung fallen häufig Absiebungen von 0 bis 4 mm, 0 bis 8 mm, 0 bis 16 mm und 0 bis 32 mm an. Diese Recyclingbaustoffe enthalten meist einen hohen Anteil an Feinstkorn und bindige Anteile. Die Verwertung dieser minderwertigen Baustoffe stellt für die Recycling-Unternehmen häufig ein Problem dar. Meist finden diese Baustoffe bisher nur in Geländeregulierungsmaßnahmen oder an Lärmschutzwällen Anwendung.

Im Bereich des Bodenaushubs stellt die Verwertung bindiger Aushubböden aufgrund der schlechten Verdichtbarkeit dieser Materialien ein Problem dar. Deshalb wurden in der Vergangenheit verschiedene Bodenstabilisierungs- und -verfestigungsverfahren entwickelt und damit für diese Baumaterialien neue Anwendungsfelder, z. B. im Straßen- und Wegebau, eröffnet. Dadurch konnte die Verwertung dieser bindigen Böden verbessert werden, trotzdem fehlen weitere geeignete Anwendungen für diese Bauabfälle, die in großem Umfang anfallen.

Im Projekt wurde in Erstuntersuchungen die Absiebung 0/32 mm des Recyclingmaterials aus der Bauschutttaufbereitungsanlage sowie feinkörnige Aushubböden, insbesondere mit bindigem Anteil, auf eine mögliche Faserbewehrung hin untersucht, um damit die Verwertung dieser Bauabfälle zu verbessern und in höherwertigeren Anwendungen zu realisieren.

Außerdem bilden diese Materialien aufgrund ihrer Zusammensetzungen und Korngrößenverteilungen die Grundvoraussetzung (geringer Porenanteil, hohe Schüttdichte) für eine wirksame Faserbewehrung. Zur Erhöhung des Faser-Boden-Verbundes in der Matrix können geeignete Misch- und Einbauverfahren sowie die Zugabe geeigneter natürlicher Zusatzstoffe beitragen. Hier werden einerseits die Erfahrungen aus der Bodenstabilisierung und -verfestigung und andererseits die Erfahrungen des FITR bei der Entwicklung selbstverdichtender, fließfähiger Verfüllmaterialien mit herangezogen.

#### 4.5 Einsatzgebiet für faserbewehrte Baustoffe auf Basis feinkörniger Recyclingbaustoffe und Aushubböden

Die Einsatzgebiete der neuen faserbewehrten Baustoffe sind vielfältig. Neben möglichen Anwendungen im Unterbau von Straßen, Wegen und Sportstätten werden im Forschungsprojekt zunächst der Einsatz im:

- Straßen-/Wasserbau im Böschungsbau und zur Böschungssicherung (s. Bild 4) und
- Deichbau zur Stabilisierung von Deichkörpern untersucht.

Bei Böschungen handelt es sich um geneigte, künstlich hergestellte Geländeoberflächen, deren Standsicherheit durch den Bodenreibungswinkel und die sich in den Böschungen z. B. aus Gewicht, Belastung sowie Kohäsion ergebenden Kräfte bestimmt werden.

Ein Böschungsbruch wird durch zu große Böschungswinkel oder -höhen, Belastungen oberhalb der Böschung, Erschütterungen, Veränderungen der Wasserverhältnisse und insbesondere durch zu geringe Scherfestigkeit des Bodens ausgelöst (vgl. Bild 4). Wenn durch äußere Kräfte verursachte Schubspannungen in der Gleitfläche die Scherfestigkeit des Bodens an diesem Ort überschreiten, dann folgt ein Böschungsbruch, d. h. der Bruch im Hang entsteht jeweils in der Zone der geringsten Scherfestigkeit. Die Scherfestigkeit ist der Maximalwert der Schubspannung in der Bruchfläche und wird durch den Reibungswinkel und die Kohäsion eines Materials beschrieben. Solche Schwächezonen der Scherfestigkeit bilden sich in der Natur meist an den Schichtgrenzen der Bodenprofile heraus [Feuerbach-2002].



Bild 4 Böschungsabbruch

Durch eine Faserbewehrung und die damit verbundene Verzahnung der Bodenmatrix kann die Scherfestigkeit eines Materials erheblich verbessert und somit der

Böschungsbruch verhindert bzw. größere Böschungswinkel und -höhen realisiert werden. Mit geeigneten Einbauverfahren können die Probleme bei der Sanierung von vorhandenen Böschungsbrüchen ausgeräumt und die Böschungsstabilität nach einer Sanierung insgesamt erhöht werden.

Auch der Deichbau stellt ein mögliches Einsatzgebiet dar. Im Deichbau können einerseits durch die Erhöhung der Scherfestigkeit der eingesetzten Materialien Deichbrüche verhindert und vorhandene Deichbaumaterialien u. U. wieder eingebaut werden und andererseits höhere Böschungen und damit möglicherweise höhere Deiche realisiert werden. Zudem nimmt die Menge der für den Deichbau geeigneten Böden kontinuierlich ab. Hier erschließt die Faserbewehrung ggf. auch die Möglichkeit, heute noch ungeeignete Böden zum Deichbau nutzbar zu machen. Der Aspekt der Umweltverträglichkeit von Recyclingbaustoffen in der Anwendung „Deichbau“ ist bereits im Fokus der Entwicklung [Mewis-2004]. Im Rahmen des hier beantragten Vorhabens sollen Ergebnisse, die in dem z. Zt. laufenden Vorhaben generiert werden, Berücksichtigung finden.

## 5 Materialauswahl, Materialaufbereitung und Materialcharakterisierung

### 5.1 Allgemeines

Es wurden unterschiedliche Fasern mit verschiedener Fasergeometrie und Böden bzw. Recyclingmaterialien mit unterschiedlicher Korngrößenverteilung, Kornform und Plastizität ausgewählt, entsprechend der erforderlichen Parameter charakterisiert und aufbereitet. Die Auswahl der Fasermaterialien erfolgte aus ökologischer, ökonomischer und bautechnischer Sicht, wobei vorrangig die Faserverfügbarkeit, die mechanischen Eigenschaften sowie die (soweit bekannte) Langzeitbeständigkeit Berücksichtigung fanden.

Danach wurden für weiterführende Betrachtungen und Untersuchungen folgende Fasern ausgewählt:

- Naturfasern: Sisal, Bambus, Flachsschäben; Abaca und Kokos zum Vergleich der Faserstrukturen
- biologisch abbaubare Kunststoff-Fasern (Strukturelemente): Polylactid (PLA)

Für Erstuntersuchungen zum Nachweis der möglichen Bewehrungsfunktion und der Langzeitbeständigkeit wurden folgende Böden bzw. Recyclingmaterialien einbezogen:

- Recyclingmaterial (0/32 mm) von der Deponie Erfurt-Schwerborn
- aufbereiteter feinkörniger Mutterboden (Bodenbörse Rams-la)
- örtlicher natürlicher Aushubboden (Tiefbau Weimar-Schöndorf)

Die Fasern und Böden wurden mit Standardmethoden charakterisiert. Die Ergebnisse der Untersuchungen werden nachfolgend beschrieben.

## 5.2 Fasern

### 5.2.1 Naturfasern

**Jute** (Bastfaserbündel aus den Stängeln von *Corchorus sp.*), **Hanf** (Bastfaserbündel aus den Stängeln von *Canabis sativa*) und **Ramie** (isolierte Bastfasern aus den Stängeln von *Boehmeria nivea*) gehören ebenso wie **Flachs** zur Gruppe der Bastfasern, **Sisal** (Gefäßbündel oder Bastfaserstränge aus den Blättern von *Agava sisalana*), **Abaca** (auch Manilahanf gen., Faser a. d. Blattscheiden (Unterblattfaser) von *Musa textilis*) und **Kokos** (Gefäßbündel und faserige Fruchtrinde der Nuss von *Cocos nucifera*) werden den Hartfasern zugeordnet. Diese Fasern, die seit langem vom Menschen genutzt werden, wurden zuerst von der Baumwolle, dann von den aufkommenden Chemiefasern in ihrer Bedeutung zurückgedrängt. Heute wird ihnen als wichtige Gruppe nachwachsender Rohstoffe wieder zunehmend Bedeutung beigemessen.

Für den Einsatz von Naturfasern in technischen Bereichen sind Dichte, Zugfestigkeit, Dehnung sowie E-Modul von großer Bedeutung. Die Bestimmung dieser Eigenschaften ist bei den komplex aufgebauten Naturfasern mit Schwierigkeiten behaftet, was die extrem breite Streuung der in der Literatur angegebenen Werte widerspiegelt, z. B. Festigkeiten zwischen 150-1100 N/mm<sup>2</sup>, E-Moduln zwischen 7-90 N/mm<sup>2</sup> und Dehnungen zwischen 1-8 % (für Kokos sogar bis 40 %). Bei der Dichte sind Werte zwischen 1,02 und 1,80 g/cm<sup>3</sup> zu finden. Nachfolgende Eigenschaften für Naturfasern wurden nach umfassenden Literaturrecherchen zusammengestellt.

Faser	Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	Zugfestigkeit (N/mm <sup>2</sup> )	E-Modul (N/mm <sup>2</sup> )	Bruchdehnung (%)	Durchmesser (mm)	Länge (mm)
Kokos	1,12 - 1,15	120 - 255	19.000 - 26.000	10 - 40	0,1 - 0,4	50 - 450
Jute	1,02 - 1,45	250 - 540	26.000 - 45.000	1,5 - 1,9	0,1 - 0,2	180 - 300
Flachs	1,5	1.110	90.000	1,8 - 3,0	0,1 - 0,4	500
Bambus	1,5	350 - 500	33.000 - 40.000	9 - 10	0,05 - 0,4	k. A.
Sisal	1,4 - 1,8	568 - 855	13.000 - 38.000	3 - 5	0,05 - 0,2	600 - 1000
Abaca	1,35 - 1,5	529 - 754	7.000 - 20.800	8	0,08 - 0,25	2 - 12
Ramie	1,43 - 1,55	585	33.000	2,4 - 3,0	0,01 - 0,03	60 - 260

Tabelle 1 Eigenschaften ausgewählter Naturfasern (Zusammenstellung nach [Scholz-2004], ergänzt)

**Flachsschäben:** Die Lein- oder Flachsfaser wird aus den Stängeln des einjährigen Faserleins (*Linum usitatissimum*) gewonnen. Flachs ist eine der ältesten Kulturpflanzen der Erde und wird seit dem Neolithikum als Faser- und Ölpflanze genutzt. Der Ernteertrag der Einjahrespflanze Flachs beträgt durchschnittlich etwa 5 t pro Hektar, wobei etwa 1,85 t Holzsubstanz je Hektar erzeugt werden. Das eingebrachte Erntegewicht setzt sich wie folgt zusammen: Samen 14%, Kapselstreu und Schmutz 19 %, Röstverlust 16 %, geröstete Gesamtfaser 14 %, Schäben 37 %

(Barthel-1961]. Im Aufarbeitungsbetrieb fallen somit nur etwa 25 % Faserausbeute, aber 75 % Schäbenanteil an. Die großen Mengen der bei der Aufbereitung des Flachses anfallenden Schäben führten zu Überlegungen der technischen Verwendung. Neben der Verfeuerung in den Kesseln der Faserindustrie wurde auch die Verwertung des Flachs-Nebenproduktes zu Faserplatten versucht. Heute werden diese Schäben hauptsächlich zur Pferdeeinstreu genutzt. Schäben sind Bruchstücke des Holzzylinders der Flachspflanze. Der Holzzylinder ist sehr stark entwickelt und besteht aus dickwandigen, verholzten Zellen. Bei der mechanischen Aufbereitung des gerösteten und getrockneten Flachsstrohes, in deren Verlauf durch Knick-, Schwing- und Hechelprozesse die Faser vom verholzten Stängelteil getrennt wird, fallen die Schäben als Bruchstücke des Holzzylinders an und werden separiert [Barthel-1961]. In ihrer Gesamtheit stellen die Schäben, bedingt durch die verschiedenen Aufarbeitungsstufen, durch unterschiedliche Aufbereitungsverfahren und die Beschaffenheit des Flachsstängels selbst ein uneinheitliches Material dar. Die Holzsubstanz setzt allerdings durch ihre sehr kompakte Zellstruktur der chemischen Aufschließung und auch dem natürlichen biologischen Abbau im Boden großen Widerstand entgegen. Damit eignen sich die Flachsschäben für die Einmischung in die Rohböden, um diese zu stabilisieren. Erschwerend für den Transport größerer Mengen ist allerdings die niedrige Schütt-Rohdichte von nur  $110 \text{ kg/m}^3$  [Barthel-1961].

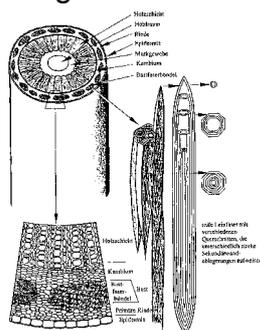


Bild 5 Aufbau und Struktur eines Flachsstängels [Flemming-1995]

**Bambusfasern:** Unter dem Begriff „Bambus“ werden alle baum- und strauchartigen Gräser mit einem ausdauernden, verholzten und außen verkieselten Stamm verstanden. Der lignifizierte Zellaufbau des Bambusgewebes und seine technischen Eigenschaften sind dem Holzgewebe sehr ähnlich. Traditionell wird Bambus als Baustoff, Nahrungsmittel oder in der Medizin eingesetzt. Beheimatet ist der Bambus in den subtropischen und tropischen Gebieten von Südostasien, Afrika und Amerika. Der Faseraufschluss ist ein technisches Verfahren zur Isolation der Fasern bzw. der Zellulose aus dem pflanzlichen Gewebe. Ziel des Aufschlusses ist es, unerwünschte Bestandteile (v. a. Lignin) und andere Begleitstoffe zu entfernen und die Elementarfaser aus den Faserbündeln herauszutrennen. Die Substanz der Teilstücke der Bambusstangen besteht zu 70 % aus Kohlehydraten wie Zellulose, zu 25 % aus Lignin und zu 5 % aus mineralischen Bestandteilen und Extrakten. Der Ligningehalt bestimmt die Druckfestigkeit und der hohe Zelluloseanteil die Zugfestigkeit. Flexibilität und Biegefestigkeit erreichen bei den Bambusfasern sehr gute Werte. Bambus weist je nach Bambusart einen Gehalt an Faserbestandteilen zwischen 30% und 50 % auf, die durch geeignete mechanische Faseraufschlussverfahren herausgelöst und als technisch nutzbare Fasern eingesetzt werden können. Das Bauen mit Bambus hat in den Verarbeitungsgebieten dieser Pflanzen eine uralte Tradition und bietet noch viele

ungenutzte Möglichkeiten, von denen die Verwendung der gebrochenen Bambusfasern als Bewehrungsfasern eine relativ neue technische Lösung darstellt. Die große Widerstandsfähigkeit und Zähigkeit von Bambus zeigt sich z. B. darin, daß Bambusstämme als Baumaterial mit einem Querschnitt von 12 cm<sup>2</sup> erst bei einer Zugbelastung von 24.000 kp reißen, während ein Baustahl von 1 cm<sup>2</sup> Querschnitt bereits bei einer Zugbelastung von 4.000 kp bricht. Das Bambusrohr ist ein Muster für pflanzliche Leichtbauweise. In der äußeren verkieselten Rindenschicht laufen axialparallel hochelastische Fasern mit einer Länge zwischen 0,6 bis 3,96 mm und einer Zugfestigkeit von bis zu 40 kp/mm<sup>2</sup>. Die Fasern werden durch das Zerschneiden der Bambusstämme gewonnen und als Armierung in Beton bereits seit mehreren Jahren werkstofftechnisch genutzt [Dunkelberg-1985].

**Sisalfasern:** Die Pflanze, aus der die Sisalfaser gewonnen wird, gehört zur Familie der Agavengewächse. Sie hat 1-2 m lange Blätter, die zur Festigung mit Fasersträngen durchzogen sind. Die Einzelfasern sind ca. 3 mm lang, ein Faserbündel kann jedoch einen Strang von 1-2 m Länge bilden [Flemming-1995]. Die Sisalgewächse stammen ursprünglich aus Mexiko und Belize (*Agava fourcroydes* = Silberagave od. Henequen), werden aber heute in guter Qualität hauptsächlich in Tansania und Kenia (*Agava sisalana*) angebaut. Der Faseraufschluss erfolgt maschinell durch Ausquetschen und Abschaben des Blattgewebes. Pro Stunde werden so bis 25.000 Blätter entfasert. Allerdings sind dabei Faserverlust und der Wasserverbrauch sehr hoch. Nach dem Waschen und Trocknen werden die Fasern durch maschinelles Abklopfen geschmeidig gemacht. Eine Konfektionierung kann dann über Schneidemaschinen erfolgen, da z. B. für das Fasermischgut Längen zwischen 20 und 30 mm benötigt werden. Für die Nutzung im Projekt „Faserboden“ ergab sich in Gesprächen mit dem Produzenten, dass minderwertige, gebräunte Qualitäten, die nicht zu Seilen oder Schnüren verarbeitet werden können und im Hauptproduktionsland Kenya in großer Zahl anfallen, einer Nutzung als Bewehrungsfasern zugeführt werden könnten.

**Abacafasern:** Die Abacafaser wird auch als Manilahanf bezeichnet. Dabei werden die festen, zähen, leichten und witterungsbeständigen Fasern aus den Blattscheiden der Banane *Musa textilis* gewonnen. Sie werden zu Tauen, Matten, Netzen und Seilen verarbeitet. Da die Verarbeitung sehr aufwendig ist, stehen diese Fasern nur in geringer Menge zur Verfügung [Franke-1994]. Daher wurde die Abacafaser aus ökonomischen Gründen nur zum Vergleich mit den Eigenschaften der verwendeten Fasern bei diesen Untersuchungen mit betrachtet.

**Kokosfasern:** Die Kokosfasern werden aus den faserigen Fruchthüllen (Mesokarp) der Kokosnuss gewonnen. Die Fasern des Festigungsgewebes sind in hohem Maße lignifiziert und haben nur einen geringen Anteil an Zellulose. Dadurch besitzen sie eine große Elastizität und Bruchfestigkeit. Aus der widerstandsfähigen Faser werden Matten, Seile, Besen, Bürsten u. v. a. Produkte hergestellt. In der Ingenieurbiologie finden grobe Matten, die aus Kokosfasern gewirkt sind, bereits seit vielen Jahren im Verbau flacher Hänge und Böschungen Anwendung [Franke-1994]. Die Matten werden flächig in Leinwandbindung mit verschiedenen Maschenweiten gewoben. Da die Kokosfaser aufgrund ihres hohen Ligningehaltes zu den sehr langsam abbaubaren Fasern gehört, haben diese Matten eine lange Lebensdauer. Hinzu kommt eine

ebenfalls vergleichsweise hohe Reißfestigkeit. Aufgrund dieser Eigenschaften werden für ingenieurblogische Sicherungsbauweisen Kokosgewebe immer dann eingesetzt, wenn der Zeitraum bis zur Stabilisierung der Böschung bzw. bis zur Übernahme der Erosionsfunktion durch die zusätzlich eingebrachte Vegetation, mehr als eine Vegetationsperiode beträgt.

In den folgenden Aufnahmen sind Proben der untersuchten Naturfasern dargestellt. Hierbei werden die Unterschiede der ausgewählten Materialien deutliche. Während die Flachsschäben, die Bambusfasern und auch die Kokosfasern relativ grobe Materialien aus den aufbereiteten Pflanzenteilen darstellen, weisen Sisal und Abaca feinere Strukturen auf. Besonders die Sisalfasern zeigen einen engen Verbund, der beim Einsatz in der Bewehrung der Bodenmatrices von großer Bedeutung ist.



Flachsschäben



Bambus



Sisal



Kokos



Abaca

Bild 6    Photographische Dokumentation der Naturfasern.

### 5.2.2 Herstellung der PLA-Strukturelemente (PLA-Fasern)

Zur Herstellung der biologisch abbaubaren Kunststoff-Fasern wurde als Werkstoff Polylactid (PLA) ausgewählt. Polylactid ist ein Polyester auf Basis von Milchsäure, aus

deren Lactid sie durch Ringöffnungspolymerisation hergestellt wird [Römpp-1992]. Polylactid ist als Polyhydroxycarbonsäure biologisch abbaubar.

In Bild ist die chemische Struktur des PLA-Moleküls dargestellt.

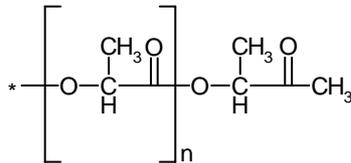


Bild 7 Chemische Struktur von Polylactid (PLA).

PLA kann zu einer Molekülmasse von 60.000 bis 200.000 g mol<sup>-1</sup> polymerisiert werden. Je nach räumlicher Struktur der Milchsäure liegen D- bzw. L-Isomere des PLA oder auch Mischformen vor. Die biologische Abbaubarkeit des PLA kann von wenigen Wochen bis hin zu mehreren Jahren eingestellt werden. Je kristalliner das PLA ist, desto schwieriger ist der biologische Abbau. PLA wird biologisch abgebaut, indem Wassermoleküle in die Struktur eindringen und die Esterbindung hydrolytisch spalten. Die entstehenden Moleküle werden dann von Mikroorganismen zu Wasser und Kohlendioxid zersetzt. Durch Copolymerisation, z. B. mit Glycolsäuren, ergibt sich für die PLA-Werkstoffe ein weites Anwendungsspektrum. Im Jahr 2002 wurde die erste großtechnische Anlage zur Herstellung von PLA, mit einer Kapazität von 140.000 Jahrestonnen, in Blair (Nebraska, USA) von den Unternehmen Cargill und Teijin in Betrieb genommen. Weitere Anlagen stehen mittlerweile in den Niederlanden, in Japan und China. Zu den Eigenschaften von PLA sowie PLA-Copolymeren gehören die hohe Festigkeit sowie die Transparenz. PLA und PLA-Blends besitzen ein großes Potenzial bei Verpackungsfolien und Tiefziehprodukten. Interessant sind Schrauben, Nägel, Implantate und Platten zur Stabilisierung von Knochenbrüchen, die vom menschlichen Körper resorbiert werden [Oberbach-2001, Hermann-2009].

Zur Herstellung der PLA-Strukturelemente (PLA-Fasern) wurde ein Material des Unternehmens Nature Works (PLA Polymer 2002D) verwendet und von der am PBA beteiligten FKUR Kunststoff GmbH (Willich, Deutschland) bereitgestellt. Das Polylactid wurde mit einem Brabender Plasticorder zunächst zu einem Extrusions-Endlosprofil verarbeitet und aus diesem anschließend unterschiedliche Strukturen angefertigt. Die Rund- und Flachprofile wurden durch Ablängen der Endlosprofile hergestellt. Zur Herstellung der Spiralstrukturen wurden die Rundprofile in der gewünschten Geometrie ausgeformt und die Struktur anschließend durch Tempern im Wärmeschrank und Abkühlung an der Raumluft fixiert.

In Tabelle 2 sind die hergestellten Strukturelemente und deren Abmessungen zusammengestellt:

Kennzeichnung		Abmessungen des Strukturelements				Grundelement gefertigt als Extrusions-Endlosprofil					
Strukturelement Nr.	Strukturelement Typ	Durchmesser [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Länge [mm]	Steigung	Werkstoff	Typ	Durchmesser [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]
1	Rundstab	1	-	-	25	-	PLA	Rundprofil	1	-	-
2	Rundstab	1	-	-	50	-	PLA	Rundprofil	1	-	-
3	Flachstab	-	6,5	0,35	25	-	PLA	Flachprofil	-	6,5	0,35
4	Flachstab	-	6,5	0,35	50	-	PLA	Flachprofil	-	6,5	0,35
5	Spirale	10	-	-	25	fein	PLA	Rundprofil	1	-	-
6	Spirale	10	-	-	25	grob	PLA	Rundprofil	1	-	-
7	Spirale	10	-	-	50	fein	PLA	Rundprofil	1	-	-
8	Spirale	10	-	-	50	grob	PLA	Rundprofil	1	-	-
9	Spirale	20	-	-	25	fein	PLA	Rundprofil	1	-	-
10	Spirale	20	-	-	25	grob	PLA	Rundprofil	1	-	-
11	Spirale	20	-	-	50	fein	PLA	Rundprofil	1	-	-
12	Spirale	20	-	-	20	grob	PLA	Rundprofil	1	-	-

Tabelle 2 Zusammenstellung der aus PLA hergestellten Strukturelemente

Bild 8 zeigt die fotografische Dokumentation der PLA-Strukturelemente. Die Nummerierung der Bilder entspricht der Nummerierung in Tabelle 2:



Nr. 1



Nr. 2



Nr. 3



Nr. 4



Nr. 5



Nr. 6



Nr. 7



Nr. 8



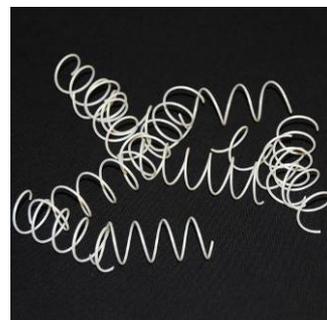
Nr. 9



Nr. 10



Nr. 11



Nr. 12

Bild 8 Fotografische Dokumentation der PLA-Strukturelemente.

### 5.2.3 Optische Analyse der Fasermaterialien

Die Fasermaterialien wurden mit unterschiedlichen optischen Analysemethoden in Bezug auf die Oberflächenstruktur untersucht. Anhand dieser Untersuchungen sollen die Wechselwirkung zwischen Faseroberfläche und Bewehrungswirkung ermöglicht werden.

Die folgenden Bilder zeigen Oberflächenaufnahmen, die mit einem Rasterelektronen-Mikroskop (Leo 1530, Carl Zeiss NTS GmbH, Oberkochen) gemacht wurden. Die Fasern wurden dafür auf einen Probenträger mit leitfähigem Kohlenstoffkleber präpariert und mit einer dünnen Gold-Palladium-Schicht besputtert.

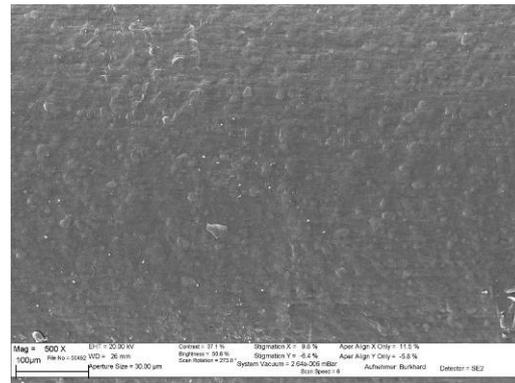
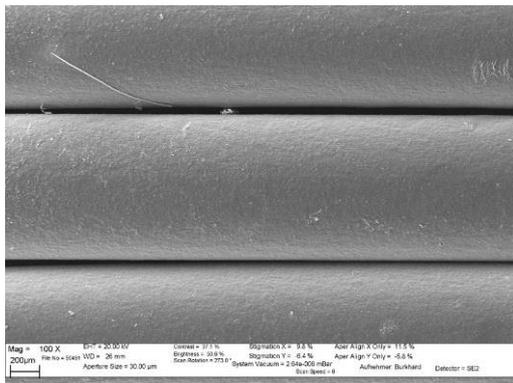


Bild 9 a/b Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen des PLA-Rundprofils (Nr. 1).

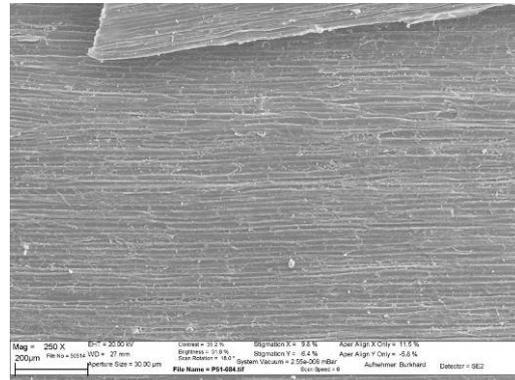
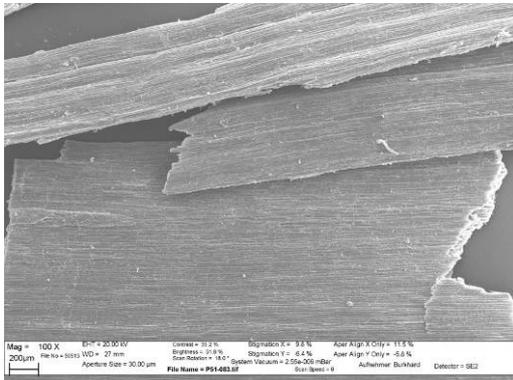


Bild 10 a/b Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen der Flachsschäben

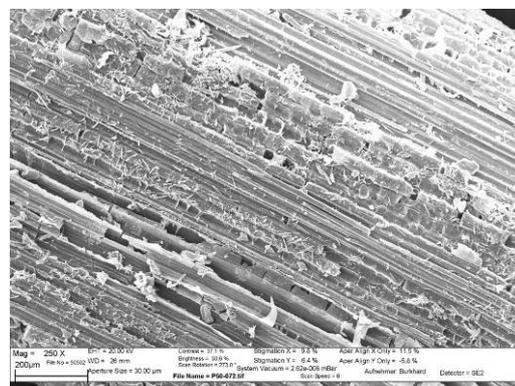
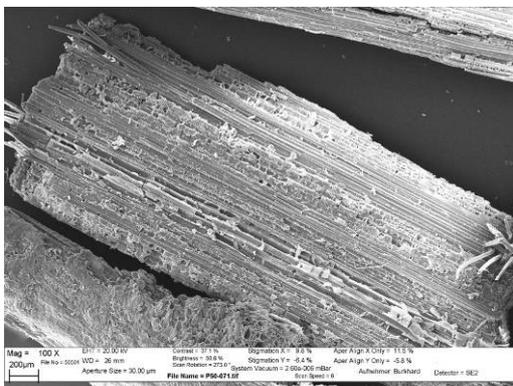


Bild 11 a/b Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen der Bambusfasern.

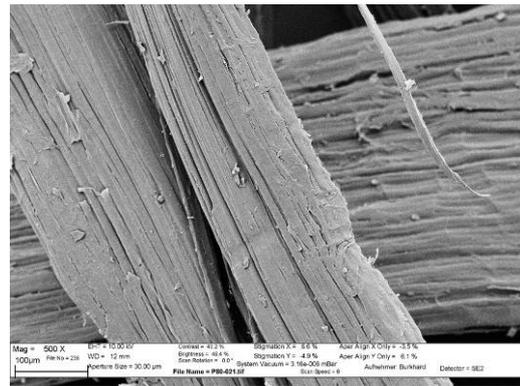
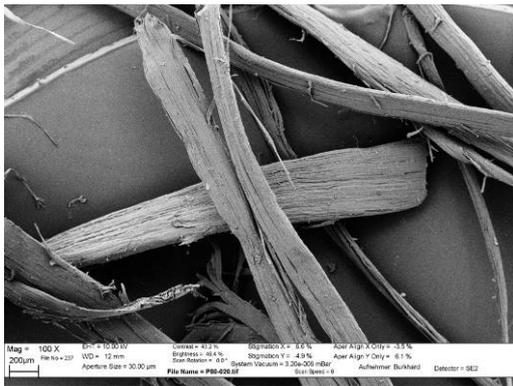


Bild 12 a/b Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Sisalfasern

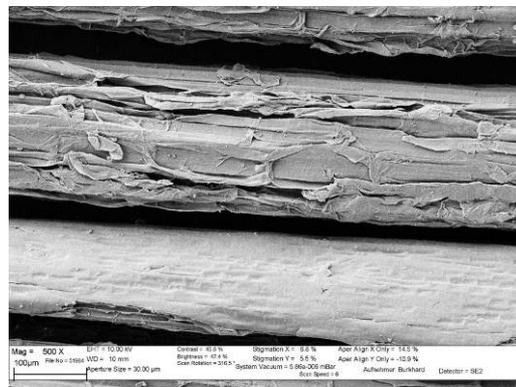


Bild 13 a/b Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Abacafasern

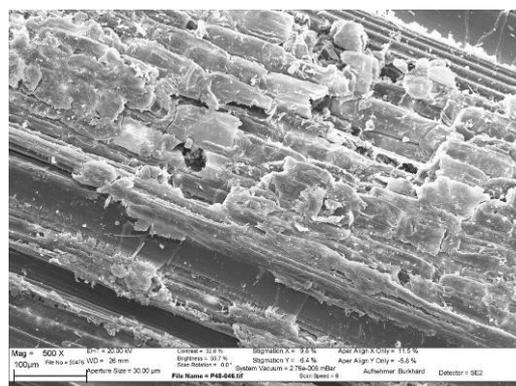
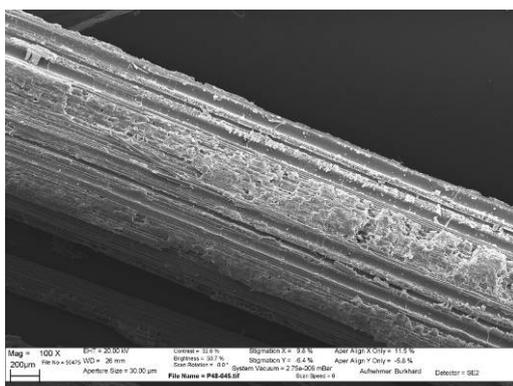


Bild 14 a/b Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Kokosfasern.

Die Proben zeigen unterschiedliche Oberflächenstrukturen. Die PLA-Strukturelemente und die Flachsschäben besitzen eine nahezu glatte Oberfläche. Die Mikroverhakung dieser Fasern im Boden ist eher unwahrscheinlich. Die Fasern Abaca, Bambus und Kokos besitzen raue bis poröse Oberflächen. Hier ist eine Mikroverankerung im Boden durch die Begünstigung der Anlagerung der Matrixpartikel denkbar. Die Sisalfaser ist hinsichtlich der Oberflächenbeschaffenheit zwischen den beiden Fasertypen anzusiedeln, zeigt jedoch eine intensive Verschlingung der Einzelfasern.

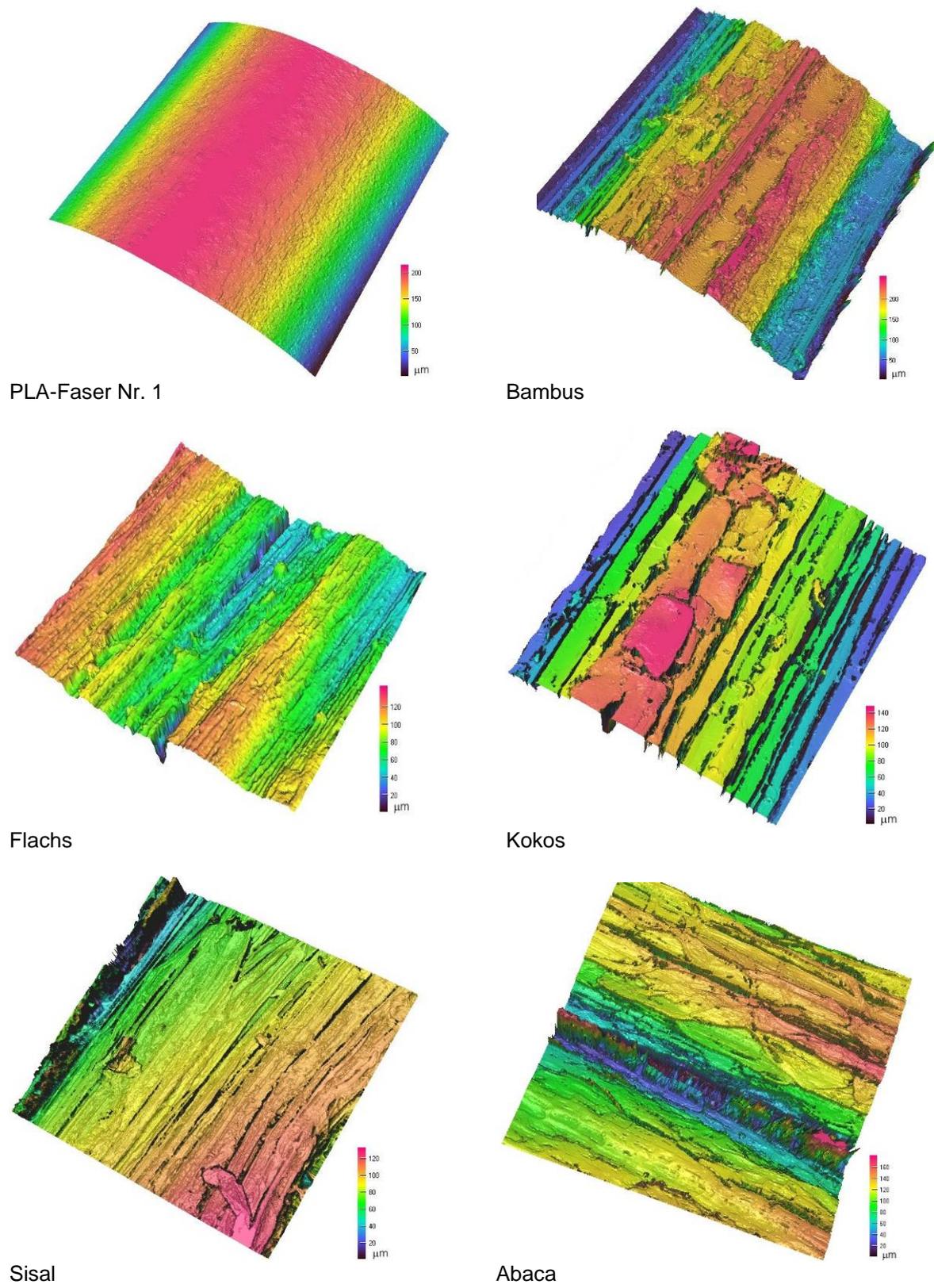


Bild 15 Oberflächenanalysen der PLA-Elemente (PLA-Faser) im Vergleich zu den Oberflächen der Naturfasern.

Um Oberflächeninformationen zur Homogenität und Höhenprofilierung zu erhalten, wurden ergänzend zu den Rasterelektronen-Mikroskop-Aufnahmen Analysen mit einem 3D-Weißlicht-Konfokal-Mikroskop ( $\mu$ surf, Nanofocus AG, Oberhausen) angefertigt. Die Fasern wurden einzeln vermessen und die konfokalen Daten als 3-D Bilder dargestellt (Bild 15).

Die PLA-Strukturelemente zeigen von allen verwendeten Materialien die glatteste Oberfläche. Die Höhendifferenzen auf der Oberfläche sind lediglich wenige Mikrometer hoch. Diese glatte Oberfläche ist durch den Herstellungsprozess bedingt. Der Schmelzmischprozess und die anschließende Extrusion zu Profilen führen zur Ausbildung eines glatten thermoplastischen Oberflächenfilms, der beim Abkühlen der Profile erhalten bleibt.

Die Naturfasern zeigen eine grundsätzlich andere Oberflächenstruktur. Die Oberflächen sind stark strukturiert und von Vertiefungen durchzogen. Diese Vertiefungen messen bis zu 160 Mikrometer (Abaca). Die Sisalfasern und Flachsschäben haben im Vergleich zu den anderen Naturfasern die am wenigsten aufgerauten Oberflächen.

#### 5.2.4 Wasseranteil der Fasermaterialien

Die Bestimmung des Wasseranteils der Fasern im Anlieferungszustand erfolgte durch Trocknung im Wärmeschrank (FEB 115L, Binder GmbH, Tuttlingen) bei 103 °C bis zur Gewichtskonstanz. In Bild 16 sind die Ergebnisse der Messungen dargestellt.

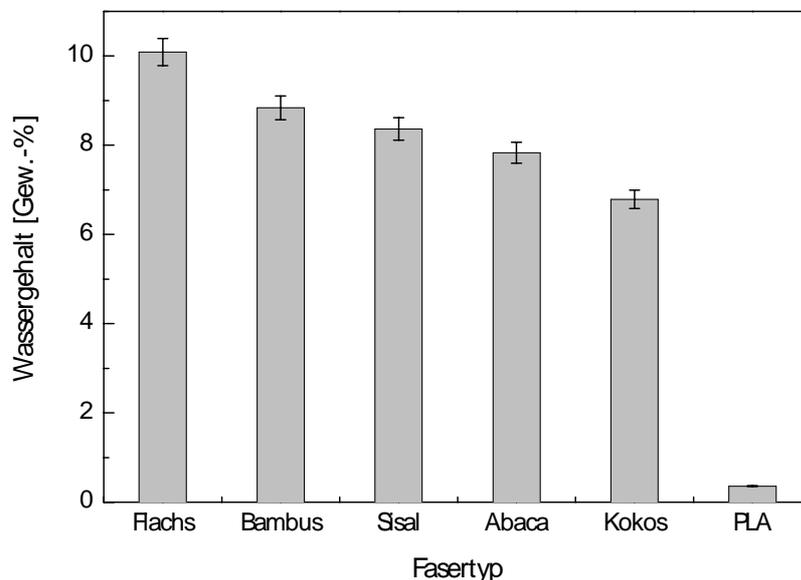


Bild 16 Wasseranteil der eingesetzten Fasermaterialien.

Die Flachsschäben haben mit 10 Gew.-% Wasser von den Naturfasern den höchsten Wassergehalt. Die Naturfasern liegen insgesamt in einem Bereich von 7 bis 10 Gew.-% Wassergehalt. Im Vergleich dazu hat die PLA-Faser mit 0,5 Gew.-% einen signifikant kleineren Wassergehalt.

## 5.2.5 Flüssigkeitsaufnahme der Fasern

Die Flüssigkeitsaufnahme der Fasern wurde mit einem Tensiometer (DCAT21, Dataphysics GmbH, Filderstadt) bestimmt. Dazu wurde eine definierte Fasermenge in den Probenkorb (Typ: Kontaktwinkelmessung) des Tensiometers eingewogen und anschließend in Abhängigkeit der Zeit die Gewichtszunahme der Fasern bestimmt. Die Aufnahme der Flüssigkeit erfolgt bei dieser Messung durch Kapillarkraft, so dass die aufgenommene Flüssigkeitsmenge ein Maß für die Saugfähigkeit der Faser darstellt. Als Testflüssigkeit wurde vollentsalztes Wasser (VE-Wasser) verwendet.

In Bild 17 ist die Flüssigkeitsaufnahme (auch als Lösungsmittelaufnahme bezeichnet) der Fasern in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Die massebezogene Lösungsmittelaufnahme  $L_m$  ist in Abhängigkeit der aufgenommenen Lösungsmittelmasse (Wassermasse)  $m_L$  und der Masse der trockenen Faser  $m_F$  definiert als:

$$L_m = \frac{m_L}{m_F}$$

Die Lösungsmittelaufnahme wird in Prozent angegeben.

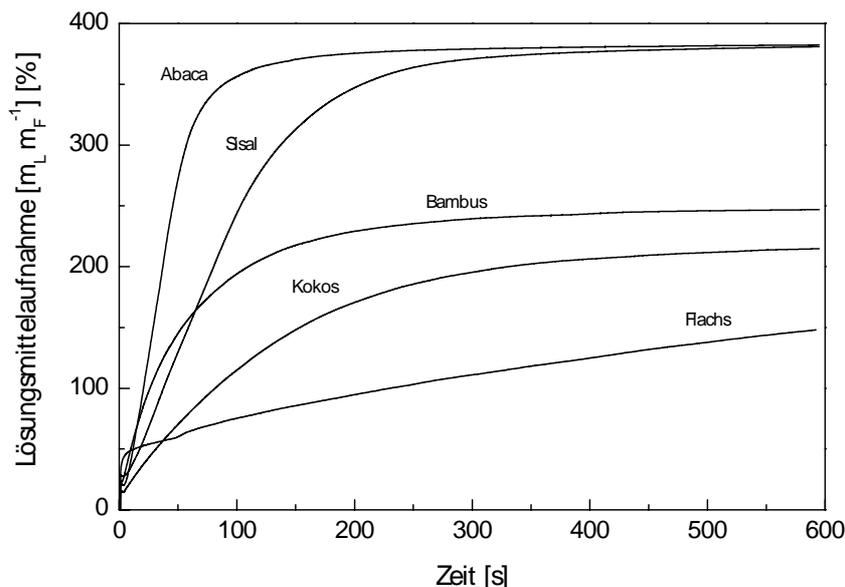


Bild 17 Lösungsmittelaufnahme (Wasser) der Fasermaterialien in Abhängigkeit der Zeit.

Alle Naturfasern nehmen innerhalb der Versuchszeit signifikanten Mengen an Wasser auf. Für die PLA-Faser konnte keine Wasseraufnahme festgestellt werden. Innerhalb der dargestellten 600 Sekunden haben die Flachsschäben den angestrebten Gleichgewichtszustand nicht erreicht. Dieser stellte sich mit einer Wasseraufnahme von 315 % erst nach einer Messdauer von 3.800 Sekunden ein.

Für den Einsatz der Fasern in der Bodenbewehrung kann die Flüssigkeitsaufnahme von Vorteil sein, da die Fasern im Boden einen zusätzlichen Flüssigkeitsspeicher darstellen. Inwieweit die Flüssigkeitsaufnahme der Fasern die mechanischen Eigenschaften des bewehrten Boden vermindert, sollte Gegenstand weiterer Untersuchungen sein, wobei sowohl die Einzelfaser als auch der bewehrte Boden betrachtet werden müssen.

## 5.2.6 Dichte der Fasermaterialien

Die Dichtebestimmung der Fasern erfolgt durch eine Messung im Helium-Gaspyknometer (Pycnomatic ATC, Porotec GmbH, Hofheim/Taunus). Da die Fasermaterialien porös sind und nicht überprüft werden kann, ob das Prüfgas (Helium) alle Poren der jeweiligen Materialien vollständig durchdringt, wird davon ausgegangen, dass mit der Messung die Rohdichte (scheinbare Dichte) der Materialien bestimmt wird, d. h. die Dichte des Faserskeletts mit Poren.

In Bild 18 sind die Ergebnisse der Messungen dargestellt.

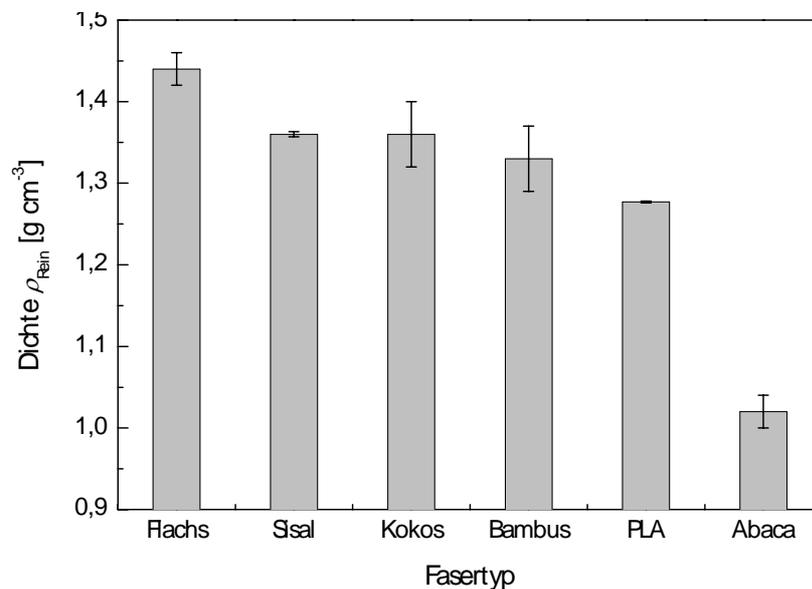


Bild 18 Dichte der eingesetzten Fasermaterialien.

Die Flachsschäben zeigen mit einer Dichte von  $1,43 \text{ g cm}^{-3}$  den höchsten Wert. Bis auf die Abaca-Faser mit einer deutlich geringeren Dichte von  $1,1 \text{ g cm}^{-3}$  liegen alle weiteren Fasern im Bereich von  $1,25$  bis  $1,35 \text{ g cm}^{-3}$ .

## 5.2.7 Prüfung der biologischen Abbaubarkeit der Fasern

Versuche zur Langzeitbeständigkeit wurden nach DIN EN 13432 „Verpackung - Anforderungen an die Verwertung von Verpackungen durch Kompostierung und biologischen Abbau - Prüfschema und Bewertungskriterien für die Einstufung von Verpackungen“ [DIN-2000] durchgeführt. Für diesen Test wurden die Faserproben mit Kompost in Kontakt gebracht, intensiv vermischt und bei  $50 \text{ °C}$  im Trockenschrank gelagert. Anschließend wurde die durch den biologischen Abbau freigesetzte Menge an Kohlendioxid in Abhängigkeit von der Versuchszeit bestimmt.

Als Referenzsubstanz wird dabei Cellulose eingesetzt. Cellulose gilt ab ca. 80 % freigesetzte Menge an Kohlendioxid, bezogen auf die theoretisch mögliche Menge, als komplett abgebaut. Die verbleibenden 20 % Kohlendioxid werden in karbonisierten Stoffwechselprodukten gespeichert, die sich nicht weiter biologisch abbauen. In Bild





**Bambus** 18.02.09



**Bambus** 14.04.09



**Bambus** 02.06.09



**Flachs** 27.01.09



**Flachs** 14.04.09



**Flachs** 02.06.09



**Kokos** 27.01.09



**Kokos** 14.04.09



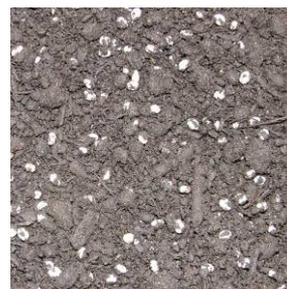
**Kokos** 02.06.09



**PLA-Granulat** 27.01.09



**PLA-Granulat** 14.04.09



**PLA-Granulat** 02.06.09



**Sisal** 18.02.09



**Sisal** 14.04.09



**Sisal** 02.06.09

Bild 20 Eingrabsversuche zur Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit der Fasern

Bei den Prüfbedingungen (50 °C, optimal befeuchtet) wurde mit dieser Untersuchung die maximale Biodegradation ermittelt. Die Fasern erreichen Werte von 41 Tagen (Sisal) bis 215 Tagen (Kokos). Da die Prüfbedingungen die realen Belastungen der Fasern nicht abbilden, wurde in Ergänzung zur oben beschriebenen Vorgehensweise noch eine zweite Prüfung durchgeführt. So ist es z. B. für die PLA-Faser bei Temperaturen um 20 °C für kurze Zeiträume (ca. 5 Jahre) kaum ein Abbau nachweisbar [Klauss-2004]. Ein merklicher Abbau findet nur unter Kompostierungsbedingungen im Temperaturbereich von 50 °C statt.

Die zweite Prüfung wurde als praxisnaher Eingrabversuch durchgeführt. Dazu wurden die Fasern in einen Kompost eingebracht und bei Raumtemperatur in abgedeckten Behältern gelagert. Die Behälter wurden regelmäßig durchmischt und befeuchtet. Die Veränderung der Fasern wurde qualitativ (Fotodokumentation) bewertet. In Bild 20 ist diese Fotodokumentation dargestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Verfügbarkeiten der Fasern sind die Untersuchungszeiträume nicht identisch, die maximale Lagerzeit betrug 100 Tage.

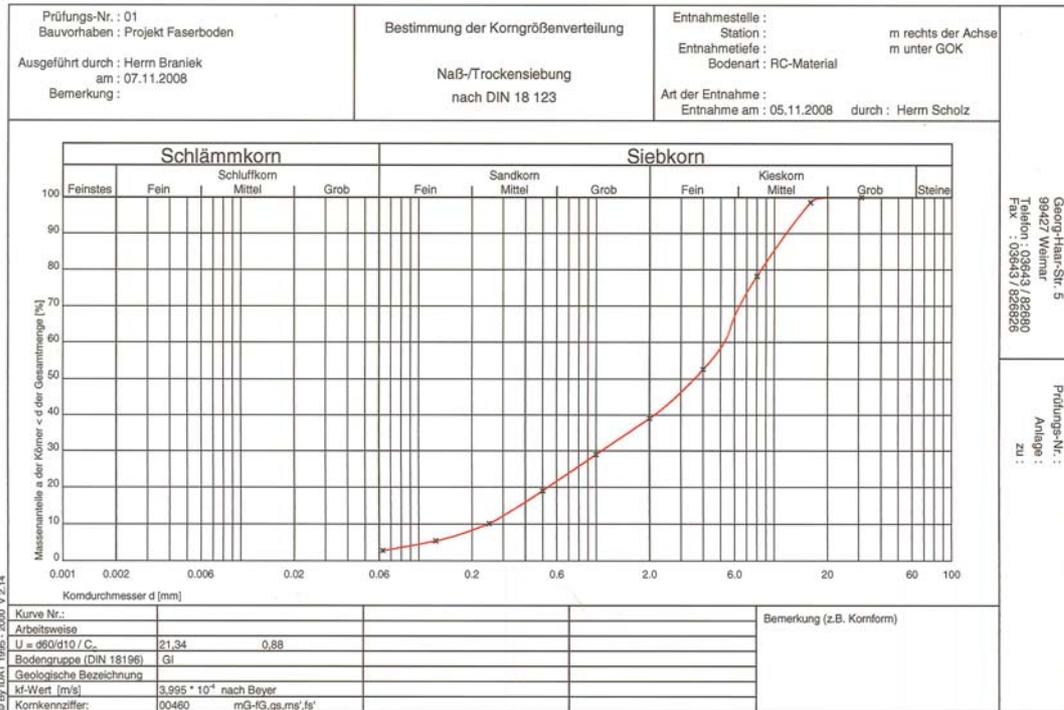
Im Eingrabversuch waren alle Fasern nach Ablauf der Lagerzeit noch nachweisbar. Die in Tabelle 3 aufgeführten Abbauzeiträume konnten somit im praxisnahen Eingrabversuch nicht bestätigt werden! Durch das Durchmischen von Fasern in den Boden wurden die beiden Materialien immer weiter homogenisiert, die Fasern waren aber immer noch komplett nachweisbar. Die in der Praxis erreichbare Zeit bis zu einem signifikanten Abbau der Fasern liegt somit wesentlich höher als über die Gleichungen in Tabelle 3 abgeschätzt. Es kann davon ausgegangen werden, dass alle Fasern mindestens zwei Vegetationsperioden für die Bewehrung zur Verfügung stehen.

### 5.3 Böden

**Recyclingmaterial (Boden 1):** Das RC-Material stammt aus der Recyclinganlage Erfurt-Schwerborn. Die Analysen in den Erstversuchen wurden mit einem Material der Körnung 0 - 32 mm (Bild 21) ausgeführt.



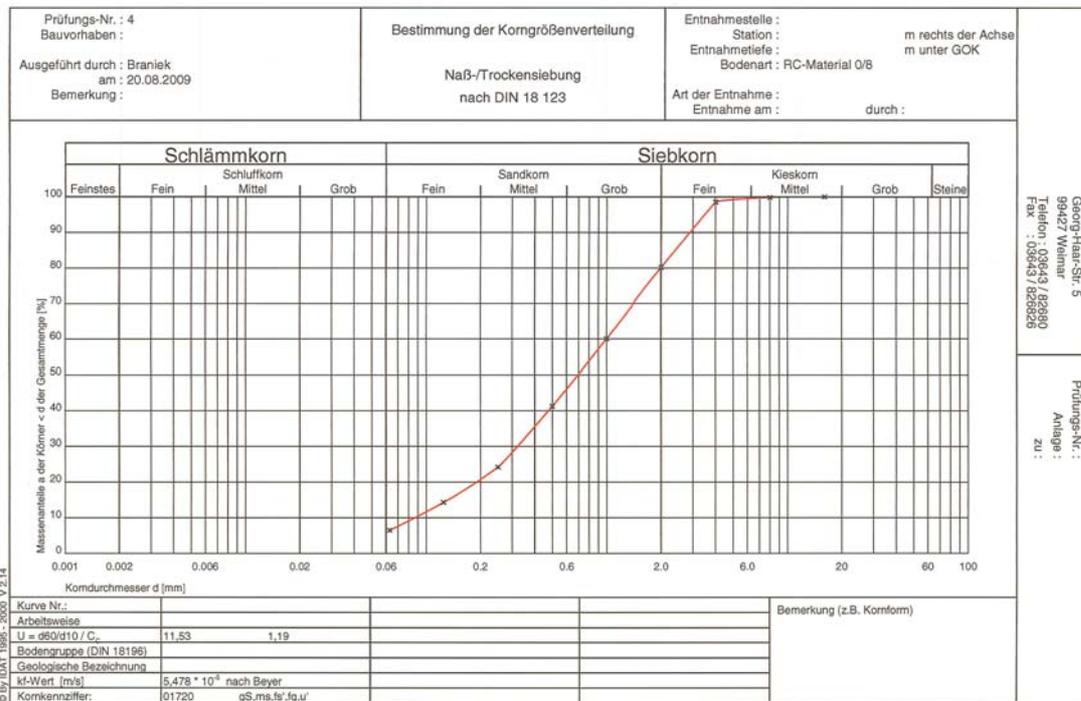
Bild 21 Trockenschalen mit RC-Material



Georg-Haar-Str. 5  
99427 Weimar  
Telefon: 03643 / 826990  
Fax: 03643 / 826928

Prüfungs-Nr.:  
Anlage:  
zu:

Bild 22 Korngrößenverteilungskurve des Recyclingmaterials 0-32 mm



Georg-Haar-Str. 5  
99427 Weimar  
Telefon: 03643 / 826990  
Fax: 03643 / 826928

Prüfungs-Nr.:  
Anlage:  
zu:

Bild 23 Korngrößenverteilungskurve des Recyclingmaterials 0-8 mm

**Mutterboden (Boden 2):** Der Mutterboden stammt aus einer Kompostierungsanlage der Bodenbörse Ramsla (Krs. Weimarer Land). Der aufbereitete Boden enthielt einen hohen organischen Anteil, v. a. Pflanzenhäcksel. Er wurde bodenfeucht angeliefert. Die Summenkurve zeigt eine lockeren grobsandigen bis feinkiesigen Boden.



Bild 24 Trockenschalen mit Mutterboden

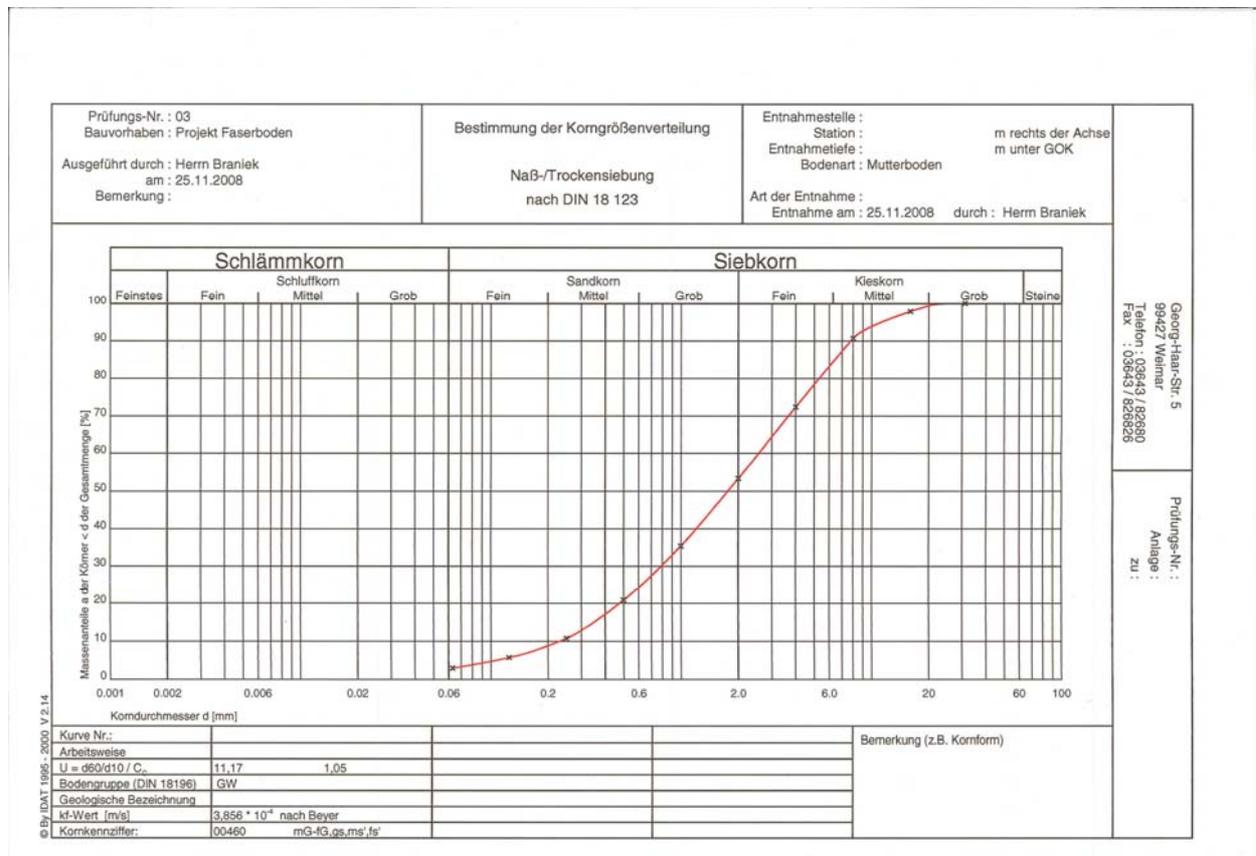


Bild 25 Korngrößenverteilungskurve des Mutterbodens

**Aushubboden (Boden 3):** Der Aushubboden stammt von einer Baustelle in Weimar-Schöndorf. Bei Tiefbauarbeiten fielen beträchtliche Mengen an Aushub dieses Bodens an, der in seiner Ausbildung typisch für die Region Mittelthüringen und repräsentativ für die Bodenbildungen über den Gesteinen des Oberen Muschelkalks (Ceratitenschichten: Wechsellagerung von Kalk-, Ton- und Mergelsteinen) ist. Über dem Muschelkalk erfolgte unter Zutritt von pleistozänem Löss die Ausbildung einer Braunerde, die in der Entnahmetiefe von 1-1,5 m unter Gelände rasch in Verwitterungsschutt und das anstehende Gestein übergeht. Die Summenkurve zeigt einen Boden, der durch den hohen Steinanteil mit seinem Schwerpunkt im Bereich des mittleren bis groben Kieskorns liegt. Das Material wurde direkt von der Baustelle angeliefert und konnte innerhalb von 12 Std. bei 105 °C getrocknet werden.



Bild 26 Trockenschalen mit Aushubboden

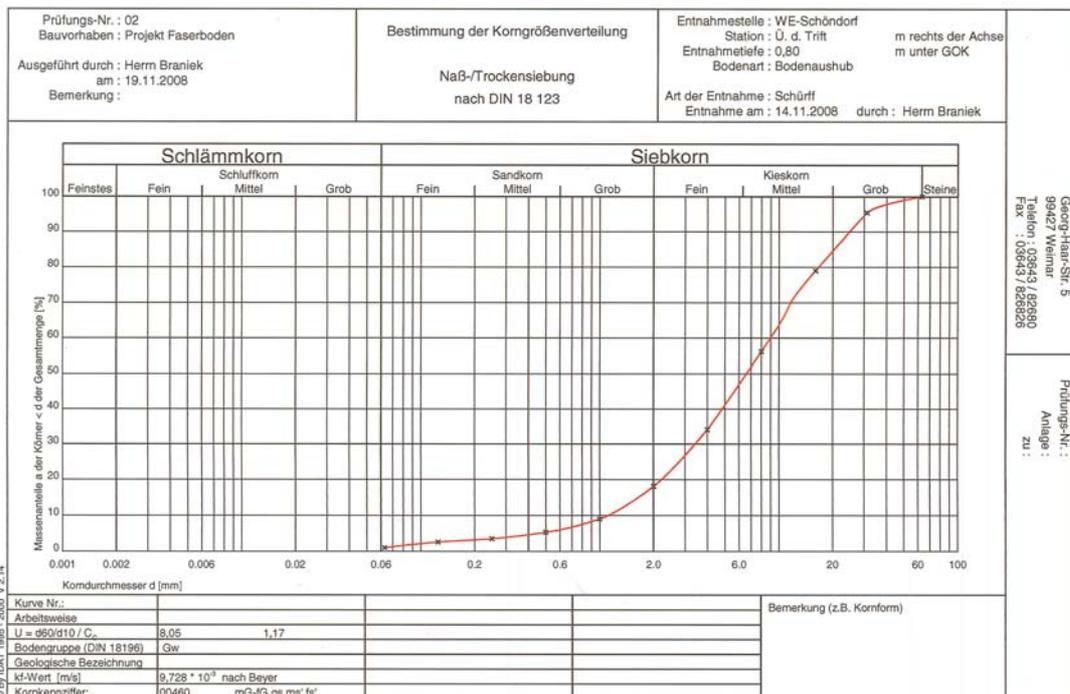


Bild 27 Korngrößenverteilungskurve des Mutterbodens

### 5.3.1 Versuche zur Auslaugung der Böden

Um erste Aussagen zum Auslaugungsverhalten der Böden zu erhalten, wurden an den ausgewählten Materialien entsprechende Versuche in Anlehnung an die DIN 38414, Teil 4 „Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Schlamm und Sedimente (Gruppe S); Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S 4)“ [DIN-1984] durchgeführt.

Die Böden wurden im Anlieferungszustand, ohne weitere Vorbehandlung, für die Untersuchungen verwendet. In den nachfolgenden Tabellen 4 - 7 sind die Ergebnisse der Analysen, zusammengefasst nach den verschiedenen Parametern, aufgeführt.

Parameter	Boden 1	Boden 2	Boden 3	Einheit
pH-	10,9	7,7	7,9	-
Leitfähigkeit	992	1150	102	[ $\mu\text{S cm}^{-1}$ ]
Wassergehalt	10,5	34,8	16,5	[Gew.-
CS	32,0	0,4	0,0	[g l <sup>-1</sup> ]
Organ. Kohlenstoff (ges.)	11,0	180,00	2,2	[mg l <sup>-1</sup> ]

Tabelle 4 Allgemeine Daten (Boden 1: Recyclingmaterial, Boden 2: Mutterboden, Boden 3: Aushubboden)

Parameter	Boden 1	Boden 2	Boden 3	Einheit
Ammoniu	0,1	0,	0,1	[mg l <sup>-1</sup> ]
Chlori	5,9	76,0	0,1	[mg l <sup>-1</sup> ]
Sulfa	450,	68,0	1,2	[mg l <sup>-1</sup> ]
Summ	456,	144,2	1,4	[mg l <sup>-1</sup> ]

Tabelle 5 Salzgehalt der Böden

Parameter	Boden 1	Boden 2	Boden 3	Einheiten
Kupfe	0,01	0,04	0,0	[mg l <sup>-1</sup> ]
Nicke	0,01	0,02	0,0	[mg l <sup>-1</sup> ]
Cadmiu	0,01	0,01	0,0	[mg l <sup>-1</sup> ]
Ble	0,02	0,02	0,0	[mg l <sup>-1</sup> ]
Zin	0,01	0,06	0,0	[mg l <sup>-1</sup> ]
Chro	0,02	0,02	0,0	[mg l <sup>-1</sup> ]
Summ	0,08	0,17	0,0	[mg l <sup>-1</sup> ]

Tabelle 6 Schwermetallgehalt der Böden

Parameter	Boden 1	Boden 2	Boden 3	Einheiten
Acenaphthe	0,049	0,0050	0,005	[ $\mu\text{g l}^{-1}$ ]
Acenaphthyle	0,010	0,01	0,01	[ $\mu\text{g l}^{-1}$ ]
Anthrace	0,010	0,00	0,00	[ $\mu\text{g l}^{-1}$ ]
Benz[a]anthracen	0,005	0,00	0,00	[ $\mu\text{g l}^{-1}$ ]
Benzo[a]pyre	0,002	0,00	0,00	[ $\mu\text{g l}^{-1}$ ]
Benzo[b]fluoranthene	0,005	0,00	0,01	[ $\mu\text{g l}^{-1}$ ]
Benzo[ghi]perylene	0,005	0,00	0,00	[ $\mu\text{g l}^{-1}$ ]
Benzo[k]fluoranthene	0,005	0,00	0,00	[ $\mu\text{g l}^{-1}$ ]
Chryse	0,005	0,00	0,00	[ $\mu\text{g l}^{-1}$ ]
Dibenz[a,h]anthracen	0,005	0,00	0,00	[ $\mu\text{g l}^{-1}$ ]
Fluoranthene	0,023	0,01	0,00	[ $\mu\text{g l}^{-1}$ ]
Fluore	0,022	0,00	0,00	[ $\mu\text{g l}^{-1}$ ]
Indeno[1,2,3cd]pyrene	0,005	0,00	0,01	[ $\mu\text{g l}^{-1}$ ]
Naphthali	0,010	0,01	0,01	[ $\mu\text{g l}^{-1}$ ]
Phenanthrene	0,170	0,02	0,00	[ $\mu\text{g l}^{-1}$ ]
Pyrene	0,006	0,04	0,00	[ $\mu\text{g l}^{-1}$ ]
Summ	0,3	0,1	0,1	[ $\mu\text{g l}^{-1}$ ]

Tabelle 7 Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

**Bewertung der Analyseergebnisse:** Während der Mutterboden, bedingt durch den großen Humusanteil, einen sehr hohen Gehalt an organischem Kohlenstoff aufweist, erklärt sich der hohe Sulfatwert beim Recyclingmaterial durch die dafür aufgearbeiteten Stoffe wie Putze und Mörtel. Die Schwermetallgehalte und auch die Anteile der PAK liegen weitgehend in den Grenzwerten. Auffällig ist der hohe CSB-Wert (Chemischer Sauerstoffbedarf) des Recyclingmaterials, der auf beträchtliche Anteile organischer Substanz hinweist.

## 6 Entwicklung faserbewehrter Böden -Versuchsdurchführung

### 6.1 Versuchsplan

Im Rahmen eines Versuchsplans wurde die Herstellung von faserbewehrten Böden durchgeführt. Durch die unterschiedlichen Fasertypen und Bodenmatrixen wurden die folgenden Parameter variiert:

- Faserlänge
- Faserdicke
- Faserkonzentration
- Bodentyp
- Korngröße

Zur Bereitstellung der Fasern im Labor wurden die Flachsschäben in Packungen zu je 50 kg angeliefert. Die trockenen Bambusfasern waren von früheren Versuchen noch in ausreichender Menge in der FITR gGmbH vorhanden. Zusätzlich wurden erntefrische Sisalfasern beschafft, die bereits durch den Lieferanten Hanf-Faser-Fabrik Nowotny

(Prenzlau) auf Längen zwischen 2 - 8 cm konfektioniert worden waren. Die Abaca- und die Kokos-Fasern konnten vorerst nicht in den notwendigen konfektionierten Längen geliefert werden. Versuche mit diesen Fasern sind aber in Weiterführung des Projektes noch geplant.

Die erzielbaren mechanischen Eigenschaften des Baustoffs, insbesondere die erreichbaren bodenmechanischen Eigenschaften, wurden ermittelt. Neben Korngröße, Proctordichte und Wassergehalt sind die Scherparameter von entscheidender Bedeutung für das neu entstandene Baustoffgemisch. Die Eigenschaften wurden in enger Wechselwirkung mit den Misch- und Einbauverfahren sowie Faserart, Fasergeometrie, -modifikation und -menge zunächst im Labormaßstab untersucht.

## 6.2 Trocknung

Die für die Versuche notwendigen Probemengen an Böden wurden im Labor vorgetrocknet und danach in einem Trockenschrank bei 105 °C getrocknet. Mittels einer Waage wurden dann die benötigten Versuchsmengen zu je 6 kg in Eimern abgefüllt und den Mischversuchen zugeführt. Der Aushubboden musste vor Versuchsbeginn manuell von den groben steinigen Beimengungen befreit werden.

## 6.3 Proctorversuche

Durch Proctorversuche war vorab der optimale Wassergehalt der Böden und dann der Boden-Faser-Gemische zu ermitteln. Zuerst wurden die Böden nach der Trocknung abgewogen und über den Proctor-Versuch der optimale Wassergehalt ermittelt. Dafür wurden jeweils 6 kg Bodenmaterial mit sich in 2%-Schritten erhöhenden Wassermengen gemischt. Das hinzugefügte Wasser lag je nach Bodenmaterial durchschnittlich zwischen 12 % (720 ml) und 28 % (1680 ml). Die Proctorversuche zur Ermittlung der optimalen Wassergehalte wurden sowohl an den drei ausgewählten Böden ohne Faserbewehrung als auch an den jeweiligen Faser-Boden-Gemischen mit Fasergehalten von 0,5; 1,0 und 1,5 Masse-% durchgeführt.

Die folgenden Abbildungen zeigen einige Beispiele der ermittelten Proctorkurven:

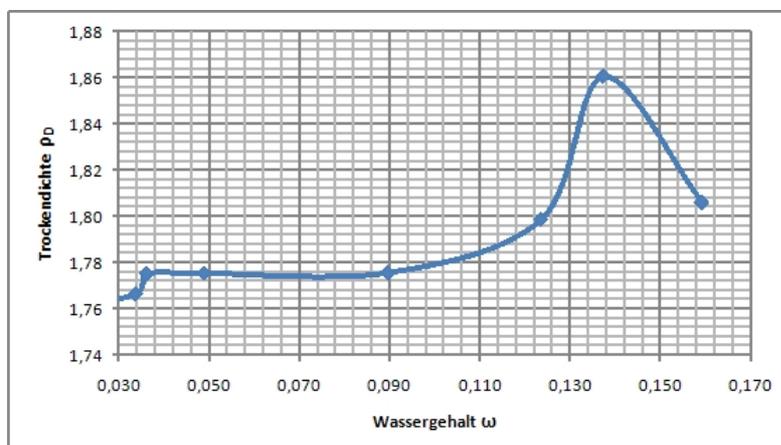


Bild 28 Proctorkurve für das Recyclingmaterial ohne Faseranteil

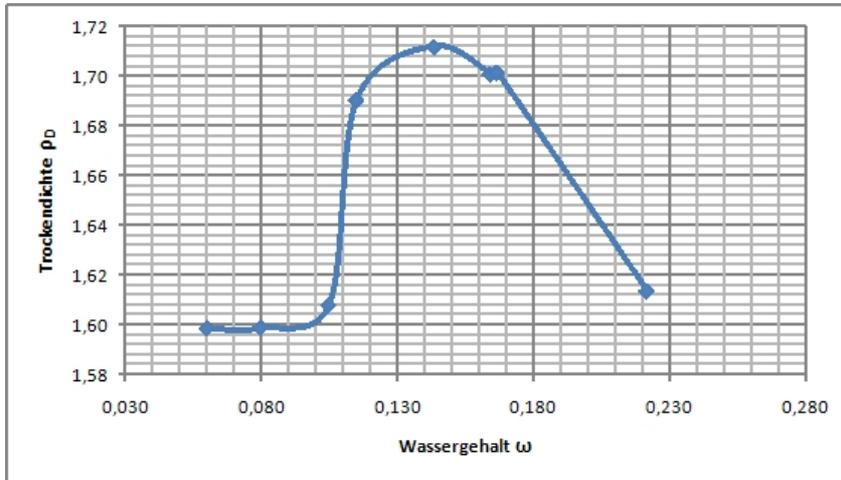


Bild 29 Proctorkurve für Recyclingmaterial mit 1,0 % Flachsschäben

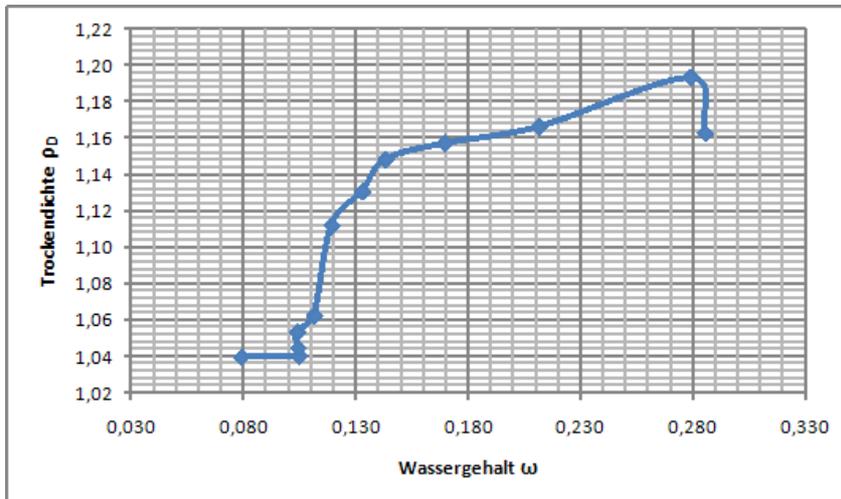


Bild 30 Proctorkurve für Mutterboden ohne Faseranteil

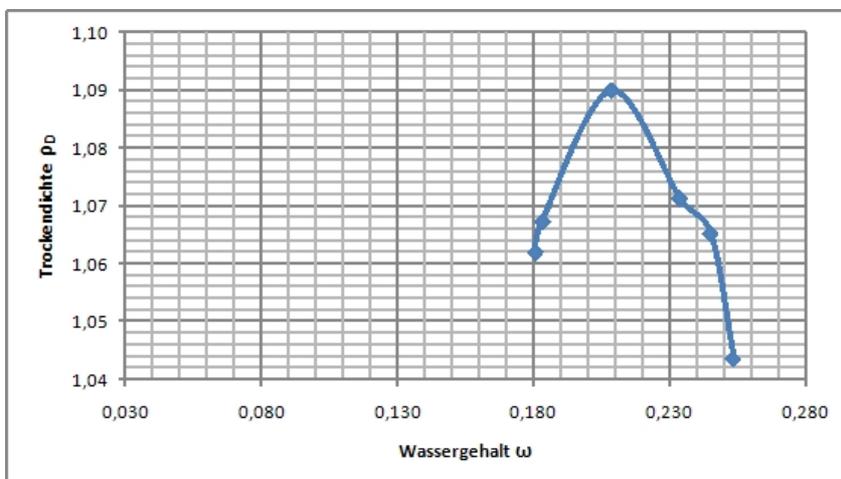


Bild 31 Proctorkurve für Mutterboden mit 1,0 % Flachsschäben

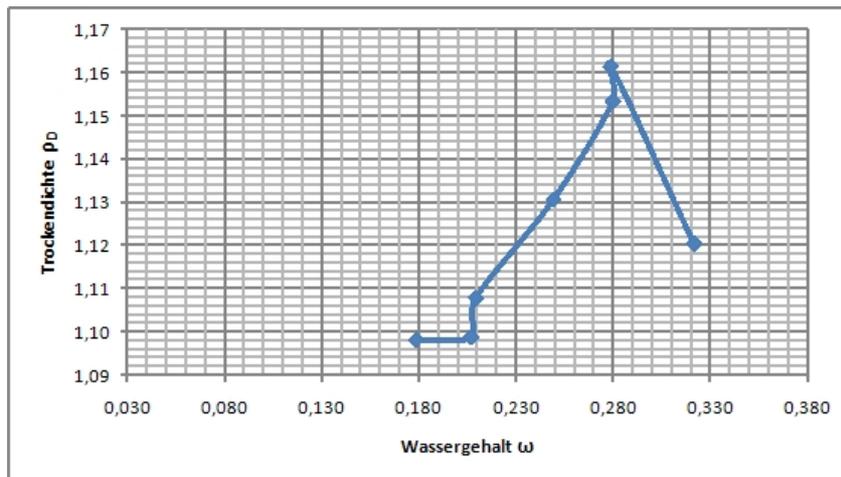


Bild 32 Proctorkurve für Mutterboden mit 1,0 % Bambus

#### 6.4 Einmischverhalten der Fasern in die Bodenmaterialien

Der Einbau der Fasern in die Bodenmatrix erfolgte durch Vermischung der Materialien unter Beigabe von Wasser bis zum Erreichen des ursprünglichen Wassergehaltes der ausgewählten Böden. Während des Mischvorganges Bodenmatrix/Fasern wurde besonderes Augenmerk auf das Einarbeitungsverhalten der Fasern in die Bodenmatrix gelegt, so dass die Homogenisierung des Faser-Boden-Gemisches immer gewährleistet war. Hier konnte unter Berücksichtigung des Standes der Technik kaum auf Erfahrungswerte zurückgegriffen werden. Aus Arbeiten zur Faserarmierung von Beton in Dichtwänden [Brockmann-1996, Preiß-2004, Scholz-2004] oder Armierung von Böden mit Kunstfasern [Rodatz-1994] konnte lediglich abgeleitet werden, dass bevorzugt Fasern im Bereich von 0,5 bis 2 mm Dicke und 20 bis 30 mm Länge für die Faser-Matrix-Gemische eingesetzt wurden.

Alle Materialien wurden mit einem DIOSNA-Rührwerk über jeweils 3 min, 6 min und 9 min gemischt. Dabei zeigten sich gute bis sehr gute Durchmischungen der einzelnen Bodenmaterialien mit den Fasern. Problematisch war bei den Sisalfasern die Bildung von Nestern, die z. T. manuell getrennt werden mussten.

Die Herstellung der Faser-Boden-Gemische für die Scherversuche erfolgte unter Verwendung eines Rührgerätes und Rührbottichs. Damit wurden 12 bis 18 kg des mit Fasern versetzten Bodenmaterials zugleich gemischt. Danach konnte mit den Scherversuchen für die Böden ohne Fasern als auch ausgewählte Faser-Boden-Gemische begonnen werden.



Bild 33 Einmischung von 0,5 % (links) und 1,5 % Sisalfasern in den Mutterboden (rechts mit Nesterbildung der Sisalfasern)

## 6.5 Scherversuche

Die Ermittlung der Scherparameter für die Faserböden konnte im Labor nur im Vergleich zu den nicht mit Fasern versetzten Böden erfolgen. Die erreichten Ergebnisse sind dementsprechend im Verhältnis Rohboden - Faserboden zu betrachten.

Die Untersuchungen fanden auf dem Versuchsfeld der FITR gGmbH in Weimar-West statt. In einer betonierten Grube, in der bereits für andere Versuchsreihen eine 40t-Pressen eingebaut worden war, wurde der von der FITR gGmbH entworfene und gebaute große Scherkasten mit einem Fassungsvermögen von 0,54 m<sup>3</sup> installiert. Zur Messung und Auswertung der Scherversuche diente ein mit der Presse abgestimmtes Computersystem, welches die bei den Versuchen erforderlichen Scherkräfte kontinuierlich erfasste.

Der Scherkasten hat eine Scherfläche von 900 cm<sup>2</sup>. Die Vorschubgeschwindigkeit betrug bei allen Versuchen 20 mm/min, die Auflast 130 kg.



Bild 34 Versuchsaufbau Presse - Scherkasten

Die Ermittlung der bodenmechanischen Messwerte ist nach [Lumb-1974] von verschiedenen Faktoren wie Geräteeffekt, Benutzereinfluss, Interaktion zwischen Gerät und Benutzer sowie Zufallsvariable und Varianz abhängig. Bei den Erstversuchen mit dem neuen Baustoff Faserboden diente die entwickelte Versuchsanlage erstmalig zur Ermittlung der Scherparameter. Daher unterlagen Versuchsaufbau und -anordnung, Materialeinbau und die Versuchsbeobachtung einem ständigen Erkenntnisgewinn und der Verbesserung des Versuchsablaufes.

Material- und zeitintensiv gestaltete sich der Einbau der Füllmengen zwischen 45 und 65 kg in den Scherkasten. Die Böden und die Faser-Boden-Gemische mussten in 5 Lagen in den Scherkasten eingebaut werden. Jede Lage wurde in Anlehnung an die Proctor-Versuche mit 21 Schlägen verdichtet, so dass pro Versuch 105 Schläge mit dem Verdichtungsstößel nötig waren. Hinzu kamen die Entleerung des stark verdichteten Materials aus dem Scherkasten und die An- und Abtransporte der Faserbodengemische in die Versuchsgrube.

Nach Einrichtung, Vorbereitung und ständiger Verbesserung des Versuchsaufbaues konnten die Scherparameter über das angeschlossene Computersystem ermittelt, berechnet und in eine graphische Darstellung umgewandelt werden (Bild 40-45). Festgestellt wurden zudem für jedes Material die maximalen Kräfte, welche die Böden bzw. die Faser-Boden-Gemische der Scherwirkung der Presse entgegengesetzt haben. Die Ergebnisse ausgewählter erfolgreicher Versuche sind in Tab. dargestellt.

Im Folgenden werden die Beobachtungen bei Vermischung und den Scherversuchen der verschiedenen Faser-Boden-Gemische dargestellt, die Messwerte der vergleichenden Untersuchungen sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

## 7 Entwicklung faserbewehrter Böden - Untersuchungsergebnisse

### 7.1. Faserbewehrung Flachsschäben

#### 7.1.1 Einbauverhalten

Zuerst wurden die Flachsschäben durch Einmischversuche mit den getrockneten Böden bzw. dem Recyclingmaterial versetzt. Während die holzigen Reste der Flachsfasergewinnung im Mutterboden und im Recyclingmaterial auch nach 9 min noch locker eingemischt waren, gingen die Schäben in den bindigen Aushubboden bereits nach 6 mit dem Grundmaterial eine Bindung ein (Bild 35). Mit der Erhöhung der Menge von 0,5 auf 1,5 Masse-% waren die Schäben dann im Faserboden-Gemisch auch noch gut sichtbar. Für die Vorbereitung des jeweiligen Faserbodens für die Versuche im Scherkasten wurden die Flachsschäben dann für alle folgenden Versuche nur mit dem Handrührgerät etwa 2 min in die Bodenmaterialien eingemischt.

## 7.1.2 Bodenmechanische Untersuchungen - Scherparameter

In dem von der FITR gGmbH eigens für dieses Grundmaterial entwickelten Scherkasten wurden zwei Faserböden untersucht:

- Mutterboden mit 1,5 Masse-% Flachsschäben (Versuch 2)
- Recyclingmaterial mit 1,5 Masse-% Flachsschäben (Versuch 6).

Dabei zeigte sich eine deutliche Verbesserung der Scherparameter bei der Mischung mit dem Mutterboden. Beim Mutterboden ohne Fasern wurde im Versuch 1 eine Scherfestigkeit von 2010,3 N erreicht (100 %), der Faserboden mit den Flachsschäben erreichte dann 2857,2 N (142 %). Mit dem groben Recyclingmaterial (0/32 mm) verschlechterte sich sogar noch die Verstärkungswirkung gegenüber dem reinen RC-Material. Während im Versuch 5 für das reine RC-Material eine Scherfestigkeit von 4175,2 N (100 %) erreicht wurde, fiel dieser Wert bei dem Gemisch mit den Flachsschäben (Versuch 6) auf 3874,8 N (93 %). Das Diagramm im Bild 44 zeigt die entsprechende Verlaufskurve.



Bild 35 a/b Einmischen von 0,5 Masse-% Flachsschäben in Aushubboden - Gemisch Flachsschäben-Aushubboden nach 9 min

## 7.2 Faserbewehrung Bambus

### 7.2.1 Einbauverhalten

Danach wurden die Einmischversuche der getrockneten Böden bzw. dem Recyclingmaterial mit den Bambusfasern fortgesetzt. Diese ließen sich in den Mutterboden und in das Recyclingmaterial wieder locker einmischen. Der bindigen Aushubboden verdichtete sich erneut nach 6 min. Mit der Erhöhung der Menge von 0,5 auf 1,5 Masse-% waren die Bambusfasern dann im Faserboden-Gemisch wieder gut sichtbar. Für die Vorbereitung des jeweiligen Faserbodens für die Versuche im Scherkasten wurden die Bambusfasern dann für alle folgenden Versuche mit dem Handrührgerät etwa 2 min in die Bodenmaterialien eingemischt.

## 7.2.2 Bodenmechanische Untersuchungen - Scherparameter

Im Scherkasten wurden zwei Faserböden untersucht:

- Mutterboden mit 1,5 Masse-% Bambusfasern (Versuch 3)
- Recyclingmaterial mit 1,5 Masse-% Bambusfasern (Versuch 7).

Die Scherparameter der Mutterboden-Faser-Mischung konnten mit den Bambusfasern gegenüber dem Zusatz von Flachsschäben noch weiter verbessert werden. Beim Mutterboden ohne Fasern wurde im Versuch 1 eine Scherfestigkeit von 2010,3 N erreicht (100 %), der Faserboden mit den Bambusfasern (Versuch 3) erreichte dann bereits 3286,3 N (163 %). Mit dem groben Recyclingmaterial (0/32 mm) verschlechterte sich hingegen die Verstärkungswirkung gegenüber dem reinen RC-Material noch einmal. Während im Versuch 5 für das reine RC-Material eine Scherfestigkeit von 4175,2 N (100 %) erreicht wurde, fiel dieser Wert bei dem Gemisch mit den Flachsschäben (Versuch 7) nochmals auf 3594,8 N (86 %). Das Diagramm im Bild 45 zeigt die entsprechende Verlaufskurve.

Die Beobachtung dieses Materials im Schnitt der Füllung des Scherkastens (Bild 36) zeigt, dass die Bambusfasern nur locker im Recyclingmaterial liegen und aufgrund der fehlenden bindigen Anteile keine Verstärkungswirkung eintritt.



Bild 36 Schnitt Bambus-Recyclingmaterial im Scherkasten



Bild 37 Gemisch Bambus-Recyclingmaterial im Scherkasten

## 7.3 Faserbewehrung Sisal

### 7.3.1 Einbauverhalten

Die vorbereitenden Einmischversuche der getrockneten Böden bzw. des Recyclingmaterials im Rührgerät DIOSNA wurden mit Sisalfasern weitergeführt. Diese ließen sich in die Bodenmaterialien zwar einmischen, neigen aber aufgrund ihrer Feinheit und unterschiedlichen Konfektionslängen zur Nesterbildung. Bereits 0,5 Masse-% Fasern erzielen dabei bereits eine beachtliche Verzahnungswirkung Faser - Bodenmatrix. Für die Vorbereitung des Faserbodens für die folgenden Versuche im

Scherkasten wurden die Sisalfasern dann mit dem Handrührgerät etwa 2 min in das Bodenmaterial eingemischt und auftretende Fasernester manuell getrennt.

### 7.3.2 Bodenmechanische Untersuchungen - Scherparameter

Im Scherkasten wurde ein Faserboden untersucht:

- Mutterboden mit 0,5 Masse-% Sisalfasern (Versuch 4).

Die Scherparameter dieser Boden-Faser-Mischung konnten mit den Sisalfasern gegenüber dem Zusatz aller anderen Fasern soweit verbessert werden, dass fast eine Verdopplung der Scherfestigkeit des Faserbodens gegenüber dem unbewehrten Boden eintrat! Beim Mutterboden ohne Fasern wurde im Versuch 1 eine Scherfestigkeit von 2010,3 N erreicht (100 %), der Faserboden mit den Sisalfasern (Versuch 4) erreichte dann nochmals eine Verstärkung der Scherfestigkeit auf 3867,6 N (192 %). Das Diagramm im Bild 40 zeigt die entsprechende Verlaufskurve.

Die Abb. 38 a/b zeigt bereits die intensive Verbindung der Sisalfasern mit dem umgebenden Boden, die schon im Proctortopf deutlich wurde und nach der Verdichtung des Materials auch im Scherkasten eingetreten ist.



Bild 38 a/b Proctortopf mit verdichtetem Mutterboden und Sisal - Gemisch Mutterboden-Sisalfasern im Scherkasten

## 7.4 Faserbewehrung Polylactid (PLA) – Fasern

### 7.4.1 Einbauverhalten

Abschließend für die Erstversuche wurden Einmischversuche der getrockneten Böden bzw. des Recyclingmaterials mit zwei verschiedenen PLA-Fasern vorgenommen. Diese Faserelemente auf Grundlage eines biologisch abbaubaren Kunststoffes wurden als Alternative zum Einsatz von Naturfasern betrachtet. Die PLA-Fasern ließen sich in den Mutterboden und in das Recyclingmaterial locker einmischen, beim Aushubboden stellte sich nach 9 min wieder eine Verdichtung ein. Es wurde jeweils eine durchschnittliche Menge von 1,0 Masse-% der beiden Faserelemente Nr. 2 (Rundstab, Länge 50 mm, Durchmesser 1 mm) und Nr. 6 (Spirale mit grober Steigung, Länge 25 mm, Durchmesser 10 mm) sowohl dem Mutterboden als auch dem Aushubboden zugesetzt. Für die Vorbereitung des jeweiligen Faserbodens für die

weiteren Versuche im Scherkasten wurden die PLA-Fasern dann mit dem Handrührgerät etwa 2 min in die Bodenmaterialien eingemischt (Bild 39 a/b)

#### 7.4.2 Bodenmechanische Untersuchungen - Scherparameter

Die Scherparameter der Mutterboden-PLA-Faser-Mischung erreichten wiederum ein sehr gutes Ergebnis und übertrafen die Scherfestigkeiten der Gemische mit Flachsschäben und Bambus. Beim Mutterboden ohne Fasern wurde im Versuch 1 eine Scherfestigkeit von 2010,3 N erreicht (100 %), der Faserboden mit den PLA-Faserelementen Nr. 2 (Versuch 10) erreichte eine Verstärkung der Scherfestigkeit auf 3013,2 N (150 %). Das Diagramm im Bild 42 zeigt die entsprechende Verlaufskurve. Bei der Aushubboden - PLA-Faser-Mischung trat nur eine geringe Verbesserung der Scherfestigkeit gegenüber dem reinen Aushubboden ein. Während beim Mutterboden ohne Fasern im Versuch 9 eine Scherfestigkeit von 3572,4 N erreicht wurde (100 %), kam der Faserboden mit den PLA-Faserelementen Nr. 6 (Versuch 8) auf eine Verstärkung der Scherfestigkeit von 4030,0 (113 %). Das Diagramm im Bild 41 zeigt die entsprechende Verlaufskurve.



Bild 39 a/b PLA Nr. 6 vor der Einmischung in den Aushubboden - Detail des PLA-Bodengemisches im Scherkasten

## 8 Gegenüberstellung von Ergebnissen und Zielsetzung

Im Rahmen des Projekts „Faserboden“ wurden zuerst umfangreiche Recherchen zu den Eigenschaften und Verwendungsmöglichkeiten von Naturfasern zum Zwecke der Bewehrung von Aushubböden und Recyclingmaterialien, die in beträchtlichen Mengen von der Bauwirtschaft als aufbereitete Bauabfälle zur Verfügung gestellt werden können, durchgeführt. Aus diesen Recherchen heraus wurden die Naturfasern Bambus und Sisal, sowie Flachsschäben als holziges Produkt der Flachsfaserherstellung für die Erstversuche ausgewählt. Durch das Fraunhofer-Institut UMSICHT wurden PLA-Faserelemente entwickelt, die als biologisch abbaubare Kunststofffasern ebenfalls in die Versuchsreihe aufgenommen wurden. Als Bodenmatrices wurden eine aufbereiteter Mutterboden, Recyclingmaterial der Korngröße 0/32 mm und ein regionaler Aushubboden ausgewählt. Von den

Bodenmaterialien wurden in Siebversuchen die Korngrößen ermittelt und durch Proctorversuche die optimalen Wassergehalte festgestellt. Die Naturfasern und PLA-Elemente wurden in ausreichender Menge für die Laborversuche beschafft. Beim Einmischen der Fasern in die Bodenmatrices wurde das Einmischverhalten beobachtet. Die entstandenen Boden-Faser-Gemische wurden ebenfalls Proctorversuchen unterzogen. Zur vergleichenden Ermittlung der Scherparameter wurden sowohl die reinen Bodenmatrices als auch die Boden-Faser-Gemische Scherversuchen unterzogen, die in einem eigens für dieses Material entwickelten Scherkasten auf dem Versuchsfeld der FITR gGmbH stattfanden. Die Versuchsergebnisse wurden tabellarisch und graphisch erfasst und eine Diskussion der erreichten Ergebnisse vorgenommen.

In Erstversuchen wurde so im Labormaßstab die Bewehrung von verschiedenen Bodenmaterialien mit Naturfasern und biologisch abbaubaren Kunststofffasern (PLA-Fasern) erprobt. Die Fasern wurden in das Stoffsystem der Böden und des Recyclingmaterials eingebracht und durch maschinelles Einmischen eine gleichmäßige Verteilung der Fasern zur Bewehrung des neuen Baustoffes erreicht. Durch die Einmischung der Fasern konnten im Labormaßstab die mechanischen und bodenmechanischen Eigenschaften, insbesondere die Scherfestigkeit des neuen Baumaterials Faserboden verbessert werden. Das Entstehen bzw. die Ausbreitung von Rissen konnte im Erstversuch aufgrund der kleinräumigen Laborversuche noch nicht nachgewiesen werden. Die Beständigkeit der Fasern für die in Erstversuchen geprüfte Anwendung der Mischung Fasern-Bodenmaterial/Recyclingmaterial konnte erfolgreich gezeigt werden. Dabei ist ein biologischer Abbau der Fasern in verschiedenen Zeiträumen und abhängig vom Einsatzgebiet durch die Art der ausgewählten Fasermaterialien gewährt. Die Beprobung von Recyclingmaterial in Mischung mit den Fasern zeigte in diesen Erstversuchen, dass eine Verwertung von minderwertigen Baumaterialien bzw. Abprodukten aus dem Baubereich in neuen Einsatzgebieten möglich ist.

Die Versuchsreihe mit dem **Mutterboden** und den verschiedenen Faseranteilen zeigt die deutlichste Verbesserung der Bewehrungseigenschaften durch die eingemischten Naturfasern und die PLA-Elemente. Zusammen mit Sisalfasern wurde hier eine Scherfestigkeit von bis zu 192 % erreicht (Tabelle 8).

Beim **Recyclingmaterial** ist eine Verschlechterung der Scherwirkung zu erkennen. Ursache hierfür wird in der grobkörnigen Struktur (0 - 32 mm) des Ausgangsmaterials im Vergleich zum Mutter- und Aushubboden gesehen. Eine Verzahnung zwischen Grundmatrix und Faser erfolgt hierbei nicht bzw. die Fasern führen nur zur weiteren Auflockerung der Struktur.

Beim **Aushubboden** zeigt vor allem der Zusatz der leicht spiralförmigen PLA-Elemente Nr. 6 eine gute Bewehrungswirkung.

Die Untermischung der PLA-Elemente gelang bei allen Bodenmatrices sehr gut.

Die Qualität des Faserverbundes im faserbewehrten Boden wird wesentlich von einer guten Haftung an der Grenzfläche und einem vollständigen Umschluss bestimmt. Diese wiederum wird durch die Viskosität der Matrices, die Faseroberfläche und durch die Formen und Abmessungen der Fasern beeinflusst. Während Matrices durch tonige

Bestandteile vor allem für Bindung und Zusammenhalt sorgen, tragen und übertragen die Fasern mechanische Belastungen wie Druck, Zug oder Stauchung. Bei den Mischungen von Bodenmatrices mit den Naturfasern hat sich gezeigt, dass dabei Faserlängen zwischen 20 und 30 mm optimal für die Einmischung ohne Nesterbildung und die Übertragung der bodenmechanischen Lasten sind. Grobes RC-Material mit Korngrößen von 0 - 32 mm hat mit den Fasern zusammen keine Verbesserung der bewehrenden Wirkung erlangt.

Verbesserte Scherparameter wurden vor allem bei der Einmischung von Fasern in feinkörnigere Matrices mit bindigen Anteilen erreicht. Um diesen Effekt auch mit Recyclingmaterialien zu erlangen, sollten weitere Versuche mit einem Korngrößenspektrum von 0/8 mm durchgeführt werden.

Bezüglich der Zielstellung des Projektes, Recyclingmaterialien in größerem Umfang in neuen Verwendungen einzusetzen, muss daher von den gröberen Materialien in Kombination mit den Fasern abgesehen werden. Neben der Beimischung von Naturfasern hat auch der Einsatz von PLA-Elementen eine positive Wirkung gezeigt. Um diese Elemente noch besser einmischen zu können und damit eine größere Nähe zu den Naturfasern wie z. B. Sisal zu erreichen, wäre eine Verfeinerung der Materialstärke von 1 mm auf 0,5 mm zu empfehlen.

Der in der FITR gGmbH entwickelte Scherkasten in Verbindung mit einer 40 t-Pressen hat sich im Praxistest bewährt. Die Versuche konnten kontinuierlich und mit guten Ergebnissen durchgeführt werden.

Bezeichnung des Faser-Boden-Gemisches	erreichte Scherfestigkeit	prozentuale Entwicklung
Mutterboden (= V1)	2010,3 N	100 %
Mutterboden + 1,5 % Flachsschäben (= V2)	2857,2 N	142 %
Mutterboden + 1,5 % Bambus (= V3)	3286,3 N	163 %
<b>Mutterboden + 0,5 % Sisal (= V4)</b>	<b>3867,6 N</b>	<b>192 %</b>
<b>Mutterboden + 1,0 % PLA Nr. 2 (= V10)</b>	<b>3013,2 N</b>	<b>150 %</b>
Recyclingmaterial (= V5)	4175,2 N	100 %
Recyclingmaterial + 1,5 % Flachsschäben (= V6)	3874,8 N	93 %
Recyclingmaterial + 1,5 % Bambus (= V7)	3594,8 N	86 %
Aushubboden (= V9)	3572,4 N	100 %
Aushubboden + 1,0 % PLA Nr. 6 (= V8)	4030,0 N	113 %

Tabelle 8 Ausgewählte Scherversuche

Die in Tabelle 8 zusammengestellten maximalen Scherfestigkeiten werden durch die graphische Darstellung der Verläufe ausgewählter Scherversuche ergänzt. Nicht nur bei dem erfolgreichsten Versuch mit der höchsten erreichten Scherfestigkeit (Versuch 4: Mutterboden mit Sisalfasern), sondern auch bei den beigemischten biologisch abbaubaren Kunststofffasern (PLA-Elemente Nr. 2 und 6) zeigt sich nach Erreichen

der maximalen Scherkraft eine Vergleichmäßigung der Meßkurve auf höherem Niveau. Damit konnte in den Erstversuchen für diese Art der Faserböden eine erfolgreiche Erhöhung der Bewehrungswirkung nachgewiesen werden.

Deutlich wird bei den Meßkurven der Versuche 5 bis 7, in denen die Fasern mit dem groben Recyclingmaterial gemischt wurden, daß nach Erreichen der maximalen Scherfestigkeit ein rasches Abfallen der Meßkurve zeigt, daß diese Faserbodengemische nicht zur Erhöhung der Bewehrungseigenschaften geeignet sind und für weitere Untersuchungen feinkörnigere RC-Materialien mit bindigen Anteilen herangezogen werden sollten.

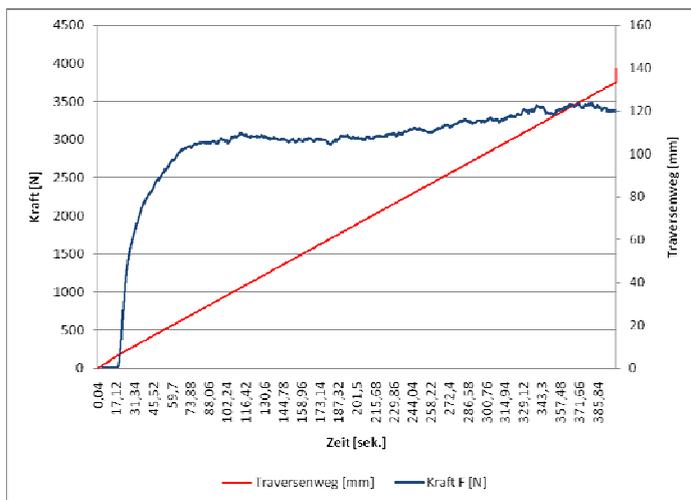


Bild 40 Scherversuch Mutterboden + 0,5 Sisal (Versuch 4)

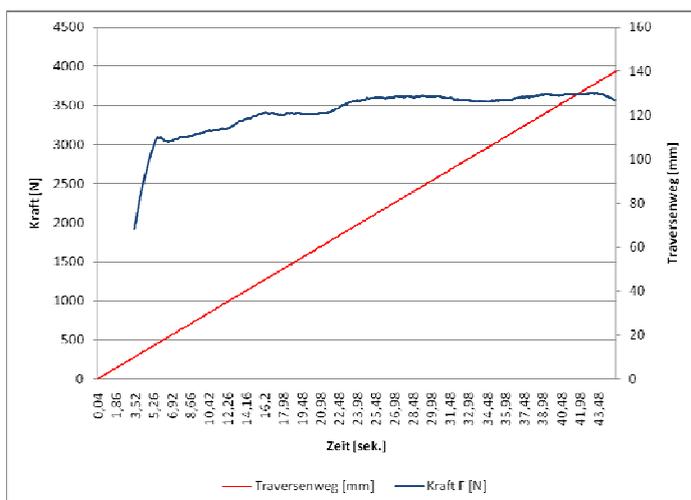


Bild 41 Scherversuch Aushubboden + 1,0 % PLA-Element Nr. 6 (Versuch 8)

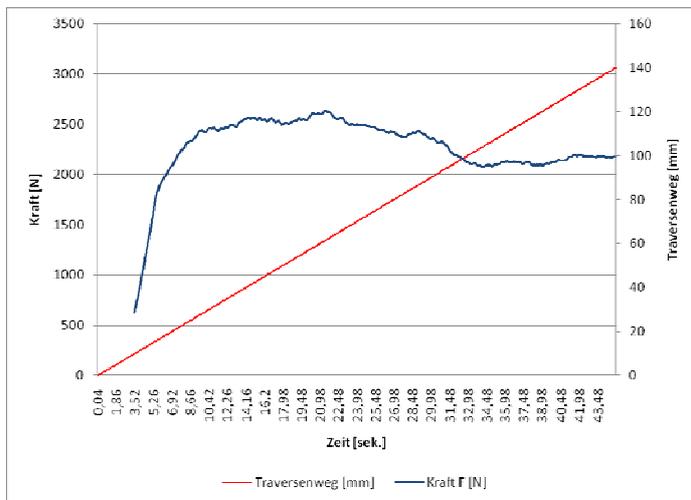


Bild 42 Scherversuch Mutterboden + 1,0 % PLA-Element Nr. 2 (Versuch 10)

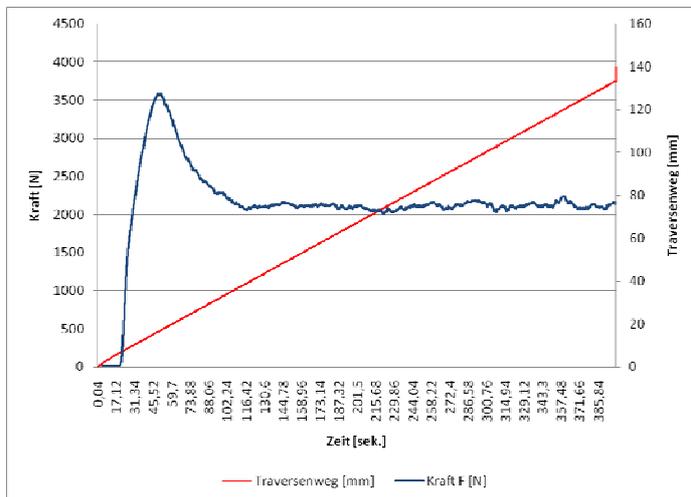


Bild 43 Scherversuch Recyclingmaterial 0/32 ohne Fasern (Versuch 5)

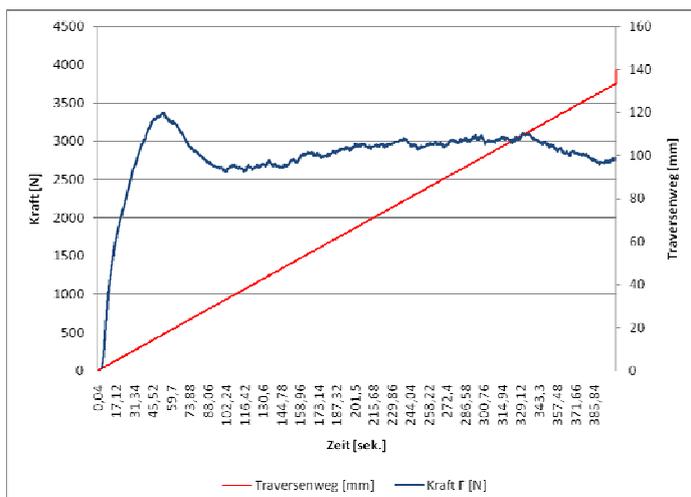


Bild 44 Scherversuch Recyclingmaterial 0/32 + 1,5 % Flachsschäben (Versuch 6)

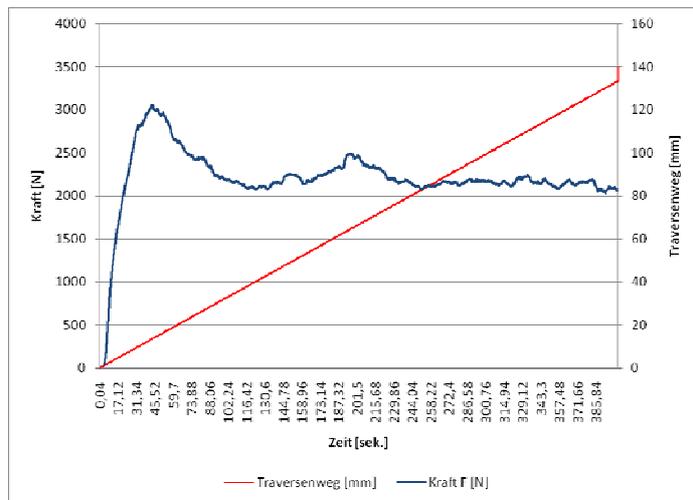


Bild 45 Scherversuch Recyclingmaterial 0/32 + 1,5 % Bambus (Versuch 7)

## 9 Verwendung der Zuwendungen

Die Aufgabenstellung wurde in einem Team von Wissenschaftlern, Technikern, Laboranten und studentischen Hilfskräften bearbeitet. Die Zuwendungen wurden im Berichtszeitraum im Wesentlichen für die Gehälter des Personals aufgewendet. Die Wissenschaftler wurden eingesetzt, um die Recherche- und Entwicklungsarbeiten zur Faser- und Bodenauswahl durchzuführen und die Ausarbeitung und Auswertung der Versuche zur Materialauswahl, -aufbereitung und -charakterisierung sowie der Prüfung der Bewehrungseigenschaften, der Erosionsbeständigkeit, der Auslaugung und der biologischen Abbaubarkeit zu übernehmen.

Die Wissenschaftler waren zudem verantwortlich für die Entwicklung der faserbewehrten Böden, die Kommunikation mit dem PBA und die Projektleitung.

Die Techniker und Laboranten haben hauptsächlich die unterschiedlichen Versuche zur Entwicklung der Faserbewehrung, der Prüfung der Bewehrungs- und Erosionseigenschaften sowie zur Auslaugung und biologischen Abbaubarkeit durchgeführt. Darüber hinaus haben sie die Ergebnisse dokumentiert und an der Diskussion der Ergebnisse mitgearbeitet.

Die studentischen Hilfskräfte unterstützten bei den Recherchearbeiten und bei der Durchführung der Versuche sowie bei der Dokumentation und Auswertung der erzielten Versuchsergebnisse.

## 10 Wissenschaftlich-technischer Nutzen

Für die Bewehrung bindiger Böden und Recyclingmaterialien, die in großen Mengen auf Baustellen und Aufbereitungsanlagen anfallen, konnte durch das Projekt eine alternative Nutzungsmöglichkeit aufgezeigt werden. In Erstversuchen im Labormaßstab wurden die positiven Auswirkungen auf die Bewehrungswirkung des Faserbodens nachgewiesen. Die ausgewählten Naturfasern und die PLA-Strukturelemente (PLA-Fasern) eröffnen durch ihren Einsatz zur Bewehrung von

Böden neue wissenschaftlich-technische Möglichkeiten, die sowohl mit der neuen Ersatzbaustoffverordnung korrespondieren als auch die Einsatzgebiete für die Aushub- und Recyclingmaterialien beträchtlich erweitern können. Besonders positiv und nachhaltig wirkt sich somit das Projekt „Faserböden“ auf die Schonung natürlicher Ressourcen aus. Ausgehend von den Ergebnissen der 1. Projektphase sollte in Fortführung des Projektes die großflächige Anwendung der Faserböden, ihre Erosionsbeständigkeit und ihr Langzeitverhalten auf größeren Flächen im Praxisversuch angewandt und untersucht werden, um den wissenschaftlich-technischen Nutzen der Entwicklung dieses neuartigen Baustoffgemisches für die Bauwirtschaft nachweisen zu können.

## 11 Wirtschaftlicher Nutzen für KMU

Die Zusammenarbeit mit den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses (PBA) entwickelte sich sehr positiv. Im Verlauf der Arbeiten am Projekt konnten weitere Partner wie die SachsenLeinen GmbH gewonnen und Interessenten aus der Praxis wie die Arpolith GmbH hinzugezogen werden.

Im Berichtszeitraum wurden 2 Sitzungen des PBA durchgeführt. Im Ergebnis dieser beiden Zusammenkünfte wurde von der BIGUS GmbH empfohlen, über zusätzliche Schüttkegelversuche das Verhalten der Faser-Boden-Mischungen beim Einsatz im Böschungsbereich weiter zu spezifizieren. Von den Praxispartnern wie der GalaBau GmbH, der Bohlen & Doyen Bauunternehmung und der Sächsischen Bau GmbH wurden neben der positiven Bewertung auch die Kostenaspekte bei der Entwicklung der Praxistauglichkeit des Einsatzes der Faserböden betont. Nach dem Nachweis der Bewehrungswirkung von Fasereinmischungen in den Bodenmaterialien werden vom PBA als nächste Aufgaben die Erprobung von technischen Lösungen der Einmischung von Fasern auf der Baustelle und der Nachweis der Erosionsbeständigkeit der Faserbodengemische im Außenbereich gesehen.

## 12 Innovativer Beitrag der Ergebnisse zu industriellen Anwendungsgebieten

Der innovative Beitrag des Projektes „Faserböden“ für die Nutzung in der Bauwirtschaft liegt in der Eröffnung der Möglichkeit der Verwertung bisher in Größenordnung ungenutzter mineralischer Ressourcen. Mit der Anwendung von Naturfasern und biologisch abbaubarer PLA-Strukturelemente wird durch das Projekt ein neue Möglichkeit der Bewehrung von Boden- bzw. Recyclingmaterialien als schonende und kostengünstige Alternative zum Einsatz von Kunstfasern, Geotextilien oder Geweben in bestimmten Einsatzgebieten, z. B. bei der Bereitstellung von Materialien für Deponieabdeckung und Böschungsbau als Grundlage für die rasche Begrünung dieser Flächen dargestellt. Durch die Kombination Boden- bzw. Recyclingmaterial, Naturfasern bzw. PLA-Fasern, wasserspeichernde Materialien wie vulkanische Tuffe und die Beimischung von Saatgut kann durch diesen innovativen Ansatz eine schnelle Begrünung größerer Flächen gewährleistet werden.

Als weitere Innovation als Ergebnis der 1. Projektphase kann der Einsatz von bisher nicht nutzbaren Sisalfasern minderer Qualität angesehen werden. Diese Naturfaser hat sich in den Erstversuchen als besonders positiv für die Steigerung der

Bewehrungsfunktion von Böden erwiesen. Unter dem Aspekt einer Konfektionierung auf Faserlängen von 20-30 mm, die bereits beim Hersteller in Kenya ausgeführt werden kann, wird durch den Einsatz dieser für die Herstellung von Seilen nicht geeigneten Fasern ein neues Feld der besseren Ausnutzung natürlicher Ressourcen eröffnet.

## 13 Veröffentlichungen im Rahmen des Vorhabens

Bereits während der Laufzeit des Vorhabens wurden die Innovationen durch Veröffentlichungen und Kongressbeiträge dem interessierten Fachpublikum bekannt gemacht. Nachfolgend sind die Veröffentlichungen aufgelistet, die auf der Grundlage der Projektergebnisse bisher entstanden bzw. in Vorbereitung sind.

### 13.1 Vorträge

Ein erster Vortrag zum Thema mit dem Titel „Faserbewehrter Boden zur Böschungssicherung und Sanierung“ ist für das 9. Sächsische Bautextilien-Symposium „Bautex 2010 - Bauen mit Geokunststoffen“ am 28. Januar 2010 in Chemnitz angemeldet worden.

### 13.2 Veröffentlichung in Fachzeitschriften und Tagungsbänden

Am 8. und 9. September 2009 fand in der Messe Erfurt das 7. Internationale Symposium „Werkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen“ (naro.tech) statt. Für dieses Symposium konnte ein Poster vorgestellt werden. Im Tagungsband wurde auf S. 88 unter dem Titel „Faserboden - Faserbewehrung von Recyclingmaterialien und Aushubböden in Erd- und Tiefbau“ ein Beitrag zur Posterpräsentation in Deutsch und Englisch veröffentlicht.

### 13.3 Teilnahme an Messe- und Informationsveranstaltungen

Neben der Teilnahme an der naro.tech 2009 auf der Messe Erfurt sind Teilnahmen an der Bautex 2010 in Chemnitz (Vortrag) und der naro.tech 2010 im September 2010 auf der Messe Erfurt (Vortrag) vorgesehen. Weiterhin erfolgte die Teilnahme am Workshop „TechnoFlachs - Neue Möglichkeiten zum Einsatz von Naturfasern in der Vliesherstellung“ am 3.3.2009 in Chemnitz und der Besuch der Messe TechTextil und des Natural Fibres Congress am 18. Juni 2009 in Frankfurt/Main. Auf den Veranstaltungen konnten zahlreiche Kontakte mit anderen Forschungsinstituten und KMU geknüpft werden.

## 14 Ausblick

In der 1. Projektphase konnte die positive Wirkung der Einmischung von Naturfasern und PLA-Elementen in ausgewählte Bodenmatrices auf die Verbesserung der bodenmechanischen Eigenschaften des Faser-Boden-Gemische nachgewiesen und damit das Ziel des Projektes erreicht werden. Um aber die Einsatzfähigkeit und Praxistauglichkeit dieses Verfahrens in der Bauwirtschaft und im Garten- und Landschaftsbau umfassend nachweisen zu können, ist eine 2. Projektphase unabdingbar, in der durch weiterführende Untersuchungen im Labor- und Feldmaßstab der praktische Nutzen der im Labormaßstab erfolgreich beprobten neuen Baustoffgemische gezeigt werden kann.

Unter Beachtung der Kostenaspekte wird die Fortsetzung des Projektes „Faserboden“ auch vom Projektbegleitenden Ausschuss (PBA) empfohlen.

Das Projekt wurde als IGF-Forschungsvorhaben aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWT) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungseinrichtungen (AiF) gefördert.

## 15 Literaturverzeichnis

- [Agarwal-2002] Agarwal, V.  
PLA: Fiber of the millennium  
Man made Textiles in India **45** (2002): 446-448; New Delhi.
- [Arbeitsentwurf 2007] Arbeitsentwurf - Stand: 13.11.2007 -  
ErsatzbaustoffV Verordnung zur Regelung des Einbaus von mineralischen  
Ersatzbaustoffen in technischen Bauwerken und zur Änderung  
der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung. - 27 Bl.;  
Mainz.
- [Barthel-1961] Barthel, R.  
Über die Verwertung des Flachs-Nebenproduktes Schäben zu  
Faserplatten. - Faserforsch. u. Textiltechnik **12** (1961) (11): 534-547;  
Berlin.
- [BMVB-2004] Stolpe: Ressourcen sparendes Bauen kann Innovations- und  
Investitionskräfte aktivieren. - Pressemitteilung Nr. 2390/04 des  
Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnen; Berlin.
- [Brockmann-1996] Brockmann, G.  
Stahlfaserbeton: ein neuer Baustoff und seine Perspektiven (= Die  
Bibliothek der Technik **136**). - 96 S.; Landsberg/Lech (Verl. Moderne  
Industrie).
- [Bürger-1995] Bürger, H.; Koine, A.; Maron, R. & Mieck, K.-P.  
Naturfasereinsatz und Umweltaspekte. - GAK: Gummi-Faser-  
Kunststoffe **7** (1995)(48): 775-783; Ratingen.

- [Carus-2008] Carus, M. et al.  
Studie zur Markt- und Konkurrenzsituation bei Naturfasern und Naturfaser-Werkstoffen (Deutschland und EU)(= Gülzower Fachgespräche **26**), 393 S.; Gülzow (Nova-Institut, FNR 2008).
- [DepVerwV-2005] Verordnung über die Verwertung von Abfällen auf Deponien über Tage (Deponieverwertungsverordnung - DepVerwV). - BGBL Jg. 2005 Teil I, ausgegeben zu Bonn am 25. Juli 2005, S. 2252-2265; Bonn.
- [DeponieV-2009] Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts vom 27. April 2009. - BGBL Jg. 2009 Teil I, ausgegeben zu Bonn am 29. April 2009, S. 900-950; Bonn.
- [DIN-1984] DIN 38414-4  
Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Schlamm und Sedimente (Gruppe S); Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S 4), Ausgabe: 1984-10; Berlin.
- [DIN-2000] DIN EN 13432  
Verpackung - Anforderungen an die Verwertung von Verpackungen durch Kompostierung und biologischen Abbau Prüfschema und Bewertungskriterien für die Einstufung von Verpackungen (Deutsche Fassung EN 13432:2000), Ausgabe: 2000-12; Berlin.
- [DIN-2004] DIN EN 13251/A1  
Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Geforderte Eigenschaften für die Anwendung in Erd- und Grundbau sowie in Stützbauwerken (Deutsche Fassung EN 13251:2000/prA1:2004); Berlin.
- [Dummis-2002] Dummis, S. & Müller, S.  
Bewehrte Erde mit Geokunststoffen am Beispiel der Stützwand in Annaberg-Buchholz. - Bautex 2002 (Straßen- und Ingenieurbau), Chemnitz (STFI).
- [Dunkelberg-1985] Dunkelberg, K.  
Bambus als Baustoff. - Mitt. Inst. f. leichte Flächentragwerke (IL) **31**: 38-90; Stuttgart (Krämer).
- [Feuerbach-2002] Feuerbach, J. & Krauter, E.  
Hang- und Böschungssicherungen unter dem Aspekt des Landschaftsschutzes. - 7 Bl.; Mainz (Ingenieurbüro geointernational).
- [FGSV-1994] Merkblatt für die Anwendung von Geotextilien und Geogittern im Erdbau des Straßenbaues. - Köln (Forschungsgesell. f. Straßen- u. Verkehrswesen).

- [FGSV-1995] Technische Lieferbedingungen für Geotextilien und Geogitter für den Erdbau im Straßenbau (TL Geotex E-StB 95). - Köln (Forschungsgesell. f. Straßen- u. Verkehrswesen).
- [FGSV-1999] Checklisten für die Anwendung von Geotextilien und Geogittern im Erdbau des Straßenbaus. - Köln (Forschungsgesell. f. Straßen- u. Verkehrswesen).
- [Flemming-1995] Flemming, M.; Ziegmann, G. & Roth, S. Faserverbundbauweisen: Fasern und Matrices. - VIII+309 S.; Berlin/Heidelberg (Springer).
- [Franke-1994] Franke, G. (Hrsg.) Nutzpflanzen der Tropen und Subtropen, Bd. 2: Spezieller Pflanzenbau (= UTB **1768**). - 403 S.; Stuttgart 1994 (Ulmer).
- [Frisch-2009] Frisch, K.-R. Einheitliche Regeln für die Verwertung mineralischer Abfälle? Warten auf die Ersatzbaustoffverordnung. - Tiefbau **2009** (1): 29; Berlin.
- [Göbel-2002] Göbel, K. & Hoy, G. Zur Entwicklung der Bauweise Kunststoffbewehrte Erde (KBE) in Sachsen. - 5. Sächsischen Bautextilien-Symposium Bautex 2002 (Straßen- und Ingenieurbau). - Chemnitz (STFI).
- [Gupta-2007] Gupta, B.; Revagade, N. & Hilborn, J., Poly (lactic acid) fiber: An overview. - Progress in Polymer Science **32**: 455-482; Oxford.
- [Hermann-2009] Hermann, K. Kunststoffe aus Stärke, Milchsäure und Cellulose. - CHemie Plus **17** (2009)(1-2): 26-28; Solothurn.
- [Klauss-2004] Klauss, M. Degradation of biologically degradable packaging items in home or backyard composting systems (= Schrr. Lehrstuhl Abfallwirtschaft u. Lehrstuhl Siedlungswasserwirtschaft Bauhaus-Univ. Weimar **11**). - 344 S.; Berlin (Rhombos).
- [Koch-2003] Koch, P.A. Polylactide fibers (PLA). - Chemical Fibers International **53** (2003)(6): 426-433; Frankfurt/Main.
- [LAGA-2003] Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Ab-

fällen - Technische Regeln - Allgemeiner Teil, Überarbeitung; Endfassung vom 06.11.2003 [= Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) **20**], 52 S.; Mainz 2003.

- [LAGA-2004a] Eckpunkte (EP) der LAGA für eine „Verordnung über die Verwertung von mineralischen Abfällen in technischen Bauwerken“ Stand: 31.08.2004; 33 S.; Mainz 2004.
- [LAGA-2004b] Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen: Teil II: Technische Regeln für die Verwertung 1.2; Bodenmaterial (TR Boden) Stand: 05.11.2004 [= Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA)]. - 22 S., Mainz 2004.
- [LAGA-2004c] Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen: Teil III: Probenahme und Analytik Stand: 05.11.2004 [Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA)]. - 11 S.; Mainz 2004.
- [Lim-2008] Lim, L.T.; Auras, R. & Rubino, M.  
Processing technologies for poly(lactic acid). - Progress in Polymer Science **33** (2008): 820-852; Oxford.
- [Lützkendorf-2003] Lützkendorf, R.; Reußmann, T. & Mieck, K.-P.  
Verstärkung mit Naturfasern - aktueller Stand und Entwicklungspotenziale. - IIR Deutschland, Nürtingen, 27./28.03.2003.
- [Lumb-1974] Lumb, P.  
Application of Statistics in Soil Mechanics. - In: Lee, I. K. (ed.): Soil Mechanics New Horizons, S. 44-111; London 1974 (Newnes-Butterwords).
- [Mieck-1995] Mieck, K.-P. & Reußmann, T.  
Entwicklung und Eigenschaften von Nadelvliesstoffen aus Flachs für Kunststoffverbunde. - Technische Textilien **6** (1995): 80-83; Frankfurt/Main.
- [Mieck-2000] Mieck, K.-P.  
Stand und Entwicklung des Einsatzes von Naturfasern für Composites. - GAK: Gummi-Fasern-Kunststoffe **53** (2000) 6: 408-413; Ratingen.
- [Müssig-2005] Müssig, J.  
Geotextilien aus Naturfasern. - GKL-Frühjahrstagung „Gartenbau und Sonderkulturen“, 2./3. Mai 2005, 12 Bl.; Hannover (GKL).
- [Murray-2004] Murray, H.R.

Geokunststoffen für den Uferschutz an Straßen und Eisenbahnen.  
- 6. Sächsischen Bautextilien-Symposium Bautex 2004 (Uferschutz an  
Strasse und Eisenbahnen). - Chemnitz (STFI).

- [Oberbach-2001] Oberbach, K.  
Kunststoff-Taschenbuch. - 28. Ausg., L+1020+22 S.; München  
(Hanser).
- [Ortlepp-2004] Ortlepp, G. & Weiß-Quasdorf, M.  
New recycling process for p-aramid fibers from fabric waste. - Che-  
mical Fibers International **54** (2004) (3): 171-172; Frankfurt/Main.
- [Patent-2002] DE 10030617 A1  
Offenlegungsschrift: Verfahren zur Faserbewehrung von Baustoffen  
sowie ein nach dem Verfahren hergestellter faserbewehrter Baustoff,  
Deutsches Patentamt, München 2002.
- [Preiß-2004] Preiß, O. & Amann, P.  
Polyvinylalkoholfaser bewehrtes Dichtwandmaterial für das  
Zweiphasenverfahren. - In: 11. Braunschweiger Deponie- und  
Dichtwandseminar 2004 (= Mitt. Inst. f. Grundbau u. Bodenmechanik  
TU Braunschweig **74**): 427-437; Braunschweig (IGB-TUBS)
- [Raininger-2003] Raininger, F. & Lenzing, A.  
Natural man-made fibers. - In: The Future of Apparel Textiles,  
Dresden, Germany, Oct. 19 - 21, 2003 (= ITMF Annual Conference  
Report). - Zürich.
- [Reußmann-2003] Reußmann, T.; Mieck, K.-P. & Lützkendorf, R.  
Von der Faser zum Granulat. - Plastverarbeiter **54** (2003): 82-83;  
Heidelberg.
- [Rodatz-1994] Rodatz, W. & Oltmanns, W.  
BMFT-Verbundvorhaben „Deponieabdichtungssysteme“, Teilvor-  
haben 51: Durchlässigkeit und Spannungs-Verformungs-Verhalten  
faserbewehrter Böden für Deponieabdichtungssysteme. - 70 S.;  
Braunschweig (IGB-TUBS)
- [Römpp-1995] Falbe, J. & Regitz, M. (Hrsg.)  
Römpp Chemie-Lexikon, 9. Aufl., 6 Bde., 5314 S.; Stuttgart (Thieme).
- [Saathoff-1994] Saathoff, F. et al.  
Über das BML/BMFT-Forschungsvorhaben „Entwicklung und Prüfung  
der Anwendbarkeit von flachsfasern als geotextile Vlies- und  
Verbundstoffe für den Erd- und Wasserbau“. - Statusseminar „Flachs“  
am 15./16. November 1993 in Leipzig, 19 S.; Lübecke 1994 (Naue  
Fasertechnik).

- [Saathoff-2004] Saathoff, F. & Werth, K.  
Geokunststoffen zur Deichsanierung und Ertüchtigung im Hochwasserschutz. - 6. Sächsischen Bautextilien-Symposium Bautex 2004 (Uferschutz an Strasse und Eisenbahnen). - Chemnitz (STFI).
- [SBD-2004] Statistisches Bundesamt Deutschland  
Aufkommen, Beseitigung und Verwertung von Abfällen im Jahr 2002; Wiesbaden 2004 (Statistisches Bundesamt).
- [Schmalz-1999] Schmalz, E.; Lewicki, C. & Böttcher, P.  
Durch Witterung und Erdeinbau hervorgerufenen Eigenschaftsänderungen bei Geovliesstoffen aus Flachs. - Geo- und Agrartextilien aus Hanffasern: Technik; Bremen 27.10.1999, 12 Bl.; Bremen.
- [Schmalz-2003] Schmalz, E. & Böttcher, P.  
Märkte und Einsatzgebiete von Geotextilien aus synthetischen Fasern und Naturfasern. - Vortrag 2003, Sächsisches Textilforschungsinstitut; Chemnitz (STFI).
- [Schnegelsberg-1999] Schnegelsberg, G.  
Handbuch der Faser: Theorie und Systematik der Faser (= Theorien u. Systeme in Technik u. Ökonomie **1**). - 720 S.; Frankfurt am Main (Dt. Fachverlag).
- [Scholz-2004] Scholz, C.  
Integrität von Einphasen-Dichtwänden - Untersuchungen zum rheologischen und mechanisch-hydraulischen Verhalten faserbewehrter Einphasen-Dichtwände. - Diss FB Ingenieurwesen TU Braunschweig (= Mitt. IGB TU Braunschweig **79**). - 217 S.; Braunschweig 2004.
- [Stracke-2009] Wohin mit Böden und Sekundärbaustoffen? Die Ersatzbaustoffverordnung kommt! - Umweltkolleg Essen 2009.
- [Mewis-2004] Mewis, P.  
Schonung natürlicher Ressourcen durch den Einsatz von Recycling-Materialien als Baustoffe für Flussdeiche. - Forschungsvorhaben der TU Darmstadt, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Förderung durch die deutsche Bundesstiftung Umwelt und Regierungspräsidium Darmstadt, Förderkennzeichen 18063, VII+106+27 S.; Darmstadt (TU).
- [Zanziger-2001] Zanzinger, H.  
Interaktion Boden-Geokunststoff. - Geotextil-Fachtagung, Dübendorf, Schweiz, 2001.

## Anlage

Begleitschreiben des PBA-Vorsitzenden