

ABSCHLUSSBERICHT ZUM PROJEKT:

„Entwicklung dauerhafter Wood-Plastic-Composites (WPC, Holz-Kunststoff-Verbundstoffe) für die Außenanwendung“

Förderung: Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU)

Aktenzeichen: 25279-31

Laufzeit: 1.12.2007 – 30.11.2009

Durchführung:

- Fraunhofer-Institut für Holzforschung (Wilhelm-Klauditz-Institut, WKI)
- Kosche Profilmantelung GmbH, Abteilung Kovalex (ehemals Valentin Holzwerkstoff GmbH & Co. KG), Mittenaar-Bicken
- Fachhochschule Eberswalde (FH Eberswalde)

Verfasser:

Dr. Anke Schirp

Fraunhofer-Institut für Holzforschung (Wilhelm-Klauditz-Institut, WKI),
Braunschweig

Eingereicht am: 27.7.2010

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	25279	Referat	31	Fördersumme	113.527,00 €
Antragstitel	Entwicklung dauerhafter Wood-Plastic-Composites (WPC, Holz-Kunststoff-Verbundstoffe) für die Außenanwendung				
Stichworte	Holz, Verfahren nachwachsende Rohstoffe, Kunststoff				
	Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)	
	2 Jahre	1.12.2007	31.11.2009		
	Zwischenbericht	15.12.2008			
Bewilligungsempfänger	Fraunhofer-Institut für Holzforschung Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI)			Tel	05 31/21 55-336
	Bienroder Weg 54 E 38108 Braunschweig			Fax	05 31/35 15 87
				Projektleitung	Dr. Anke Schirp
				Bearbeiter	
Kooperationspartner	Kosche Profilmantelung GmbH Abteilung Kovalex Hauptstr. 36 35756 Mittenaar-Bicken				

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Wood-Plastic Composites (WPC) stellen eine relativ neue Klasse hybrider Werkstoffe dar, die im vergangenen Jahrzehnt einen kontinuierlich steigenden Marktanteil erzielen konnten, vor allem als Substitut für nicht-lasttragende Bauteile aus imprägniertem Vollholz. In Europa enthalten WPC in der Regel 60-70 Gew.-% Holzpartikel, meistens in Form von Holzmehl, und sind somit potenziell anfällig für den Abbau durch holzerstörende Pilze (Basidiomyceten). Die Anfälligkeit von WPC für Pilzabbau wird von zahlreichen Faktoren bestimmt, wie dem Holzanteil, der Holzart, der Holzpartikelgeometrie, der Verarbeitung und somit der Qualität der Holzpartikelummantelung durch den thermoplastischen Kunststoff, und der Verwendung von Additiven. Das Ziel dieses Projektes bestand in der Anwendung von zwei Strategien zur Minimierung des Abbaus von WPC durch holzerstörende Pilze. Ein weiteres Projektziel bestand in der Entwicklung eines Schnelltests zur Prüfung der Beständigkeit von WPC gegen den Abbau durch holzerstörende Pilze.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Die zwei Strategien zur Minimierung des Abbaus von WPC durch holzerstörende Pilze umfassten:

1. Verwendung von Robinienholz (*Robinia pseudoacacia*), einer Holzart mit einer hohen natürlichen Dauerhaftigkeit, zur Herstellung von WPC;
2. Verwendung von Refinerfasern, d.h. thermomechanisch aufgeschlossenem Holzfaserstoff, zur Herstellung von WPC. Es wurde angenommen, dass eine Verbesserung der Interphasenhaftung von Holz und Kunststoff erreicht werden kann, indem Refinerfasern bei der Extrusion eingesetzt werden, die beim Holzaufschluss hydrophobiert wurden. Dies wiederum sollte zu einer Verringerung der Wasseraufnahme der WPC und somit zu einer Reduzierung des Abbaus von WPC durch holzerstörende Pilze führen.

Beim Schnelltest zur Prüfung der Beständigkeit von WPC gegen den Abbau durch holzerstörende Pilze wurden extrem kleine Prüfkörper mit den Abmessungen 15 mm (Länge) x 10 mm (Breite) x 4 mm (Dicke) verwendet. Die Inkubationszeit sollte durch die Verwendung sehr kleiner Prüfkörper im Vergleich zur bestehenden Testmethode (DIN CEN/TS 15534-1, 2007) reduziert werden. Die Masseverluste der Prüfkörper sollten einer möglichen Reduzierung der Biegefestigkeit gegenübergestellt werden. Die Biegefestigkeit wurde mittels eines Dynstat-Gerätes (DIN 51230) und gemäß der Prüfnorm von Kunststoffen (DIN 53435) ermittelt.

Ergebnisse und Diskussion

In Bezug auf die beiden Strategien zur Minimierung des Abbaus von WPC durch holzerstörende Pilze wurden die folgenden Ergebnisse erzielt:

1. Verwendung von Robinienholz (*Robinia pseudoacacia*) zur Herstellung von WPC:

- Die Verwendung von Robinienholz, unabhängig von der Partikelgeometrie (Holzmehl, Refinerfasern), verleiht WPC eine hohe Resistenz gegen holzerstörende Pilze. Die Masseverluste der WPC (Prüfkörperabmessungen 50 mm x 40 mm x 10 mm) auf Basis von Robinie nach 16 Wochen Inkubation mit holzerstörenden Pilzen (Weißfäulepilz *Trametes versicolor*; Braunfäulepilz *Gloeophyllum trabeum*) betragen weniger als 4%. Gemäß DIN CEN/TS 15534-1 (2007) weisen WPC eine hohe Resistenz gegen Benetzung auf, wenn der Masseverlust der Prüfkörper weniger als 3% und der Holzfeuchtegehalt weniger als 25% beträgt. Diese Eigenschaft bewirkt einen Schutz gegen den Befall mit holzerstörenden Pilzen, solange sie erhalten bleibt (DIN CEN/TS 15534-1, 2007).
- Insgesamt waren die Masseverluste der WPC (Prüfkörperabmessungen 50 mm x 40 mm x 4 mm) mit Kiefer (*Pinus sylvestris*) höher (bis zu 14%) als für WPC mit Robinie. Die verwendete Holzart scheint einen größeren Einfluss auf die Resistenz gegen holzerstörende Pilze zu haben als die Verwendung eines Haftvermittlers (maleinsäureanhydrid-modifiziertes Polypropylen, MAPP).

2. Verwendung von Refinerfasern (Holzfaserstoff) zur Herstellung von WPC:

Die Verwendung von Refinerfasern aus Kiefer bewirkt im Hinblick auf die Resistenz von WPC gegen holzerstörende Pilze keine Verbesserung gegenüber der Verwendung von Holzmehl. Die Masseverluste der WPC mit Refinerfasern aus Kiefer waren höher (11-14%) als die Masseverluste der WPC mit Holzmehl aus Kiefer (8%). Beim Einsatz von Robinie hat die Form der verwendeten Partikel (Refinerfasern, Mehl) geringeren Einfluss auf die Resistenz von WPC.

In Bezug auf den Schnelltest zur Prüfung der Beständigkeit von WPC gegen den Abbau durch holzerstörende Pilze wurden folgende Ergebnisse erzielt:

- Die Biegefestigkeit (Dynstat) der WPC wurde nach 12 Wochen durch die Feuchtaufnahme allein um bis zu 20% reduziert.
- Der Weißfäulepilz (*Trametes versicolor*) bewirkte keine oder nur eine geringfügige zusätzliche Reduzierung der Biegefestigkeit (Dynstat) der WPC. Der Braunfäulepilz (*Gloeophyllum trabeum*) bewirkte eine leichte zusätzliche Reduzierung der Biegefestigkeit (Dynstat) der WPC.
- Die maximale Reduzierung der Biegefestigkeit (Dynstat) der WPC aufgrund von holzerstörenden Pilzen betrug 34%. Im Gegensatz hierzu wurde die Biegefestigkeit (Dynstat) der Prüfkörper aus Vollholz (Kiefernspint) durch den Einfluss der holzerstörenden Pilze um bis zu 56% reduziert.
- Es zeigte sich, dass die Masseverluste bei Verwendung der extrem kleinen Prüfkörper nicht ermittelt werden konnten. Aufgrund des geringen Gewichts der Prüfkörper ergaben sich beim Entfernen des Pilzmyzels so große Abweichungen bei den Prüfkörpern identischer Rezepturen, dass eine Auswertung der Masseverluste nicht sinnvoll war.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Ergebnisse des Projektes sind in den folgenden Veröffentlichungen enthalten:

- Inka Weidenmüller (2010): Evaluierung der Resistenz von Wood-Plastic Composites (WPC) auf Basis von Refinerfasern und Holzmehl aus Kiefer und Robinie gegen holzerstörende Pilze im Labortest. Diplomarbeit, Fachhochschule Eberswalde, Fachbereich Holztechnik, Studiengang Holztechnik.
- A. Schirp, I. Weidenmüller, J. Stender (2010): Strategies for improving the resistance of wood-plastic composites (WPC) against wood-decay fungi. Proceedings, 8th Global WPC and Natural Fibre Composites Congress and Exhibition, 22 – 23 June 2010, Stuttgart/Germany. Editors: Andrzej K. Bledzki and Volker E. Sperber, Universität Kassel, Institut für Werkstofftechnik, Kunststoff- und Recyclingtechnik. ISBN 978-83-7518-226-2.

Fazit

Die Verwendung von Robinie, unabhängig von der Partikelgeometrie, führt zu einer hohen Resistenz von WPC gegen Abbau durch holzerstörende Pilze. Robinien-Refinerfasern weisen ein hohes Potenzial zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften und zur Reduzierung der Feuchtaufnahme von WPC auf.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Zusammenfassung	3
2 Stand des Wissens und der Technik	8
3 Gegenstand und Ziele des Projekts, Lösungskonzept gemäß Projektantrag	11
4 Detaillierte Beschreibung der Methodik, Ergebnisse und Diskussion	13
Arbeitsphase 1: Extrusion für Freilandversuche	13
Arbeitsphase 1: Installation der Freilandversuche	13
Arbeitsphase 1: Vorauswahl der Strategien zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit	26
Arbeitsphase 1: Herstellung von Probenmaterial für Labortest nach DIN CEN/TS 15534-1 (Standardtest) und für Schnelltest (Dynstat)	27
Arbeitsphase 1: Durchführung des Standardtests und des Schnelltests; Bewertung	29
Arbeitsphase 2: Erste Evaluierung der Proben aus Freilandtests	37
Arbeitsphase 2: Durchführung der Strategien zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit	37
Arbeitsphase 2: Abschließende Evaluierung der Proben im Freilandtest	49
5 Ausblick	49
6 Literaturangaben	51
7 Anhang: Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	53

1 Zusammenfassung

Wood-Plastic Composites (WPC) stellen eine relativ neue Klasse hybrider Werkstoffe dar, die im vergangenen Jahrzehnt einen kontinuierlich steigenden Marktanteil erzielen konnten, vor allem als Substitut für nicht-lasttragende Bauteile aus imprägniertem Vollholz. In Europa enthalten WPC in der Regel 60-70 Gew.-% Holzpartikel, meistens in Form von Holzmehl, und sind somit potenziell anfällig für den Abbau durch holzerstörende Pilze (Basidiomyceten). Die Anfälligkeit von WPC für Pilzabbau wird von zahlreichen Faktoren bestimmt, wie dem Holzanteil, der Holzart, der Holzpartikelgeometrie, der Verarbeitung und somit der Qualität der Holzpartikelummantelung durch den thermoplastischen Kunststoff, und der Verwendung von Additiven.

Das Ziel dieses Projektes bestand in der Anwendung von zwei Strategien zur Minimierung des Abbaus von WPC durch holzerstörende Pilze:

1. Verwendung von Robinienholz (*Robinia pseudoacacia*), einer Holzart mit einer hohen natürlichen Dauerhaftigkeit, zur Herstellung von WPC;
2. Verwendung von Refinerfasern, d.h. thermomechanisch aufgeschlossenem Holzfaserstoff, zur Herstellung von WPC. Es wurde angenommen, dass eine Verbesserung der Interphasenhaftung von Holz und Kunststoff erreicht werden kann, indem Refinerfasern bei der Extrusion eingesetzt werden, die beim Holzaufschluss hydrophobiert wurden. Dies wiederum sollte zu einer Verringerung der Wasseraufnahme der WPC und somit zu einer Reduzierung des Abbaus von WPC durch holzerstörende Pilze führen.

Ein weiteres Projektziel bestand in der Entwicklung eines Schnelltests zur Prüfung der Beständigkeit von WPC gegen den Abbau durch holzerstörende Pilze. Bei diesem Schnelltest wurden extrem kleine Prüfkörper mit den Abmessungen 15 mm (Länge) x 10 mm (Breite) x 4 mm (Dicke) verwendet. Die Inkubationszeit sollte durch die Verwendung sehr kleiner Prüfkörper im Vergleich zur bestehenden Testmethode (DIN CEN/TS 15534-1, 2007) reduziert werden. Hierbei sollten die Masseverluste der Prüfkörper einer möglichen Reduzierung der Biegefestigkeit gegenübergestellt

werden. Die Biegefestigkeit wurde mittels eines Dynstat-Gerätes (DIN 51230) und gemäß der Prüfnorm von Kunststoffen (DIN 53435) ermittelt.

Das Projekt wurde erfolgreich durchgeführt. Im Einzelnen wurden die folgenden Ergebnisse erzielt:

Verwendung von Robinienholz (*Robinia pseudoacacia*) zur Herstellung von WPC:

- Die Verwendung von Robinienholz, unabhängig von der Partikelgeometrie (Holzmehl, Refinerfasern), verleiht WPC eine hohe Resistenz gegen holzerstörende Pilze. Die Masseverluste der WPC (Prüfkörperabmessungen 50 mm x 40 mm x 10 mm) auf Basis von Robinie nach 16 Wochen Inkubation mit holzerstörenden Pilzen (Weißfäulepilz *Trametes versicolor*, Braunfäulepilz *Gloeophyllum trabeum*) betragen weniger als 4%. Gemäß DIN CEN/TS 15534-1 (2007) weisen WPC eine hohe Resistenz gegen Benetzung auf, wenn der Masseverlust der Prüfkörper weniger als 3% und der Holzfeuchtegehalt weniger als 25% beträgt. Diese Eigenschaft bewirkt einen Schutz gegen den Befall mit holzerstörenden Pilzen, solange sie erhalten bleibt (DIN CEN/TS 15534-1, 2007).
- Insgesamt waren die Masseverluste der WPC (Prüfkörperabmessungen 50 mm x 40 mm x 4 mm) mit Kiefer (*Pinus sylvestris*) höher (bis zu 14%) als für WPC mit Robinie. Dies bestätigt die Hypothese, dass die Verwendung einer dauerhaften Holzart in WPC zu einer hohen Resistenz gegen Abbau durch holzerstörende Pilze führt.
- Die verwendete Holzart scheint einen größeren Einfluss auf die Resistenz gegen holzerstörende Pilze zu haben als die Verwendung eines Haftvermittlers (maleinsäureanhydrid-modifiziertes Polypropylen, MAPP).

Verwendung von Refinerfasern, d.h. thermomechanisch aufgeschlossenem Holzfaserstoff, zur Herstellung von WPC:

- Die Verwendung von Refinerfasern aus Kiefer bewirkt im Hinblick auf die Resistenz von WPC gegen holzerstörende Pilze keine Verbesserung gegenüber der Verwendung von Holzmehl. Die Masseverluste der WPC mit Refinerfasern aus Kiefer waren höher (11-14%) als die Masseverluste der WPC mit Holzmehl aus Kiefer (8%). Beim Einsatz von Robinie hat die Form

der verwendeten Partikel (Refinerfasern, Mehl) geringeren Einfluss auf die Resistenz von WPC.

- Robinien-Refinerfasern weisen ein hohes Potenzial zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften und zur Reduzierung der Feuchteaufnahme von WPC auf.

Insgesamt konnte bei der Umsetzung der beiden Strategien gezeigt werden, dass die Prüfkörpergröße einen deutlichen Einfluss auf die WPC-Resistenzevaluierung hat. Die Verwendung von Prüfkörpern mit den Abmessungen 80 x 10 x 4 mm und dadurch mit einem hohen Verhältnis von Oberfläche zu Volumen schafft ein „worst-case-Szenario“, bei dem die maximalen Masse- und Festigkeitsverluste im Gegensatz zu Prüfkörpern mit den Abmessungen 50 x 40 x 4 mm überschätzt werden können. Darüber hinaus ist festzuhalten, dass WPC eine Versiegelung aufweisen, d.h., während der Extrusion wird auf der Außenseite des Profils eine dünne Schicht aus Kunststoff ausgebildet, die das Profil vor Wasseraufnahme und Umwelteinflüssen schützt. Die Qualität dieser Versiegelung hat einen deutlichen Einfluss auf die Resistenzevaluierung. Wenn die Prüfkörper zur Resistenzevaluierung aus Tapes hergestellt werden, bleibt die Versiegelung der WPC besser erhalten, als wenn die Prüfkörper aus einem Hohlkammerprofil herausgeschnitten werden. Hierdurch sind die Masseverluste von WPC bei der Verwendung von Prüfkörpern aus Tapes geringer als bei der Verwendung von Prüfkörpern aus einem Hohlkammerprofil.

In Bezug auf das weitere Projektziel „Entwicklung eines Schnelltests zur Prüfung der Beständigkeit von WPC gegen den Abbau durch holzerstörende Pilze“ wurden die folgenden Ergebnisse erzielt:

- Die Biegefestigkeit (Dynstat) der WPC wurde nach 12 Wochen durch die Feuchteaufnahme allein um bis zu 20% reduziert.
- Der Weißfäulepilz (*Trametes versicolor*) bewirkte keine oder nur eine geringfügige zusätzliche Reduzierung der Biegefestigkeit (Dynstat) der WPC. Der Braunfäulepilz (*Gloeophyllum trabeum*) bewirkte eine leichte zusätzliche Reduzierung der Biegefestigkeit (Dynstat) der WPC.
- Die maximale Reduzierung der Biegefestigkeit (Dynstat) der WPC aufgrund von holzerstörenden Pilzen betrug 34%. Im Gegensatz hierzu wurde die

Biegefestigkeit (Dynstat) der Prüfkörper aus Vollholz (Kiefernspint) durch den Einfluss der holzerstörenden Pilze um bis zu 56% reduziert.

- Es zeigte sich, dass die Masseverluste bei Verwendung der extrem kleinen Prüfkörper nicht ermittelt werden konnten. Aufgrund des geringen Gewichts der Prüfkörper ergaben sich beim Entfernen des Pilzmyzels so große Abweichungen bei den Prüfkörpern identischer Rezepturen, dass eine Auswertung der Masseverluste nicht sinnvoll war.

In Ergänzung zu den Laboruntersuchungen sollte die Dauerhaftigkeit der WPC im Freiland untersucht werden. Auf dem Gelände der FH Eberswalde wurde ein Prüffeld eingerichtet, bei denen die WPC-Terrassendielen keinen Bodenkontakt aufweisen. Die Terrassendielen wurden hierbei gemäß der Aufbauanleitung des Herstellers (Kosche) verlegt, um möglichst großen Praxisbezug zu erreichen. Auf dem Gelände des Fraunhofer WKI wurden WPC-Terrassendielen (vier Rezepturen) in Anlehnung an DIN EN 252 (1990) mit Erdkontakt verlegt. Hierbei wurden Vollholzproben aus Kiefer als nicht-dauerhafte Referenz sowie geriffelte Bangkirai-Terrassendielen als dauerhafte Referenz verwendet. Die Modifizierung von DIN EN 252 bestand in geänderten Prüfkörperabmessungen (600 mm x 145 mm x 25 mm), da die nach der Norm erforderlichen Prüfkörperabmessungen nicht extrudiert werden konnten. Zusätzlich wurden Kiefernspintholzprüfkörper mit den Abmessungen 600 mm x 50 mm x 25 mm verwendet, die aufgrund dieser Abmessungen und aufgrund ihrer Beschaffenheit (nur Splintholz, kein Kern) als Referenz gemäß DIN EN 252 dienen. Die Prüfkörper wurden zur Hälfte in den Boden eingegraben. Über einen Zeitraum von fünf Jahren sollen jedes Jahr fünf Prüfkörper entnommen werden, d.h., pro Variante wurden insgesamt 25 Prüfkörper eingebaut. Da das Freilandprüffeld am Fraunhofer WKI erst am 27.7.2009 fertig gestellt werden konnte, liegen die ersten Ergebnisse erst nach dem 27.7.2010 vor. Die Ergebnisse werden der DBU und der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt.

Die Ergebnisse des Projektes werden in den folgenden Veröffentlichungen dargestellt:

- Inka Weidenmüller (2010): Evaluierung der Resistenz von Wood-Plastic Composites (WPC) auf Basis von Refinerfasern und Holzmehl aus Kiefer und

Robinie gegen holzzerstörende Pilze im Labortest. Diplomarbeit, Fachhochschule Eberswalde, Fachbereich Holztechnik, Studiengang Holztechnik.

- Schirp, I. Weidenmüller, J. Stender (2010): Strategies for improving the resistance of wood-plastic composites (WPC) against wood-decay fungi. Proceedings, 8th Global WPC and Natural Fibre Composites Congress and Exhibition, 22 – 23 June 2010, Stuttgart/Germany. Editors: Andrzej K. Bledzki and Volker E. Sperber, University of Kassel, Institut für Werkstofftechnik, Kunststoff- und Recyclingtechnik, Kassel. ISBN 978-83-7518-226-2.

2 Stand des Wissens und der Technik

WPC stellen eine relativ neue Klasse hybrider Werkstoffe dar, die im vergangenen Jahrzehnt in den USA einen beachtlichen Marktanteil erzielen konnten, vor allem als Terrassendielen und Fassaden (Wolcott 2001, Clemons 2002). Dagegen werden WPC erst allmählich auf dem europäischen Markt eingeführt, dessen Volumen in den nächsten fünf Jahren auf bis zu € 1.4 Billionen bzw. 1.3 Millionen t anwachsen soll (WRAP 2003). Dies würde bedeuten, dass der europäische Markt den amerikanischen in etwa zehn Jahren mengenmäßig sogar übersteigen könnte. Der Markterfolg von WPC in den USA kann zum großen Teil auf die freiwillige Verpflichtung der nordamerikanischen Industrie aus dem Jahre 2002 zurückgeführt werden, auf Holzschutzmittel auf Chrom-Kupfer-Arsen-Basis in Zukunft zu verzichten (www.epa.gov). Damit wurde der Markt für alternative Produkte, die dauerhaften Schutz gegen Mikroorganismen bieten, geöffnet.

WPC bestehen in der Regel aus einem Füllstoff auf der Basis nachwachsender Rohstoffe (in der Regel Holz, aber auch alternative Lignocellulosen wie Stroh, Hanf oder Sisal) und einer thermoplastischen Kunststoffmatrix (Polyethylen, Polypropylen oder Polyvinylchlorid). Aufgrund der limitierten thermischen Stabilität von Holz können nur Thermoplaste eingesetzt werden, die unterhalb von 200°C schmelzen und bearbeitet werden können (Wolcott 2001). Derzeit werden die meisten WPC in Nordamerika für die Außenanwendung mit Polyethylen, z. T. aus Recyclingbeständen, hergestellt. Der Einsatz von Holzpartikeln oder Verstärkungsfasern bewirkt überwiegend eine Verbesserung der mechanischen Materialeigenschaften des Verbundwerkstoffes. Zusätzlich zu den Hauptkomponenten Holz und Kunststoff werden den Formulierungen in der Regel kleinere Mengen von Additiven zugesetzt, die die Bearbeitbarkeit und Leistungsfähigkeit des Werkstoffes verbessern, z.B. Kopplungsreagenzien (Haftvermittler, coupling agents), UV-Stabilisatoren, Pigmente, Gleitmittel, Fungizide und Schaumbildner. Die am häufigsten eingesetzten Haftvermittler sind Maleinsäureanhydrid-modifiziertes Polyethylen (MAPE) und Maleinsäureanhydridmodifiziertes Polypropylen (MAPP). WPC werden meist im Extrusions- oder Spritzgussverfahren sowie neuerdings auch im Plattenpressverfahren hergestellt.

Die Entwicklung für WPC auf dem deutschen Markt ist durch eine Fülle von Einflussfaktoren gehemmt. Hierbei sind zunächst zu nennen die geringe Verbraucherakzeptanz für ein Produkt auf der Basis von synthetischen Polymeren und ein stetig steigender Preis für Erdöl und damit für öl-abhängige Folgeprodukte. Bei dieser Betrachtungsweise wird jedoch vernachlässigt, dass WPC als Ersatz für Produkte auf der Basis von 100 % Kunststoff dienen können und dass außerdem ein starkes Bestreben von Seiten der Industrie besteht, die Holzanteile in WPC-Formulierungen weiter zu erhöhen. Weitere Vorteile von WPC bestehen im geringen Wartungs- und Pflegeaufwand im Vergleich zu Vollholz, Splitterfreiheit, einer hohen Formgebungsvielfalt und guten Recyclingfähigkeit.

Ein Hemmfaktor für das weitere Marktwachstum von WPC besteht darin, dass unzureichende Kenntnisse über Produkteigenschaften und Normung dieser Komposite bei Herstellern und potentiellen Anwendern bestehen. Insbesondere die Langzeiteigenschaften von WPC für die Außenanwendung sind noch nicht ausreichend getestet bzw. dokumentiert worden. Es hat sich jedoch bereits gezeigt, dass WPC entgegen ursprünglicher Annahmen von Holz zerstörenden Pilzen besiedelt und abgebaut werden können, wenn auch in langsameren Zeitspannen als Produkte auf der Basis von Vollholz (Morris und Cooper 1998; Verhey et al. 2001; Pendleton et al. 2002; Schirp und Wolcott 2005, 2006). Von thermoplastischen Polymeren wie Polyethylen ist bekannt, dass sie relativ resistent gegenüber Mikroorganismen sind (Albertsson et al. 1987), doch auch hier gibt es Hinweise aus der Fachliteratur, dass Polyethylen von spezifischen Pilzen, z.B. dem Weißfäulepilz *Phanerochaete chrysosporium* nach Oxidation (Volke-Sepulveda et al. 2002) sowie unter Stickstoff- oder Kohlenstoff-limitierten Kulturbedingungen (Iloyshi et al. 1998) abgebaut werden kann. Außerdem ist anzunehmen, dass die strukturelle Integrität der thermoplastischen Matrix nach längerer Bewitterung (UV-Einwirkung, Oxidation) beeinträchtigt wird.

Das Ausmaß eines Pilzbefalls von WPC hängt im Wesentlichen von den folgenden Faktoren ab (Schirp et al. 2008):

- Menge des zur Verfügung stehenden Substrates, d.h. Anteil des Holzes im Werkstoff;

- Partikelgröße des Holzfüllstoffes;
- Feuchte des Holzes, wobei die im Vergleich zu Vollholz langsamere Wasseraufnahme von WPC von entscheidender Bedeutung ist;
- Qualität der Ummantelung der Holzpartikel durch Thermoplast (Thermoplast stellt eine physikalische Barriere für Pilzausbreitung dar);
- Beanspruchung der thermoplastischen Matrix durch Einwirkung von UV-Licht und Oxidationsprozesse;
- Güte der Holz-Kunststoff-Kopplung, d.h., wie viele Lücken sind zwischen Holz und Thermoplast vorhanden, die für die Ausbreitung der Pilzhyphen zur Verfügung stehen können.

Auch Schimmel- und holzverfärbende Pilze (Bläuepilze) sowie Algen rufen bei WPC Probleme hervor (Dawson-Andoh 2004, Laks et al. 2005, Van Acker 2006, Schirp et al. 2008). Hierbei handelt es sich jedoch in erster Linie um kosmetische Effekte, da die oben genannten Mikroorganismen in der Regel nicht die strukturellen Holzbestandteile abbauen können und thermoplastische Kunststoffe bekanntlich sehr resistent gegen Mikroben sind. Jedoch kann durch unansehnliche Verfärbungen im Produkt ein Schaden entstehen, der durch entsprechenden Wartungs- und Pflegeaufwand (Abbürsten, Hochdruckreinigung mit Wasser) kompensiert werden muss. Dieser steht dem ursprünglich angenommenen Vorteil von WPC, Wartungsfreiheit, entgegen.

Bisher liegen nur wenige Ergebnisse zur Dauerhaftigkeit von WPC aus Freilandversuchen vor (Verhey et al. 2003; Ibach und Clemons 2004). Seit Oktober 2000 bewerten Wissenschaftler des USDA Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin (USA) die Dauerhaftigkeit von WPC unter Freilandbedingungen, wobei die Ergebnisse kontinuierlich auf WPC-Konferenzen präsentiert werden.

3 Gegenstand und Ziele des Projekts, Lösungskonzept gemäß Projektantrag

Mögliche Strategien zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit (Resistenz gegen holzerstörende Pilze) von WPC orientieren sich zunächst an den vier grundlegenden Wachstumsanforderungen von Pilzorganismen (Zabel und Morrell 1992):

- Verfügbarkeit eines Substrats;
- Vorhandensein von Feuchtigkeit (Holzfeuchte oberhalb des Fasersättigungsbereiches, d.h., die Zellwände sind feuchtegesättigt, während die Zellhohlräume (Lumina) frei von Feuchte sind);
- Temperatur zwischen 5°C und 40°C mit einem Optimalbereich zwischen 24°C und 30°C;
- Verfügbarkeit von Sauerstoff.

Da es nicht praktikabel bzw. möglich ist, die Umgebungstemperatur von WPC-Produkten in einen Bereich zu verschieben, der langfristig außerhalb des Optimums für Pilzwachstum liegt, und auch die Verfügbarkeit von Sauerstoff nicht ausgeschlossen werden kann, basieren die Strategien zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit auf Substrat- und / oder Feuchteausschluß. Substrat- und / oder Feuchteausschluß kann durch Anwendung von Maßnahmen aus dem Bereich der Holzmodifizierung (Hill 2006) erreicht werden.

Im Projektantrag wurden verschiedene Strategien zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit beschrieben, und es wurde eine erste Vorauswahl an folgenden Strategien getroffen:

1. Verwendung von Holzpartikeln aus thermisch behandeltem Holz („Thermoholz“);
2. Verwendung von Partikeln aus dauerhaften Holzarten (z. B. Lärche, Robinie);
3. Verwendung sehr kleiner Holzpartikel zur Verbesserung der Ummantelung von Holz mit Kunststoff;
4. Refineraufschluß von Holz zum Herauslösen von hydrophilen Holzbestandteilen, zur Modifizierung der Faseroberflächen und damit zur

Verbesserung der Holz-Kunststoff-Kopplung; dies wiederum sollte zur Reduzierung der Wasseraufnahme und zur Verbesserung der Resistenz gegen den Abbau durch holzerstörende Pilze führen.

Da die Labor-Prüfungsmethode zur Resistenz von WPC gegen holzerstörende Pilze sehr zeitaufwendig ist und zudem noch wenige Erfahrungen mit dieser Methode vorliegen, konnten im Rahmen dieses Projektes nicht alle der oben genannten Strategien verfolgt werden. Es wurde in Diskussionen mit der Firma Valentin Holzwerkstoff GmbH beschlossen, die Strategien 2 und 4 im Rahmen dieses Projektes zu verfolgen. In Bezug auf Strategie 2 wurde Robinie (*Robinia pseudoacacia*) als dauerhafte Holzart ausgewählt.

Die Strategien zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit von WPC sollten sowohl in Labor- als auch in Freilanduntersuchungen angewendet und untersucht werden. Die Aussagekraft von Laborprüfungen ist nur dann gewährleistet, wenn die im Freiland gewonnenen Erkenntnisse die Laborergebnisse in angemessener Weise reflektieren. So ist es möglich, dass Prüfkörper, die in Laborprüfungen keine Schäden aufweisen, in Freilandprüfungen von holzerstörenden Pilzen befallen werden; jedoch ist auch der umgekehrte Fall möglich. Während einer Projektlaufzeit von zwei Jahren kann die Dauerhaftigkeit von WPC im Freiland nicht abschließend beurteilt werden. Die Freilandtests am Fraunhofer WKI wurden für eine Dauer von fünf Jahren eingerichtet, wobei die Prüfkörper in jährlichen Abständen untersucht werden.

Pilzbefall von Holz und von Produkten, die Holz enthalten, wird in Labortests meistens durch die Bestimmung von Masseverlusten in Prüfkörpern nach Beimpfung mit Prüfpilzen und einer definierten Inkubationszeit ermittelt. Für die Anwendung von Produkten für semi-konstruktive und konstruktive Einsatzbereiche ist außerdem die Ermittlung von mechanischen Eigenschaften nach Pilzbefall von Bedeutung. In diesem Projekt wurden daher neben der Bestimmung von möglichen Masseverlusten mechanische Eigenschaften der mit Basidiomyceten inkubierten WPC-Proben ermittelt. Hierbei sollte auch untersucht werden, ob die Inkubationszeit durch die Verwendung sehr kleiner Prüfkörper im Vergleich zur aktuellen Testmethode (ENV 12038 gemäß DIN CEN/TS 15534-1, 2007) signifikant reduziert werden kann.

4 Detaillierte Beschreibung der Methodik, Ergebnisse und Diskussion

Anmerkung: Die nachfolgende Beschreibung orientiert sich an der im Projektantrag enthaltenen Gliederung.

Arbeitsphase 1 (Monate 1-12):

„Extrusion von derzeit am Markt verfügbaren, repräsentativen WPC-Formulierungen für den Einsatz als Terrassendielen; hierbei sollen auch Formulierungen mit Haftvermittlern sowie ausgewählten Fungiziden hergestellt werden (Valentin)“:

Anmerkung: Formulierungen mit Fungiziden wurden in Absprache mit der DBU nicht hergestellt.

Die Firma Valentin stellte vier Rezepturen auf einem parallelen, gegenlaufenden Doppelschneckenextruder mit vorhergehender Compoundierung im Heiz-Kühl-Mischer her (Tabelle 1; %-Anteile sind Gewichtsprozente).

Tabelle 1: WPC-Rezepturen für Freilandversuche.

Rezept-Nr.	Holzmehl	HDPE	MAPE	Gleitmittel	Stabilisator
R1	50	49,5	0	0,3	0,2
R2	50	47,0	2,5	0,3	0,2
R4	75	22,0	2,5	0,3	0,2
R5	70	25,84	3,66	0,3	0,2

Arbeitsphase 1 (Monate 1-12):

„Installation von Freilandtests zur Bewertung der Dauerhaftigkeit der extrudierten Produkte (WKI, FH Eb)“:

Da in der relevanten DIN CEN/TS TS 15534-1 (2007) keine Verfahren zur Prüfung der biologischen Dauerhaftigkeit von WPC in Freilandtests enthalten sind, wurden die beiden im Folgenden beschriebenen Methoden ausgewählt. Auf dem Gelände der FH Eberswalde wurden Freilandtests installiert, bei denen die WPC-Terrassendielen keinen Bodenkontakt aufweisen (Abbildungen 1 und 2). Die

Terrassendielen (Rezepturen siehe Tabelle 1) wurden hierbei gemäß der Aufbauanleitung des Herstellers (Valentin) verlegt, um möglichst großen Praxisbezug zu erreichen. Für die Unterkonstruktion wurden ca. 2 cm dicke Gehwegplatten verwendet. Ein Gefälle von 2% wurde beim Einbau berücksichtigt.



Abbildung 1: Verlegung der WPC-Terrassendielen (FH Eberswalde) nach Aufbauanleitung.



Abbildung 2: Verlegte WPC-Terrassendielen (FH Eberswalde).

Auf dem Gelände des Fraunhofer WKI wurden die WPC-Terrassendielen in Anlehnung an DIN EN 252 („Freiland-Prüfverfahren zur Bestimmung der relativen Schutzwirkung eines Holzschutzmittels im Erdkontakt“) verlegt (Abbildung 3). Hierbei

wurden Vollholzproben aus Kiefer (Splint und Kern) als nicht-dauerhafte Referenz sowie geriffelte Bangkirai-Terrassendielen als dauerhafte Referenz verwendet. Die Modifizierung von DIN EN 252 bestand in geänderten Prüfkörperabmessungen, da kein Extruderwerkzeug vorhanden war, mit dem die nach DIN EN 252 erforderlichen Abmessungen extrudiert werden konnten. Somit wurden Prüfkörper aus WPC (vier Rezepturen), Bangkirai und Kiefer mit den Abmessungen 600 mm x 145 mm x 25 mm verwendet. Zusätzlich wurden Kiefersplintholzprüfkörper mit den Abmessungen 600 mm x 50 mm x 25 mm eingesetzt, um einige Prüfkörper verfügbar zu haben, die aufgrund ihrer Abmessungen und ihrer Zusammensetzung (nur Splintholz, kein Kern) als direkte Referenz gemäß DIN EN 252 dienen sollten. Die Prüfkörper wurden zur Hälfte in den Boden eingegraben. Die Abstände zwischen den Prüfkörpern betragen 300 mm und zwischen den Reihen 650-700 mm. Über einen Zeitraum von fünf Jahren sollen jedes Jahr fünf Prüfkörper entnommen werden, d.h., pro Variante (WPC-R1, WPC-R2, WPC-R4, WPC-R5, Kiefer, Kiefersplint, Bangkirai) wurden insgesamt 25 Prüfkörper verbaut. Insgesamt wurden somit 175 Prüfkörper (7 x 25) verbaut. Da das Freilandprüffeld am Fraunhofer WKI erst am 27.7.2009 fertig gestellt werden konnte (vgl. Projekt-Zwischenbericht), liegen die ersten Ergebnisse erst im nach dem 27.7.2010 vor. Die Ergebnisse werden aber der DBU und der Öffentlichkeit zugänglich gemacht.



Abbildung 3: Freiland-Versuchsfäche mit WPC-Prüfkörpern im Erdkontakt (WKI).

Die Auswertung der Freilandtests (WKI) umfasst die folgenden jährlichen Untersuchungen:

1. Ermittlung der Biegefestigkeit, des Biege-E-Moduls, der maximalen Bruchlast und der Durchbiegung bei einer Last von 500 N in Anlehnung an EN 310 unter

Verwendung von 600 mm langen Prüfkörpern und einer Stützweite von 500 mm, wobei beide Profilseiten (geriffelt, ungeriffelt) geprüft werden (vgl. Qualitäts- und Prüfbestimmungen für WPC-Terrassendecks, Qualitätsgemeinschaft Holzwerkstoffe e.V., Gießen, www.qg-holzwerkstoffe.de);

2. Ermittlung der Biegefestigkeit und des Biege-E-Moduls gemäß DIN EN ISO 178 unter Verwendung von Prüfkörpern der Abmessungen 80 mm x 10 mm x 4 mm;
3. Ermittlung der Charpy-Schlagzähigkeit nach ISO 179-1 (ungekerbt, Prüfkörperabmessungen 80 mm x 10 mm x 4 mm);
4. Dokumentation der Farbveränderungen der Materialien;
5. Dokumentation morphologischer Veränderungen an den Materialien aufgrund von biotischen Einflüssen (Pilze, Algen, Moose, etc.) und Witterungseinflüssen.

Bei den mechanischen Prüfungen nach dem ersten Jahr und in den jeweils darauffolgenden Jahren ist darauf zu achten, dass die Entnahmeposition der Prüfkörper aus den Profilen genau dokumentiert wird. Es wird erwartet, dass die größten Festigkeitsverluste der WPC in der Luft-Boden-Grenzzone (Abbildung 4) auftreten.

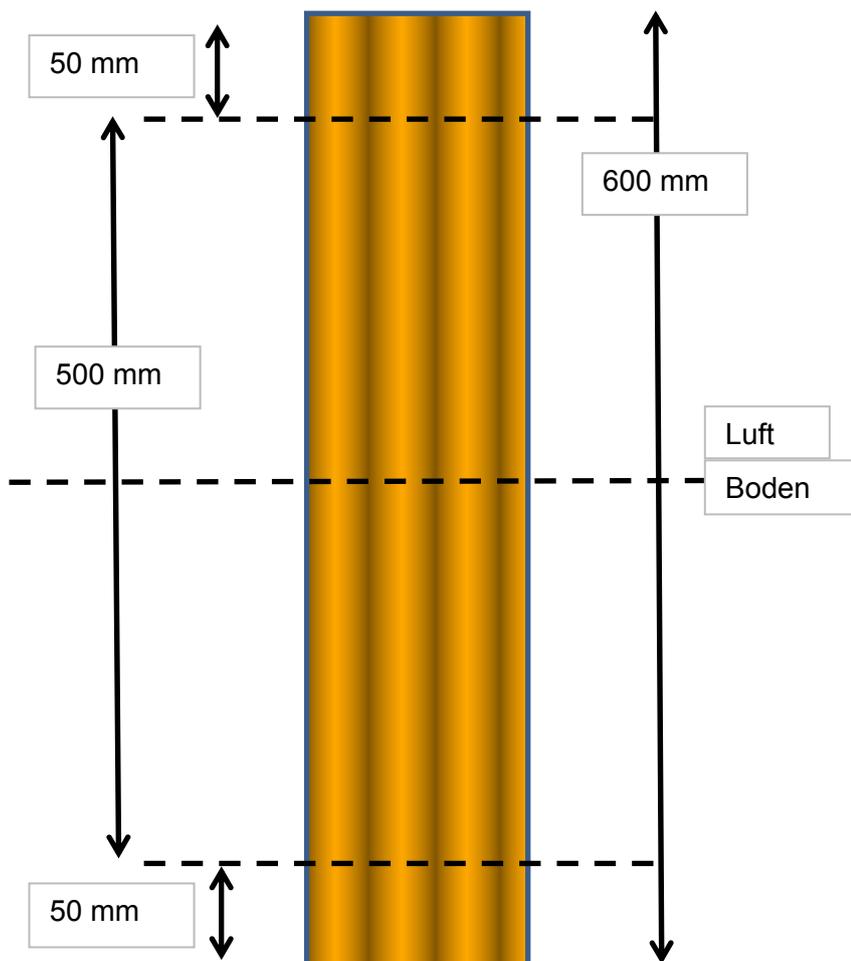


Abbildung 4: Prüfkörperabmessungen für den Freilandversuch (WPC im Erdkontakt) am Fraunhofer WKI.

Die kleinen Prüfkörper für die Ermittlung der Biegeeigenschaften und der Charpy-Schlagzähigkeit werden in Abbildung 5 gezeigt. Abschnitte der WPC-Profil- und Vollholzvarianten sind in den Abbildungen 6a-g zu sehen.

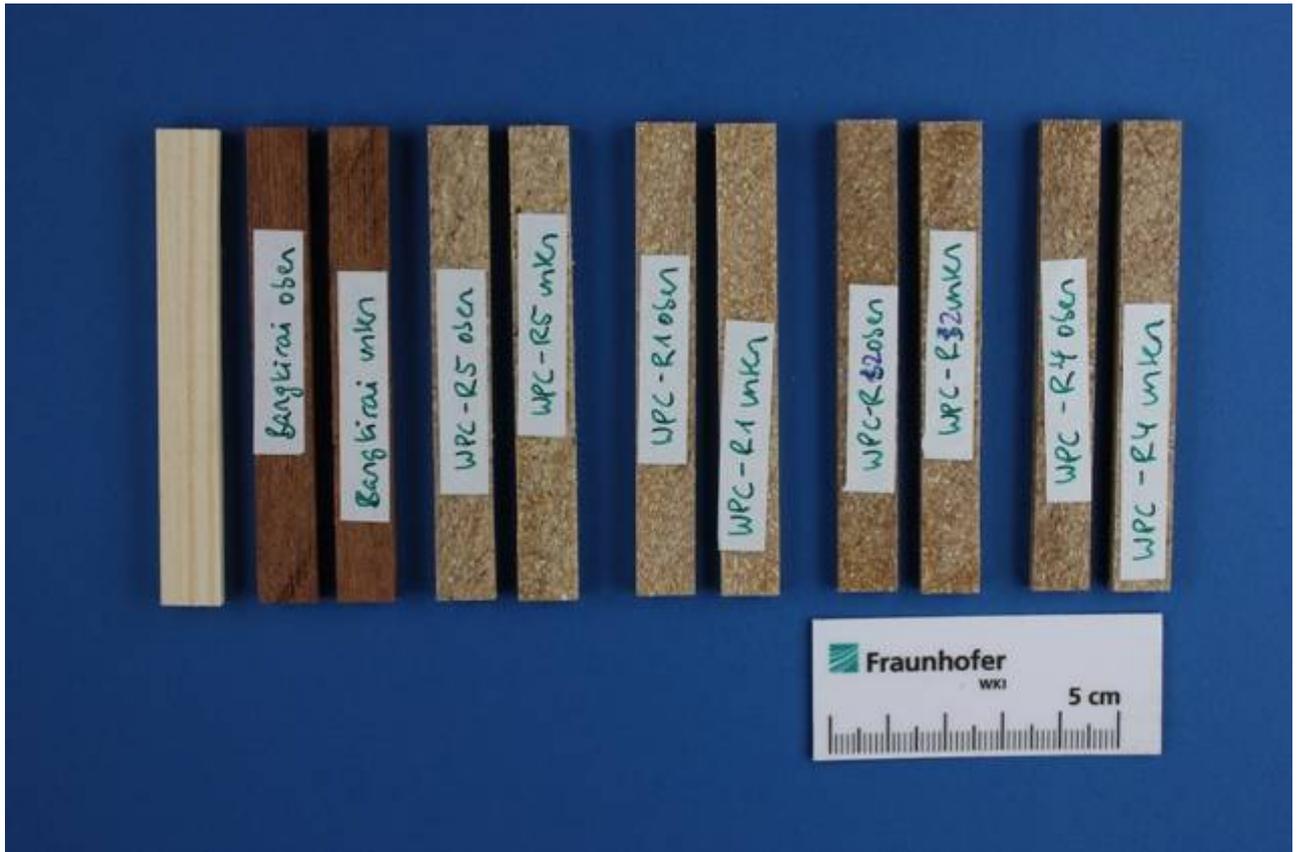
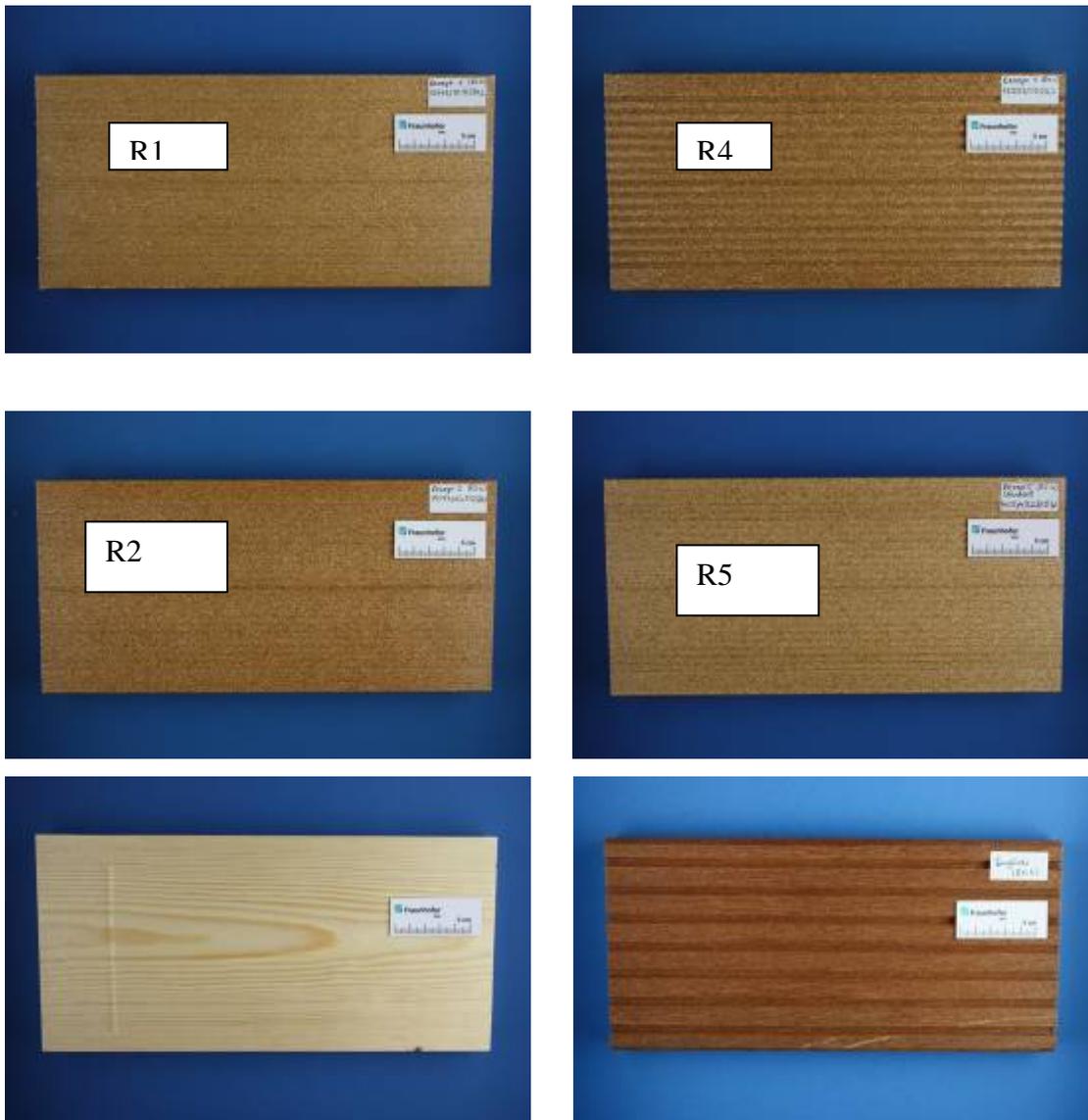


Abbildung 5: Prüfkörper für die Ermittlung der Biegeeigenschaften gemäß DIN EN ISO 178 und der Charpy-Schlagzähigkeit gemäß DIN EN ISO 179-1.



Abbildungen 6a-g: Abschnitte der WPC-Profil- und Vollholzvarianten.

Die Ergebnisse der mechanischen Prüfungen von Referenz-Prüfkörpern sind in den Abbildungen 7-12 dargestellt. Die Werte sind für sich genommen nicht besonders aussagekräftig, sondern sollen als Referenzwerte für die weiteren Prüfungen in den folgenden Jahren dienen. Es ist zu erkennen, dass die Rezeptur R5 (70% Holzmehl; 26% HDPE; 4% MAPP; 0,3% Gleitmittel; 0,2% Stabilisator) bei der Prüfung in Anlehnung an EN 310 die besten Biegeeigenschaften aufweist (Abbildungen 7 und 8). Wenn jedoch kleine Prüfkörper zugrunde gelegt werden (Abbildungen 11 und 12), ist die Rezeptur R5 hinsichtlich der Biegeeigenschaften nicht mehr den anderen Formulierungen überlegen; die Unterschiede zwischen den verschiedenen Rezepturen sind insgesamt geringer als bei der Prüfung in Anlehnung an EN 310.

Aus Abbildung 7 geht hervor, dass der optimale Gehalt an Holzmehl in Bezug auf die Biegefestigkeit etwa 70% beträgt (R5). Bei einem Holzgehalt von 50% (R1, R2) werden deutlich geringere Biegefestigkeiten erzielt. Der Haftvermittler (MAPP) bewirkt eine Verbesserung der Biegefestigkeit und des Biege-E-Moduls (vgl. R1 und R2; Abbildungen 7 und 8).

Bei allen Rezepturen bis auf R1 wird die Anforderung in Bezug auf maximale Durchbiegung bei einer Last von 500 N gemäß Qualitäts- und Prüfbestimmungen für WPC-Terrassendecks erfüllt (Abbildung 9). Die Rezepturen R4 (75% Holzgehalt) und R5 (70% Holzgehalt) weisen die geringste Durchbiegung auf.

Im Hinblick auf die Charpy-Schlagzähigkeit ist zu erkennen, dass mit einer Zunahme des Holzgehaltes eine Reduzierung der Schlagzähigkeit zu verzeichnen ist (Abbildung 10). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Schlagzähigkeit im Wesentlichen durch den Anteil an Polymermatrix (HDPE) bestimmt wird.

Ein allgemeiner Trend in Bezug auf einen möglichen Einfluss der Riffelung auf die Biegeeigenschaften der WPC-Rezepturen ist nicht erkennbar (Abbildungen 11 und 12).

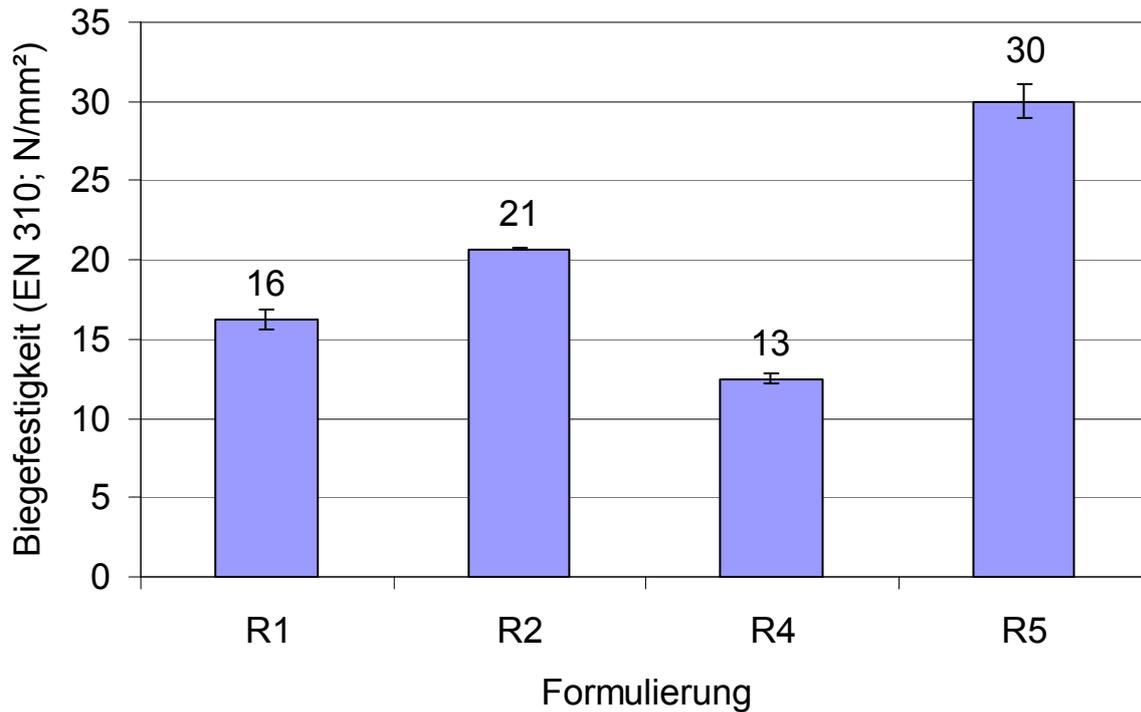


Abbildung 7: Biegefestigkeit (geprüft in Anlehnung an EN 310) der WPC-Referenz-Prüfkörper (ohne Bodenkontakt). Prüfkörperlänge 600 mm; grobe Riffelung geprüft in Zugbelastung. Informationen zur Zusammensetzung der Formulierungen sind in Tabelle 1 enthalten. Jede Säule repräsentiert den Mittelwert von vier Einzelwerten mit Ausnahme von R5 (fünf Einzelwerte). Die Biegefestigkeiten von Prüfkörpern aus Bangkirai und Kiefer betragen 130 N/mm^2 bzw. 96 N/mm^2 .

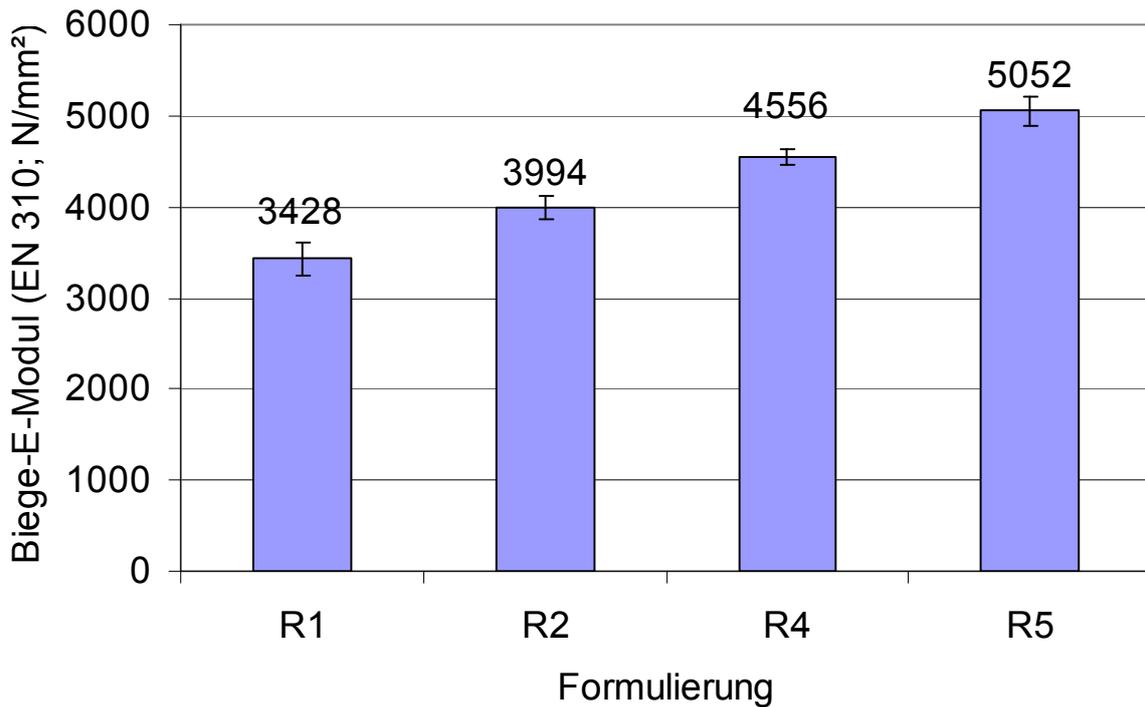


Abbildung 8: Biege-E-Modul (geprüft in Anlehnung an EN 310) der WPC-Referenz-Prüfkörper (ohne Bodenkontakt). Prüfkörperlänge 600 mm; grobe Riffelung geprüft in Zugbelastung. Informationen zur Zusammensetzung der Formulierungen sind in Tabelle 1 enthalten. Jede Säule repräsentiert den Mittelwert von vier Einzelwerten mit Ausnahme von R5 (fünf Einzelwerte). Die Biege-E-Module von Prüfkörpern aus Bangkirai und Kiefer betragen 12964 N/mm² bzw. 10376 N/mm².

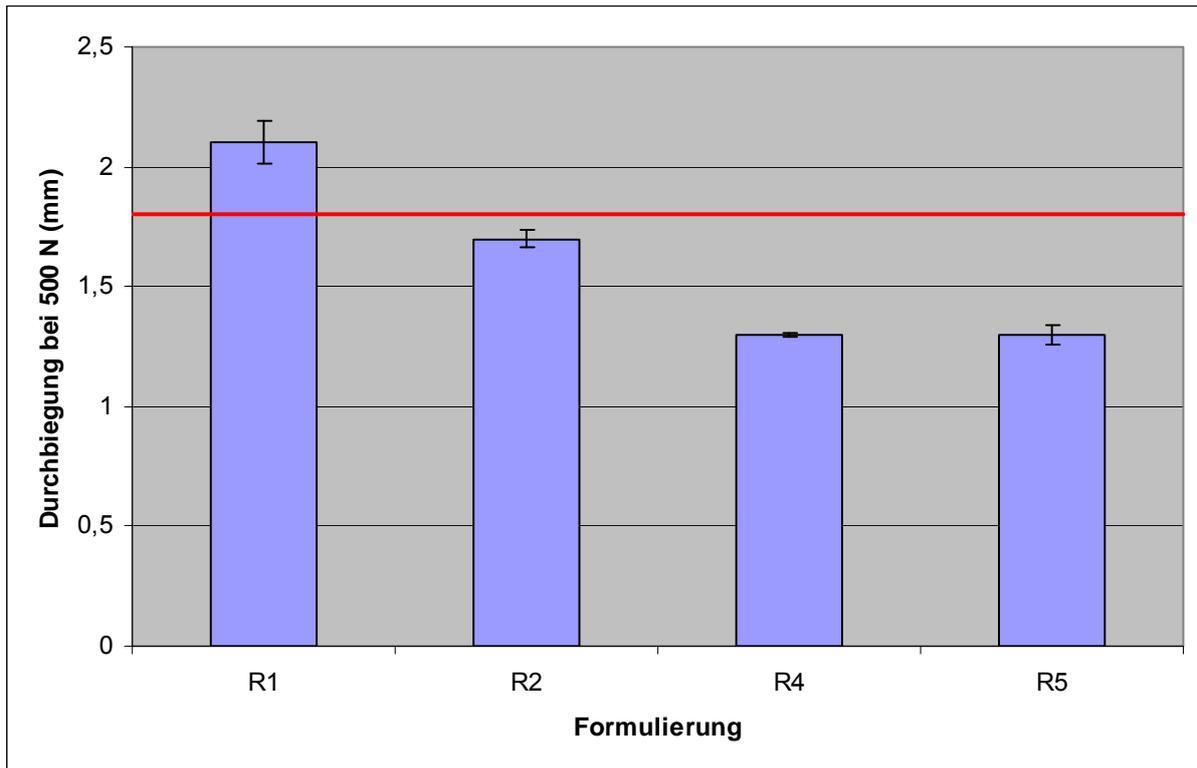


Abbildung 9: Durchbiegung (geprüft in Anlehnung an EN 310) der WPC-Referenz-Prüfkörper (ohne Bodenkontakt). Prüfkörperlänge 600 mm; grobe Riffelung geprüft in Zugbelastung. Jede Säule repräsentiert den Mittelwert von vier Einzelwerten mit Ausnahme von R5 (fünf Einzelwerte). Rote Linie repräsentiert die Anforderung gemäß Qualitäts- und Prüfbestimmungen für WPC-Terrassendecks. Informationen zur Zusammensetzung der Formulierungen sind in Tabelle 1 enthalten.

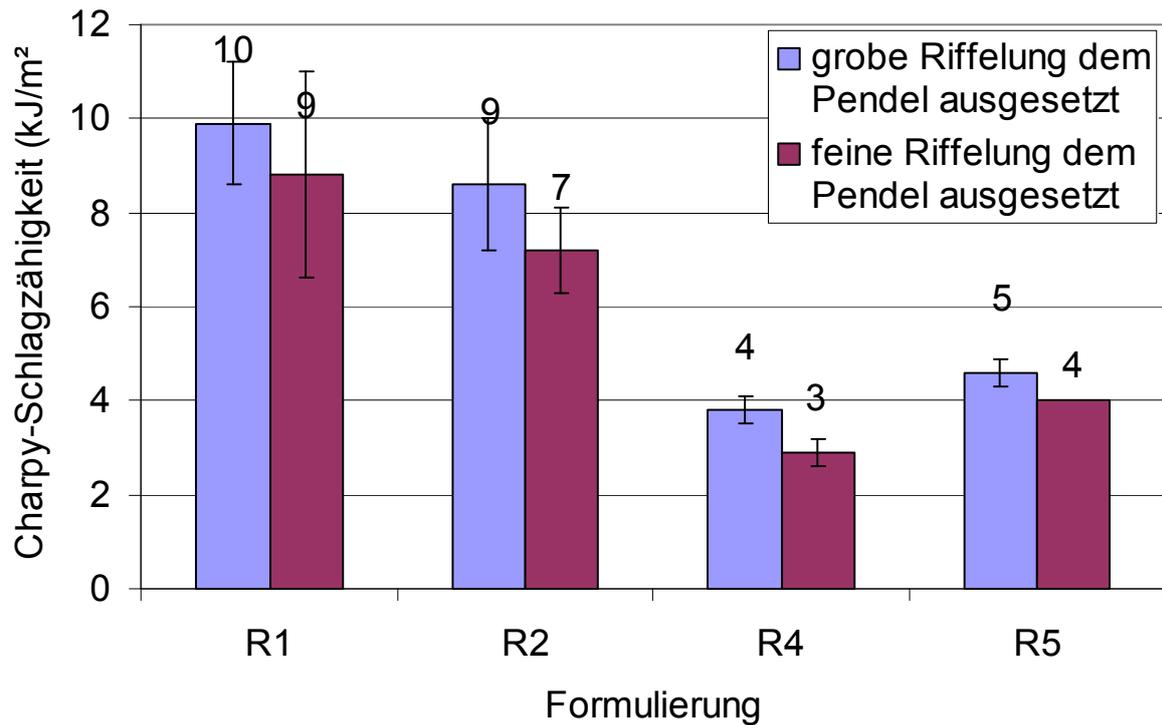


Abbildung 10: Charpy-Schlagzähigkeit (geprüft gemäß ISO 179-1, ungekerbt) der WPC-Referenz-Prüfkörper (ohne Bodenkontakt). Prüfkörperabmessungen 80 mm x 10 mm x 4 mm. Informationen zur Zusammensetzung der Formulierungen sind in Tabelle 1 enthalten. Jede Säule repräsentiert den Mittelwert von sechs bis acht Einzelwerten. Die Schlagzähigkeit von Prüfkörpern aus Bangkirai beträgt 38 kJ/m² (grobe Riffelung dem Pendel ausgesetzt) bzw. 44 kJ/m² (feine Riffelung dem Pendel ausgesetzt). Die Schlagzähigkeit von Prüfkörpern aus Kiefer beträgt 36 kJ/m² (keine Riffelung vorhanden).

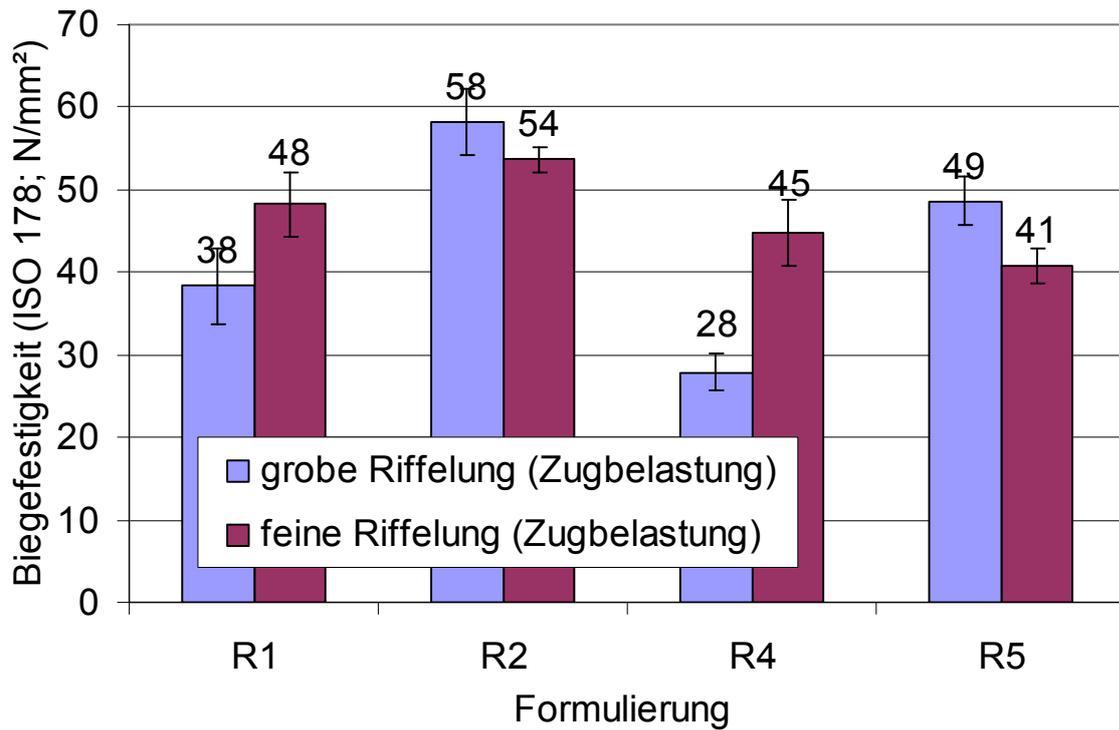


Abbildung 11: Biegefestigkeit (geprüft gemäß ISO 178) der WPC-Referenz-Prüfkörper (ohne Bodenkontakt). Prüfkörperabmessungen 80 mm x 10 mm x 4 mm. Informationen zur Zusammensetzung der Formulierungen sind in Tabelle 1 enthalten. Jede Säule repräsentiert den Mittelwert von sechs bis acht Einzelwerten. Die Biegefestigkeit von Prüfkörpern aus Bangkirai beträgt 169 N/mm² (grobe Riffelung in Zugbelastung geprüft) bzw. 144 N/mm² (feine Riffelung in Zugbelastung geprüft). Die Biegefestigkeit von Prüfkörpern aus Kiefer beträgt 110 N/mm² (keine Riffelung vorhanden).

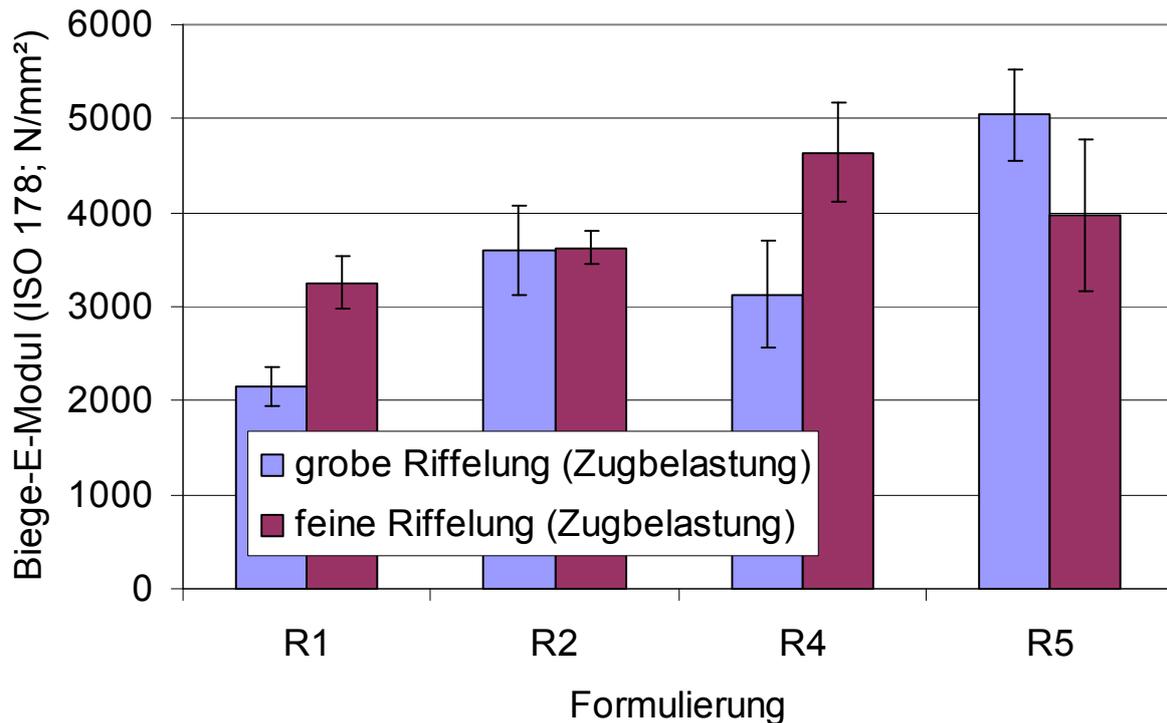


Abbildung 12: Biege-E-Modul (geprüft gemäß ISO 178) der WPC-Referenz-Prüfkörper (ohne Bodenkontakt). Prüfkörperabmessungen 80 mm x 10 mm x 4 mm. Informationen zur Zusammensetzung der Formulierungen sind in Tabelle 1 enthalten. Jede Säule repräsentiert den Mittelwert von sechs bis acht Einzelwerten. Der Biege-E-Modul von Prüfkörpern aus Bangkirai beträgt 19300 N/mm² (grobe Riffelung in Zugbelastung geprüft) bzw. 12843 N/mm² (feine Riffelung in Zugbelastung geprüft). Der Biege-E-Modul von Prüfkörpern aus Kiefer beträgt 12800 N/mm² (keine Riffelung vorhanden).

Arbeitsphase 1:

„Vorauswahl der Strategien zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit von WPC: Wirtschaftlichkeitsberechnungen und Prüfung der Rohstoffverfügbarkeit sowie der verfahrenstechnischen Umsetzbarkeit“:

Es wurde in Diskussionen mit der Firma Valentin Holzwerkstoff GmbH beschlossen, die Strategien 2 (Verwendung einer dauerhaften Holzart; hier: Robinie) und 4 (Verwendung von Refinerfasern) im Rahmen dieses Projektes zu verfolgen. Es ist bekannt, dass Robinie eine hohe Resistenz gegenüber mikrobiellem Angriff aufweist (Dauerhaftigkeitsklasse 1; EN 350-2, 1994), die auf hohe Anteile an Kernholz (80-90%) und Spätholzgefäßen (75-80%) sowie auf die Anwesenheit von Tanninen

zurückgeführt wird (Gehri und Kucera 1993). Es ist anzunehmen, dass die Extraktstoffe, z. B. Tannine, der Robinie eine Verbesserung der Resistenz gegen holzerstörende Pilze sowie eine Verbesserung der Interphasenhaftung zwischen den Holzfasern und PP bewirken.

Refinerfasern bieten die Möglichkeit einer echten Faserverstärkung im Gegensatz zur Verwendung von Holzmehl (Schirp und Stender 2009). Außerdem ist zu erwarten, dass die Wasseraufnahme und Quellung der WPC auf Basis von Refinerfasern aufgrund der beim Faseraufschluss herausgelösten hydrophilen Bestandteile reduziert werden kann. Voraussetzung zur erfolgreichen Umsetzung dieser Strategie ist jedoch, dass Refinerfasern bzw. Compound auf Basis von Refinerfasern in den Extruder dosiert werden können. Hierzu wurde vom Fraunhofer WKI aus eigenen Mitteln in ein Stopfwerk (Dosierwerk) investiert, das im Frühjahr 2009 installiert wurde.

Arbeitsphase 1:

„Herstellung von Probenmaterial für Labortest nach DIN CEN/TS 15534-1 (im Folgenden Standardtest genannt) und für den Schnelltest; zusätzlich zum Masseverlust wird eine mögliche Reduzierung der Schlagzähigkeit als Bewertungskriterium herangezogen (WKI)“:

Am Fraunhofer WKI wurden die in Tabelle 2 gezeigten folgenden Formulierungen hergestellt.

Tabelle 2: WPC-Rezepturen in Arbeitsphase 1 (Angaben in Gewichtsprozent).

Rezept-Nr.	Holzmehl	Polypropylen	MAPP	Gleitmittel
1	70	25,5	3	1,5
2	70	28,5	0	1,5
3	50	45,5	3	1,5
4	50	48,5	0	1,5
5	0	100,0	0	0

Als positive Kontrolle und zur Überprüfung der Pilz-Virulenz wurde Kiefern-Splintholz verwendet (Probe Nr. 6).

Die WPC-Formulierungen wurden folgendermaßen hergestellt:

Vor der Compoundierung wurde das Holzmehl (Lignocel® BK 40/90, Partikelgröße 300 – 500 µm, J. Rettenmaier & Söhne GmbH + Co. KG, Rosenberg) im Ofen bei 100°C bis auf eine Holzfeuchte von weniger als 2% getrocknet. Für die Herstellung des Compounds im Heizmischer (Typ TSHK 100, Papenmeier / Lödige, Paderborn) wurden neben Holzmehl Polypropylenfasern (6 mm und 12 mm Länge, Dichte 0.91 g/cm³, Belgian Fibers, Mouscron, Belgien), MAPP (Licocene® PP MA 7452, Clariant) und Gleitmittel (Licomont® ET 141, Clariant; Schmelzpunkt zwischen 76 °C und 81 °C; Grießform) verwendet. Ein Pflugscharmischer (Typ FM 130 DS, Lödige, Paderborn) wurde zur Abkühlung und weiteren Zerkleinerung des Compounds verwendet. Die Compounds mit 70% Holzmehl waren pulverförmig und gleichmäßig geformt, während die Compounds mit 50% Holzmehl zusammenhafteten und große, kugelförmige Körner enthielten. Daher wurden die Compounds mit 50% Holzmehl vor der Extrusion nochmals aufgemahlen. Die Compounds wurden auf einem konischen, gegenläufigen, 54 mm-Doppelschneckenextruder (Battenfeld MBEX 2-54 C) zu einem endlosen Tapeprofil (4 mm x 40 mm) extrudiert. Die Extrusionstemperatur betrug zwischen 150°C und 180°C. Nach der Extrusion wurden die Tapes bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchtigkeit für mehrere Wochen klimatisiert, und anschließend wurden die Proben für die Beimpfung mit den holzerstörenden Pilzen aus den Tapes geschnitten. Die Abmessungen der Proben für den Standardtest betragen 50 mm x 40 mm x 4 mm (Länge in Extrusionsrichtung x Breite x Dicke). Die Abmessungen der Proben für den Schnelltest betragen 15 mm x 10 mm x 4 mm (Länge in Extrusionsrichtung x Breite x Dicke). Die Prüfkörper aus den Tapes waren beidseitig glatt und durch die Extrusion versiegelt; nur an den Schnittkanten war keine Versiegelung vorhanden. Rezept 5 wurde hergestellt, indem das Polypropylen zu einer Platte verpresst wurde.

Arbeitsphase 1:

„Durchführung des Standardtests und des Schnelltests (Anhang 2) sowie Bewertung der Ergebnisse. Bewertungskriterien sind mögliche Masseverluste und Reduktion der Schlagzähigkeit (FH Eb)“:

Anmerkungen:

- *Alle Aufgaben in diesem Arbeitspaket bis auf den Dynstat-Test wurden vom Fraunhofer WKI durchgeführt.*
- *Anstelle der Schlagzähigkeit wurde die Biegefestigkeit als Kriterium für die Veränderungen im Material nach Pilzbefall herangezogen, da ansonsten die Prüfkörper für den Dynstat-Test (Schnelltest) mit einer Kerbe hätten versehen werden müssen; diese Kerbe hätte jedoch schon vor der Beimpfung mit den Pilzen eingebracht werden müssen.*

Prüfung der Resistenz von WPC gegen holzerstörende Pilze:

Durchführung des Standardtests:

Zur Prüfung der Beständigkeit der WPC gegen holzerstörende Basidiomyceten wurde der Labortest nach ENV 12038 gemäß CEN TS 15534-1 (2007) durchgeführt. Die Prüfung wurde mit einem Braunfäulepilz (*Gloeophyllum trabeum* (Pers.: Fr.) Murill (BAM Ebw. 109) und einem Weißfäulepilz (*Trametes versicolor* (Linnaeus: Fries) Pilat (CTB, 863a) über Inkubationszeiträume von jeweils 10 und 16 Wochen durchgeführt. Neben den Inkubationsvarianten mit Basidiomyceten wurden auch Proben ohne Pilze in Kulturgefäßen gelagert und geprüft (Agar-Kontrollen). Die Kulturgefäße (Fa. P.J.K. GmbH Industrievertretungen, Handel, Marketing) wurden vor der Beimpfung mit Pilzen durch Gamma-Strahlung (Fa. BBF-Sterilisationsservice GmbH) sterilisiert. Gemäß ENV 12038 wurde Malz-Extrakt-Agar-Medium vorbereitet und im Autoklaven sterilisiert. Die Prüfpilze wurden zunächst auf Virulenz geprüft und anschließend auf die Medien geimpft. Die Prüfkörper wurden bis zur Massekonstanz konditioniert (20°C und 65% rel. Luftfeuchte) und gewogen und anschließend in Alufolie gewickelt und im Autoklaven sterilisiert. Pro WPC-Formulierung und Agar-Kontrolle und pro Inkubationszeitraum (10 oder 16 Wochen) wurden vier Prüfkörper

verwendet (zwei Prüfkörper pro Kulturgefäß). Die Prüfkörper wurden auf sterilisierte Fächerscheiben ausgelegt, die auf den Prüfpilzen platziert wurden. Die Prüfkörper in den Kulturgefäßen wurden in abgedunkelten Kulturkammern bei $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ und $(70 \pm 5) \%$ relativer Luftfeuchte inkubiert. Nach der Inkubationsdauer von 10 oder 16 Wochen wurden die Prüfkörper aus den Kulturgefäßen entnommen. Das Mycel wurde vorsichtig von den Prüfkörpern entfernt, und die Prüfkörper wurden erneut gewogen. Anschließend wurde mittels Darrtrocknung der Feuchtegehalt der Prüfkörper nach der Inkubation ermittelt. Zusätzlich wurde an jeweils acht konditionierten (20°C und 65% rel. Luftfeuchte) Prüfkörpern von jeder Formulierung der Feuchtegehalt mittels Darrtrocknung bestimmt, um am Ende des Versuches mit Hilfe dieser Werte den Masseverlust berechnen zu können. Durch diese berechnete Ausgangsdarrtrockenmasse konnte durch den Vergleich mit der realen ermittelten Enddarrtrockenmasse nach der Inkubation der Masseverlust ermittelt werden. Dieses Verfahren wurde gewählt, da die Prüfkörper vor der Inkubation keiner Darrtrocknung unterzogen wurden, um das Holz und die Polymermatrix nicht zu verändern.

Durchführung des Schnelltests:

Neben den Prüfkörpern mit den Standardabmessungen nach ENV 12038 wurden für zwei Inkubationszeiträume jeweils 4 kleinere Proben mit den Maßen $15\text{mm} \times 10\text{mm} \times 4\text{mm}$ (Länge x Breite x Dicke) verwendet. Der Inkubationszeitraum wurde aufgrund der kleineren Prüfkörperabmessungen auf 6 und 12 Wochen verkürzt. Im Anschluss an die Inkubation wurde nach dem Entfernen des Mycels und einer Konditionierung bei 20°C und 65% rel. Luftfeuchte ein Dynstat-Test gemäß DIN 53435 (1983) zur Ermittlung der Biegefestigkeit durchgeführt. Der Dynstat-Test zählt zu den Verfahren nach Izod, bei denen ein einseitig eingespannter Prüfkörper verwendet wird. Da es sich um einen zerstörenden Test handelt, kann nicht an ein- und demselben Prüfkörper vor und nach der Inkubation die Biegefestigkeit ermittelt werden. Daher wurden die Biegefestigkeiten von mit Pilzen beimpften Prüfkörpern und unbeimpften Prüfkörpern (auf Agar gelagert) verglichen. Zusätzlich wurden Prüfkörper verwendet, die weder mit noch ohne Pilze inkubiert worden waren, um die Effekte von Pilzen und Feuchtaufnahme zu trennen. Es ist gezeigt worden, dass Feuchtaufnahme die mechanischen Eigenschaften von WPC stärker beeinflussen kann als die Besiedlung mit holzerstörenden Pilzen (Schirp und Wolcott 2005).

Berechnung des Masseverlustes:

Der Masseverlust der WPC-Prüfkörper wurde auf den Trockenholzgehalt (ml_w) bezogen unter der Annahme, dass die Kunststoffmatrix nicht von den verwendeten holzerstörenden Pilzen abgebaut wird (Albertsson et al. 1987). Für die Bestimmung des Masseverlustes (ml_w) wurde folgende Formel nach ENV 12038 gemäß DIN CEN/TS 15534-1 (2007) verwendet:

$$ml_w = ((m_1 - m_3) / (m_1 \times (\text{Trockenholzgehalt des WPC-Werkstoffes in } \%))) \times 10000$$

m_1 = Ausgangsdarrtrockenmasse (berechnet)

$$\rightarrow (m_0 / (m_4 + 100)) \times 100$$

m_0 = Ausgangsmasse von Kontrollproben nach Konditionierung

m_4 = Ausgangsfeuchtegehalt der unbehandelten Proben (Durchschnitt)
(siehe Tab. 3)

m_3 = Enddarrtrockenmasse

Tabelle 3: Durchschnittliche Ausgangsfeuchtegehalte (m_4) der WPC (ohne Beimischung und ohne Inkubation) nach Konditionierung, ermittelt durch Darrtrocknung gemäß der Formel: $((m_{\text{feucht}} - m_{\text{darr}}) / m_{\text{darr}}) \times 100$. Zur Zusammensetzung der WPC siehe Tabelle 2.

Formulierung-Nr.	#1 WPC	#2 WPC	#3 WPC	#4 WPC	#5 PP	#6 Kiefernspint
Ø Feuchtegehalt [%]	2,4	3,6	1,8	2,0	0	12,2

Berechnung des Feuchtegehaltes:

Der Feuchtegehalt der WPC-Proben (mc_w) nach der Konditionierung wurde ebenfalls auf den Trockenholzgehalt bezogen und nach ENV 12038 gemäß DIN CEN/TS 15534-1 (2007) berechnet:

$$mc_w = ((m_2 - m_3) / (m_3 \times (\text{Trockenholzgehalt des WPC-Werkstoffes in } \%))) \times 10000$$

m_2 = Masse der feuchten Probe nach Inkubation

m_3 = Enddarrtrockenmasse

Ergebnisse und Diskussion:

Standardtest:

Die statistische Auswertung ergab, dass die Inkubationsdauer nicht den signifikanten Haupteffekt darstellte. Daher wurden die Ergebnisse für die 10- und 16-wöchige Inkubationsdauer gemeinsam ausgewertet. Bei den geprüften WPC-Formulierungen ergab sich insgesamt ein maximaler Masseverlust von 3,4% nach 16 Wochen Inkubation mit holzerstörenden Pilzen (Tabelle 4). Dieser maximale Masseverlust wurde bei den WPC-Prüfkörpern mit 70% Holzmehl, 28,5% PP, 0% MAPP, 1,5% Gleitmittel (Formulierung Nr. 2) ermittelt, die mit dem Braunfäulepilz *Gloeophyllum trabeum* inkubiert wurden. Bei der entsprechenden WPC-Formulierung mit Haftvermittler (70% Holzmehl, 25,5% PP, 3% MAPP und 1,5% Gleitmittel; Formulierung Nr. 1) wurde dagegen nur ein Masseverlust von 0,4% ermittelt. Dies zeigt, dass der Haftvermittler einen deutlichen Einfluss auf die Masseverluste der WPC hat (geringere Masseverluste bei Verwendung von MAPP). Dies spiegelt sich auch bei der Betrachtung der Feuchtegehalte der WPC wieder: Bei den WPC ohne MAPP (3,4% Masseverlust) betrug der Feuchtegehalt 32%, während er bei den WPC mit MAPP (0,4% Masseverlust) nur 23% betrug. D.h., wenn die Feuchteaufnahme der WPC durch Anwesenheit von MAPP reduziert wird, wird auch der Abbau der WPC durch holzerstörende Pilze reduziert.

Bei den WPC mit 50% Holzanteil (Formulierungen Nr. 3 und 4) ergaben sich niedrigere Masseverluste (maximal 2,4%) als bei den WPC mit 70% Holzanteil (Formulierungen Nr. 1 und 2). D.h., neben dem Haftvermittler hat auch der Holzanteil einen Einfluss auf die Resistenz von WPC gegen holzerstörende Pilze.

Insgesamt wurden nur durch den Braunfäulepilz *Gloeophyllum trabeum* Masseverluste in den WPC bewirkt. Durch den Weißfäulepilz *Trametes versicolor* wurden keine Masseverluste in den WPC hervorgerufen. Dies ist insofern zu erwarten, als das in den WPC eingesetzte Holzmehl aus Nadelhölzern besteht und Nadelhölzer bevorzugt von Braunfäulepilzen abgebaut werden (Schmidt 1994).

Tabelle 4: Masseveränderungen und Holzfeuchten (jeweils basierend auf dem Trockenholzgehalt) der vier WPC-Formulierungen, der negativen Kontrolle (Polypropylen, PP) und der positiven Kontrolle (Kiefern-Splintholz, KS) nach einer Inkubationszeit von 10 und 16 Wochen mit *G. trabeum* (Braunfäule) und *T. versicolor* (Weißfäule). Die Formulierungen bestehen aus Holzmehl / Polypropylen / Haftvermittler (MAPP) / Gleitmittel (Angaben in Gew.-%). Formulierung #1: 70 / 25,5 / 3 / 1,5; Formulierung #2: 70 / 28,5 / 0 / 1,5; Formulierung #3: 50 / 45,5 / 3 / 1,5; Formulierung #4: 50 / 48,5 / 0 / 1,5.

Material	Inkubationsvariante	Probenanzahl	Masseverlust [%]		Feuchtegehalt [%]	
			Mittelwert	Stabw.*	Mittelwert	Stabw.*
#1 WPC	<i>G.trabeum</i>	8	0,4	0,6	23	5
	<i>T.versicolor</i>	7	-1,2	0,9	24	2
	Inkubiert ohne Pilz	6	-1,1	0,8	21	2
#2 WPC	<i>G.trabeum</i>	8	3,4	1,7	32	3
	<i>T.versicolor</i>	8	-0,4	0,3	28	2
	Inkubiert ohne Pilz	6	-0,4	0,3	27	1
#3 WPC	<i>G.trabeum</i>	8	-0,1	1,0	20	5
	<i>T.versicolor</i>	8	-0,7	0,7	22	2
	Inkubiert ohne Pilz	8	-1,8	0,9	19	3
#4 WPC	<i>G.trabeum</i>	7	2,4	1,5	27	4
	<i>T.versicolor</i>	8	-0,1	0,8	23	4
	Inkubiert ohne Pilz	8	0,1	1,5	18	3
#5 PP (Neg.)	<i>G.trabeum</i>	7	0,0	0,4	0	0
	<i>T.versicolor</i>	6	0,6	0,4	0	0
	Inkubiert ohne Pilz	6	-1,0	0,8	0	0
#6 KS (Pos.)	<i>G.trabeum</i>	8	24,0	0,9	76	8
	<i>T.versicolor</i>	8	24,3	3,4	86	26
	Inkubiert ohne Pilz	8	-2,2	0,9	36	3

* Stabw. = Standardabweichung

Gemäß CEN/TS 15534-1 (2007) weisen WPC eine hohe Resistenz gegen Benetzung auf, wenn der Masseverlust der Prüfkörper weniger als 3% und der Holzfeuchtegehalt weniger als 25% beträgt. Diese Eigenschaft bewirkt einen Schutz gegen den Befall mit holzerstörenden Pilzen, solange sie erhalten bleibt (CEN/TS 15534-1, 2007). Insofern weisen alle geprüften WPC-Formulierungen bis auf die Formulierung Nr. 2 (70% Holzmehl, 28,5% PP, 0% MAPP, 1,5% Gleitmittel) unter den Versuchsbedingungen eine hohe Resistenz gegen holzerstörende Pilze auf. Bei den Prüfkörpern aus Polypropylen traten keine bzw. sehr geringe (0,6%) Masseverluste auf. Diese Prüfkörper nahmen während der Inkubation keine Feuchte auf. Die Referenz-Prüfkörper aus KiefernSplintholz wiesen nach Inkubation mit *G.*

trabeum und mit *T. versicolor* einen mit 24% deutlich höheren Masseverlust als die WPC auf. Hierbei lagen die Holzfeuchten der Prüfkörper nach 16 Wochen Inkubation bei 76% bzw. 86% (Tabelle 4). Diese Holzfeuchten liegen im Optimalbereich (40 bis 80%) für den Abbau von Holzsubstrat durch holzerstörende Pilze (Scheffer 1973). An den auf Agar und ohne Pilze inkubierten Prüfkörpern traten keine Masseverluste auf.

Schnelltest:

Die Masseverluste der Dynstat-Prüfkörper nach dem Entfernen des Mycels konnten nicht ermittelt werden, da sich aufgrund des geringen Gewichtes der Prüfkörper sehr große Abweichungen bei den Prüfkörpern identischer Formulierungen ergaben. Die Ergebnisse des Dynstat-Tests werden in den Abbildungen 13 und 14 gezeigt. Beim Versuchsaufbau wurde berücksichtigt, dass die Effekte der Feuchteaufnahme und des Abbaus der WPC durch holzerstörende Pilze getrennt werden sollten. Ein Vergleich der Werte für die Biegefestigkeit der „klimatisierten Kontrollen“ mit den „inkubierten Kontrollen“ zeigt, dass nach 12 Wochen Inkubation die Biegefestigkeit allein durch die Feuchteaufnahme der Prüfkörper reduziert wurde (Abbildung 14). Dies trat sowohl bei den WPC als auch bei den Prüfkörpern aus Kiefernspiltholz auf.

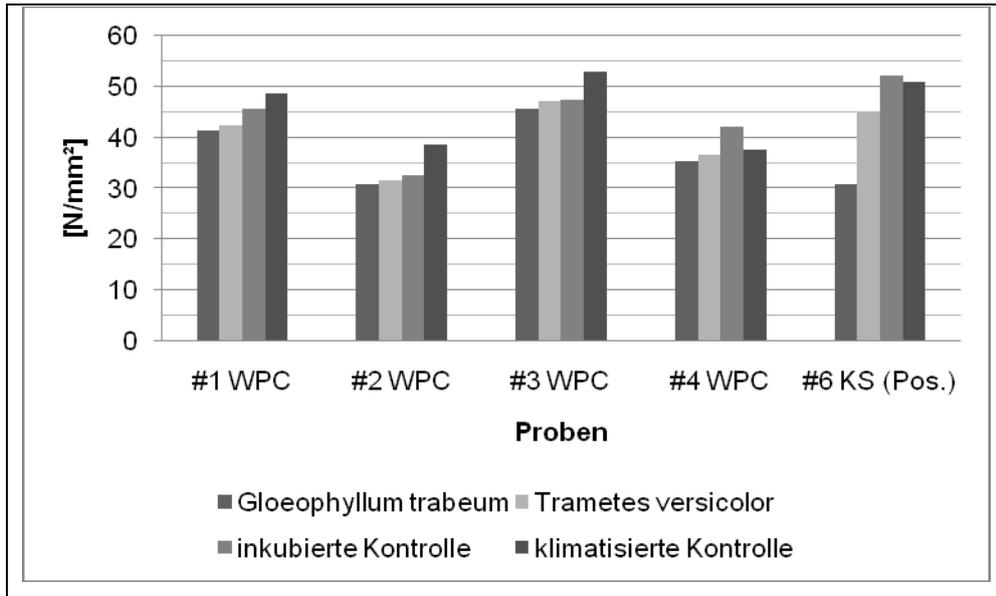


Abbildung 13: Biegefestigkeiten von WPC nach 6 Wochen Inkubationszeit. Die Formulierungen bestehen aus Holzmehl / Polypropylen / Haftvermittler (MAPP) / Gleitmittel (Angaben in Gew.-%). Formulierung #1: 70 / 25,5 / 3 / 1,5; Formulierung #2: 70 / 28,5 / 1,5; Formulierung #3: 50 / 45,5 / 3 / 1,5; Formulierung #4: 50 / 48,5 / 0 / 1,5. KS bedeutet Kiefernspiltholz.

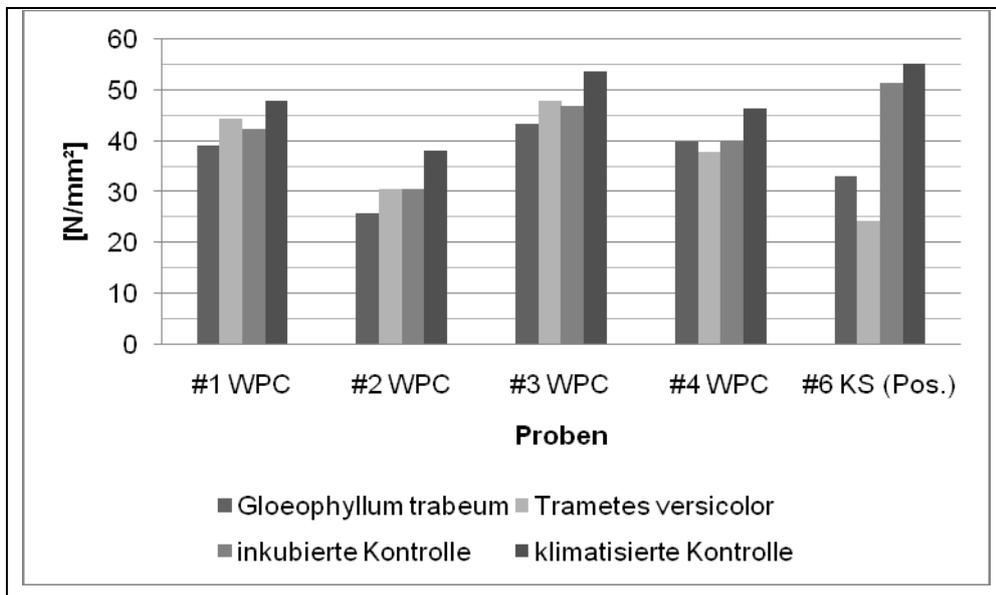


Abbildung 14: Biegefestigkeiten von WPC nach 12 Wochen Inkubationszeit. Die Formulierungen bestehen aus Holzmehl / Polypropylen / Haftvermittler (MAPP) / Gleitmittel (Angaben in Gew.-%). Formulierung #1: 70 / 25,5 / 3 / 1,5; Formulierung #2: 70 / 28,5 / 1,5; Formulierung #3: 50 / 45,5 / 3 / 1,5; Formulierung #4: 50 / 48,5 / 0 / 1,5. KS bedeutet Kiefernspiltholz.

Ein Vergleich der Werte für die Biegefestigkeit der „inkubierten Kontrollen“ mit den Werten für die beiden Prüfpilze zeigt den Einfluss der holzerstörenden Pilze auf. Es ist zu erkennen, dass der Einfluss der Feuchteaufnahme auf die Biegefestigkeit der WPC größer ist als der Einfluss der holzerstörenden Pilze. Dieser Effekt ist bereits beschrieben worden (Schirp und Wolcott 2005). Bei den Vollholzprüfkörpern aus Kiefernspint ist dagegen zu erkennen, dass die holzerstörenden Pilze die Biegefestigkeit stärker reduzieren als die Feuchteaufnahme allein.

Schlussfolgerungen:

- Die untersuchten WPC wiesen unter den verwendeten Bedingungen und nach den Anforderungen der DIN CEN/TS 15534-1 (2007) eine hohe Beständigkeit gegen holzerstörende Pilze auf. Der Masseverlust der WPC betrug weniger als 3% (Anforderung gemäß DIN CEN/TS 15534-1), mit Ausnahme einer WPC-Formulierung mit 70% Holzgehalt und ohne Haftvermittler (MAPP); hier war der Masseverlust jedoch nur geringfügig höher als gemäß Anforderung (3,4%).
- Es wurden nur durch den Braunfäulepilz *Gloeophyllum trabeum* Masseverluste in den WPC bewirkt. Durch den Weißfäulepilz *Trametes versicolor* wurden keine Masseverluste in den WPC hervorgerufen. Dies ist insofern zu erwarten, als das in den WPC eingesetzte Holzmehl aus Nadelhölzern besteht und Nadelhölzer bevorzugt von Braunfäulepilzen abgebaut werden.
- Der Einsatz eines Haftvermittlers (MAPP) reduzierte die Wasseraufnahme der WPC und damit die Anfälligkeit für einen Masseverlust der WPC aufgrund von Basidiomyceten.
- Der Masseverlust von WPC aufgrund von Abbau durch holzerstörende Pilze scheint mit zunehmendem Holzanteil zu steigen.
- Der Einfluss der Feuchteaufnahme auf die Biegefestigkeit (ermittelt im Dynstat-Test) der WPC ist größer als der Einfluss der holzerstörenden Pilze. Dies betätigt die Ergebnisse früherer Untersuchungen.
- Da mit dem Schnelltest (Dynstat) keine Informationen über mögliche Masseverluste erhalten werden konnten, wurde der Standardtest in den weiteren Untersuchungen (Arbeitsphase 2) verwendet.

Arbeitsphase 2:

„Erste Evaluierung der Proben aus Freilandtests (WKI, FH Eb)“

Da die Freilandprüffläche am Fraunhofer WKI erst im Juli 2009 fertig gestellt wurde, wird eine erste Evaluierung der Proben im Juli 2010 erfolgen.

Arbeitsphase 2:

„Durchführung der in AP 1 festgelegten Strategien zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit von WPC (WKI, Valentin)“ und „Untersuchung der Dauerhaftigkeit ausgewählter WPC-Formulierungen mittels Schnelltest (wenn dieser nicht verworfen wurde), sonst mittels Standardtest (FH Eb)“

Anmerkung: Die Untersuchung der Dauerhaftigkeit der WPC wurde nicht von der FH Eberswalde durchgeführt, sondern vom Fraunhofer WKI.

Wie bereits beschrieben, wurde der Standardtest in den weiteren Untersuchungen (Arbeitsphase 2) verwendet. Um Masse- und Festigkeitsverluste an ein- und denselben Prüfkörpern ermitteln und in Bezug setzen zu können, wurden zusätzlich Prüfkörper in den Abmessungen 80 mm x 10 mm x 4 mm verwendet.

Für die Untersuchungen wurden die folgenden Materialien in den WPC-Formulierungen verwendet:

Refinerfasern (thermomechanisch aufgeschlossener Holzfaserstoff) wurden im Fraunhofer WKI mittels eines 12 inch (30,5 cm)-Scheibenrefiners (Andritz, Graz, Österreich) hergestellt. Hackschnitzel aus Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) und Robinie (*Robinia pseudoacacia* L.) wurden bei 150°C und 5 bar für 5 Minuten aufgeschlossen. Die Fasern wurden unbeleimt durch die Blowline ausgetragen und in einem Rohrtrockner getrocknet. Der Holzfeuchtegehalt der Fasern nach der Trocknung betrug ca. 10%. Holzmehl aus Kiefer und Robinie wurde in einer Condux-Mühle (Pallmann, Zweibrücken) auf eine Partikelgröße von weniger als 1 mm zerkleinert. Als Matrixpolymer wurden PP-Fasern ohne Copolymer verwendet (Belgian Fibers; Mouscron, Belgien; 6 mm Länge, Schmelzflussindex 13 g / 10 min). Als Haftvermittler wurde ein niedermolekulares, Maleinsäureanhydrid-modifiziertes

PP (MAPP; Licocene® PP MA 6252; Propfgehalt 7%, Schmelzpunkt ca. 140°C; Clariant, Gersthofen) in Granulatform eingesetzt. Außerdem wurde ein Gleitmittel auf Basis von Esterwachs (Licolub® H12, Clariant) verwendet.

Am Fraunhofer WKI wurden die in Tabelle 5 gezeigten Formulierungen hergestellt.

Tabelle 5: WPC-Rezepturen in Arbeitsphase 2. %-Anteile sind Gewichtsprozente. Die Rezeptbezeichnung setzt sich zusammen aus Holzart („K“ bedeutet Kiefer, „R“ bedeutet Robinie) / Form des Holzsubstrates („M“ bedeutet „Holzmehl“, „RF“ bedeutet „Refinerfaser“) / Haftvermittler MAPP („+“ bedeutet MAPP vorhanden, „-“ bedeutet MAPP nicht vorhanden).

Rezept-Bez.	Holzart	Holzmehl	Refinerfasern	PP-Fasern	MAPP	Gleitmittel
KM+	Kiefer	70	-	25,5	3	1,5
KRF+	Kiefer	-	70	25,5	3	1,5
KRF-	Kiefer	-	70	28,5	0	1,5
RM+	Robinie	70	-	25,5	3	1,5
RRF+	Robinie	-	70	25,5	3	1,5
RRF-	Robinie	-	70	28,5	0	1,5

Vor der Compoundierung wurden die Refinerfasern und das Holzmehl bei 100°C im Trockenschrank getrocknet, bis ein Holzfeuchtegehalt von weniger als 6% erreicht wurde. Die Compoundierung erfolgte in einem Heizmischer (TSHK 100, Papenmeier / Lödige, Paderborn) und nachfolgend einem Pflugscharmischer (FM 130 DS, Lödige, Paderborn). Der Holzfeuchtegehalt der Compounds betrug ca. 1%. Die Compounds wurden über ein Stopfwerk (KSW, Kreyenborg GmbH, Münster) einem konischen, gegenläufigen Doppelschneckenextruder (Battenfeld miniBEX 2-54C) zugeführt und zu Hohlkammerprofilen mit drei Kammern (70 mm x 17 mm, Wandstärke 4 mm; glatte Oberfläche) extrudiert. Die Extrusionstemperaturen betragen zwischen 160°C und 190°C.

Aus den WPC-Profilen wurden Prüfkörper hergestellt, indem die Stege und Schmalseiten der Profile entfernt wurden. Es wurden zwei Sätze von Prüfkörpern hergestellt:

- Probensatz a): Prüfkörper mit den Abmessungen 50 mm (Länge) x 40 mm (Breite) x 4 mm (Dicke) in Anlehnung an DIN CEN/TS 15534-1 (2007) bzw. DIN EN 12038 (1996);

- Probensatz b): Prüfkörper mit den Abmessungen 80 mm x 10 mm x 4 mm gemäß DIN EN ISO 178 bzw. DIN EN ISO 179-1 (2001).

Probensatz a) wurde zur Ermittlung der Masseverluste der WPC nach der Inkubation mit holzerstörenden Pilzen verwendet. Probensatz b) wurde zur Ermittlung der Masse- und Festigkeitsverluste der WPC nach der Inkubation mit holzerstörenden Pilzen eingesetzt. Für beide Probensätze wurden Prüfkörper aus Kiefernspiltholz (geringe Resistenz gegen holzerstörende Pilze) als positive Kontrolle und Prüfkörper aus Polypropylen (hohe Resistenz) als negative Kontrolle verwendet. Polypropylen-Prüfkörper wurden im Plattenpressverfahren hergestellt.

Der Versuchsaufbau war folgendermaßen:

Probensatz a): Ermittlung der Masseverluste:

Für jede WPC-Rezeptur und jede Kontrolle (Kiefer, PP) wurden 80 Prüfkörper verwendet. Diese 80 Prüfkörper setzten sich folgendermaßen zusammen:

- Jeweils 16 Prüfkörper wurden zur Inkubation mit einem Weißfäulepilz (*Trametes versicolor*, Linnaeus: Fries, Pilat, CTB 863a) und einem Braunfäulepilz (*Gloeophyllum trabeum*, (Pers.: Fr.) Murill, BAM Ebw. 109) verwendet; jeweils zwei Prüfkörper wurden in ein Inkubationsgefäß eingebracht.
- Jeweils 16 Prüfkörper wurden auf Agar, jedoch ohne Inokulum, in Inkubationsgefäße eingebracht; hier wurden wiederum jeweils zwei Prüfkörper pro Inkubationsgefäß verwendet.
- 16 Prüfkörper wurden zur Berechnung der WPC-Trockengewichte verwendet.
- 16 Prüfkörper wurden bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchte klimatisiert.

Somit ergab sich für die sechs WPC-Rezepturen und die beiden Kontrollen (Kiefernspiltholz und PP) eine Gesamtprüfkörperanzahl von $80 \times 8 = 640$.

Probensatz b): Ermittlung der Masse- und Festigkeitsverluste:

Für jede WPC-Rezeptur und jede Kontrolle (Kiefer, PP) wurden 30 Prüfkörper verwendet. Diese 30 Prüfkörper setzten sich folgendermaßen zusammen:

- Jeweils sechs Prüfkörper wurden zur Inkubation mit einem Weißfäulepilz (*Trametes versicolor*, Linnaeus: Fries, Pilat, CTB 863a) und einem Braunfäulepilz (*Gloeophyllum trabeum*, (Pers.: Fr.) Murill, BAM Ebw. 109) verwendet; alle sechs Prüfkörper wurden in ein Inkubationsgefäß eingebracht.
- Jeweils sechs Prüfkörper wurden auf Agar, jedoch ohne Inokulum, in Inkubationsgefäße eingebracht; hier wurden wiederum jeweils sechs Prüfkörper pro Inkubationsgefäß verwendet.
- Sechs Prüfkörper wurden zur Berechnung der WPC-Trockengewichte verwendet.
- Sechs Prüfkörper wurden bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchte klimatisiert.

Insgesamt wurden für die sechs WPC-Rezepturen und die beiden Kontrollen (Kiefernspint, PP) $30 \times 8 = 240$ Prüfkörper für die Prüfung der Biegeeigenschaften und $30 \times 8 = 240$ Prüfkörper für die Prüfung der Charpy-Schlagzähigkeit verwendet.

Bestimmung der Resistenz von WPC gegen holzerstörende Pilze:

Alle Prüfkörper wurden bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchte für zwei Wochen klimatisiert. Inkubationsgefäße (P.J.K. GmbH, Kleinblittersdorf) wurden mittels Gamma-Bestrahlung (BBF Sterilisationsservice GmbH, Kernen) sterilisiert und mit einem sterilen Medium, bestehend aus 50 g Malzextrakt (Villa Natura Gesundheitsprodukte GmbH, Kirn) und 25 g Agar (Carl Roth GmbH & Co. KG, Karlsruhe) pro Liter destilliertem Wasser, befüllt. Myzelstücke des jeweiligen Pilzstammes wurden unter sterilen Bedingungen auf den Agar in den Inkubationsgefäßen transferiert. Nach der Beimpfung wurden die Inkubationsgefäße in einem Brutschrank bei 22°C und 70% relativer Luftfeuchte gelagert. Nachdem das Pilzmyzel den Agar vollständig überwachsen hatte, wurden sterilisierte Fächerscheiben auf das Myzel gelegt, damit die Prüfkörper das Myzel bzw. den Agar nicht berührten. Die klimatisierten Prüfkörper wurden in einem Autoklaven sterilisiert

und auf die Fächerscheiben gelegt. Bei den WPC-Prüfkörpern wurde die Seite, die ursprünglich die Außenseite der Profile dargestellt hatte, auf den Agar gelegt, so dass eine intakte WPC-Oberfläche in Kontakt mit dem Myzel gebracht wurde. Die Prüfkörper wurden für 16 Wochen bei 22°C und 70% relativer Luftfeuchte im Brutschrank gelagert. Beim Probensatz a) wurden nach 8 Wochen vier Prüfkörper pro Rezeptur (zwei Inkubationsgefäße) entnommen und Gewichtsverluste sowie Feuchtaufnahme ermittelt. Bei den Probensätzen a) und b) wurden nach 16 Wochen Inkubation die (restlichen) Prüfkörper aus den Gefäßen entnommen und das Pilzmyzel von den Prüfkörpern entfernt. Die Prüfkörper wurden gewogen, um den Holzfeuchtegehalt der Proben nach der Inkubation zu ermitteln, und erneut in der Klimakammer für zwei Wochen gelagert. Nach der Klimatisierung wurden die Prüfkörper gewogen, im Ofen bei 103°C getrocknet und erneut gewogen.

Die Masseverluste und Feuchtegehalte der WPC wurden ermittelt, wie im Abschnitt zur Arbeitsphase 1 beschrieben.

Mögliche Festigkeitsverluste aufgrund des Holzabbaus durch Pilze wurden nur für Probensatz b) ermittelt. Biegefestigkeit und Biege-E-Modul von sechs Prüfkörpern pro Rezeptur (Abmessungen 80 mm x 10 mm x 4 mm) wurden ermittelt in Anlehnung an DIN EN 310 (Modifizierung bestand in geänderten Abmessungen) unter Verwendung einer Dreipunktbiegeprüfung auf einer Universalprüfmaschine (Zwick 1474). Die Stützweite betrug 64 mm und die Prüfgeschwindigkeit 3 mm pro Minute. Die Prüfkörperseite, die während der Prüfkörpervorbereitung gesägt worden war, wurde hierbei einer Zugbelastung ausgesetzt. Die Charpy-Schlagzähigkeit von sechs Prüfkörpern pro Rezeptur wurde auf einem Pendelschlagwerk (Zwick, Typ 5102) mit einem 2J-Pendel gemäß DIN EN ISO 179-1 für ungekerbte Prüfkörper (Typ 1) ermittelt (Prüfkörperabmessungen 80 mm x 10 mm x 4 mm).

Ergebnisse und Diskussion:

Probensatz a (Prüfkörperabmessungen 50 x 40 x 4 mm) - Ermittlung der Gewichtsverluste:

Nach 16 Wochen Inkubation mit holzerstörenden Pilzen betrug die Holzfeuchte aller WPC-Prüfkörper mindestens 25%. Dies entspricht der erforderlichen Mindestholzfeuchte gemäß DIN CEN/TS 15534-1 (2007) (Abbildung 15). Zum Vergleich betrug die Holzfeuchte der inkubierten Kiefernspiltholzproben zwischen 165% und 173%. Die Polypropylen-Prüfkörper nahmen, wie erwartet, keine nennenswerte Menge an Feuchte auf.

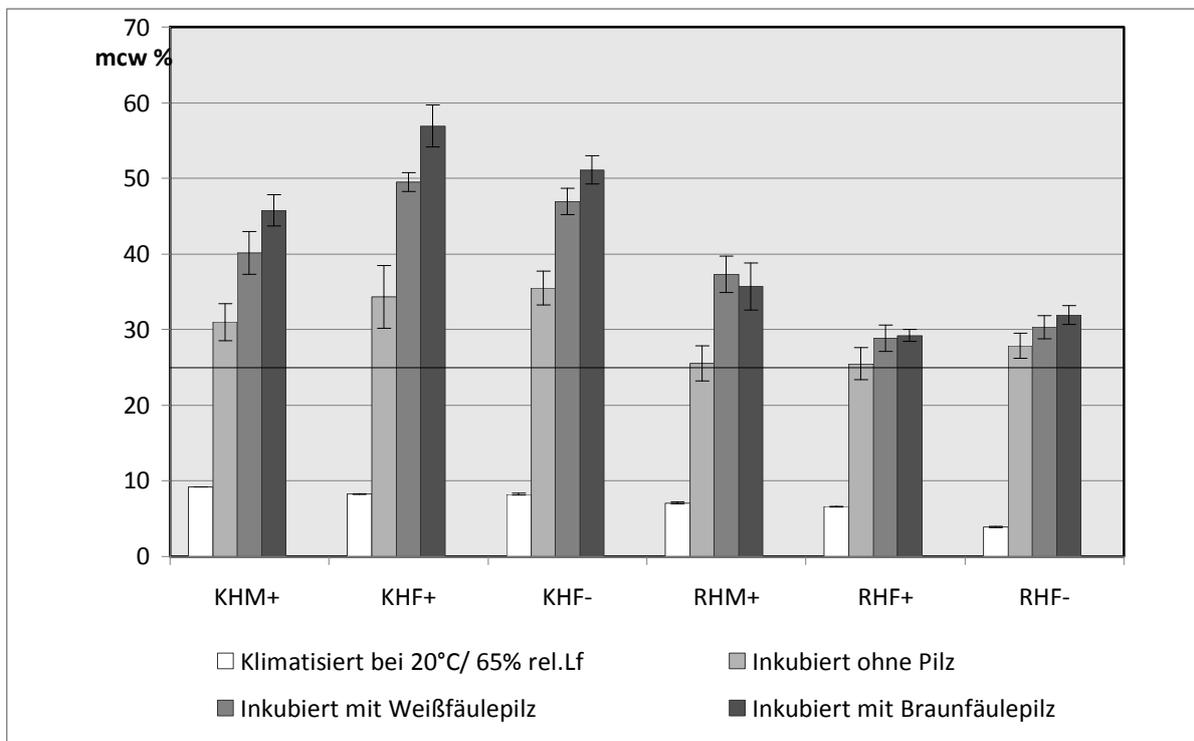


Abbildung 15: Holzfeuchte (mcw) der WPC (basierend auf dem Trockenholzgewicht) nach 16 Wochen Inkubation mit holzerstörenden Pilzen. Ergebnisse für Probensatz a (Prüfkörpergröße 50 x 40 x 4 mm). Die Bezeichnungen der Rezepturen sind in Tabelle 5 aufgelistet. Der Holzfeuchtegehalt der Vollholzproben aus Kiefer betrug zwischen 165% und 173%; die PP-Prüfkörper nahmen keine Feuchtigkeit auf (Ergebnisse nicht gezeigt). Die schwarze horizontale Linie repräsentiert die Anforderung für den minimalen Holzfeuchtegehalt gemäß DIN ENV 12038 (25%).

Es ist nicht bekannt, zu welchem Zeitpunkt während der 16 Wochen Inkubation die Holzfeuchte von 25% erreicht wurde (um dies zu ermitteln, hätten die Prüfkörper periodisch gewogen werden müssen, was wiederum zu unsterilen Bedingungen geführt hätte). Wenn 25% Holzfeuchte zu einem späten Zeitpunkt während der Inkubation erreicht worden sind, können die Masseverluste der WPC unterschätzt worden sein. Es ist gezeigt worden, dass eine Wasserlagerung der WPC-Prüfkörper vor der Inkubation mit holzerstörenden Pilzen zu höheren Masseverlusten führt als ohne vorherige Wasserlagerung (Ibach et al. 2003). Eine Wasserlagerung der Prüfkörper ist jedoch mit der folgenden Problematik verknüpft: Wenn die WPC vor der Inkubation in Wasser gelagert werden, sollten die Referenzprüfkörper aus Vollholz ebenfalls in Wasser gelagert werden. Dies bedeutet jedoch, dass die Prüfkörper aus Vollholz zu feucht für ein optimales Pilzwachstum werden würden. Aus diesem Grund wurde in diesem Projekt keine Wasserlagerung als Vorbehandlung durchgeführt. Hinzu kommt, dass eine Wasserlagerung der Prüfkörper vor der Beimpfung ein „worst-case-Szenario“ für die WPC schafft, während der Test, wenn er ohne vorherige Wasserlagerung erfolgt, realistischere Prüfbedingungen widerspiegelt, da hierbei die durch das Material gegebene langsamere Feuchteaufnahme der WPC und die insgesamt geringere Wasseraufnahme der WPC im Vergleich zum Vollholz berücksichtigt wird.

Insgesamt wiesen die WPC auf Basis von Kiefernholz nach der Inkubation einen höheren Holzfeuchtegehalt auf als die WPC auf Basis von Robinie. Dies kann auf die hydrophoben Extraktstoffe der Robinie zurückgeführt werden. Die Verwendung eines Haftvermittlers (MAPP) scheint keinen starken Einfluss auf die Wasseraufnahme während der Inkubation zu haben (vgl. RRF+ und RRF- sowie KRF+ und KRF-, Abbildung 15). Die Holzart scheint einen stärkeren Einfluss auf die Wasseraufnahme zu haben als der Haftvermittler.

Es wurde erwartet, dass WPC mit Refinerfasern eine niedrigere Wasseraufnahme als die WPC mit Holzmehl aufweisen. Diese Erwartung wurde im Falle der WPC mit Robinie erfüllt, jedoch nicht im Falle der WPC mit Kiefer. Dies kann wiederum auf die chemische Zusammensetzung der Robinie und das Vorhandensein von Extraktstoffen zurückgeführt werden. Außerdem spielen die Fasermorphologie und

die Veränderung (Schädigung) der Partikelgeometrie während der Verarbeitung hierbei eine Rolle.

Die Masseverluste der Kiefernspiltholz-Kontrollprüfkörper betragen 30% nach der Inkubation mit dem Weißfäulepilz und 36% nach der Inkubation mit dem Braunfäulepilz. Die Prüfkörper aus Polypropylen wiesen keinen Masseverlust auf. Gemäß CEN/TS 15534-1 (2007) weisen WPC eine hohe Resistenz gegen Benetzung auf, wenn der Masseverlust der Prüfkörper weniger als 3% und der Holzfeuchtegehalt weniger als 25% beträgt. Diese Eigenschaft bewirkt einen Schutz gegen den Befall mit holzerstörenden Pilzen, solange sie erhalten bleibt (CEN/TS 15534-1, 2007). Die Ergebnisse zeigen, dass die WPC mit Kiefer und Robinie nach 16 Wochen Inkubation mit Prüfpilzen unterschiedliche Masseverluste aufweisen (Abbildung 16): Insgesamt waren die Masseverluste der WPC mit Kiefer höher (bis zu 14%) als für WPC mit Robinie (niedriger als 3% für RRF+ und RRF-; niedriger als 4% für RM+). Dies bestätigt die Hypothese, dass die Verwendung einer dauerhaften Holzart wie Robinie zu einer hohen Resistenz von WPC gegen Abbau durch holzerstörende Pilze führt.

Die Masseverluste der WPC mit Kiefernholz waren mehr als 50% höher, wenn der Braunfäulepilz verwendet wurde. Dies ist zu erwarten, da Nadelholzarten normalerweise bevorzugt von Braunfäulepilzen abgebaut werden. Die WPC mit Refinerfasern aus Robinie wurden im annähernd gleichen Ausmaß von beiden Pilzarten abgebaut, während die WPC mit Robinienmehl stärker vom Weißfäulepilz abgebaut wurden.

Es wurde erwartet, dass die WPC mit Refinerfasern niedrigere Masseverluste als die WPC mit Holzmehl aufweisen. Für die WPC mit Kiefernholz wurde jedoch der gegenteilige Effekt beobachtet (Abbildung 16). Im Falle der WPC mit Robinie war diesbezüglich kein Trend zu erkennen: Bei den WPC, die dem Weißfäulepilz ausgesetzt worden waren, trat bei den WPC mit Holzmehl ein höherer Masseverlust auf als bei den WPC mit Refinerfasern. Bei den Robinien-WPC, die dem Braunfäulepilz ausgesetzt worden waren, trat ein höherer Masseverlust bei den WPC mit Refinerfasern als bei den WPC mit Holzmehl auf. Insgesamt scheint die Verwendung von Refinerfasern im Hinblick auf die Resistenz von WPC gegen

holzerstörende Pilze eher schädlich als nützlich zu sein, wenn Kiefernholz verwendet wird. Wenn Robinie verwendet wird, scheint die Form der verwendeten Partikel (Refinerfasern, Mehl) geringen Einfluss auf die Masseverluste zu haben.

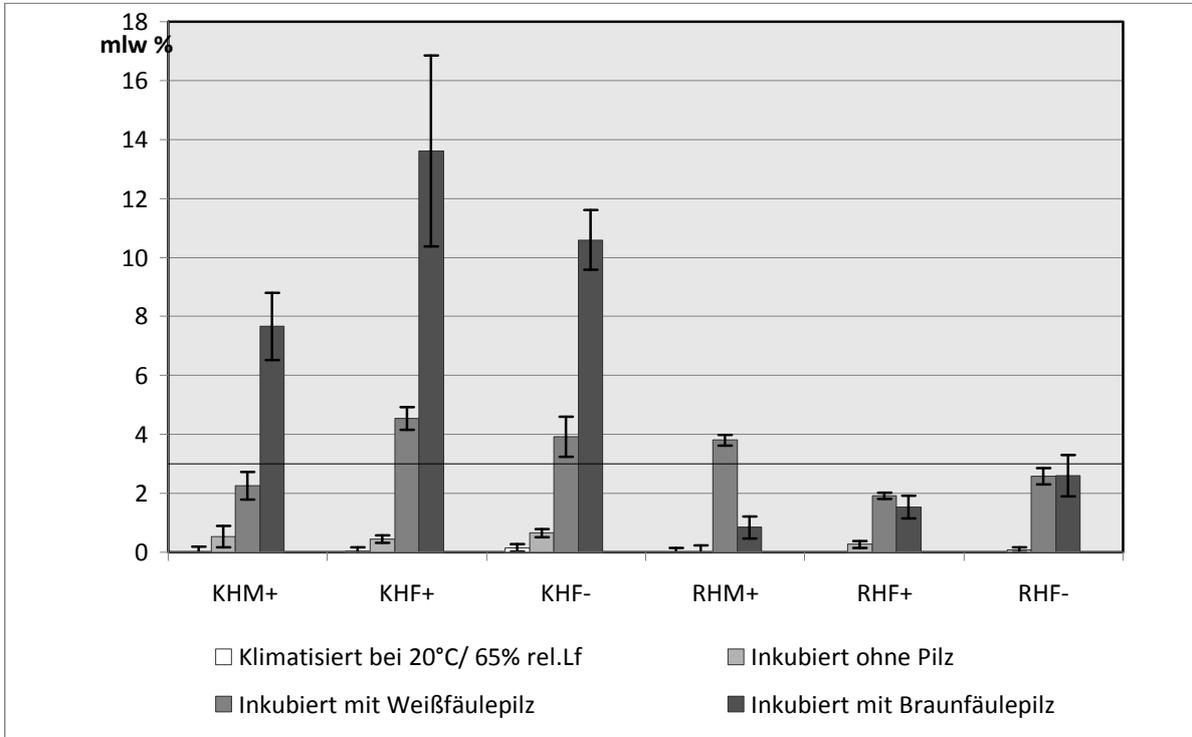


Abbildung 16: Masseverluste (mlw) der WPC (Probenatz a) nach 16 Wochen Inkubation mit holzerstörenden Pilzen. Ergebnisse für Probenatz a (Prüfkörpergröße 50 x 40 x 4 mm). Die Bezeichnungen der Rezepturen sind in Tabelle 5 aufgelistet. Die Masseverluste der Vollholzproben aus Kiefer betragen 30% (Weißfäulepilz) und 36% (Braunfäulepilz); die PP-Prüfkörper wiesen keinen Masseverlust auf (Ergebnisse nicht gezeigt). Die schwarze horizontale Linie repräsentiert die Anforderung für den maximalen Masseverlust gemäß DIN ENV 12038 (3%).

Die Feuchteaufnahme und Masseverluste der WPC aufgrund von Pilzbefall scheinen linear mit der Inkubationszeit anzusteigen (Ergebnisse für den achtwöchigen Inkubationszeitraum nicht gezeigt).

Probensatz b (Prüfkörperabmessungen 80 x 10 x 4 mm) - Ermittlung der Masse- und Festigkeitsverluste:

Der Holzfeuchtegehalt der Prüfkörper mit den Abmessungen 80 x 10 x 4 mm nach 16 Wochen Inkubation mit dem Weiß- und Braunfäulepilz war ähnlich wie der Holzfeuchtegehalt der Prüfkörper aus dem Probensatz a (Ergebnisse nicht gezeigt). Auch in Bezug auf die Masseverluste wurde bei beiden Probensätzen ein ähnlicher Trend festgestellt: Die WPC mit Kiefernholz wiesen höhere Masseverluste auf als die WPC mit Robinie (Ergebnisse nicht gezeigt). Jedoch waren die Masseverluste bei den WPC mit Kiefernholz im Probensatz b insgesamt deutlich höher als im Probensatz a, wobei die höchsten Masseverluste 45% betragen (WPC mit Kiefern-Refinerfasern und mit MAPP). Diese Masseverluste sind somit so hoch wie für Vollholz aus Kiefer. Dies zeigt, dass die Abmessungen der Prüfkörper einen starken Einfluss auf die Resistenzevaluierung haben und dass WPC mit Kiefernholz eine geringe Resistenz gegen holzzerstörende Pilze aufweisen. Die Verwendung von Prüfkörpern mit den Abmessungen 80 x 10 x 4 mm, d.h. mit einem hohen Verhältnis von Oberfläche zu Volumen, schafft ein „worst-case-Szenario“ für den Resistenztest. Hinzu kommt, dass bei der Prüfkörperherstellung die intakten Profiloberflächen beeinträchtigt wurden, so dass Eintrittsmöglichkeiten für Feuchte geschaffen werden konnten. Normalerweise werden WPC durch eine dünne Polymerschicht geschützt, die während der Herstellung (Extrusion, Spritzguss) entsteht.

Beim Versuchsaufbau wurde berücksichtigt, dass die Effekte der Feuchtaufnahme und der Pilzaktivität auf die mechanischen Eigenschaften der WPC getrennt werden sollten (Abbildungen 17-19). Durch einen Vergleich der Prüfkörper, die bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchte gelagert wurden, mit den Prüfkörpern, die ohne Prüfpilz inkubiert wurden, können Informationen über den alleinigen Einfluss der Feuchte erhalten werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Feuchtaufnahme allein die Biegefestigkeit der WPC deutlich reduziert (Abbildung 17).

Durch einen Vergleich der Prüfkörper, die mit und ohne Prüfpilz inkubiert wurden, können die Effekte der Pilze (inklusive der Feuchtaufnahme) analysiert werden. Es zeigte sich, dass die Prüfpilze die Biegefestigkeit nicht so stark beeinträchtigten wie die Feuchtaufnahme. Dies stimmt mit bisherigen Beobachtungen überein (Schirp

und Wolcott 2005). In einigen Fällen scheint es so, als ob die holzerstörenden Pilze die Biegefestigkeit der WPC leicht erhöhen (siehe RF+, RRF+; Abb. 17). Im Falle der Vollholzproben (Kiefer) ergibt sich ein anderes Bild: Die holzerstörenden Pilze haben einen stärkeren, negativen Einfluss auf die Biegefestigkeit als die Feuchteaufnahme allein.

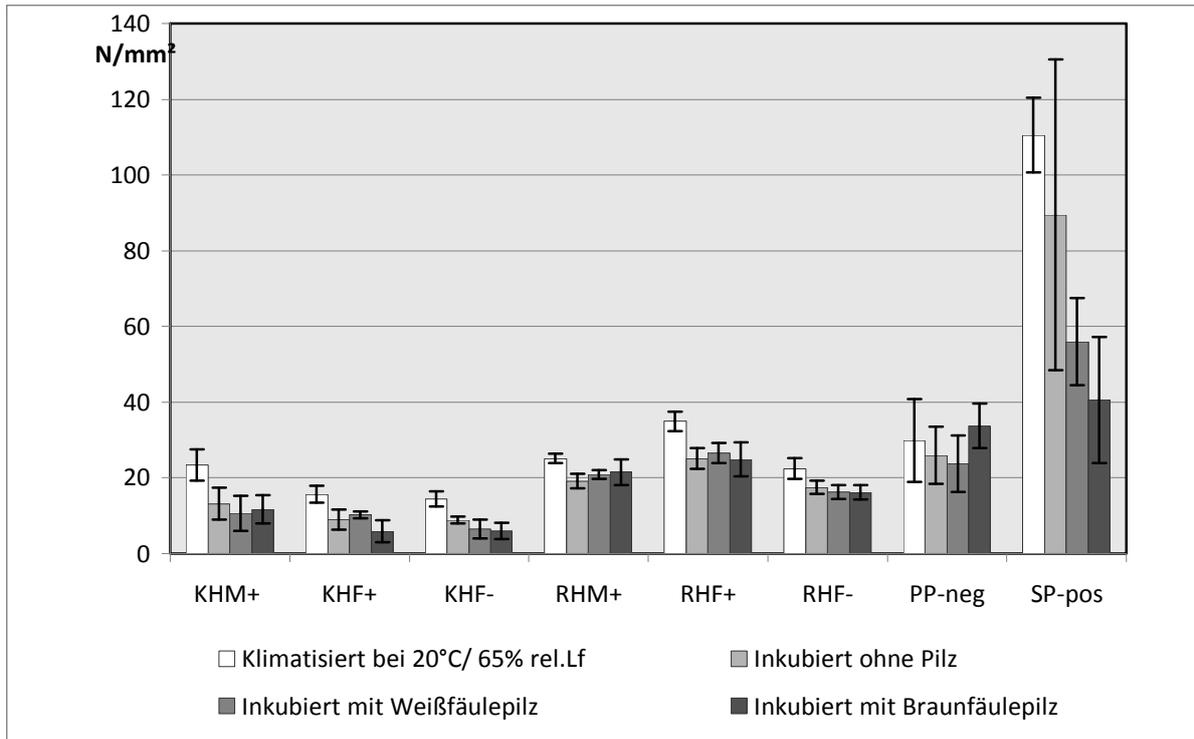


Abbildung 17: Biegefestigkeit in N/mm^2 der WPC nach 16 Wochen Inkubation mit holzerstörenden Pilzen. Ergebnisse für Probensatz b (Prüfkörpergröße $80 \times 10 \times 4 \text{ mm}$). Die Bezeichnungen der Rezepturen sind in Tabelle 5 aufgelistet.

Insgesamt war die Biegefestigkeit der WPC mit Robinie höher als die der WPC mit Kiefer. Die Verwendung von Robinien-Refinerfasern resultierte in höherer Biegefestigkeit als der Einsatz von Robinienholzmehl. Dieses Ergebnis stimmt mit bisherigen Ergebnissen nicht überein (Schirp und Stender 2009) und ist daher genauer zu analysieren. Im Fall der WPC mit Kiefernholz wurden die bisherigen Erkenntnisse von Schirp und Stender (2009) bestätigt: Hier wiesen die WPC mit Refinerfasern eine niedrigere Biegefestigkeit auf als die WPC mit Holzmehl.

Im Hinblick auf den Biege-E-Modul wurde der gleiche Trend wie bei den Ergebnissen für die Biegefestigkeit beobachtet (Abbildung 18): Die Feuchteaufnahme allein hat

einen starken negativen Einfluss auf den Biege-E-Modul der WPC. In einigen Fällen war eine Erhöhung des Biege-E-Moduls aufgrund von Pilzbefall zu erkennen (z. B. KRF-, Abbildung 18). Auch dieser Effekt ist bereits in einer früheren Untersuchung (Schirp und Wolcott 2006) beobachtet worden, wobei zur Bestimmung des E-Moduls eine andere Methode, die dynamisch-mechanische Analyse, verwendet wurde.

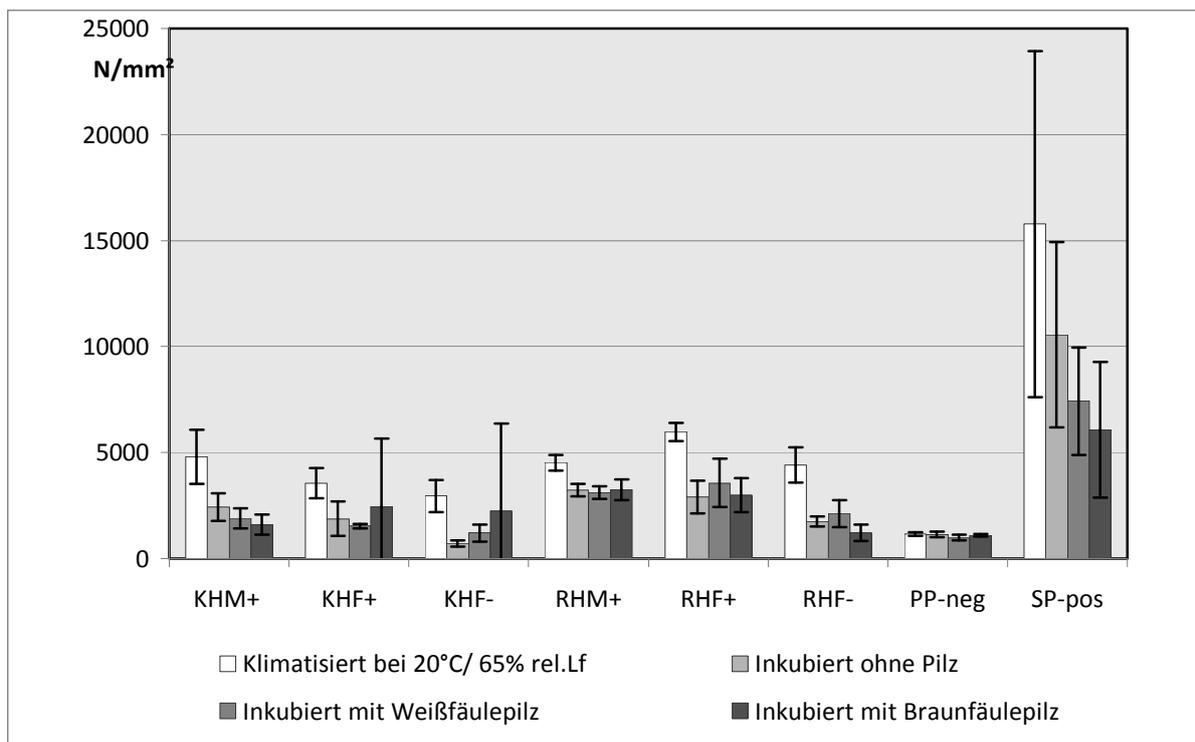


Abbildung 18: Biege-E-Modul in N/mm^2 der WPC nach 16 Wochen Inkubation mit holzerstörenden Pilzen. Ergebnisse für Probensatz b (Prüfkörpergröße $80 \times 10 \times 4 \text{ mm}$). Die Bezeichnungen der Rezepturen sind in Tabelle 5 aufgelistet.

Die Charpy-Schlagzähigkeit wurde deutlich weniger als die übrigen Festigkeitseigenschaften durch holzerstörende Pilze beeinträchtigt (Abbildung 19). Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass holzerstörende Pilze die strukturellen Holzbestandteile zerstören, ohne die Polypropylenmatrix abzubauen, und dass die Schlagzähigkeit stark vom vorhandenen Matrixanteil abhängt (je mehr Polymermatrix im WPC enthalten ist, desto höher ist die Schlagzähigkeit). Da die Schlagzähigkeit der WPC aufgrund des hohen Holzanteils somit insgesamt niedrig ist, sind die relativen Unterschiede zwischen den Rezepturen gering. Bei Vollholz ergibt sich ein anderes Bild: Hier ist die Schlagzähigkeit bekanntermaßen der sensitivste Indikator für den Abbau der Holzsubstanz durch holzerstörende Pilze (Trendelenburg 1940).

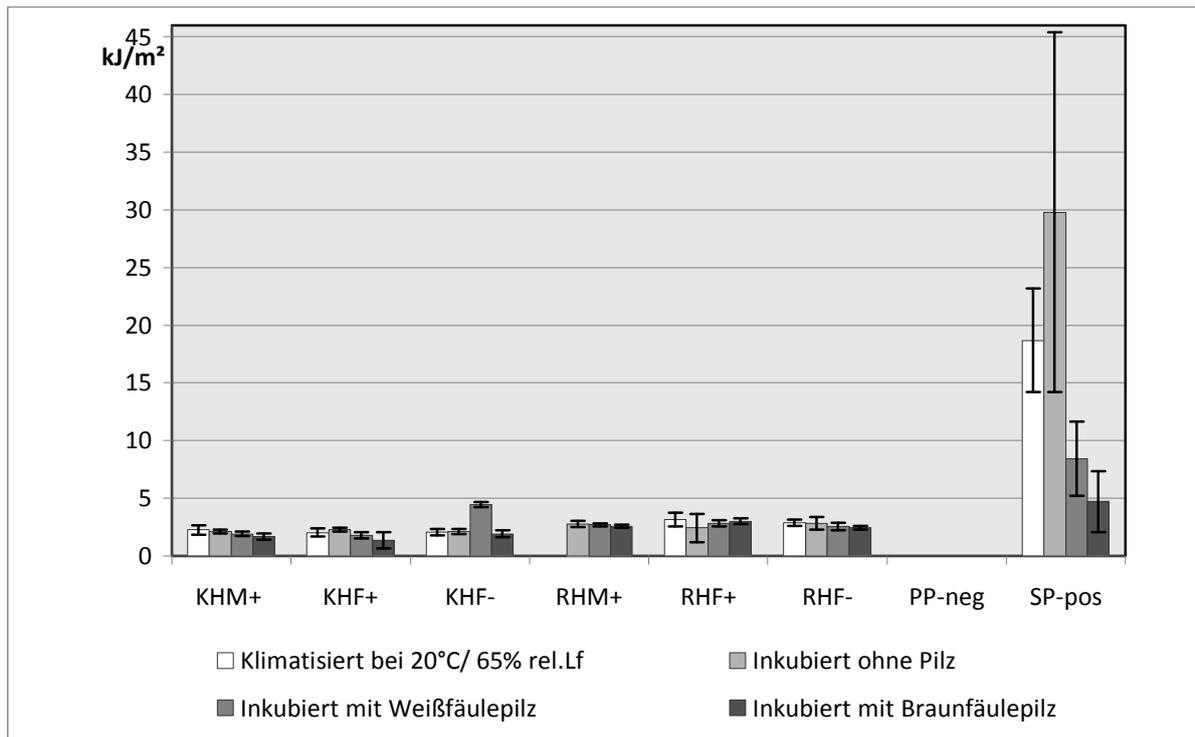


Abbildung 19: Charpy-Schlagzähigkeit in kJ/m^2 der WPC nach 16 Wochen Inkubation mit holzerstörenden Pilzen. Ergebnisse für Probenatz b (Prüfkörpergröße 80 x 10 x 4 mm). Die Bezeichnungen der Rezepturen sind in Tabelle 5 aufgelistet.

Arbeitsphase 2:

„Abschließende Evaluierung der Proben im Freilandtest (WKI, FH Eb)“

Die abschließende Evaluierung der Proben aus dem Freilandtest wird im Jahr 2014 erfolgen, da der Freilandtest auf fünf Jahre angelegt ist und im Juli 2009 eingerichtet wurde. Die Ergebnisse werden der Öffentlichkeit zugänglich gemacht.

5 Ausblick

Die bei der Durchführung der Resistenzprüfungen an WPC gesammelten Erfahrungen sollten in die europäische Normung (CEN/TS 15534-1, 2007) einfließen. Bei der Betrachtung der Dauerhaftigkeit von WPC ist weiterhin zu berücksichtigen, dass neben Braun- und Weißfäulepilzen auch weitere Mikroorganismen eine Rolle spielen. Hierzu zählen Moderfäulepilze, Bläuepilze und Schimmelpilze. Die Ergebnisse der Freilandtests werden dazu beitragen, die Effekte dieser

Mikroorganismen in Verbindung mit abiotischen Faktoren (UV-Bestrahlung, Feuchte, Frost, etc.) besser bewerten zu können. Gegebenenfalls sind weitere Untersuchungen erforderlich, um WPC nachhaltig und möglichst ohne Einsatz von Bioziden zu schützen.

Weiterhin sollte die optimale Refinerfaserlänge für die Verwendung von thermomechanisch aufgeschlossenen Holzfaserstoffen in WPC ermittelt werden. Die Oberflächen der Refinerfasern sollten genauer charakterisiert werden, um das Verstärkungspotenzial der Refinerfasern für extrudierte WPC besser auszuschöpfen. Weitere Untersuchungen sollten auch die Auswirkungen der Verarbeitung auf die Fasergeometrie berücksichtigen. Mit entsprechenden Untersuchungen wurde bereits am Fraunhofer WKI begonnen.

6 Literaturangaben

- Albertsson, A. C., S. O. Andersson, S. Karlsson (1987): The mechanism of biodegradation of polyethylene. *Polymer Degradation and Stability* 18: 73-87.
- Clemons, C. (2002): Wood-plastic composites in the United States – the interfacing of two industries. *Forest Products Journal* 52(6): 10-18.
- Dawson-Andoh, B., L. M. Matuana, J. Harrison (2004): Mold susceptibility of rigid PVC/wood-flour composites. *Journal of Vinyl and Additive Technology* 10(4): 179-186.
- Gehri, E., L. Kucera (1993): Das Holz der Robinie – Eigenschaften und Verwendungsmöglichkeiten. Publikation Nr. 93-1, ETH Zürich.
- Hill, C. A. S. (2006): *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes*. John Wiley and Sons, Ltd, Chichester, England.
- Ibach, R. E., C. M. Clemons, N. M. Stark (2003): Combined ultraviolet and water exposure as a preconditioning method in laboratory fungal durability testing. *Proceedings of the 7th International Conference on Woodfiber-Plastic Composites*, Forest Products Society, Madison, WI, 2003: 61-67.
- Ibach, R. E., C. M. Clemons (2004): Field evaluations of extruded woodfiber-plastic composites. *Proceedings of the Progress in Woodfibre-Plastic Composites Conference 2004*, Toronto, Canada.
- Iioyshi, Y., Y. Tsutsumi, T. Nishida (1998): Polyethylene degradation by lignin-degrading fungi and manganese peroxidase. *Journal of Wood Science* 44: 222-229.
- Laks, P., J. Vehring, S. Verhey, D. Richter (2005): Effect of manufacturing variables on mold susceptibility of wood-plastic composites. *Proceedings of the 8th International Conference on Woodfiber-Plastic Composites*, Forest Products Society, Madison, WI, 2005: 265-270.
- Morris, P. I., P. Cooper (1998): Recycled plastic/wood composite lumber attacked by fungi. *Forest Products Journal* 48(1): 86-88.
- Pendleton, D. E., T. A. Hoffard, T. Adcock, B. Woodward, M. P. Wolcott (2002): Durability of an extruded HDPE/wood composite. *Forest Products Journal* 52(6): 21-27.
- Scheffer, T. C. (1973): Microbiological degradation and the causal organisms. S. 31-106 in D.D. Nicholas (Herausgeber): *Wood Deterioration and Its Prevention by Preservative Treatments*. Syracuse University Press, Syracuse, New York.
- Schirp, A., J. Stender (2009): Herstellung und Eigenschaften von extrudierten Wood-Plastic Composites mit Refinerfasern (Thermomechanical Pulp-Fasern). *Chemie Ingenieur Technik* 81(11): 1773-1781.
- Schirp, A., R. E. Ibach, D. E. Pendleton, M. P. Wolcott (2008): Biological degradation of wood-plastic composites (WPC) and strategies for improving the resistance of WPC against biological decay. Book chapter, in Schultz, T.P., D.D. Nicholas and M.H. Freeman: *Development of Wood Preservative Systems*. Volume based on symposium, held at the American Chemical Society (ACS) National Meeting, San Diego, CA, USA, March 13-17, 2005.

- Schirp, A., M. P. Wolcott (2006): Fungal degradation of wood-plastic composites and evaluation using dynamic mechanical analysis. *Journal of Applied Polymer Science* 99: 3138-3146.
- Schirp, A., M. P. Wolcott (2005): Influence of fungal decay and moisture absorption on mechanical properties of extruded wood-plastic composites. *Wood and Fiber Science* 37(4): 643-652.
- Schmidt, O. (1994): *Holz- und Baumpilze*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. 246 S.
- Trendelenburg (1940): Über die Abkürzung der Zeitdauer von Pilzversuchen an Holz mit Hilfe der Schlagbiegeprüfung. *Holz als Roh- und Werkstoff* 3(12): 397-407.
- Van Acker, J. (2006): Testing biological durability of wood-plastic composites. Paper presented at the 37th Annual Meeting of the International Research Group on Wood Protection (IRG) in Tromsø, Norway, June 18-22, 2006. www.irg-wp.com.
- Verhey, S., P. Laks, D. Richter (2001): Laboratory decay resistance of woodfiber/thermoplastic composites. *Forest Products Journal* 51(9): 44-49.
- Verhey, S. A., P. E. Laks, D. L. Richter, E. D. Keranen, G. M. Larkin (2003): Use of field stakes to evaluate the decay resistance of woodfiber-thermoplastic composites. *Forest Products Journal* 53 (5): 67-74.
- Volke-Sepulveda, T., G. Saucedo-Castaneda, M. Gutierrez-Rojas, A. Manzur, E. Favela-Torres (2002): Thermally treated low density polyethylene biodegradation by *Penicillium pinophilum* and *Aspergillus niger*. *Journal of Applied Polymer Science* 83: 305-314.
- Wolcott, M. P. (2001): Wood-Plastic Composites. In: K.H.J. Buschow, R.W. Cahn, M.C. Flemings, B. Ilshner, E.J. Kramer, S. Mahajan, eds.: *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. Elsevier, Amsterdam, New York: 9759-9763.
- WRAP (2003): Wood plastic composites study – Technologies and UK market opportunities. Published by the Waste and Resources Action Programme (WRAP). www.wrap.org.uk.
- Zabel, R.A., J.J. Morrell (1992): *Wood Microbiology: Decay and Its Prevention*. Academic Press, Inc. 476 pp.

Zitierte Normen:

- DIN EN ISO 178 (2003): Kunststoffe - Bestimmung der Biegeeigenschaften.
- DIN EN ISO 179-1 (2001): Kunststoffe – Bestimmung der Charpy-Schlageigenschaften – Teil 1: Nicht instrumentierte Schlagzähigkeitsprüfung.
- DIN EN 252 (1990): Freiland-Prüfverfahren zur Bestimmung der relativen Schutzwirkung eines Holzschutzmittels im Erdkontakt.
- DIN EN 310 (1993): Holzwerkstoffe; Bestimmung des Biege-Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit.

- DIN EN 350-2 (1994): Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten – Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz – Teil 2: Leitfaden für die natürliche Dauerhaftigkeit und Tränkbarkeit von ausgewählten Holzarten von besonderer Bedeutung in Europa.
- DINV ENV 12038 (1996): Dauerhaftigkeit von Holz und Holzwerkstoffen – Holzwerkstoffplatten: Bestimmung der Beständigkeit gegen holzerstörende Basidiomyceten.
- DIN CEN/TS TS 15534-1 (2007): Holz-Polymer-Werkstoffe (WPC) – Teil 1: Prüfverfahren für die Beschreibung von WPC-Werkstoffen und –Erzeugnissen.
- DIN 53435 (1983): Prüfung von Kunststoffen: Biegeversuch und Schlagbiegeversuch an Dynstat-Probekörpern.
- DIN 51230 (1962): Dynstat-Gerät zur Bestimmung von Biegefestigkeit und Schlagzähigkeit an kleinen Proben.

7 Anhang: Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungsverzeichnis:

	Seite
Abbildung 1: Verlegung der WPC-Terrassendielen (FH Eberswalde) nach Aufbauanleitung.	14
Abbildung 2: Verlegte WPC-Terrassendielen (FH Eberswalde).	14
Abbildung 3: Freiland-Versuchsfläche mit WPC-Prüfkörpern im Erdkontakt (WKI).	15
Abbildung 4: Prüfkörperabmessungen für den Freilandversuch (WPC im Erdkontakt) am Fraunhofer WKI.	17
Abbildung 5: Prüfkörper für die Ermittlung der Biegeeigenschaften (gemäß ISO 178) und der Charpy-Schlagzähigkeit.	18
Abbildungen 6a-g: Abschnitte der WPC-Profil- und Vollholzvarianten.	19
Abbildung 7: Biegefestigkeit (geprüft in Anlehnung an EN 310) der WPC-Referenz-Prüfkörper (ohne Bodenkontakt).	21
Abbildung 8: Biege-E-Modul (geprüft in Anlehnung an EN 310) der WPC-Referenz-Prüfkörper (ohne Bodenkontakt).	22
Abbildung 9: Durchbiegung (geprüft in Anlehnung an EN 310) der WPC-Referenz-Prüfkörper (ohne Bodenkontakt).	23
Abbildung 10: Charpy-Schlagzähigkeit (geprüft gemäß ISO 179-1, ungekerbt) der WPC-Referenz-Prüfkörper (ohne Bodenkontakt).	24
Abbildung 11: Biegefestigkeit (geprüft gemäß ISO 178) der WPC-Referenz-Prüfkörper (ohne Bodenkontakt).	25
Abbildung 12: Biege-E-Modul (geprüft gemäß ISO 178) der WPC-Referenz-Prüfkörper (ohne Bodenkontakt).	26
Abbildung 13: Biegefestigkeiten von WPC nach 6 Wochen Inkubationszeit.	35
Abbildung 14: Biegefestigkeiten von WPC nach 12 Wochen Inkubationszeit.	35
Abbildung 15: Holzfeuchte (mcw) der WPC (basierend auf dem Trockenholzgewicht) nach 16 Wochen Inkubation mit holzzerstörenden Pilzen. Ergebnisse für Probensatz a (Prüfkörpergröße 50 x 40 x 4 mm).	42
Abbildung 16: Masseverluste (mlw) der WPC (Probensatz a) nach 16 Wochen Inkubation mit holzzerstörenden Pilzen. Ergebnisse für Probensatz a (Prüfkörpergröße 50 x 40 x 4 mm).	45
Abbildung 17: Biegefestigkeit in N/mm ² der WPC nach 16 Wochen Inkubation mit holzzerstörenden Pilzen. Ergebnisse für Probensatz b (Prüfkörpergröße 80 x 10 x 4 mm).	47
Abbildung 18: Biege-E-Modul in N/mm ² der WPC nach 16 Wochen Inkubation mit holzzerstörenden Pilzen. Ergebnisse für Probensatz b (Prüfkörpergröße 80 x 10 x 4 mm).	48
Abbildung 19: Charpy-Schlagzähigkeit in kJ/m ² der WPC nach 16 Wochen Inkubation mit holzzerstörenden Pilzen. Ergebnisse für Probensatz b (Prüfkörpergröße 80 x 10 x 4 mm).	49

Tabellenverzeichnis:

	Seite
Tabelle 1: WPC-Rezepturen für Freilandversuche.	13
Tabelle 2: WPC-Rezepturen in Arbeitsphase 1 (Angaben in Gewichtsprozenten).	27
Tabelle 3: Durchschnittliche Ausgangsfeuchtegehalte (m_4) der WPC (ohne Beimpfung und ohne Inkubation) nach Konditionierung, ermittelt durch Darrtrocknung.	31
Tabelle 4: Masseveränderungen und Holzfeuchten (jeweils basierend auf dem Trockenholzgehalt) der vier WPC-Formulierungen, der negativen Kontrolle (Polypropylen, PP) und der positiven Kontrolle (Kiefern-Splintholz, KS) nach einer Inkubationszeit von 10 und 16 Wochen mit <i>G. trabeum</i> (Braunfäule) und <i>T. versicolor</i> (Weißfäule).	33
Tabelle 5: WPC-Rezepturen in Arbeitsphase 2. %-Anteile sind Gewichtsprozent.	38