

Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

Erhöhung der Festigkeiten und der Feuerbeständigkeit von Leichtbau-Holzwerkstoffen durch Basaltinlays und mineralische Bindemittel

Zuwendungsempfänger:

Georg-August-Universität Göttingen – Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie – Burckhardt-Institut – Holzbiologie und Holzprodukte

Förderkennzeichen:

22011017

Laufzeit:

01.10.2018 bis 31.12.2022

Datum der Veröffentlichung:

10.07.2023



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

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

Inhaltsverzeichnis

I.	Abbildungsverzeichnis	2
II.	Tabellenverzeichnis	3
III.	Abkürzungsverzeichnis	4
IV.	Kurzbericht	1
1.	Aufgabenstellung	1
	Ursprüngliche Zielstellungen.....	1
	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	2
	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	2
2.	Planung und Ablauf des Vorhabens	3
	Planung und Ablauf des Vorhabens	3
	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	4
3.	Resümee der wesentlichen Ergebnisse	6
	a) Arbeitspakete und Meilensteine	6
	b) Zusammenfassung	8
V.	Ausführliche Darstellung der Ergebnisse	10
1.	Erzielte Ergebnisse	10
	Arbeitspaket 1: Auswahl und Modifizierung der Basaltinlays	10
	a) Auswahl geeigneter Basaltinlays	10
	b) Modifizierung der Basaltinlays	12
	a. Single Fiber Pull-Out-Test.....	12
	b. Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Klebungen nach DIN EN 310 sowie DIN EN 1464 13	
	Arbeitspaket 2: Herstellung rohdichtereduzierter Einschichtspanplatten mit Basaltinlays sowie Prüfung der mechanisch-technologischen Eigenschaften	25
	Arbeitspaket 3 und 4: Herstellung von rohdichtereduzierten dreischichtigen Spanplatten unter Verwendung von Basaltinlays sowie Herstellung von rohdichtereduzierten Oriented Strand Boards unter Verwendung von Basaltinlays	30
	Arbeitspaket 5 bis 8: Verwendung von mineralischen Bindemitteln in Kombination mit pMDI-, MUF- und PF-Harzen sowie deren Brandschutzuntersuchungen	35
	Arbeitspaket 9: Herstellung mineralisch gebundener OSB-Platten im industriellen Maßstab	43
2.	Verwertung	44
	a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen.....	44
	b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende.....	44
	c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende.....	44
	d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	45
3.	Erkenntnisse von Dritten	46
4.	Veröffentlichungen	47
VI.	Literatur	47

I. Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1:	SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER ANORDNUNG DER VERSTÄRKUNG IN DER MDF-PLATTE.....	2
ABBILDUNG 2:	AUSGEHÄRTETE UF-MATRIX MIT BASALTFASER	13
ABBILDUNG 3:	AUFBAUSCHEMA DER OBERFLÄCHENMODIFIZIERUNGS-ANLAGE MIT AUFTRAGSWANNE UND HEIZZONE	15
ABBILDUNG 4:	ESEM-AUFNAHMEN DER VERSCHIEDENEN OBERFLÄCHENMODIFIZIERUNGEN AUF DEN BASALTFASEROBERFLÄCHEN BEI EINER 1000-FACHEN VERGRÖßERUNG	17
ABBILDUNG 5:	EDX-AUFNAHMEN DER VERSCHIEDENEN OBERFLÄCHENMODIFIZIERUNGEN AUF DEN BASALTFASEROBERFLÄCHEN BEI EINER 1000-FACHEN VERGRÖßERUNG. BEISPIELHAFT WIRD HIER DAS ELEKTRONENBILD MIT DER VERTEILUNG VON DETEKTIERTEN KOHLENSTOFFATOMEN (ROT) GEZEIGT.....	18
ABBILDUNG 6:	FTIR-SPEKTREN DER VERSCHIEDENEN OBERFLÄCHENBESCHICHTUNGEN DES BASALTGEWEBES.	20
ABBILDUNG 7:	FTIR-SPEKTREN DER VERSCHIEDENEN UREIDOSILANBESCHICHTUNGEN UND REFERENZ DER HÄNDISCH MODIFIZIERTEN EINZELASERN.	20
ABBILDUNG 8:	MESSWERTE DES SCHÄLWIDERSTANDES DER VERSCHIEDENEN MODIFIZIERUNGS- UND BINDEMITELKOMBINATIONEN	23
ABBILDUNG 9:	BIEGEFESTIGKEIT VON DREISCHICHTSPANPLATTEN (DICHT 650 KG/M ³) MIT VERSCHIEDEN MODIFIZIERTEN BASALTINLAYS	24
ABBILDUNG 10:	LOKALISIERUNG DES BASALTGEWEBES IN HERGESTELLTEN EINSCHICHTSPANPLATTEN	26
ABBILDUNG 11:	BIEGEFESTIGKEITEN DER EINSCHICHTSPANPLATTEN, GEBUNDEN MIT PMDI UND MUF.	28
ABBILDUNG 12:	BIEGEFESTIGKEITEN VON VERSTÄRKTEN MUF UND PMDI GEBUNDENEN EINSCHICHTSPANPLATTEN VERSCHIEDENER DICHTEN	29
ABBILDUNG 13:	KUMULATIVE LÄNGENVERTEILUNGEN SOWIE MITTLERE BREITE DER VERSCHIEDENEN SPAN- UND STRANDFRAKTIONEN	30
ABBILDUNG 14:	BIEGEFESTIGKEITEN DER DREISCHICHTSPANPLATTEN UND OSB DER DICHTEN 720 KG/M ³ , 650 KG/M ³ UND 580 KG/M ³ HERGESTELLT MIT VERSCHIEDENEN KLEBSTOFFSYSTEMEN.....	31
ABBILDUNG 15:	ROHDICHTEPROFILE DER REFERENZPLATTE SOWIE VON MIT BASALTINLAYS VERSTÄRKTEN PMDI- GEBUNDENEN DREISCHICHTSPANPLATTEN UND OSB MIT EINER DICHTE VON 720 KG/M ³	33
ABBILDUNG 16:	BIEGEFESTIGKEITEN DER DREISCHICHTSPANPLATTEN UND OSB DER DICHTEN 720 KG/M ³ UND 580 KG/M ³ HERGESTELLT MIT VERSCHIEDENEN KLEBSTOFFSYSTEMEN MIT UNTERSCHIEDLICHEN POSITIONEN DER BASALTGEWEBE	34
ABBILDUNG 17:	WÄRMEFREISETZUNGSRATEN UND PROBENMASSEN DER UNTERSCHIEDLICHEN PRÜFKÖRPER GEMESSEN IM CONE-KALORIMETER.....	37
ABBILDUNG 18:	REAKTIONSTEMPERATUR VON REINEM PORTLANDZEMENT SOWIE PORTLANDZEMENT VERSETZT MIT HOLZMEHL UND BASALTPULVER.	41
ABBILDUNG 19:	GEMITTELTE SPANNUNGS-DEHNUNGS-DIAGRAMME SOWIE QUERZUGFESTIGKEITEN DER ZEMENTSPANPLATTEN MIT UND OHNE BASALTVERSTÄRKUNG UND UNTERSCHIEDLICHEN ZEMENT-ZU-HOLZ VERHÄLTNISSEN.....	41

II. Tabellenverzeichnis

TABELLE 1:	ARBEITSPAKETE MIT BEARBEITUNGSZEITRAUM UND ZIELERREICHUNG LAUT PROJEKTANTRAG.	6
TABELLE 2:	MEILENSTEINE MIT FÄLLIGKEIT UND ZIELERREICHUNG LAUT PROJEKTANTRAG.	7
TABELLE 3:	TECHNISCHE EIGENSCHAFTEN DER VERWENDETEN BASALTINLAYS.	10
TABELLE 4:	MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN DER HERGESTELLTEN EINSCHICHT-SPANPLATTEN MIT EINER DICHT VON 680 KG/M ³	11
TABELLE 5:	VERWENDETES BASALTGEWEBE NACH ART DER LEINWANDBINDUNG UND DESSEN TECHNISCHE EIGENSCHAFTEN.	14
TABELLE 6:	FLÄCHENGEWICHTE SOWIE ZUGKRAFT UND DEHNUNG BEI HÖCHSTKRAFT IN KETTRICHTUNG DER VERSCHIEDENEN GEWEBE	15
TABELLE 7:	ELEMENTARVERTEILUNGSSUMMENSPEKTREN DER VERSCHIEDENEN BASALTVARIANTEN.	19
TABELLE 8:	MECHANISCHE FESTIGKEITEN ERMITTELT DURCH DREI-PUNKT-BIEGEPRÜFUNG VON SPERRHOLZ MIT AUFGEBRACHTEM BASALTGEWEBEN, WELCHE MIT UREIDOSILAN, ACRYLAT SOWIE EINER KOMBINATIONSBSCHICHTUNG MODIFIZIERT WAREN IN VERBINDUNG MIT VERSCHIEDENEN BINDEMITTELN.....	21
TABELLE 9:	QUERZUGFESTIGKEITEN DER EINSCHICHTSPANPLATTEN, GEBUNDEN MIT PMDI UND MUF	27
TABELLE 10:	STRENGTH-TO-WEIGHT RATIO (σ) DER PRODUZIERTEN SPANPLATTEN UND OSB (JEDER WERT BEINHALTET 24 MESSUNGEN	32
TABELLE 11:	QUERZUGFESTIGKEITEN DER DREISCHICHTSPANPLATTEN UND OSB DER DICHTEN 720 KG/M ³ , 650 KG/M ³ UND 580 KG/M ³ HERGESTELLT MIT VERSCHIEDENEN KLEBSTOFFSYSTEMEN	33
TABELLE 12:	BRANDEINWIRKUNG NACH DIN EN 11925 VON REFERENZ-SPANPLATTEN UND SPANPLATTEN BEHANDELT MIT DEM MINERALISCHEN ADDITIV ULTRACOOOL 500.....	36
TABELLE 13:	KALORIMETRISCHE KENNWERTE VON DREISCHICHTSPANPLATTEN MIT VERSCHIEDENEN ADDITIVEN....	37
TABELLE 14:	QUERZUG- UND BIEGEFESTIGKEITEN VON DREISCHICHTSPANPLATTEN MIT VERSCHIEDENEN ADDITIVEN	38
TABELLE 15:	KALORIMETRISCHE KENNWERTE VON EINSCHICHTSPANPLATTEN MIT VERSCHIEDENEN BINDEMITTELVERHÄLTNISSSEN	39
TABELLE 16:	QUERZUG- UND BIEGEFESTIGKEITEN VON EINSCHICHTSPANPLATTEN MIT VERSCHIEDENEN BINDEMITTELVERHÄLTNISSSEN	39
TABELLE 17:	QUERZUG- UND BIEGEFESTIGKEITEN VON BASALTFASERVERSTÄRKTEN EINSCHICHTSPANPLATTEN MIT VERSCHIEDENEN BINDEMITTELVERHÄLTNISSSEN.....	39
TABELLE 18:	BIEGEFESTIGKEITEN UND QUERZUGFESTIGKEITEN DER ZEMENTSPANPLATTEN MIT UND OHNE BASALTVERSTÄRKUNG MIT UNTERSCHIEDLICHEN ZEMENT-ZU-HOLZ VERHÄLTNISSSEN	42
TABELLE 19:	KALORIMETRISCHE KENNWERTE VON REFERENZ- UND VERSTÄRKTEN ZEMENTSPANPLATTEN MIT VERSCHIEDENEN SPANGEHALTEN.....	42

III. Abkürzungsverzeichnis

BMEL:	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
EDX:	Energy Dispersive X-ray spectroscopy
ESEM:	Environmental Scanning Electron Microscope
F_{\max} :	Maximalkraft
FNR:	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.
FTIR:	Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer
IB:	Querzugfestigkeit
MDF:	Mitteldichte Holzfasernplatten
MOE:	Elastizitätsmodul
MOR:	Biegefestigkeit
MUF:	Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harz
OMA:	Oberflächen-Modifizierungs-Anlage
OSB:	Oriented Strand Board
PB:	Spanplatte
PF:	Phenol-Formaldehyd-Harz
pMDI:	Polymeres Diphenylmethandiisocyanat-Harz
PMF:	Phenol-Melamin-Formaldehyd-Harz
UF:	Harnstoff-Formaldehyd-Harz
W:	Arbeit

IV. Kurzbericht

1. Aufgabenstellung

Ursprüngliche Zielstellungen

Ziel des Projektes war die Optimierung der Festigkeiten und Feuerbeständigkeit rohdichtereduzierter Spanplatten und Oriented Strand Boards (OSB) für den Bausektor und die Verpackungsindustrie. Dieses globale Projektvorhaben bestand im Wesentlichen aus zwei Themenblöcken:

1. Verbesserung der mechanischen Eigenschaften

Viele mechanisch-technologische Eigenschaften von Holzwerkstoffen korrelieren direkt mit der Rohdichte des Werkstoffes. Aufgrund von Ressourceneinsparungen bzw. höherer Ressourceneffizienz im Sinne einer nachhaltigen Werkstoffproduktion und -nutzung wurden in der Vergangenheit bereits im Bereich des Möbelbaus die Rohdichten der dort klassischerweise verwendeten Werkstoffe, wie Span- und Faserplatten, z. T. deutlich reduziert [1]. Diese Rohstoffeinsparung ist auch für den Bausektor wünschenswert. Aufgrund der höheren Anforderungen für Holzwerkstoffe hinsichtlich ihrer mechanisch-technologischen Eigenschaften, die mit der Werkstoffverwendung in diesem Sektor einhergehen, ist diese Einsparung jedoch nicht in gleicher Weise realisierbar. Rohdichtereduzierungen führen zu einer deutlichen Verringerung der Festigkeitseigenschaften sowohl senkrecht als auch parallel zur Werkstoffoberfläche und bedeuten für Werkstoffe im Bausektor somit vielfach eine Unterschreitung der normativen Mindestanforderungen. Durch den Einsatz von geeigneten Geweben auf Basaltbasis sollen die für den Bausektor notwendigen Mindestanforderungen an die Festigkeit (insbesondere die Biegefestigkeit) von Holzwerkstoffen trotz reduzierter Rohdichten erfüllt werden.

Als klassische Werkstoffe für den Bausektor werden im Rahmen dieses Projektes die Verwendung unterschiedlicher Basaltinlays für einschichtige und dreischichtige Spanplatten (AP 2 und AP 3) sowie für Oriented Strand Boards (OSB) (AP 4) untersucht. Diese Holzwerkstoffe werden größtenteils mit polymeren Diisocyanaten (pMDI), Phenol-Formaldehyd-Harzen (PF-Harz) oder Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harzen (MUF-Harz) gebunden, um eine hohe Wasserbeständigkeit der Werkstoffe zu gewährleisten. Die Verklebung von Holz als organischer und Basalt als anorganischer Komponente des Verbundwerkstoffes mittels klassischer Klebharze stellt dabei eine wesentliche Herausforderung dar. Eine gute Verbindung der unterschiedlichen Komponenten ist jedoch Voraussetzung für die Herstellung der Plattenwerkstoffe im Hinblick auf deren Festigkeiten. Um hohe Festigkeitswerte durch eine gute Anbindung der Bindemittel an das Basaltfasergewebe zu gewährleisten, soll dessen Oberfläche mit Silanverbindungen modifiziert werden (AP 1).

2. Erhöhung der Feuerbeständigkeit

Der zweite Themenblock betraf die Optimierung der Feuerbeständigkeit von Holzwerkstoffen für den Bausektor. Dort ist neben den mechanisch-technologischen Anforderungen an die eingesetzten Holzwerkstoffe auch eine ausreichende Feuerbeständigkeit zu gewährleisten. Für dieses Teilvorhaben sollten alternative Klebstoffe auf Mineralbasis (Wasserglas, Kieselsole, Carbonate), die einen entsprechenden Feuerschutz bieten, in Kombination mit den für die Werkstofffertigung typischen Bindemitteln Isocyanat, PF-Harz und MUF-Harz entwickelt werden (AP 5, AP 6 und AP 7). Die entwickelten Bindemittelsysteme sollten ebenfalls für die Werkstoffe mit Basaltinlays angewendet und hinsichtlich ihrer Beeinflussung der Festigkeiten sowie des Brandverhaltens der hergestellten Platten evaluiert werden (AP 8). Abschließend sollten die im Labormaßstab gewonnenen Erkenntnisse auf eine industrielle Großanlage eines Projektpartners übertragen werden (AP 9).

Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Produktion der Holzwerkstoffe sowie die Prüfung der mechanisch-technologischen und kalorimetrischen Eigenschaften konnten intern an der Abteilung Holzbiologie und Holzprodukte der Georg-August-Universität Göttingen durchgeführt werden. Aufgrund der Möglichkeit der kompletten Plattenfertigung im Labormaßstab und einem gut ausgestatteten Physiklabor war es möglich, Eigenschaften wie Querkzugfestigkeiten nach EN 319, Biegefestigkeit inklusive Elastizitätsmodul nach EN 310, Bestimmung der Maßänderung nach EN 318, Bestimmung des Feuchtegehaltes nach EN 322, Bestimmung der Rohdichte nach EN 323 vor Ort zu bestimmen. Weiter standen abteilungsinterne Geräte wie ein 3D-Mikroskop, ein Rasterelektronenmikroskop und ein Rohdichteprofil-Labor-Messgerät zur Verfügung.

Durch die auftretende Corona-Pandemie im Jahr 2020 konnten die geforderten Ziele und Meilensteine nicht entsprechend dem gesetzten Zeit- und Ressourcenplan erbracht werden. Daher wurde eine Verlängerung des Teilvorhabens um 14 Monate beantragt und durch die FNR bewilligt.

Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

1. Faserverstärkung von Holzwerkstoffen

Die Faserverstärkung von Holzwerkstoffen wurde in den frühen 2000er-Jahren in der Forschung verstärkt untersucht. So wurden verschiedene Arten von Holzwerkstoffen oder Vollholz mit Geweben oder Vliesstoffen (besser bekannt als Nonwovens) verstärkt. Ebenfalls war die verwendete Auswahl der Faserarten sehr groß. So wurden natürliche, synthetische oder mineralische Fasern mit unterschiedlichen Garnfeinheiten, Flächenmassen der Gewebe, Fadendichten im Halbzeug oder Beschichtungssysteme untersucht. Im Folgenden werden kurz einige Publikationen aufgelistet und beschrieben, welche den wissenschaftlichen und technischen Stand bei Projektbeginn widerspiegeln:

In der ersten hier dargestellten Publikation wurden mitteldichte Faserplatten (MDF) mit Metallnetzen sowie gewebten Synthetiknetzen verstärkt. Der Plattenaufbau wurde, unüblich für MDF-Platten dreigeteilt, ähnlich wie bei dreischichtigen Faserplatten. Die Verstärkungsnetze wurden jeweils zwischen eine der beiden Deckschichten und die Mittelschicht eingebracht [2] (vgl. Abbildung 1). Mohebbi et al. kamen zu dem Ergebnis, dass die Effizienz der Verstärkung besonders von der Zugfestigkeit des Verstärkungsmaterial abhängt.

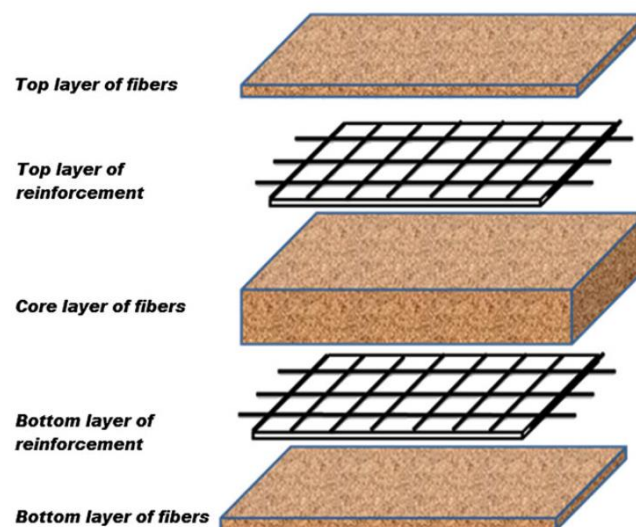


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Anordnung der Verstärkung in der MDF-Platte; die Verstärkungen wurden jeweils ein Viertel der Plattendicke von der Oberfläche entfernt eingebracht (nach Mohebbi et al. [2])

Cai verstärkte MDF-Platten sowie Flakeboards, indem eine dünne Glasfasermatte auf die Plattenoberflächen presste [3].

Verschiedene natürliche Fasern aus Flachs, Hanf, Bambus, aber auch aus Basalt wurden in einer weiteren Studie auf den Biegezugzonen von Holzbalken aufgebracht, um die Biegefestigkeit der Balken zu erhöhen [4]. Neben Geweben wurden auch Non-wovens aus Flachs- und Hanffasern zur Verstärkung von Spanplatten verwendet [5].

Basaltfasergewebe wurden in der Kombination mit Holzwerkstoffen bereits als Verstärkungsmaterial verwendet. In verschiedenen Forschungsansätzen wurden die Gewebe zum Beispiel mit verschiedenen Bindemitteln oberflächlich auf Holzwerkstoffe aufgeklebt [6,7].

Basaltfasern wurden ebenfalls oft als Faserverstärkungsmaterial verwendet, dies aber meist in Kombination mit mineralischen Bindemitteln wie Zement [8–10].

2. Mineralische Bindemittel

Wissenschaftlich wurde die Verwendung von Wasserglas als mineralische Bindemittel für Holzwerkstoffe bereits in verschiedenen Arbeiten untersucht. So wurde Wasserglas zum Beispiel als Holzschutzmittel [11,12] oder zur Erhöhung der UV-Beständigkeit eingesetzt. Es wurde ebenfalls zur Verklebung von Massiholz [13,14] oder als Flammschutzmittel verwendet [15]. Jedoch zeigten einige Studien, dass das Wasserglas nicht fest im Holz verankert ist, sondern oftmals, aufgrund seiner Wasserlöslichkeit, herausgewaschen werden kann [16,17].

Aufgrund von Kostengründen und der sehr hohen Werkstoffdichte ist die industrielle Verwendung von mineralischen Bindemitteln bei der Herstellung von Holzwerkstoffen jedoch gegenwärtig lediglich auf die Nutzung von Beton beschränkt. Beton wird als Bindemittelmatrix zur Herstellung von zementgebundenen Spanplatten für den Bausektor verwendet, um Spanplatten anzufertigen, die den Anforderungen der Brandschutzklassen nach DIN 4102 und EN 13501-1 genügen. Der in der Industrie verwendete Holzanteil beträgt meist zwischen 10 – 15 m%. Holzfasern werden für die Herstellung von Gipsfaserplatten verwendet, da diese die Festigkeiten des Plattenwerkstoffes erhöhen.

2. Planung und Ablauf des Vorhabens

Planung und Ablauf des Vorhabens

Im ersten Jahr des Projektvorhabens sollten insbesondere Basaltinlays ausgewählt und oberflächlich modifiziert werden, welche im folgenden Projektverlauf in einschichtige sowie dreischichtige Spanplatten und OSB-Platten implementiert werden sollten (vgl. AP 1). Ebenfalls im ersten Jahr sollten rohdichtereduzierte Einschichtspanplatten sowie rohdichtereduzierte Dreischichtspanplatten mit Basaltinlays hergestellt und hinsichtlich ihrer mechanisch-technologischen Eigenschaften überprüft werden (AP 2 und AP 3). Erste Untersuchungen bezüglich der Eigenschaften von verschiedenen mineralischen Additiv- und Bindemittelkombination sollten durchgeführt werden (AP 5, AP 6 und AP 7).

Die Herstellung von rohdichtereduzierten OSB-Platten und die Prüfung der mechanisch-technologischen Eigenschaften (AP 4) sowie die Verwendung der im Vorjahr untersuchten Leimflotten mit mineralischen Komponenten in der Produktion von Span- und OSB-Platten (AP 5, AP 6 und AP 7) sollten im zweiten Jahr des Projektvorhabens durchgeführt werden.

Für das letzte Jahr des Vorhabens waren vor allem die Brandschutztests der in den zuvor hergestellten und durch die mineralische Bindemittelflotte verstärkten Span- und OSB-Platten (AP 8) sowie eine Übertragung der in den Arbeitspaketen 5 und 7 gewonnen Erkenntnissen auf einen Versuch im Industriemaßstab bei einem der Projektpartner geplant.

Während des Vorhabens kam es jedoch aufgrund verschiedener Faktoren zu einer Umstrukturierung des Zeitplans. Durch eine zweifache Verlängerung des Projektvorhabens wurde das Projektende anstatt auf September 2021 auf den Dezember 2022 verschoben.

Aufgrund der guten Ergebnisse der mechanisch-technologischen Prüfungen von den hergestellten Einschicht- und Dreischichtspanplatten wurde die Modifizierung der Basalt-Oberfläche mit Ureidosilan in das vierte Jahr des Bewilligungszeitraums verschoben. Die Produktion von Dreischichtspanplatten und OSB-Platten mit dem von einem Projektpartner zur Verfügung gestellte Material ohne Silan-Modifizierung wurde vorgezogen.

Die industrienähe Herstellung von Span- und OSB-Platten mit mineralischen Bindemitteln, die akzeptable hygriech-mechanische Eigenschaften aufweisen, stellte sich im Verlauf des Projektes aufgrund technischer Verfahrensprobleme (vgl. Kapitel: Arbeitspaket 5 bis 8:) als nicht realisierbar dar. Daher konnten die Arbeitspakete 5 – 7 nur teilweise bearbeitet werden. Als Alternative wurden im Zuge dessen basaltfaserverstärkte Zementspanplatten hergestellt, welche aufgrund der mineralischen Matrix ebenfalls schwerentflammbar Holzwerkstoffe darstellen. Durch Schwierigkeiten, welche sich bei der Produktion der Plattenwerkstoffe der Arbeitspakete 5 – 7 ergaben, konnte das darauf aufbauenden Arbeitspakete 9, welches ein Up-Scaling auf Industriemaßstab vorsahen, nicht bearbeitet werden.

Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Innerhalb des Projektes wurde mit diversen anderen Stellen zusammengearbeitet:

Aufgrund personeller Veränderungen innerhalb der Culimeta Innobra GmbH (einem offiziellen Projektpartner) machte sich der dortige Ansprechpartner mit der Dibrax GmbH in Brake selbstständig. Da es für lange Zeit unklar war, welcher der beiden Betriebe die Rechte auf die Produkte SWK1000 sowie UltraCool500 hatte, wurde anfangs lediglich mit der Dibrax GmbH zusammengearbeitet. Die Synthese der Produkte SWK1000 sowie UltraCool500 erfolgte jedoch nicht durch die Dibrax GmbH, sondern durch das Entwicklungsbüro Heike Huth, welches von der Dibrax GmbH beauftragt wurde. Erst als die Dibrax GmbH im Jahre 2020 aufgelöst wurde, kam es zu einer Zusammenarbeit mit der Culimeta Innobra GmbH. Jedoch wurde erst im späteren Verlauf der Kooperation ersichtlich, dass lediglich die Culimeta Innobra GmbH die Produkte SWK1000 und UltraCool500 vertreibt, diese aber ebenfalls nicht selbst synthetisiert. Eigentlicher Hersteller der Produkte ist die IGP Chemie GmbH in Dülmen, mit welcher im weiteren Verlauf ebenfalls zusammengearbeitet wurde.

Für die Modifizierung der Basaltgewebe wurde mit dem Fraunhofer-Anwendungszentrum (HOFZET) des Fraunhofer-Instituts für Holzforschung (WKL) in Hannover zusammengearbeitet. Dieses verfügt über eine Oberflächenmodifizierungsanlage, welche einen gleichmäßigen Auftrag von Chemikalien auf Faseroberflächen gewährleistet.

Für die Bestimmung der Schälwiderstandsprüfungen nach DIN EN 1464 sowie Zugversuche an Basaltgeweben nach DIN EN 10319 durchgeführt wurde mit dem Fraunhofer-Institut für Holzforschung (WKL) in Braunschweig zusammengearbeitet, da dieses geeignete Prüfvorrichtungen für diese Prüfvorschriften besitzt [18,19].

Um eigene Gewebe herzustellen, wurde mit dem Zentrum für leichte und umweltgerechte Bauten (ZELUBA), welches zum Fraunhofer-Institut für Holzforschung (WKL) gehört, zusammengearbeitet.

Vom ursprünglichen Projektpartner AkzoNobel wurde die Sparte der Firma, welche Kieselsole vertreibt, als Nouryon Functional Chemicals GmbH ausgegliedert. Daher wurde im Laufe des Projekts mit Nouryon zusammengearbeitet.

Phenolharze wurden von der Firma Dynea Chemicals zur Verfügung gestellt, nachdem bei Gesprächen und Beratungen der Firma Allnex Germany GmbH ersichtlich wurde, dass die Phenolharze des Herstellers aus Erkner für die Produktion von Holzwerkstoffen besser geeignet sind.

3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse

a) Arbeitspakete und Meilensteine

Tabelle 1: Arbeitspakete mit Bearbeitungszeitraum und Zielerreichung laut Projektantrag.

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
AP 1 Auswahl und Modifizierung der Basaltinlays	10/2018 bis 03/2020	Ja
AP 2 Herstellung rohdichtereduzierter Einschichtspanplatten mit Basaltinlays sowie Prüfung der mechanisch-technologischen Eigenschaften	10/2018 bis 12/2019	Ja
AP 3 Herstellung rohdichtereduzierter Dreischichtspanplatten mit Basaltinlays sowie Prüfung der mechanisch-technologischen Eigenschaften	01/2019 bis 03/2020	Ja
AP 4 Herstellung rohdichtereduzierter OSB-Platten mit Basaltinlays sowie Prüfung der mechanisch-technologischen Eigenschaften	04/2019 bis 06/2020	Ja
AP 5 Ermittlung der Eigenschaften der Leimflotte Kieselso/ SWK 1000/pMDI sowie Verwendung von Kieselsofen und SWK 1000 in Kombination mit pMDI zur Herstellung von Spanplatten und OSB	07/2019 bis 06/2020	Teilweise
AP 6 Ermittlung der Eigenschaften der Leimflotte Kieselso/ MUF sowie Verwendung von Kieselsofen und MUF-Harzen zur Herstellung von Spanplatten	07/2019 bis 09/2020	Teilweise
AP 7 Ermittlung der Eigenschaften der Leimflotte Kieselso/ SWK1000/ UltraCool500/ PF sowie Verwendung von Kieselso/ SWK1000/ UltraCool500/ PF	07/2019 bis 12/2020	Teilweise
AP 8 Brandschutztests an den in AP 5 bis 7 hergestellten Holzwerkstoffen	10/2012 bis 09/2021	Teilweise
AP 9 Industrierversuch zur Herstellung mineralisch gebundener OSB-Platten	01/2021 bis 06/2021	Geplant

Tabelle 2: Meilensteine mit Fälligkeit und Zielerreichung laut Projektantrag.

Meilensteine (M) (lt. Planung im Antrag)	Fälligkeit (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
M 1 Entwicklung von Oberflächenmodifikationen der Basaltmatten	03/2020	Ja
M 2 Ermittlung der optimalen Position in einschichtigen Spanplatten	03/2019	Ja
M 3 Ermittlung der optionalen Position der Basaltmatten in dreischichtigen Spanplatten	06/2019	Ja
M4 Ermittlung der optimalen Position der Basaltmatten in OSB-Platten	09/2019	Ja
M5 Ermittlung der maximal erzielbaren Rohdichtereduzierung in einschichtigen Spanplatten unter Verwendung von Basaltmatten	09/2019	Ja
M6 Ermittlung der maximal erzielbaren Rohdichtereduzierung in dreischichtigen Spanplatten unter Verwendung von Basaltmatten	12/2019	Ja
M7 Ermittlung der maximal erzielbaren Rohdichtereduzierung in OSB-Platten unter Verwendung von Basaltmatten	03/2020	Ja
M8 Feuerbeständigkeit nach DIN/EN durch Verwendung von Kieselolen, SWK 1000 und pMDI	06/2020	Teilweise
M9 Feuerbeständigkeit nach DIN/EN durch Verwendung von Kieselolen und MUF-Harzen	09/2020	Teilweise
M10 Feuerbeständigkeit nach DIN/EN durch Verwendung von SWK 1000, Ultra Cool 500, Kieselolen und PF-Harzen	12/2020	Nein
M11 Industrierversuch zur Herstellung mineralisch gebundener OSB-Platten und Überprüfung der Umsetzbarkeit in den Industriemaßstab	06/2021	Nein

b) Zusammenfassung

Die im Jahr 2004 erstmals vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) aufgelegte Charta für Holz hatte das Ziel, den Holzverbrauch in Deutschland pro Kopf innerhalb von zehn Jahren um 20 % zu steigern. Dieses Ziel wurde bereits vor Ablauf der Zehnjahresfrist erreicht. Die zweite Auflage der Charta (Charta für Holz 2.0) definiert dahingegen das Ziel, mehr Holz aus nachhaltiger Forstwirtschaft zu verwenden – zugunsten von Klimaschutz, Arbeitsplätzen und Wertschöpfung im ländlichen Raum sowie zur Schonung endlicher Ressourcen. Eine Umsetzung der vom BMEL benannten Ziele, welche zum Beispiel das Bauen mit Holz beinhalten, erfordert eine Effizienzsteigerung beim Einsatz der Material- und Energieressourcen zur Herstellung von Holzwerkstoffen.

Ziel des bearbeiteten Projektvorhabens war es, neue sowie effizientere Produkte (Spanplatten und OSB) aus Holz herzustellen, um die Wertschöpfung von Holzwerkstoffen zu verbessern und deren Einsatz in neuen Anwendungsbereichen (Brandschutz) zu ermöglichen.

Die Verwendung von Basaltfasern als Verstärkungsmaterial für Holzwerkstoffe macht es möglich, zum einen Plattenwerkstoffe herzustellen, welche bei gleichbleibender Dichte im Vergleich zu konventionellen Plattenwerkstoffen weitaus höhere Biegefestigkeiten aufweisen. Andererseits besteht die Möglichkeit, die in der Norm DIN EN 310 [20] geforderten Mindestanforderungen bei reduzierter Dichte zu erreichen. Durch die Implementierung von Basaltfasern mit hoher Zugfestigkeit ist es möglich, das Festigkeit-zu-Gewicht-Verhältnis (strength-to-weight ratio) zu erhöhen. Mit dem Blick auf die Produktion bedeutet dies eine Einsparung des Rohstoffes Holz, was im Hinblick auf die derzeitige Holzverknappung sowie steigenden Holzpreisen einen ökologischen sowie ökonomischen Vorteil darstellt.

In Vorversuchen wurde evaluiert, inwieweit Beschichtungssysteme die Adhäsion zwischen der Bindemittelmatrix und der Basaltoberfläche verbessern. Die physikalisch-mechanischen sowie chemisch-analytischen Untersuchungen ergaben, dass die Verwendung einer Acrylatbeschichtung, wie in der Industrie üblich, in den meisten Fällen bessere Kennwerte ergibt als die Verwendung eines Ureidosilans.

Die Herstellung und Analyse von Einschichtspanplatten, in denen die Basaltgewebe in unterschiedlichen Ebenen implementiert wurden, zeigte, dass die Implementierung in allen Fällen eine Verbesserung der Biegefestigkeit der Plattenwerkstoffe verursachte. Die höchsten Steigerungen wurden erzielt, je weiter die Basaltgewebe von der Plattenmitte entfernt waren. Dabei sei darauf hingewiesen, dass es keinen signifikanten Unterschied zwischen der Implementierung der Basaltgewebe nahe der Oberfläche oder dem nachträglichen Aufpressen des Gewebes auf die Plattenoberfläche gab. Diese Ergebnisse wurden bei der Produktion weiterer Plattenwerkstoffe berücksichtigt.

In einem weiteren Schritt wurde die Dichteabhängigkeit der Verstärkung bezogen auf die Plattendichte untersucht. Dafür wurden Spanplatten sowie OSB der Dichten 720 kg/m³, 650 kg/m³ und 580 kg/m³ mit Basaltgeweben verstärkt und auf ihre physikalisch-mechanischen Eigenschaften hin getestet. Die Ergebnisse zeigten, dass für die Spanplatten bei Abnahme der Dichte die relative Festigkeitszunahme durch die Verstärkung zunimmt, wohingegen sie für die OSB abnimmt. Dies ist auf die unterschiedlichen Größen der Holzpartikel und deren Einbindung in das Basaltgewebe zurückzuführen. Es war durch die Faserverstärkung möglich, dass mit Harnstoff-Formaldehyd-Harz gebundene Spanplatten mit einer Dichte von 580 kg/m³ die Anforderungen für P2 Platten nach DIN EN 312 erreichen, welche die Referenzplatten mit 720 kg/m³ nicht erreichten.

Im zweiten Teilbereich des Projektvorhabens, sollten Holzwerkstoffe mit mineralischen Brandschutzklebern ausgerüstet werden. Die Herstellung von Spanplatten und OSB mit zusätzlichen mineralischen Bindemitteln in

Kombination mit konventionellen Bindemitteln (MUF, PF, Isocyanat) stellte sich als sehr problematisch dar. Lediglich mit zwei der mineralischen Co-Bindemittel war es möglich, Einschicht- sowie Dreischichtspanplatten herzustellen und diese auf ihre physikalisch-mechanische sowie kalorimetrische Eigenschaften zu überprüfen. Die mechanischen Eigenschaften wurden aufgrund der Zugabe des Additivs (Co-Bindemittels) in erheblichem Maße reduziert. Ebenfalls zeigten die kalorimetrischen Untersuchungen, dass das mineralische Additiv im Gegensatz zu konventionellen Flammschutzmitteln eine geringere Effizienz aufweist.

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurden ebenfalls zementgebundene Spanplatten mit verschiedenen hohen Holzanteilen hergestellt, welche mit Basaltgeweben verstärkt wurden. Die Ergebnisse der Versuche machten deutlich, dass auch bei diesen Holzwerkstoffen die Implementierung der Basaltgewebe die Biegefestigkeit stark erhöht und der Festigkeitsreduktion bei steigendem Holzanteil entgegenwirkt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Durchführung des Projektvorhabens zeigte, dass insbesondere die mineralische Faserverstärkung von Holzwerkstoffen ein Verfahren darstellt, dass eine Effizienzsteigerung von Plattenwerkstoffen ermöglicht. Die daraus resultierenden leichteren Werkstoffe können zu einer Ressourcenschonung im Bausektor beitragen.

V. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

1. Erzielte Ergebnisse

Arbeitspaket 1: Auswahl und Modifizierung der Basaltinlays

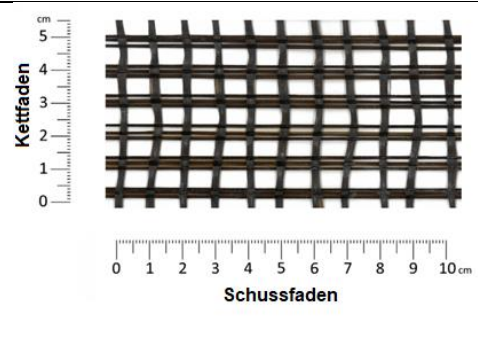
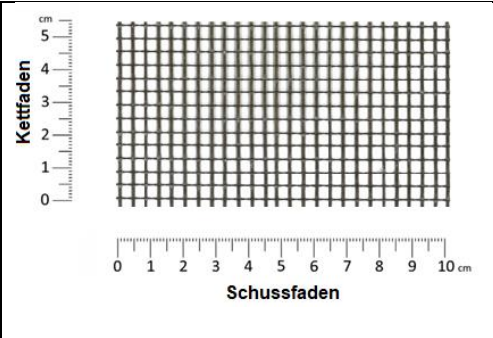
Ziel dieses Arbeitspaketes war die Auswahl von Basaltinlays und deren Modifizierung. Basaltinlays können sich strukturell in verschiedenen Parametern unterscheiden. So lassen sich Gewebe hinsichtlich ihrer Maschenweite, der Feinheiten der Kett- und Schussfäden sowie der Gewebestrukturen, welche beim Webprozess festgelegt werden, differenzieren. Zusätzlich kann die Oberfläche der Gewebe nachträglich modifiziert werden, um ihre Eigenschaften zu verändern.

Durch verschiedene Untersuchungen sollte überprüft werden, welche Gewebeart für die Verwendung zur Herstellung von Plattenwerkstoffen (Spanplatten und Oriented Strand Boards) im Rahmen des Projektvorhabens am besten geeignet ist. Zusätzlich wurden Basaltgewebe oberflächlich chemisch behandelt, um daran anschließend zu analysieren, ob diese Veränderungen die Adhäsion zwischen Bindemitteln und Basalt erhöhen und in der Folge die Festigkeiten der Werkstoffe verbessern.

a) Auswahl geeigneter Basaltinlays

Im nachfolgend beschriebenen Teilbereich des ersten Arbeitspaketes ging es um die Auswahl geeigneter Basaltinlays. Die zwei zur Auswahl stehenden Inlays unterschieden sich hinsichtlich ihrer Maschenweite, der Feinheit der Kett- und Schussfäden sowie des Flächengewichts (vgl. Tabelle 3). Das Geogrid wurde durch den Projektpartner Deutsche Basalt Faser GmbH zur Verfügung gestellt; das engmaschige Gittergewebe stammte von der Firma Incotology GmbH.

Tabelle 3: Technische Eigenschaften der verwendeten Basaltinlays.

		
Name	Geogrid	Gittergewebe
Schussfaden (tex)	750	210
Kettfaden (tex)	720	210
Maschenweite (mm)	9*9	3,5*3,5
Flächengewicht (g/m²)	200	120
Zugfestigkeit in Kettrichtung (kN/m) nach DIN EN 10319	35,6	27,9
Dehnung bei Höchstkraft in Kettrichtung (%) nach DIN EN 10319	1,7	1,9

Die beiden Verstärkungsmaterialien wurden in einem Vorversuch auf ihre Verwendbarkeit in sowie ihre verstärkende Funktion von Holzwerkstoffe(n) getestet. Hierfür wurden Gewebe, welche in der Plattenmitte lokalisiert waren, in Einschichtspanplatten verpresst und die Festigkeiten der Platten analysiert. Als Bindemittel für diese Versuche wurde für alle Varianten pMDI verwendet. Es wurden insgesamt drei Varianten hergestellt: Eine Spanplatte als Referenzvariante sowie Spanplatten, welche jeweils ein feines bzw. ein grobes Basaltgewebe in der Plattenmitte enthielten. Die Spanplatten sollten eine Zielrohdichte von 650 kg/m² aufweisen, dabei betrug die Presszeit 15 s/mm Plattendicke bei einer Temperatur von 200 °C. Die Dicke von 18 mm wurde durch metallene Abstandshalter realisiert. Die in der Folge geprüften mechanischen Eigenschaften der drei Varianten sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: Mechanische Eigenschaften der hergestellten Einschicht-Spanplatten mit einer Dichte von 680 kg/m³.

	Referenz	Geogrid	Gittergewebe
Querzugfestigkeit (N/mm ²) nach DIN EN 319	1,73	1,39	1,05
Querzugfestigkeit nach Kochprüfung (N/mm ²) nach DIN EN 1087-1	0,47	0,21	0,08
Biegefestigkeit (N/mm ²) nach DIN EN 310	24,15	28,06	27,69
Biege-Elastizitätsmodul (N/mm ²) nach DIN EN 310	3671	4103	4085

Anhand dieser Ergebnisse wurden zwei Effekte deutlich. Diese können auf das Einbringen der Gewebe in die Spanplatten zurückgeführt werden.

Der erste Effekt besteht in der Verringerung der Querzugfestigkeit nach DIN EN 319 [21] sowie der Querzugfestigkeit nach DIN EN 1087 [22]. Die Gewebestruktur scheint, wenn das Gewebe in die Mitte der Platte lokalisiert ist, eine wenig durchlässige Trennschicht zwischen den angrenzenden Spanpartikeln darzustellen. Je feiner die Maschenweite des Gewebes, desto stärker ist dieser Effekt. Beim Geogrid, das einen großen Maschenabstand zwischen Kett- und Schussfäden aufweist, können sich die im Vergleich zur Maschenweite kleineren Partikel freier orientieren. Bei dem verwendeten engmaschigen Gittergewebe ist durch die Maschenweite von 3,5×3,5 mm ein Durchdringen des Basaltgitters durch das Spanmaterial fast nicht mehr möglich. Ein ähnlicher Effekt konnte bei der Gegenüberstellung von Spanplatten zu OSB beobachtet werden. Die weitaus größeren OSB-Strands können anders als die Späne der Spanplatten das Geogrid nicht durchdringen, wodurch das Gitter auch dort einen Trennschichtcharakter besitzt. Generell führt eine Verkleinerung der Maschenweite zu einer vorwiegend planaren Ausrichtung von größeren Partikeln, da eine freie Orientierung nur in geringerem Ausmaß möglich ist. Aus dieser geringeren Vernetzung innerhalb der Platte resultiert die geringere Querzugfestigkeit.

Der nur in geringerem Maße verstärkende Charakter des feinmaschigen Gewebes lässt sich teilweise anhand der geringere Eigenfestigkeit dieses Materials, verursacht durch sein geringeres Flächengewicht, erklären.

Der zweite Effekt besteht in einer Erhöhung der Biegefestigkeit. Die hohe Zugfestigkeit des Basalt-Materials führt dazu, dass die Biegefestigkeit sowie das Biege-Elastizitätsmodul ansteigen. Obwohl das Verstärkungsmaterial in der theoretischen neutralen Zone [23], also der Hälfte der Plattendicke, eingebracht wurde, ist eine Erhöhung der Festigkeiten zu verzeichnen. Die Maschenweite scheint für die Biegeeigenschaften eine untergeordnete Rolle zu spielen.

Aufgrund dieser beobachteten Effekte wurde beschlossen, dass für den weiteren Verlauf des Projektes das Geogrid aufgrund seiner höheren Eigenfestigkeiten sowie der größeren Maschenweite das bessere Verstärkungsmaterial darstellt.

b) Modifizierung der Basaltinlays

Um die Adhäsion zwischen dem Basaltgewebe und konventionellen Bindemitteln, welche für die Herstellung von Plattenwerkstoffen in der Holzindustrie verwendet werden, und damit auch die Festigkeiten der Plattenwerkstoffe zu verbessern, wurde eine chemische Modifizierung der Basaltfasern durchgeführt. Nach Yu et al. [24] wird die Leistung von Verbundwerkstoffen, zu denen auch die Kombination aus Basaltgewebe und Plattenwerkstoff zählt, durch die Eigenschaften der Fasern und der Matrix (hier das Bindemittel) sowie der Grenzflächenkompatibilität zwischen beiden bestimmt. Die Adhäsionseigenschaft der Faser (hier die Basaltfaser) ist grundlegend für eine effiziente Lastübertragung über die Matrix-Faser-Grenze.

Das in den Arbeitspaketen verwendete Geogrid ist bereits mit einer Acrylatbeschichtung versehen. Neben dieser vorhandenen Acrylatbeschichtung wurde das aktive Ureidosilan Silquest A-1524 des Projektpartners Momentive Performance Materials GmbH als Beschichtungskemikalie verwendet.

Das Ureidosilan (3-Ureidopropyltrimethoxysilan) kam für diese Anwendung in Frage, da sich die Ureid-Struktur vom Harnstoff ableitet. Jene weist eine Harnstoffgruppe auf, welche mit den Methylolgruppen in den Harnstoff- sowie Phenolharzen reagieren kann. Die Tri-Methoxy-Silan-Gruppe bindet nach vorheriger Hydrolyse theoretisch kovalent an die basalteigenen Hydroxylgruppen. Durch diese Vernetzungsmöglichkeiten erschien das Ureidosilan als geeigneter Quervernetzer zwischen den organischen Bindemitteln sowie dem anorganischen Basalt.

Über die Acrylatbeschichtung können keine weiteren Angaben, etwa hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung, gemacht werden, da dieses Produkt von der Deutschen Basalt Faser GmbH hergestellt wird und diese die Zusammensetzung aus betriebsschutzrechtlichen Gründen nicht offenlegen möchte.

Für die Modifizierung des Basalts wurden verschiedene Verfahren angewendet und evaluiert, was in den folgenden Unterkapiteln dargestellt wird.

a. Single Fiber Pull-Out-Test

Kurze Basaltfasern oder Ultra Short Fibers werden oftmals für die Faserverstärkung von mineralischen Matrizen verwendet. Hierzu zählt unter anderem die Kombination von Basaltfasern mit Zement, welche im Bauwesen oft Verwendung findet. Es wurde versucht, den Single Fiber Pull-Out-Test, welcher in diesem Bereich das gängige Prüfverfahren zur Evaluierung der Faserverstärkung der Matrix ist [25,26], mit üblichen Bindemitteln der Holzwerkstoffindustrie durchzuführen. Durch die Adaptation dieses Versuchsaufbaus sollten Rückschlüsse auf die Adhäsionskräfte zwischen unbehandeltem und modifiziertem Basalt und Klebstoffmatrix ermöglicht werden.

Basaltfasern mit einer Feinheit von 620 tex wurden mit der Arcrylat- und Ureidosilan-Beschichtung, den Angaben der Chemikalienhersteller folgend, versehen. Hierfür wurden die Fasern in die zuvor angesetzten Chemikalienlösung eingetaucht und danach getrocknet. Abschnitte der Referenz- sowie behandelten Fasern wurden anschließend einen Zentimeter tief in eine flüssige Bindemittelmatrix eingebettet. Die hierfür verwendeten Bindemittel waren Harnstoff-Formaldehyd (UF), Melamin-Formaldehyd (MUF), polymeres Diphenylmethandiisocyanat (pMDI) sowie ein Klebharz auf Phenol-Formaldehyd-Basis (PF).

Bei der Versuchsdurchführung wurde jedoch deutlich, dass sowohl bei Raumtemperatur als auch bei einer erhöhten Temperatur von 70 °C oder beschleunigt durch chemische Katalysatoren die Bindemittel nicht als reine Polymermatrix ausgehärtet werden konnten. Dadurch, dass der Feststoffanteil der Harze bei ungefähr 60–66 % liegt und diese in Wasser gelöst sind, verringert sich während der Polykondensationsreaktionen der Harze (UF, MUF und PF) das Volumen der Matrix. Durch diese Schrumpfung entstehen starke innere Spannungen und die Matrix bildet

Risse (vgl. Abbildung 2). Lediglich beim pMDI ist eine Aushärtung als Matrix möglich, da dieses einen Feststoffanteil von 100 % aufweist.

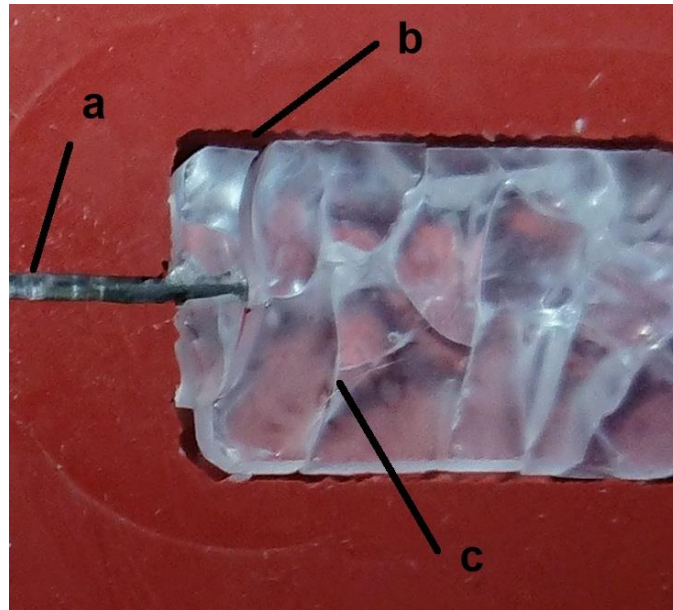


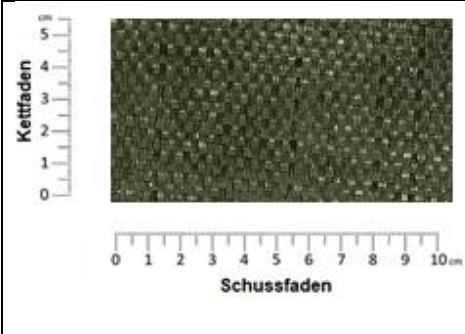
Abbildung 2: Ausgehärtete UF-Matrix mit Basaltfaser (a: Basaltfaser; b: Spalt, verursacht durch Schrumpfung der Matrix; c: Rissbildung verursacht durch innere Spannungen)

Aufgrund der mit dem Single Fiber Pull-Out-Test verbundenen technischen Probleme wurde auf den Rollenschälversuch zur Bestimmung des Schälwiderstandes von Basaltverklebungen zurückgegriffen, da dieser Test ebenfalls Rückschlüsse auf das Adhäsionsverhalten sowie die Versagensstruktur von Verklebungen ermöglicht. Dieses Testverfahren und seine Durchführung werden im Nachfolgenden beschrieben.

b. Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Klebungen nach DIN EN 310 sowie DIN EN 1464

Um eine differenzierte Aussage über die Verklebung zwischen Basalt und Holz unter Verwendung von Bindemitteln treffen zu können, wurden die verschiedenen Kombinationen von modifiziertem Basaltgewebe und Bindemittel nach DIN EN 310 und DIN EN 1464 getestet. Für die Bestimmung des Schälwiderstandes (DIN EN 1464) konnten jedoch nicht wie beim Single Fiber Pull-Out-Test Einzelfasern verwendet werden. Ebenso bot sich für diesen Test nicht die Verwendung der Gewebe mit Netz-Struktur an. Für diesen Versuch wurde ein Basaltgewebe (nach Art der Leinwandbindung (siehe Tabelle 5) verwendet, um eine vollflächige Verklebung zwischen Basalt und Trägermaterial zu garantieren.

Tabelle 5: Verwendetes Basaltgewebe nach Art der Leinwandbindung und dessen technische Eigenschaften.

	
Name	Gewebe_475
Schussfaden (tex)	600
Kettfaden (tex)	600
Flächengewicht (g/m ²)	475
Zugfestigkeit in Kettrichtung (kN/m) nach DIN EN 10319	57,2
Dehnung bei Höchstkraft in Kettrichtung (%) nach DIN EN 10319	1,8

Um einen gleichmäßigen Chemikalienauftrag zu gewährleisten, wurde diesmal das Gewebe nicht händisch in die Modifikationslösung eingetaucht, sondern es wurde eine Oberflächenmodifizierungsanlage verwendet. Dabei wurde das Basaltgewebe durch eine Auftragswanne geführt, in welchem sich die zu verwendende Modifizierungschemikalie befand. Für die Silanbehandlung wurde eine Lösung mit 7,5 m% Ureidosilan hergestellt. Die Acrylatlösung wurde nach Herstellerangaben verwendet. Danach wurden überschüssige Chemikalien mittels Gummirollen abgepresst. Anschließend wurde das Gewebe in einer Heizzone getrocknet und das Gewebe wieder aufgerollt (vgl. Abbildung 3). Die einzelnen Parameter (Vorschubgeschwindigkeit, Anpressdruck der Quetschwalze, Temperatur der Heizzone) wurden für das verwendete Acrylat und das Ureidosilan entsprechend der Vorgaben der Chemikalienhersteller angepasst. Es wurde ebenfalls eine Kombinations-Beschichtung durchgeführt, bei welcher zuerst mit Acrylat und danach mit Ureidosilan beschichtet wurde.

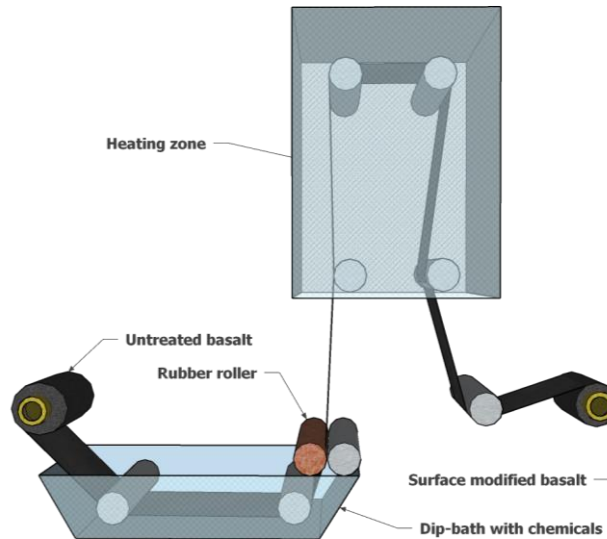


Abbildung 3: Aufbauschema der Oberflächenmodifizierungs-Anlage mit Auftragswanne und Heizzone.

Für die einzelnen Gewebetypen wurden das Flächengewicht und die Zugfestigkeit in Kettrichtung sowie die Dehnung bei Höchstkraft in Kettrichtung (%) nach DIN EN 10319 ermittelt (vgl. Tabelle 6). Diese Parameter sind als Kenngrößen für die Eignung der Gewebe als Verstärkungsmaterialien von Bedeutung. Eine höhere Festigkeit der Gewebe würde sich positiv auf die Endfestigkeiten der verstärkten Werkstoffe auswirken.

Es wurden lediglich die Festigkeitseigenschaften in Kettrichtung betrachtet, da diese die Belastungsrichtung in den danach folgenden Biege- sowie Rollenschälversuchen darstellten. Bei der Herstellung der Holzwerkstoffe in den folgenden Arbeitspaketen wurde stets auf die Orientierung der Gewebe geachtet. Jegliche Prüfkörper für den Drei-Punkt-Biegeversuch wurden so zugeschnitten, dass die Kettrichtung parallel zur Prüfkörperlänge verlief.

Tabelle 6: Flächengewichte sowie Zugkraft und Dehnung bei Höchstkraft in Kettrichtung der verschiedenen Gewebe (n=4; Mittelwert \pm Standardabweichung).

Variante	Flächengewicht (g/m ²)	Gewichtszunahmen (%)	Zugfestigkeit in Kettrichtung (kN/m) nach DIN EN 10319	Dehnung bei Höchstkraft in Kettrichtung (%) nach DIN EN 10319
Referenz	475	–	57,2 ($\pm 3,1$)	1,8 ($\pm 0,2$)
Silanisierung	484	1,9	65,6 ($\pm 2,4$)	1,7 ($\pm 0,3$)
Acrylatbehandlung	534	12,4	101 ($\pm 3,9$)	2,1 ($\pm 2,1$)
Kombination	542	14,0	107 (4,3)	2,2 ($\pm 0,1$)

Alle drei Beschichtungstypen erhöhen die Zugfestigkeit des behandelten Basaltgewebes in Kettrichtung. Dies lässt sich mit einer Verklebung der Einzelfilamente untereinander erklären.

Die Versagensart von Fasern beziehungsweise Faser-Matrix-Verbunden wird im Folgenden kurz erläutert.

Es gibt verschiedene Versagensformen von Verbunden aus Fasern und Matrix, die zum Beispiel abhängig sind von der Orientierung der Fasern, dem Massen- oder Volumenverhältnis von Faser und Matrix oder der Art und Wirkungsrichtung des Krafteinflusses der Prüfung. Die bei einer Zugbelastung aufgewendete Kraft wird während der Prüfung theoretisch auf alle Einzelfilamente in Zugrichtung gleichmäßig verteilt. Wird die maximale Zugfestigkeit eines Einzelfilaments überschritten, versagt dieses und bricht. Die Kraft wird nun von den verbleibenden Einzelfilamenten getragen. Diese Versagensart gilt für das unbeschichtete Referenzgewebe.

Bei der Verwendung von modifizierten Fasern hingegen sind nicht nur die Einzelfestigkeiten der Filamente sowie der Matrix (hier Beschichtung) ausschlaggebend, sondern ebenfalls die Scherfestigkeit der Grenzfläche zwischen Faser und Matrix, welche von dem Adhäsionsverhalten der beiden Komponenten bestimmt wird. Die Grenzflächenbeschaffenheit beeinflusst die Art der Ausbreitung von Mikrorissen an den durch Filamentbruch neu entstehenden Filamentenden. Wenn eine starke Bindung zwischen den Bruchstücken und der Matrix besteht, breiten sich die Risse nicht über die Länge der Faser aus. Folglich bleibt der Verbund auch dann bestehen, wenn die Faser an mehreren Stellen ihrer Länge bricht [27]. Dies erklärt die höheren Zugfestigkeiten der beschichteten Gewebe im Gegensatz zu dem verwendeten Referenzgewebe.

Es fällt jedoch auf, dass die Erhöhung der Zugfestigkeit durch die Silanisierung weitaus geringer ausfällt im Vergleich zu den Ergebnissen der Acrylat- oder Kombinationsbeschichtung. Dies mag zum einen an den unterschiedlichen Gewichtszunahmen liegen. Durch den höheren Chemikalienauftrag werden die Einzelfilamente stärker benetzt und miteinander verklebt. Zum anderen scheint die Acrylatbeschichtung durch ihre chemische Beschaffenheit nach dem Trocknungsprozess weitaus stärker intermolekular zu vernetzen.

Die Silanolgruppen des Ureidosilans (drei Hydroxy-(-OH)-Gruppen), welche bei der Vorhydrolyse gebildet werden, können sich ebenfalls untereinander zu Siloxanbindungen verbinden, wobei die Hydroxygruppe auch an das Basalt gebunden werden können. Die Silanolgruppen scheinen jedoch geringere Grenzschichtfestigkeiten auszuprägen als die Acrylate.

Der leichte Anstieg der Zugfestigkeit der Kombinationsbeschichtung im Vergleich zur reinen Acrylatbehandlung lässt sich mit dem höheren Flächengewicht begründen, da das Basaltgewebe doppelt beschichtet wurde und somit eine höhere Chemikalienaufnahme aufweist.

Neben der physikalisch-mechanischen Untersuchung der Beschichtungen wurden ebenfalls Elektronenmikroskop-Aufnahmen (ESEM) sowie Elementaranalysen mit Hilfe eines Rasterelektronenmikroskops mit EDX-Einheit (Energy Dispersive X-ray spectroscopy) durchgeführt. Ziel dieser Analysen war zum einen, die oberflächlichen Veränderungen der Beschichtungen zu charakterisieren, zum anderen sollte die chemische Struktur abgebildet werden, um zu überprüfen, ob ein Chemikalienauftrag durch die Beschichtung stattgefunden hat (vgl. Abbildung 4).

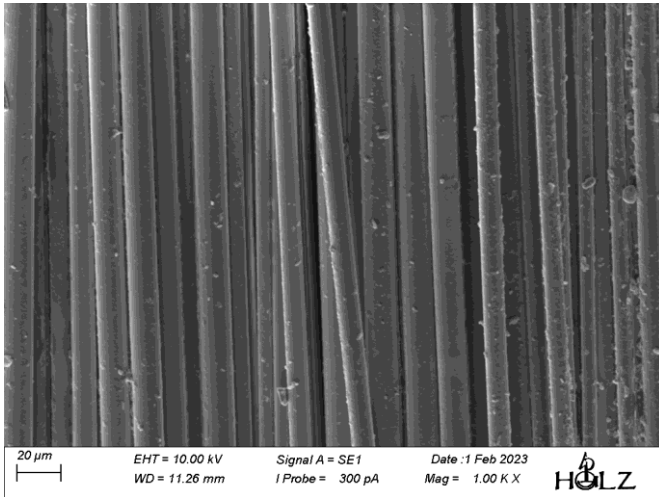
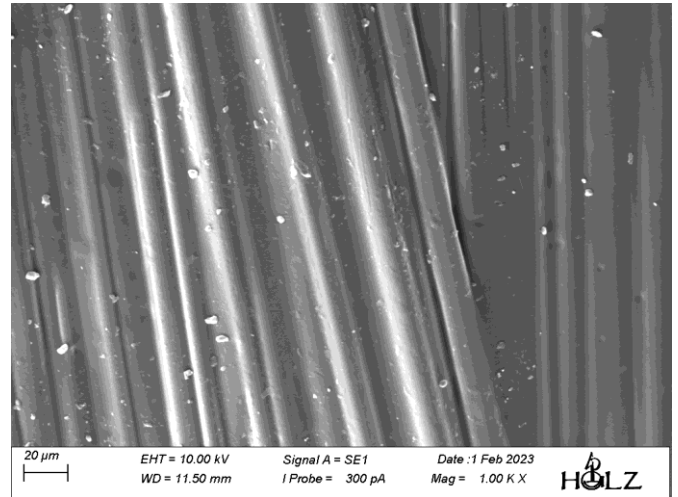
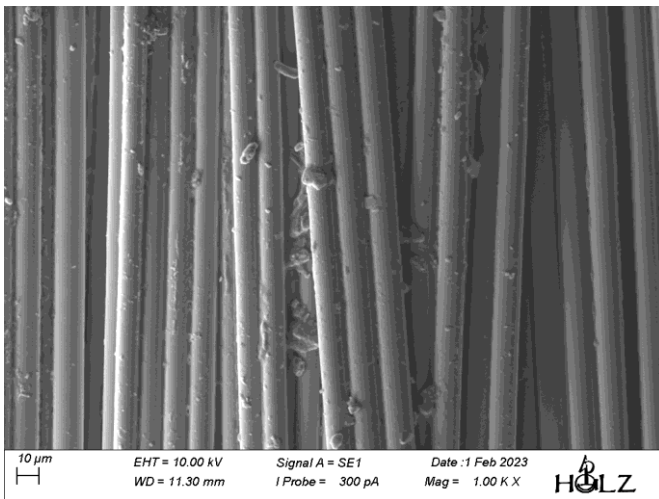
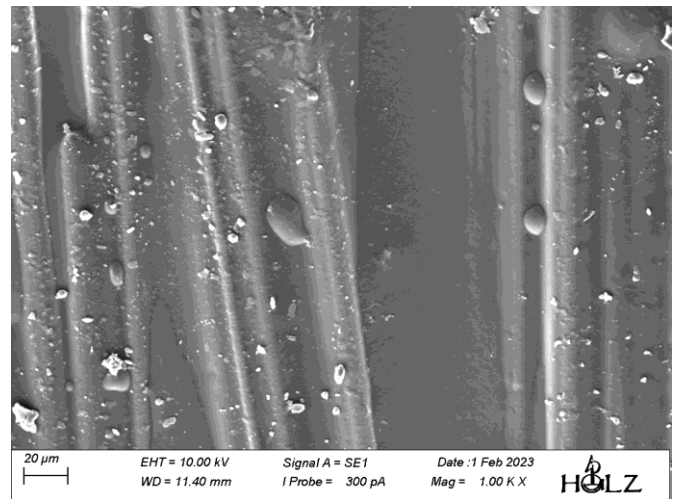
a**b****c****d**

Abbildung 4: ESEM-Aufnahmen der verschiedenen Oberflächenmodifizierungen auf den Basaltfaseroberflächen bei einer 1000-fachen Vergrößerung (a: Referenzfaser; b: Faser mit Acrylatbeschichtung; c: Faser mit Ureidosilanbeschichtung; d: Faser mit Kombinationsbeschichtung).

Durch die ESEM-Untersuchungen wurde deutlich, dass die Beschichtungen die Einzelfilamente der Fäden sowie die Kett- und Schussfäden in den Kreuzungsbereichen unterschiedlich stark miteinander verklebten. Dies wird ebenfalls im haptischen Umgang mit dem Material sowie seiner visuellen Betrachtung deutlich. Gewebe, die mit Acrylat beschichtet wurden, weisen weniger Einzelfilamente auf, die sich bei geringer mechanischer Belastung lösen, als Gewebe, die mit Ureidosilan beschichtet wurden.

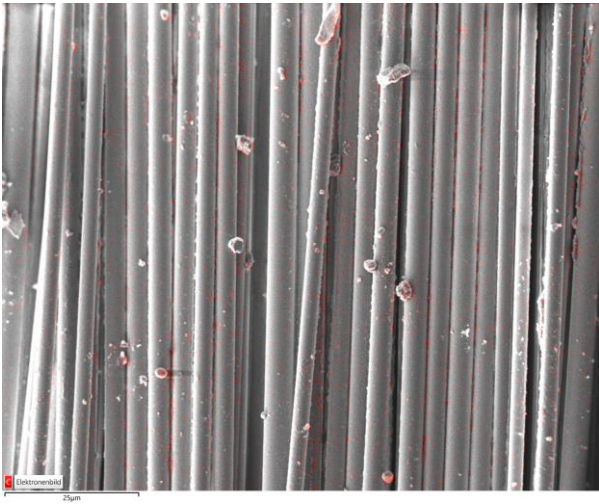
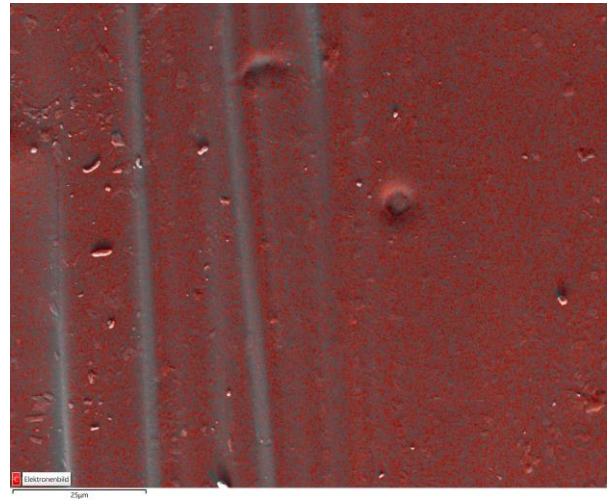
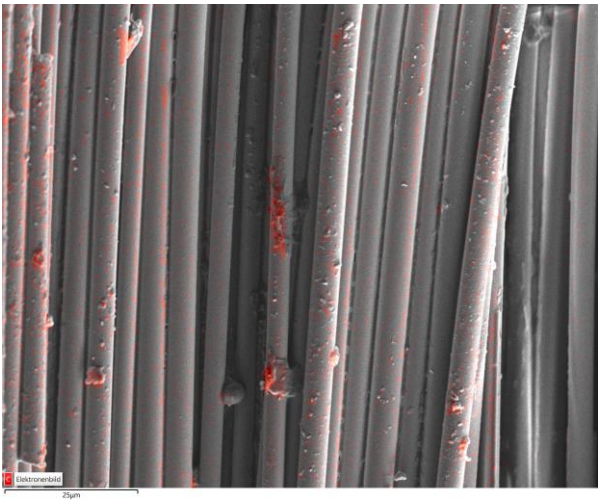
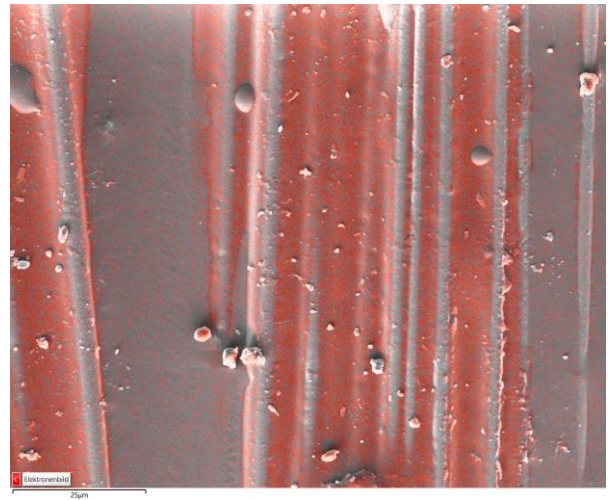
a**b****c****d**

Abbildung 5: EDX-Aufnahmen der verschiedenen Oberflächenmodifizierungen auf den Basaltfaseroberflächen bei einer 1000-fachen Vergrößerung. Beispielhaft wird hier das Elektronenbild mit der Verteilung von detektierten Kohlenstoffatomen (rot) gezeigt (a: Referenzfaser; b: Faser mit Acrylatbeschichtung; c: Faser mit Ureidosilanbeschichtung; d: Faser mit Kombinationsbeschichtung).

Anhand der EDX-Elementanalyse konnte festgestellt werden, wie einzelne chemische Elemente auf der Oberfläche der Gewebe verteilt waren. Elemente, die hier analysiert wurden, waren das für Basalt typische Calcium, Eisen, Natrium, Aluminium, Silizium sowie Sauerstoff. Als Nachweiselement für die Behandlungen wurde Kohlenstoff verwendet, da dieser sowohl in der Acrylatbeschichtung als auch der Ureidosilanbeschichtung vorhanden ist, jedoch nicht im Basalt an sich. Eine Detektion des Stickstoffs, der im Ureidosilan enthalten ist, war anhand des EDX nicht möglich, da der Probenraum mit Stickstoff gespült wird und dieser bei der Elementanalyse die Ergebnisse verfälschen würde. Die Verteilungen der Kohlenstoffatome auf den modifizierten Basaltfasern werden in Abbildung 5 dargestellt

Die Ergebnisse der Elementarverteilungs-Summenspektren der einzelnen Varianten sind der Tabelle 7 zu entnehmen.

Tabelle 7: Elementarverteilungssummenspektren der verschiedenen Basaltvarianten.

Element (m%)	Referenz	Silanisierung	Acrylatbehandlung	Kombination
Kohlenstoff	11,6	11,6	72,5	55,5
Sauerstoff	32,6	41,2	24,6	26,7
Silizium	23,5	21,9	1,1	11,1
Aluminium	8,3	7,9	0,7	2,0
Eisen	8,9	4,9	-	1,5
Calcium	7,0	5,1	0,7	1,4
Natrium	2,7	3,0	0,4	0,8

Bei der Bewertung der Ergebnisse sei darauf hingewiesen, dass die Basaltfasern bei ihrer Herstellung über Graphitwalzen geführt werden. Bei dieser technischen Notwendigkeit scheint es zu leichten Verunreinigungen der Fasern zu kommen. Daher weist das Referenzmaterial einen für reines Basalt untypischen hohen Kohlenstoffanteil auf.

Anders als die Ureidosilanbeschichtung führt die Acrylatbeschichtung zu einem starken Anstieg der detektierten Kohlenstoffatome, was durch die elementare Zusammensetzung der Beschichtung sowie die höhere Gewichtszunahme durch die Beschichtung begründbar ist.

Dadurch, dass bei der Variante der Acrylatbehandlung nahezu keine für Basalt charakteristischen Elemente wie Silizium oder Eisen mehr detektierbar sind, kann davon ausgegangen werden, dass das Acrylat die Basaltoberfläche fast komplett ummantelt. Dies korrespondiert mit den Erkenntnissen der ESEM-Aufnahmen.

Bei der Gegenüberstellung der Summenspektren der Einzelbeschichtungen sowie der Kombinationsbeschichtung wird deutlich, dass bei der Kombinationsbeschichtung die nachträgliche Silanisierung die Acrylatbeschichtung nicht deckend überzieht. Wäre dies der Fall, müsste das Summenspektrum dem der Silanisierung ähneln. Besonders deutlich wird dies durch die prozentuale Verteilung der Elemente Kohlenstoff und Silizium. Der gemessene Kohlenstoffanteil nimmt leicht ab, da ein Teil der Acrylatbeschichtung mit dem Ureidosilan bedeckt ist. Dies führt ebenfalls dazu, dass der Anteil des detektierbaren Siliziums ansteigt, da dieses im Ureidosilan enthalten ist. Ein weiterer Grund für die nicht deckende zweite Beschichtung könnte die geringe Wechselwirkung zwischen Silanolgruppen des Ureidosilans und dem Acrylat darstellen. Dadurch ist eine Anbindung des Ureidosilans an die acrylatbehandelte Oberfläche, ob über polare Wechselwirkungen oder kovalente Bindungen, nur bedingt möglich.

Weiterhin wurden FTIR-Analysen durchgeführt, um nicht nur die Elemente auf den Oberflächen, sondern auch die chemischen Bindungen nachweisen zu können. Die FTIR-Spektren der verschiedenen Oberflächenbeschichtungen sind in Abbildung 6 dargestellt.

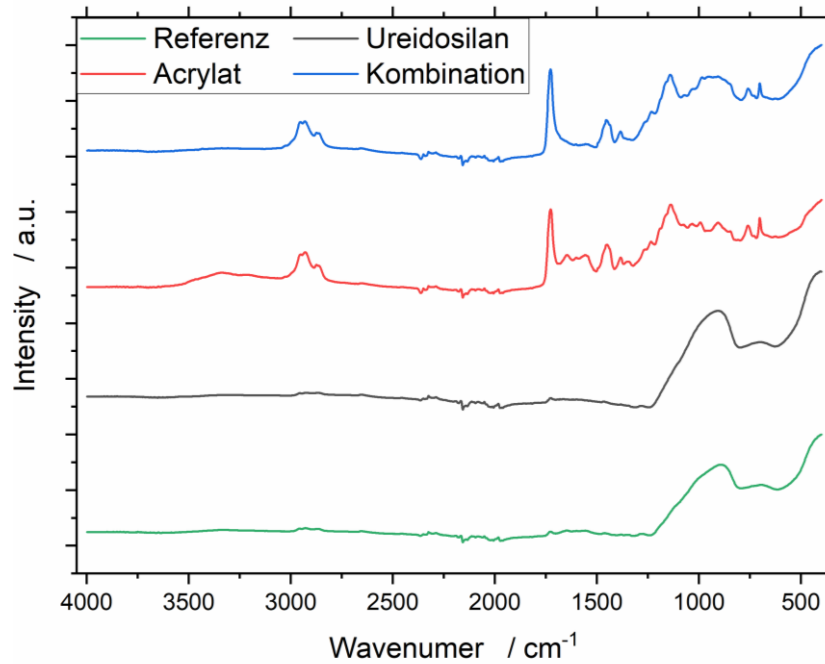


Abbildung 6: FTIR-Spektren der verschiedenen Oberflächenbeschichtungen des Basaltgewebes.

Da die genaue chemische Zusammensetzung der Acrylatbeschichtung aufgrund von betriebsschutzrechtlichen Gründen nicht vorlag, kann nur bedingt auf Effekte, die auf der chemischen Zusammensetzung beruhen, zurückgeschlossen werden. Jedoch weisen die Spektren der Acrylat- und Kombinationsbeschichtung einige charakteristische Peaks auf. Der Peak bei 1725 cm^{-1} weist auf eine Carbonyl- bzw. Carboxylstruktur hin. Die Peaks bei 3000 cm^{-1} weisen auf Methyl- bzw. Methylengruppen hin.

Auffällig ist, dass sich die Spektren der Referenzfaser und der mit Ureidosilan beschichteten Fasern kaum unterscheiden, ebenso wie die Spektren der Acrylat- und Kombinationsbeschichtung. Da vermutet wurde, dass dies auf die geringe Gewichtszunahme des Gewebes während der Beschichtung zurückzuführen ist, wurden nochmals Einzelfasern mit Ureidosilan händisch beschichtet. Hierfür wurde eine Lösung mit 15 m% Ureidosilan angesetzt.

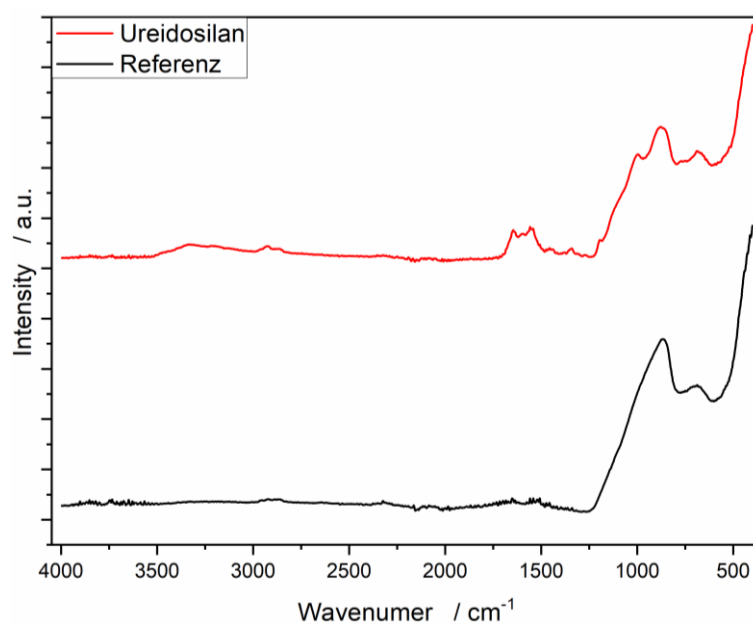


Abbildung 7: FTIR-Spektren der verschiedenen Ureidosilanbeschichtungen und Referenz der händisch modifizierten Einzelfasern.

Die nachträglich und mit einer höheren Ausgangskonzentration des Ureidosilans beschichteten Einzelfasern weisen, im Gegensatz zu den behandelten Geweben, Unterschiede in den FTIR-Spektren im Vergleich zu der Basaltreferenz auf (vgl. Abbildung 7). Die beiden Peaks bei einer Wellenlänge von 1514 und 1545 cm^{-1} deuten auf Amidstrukturen des Ureidosilans hin. Die leichten Anstiege bei den Wellenlängen 3100 und 3400 cm^{-1} verweisen auf verschiedene Amin- bzw. Amidstrukturen.

Nach der Beschichtung des Basaltgewebes unter Verwendung der Oberflächenmodifizierungsanlage wurden die Gewebe auf 6 mm dickes Birkensterrholz geklebt und Prüfkörper für Biegefestigkeits- und Schälwiderstandsprüfungen zugeschnitten. Als Bindemittel wurden in dieser Versuchsreihe UF, MUF, pMDI, PF sowie ein PMF verwendet. Auftragsmenge war für alle Prüfkörper 100 g/m^2 bei einer Presszeit von 30 Minuten, einer Presstemperatur von 150 $^{\circ}\text{C}$ und einem Druck von 1 N/mm^2 . Die Ergebnisse der Festigkeitsmessungen sind in der folgenden Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Mechanische Festigkeiten ermittelt durch Drei-Punkt-Biegeprüfung von Sperrholz mit aufgebrachtem Basaltgeweben, welche mit Ureidosilan, Acrylat sowie einer Kombinationsbeschichtung modifiziert waren in Verbindung mit verschiedenen Bindemitteln (jeder Wert beinhaltet 4 Messungen (2 Reihen mit je 2 Probe); Mittelwert \pm Standardabweichung; grün hinterlegt sind die erreichten Höchstwerte je Parameter).

Modifizierung	Bindemittel	MOE (N/mm^2)	MOR (N/mm^2)	F_{\max} (N)	W bis F_{\max} (N mm)
Referenz	-	5013 (± 331)	69 (± 3)	737 (± 21)	2273 (± 355)
Referenz	UF	11087 (± 242)	117 (± 2)	1345 (± 19)	4812 (± 467)
Referenz	MUF	10780 (± 192)	127 (± 6)	1463 (± 64)	5759 (± 779)
Referenz	pMDI	7074 (± 323)	125 (± 9)	1440 (± 100)	8145 (± 618)
Referenz	PF	6604 (± 184)	108 (± 1)	1247 (± 2)	6831 (± 918)
Referenz	PMF	5675 (± 282)	99 (± 9)	1135 (± 104)	6250 (± 1340)
Silanisierung	UF	12163 (± 271)	121 (± 4)	1326 (± 47)	4792 (± 176)
Silanisierung	MUF	13265 (± 141)	129 (± 18)	1417 (± 204)	5190 (± 286)
Silanisierung	pMDI	7556 (± 428)	129 (± 12)	1413 (± 138)	8977 (± 2740)
Silanisierung	PF	12521 (± 377)	139 (± 9)	1522 (± 96)	6148 (± 612)
Silanisierung	PMF	12258 (± 246)	139 (± 2)	1518 (± 19)	6522 (± 168)
Acrylatbehandlung	UF	7236 (± 364)	113 (± 5)	1241 (± 57)	8305 (± 478)
Acrylatbehandlung	MUF	12381 (± 133)	120 (± 6)	1316 (± 69)	4067 (± 1026)
Acrylatbehandlung	pMDI	13285 (± 389)	162 (± 5)	1772 (± 49)	10222 (± 1826)
Acrylatbehandlung	PF	12125 (± 715)	138 (± 11)	1509 (± 118)	6932 (± 1063)
Acrylatbehandlung	PMF	7528 (± 66)	124 (± 11)	1357 (± 124)	7828 (± 1732)
Kombination	UF	12865 (± 59)	132 (± 9)	1443 (± 102)	5445 (± 1086)
Kombination	MUF	12815 (± 552)	133 (± 4)	1455 (± 39)	6032 (± 1122)
Kombination	pMDI	12784 (± 113)	136 (± 2)	1484 (± 27)	6459 (± 308)
Kombination	PF	12827 (± 405)	138 (± 24)	1508 (± 262)	5845 (± 254)
Kombination	PMF	7848 (± 160)	133 (± 6)	1439 (± 63)	7821 (± 2637)

Aus den Messwerten wird ersichtlich, dass im Vergleich zu Verklebungen mit Referenzgeweben alle Gewebemodifikationen die mechanischen Eigenschaften in unterschiedlichem Maße verbessern. Für die verschiedenen Bindemittel lassen sich folgende Ergebnisse festhalten:

- Harnstoffharze wie UF und MUF bewirken die höchsten Festigkeitswerte in Kombination mit dem doppeltbeschichteten Gewebe.
- Das pMDI ergibt in Kombination mit dem acrylatbehandelten Gewebe die höchsten Festigkeitswerte von allen Varianten. Die Kombination mit dem silanisierten Gewebe bewirkt nur eine geringe Verbesserung der Biegefestigkeit.
- Phenolbasierte Klebharze wie das PF und PMF erzeugen die höchste Steigerung der Festigkeitswerte, bei silanisiertem Gewebe.
- Es ist auffällig, dass die mittlere Biegefestigkeit aller Verbundwerkstoffe einer Klebstoffvariante, für die drei Oberflächenbehandlungen bei ca. 135 N/mm² liegt, obwohl sich die Zugfestigkeiten in Kettrichtung, besonders für die Ureidosilanbehandlung stark unterschieden (vgl. Tabelle 6).

Der Parameter W bis F_{\max} , welcher die benötigte Arbeit bis zum Erreichen des Kraftmaximums darstellt und sich aus dem Integral der Spannungs-Dehnungs-Kurve ergibt, zeigt, dass die verstärkten Platten mehr Energie absorbieren können, bevor sie versagen, und daher duktiler sind. Die bei der Biegung auftretenden Zugspannungen auf der Unterseite der Prüfkörper werden teilweise vom Basalt absorbiert. Aufgrund der hohen Zugfestigkeit des Verstärkungsmaterials kann die Festigkeitsabnahme verursacht durch erste Mikrorisse, die in den Holzlagen auftreten, wenn der Probekörper unter Biegebelastung versagt, von den Basaltfasern kompensiert werden. Im Gegensatz zu unbeschichteten Sperrholzplatten, welche im Spannungs-Dehnungs-Diagramm eine Gerade abbildeten und beim Erreichen des Kraftmaximums versagten, flachte die Steigung der beschichteten Platten vor Erreichen des Kraftmaximums ab. Studien kommen zu dem identischen Ergebnis, dass die Verstärkung eines Holzwerkstoffs durch Fasern oder Gittern auf der Basis von Basalt, E-Glas oder Kohlenstoff die Biegeeigenschaften erheblich verbessern kann [28–30].

Die Ergebnisse nach DIN EN 310, welche auf der Drei-Punkt-Biegeprüfung beruhen, spiegeln nur indirekt die Festigkeit der Klebung wider. Durch die Durchführung des Rollenschälversuches nach DIN EN 1464 wird neben der Kraft, welche benötigt wird, um das Gewebe vom Sperrholz zu trennen, ebenfalls die Versagensart der Klebung evaluiert. Während der Prüfung werden 115 mm verklebtes Gewebe vom Träger abgezogen. Laut Norm werden dabei die ersten und letzten 25 mm des Messwegs in der Kalkulation der Kraft nicht berücksichtigt. Die gesamte benötigte Kraft wird auf die verbleibenden 65 mm gemittelt. Die benötigten mittleren Kräfte im Integral können der Abbildung 8 entnommen werden.

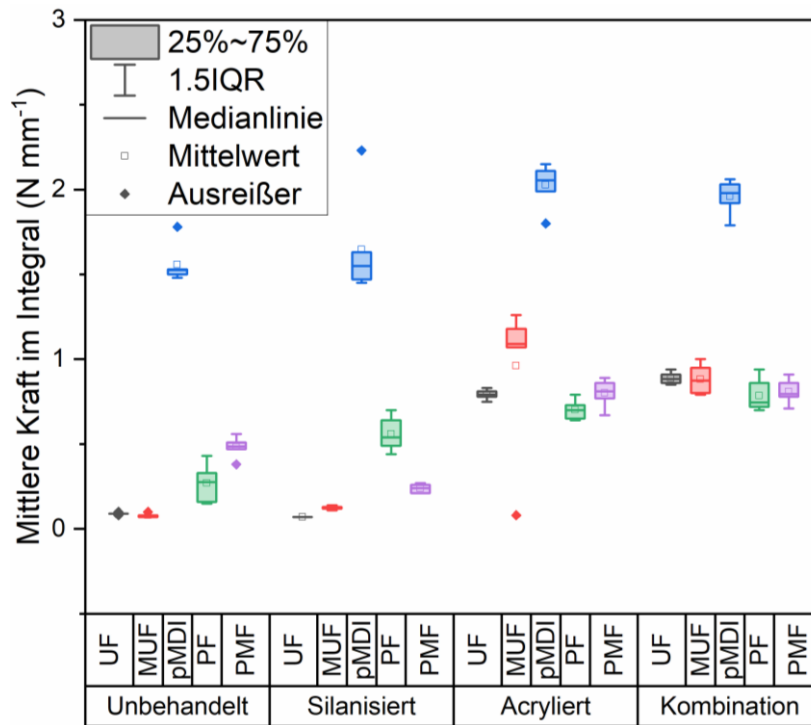


Abbildung 8: Messwerte des Schälwiderstandes der verschiedenen Modifizierungs- und Bindemittelkombinationen (jeder Wert beinhaltet 6 Messungen (2 Reihen mit je 3 Proben)).

Die Ergebnisse des Rollenschälversuchs weisen einen ähnlichen Trend wie bereits die Ergebnisse aus der Drei-Punkt-Biegeprüfung auf. Die Verklebungen des unbehandelten Basalts schneiden in nahezu allen Varianten schlechter ab, als die der modifizierten Varianten. Für die verschiedenen Bindemittel lassen sich folgende Aussagen treffen:

- Die Verklebung des UF zeigt die höchsten Festigkeitswerte in Kombination mit dem doppelbeschichteten Gewebe, wohingegen das MUF mit dem rein acrylatbehandelten Gewebe die höchsten Festigkeitswerte aufweist.
- Das pMDI weist in allen Varianten sehr hohe Festigkeiten auf. In Kombination mit dem acrylatbehandelten Gewebe sich die höchsten Festigkeiten.
- Die beste Verklebung der phenolbasierten Klebharze ergibt sich in der Kombination mit dem doppelbeschichteten Basalt.

Bei der visuellen Überprüfung aller getesteten Proben erwies sich eine Beurteilung der Bruchbilder aufgrund der Transparenz der Klebstofffilme (PF sowie PMF ausgenommen) als schwierig. Nach abschließender Einschätzung wiesen jedoch alle Klebungen einen Kohäsionsbruch nach EN ISO 10365 auf [31].

Abschließend lässt sich festhalten, dass die Acrylatbeschichtung eine sehr gute Kompatibilität mit den verwendeten Klebstoffen in der Holzwerkstoffindustrie aufweist. Eine nachträgliche Beschichtung mit dem Ureidosilan bewirkt nur geringfügige Verbesserungen ($\leq 1\%$) für die phenolbasierten Bindemittel sowie das reine UF-Harz bei der Schälwiderstandsmessung. Bei der Drei-Punkt-Biegeprüfung bewirkten alle Behandlungen einen Anstieg der Biegefestigkeit im Vergleich zum verwendeten Referenzgewebe.

In den vorangegangenen Versuchen wurden lediglich die Adhäsions- und Kohäsionskräfte zwischen Bindemittel und Basalt, beziehungsweise den Beschichtungen analysiert. Der Einfluss der Integration der Basaltgewebe in Spanplatten konnte bei den Versuchsdurchführungen nicht berücksichtigt werden. Daher folgte in einem weiteren

Versuchsaufbau die Zusammenführung der Oberflächenbeschichtung des Basaltes und die Integration der Gewebe in die Spanplatten.

Da für diese Versuche auf eine Gitterstruktur, wie beim Geogrid gegeben, für eine Integration in die Spanplatte gegeben sein musste, jedoch das Geogrid nicht ohne Acrylatbeschichtung hergestellt wird, wurde in Kooperation mit dem Zentrum für leichte und umweltgerechte Bauten (ZELUBA) in Braunschweig, Basaltgewebe an dem dortigen Webstuhl hergestellt. Das hergestellte Gewebe konnte das Geogrid nicht vollständig nachbilden. Die Feinheit des Schussfadens war 600 tex, wohingegen der Faden in Kettichtung nur 300 tex besaß. Die halbe Feinheit beruhte darauf, dass es sich bei der Herstellung um ein Drehergewebe handelte, bei welchem jeweils zwei Kettfäden je Bahn gekreuzt werden. Die Maschenweite der Fäden war 9×9 mm. Da Basaltfasern sehr glatt sind und das Gewebe, wenn es nicht beschichtet ist, an sich einen sehr geringen Schiebewiderstand aufweist (Verschieben der Kett und Schussfäden im Gewebeverband) wurde mit jeder zweiten Kettbahn zusätzlich ein niedrigschmelzender PE-Faden mit eingewebt. Dieser wurde vor dem Aufrollen des Gewebes an der Maschine aufgeschmolzen und bewirkte so in den Knotenpunkten zwischen Schuss- und Kettfäden eine höhere Stabilität.

Das Basaltgewebe wurde nach der Fertigung wie für die Rollenschälversuches nach DIN EN 1464 modifiziert, diesmal jedoch wieder durch händisches Eintauchen in die Modifizierungslösungen. Dadurch konnten die Referenzvariante mit der Ureidosilanbeschichtung, der Acrylatbeschichtung und der Kombinationsbeschichtung verglichen werden. Für die Versuchsdurchführung wurden Dreischichtspanplatten mit einer Zielrohddichte von 650 kg/m³ hergestellt, in welchen das Basalt zwischen Deck- und Mittellagen integriert wurde. Das Verhältnis der Lagen war 20 m% Decklage, 60 m% Mittellage und 20 m% Decklage. Als Bindemittel wurden pMDI sowie MUF verwendet, wobei der Bindemittelanteil so angepasst wurde, dass ca. 4 % Feststoffgehalt der Bindemittel in den Mittellagen und ca. 6 % Feststoffgehalt der Bindemittel bezogen auf die trockene Holzpartikelmenge in den Decklagen verwendet wurde.

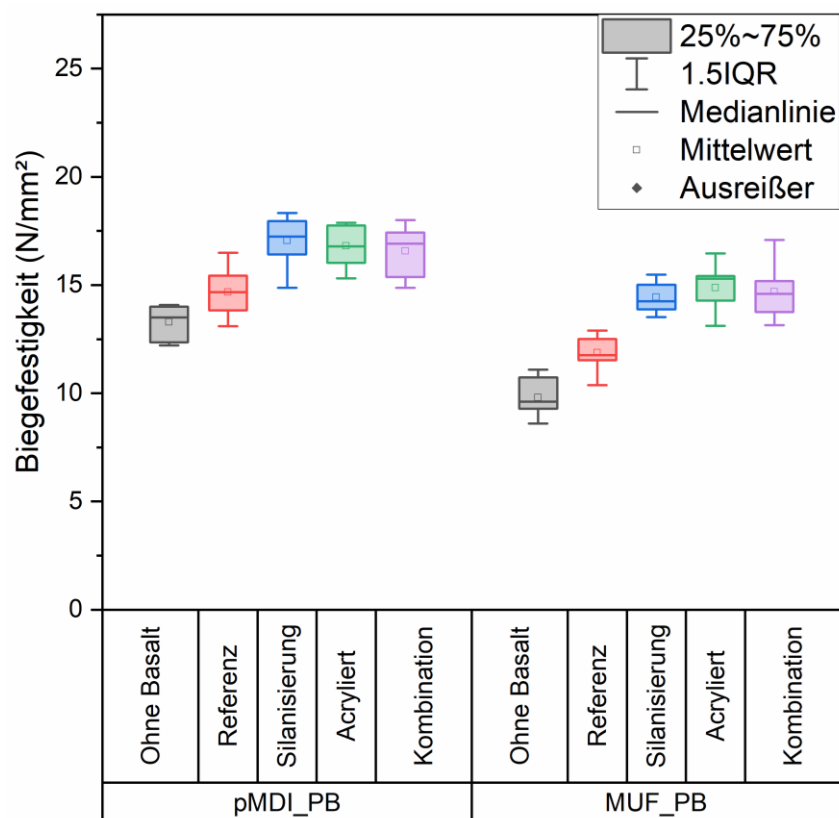


Abbildung 9: Biegefestigkeit von Dreischichtspanplatten (Dichte 650 kg/m³) mit verschieden modifizierten Basaltinlays (jeder Wert beinhaltet 9 Messungen (3 Reihen mit je 3 Proben)).

Die in Abbildung 9 dargestellten Ergebnisse der Biegefestigkeiten von Dreischichtspanplatten mit verschiedenen modifizierten integrierten Basaltgeweben zeigen sehr ähnliche Trends wie die in Tabelle 8 gezeigten Ergebnisse der Drei-Punkt-Biegeprüfung der oberflächlich verklebten Basaltgewebe und können wie folgt zusammengefasst werden:

Die Implementierung von Basaltgeweben verursacht in allen Fällen eine Erhöhung der Biegefestigkeiten der Einschichtspanplatten.

- Die Verwendung von unbeschichtetem Gewebe (Referenz) erhöht die Biegefestigkeit in einem geringeren Maße als die Verwendung von beschichtetem Gewebe.
- Es können keine signifikanten Unterschiede zwischen den Beschichtungen und deren Wirkung auf die Biegefestigkeit festgestellt werden.

Aufgrund der Erkenntnisse dieses Arbeitspakets wurde darauf verzichtet, das von der Deutschen Basalt Faser GmbH zur Verfügung gestellt Geogrid mit Ureidosilanen zu beschichten. Da der erhoffte Effekt der Quervernetzung zwischen dem Basalt und den organischen Bindemitteln, mithilfe des Ureidosilans ausblieb bzw. zu gering ausfiel, wurde das Gewebe in den folgenden Versuchen ohne weitere Beschichtung verwendet. Warum das Ureidosilan, ob alleine oder in Kombination aufgetragen, keine signifikante Verbesserung der Adhäsion, besonders im Blick auf den Rollenschälversuch nach DIN EN 1464, verursacht, konnte nicht abschließend geklärt werden. Obwohl der Chemikalienauftrag sowie die Plattenherstellung nach Angaben des Chemikalienherstellers durchgeführt wurden, hat eine Quervernetzung zwischen der Harnstoffgruppe des Ureidosilans und den N-Methylolgruppen des MUF bzw. den Isocyanatgruppen des pMDI anscheinend nur in geringem Maße stattgefunden. Ob dies ausschließlich auf den geringen Chemikalienauftrag (Gewichtszunahme) und die geringe Zahl an Bindungen zurückzuführen ist oder ob der verwendete Quervernetzer für diese Verwendung nicht geeignet ist, konnte nicht geklärt werden.

Arbeitspaket 2: Herstellung rohdichtereduzierter Einschichtspanplatten mit Basaltinlays sowie Prüfung der mechanisch-technologischen Eigenschaften

Die Zielsetzung dieses Arbeitspaketes wurde im Vergleich zum eingereichten Projektantrag leicht verändert. Der Ansatz der Rohdichtereduzierung wurde in diesem Arbeitspaket nur bedingt berücksichtigt. Die dem Arbeitspaket zugrundeliegende Fragestellung war, inwieweit die Lokalisierung des Basaltgewebes die Festigkeitseigenschaften beeinflusst. In der Theorie würde das Aufbringen des Basaltgewebes auf der Dehnungsseite der Holzwerkstoffe den stärksten positiven Effekt bei einer Biegebelastung hervorbringen, da das verstärkende Material in der Ebene lokalisiert ist, in welcher die höchste Verformungsspannung auf den Werkstoff einwirkt. Jedoch wäre bei einem rein oberflächlichen Aufbringen das Basaltgewebe nicht in die Spanplatte integriert. Ein späteres Beschichten oder Bekleben (zum Beispiel aus ästhetischen Gesichtspunkten) könnte sich dadurch als schwierig erweisen.

Daher wurden für diesen Versuch verschiedene Ebenen gewählt, in denen das Basaltgewebe (Geogrid) in der Spanplatte positioniert wurde. Hierfür eigneten sich die Einschichtspanplatten besonders gut, da es keine Deck- und Mittellagen gab, welche bei den Überlegungen berücksichtigt werden mussten.

Die für diese Versuche möglichen Positionen des Basalts sind in der folgenden Abbildung 10 dargestellt. Die verschiedenen Ebenen wurden anhand der verwendeten m% des Spananteils ermittelt. Das bedeutet, dass für eine Implementierung der Basaltgewebe in die Mitte der Platte (vgl. Abbildung 10 b) 50 m% des Spanmaterials unterhalb und 50 m% des Materials oberhalb des Gewebes liegen. Die Varianten (g) und (h) unterscheiden sich darin, dass

bei der ersten Variante das Basaltgewebe vor dem Pressen auf die Oberflächen des Spankuchens aufgebracht wurde (g). Bei der zweiten Variante (h) wurde das Gewebe erst nach dem Schleifen der fertigen Spanplatte in einem zusätzlichen Arbeitsschritt aufgebracht und anschließend verpresst. Bei der Variante (i) wurde das Basaltgewebe nur einseitig in einem weiteren Arbeitsschritt nach dem Schleifen der Spanplatte aufgeklebt.

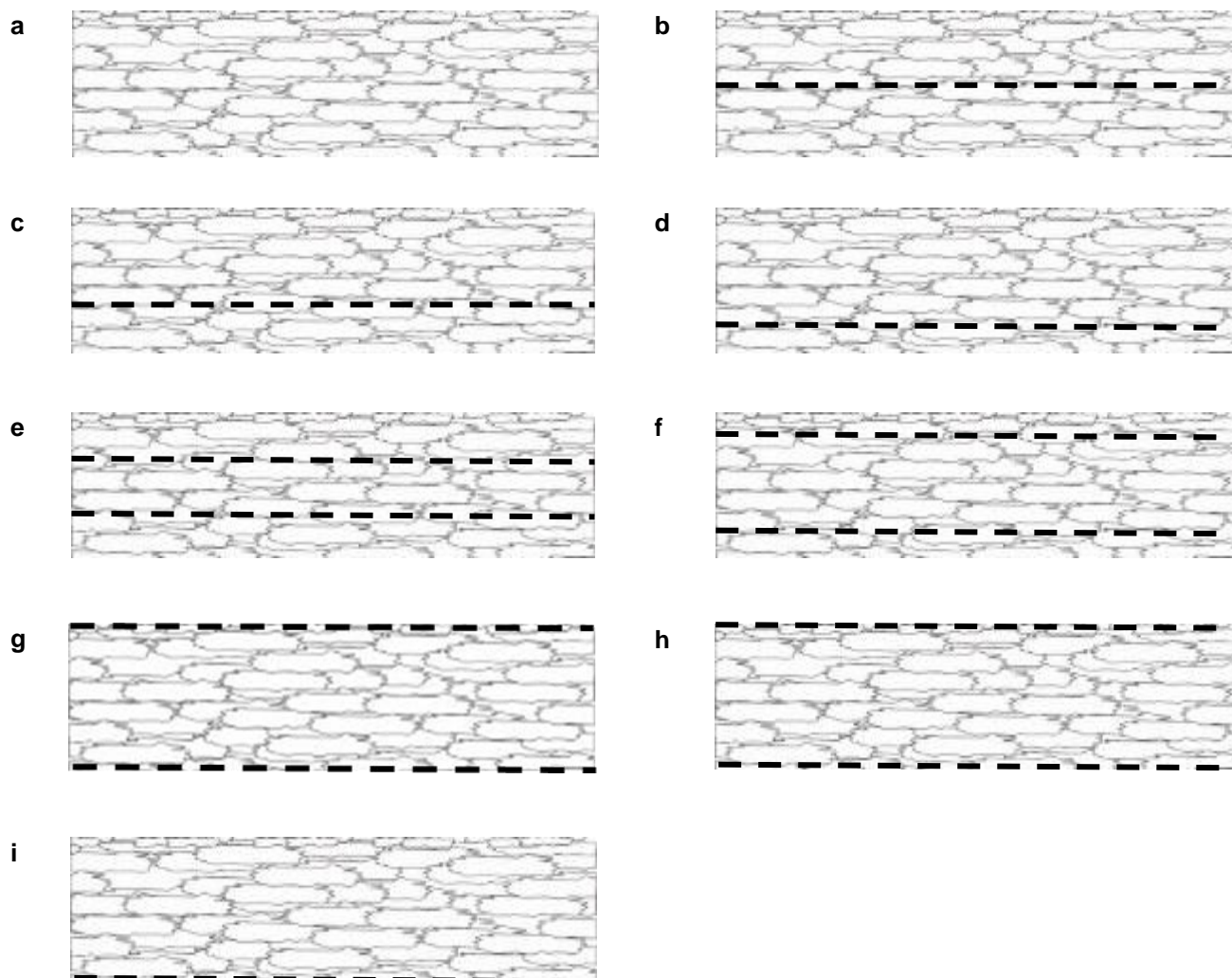


Abbildung 10: Lokalisierung des Basaltgewebes in hergestellten Einschichtspanplatten (a: Referenz; b: Mittellage; c: unteres Drittel; d: unteres Fünftel; e: oberes und unteres Drittel; f: oberes und unteres Fünftel; g: auf den Oberseiten vor dem Pressen aufgelegt; h: nachträglich auf die Oberseiten aufgedrückt).

Die Spanplatten wurden mit MUF- sowie pMDI-Harz (Bindemittelanteil 8 bzw. 6 m%) verklebt – wobei eine mittlere Dichte von ca. 680 kg/m³ angestrebt wurde –, besäumt und geschliffen (beachte Variante h, bei welcher nach dem Schleifen das Basaltgewebe oberflächlich aufgebracht wurde) und auf ihre Querkzug- und Biegefestigkeit überprüft.

Tabelle 9: Querkzugfestigkeiten der Einschichtspanplatten, gebunden mit pMDI und MUF (a: Referenz; b: Mittellage; c: unteres Drittel; d: unteres Fünftel; e: oberes und unteres Drittel; f: oberes und unteres Fünftel; g: auf den Oberseiten vor dem Pressen aufgelegt; h und i: nachträglich auf den Oberseiten aufgepresst (jeder Wert beinhaltet 72 Messungen (6 Reihen mit je 12 Proben); Mittelwert \pm Standardabweichung)).

Bindemittel	Querkzugfestigkeiten (N/mm ²) der Varianten								
	a	b	c	d	e	f	g	h	i
pMDI	1,76 ($\pm 0,19$)	1,28 ($\pm 0,21$)	1,42 ($\pm 0,23$)	1,69 ($\pm 0,05$)	1,45 ($\pm 0,23$)	1,67 ($\pm 2,70$)	1,65 ($\pm 2,80$)	1,72 ($\pm 0,28$)	1,74 ($\pm 0,22$)
MUF	1,21 ($\pm 0,09$)	0,75 ($\pm 0,16$)	0,81 ($\pm 0,19$)	1,10 ($\pm 0,10$)	0,87 ($\pm 0,20$)	1,13 ($\pm 2,10$)	1,15 ($\pm 0,12$)	1,24 ($\pm 0,23$)	1,20 ($\pm 0,18$)

Folgende Querkzugfestigkeiten ergaben sich für die verschiedenen Varianten (vgl. Tabelle 9).

Einschichtspanplatten, welche mit dem Isocyanat-Harz gebunden wurden, weisen generell eine höhere Festigkeit auf als die Varianten, welche mit dem Melamin-Harnstoff-Harz gebunden wurden.

Eine Positionierung der Basaltgewebe hat in der Mitte der Platte (Position a) für beide Bindemittelsysteme den höchsten negativen Einfluss auf die Querkzugfestigkeit. Dieser Effekt war zu erwarten, da das typische Rohdichteprofil einer Spanplatte in der Plattenmitte die geringste Dichte aufweist. Das Einbringen der Basaltlage scheint hier dem Einbringen einer Trennschicht gleichzukommen. Ein ähnlicher, aber geringerer negativer Effekt ist für die Positionen b und e zu verzeichnen. Dort wurde der Basalt einseitig beziehungsweise beidseitig nach 1/3 m% der Späne eingebracht. Hier wirkte das Basaltgewebe weiterhin als Trennschicht, denn das Versagen der Prüfkörper verlagerte sich für die meisten Prüfkörper von der Plattenmitte hin zu der Ebene, in der das Basalt positioniert war. Sobald das Basalt weit genug von der Plattenmitte entfernt positioniert wurde (hier ab 1/5 m% der Spanmasse bei Position d und f) wirkte sich das Basaltgewebe nicht mehr negativ auf die Querkzugfestigkeit der Prüfkörper aus. Der Bruch der Prüfkörper verlagerte sich wieder in die Prüfkörpermitte.

Das Aufbringen der Basaltgewebe auf die Plattenoberfläche – ob vor oder nach der Plattenherstellung (Position g, h und i) – hatte keinen negativen Einfluss auf die Querkzugfestigkeit. Eine Delaminierung des Basaltes fand bei den Querkzugprüfungen nicht statt.

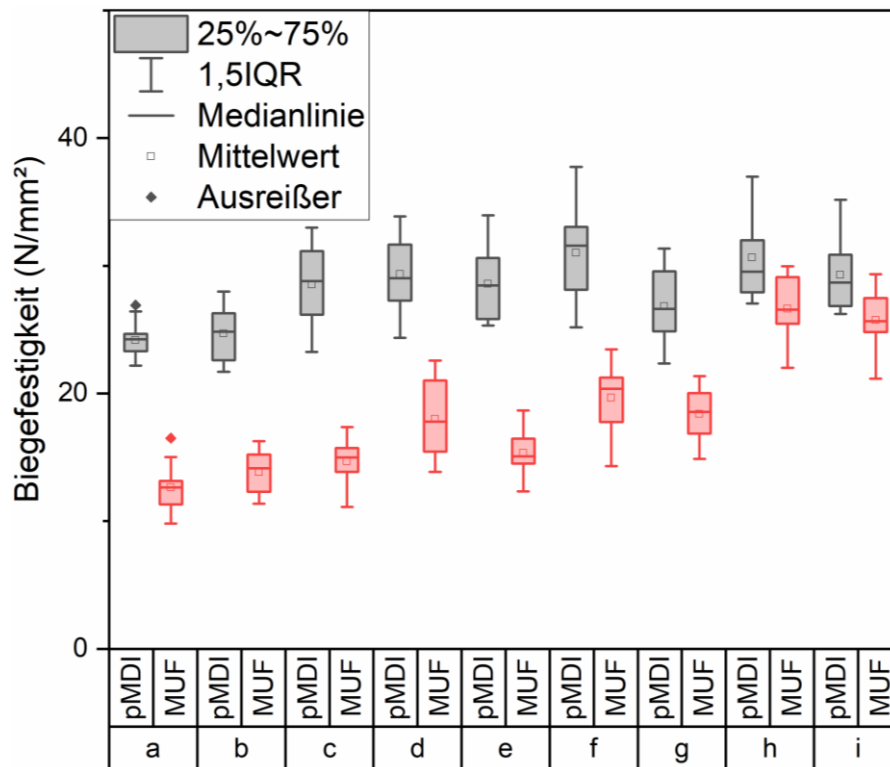


Abbildung 11: Biegefestigkeiten der Einschichtspanplatten, gebunden mit pMDI und MUF (a: Referenz; b: Mittellage; c: unteres Drittel; d: unteres Fünftel; e: oberes und unteres Drittel; f: oberes und unteres Fünftel; g: auf den Oberseiten vor dem Pressen aufgelegt; h und i: nachträglich auf den Oberseiten aufgepresst (jeder Wert beinhaltet 24 Messungen (6 Reihen mit je 4 Proben)).

Bei der Betrachtung der Biegefestigkeiten (vgl. Abbildung 11) gibt es einige Ergebnisse, die für die weiterführenden Arbeitspakete von Bedeutung sind und deren Tendenzen für die Herstellung von Dreischichtspanplatten und OSB in den Arbeitstakten 4 und 5 berücksichtigt wurden. Wie auch schon bei der Überprüfung der Querkzugfestigkeiten weist die Verwendung von pMDI höhere Festigkeiten bei der Drei-Punkt-Biegeprüfung auf als das MUF.

Basaltgewebe, die weiter außen lokalisiert sind, erhöhen die Biegefestigkeit in stärkerem Maße als Basaltgewebe, die näher an der Plattenmitte liegen. Obwohl in der Theorie Basaltgewebe, die auf der Druckseite bei einem Biegeversuch lokalisiert sind, keinen positiven Einfluss auf die Biegefestigkeit haben sollten, erhöht sich diese für beide Bindemittel leicht.

Beidseitig auf Unter- und Oberseite aufgebrachtes Gewebe resultiert in den höchsten Festigkeitswerten, jedoch nur, wenn das Basalt in einem zusätzlichen Arbeitsschritt nach dem Schleifen aufgeklebt und verpresst wird. Bei einer Zugabe der Decklagen vor dem Pressen wird das Gewebe bei nachträglichem Schleifen teilweise beschädigt, was den verstärkenden Charakter der Gewebe negativ beeinflusst.

Wie bereits anfangs beschrieben wurde in diesem Arbeitspaket die Auswirkung der Dichterduktion nur in kleinerem Umfang betrachtet. Für diese Versuchsreihe wurde auf die vorherigen Versuche zurückgegriffen und lediglich die Basaltpositionen verwendet, welche die Biegefestigkeit am stärksten verbesserten. Folglich wurden MUF und pMDI gebundene Einschichtspanplatten mit den Dichten 680 kg/m^3 und 450 kg/m^3 der Positionsvarianten a (Referenz), f (Basalt eingebracht in das obere und untere Fünftel), h (nachträglich auf beiden Oberseiten aufgepresst) sowie Position i (nachträglich auf Dehnungsseite aufgepresst) hergestellt. Die Ergebnisse des Versuches sind in Abbildung 12 dargestellt.

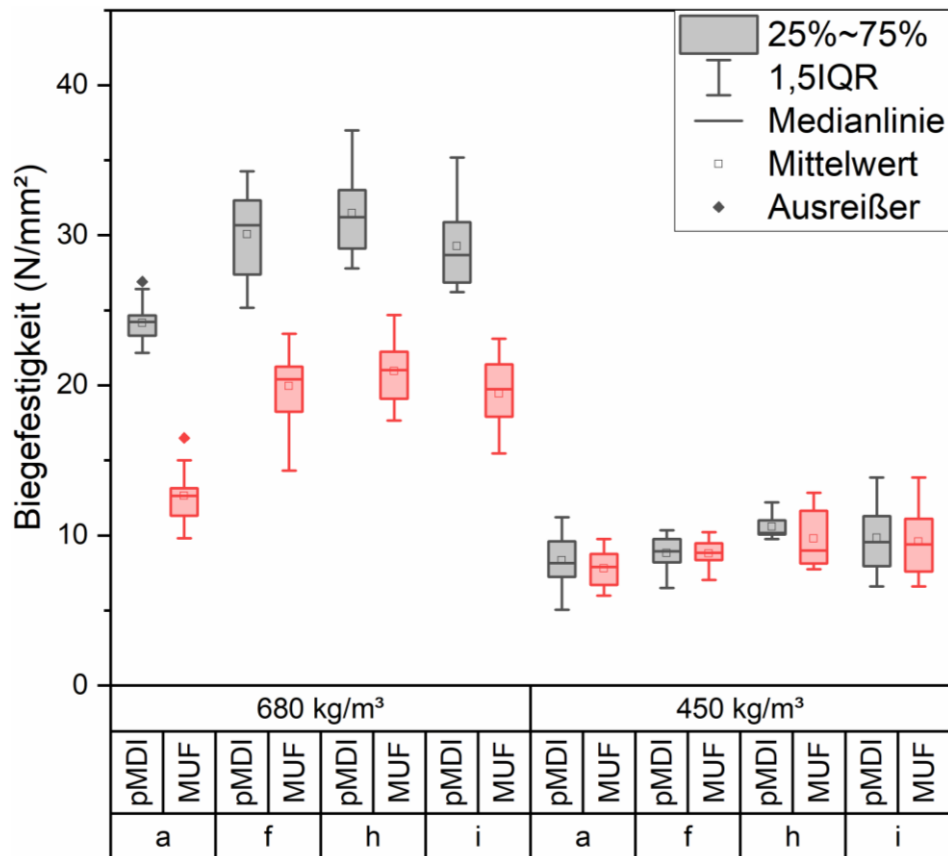


Abbildung 12: Biegefestigkeiten von verstärkten MUF und pMDI gebundenen Einschichtspanplatten verschiedener Dichten (a: Referenz; f: oberes und unteres Fünftel; h: nachträglich auf beiden Oberseiten aufgepresst; i: nachträglich auf Dehnungsseite aufgepresst (jeder Wert beinhaltet 24 Messungen (6 Reihen mit je 4 Proben)).

Angemerkt sei hier, dass die Reduktion der Dichte auf 450 kg/m³ eine zu hohe Reduktion darstellt. Effekte zwischen den beiden Bindemitteln und den vier Varianten sind nicht mehr klar erkennbar, da sich die 1,5-fachen Interquartilsabstände aller Varianten stark überschneiden. Dies liegt an einer zu geringen Eigenfestigkeit der Platten, verursacht durch einen zu geringen Kompressionsfaktor bei der Herstellung der Einschichtspanplatten. Dies hat zur Folge, dass die Spanpartikel bei dem Herstellungsprozess nicht mit genügend Kraft miteinander verpresst werden, um ausreichend untereinander verklebt zu werden.

Die Reduktion der Dichte wirkt sich zum einen drastisch auf die Biegefestigkeit der Referenzen aus und reduziert die Festigkeitsunterschiede, welche durch die eingesetzten Bindemitteltypen verursacht wurde. So weisen die Referenzen der 450 kg/m³ Varianten beider Bindemittel eine ähnliche Festigkeit auf. Die Effekte der Basaltfaserverstärkung sind lediglich marginal für alle drei verschiedenen Basaltpositionierungen. Das nachträgliche Aufbringen der Basaltgewebe scheint hier den höchsten Einfluss auf die Biegefestigkeit zu haben, jedoch überschneiden sich auch hier die 1,5-fachen Interquartilsabstände nahezu komplett.

Aus dieser Versuchsreihe wurden einige Erkenntnisse gewonnen, die für die folgenden Arbeitspakete von Bedeutung waren. So wurde zum Beispiel für alle folgenden Versuche lediglich das Basalt so positioniert, dass es den höchsten verstärkenden Einfluss auf die Biegefestigkeit der Dreischichtspanplatten und OSB hat. Ebenfalls wurde die Reduktion der Dichte in einem moderateren Bereich durchgeführt, um auftretende Effekte durch die Basaltimplementierung besser evaluieren zu können. Die Verwendung von unterschiedlichen Harzen und deren Vergleich ist möglich; pMDI und MUF eignen sich für eine Gegenüberstellung.

Arbeitspaket 3 und 4: Herstellung von rohdichterreduzierten dreischichtigen Spanplatten unter Verwendung von Basaltinlays sowie Herstellung von rohdichterreduzierten Oriented Strand Boards unter Verwendung von Basaltinlays

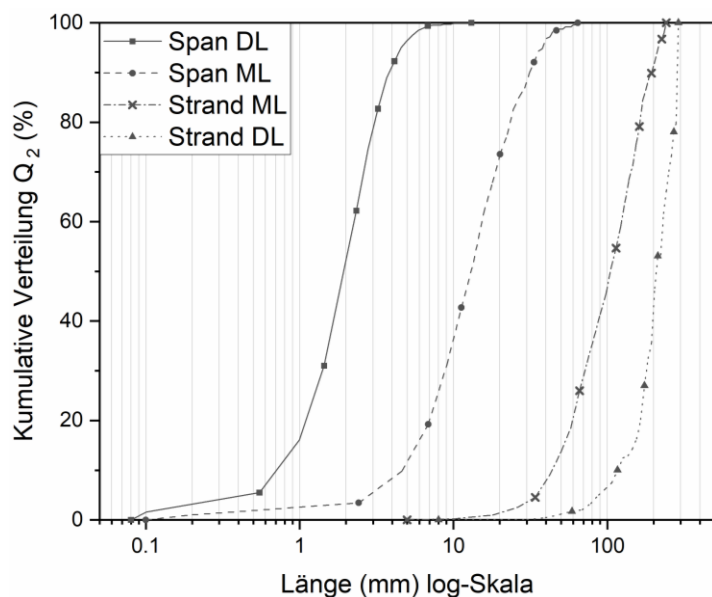
Die im Folgenden bearbeiteten Teilaspekte des Projektvorhabens umfassen die im Projektantrag beschriebenen Arbeitspakete zur Herstellung rohdichterreduzierter Spanplatten (AP3) sowie der Herstellung von rohdichterreduzierten Oriented Strand Boards (AP4). Diese Arbeitspakete wurden zeitgleich sowie vergleichend bearbeitet. Daher werden die Ergebnisse beider Holzwerkstofftypen zusammengefasst präsentiert.

Für die Herstellung der in diesem Arbeitspaket verwendeten Holzwerkstoffe wurde auf Ergebnisse der zuvor durchgeführten Arbeitspakete 1 und 2 zurückgegriffen.

Die in Arbeitspaket 1 durchgeführten Oberflächenmodifizierungen zeigten, dass die Acrylatbeschichtung, mit welcher das in diesem Arbeitspaket verwendete Geogrid bereits versehen ist, eine sehr gute Kompatibilität zu den gängigen Holzwerkstoffen aufweist. Daher wurde auf eine weitere Modifizierung des Gewebes mit Ureidosilanen in diesen Arbeitspaketen verzichtet.

Die Ergebnisse aus dem Arbeitspaket 2 wurden ebenfalls berücksichtigt. So wurde bei der Herstellung der Werkstoffe darauf geachtet, dass die Deckschichtfraktionen jeweils 20 m% der Partikel- und Strandmasse einnahmen, wohingegen 60 m% auf die Mittellage entfielen. So konnte die Positionierung der beidseitig eingebrachten Basaltmatten in den unteren und oberen 20 m% leicht realisiert werden. Außerdem wurde bei einem Teil der Platten das Basalt beidseitig auf die Oberfläche geklebt, nachdem die Platten gepresst und geschliffen wurden. Die Ergebnisse der Dichterreduktion wurden ebenfalls berücksichtigt. So wurden Platten mit drei verschiedenen Dichten (720 kg/m^3 , 650 kg/m^3 und 580 kg/m^3) hergestellt. Diese Dichtestaffelung sollte einen differenzierteren Einblick in die Auswirkung der Verstärkungsmaterialien bei verschiedenen Dichten liefern.

Um die verschiedenen Fraktionen der verwendeten Späne und Strands zu charakterisieren, welche in den Decklagen sowie der Mittellage verwendet wurden, wurden diese mittels FibreShape analysiert. Die Scans wurden durch Schattierungskorrektur und Schwellenwertberechnung manipuliert, um sicherzustellen, dass Risse oder Löcher, besonders in den Strands optisch aufgefüllt wurden. Dies ermöglichte eine genaue softwaregestützte Berechnung der Längenparameter. Die Darstellung der Ergebnisse (siehe Abbildung 13) erfolgte in Anlehnung an die Normen DIN ISO 9276-1, DIN ISO 9276-2 und DIN ISO 9276-4 [32–34]. Alle Auswertungen basieren auf der Gewichtungsmethode der individuellen Partikelfläche (q_2 -Verteilung).



Fraktion	Mittlere Breite (mm)
Span DL	0,50
Span ML	1,98
Strand ML	4,50
Strand DL	9,35

Abbildung 13: Kumulative Längenverteilungen sowie mittlere Breite der verschiedenen Span- und Strandfraktionen (DL: Decklage; ML: Mittellage)

Die Unterschiede in den Fraktionen für die Herstellung von Spanplatten und OSB sind für die einzelnen Werkstoffe typisch. So wird bei Spanplatten die feinere Fraktion als Decklagen verwendete, um eine homogenere Oberfläche für nachträgliche Beschichtungen (Kleben oder Streichen) zu schaffen. Im Gegensatz ermöglicht die Verwendung der längeren Strands in den Decklagen eine höhere Biegefestigkeit der Platte.

Neben der Länge variiert auch die Breite (vgl. Abbildung 13) der verwendeten Fraktionen der Holzpartikel. So weisen die feinen Späne der Decklage eine mittlere Breite von ca. 0,50 mm und die groben Späne von 1,98 mm auf. Für die beiden Fraktionen der Strands sind die mittleren Breiten ca. 9,35 mm (Decklage) und ca. 4,50 mm (Mittellage).

Die für den ersten Versuch hergestellten Plattenwerkstoffe umfassten drei Spanplattentypen sowie zwei OSB-Typen mit den Dichten 720 kg/m³, 650 kg/m³ und 580 kg/m³. Die Spanplatten wurden mit pMDI, MUF sowie UF gebunden, die OSB mit pMDI und PF. Das verwendete pMDI stellt kein klassisches Bindemittel für Dreischichtspanplatten dar, wurde aber genutzt, um das gleiche Bindemittel in beiden Plattenwerkstoffen zu verwenden. Dieser Ansatz wurde gewählt, um Auswirkungen der Partikelgröße (kleine Spanpartikel im Gegensatz zu großen Strands) unabhängig vom verwendeten Bindemittel betrachten zu können. Die Bindemittelmengen wurden so angepasst, dass in den Deckschichten der Werkstoffe ein Feststoffgehalt von ca. 6 % Bindemittel und für die Mittellage ein Feststoffgehalt von ca. 4 % Bindemittel bezogen auf die trockene Holzpartikelmenge verwendet wurde. Es wurden für die Herstellung aller Varianten die gleichen Presszeiten, -temperaturen und -drücke verwendet. Die Biegefestigkeiten der Drei-Punkt-Biegeprüfungen sind in Abbildung 14 dargestellt.

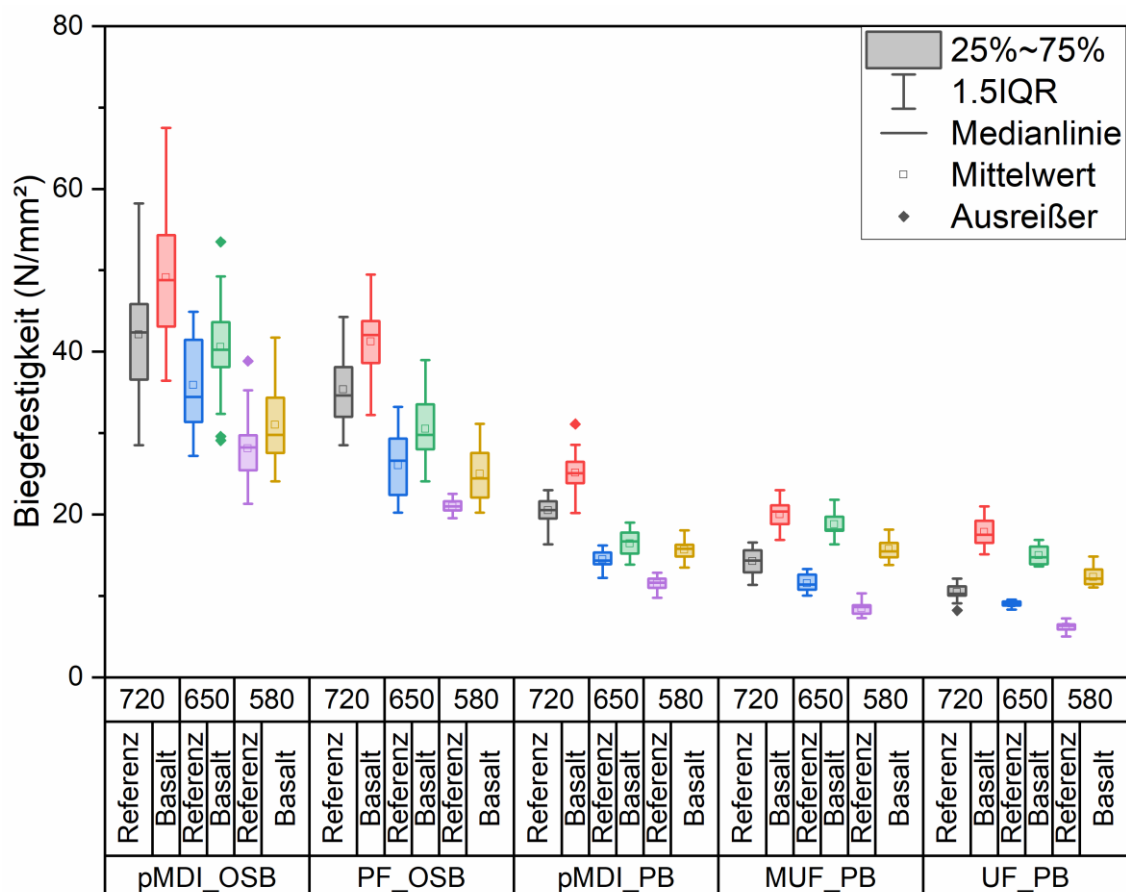


Abbildung 14: Biegefestigkeiten der Dreischichtspanplatten und OSB der Dichten 720 kg/m³, 650 kg/m³ und 580 kg/m³ hergestellt mit verschiedenen Klebstoffsystemen (jeder Wert beinhaltet 24 Messungen (6 Reihen mit je 4 Proben)).

Die Daten der Drei-Punkt-Biegeprüfung wurden ebenfalls zur Berechnung des Verhältnisses von Festigkeit zu Gewicht (strength-to-weight ratio) der Referenz- und verstärkten Platten genutzt (vgl. Tabelle 10). Dazu wurde die von Hao et al. [35] verwendete Formel an die hier produzierten Plattenwerkstoffe angepasst.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \frac{3Pl}{2bh^2} \quad (1)$$

σ ist das Verhältnis von Festigkeit zu Gewicht in N m/kg; ρ ist die Dichte der hergestellten Probekörper in kg/m³; P ist F_{max} (erhalten im Dreipunkt-Biegeversuch) und in N (Newton); l, b und h sind die drei Abmessungen des Probekörpers in m (Metern).

Tabelle 10: Strength-to-weight ratio (σ) der produzierten Spanplatten und OSB (jeder Wert beinhaltet 24 Messungen (6 Reihen mit je 4 Proben; die Klammern hinter den Messwerten beinhalten die relative Veränderung der verstärkten Proben verglichen mit deren Referenz); Mittelwert \pm Standardabweichung.

Variante	Dichte (kg/m ³)	Strength-to-weight ratio (N m/kg) ^a	
		Referenz	Verstärkt
pMDI_OSB	720	77125 \pm 10547	89646 \pm 12061 (+14,0)
pMDI_OSB	650	73528 \pm 11457	84128 \pm 8914 (+12,6)
pMDI_OSB	580	65012 \pm 10107	71690 \pm 10291 (+9,3)
PF_OSB	720	71821 \pm 8014	82148 \pm 10617 (+12,6)
PF_OSB	650	64496 \pm 8369	69843 \pm 9135 (+7,7)
PF_OSB	580	59615 \pm 7412	63471 \pm 7891 (+6,1)
pMDI_PB	720	41924 \pm 2796	50874 \pm 4422 (+17,6)
pMDI_PB	650	32678 \pm 2372	37264 \pm 3362 (+12,3)
pMDI_PB	580	28214 \pm 2169	39717 \pm 3404 (+29,0)
MUF_PB	720	27720 \pm 2873	38742 \pm 3035 (+28,4)
MUF_PB	650	24668 \pm 2535	40124 \pm 3653 (+38,5)
MUF_PB	580	20330 \pm 2053	37864 \pm 3122 (+46,3)
UF_PB	720	20384 \pm 3570	34049 \pm 5878 (+40,1)
UF_PB	650	20733 \pm 894	34218 \pm 2919 (+39,4)
UF_PB	580	15803 \pm 1625	31601 \pm 2813 (+50,0)

Die Ergebnisse der Drei-Punkt-Biegeprüfung und der nachträglichen Berechnung des Festigkeit zu Gewicht Verhältnis können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die verwendeten Bindemittel bewirken durch ihre Eigenfestigkeit als Klebstoffmatrix sowie ihrer Adhäsionskräfte zum Holz unterschiedlich hohe Festigkeiten in den Plattenwerkstoffen. Die Verwendung von pMDI bei der Herstellung von OSB erzeugt höhere Festigkeiten als PF. Bei Dreischichtspanplatten weisen ebenfalls die pMDI gebundenen Platten die höchsten Festigkeiten auf, gefolgt von MUF und UF.
- Die Basaltgrids wirken sich in allen Varianten, unabhängig von Dichte, Plattenwerkstoff oder Bindemittel, positiv auf die Biegefestigkeit der Platten aus. Dabei verringert sich bei OSB der absolute verstärkende Effekt bei einer Reduktion der Dichte. Die Biegefestigkeiten bei OSB nehmen um 7 N/mm², 5 N/mm² und 3 N/mm² für die drei Dichteniveaus 720 kg/m³, 650 kg/m³ und 580 kg/m³ im Gegensatz zur Referenz zu. Bei Spanplatten ist die absolute Verstärkung für alle Dichteniveaus gleichbleibend, ca. 6,5 N/mm² für alle drei Dichteniveaus. Dies ist, wie bereits zuvor beschrieben, auf den Trennschichtcharakter bei einem zu hohen Partikelgrößen-Maschenweiten-Verhältnis zurückzuführen, welcher durch eine Dichtereduktion der OSB verstärkt wird.
- Das Verhältnis von Festigkeit zu Gewicht wurde bei allen Plattenvarianten durch die Implementierung der Basaltgewebe erhöht. Jedoch nimmt auch hier der Trend der relativen Verstärkung für die OSB mit abnehmender Dichte ab, wohingegen die relative Verstärkung bei Spanplatten mit abnehmender Dichte zunimmt.

Querzugfestigkeiten, welche ebenfalls von allen Plattenvarianten ermittelt wurden sind in Tabelle 11 **Tabelle 9** aufgelistet.

Tabelle 11: Querkzugfestigkeiten der Dreischichtspanplatten und OSB der Dichten 720 kg/m³, 650 kg/m³ und 580 kg/m³ hergestellt mit verschiedenen Klebstoffsystemen (jeder Wert beinhaltet 48 Messungen (6 Reihen mit je 8 Proben) Mittelwert \pm Standardabweichung.

	pMDI_OSB		PF_OSB		PMDI_PB		MUF_PB		UF_PB	
	Referenz	Basalt	Referenz	Basalt	Referenz	Basalt	Referenz	Basalt	Referenz	Basalt
720 kg/m ³	0,89 ($\pm 0,14$)	1,00 ($\pm 0,15$)	0,81 ($\pm 0,08$)	0,76 ($\pm 0,11$)	0,84 ($\pm 0,10$)	0,84 ($\pm 0,08$)	0,74 ($\pm 0,07$)	0,63 ($\pm 0,09$)	0,29 ($\pm 0,06$)	0,32 ($\pm 0,05$)
650 kg/m ³	8,2 ($\pm 0,13$)	8,2 ($\pm 0,09$)	0,56 ($\pm 0,08$)	0,60 ($\pm 0,07$)	0,77 ($\pm 0,05$)	0,71 ($\pm 0,09$)	0,63 ($\pm 0,09$)	0,54 ($\pm 0,09$)	0,19 ($\pm 0,05$)	0,22 ($\pm 0,04$)
580 kg/m ³	0,67 ($\pm 0,13$)	0,63 ($\pm 0,13$)	0,49 ($\pm 0,05$)	0,47 ($\pm 0,08$)	0,60 ($\pm 0,07$)	0,56 ($\pm 0,09$)	0,52 ($\pm 0,10$)	0,48 ($\pm 0,08$)	0,14 ($\pm 0,04$)	0,15 ($\pm 0,03$)

Die Positionierung des Basaltgewebes zwischen Deck- und Mittellage verursacht, wie auch in Arbeitspaket 2: Herstellung rohdichtereduzierter Einschichtspanplatten mit Basaltinlays sowie Prüfung der mechanisch-technologischen Eigenschaften beschrieben, keine Reduktion der Querkzugfestigkeiten. Insgesamt versagten die Mehrheit aller verstärkten Proben in der Mittellage und nicht zwischen Mittel- und Decklage, wo sich das Basaltgitter befand. Die Trends der Festigkeit zeigen für alle hergestellten Varianten ein ähnliches Verhalten: Mit abnehmender Dichte sinkt ebenfalls die Querkzugfestigkeit, da diese direkt mit der Werkstoffdichte korreliert.

Es wurden ebenfalls Rohdichteprofilmessungen an einigen der Plattenwerkstoffe durchgeführt. Ein Vergleich zwischen pMDI gebundenen Dreischichtspanplatten und OSB mit und ohne Basaltverstärkung ist in Abbildung 15 dargestellt.

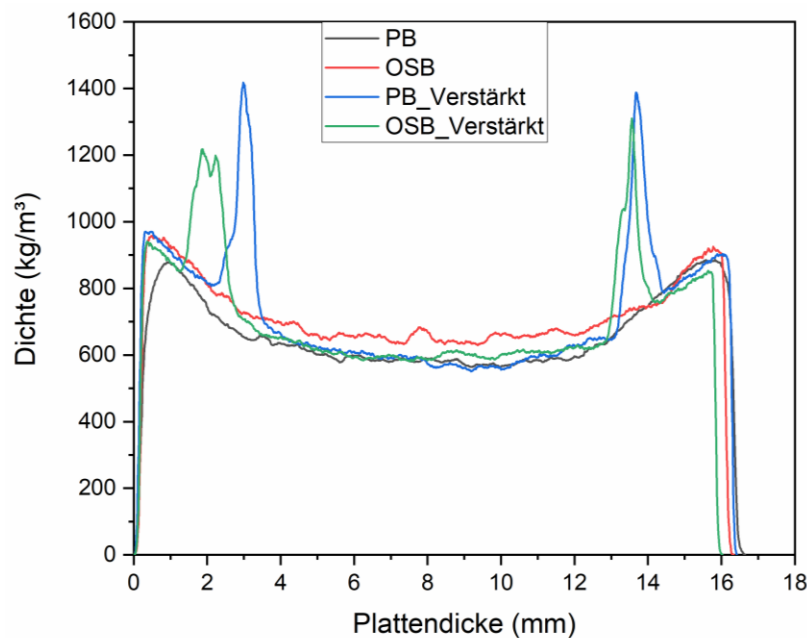


Abbildung 15: Rohdichteprofile der Referenzplatte sowie von mit Basaltinlays verstärkten pMDI-gebundenen Dreischichtspanplatten und OSB mit einer Dichte von 720 kg/m³.

Die Referenzproben weisen ein charakteristisches Dichteprofil auf, mit der höchsten Dichte in der Nähe der Oberfläche und der niedrigsten Dichte in der Plattenmitte [36]. Die basaltverstärkten Varianten zeigen eine ähnliche Dichteverteilung, mit dem Unterschied, dass die beiden Basaltgewebe, die sich zwischen den Decklagen und der Mittellage der Platten befanden, nachgewiesen werden können. Die manuelle Herstellung der Platten führt zu einer

leicht ungleichmäßigen horizontalen Ausrichtung des Basaltgitters. Die Spitze der Basaltbewehrung ist etwa 2 mm breit, obwohl das Gitter selbst eine Dicke von 0,55 mm besitzt. Dieser Effekt scheint bei der OSB-Variante stärker ausgeprägt zu sein als bei der Spanplatte. Dies deutet darauf hin, dass die Strands aufgrund ihrer Größe die Maschen, die eine Größe von ca. 9x9 mm aufweisen, nicht durchdringen können. Die Inhomogenität der Strand-Verteilung scheint aufgrund der Handstreuung einen größeren Einfluss auf die flächige Ausrichtung der Bewehrung hat.

Neben der reinen Dichteabhängigkeit der Festigkeiten der Referenz sowie der basaltfaserverstärkten Plattenwerkstoffe wurde ebenfalls der Einfluss der Positionierung des Basaltgrids auf die Biegefestigkeit der Holzwerkstoffe untersucht. Hierfür wurden Plattenwerkstoffe hergestellt, die wieder drei Spanplattentypen (UF, MUF, pMDI) sowie zwei OSB-Typen (pMDI und PF) mit den Dichten 720 kg/m³ und 580 kg/m³ umfassten. Die Spanplatten wurden abermals mit pMDI, MUF sowie UF gebunden, die OSB mit pMDI und PF. Die Positionierung der Basaltgewebe wurde aus den Versuchen in Arbeitspaket 2: Herstellung rohdichtereduzierter Einschichtspanplatten mit Basaltinlays sowie Prüfung der mechanisch-technologischen Eigenschaften abgeleitet. Es wurde neben den Referenzen der jeweiligen Plattentypen ebenfalls eine Variante hergestellt, in der das Basaltgewebe zwischen Mittel- und Decklagen positioniert wurde, sowie eine Variante, in welcher das Basaltgewebe beidseitig auf die bereits geschliffenen Oberflächen verpresst wurde. Die Auswirkungen der Basaltpositionen auf die Biegefestigkeiten der verschiedenen Holzwerkstoffvarianten sind in Abbildung 16 dargestellt.

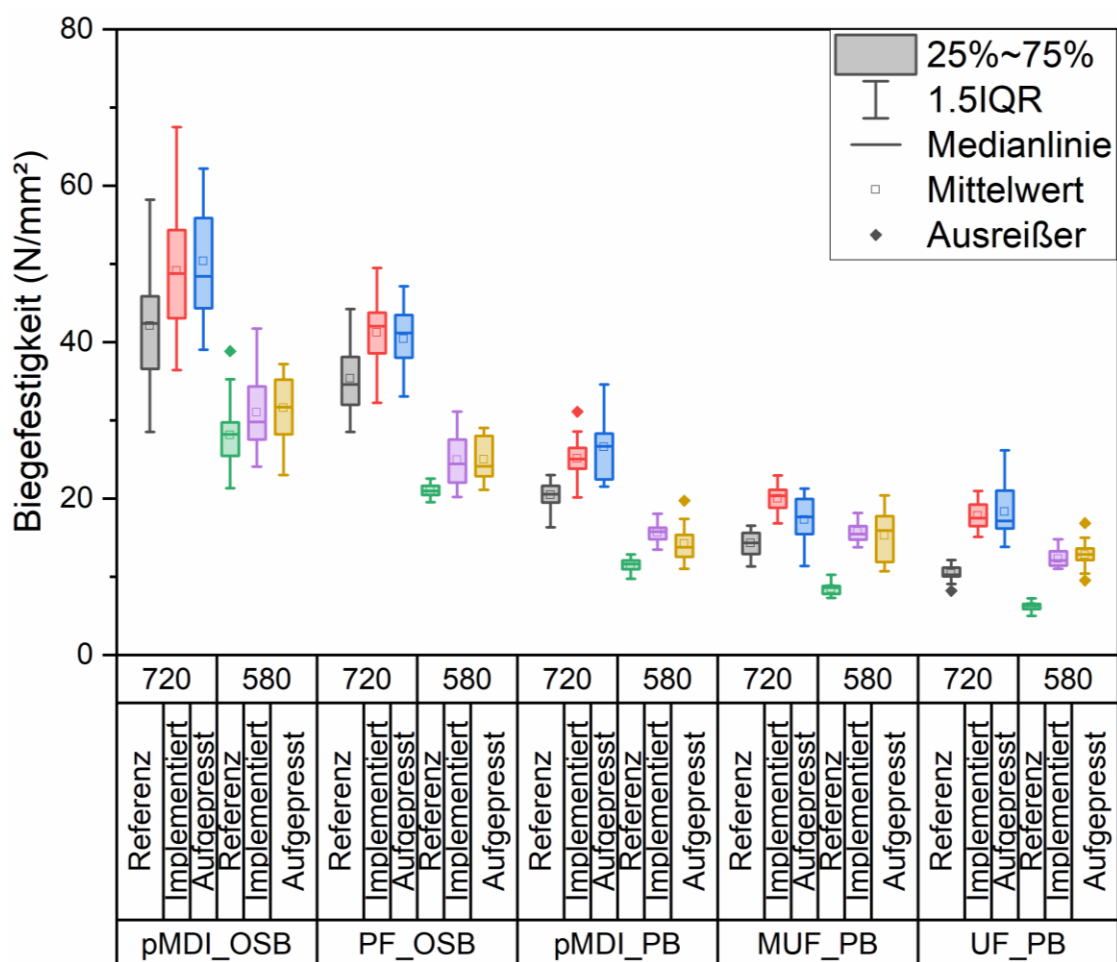


Abbildung 16: Biegefestigkeiten der Dreischichtspanplatten und OSB der Dichten 720 kg/m³ und 580 kg/m³ hergestellt mit verschiedenen Klebstoffsystemen mit unterschiedlichen Positionen der Basaltgewebe (jeder Wert beinhaltet 12 bzw. 24 Messungen (3 bzw. 6 Reihen mit je 4 Proben)).

Die Ergebnisse der der Drei-Punkt-Biegeprüfung der Platten mit verschiedenen Lokalisierungen der Basaltgewebe in und auf den Platten zeigt sehr ähnliche Trends im Vergleich zu den zuvor in Arbeitspaket 2: Herstellung rohdichtereduzierter Einschichtspanplatten mit Basaltinlays sowie Prüfung der mechanisch-technologischen Eigenschaften durchgeführten Tests zur Positionierung der Basaltgewebe in Einschichtspanplatten.

- Die Basaltgewebe bewirken, unabhängig von ihrer Position, der Plattendichte und dem verwendeten Bindemittel eine Erhöhung der Biegefestigkeiten.
- Der relative verstärkende Effekt nimmt bei den OSB bei Reduzierung der Dichte ab, wohingegen er für die Dreischichtspanplatten nahezu gleichbleibt. Dies deckt sich mit den Ergebnissen der Dichteabhängigkeit der Festigkeiten von Dreischichtspanplatten und OSB.
- Die Lokalisierung des Basaltgewebes, ob zwischen Mittel- und Decklagen eingebettet oder nachträglich oberflächlich aufgedrückt, beeinflusst den Effekt der Verstärkung geringfügig.

Für die beiden hier vergleichend betrachtenden Arbeitspakete lassen sich zusammenfassend einige wichtige Ergebnisse festhalten:

Die Erhöhung des strength-to-weight ratio durch die Implementierung der Basaltgewebe ermöglicht es, dass Plattenwerkstoffe geringerer Dichte normativen Anforderungen erreichen, die sonst nur bei erheblich höherer Dichte erreicht werden würden. UF-gebundene Dreischichtspanplatten mit einer Dichte von 580 kg/m³ konnten die Anforderungen für P2 Platten nach DIN EN 312 erreichen, welche von UF-gebundene Referenz-Dreischichtspanplatten mit einer Dichte von 720 kg/m³ knapp unterschritten wurden.

Die verstärkende Wirkung des Basaltgewebes ist für Dreischichtspanplatten höher als für OSB. Dies ist auf das Partikelgrößen-zu-Maschenweiten-Verhältnis zurückzuführen. Späne können aufgrund ihrer geringen Größe durch die Masche hindurchragen, wohingegen dies für Strands nicht möglich ist. Daher besitzt das Basaltgewebe einen Trennschichtcharakter, der bei einer Dichtereduktion an Einfluss zunimmt. Die absolute Verstärkung bei einer Reduktion der Dichte nimmt für OSB ab, wohingegen sie bei Spanplatten gleichbleibt.

Arbeitspaket 5 bis 8: Verwendung von mineralischen Bindemitteln in Kombination mit pMDI-, MUF- und PF-Harzen sowie deren Brandschutzuntersuchungen

In diesem Abschnitt wurden die im Projektantrag verfassten Arbeitspakete 5 bis 8 zusammenfassend beschrieben. Die Arbeitspakete wurden parallel bearbeitet, da sie alle die Verwendung von mineralischen Bindemitteln thematisierten. Der für diese Arbeitspakete mineralische Brandschutzkleber SWK 1000 besteht aus einer Styrol-Acryl-Copolymer-Emulsion, wohingegen das Ultracool 500 ein Wasserglasgemisch (Silikatgemisch) ist. In beiden Rezepturen ist ein hoher Anteil an Aluminiumhydroxid enthalten.

Das größte Problem bei der Verarbeitung der Brandschutzkleber SWK 1000 sowie Ultracool 500 bestand darin, dass die Formulierungen einen Feststoffgehalt von 68 % sowie 80 % aufweisen. Der Feststoffgehalt dieser Additive ist insbesondere auf einen hohen Anteil an Aluminiumhydroxid zurückzuführen. Dies ist ein nahezu unlösliches Hydroxid, welches als Feinpartikel in den Dispersionen vorliegt.

Bei einer klassischen Beleimung von Spänen oder Strands, wie sie in der Holzwerkstoffindustrie für Bindemittel und Additive üblich ist, wird das Bindemittel auf die Partikelmasse gesprüht. Dies erfolgt meist unter Verwendung von Druckluftdüsen. Durch die Verwendung von Sprüh- und Steuerluft mit Drücken von ca. 6 bar kam es durch den hohen Anteil an mikrostrukturellem, nicht gelöstem Feststoff, ob mit Bindemittel vermischt oder als einzelne Komponenten, zu einer Abscheidung des Feststoffes. Durch die sehr hohe Oberfläche der Feinpartikel setzte bereits während des

Sprühprozesses die Trocknung der flüssigen Phase ein, wodurch die Haftung der Aluminiumhydroxid-Partikel nicht mehr gewährleistet war. Der daraus resultierende Feinstaubgehalt absorbiert durch die im Vergleich zu den Spänen hohe Oberfläche das verwendete konventionelle Bindemittel und erschwert daher eine Plattenherstellung in hohem Maße. Es wurde versucht, den Beleimungsprozess zu optimieren. So wurde versucht, die konventionellen und mineralischen Bindemittel nacheinander oder als Bindemittelgemisch aufzubringen. Desweiteren wurden Parameter wie Druck der Sprüh- und Steuerluft der Düse, Düsendurchmesser und Rotationsgeschwindigkeit der Beleimungstrommel variiert. Jedoch gelang es nicht, die Probleme, die mit dem Auftrag des Bindemittels mithilfe einer Druckluftdüse zusammenhingen, zu beheben.

In einem Vorversuch, welcher die Herstellung von Spanplatten mit dem Einsatz der beiden mineralischen Bindemittel vorsah, konnten lediglich mit dem Wasserglasgemisch Ultracool 500 Spanplatten hergestellt werden. In diesem Prozess wurde zuerst das Ultracool 500 und nachträglich pMDI als Bindemittel aufgetragen. Die Konzentration des Wasserglasgemischs betrug 10 m% Feststoffgehalt auf das Gewicht der getrockneten Späne für Deck- sowie Mittelschicht. Die Bindemittelmengen waren ca. 6 % für die Deckschicht und für die Mittellage ca. 4 % pMDI bezogen auf die getrocknete Holzpartikelmenge.

Während der Beleimung kam es bei der Rotation der Späne in der Beleimungstrommel nur in geringerem Maße zu einer Separation von mineralischem Feinstaub. Die behandelten Späne wurden zu Dreischichtspanplatten mit einer Zielrohddichte von ca. 720 kg/m² verpresst. Dabei betrug die Presszeit 15 s/mm Plattendicke bei einer Temperatur von 180 °C. Die Dicke von 18 mm wurde durch metallene Abstandshalter eingestellt.

Die Platten wurden angelehnt an die DIN EN 11925 getestet, welche die Entzündbarkeit von Produkten bei direkter Flammeneinwirkung durch einen Einzelflammtest beschreibt [37]. Für alle Versuche wurde eine Beflammungsdauer von 40 Sekunden angesetzt.

Tabelle 12: Brandeinwirkung nach DIN EN 11925 von Referenz-Spanplatten und Spanplatten behandelt mit dem mineralischen Additiv Ultracool 500 (jeder Wert beinhaltet 6 Messungen (3 Reihen mit je 2 Proben)).

Variante	Ø Brandeinwirkung [cm ²]
Referenz	8,0
Ultracool 500	6,0

Die Zugabe des mineralischen Ultracool 500 bewirkte eine Reduktion der oberflächlichen Flammeinwirkung (vgl. Tabelle 12).

In einem weiteren Versuch wurde untersucht, in wie weit das verwendete Ultracool 500 die kalorimetrischen Eigenschaften der Spanplatten beeinflusst. Dafür wurden die hergestellten Spanplatten nach ISO 5660 getestet [38]. Bei diesem Test wurden Prüfkörper mit einer Größe von 10×10 cm in horizontaler Ausrichtung einer kontrollierten Bestrahlungsstärke in einem Cone-Kalorimeter ausgesetzt. Dabei wird die Wärmefreisetzungsrate der Prüfkörper und deren Masseverlust über die Prüfzeit ermittelt. Für diesen Versuch wurden sowohl Dreischichtspanplatten hergestellt, bei denen die Mittel- sowie Deckschichten mit dem Ultracool 500 ausgerüstet waren, als auch eine Variante bei der lediglich die Deckschicht das Wasserglasgemisch enthielt. Diese Spanplatten wurden mit einer Referenz ohne Additiv und einer Variante mit konventionellem Flammenschutzmittel auf Stickstoff / Phosphor-Basis (ebenfalls 10 m%) verglichen (siehe Abbildung 17 sowie Tabelle 13).

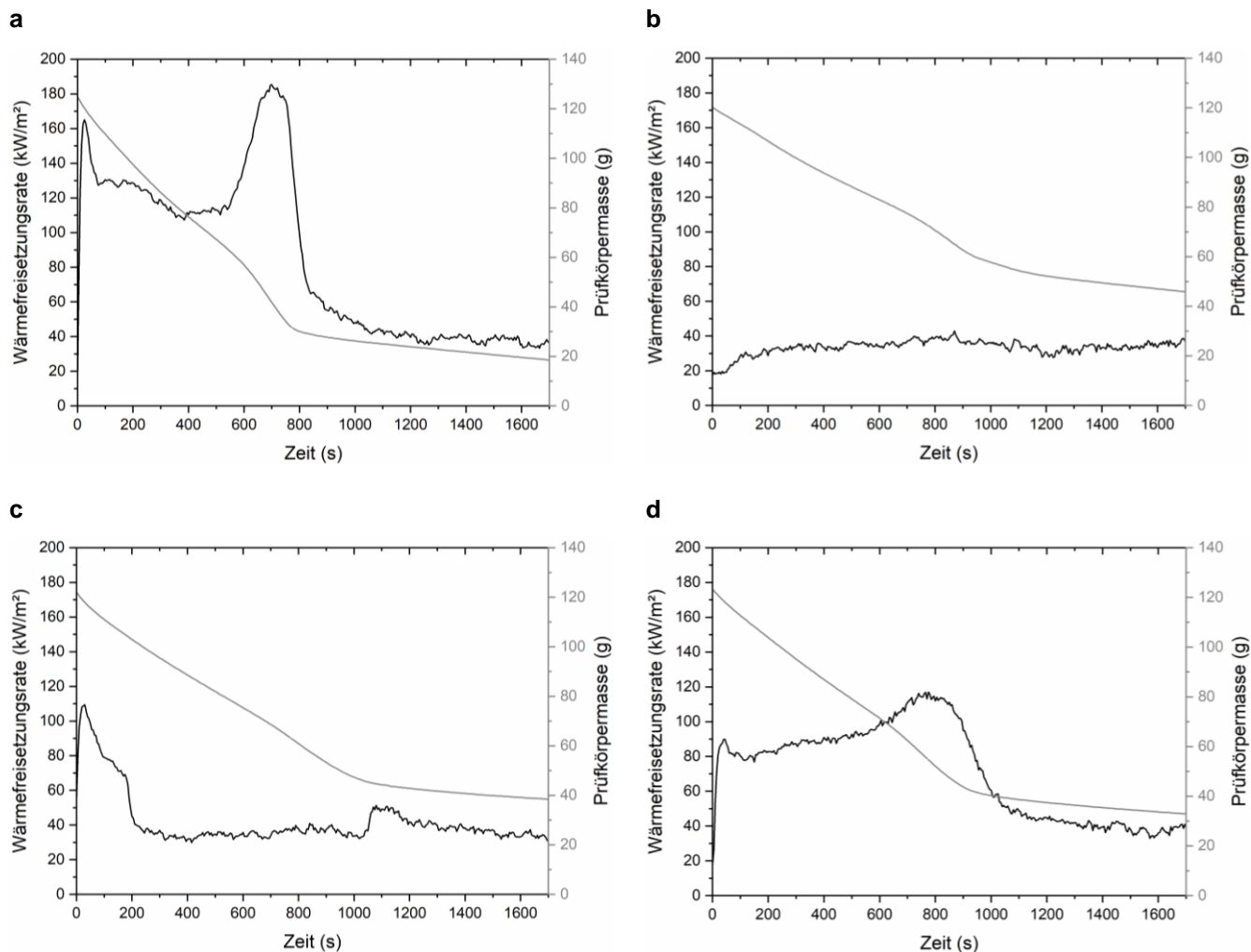


Abbildung 17: Wärmefreisetzungsraten und Probenmassen der unterschiedlichen Prüfkörper gemessen im Cone-Kalorimeter (a: Referenz Spanplatte; b: Konventionelles Flamschutzmittel; c: Spanplatte bei der Deck- und Mittellagen mit mineralischem Wasserglasgemisch (Ultracool 500) versehen waren; d: Spanplatte bei der nur die Decklagen mit mineralischem Wasserglasgemisch versehen waren).

Tabelle 13: Kalorimetrische Kennwerte von Dreischichtspanplatten mit verschiedenen Additiven (jeder Wert beinhaltet 3 Messungen (3 Reihen mit je 1 Probe)).

	Referenz	Konventionelles FSM	mineralisches Additiv in Deck und Mittellage	mineralisches Additiv nur in Decklagen
Entflammungszeitpunkt (s)	43	-	46	52
Gesamte Wärmefreisetzung (MJ/m²)	102,2	60,5	76,3	99,2
Masseverlust (%)	78,0	63,0	69,9	68,6

Neben den kalorimetrischen Untersuchungen wurden ebenfalls die Querkzug- sowie Biegefestigkeit analysiert (Tabelle 14).

Tabelle 14: Querzug- und Biegefestigkeiten von Dreischichtspanplatten mit verschiedenen Additiven (jeder Wert beinhaltet 18 bzw. 6 Messungen (3 Reihen mit je 6 bzw. 2 Proben); Mittelwert \pm Standardabweichung).

	Referenz	Konventionelles FSM	Mineralisches Additiv in Deck und Mittellage	mineralisches Additiv nur in Decklagen
Biegefestigkeit (N/mm ²)	20,5 ($\pm 1,6$)	14,6 ($\pm 1,5$)	6,8 ($\pm 1,4$)	7,8 ($\pm 1,1$)
Querzugfestigkeit (N/mm ²)	0,83 ($\pm 0,10$)	0,79 ($\pm 0,06$)	0,43 ($\pm 0,04$)	0,79 ($\pm 0,09$)

Die kalorimetrischen sowie physikalisch-mechanischen Ergebnisse der verschiedenen Dreischichtspanplatten, welche mit flammhemmenden Additiven ausgerüstet wurden, lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die kalorimetrischen Analysen zeigen, dass das Wasserglasgemisch (Ultracool 500) lediglich eine Wirkung zeigt, wenn sowohl die Deck- als auch die Mittellagen damit ausgestattet sind. Es sind wie auch bei der Referenz bei beiden mineralischen Varianten zwei Peaks der Wärmefreisetzung zu erkennen. Diese weisen zum einen auf eine Entflammung der Prüfkörper (1. Peak) sowie eine starke Vergrößerung der Oberfläche durch Rissbildung (2. Peak) hin [39].
- Das konventionelle Flamschutzmittel zeigt für alle kalorimetrische Kennwerte eine verminderte Flammwirkung. Der Prüfkörper entzündete sich nicht und zeigte den geringsten Masseverlust.
- Die Festigkeiten wurden bei der Zugabe aller Additive negativ beeinflusst. Die nur mit konventionellem Bindemittel (pMDI) hergestellte Dreischichtspanplatte zeigt höhere Festigkeiten als die Dreischichtspanplatte, bei welcher die Späne der Deck- und Mittellagen mit Additiven versehen wurden. Demgegenüber ermöglicht eine Behandlung nur der Deckschicht mit Additiven weiterhin hohe Querzugfestigkeiten.

Die Herstellung von OSB mit den beiden mineralischen Additiven und PF-Harzen war aufgrund der beschriebenen Problematik nicht möglich. Die Oberfläche der Strands ist kleiner als die der Späne der Dreischichtspanplatte. Daher schien die Anhaftung der mineralischen Additive noch schlechter als bei den Spanplatten. Selbst die Produktion von OSB mit dem Ultracool 500, mit welchem die Produktion von Spanplatten möglich war, gelang nicht.

In einem weiteren Versuch wurde MUF teilweise oder vollständig durch Kieselsol (Levasil CC503 der Firma Nouryon Functional Chemicals GmbH), das als mineralisches Bindemittel eingesetzt wurde, bei der Herstellung von Spanplatten substituiert. Dazu wurden Einschichtspanplatten mit einem Bindemittelanteil von 8 m% hergestellt. Dieser Bindemittelanteil wurde durch die Einstellung unterschiedlicher Mischungsverhältnisse zwischen MUF und Kieselsol erreicht: 100/0 m%; 75/25 m%; 50/50 m%; 25/75 m% sowie 0/100 m%. Die Beleimung der Späne mit den beiden Bindemitteln erfolgte getrennt. Erst wurde das MUF aufgesprüht, danach wurde das Kieselsol aufgebracht. Während der Beleimung der Späne kam es in der Beleimungstrommel wiederum zum Ausfallen des Kieselsols aus der Lösung, was wahrscheinlich auf die Änderung des pH-Wertes an der Spanoberfläche zurückzuführen ist. Die behandelten Späne wurden dennoch zu Einschichtspanplatten mit einer Zielrohddichte von ca. 680 kg/m² verpresst. Dabei betrug die Presszeit 15 s/mm Plattendicke bei einer Temperatur von 180 °C. Die Dicke von 18 mm wurde durch metallene Abstandshalter eingestellt. Bei der Verwendung des Mischungsverhältnisses 0/100 m%, also der Variante, in der nur Kieselsol als Bindemittel verwendet wurde, war die Herstellung von Spanplatten nicht möglich. Die Einschichtspanplatten hatten eine so geringe Eigenfestigkeit, dass sie nach dem Öffnen der Heißpresse bereits einen starken Springback, also eine Zunahme der Plattendicke verursacht durch eine zu geringe Adhäsion der Späne

untereinander, verzeichneten. Die kalorimetrischen sowie mechanischen Eigenschaften aller anderen Varianten sind in Tabelle 15 und Tabelle 16 dargestellt.

Tabelle 15: Kalorimetrische Kennwerte von Einschichtspanplatten mit verschiedenen Bindemittelverhältnissen (jeder Wert beinhaltet 3 Messungen (3 Reihen mit je 1 Probe)).

	100/0 (MUF/Kieselsoel)	75/25 (MUF/Kieselsoel)	50/50 (MUF/Kieselsoel)	25/75 (MUF/Silikasoel)
Entflammungszeitpunkt (s)	24	34	27	38
Gesamte Wärmefreisetzung (MJ/m ²)	117,3	111,2	104,7	106,3
Masseverlust (%)	85,5	84,6	83,2	81,0

Tabelle 16: Querzug- und Biegefestigkeiten von Einschichtspanplatten mit verschiedenen Bindemittelverhältnissen (jeder Wert beinhaltet 18 bzw. 6 Messungen (3 Reihen mit je 6 bzw. 2 Proben); Mittelwert \pm Standardabweichung).

	100/0 (MUF/Kieselsoel)	75/25 (MUF/Kieselsoel)	50/50 (MUF/Kieselsoel)	25/75 (MUF/Kieselsoel)
Biegefestigkeit (N/mm ²)	15,5 ($\pm 0,8$)	12,0 ($\pm 1,2$)	10,8 ($\pm 0,9$)	7,2 ($\pm 0,8$)
Querzugfestigkeit (N/mm ²)	0,56 ($\pm 0,19$)	0,44 ($\pm 0,12$)	0,32 ($\pm 0,02$)	0,18 ($\pm 0,04$)

Es wurden ebenfalls Basaltfaserverstärkte Varianten hergestellt, bei denen jeweils ein Geogrid nach 20 m% und nach 80 m% der gestreuten Späne in den Presskuchen integriert wurde. Die verwendeten Bindemittelverhältnisse blieben bei diesen Varianten gleich. Die mechanischen Eigenschaften der verstärkten Einschichtspanplatten sind in Tabelle 17 aufgeführt.

Tabelle 17: Querzug- und Biegefestigkeiten von basaltfaserverstärkten Einschichtspanplatten mit verschiedenen Bindemittelverhältnissen (jeder Wert beinhaltet 18 bzw. 6 Messungen (3 Reihen mit je 6 bzw. 2 Proben); Mittelwert \pm Standardabweichung).

	100/0 (MUF/Kieselsoel)	75/25 (MUF/Kieselsoel)	50/50 (MUF/Kieselsoel)	25/75 (MUF/Kieselsoel)
Biegefestigkeit (N/mm ²)	19,6 ($\pm 2,0$)	18,7 ($\pm 1,2$)	20,3 ($\pm 0,9$)	16,6 ($\pm 1,3$)
Querzugfestigkeit (N/mm ²)	0,53 ($\pm 0,11$)	0,43 ($\pm 0,14$)	0,36 ($\pm 0,10$)	0,15 ($\pm 0,08$)

Die Verwendung von Kieselsoel als Substitut für MUF bei der Herstellung von Einschichtspanplatten mit und ohne Basaltfaserverstärkung lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Ein steigendes Verhältnis von Kieselsoel zu MUF beeinflusst die mechanischen Eigenschaften negativ. Bei einem Verzicht von MUF, also einer reinen Verwendung der Kieselsoel, ist eine Plattenproduktion aufgrund des unmittelbar auftretenden Springbacks nicht möglich.
- Die Verwendung von Basaltfasern wirkt der Reduktion der Biegefestigkeit durch die Verwendung eines geringeren MUF-Anteils entgegen.

- Die kalorimetrischen Eigenschaften werden nur in einem geringen Maße beeinflusst. Der sinkende Masseverlust bei steigendem Kieselanteil ist auf den steigenden mineralischen Anteil des Bindemittels zurückzuführen, der nicht pyrolysiert wird und als Rückstand verbleibt. Ein signifikant flammschützender Effekt ist also nicht zu beobachten.

Aufgrund dieser Entwicklung wurde anstelle der mineralisch additivierten Dreischichtspanplatten und OSB zementgebundene Spanplatten hergestellt, welche aufgrund der Zementmatrix nach DIN EN 4102 als nicht brennbar klassifiziert werden [40]. Diese Platten wurden mit Basaltfasern verstärkt, um den Holzbestandteil zu erhöhen, welcher in klassischen Zementspanplatten aus technischen Gründen auf einen geringen zweistelligen Prozentanteil beschränkt ist.

Für diese Versuche wurden Zementspanplatten mit einem Spananteil von 10, 20 und 30 m% im Trockenprozess hergestellt. Als Zement wurde schnellhärtender Portlandzement der Klasse CEM I 52,5R-HS/NA Su verwendet.

Zur Plattenherstellung wurde Kaliwasserglas (1,5 m% bezogen auf die Zementmasse) sowie eine Aluminiumsulfat-Lösung 1 m% bezogen auf die Zementmasse) auf das Holzmaterial gesprüht. Auf diese Weise wurde eine homogene Verteilung dieser Reaktionsbeschleuniger und des Wassers erreicht. Anschließend wurde den so befeuchteten Holzspänen nach und nach Zementpulver zugegeben. Das Pulver haftete an den nassen Partikeln und bildete die oberflächliche Schicht des mineralischen Bindemittels. Im letzten Schritt wurde zusätzliches Wasser (50 % der Gesamtwassermenge) aufgesprüht. Die der Mischung hinzugefügte Wassermenge wurde anhand der Gleichung von Simatupang und Okino et al. [41,42] berechnet ().

$$RW = 0.35C + (0.30 - M)W \quad (2)$$

Dabei ist RW die erforderliche Wasserzugabemenge zur Mischung (l); C ist die Menge an Portlandzement (kg); M ist der Feuchtigkeitsgehalt der Holzspäne (Gew.-%); W ist das Darrgewicht der Holzspäne (kg).

Anschließend wurde die Masse gleichmäßige per Hand gestreut, zunächst vorgepresst und dann bei 70 °C für 8 h gepresst. Bei den Varianten, welche das Geogrid enthielten, wurden die Gewebe so positioniert, dass die beidseitig eingebrachten Basaltmatten in den unteren und oberen 20 m% der Plattenebene lokalisiert waren. Die Zementplatten wurden dann in Plastiksäcken versiegelt und 27 Tage bei 20 °C und 65 % Luftfeuchtigkeit (Normklima) gelagert. Nach dem Probenzuschnitt wurden die Probekörper einen weiteren Tag im Normklima gelagert, um eine Gleichgewichtsfeuchte vor den mechanischen und kalorimetrischen Tests zu erreichen.

In einem Vorversuch wurde die Kompatibilität zwischen dem Zement und den Holzspänen analysiert. Die Zugabe von Zusatzstoffen, wie zum Beispiel Holzspänen oder chemischen Beschleunigern, zum Zement können die Hydratation d.h. die Aushärtung beeinflussen. Hachmi et al. [43] beschrieben diesen Effekt und entwickelten einen Wirkungsindex für Hydratations. Dieser wurde später für Herstellung von Zementspanplatten angepasst [44]. Um die Wirkungsindizes für die in dem Versuch hergestellten verstärkten Zementspanplatten zu ermitteln, wurden zum einen Portlandzement mit destilliertem Wasser vermischt. Zum anderen wurden für die Analyse der Auswirkung der Zusatzstoffe gemahlene Holzspäne sowie gemahlenes Geogrid mit dem Portlandzement und Wasser vermischt. Die Aushärtung des Zements wurde in einem thermisch-isolierten (adiabatischen) System für 24 Stunden durchgeführt und die Aushärtungstemperatur mittels Temperaturfühler aufgezeichnet.

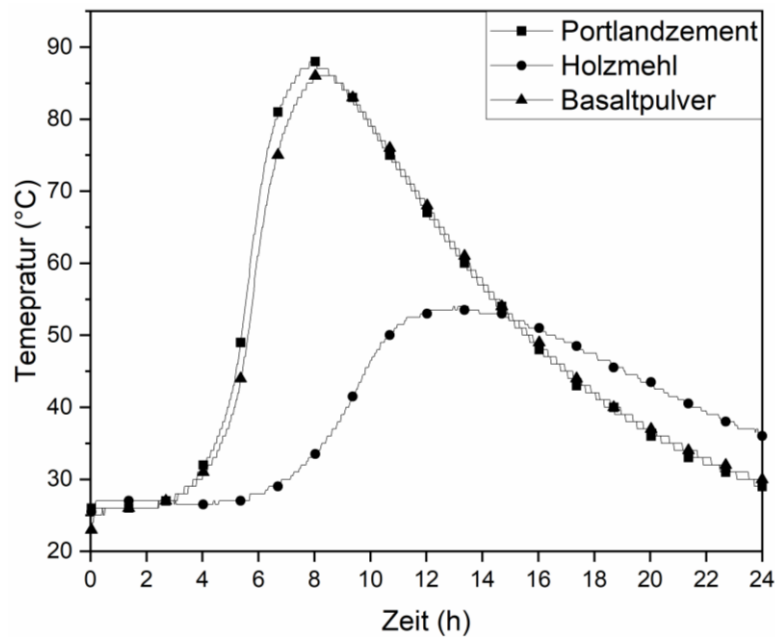


Abbildung 18: Reaktionstemperatur von reinem Portlandzement sowie Portlandzement versetzt mit Holzmehl und Basaltpulver.

Die Reaktionstemperaturen zeigen deutlich, dass Holz einen negativen Einfluss auf die Hydratation des Zementleims hat (Abbildung 18). Dies war zu erwarten, da die leicht löslichen Zucker sowie Hemicellulosen, die durch den basischen pH-Wert des Zementleims gespalten werden, die Bildung von Hydraten wie Calciumsilikathydrat, Portlandit und Ettringit beeinflussen [45]. Die Temperaturkurve des mit Basaltpulver versetzten Portlandzements zeigt, dass die Basaltpartikel die Hydratation nicht beeinflussen.

Des Weiteren wurden für die hergestellten Zementspanplatten die mechanischen Eigenschaften mit und ohne Basaltfaserverstärkung ermittelt (Abbildung 19 sowie Tabelle 18).

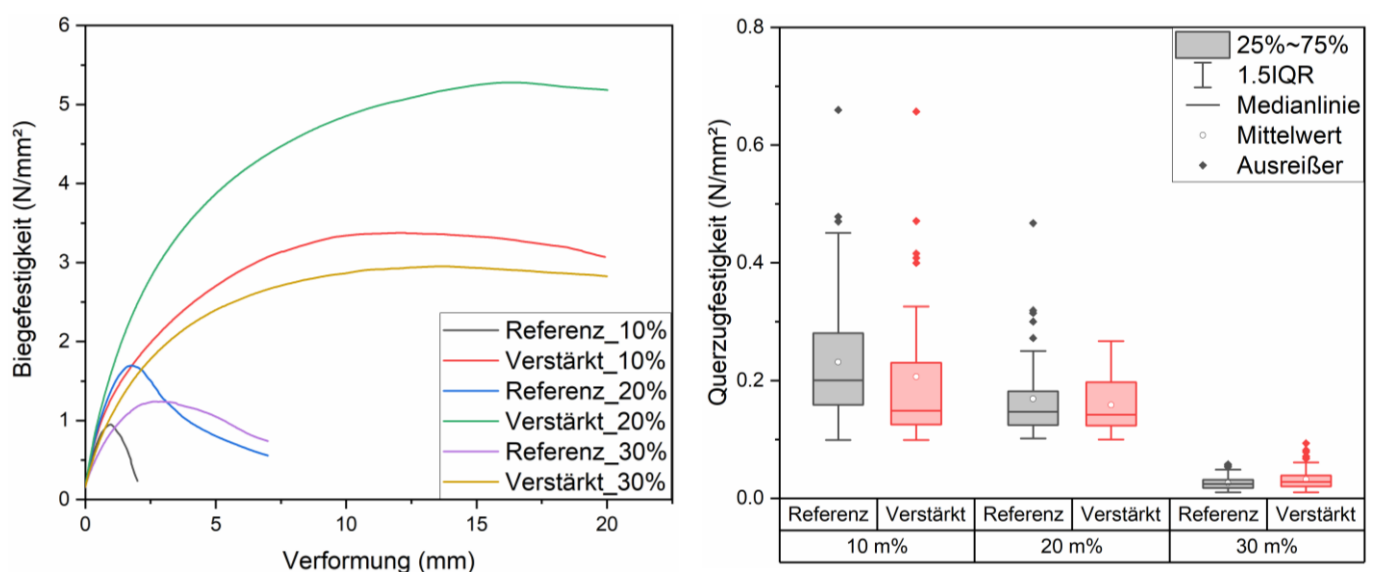


Abbildung 19: Gemittelte Spannungs-Dehnungs-Diagramme sowie Querzugfestigkeiten der Zementspanplatten mit und ohne Basaltverstärkung und unterschiedlichen Zement-zu-Holz Verhältnissen (jede Kurve stellt den Mittelwert von 16 Messungen dar (4 Reihen mit je 4 Proben); jeder Boxplot umfasst 60 Messungen (4 Reihen mit je 15 Proben)).

Tabelle 18: Biegefestigkeiten und Querkzugfestigkeiten der Zementspanplatten mit und ohne Basaltverstärkung mit unterschiedlichen Zement-zu-Holz Verhältnissen (jeder Wert beinhaltet 16 bzw. 60 Messungen (4 Reihen mit je 4 bzw. 15 Proben); Mittelwert \pm Standardabweichung).

	Referenz 10 m%	Verstärkt 10 m%	Referenz 20 m%	Verstärkt 20 m%	Referenz 30 m%	Verstärkt 30 m%
Biegefestigkeit (N/mm ²)	1,23 ($\pm 0,41$)	4,37 ($\pm 1,50$)	1,77 ($\pm 0,50$)	5,40 ($\pm 1,42$)	1,33 ($\pm 0,29$)	3,06 ($\pm 0,55$)
Querkzugfestigkeit (N/mm ²)	0,23 ($\pm 0,10$)	0,21 ($\pm 0,12$)	0,17 ($\pm 0,07$)	0,16 ($\pm 0,05$)	0,03 ($\pm 0,01$)	0,03 ($\pm 0,01$)

Neben den mechanischen Eigenschaften wurden ebenfalls die kalorimetrischen Kenngrößen mithilfe eines Cone-Kalorimeters ermittelt.

Tabelle 19: Kalorimetrische Kennwerte von Referenz- und verstärkten Zementspanplatten mit verschiedenen Spangehalten (jeder Wert beinhaltet 9 Messungen (3 Reihen mit je 3 Probe)).

	Referenz 10 m%	Verstärkt 10 m%	Referenz 20 m%	Verstärkt 20 m%	Referenz 30 m%	Verstärkt 30 m%
Entflammungszeitpunkt (s)	-	-	-	-	-	-
Gesamte Wärmefreisetzung (MJ/m ²)	32	35	49	47	55	55
Masseverlust (%)	12,5	16,8	28,2	26,2	35,3	31,3

Die mechanischen Festigkeiten der Zementspanplatten (Abbildung 19 und Tabelle 18) sowie die kalorimetrischen Eigenschaften (Tabelle 19) lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Biegefestigkeiten wurden für alle Varianten durch die Implementierung des Geogrids stark erhöht. Die Gewebe tragen ebenfalls dazu bei, dass die Plattenwerkstoffe duktiler sind. Die maximale Biegefestigkeit wird erst nach einer längeren Phase der plastischen Verformung erreicht.
- Die Verwendung von 20 m% Holzspänen ergibt die höchsten Biegefestigkeiten von den untersuchten Holzpartikelmassen. Jedoch ist die Biegefestigkeit auch bei einer Zugabe von 30 m% Holzspänen ca. doppelt so hoch wie die der Referenz.
- Die Querkzugfestigkeit wird durch die Implementierung der Basalgewebe nicht beeinflusst. Jedoch wirkt sich ein steigender Holzspananteil reduzierend auf die Querkzugfestigkeit der Zementspanplatten aus.
- Keine der hergestellten Varianten hat sich während der Messung im Cone-Calorimeter entzündet. Jedoch führt ein Anstieg des Holzspäneanteils zu einer höheren Wärmefreisetzung sowie zu höherem Masseverlust der Prüfkörper.

Für die hier bearbeiteten Arbeitspakete lassen sich zusammenfassend folgende Ergebnisse festhalten:

Die Verwendung von mineralischen Bindemitteln stellt sich in vielerlei Hinsicht als problematisch dar. Zum einen ist das Aufbringen der Emulsionen unter der Verwendung von Druckluftdüsen nur schwer realisierbar. Bei Aufsprühen der Dispersionen kommt es zu einer Phasenumkehr auf der Oberfläche der Fasern, die zum Ausfallen der mineralischen Komponente führt. Dies ist wahrscheinlich auf die Veränderung des pH-Wertes der Dispersion durch die Holzoberflächen zurückzuführen.

Durch die hohe Oberfläche der Feinpartikel in der Emulsion trocknet die wässrige Fase bereits während des Sprühprozesses und ein hoher Anteil an Feinstaub, welcher nicht auf den Holzpartikeln haften kann, wird erzeugt.

Der Einsatz von mineralischen Bindemitteln zeigt nur eine geringe Auswirkung auf die kalorimetrischen Eigenschaften, bewirkt jedoch gleichzeitig eine relativ starke Reduktion der mechanischen Festigkeiten. Durch den Einsatz von Basaltgeweben als Verstärkungsmaterial, ist es möglich hohe Biegefestigkeiten, auch für Varianten mit einem hohen mineralischen Bindemittelanteil, zu gewährleisten.

Die Verwendung von Basaltgeweben als Verstärkungsmaterial für zementgebundene Spanplatten ermöglicht es einen höheren Anteil von Portlandzement durch Holzspäne, unter Erreichung hoher Biegefestigkeiten, zu substituieren.

Arbeitspaket 9: Herstellung mineralisch gebundener OSB-Platten im industriellen Maßstab

Aufgrund der im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Probleme bei der Herstellung von Spanplatten und OSB, welche mit mineralischen Additiven ausgestattet sind, konnten die Versuche nicht auf den industriellen Maßstab übertragen werden. Gespräche mit der Firma IGP Chemie GmbH, welche die mineralischen Additive herstellt, ergaben, dass eine Anpassung der Formulierungen nicht möglich bzw. nicht zielführend für die Firma war. Die Formulierungen sollten weiterhin lediglich als Sandwichkleber zur Verklebung von expandierten Polystyrol-, Polyurethan- oder Gipskarton-Platten dienen.

Eine Herstellung von zementgebundenen Spanplatten ist in den Werken der Swiss Krono GmbH nicht möglich, da die dortigen Anlagen nicht für mineralische Bindemittel ausgelegt sind und nur rein holzbasierte Plattenwerkstoffe hergestellt werden können.

Eine Herstellung von mineralisch gebundenen Spanplatten wurde ebenfalls in Kooperation mit der Dibrax GmbH angedacht. Jedoch war eine Nutzung der Anlagen nicht möglich, da die Firma im Jahr 2020 aufgelöst wurde.

2. Verwertung

a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen

Im Laufe des Forschungsvorhabens wurden keine Erfindungen bzw. Schutzrechte angemeldet.

b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Durch die positiven Ergebnisse des Forschungsvorhabens, besonders bei der Basaltfaserverstärkung von Plattenwerkstoffen mit geringer Dichte, wäre eine Implementierung der Faserverstärkung in die industrielle Plattenproduktion denkbar. Durch die Entwicklung neuer Produkte, wie basaltfaserverstärkte Plattenwerkstoffe, ergeben sich neue Marktstrukturen für deutsche Unternehmen und können die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Holzwerkstoffindustrie erhöhen.

Es wurde bereits mit der Forschungs- und Entwicklungsabteilung der Firma Swiss Krono GmbH über eine Implementierung der Faserverstärkung in den industriellen Prozess gesprochen. Dabei wurde deutlich, dass Interesse an dieser Art von Plattenwerkstoffen besteht, jedoch müsste der Quadratmeter-Preis des eingebrachten Basaltgrids reduziert werden. Dies könnte über eine Vergrößerung des Schussfadenabstandes, die zu einer Verringerung der Basaltmenge führen würde, erreicht werden.

An der Abteilung Holzbiologie und Holzprodukte der Georg-August-Universität Göttingen laufen derzeit, aufbauend auf den in diesem Forschungsvorhaben generierten Ergebnisse, Zeitstandfestigkeitsprüfungen nach DIN EN 1156 zur Bestimmung des Kriechverhaltens [46]. Eine Verringerung des Kriechverhaltens durch die Basaltfaserverstärkung könnte die verstärkten Holzwerkstoffe für weitere Anwendungen interessanter machen.

c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Mit der Bearbeitung des Forschungsprojekts HolzBasalTec wurden neue wissenschaftliche Kompetenzen im Bereich der Faserverstärkung sowie des Brandschutzes geschaffen, Bestehende Kompetenzen in diesen Bereichen konnten erhalten und weiter ausgebaut werden. An der Abteilung Holzbiologie und Holzprodukte der Georg-August-Universität Göttingen wurden, angeregt durch die Verwendung mineralischer Komponenten zur Verstärkung von Holzwerkstoffen, einige Publikationen veröffentlicht, welche die Herstellung neuartiger mineralisch gebundener Plattenwerkstoffe als Thema hatten [45,47–49]. Aufgrund der im Projekt HolzBasalTec gewonnen Erkenntnisse und Forschungsk Kooperationen entsteht so auf lange Sicht ein Forschungsschwerpunkt im Bereich der Kombinationsmöglichkeit von Holz und mineralischen Baustoffen und Additiven.

Ein kurz- und mittelfristiges Ziel des Forschungsvorhabens war es, die Qualifizierung des wissenschaftlichen Nachwuchses zu gewährleisten. Für die Bearbeitung des Forschungsprojektes wurde eine neue Stelle für einen Nachwuchswissenschaftler geschaffen. Die angestrebte Promotion ist an das Forschungsprojekt angelehnt und soll kumulativ mit mehreren Publikationen erfolgen. Des Weiteren wurde das Projekt zur Ausbildung von Studierenden genutzt. Im Bearbeitungszeitraum wurde eine Bachelorarbeit im Rahmen des Teilvorhabens fertiggestellt. Ebenso ist angedacht, die aus dem Forschungsprojekt gewonnen Erkenntnisse und Methoden in die Ausbildung der Studierenden (Vorlesungen, Praktika) einfließen zu lassen.

Durch die angestrebte Veröffentlichung weiterer Publikationen werden die Ergebnisse des Projektes der wissenschaftlichen Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Weiterhin werden die Ergebnisse auf der Homepage der Abteilung publiziert.

d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die im Rahmen des Projektes HolzBasalTec gesammelte Expertise soll in bereits in der Abteilung Holzbiologie und Holzprodukte etablierten Projekten genutzt und weiterentwickelt werden. Diesbezüglich sind zwei von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe geförderte Forschungsvorhaben zu nennen, mit denen es bereits während der Laufzeit eine enge Kooperation gab: die Projekte „MatLeicht - Materialeffiziente Herstellung von Produkten aus leichtem Laubholz“ (FKZ 2220NR011A) sowie „KiefernStolz - Nachhaltige Nutzungspotentiale für Kiefernstarkholz – eine ganzheitliche Betrachtung ihres Aufkommens, Waldbaus, der Holzernte und ihrer Verwertung“ (FKZ 2220WK01E3). Die Projekte befassen sich mit verschiedenen Aspekten der Verstärkung von furnierbasierten Werkstoffen mit Basalt- und anderen Geweben.

Eine externe Zusammenarbeit besteht mit dem Fraunhofer WKI in Braunschweig bei der es insbesondere zum Austausch aufgrund der Überschneidungen mit dem von der FNR geförderten Verbundvorhaben „FREIFO - Selbsttragende Freiformflächen aus Laubholz furnier - Hybridwerkstoffe für den Einsatz in Fußgänger- und Fahrradbrücken; Teilvorhaben 1: Herstellung von Hybridwerkstoffen aus Laubholz furnier“ (FKZ 2220HV039) kam. Dieses Vorhaben des WKIs beschäftigt sich mit der Implementierung von faserverstärkten Hybridwerkstoffen für den Einsatz in einer Fußgängerbrücke. Mit dem bearbeitenden Team unter der Leitung von Herrn Peter Meinlschmidt bestand ein reger Austausch bezüglich der Verwendung von Basalt als Bewehrungsmaterial der Hybridwerkstoffe.

Neben dem Wissenstransfer mit anderen Projekten sind ebenfalls weitere Umsetzungen der Ergebnisse mit beteiligten Industriepartnern angedacht. Das Spanplattenwerk Gotha GmbH hat Interesse an einer Versuchsreihe geäußert, in welcher Türen mit Basaltgewebe ausgestattet werden sollen, um auftretende Verformungen bei der Brandprüfung nach DIN EN 4102 zu verringern [50]. Die Versuche waren ursprünglich im Rahmen des Projektes geplant, konnten aber aus Gründen mangelnder Kapazität auf Seiten der Firma nicht durchgeführt werden.

Weiterhin sollen die gewonnenen Erkenntnisse in weiteren zukünftigen Projekten angewandt und weiterentwickelt werden. So ist die Abteilung Holzbiologie und Holzprodukte an dem nationalen ZIM-Kooperationsnetzwerk „C2C-Naturbau“ -Cradle to Cradle- Bauen mit der Natur-für die Natur (FKZ 16KN 107002). Ein weiteres ZIM-Kooperationsnetzwerk soll zum Thema „Entwicklung von Verbundwerkstoffen aus Holz oder anderen lignocellulose-basierten Rohstoffen mit mineralischen Bindemitteln (ReBioVerMat)“ beantragt werden. In beiden Kooperationsnetzwerken können die Ergebnisse aus „HolzBasalTec“ als Grundlage dienen und in Zusammenarbeit mit mittelständischen Firmen weiterentwickelt werden.

3. Erkenntnisse von Dritten

Während der Durchführung des Forschungsvorhabens gab es einige Veröffentlichungen von Dritten, die sich ebenfalls mit der Verstärkung von Holzwerkstoffen mit Basaltfasern beschäftigten. Neben einigen anderen wurden die folgenden Studien während des Bewilligungszeitraums des Forschungsvorhabens veröffentlicht:

In der Veröffentlichung von Wang et al. (2019) wurden kleine Holzbalken mit faserverstärkten Polymerverbundwerkstoffen (FRP) versehen. Neben Fasern wie E-Glas und Flachs wurde ebenfalls Basalt als Faser in dem Polymerverbund verwendet. In dieser Studie wurden insbesondere die Biegeeigenschaften sowie die Versagensmodi der verstärkten Holzbalken untersucht und bewertet [51].

Agnieszka Wdowiak und Janusz Brol veröffentlichten 2019 eine Studie, in der Holzbalken mit basaltfaserhaltigen Polymerverbundwerkstoffen (BFRP) verstärkt wurden. Der Fokus der Studie lag auf der Verwendung von Schnittholz niedrigerer Qualitätsklassen, welche zur Verstärkung der Träger mit vorgespannten Basaltfaserstäben versehen waren. Diese Lösung ermöglicht es, Holz niedrigerer Qualitätsklassen als Baumaterial zu verwenden, da die bewehrten Balken den Normanforderungen entsprachen [52].

Agnieszka Wdowiak-Postulak veröffentlichte 2020 eine Studie, in der Holzbalken eines Altbaus aus dem Jahr 1860 mit basaltfaserhaltigen Polymerverbundwerkstoffen (BFRP) verstärkt wurden. Die Versuche mit bewehrten Holzbalken sollten die Erhöhung der Tragfähigkeit und Steifigkeit nach Einbringung einer natürlichen Bewehrung ermitteln [53].

Kramár et al. (2021) veröffentlichten eine Publikation, in der Basaltfasern oberflächlich mit Plasma behandelt wurden, um eine stärkere Adhäsion mit Bindemitteln aus der Holzwerkstoffindustrie zu erreichen. Die Ergebnisse zeigten, dass Amidstrukturen mithilfe von dielektrischer oberflächlicher Barriereentladung auf den Basaltfasern generiert werden konnten, was eine verbesserte Adhäsion mit einigen Bindemitteln bewirkte [54].

Auf dem Gebiet der mineralischen Brandschutzmittel gab es ebenfalls während der Zeit des Forschungsvorhabens einige Veröffentlichungen von Dritten. Unter anderem wurden die folgenden Studien während des Bewilligungszeitraums des Forschungsvorhabens veröffentlicht:

Ozyhar et al. (2021) veröffentlichten eine Studie, in der Flammschutzmittel auf mineralischer Basis in Kombination mit MUF-Harzen zur Verwendung in Holzwerkstoffen getestet wurden. Eine Zugabe von 10–15 Gew.-% des Flammschutzmittels erbrachte einen guten Kompromiss im Hinblick auf die Abwägung zwischen Flammschutz und mechanische Eigenschaften, da, wie auch in dem Fall des Projektvorhabens, die mineralischen Komponenten die Festigkeiten stark reduzieren [55].

Hüsnügül Yilmaz Atay veröffentlichte 2021 eine Arbeit, in der Holzwerkstoffe mit den Mineralien Huntit sowie Hydromagnesit (helles Magnesia) als Flammschutzmittel versehen wurden. Durch die Zugabe der gemahlenden Mineralien konnte die Feuerbeständigkeit von Holzwerkstoffen verbessert werden [56].

Eine interessante Studie, wenn auch thematisch etwas weiter entfernt, wurde 2022 von Fei et al. veröffentlicht. In dieser Arbeit wurde eine enzymatische Mineralisation angewendet, um CaCO_3 -Mineralien in Holzkompartmenten abzulagern. Der Einbau von CaCO_3 -Mesokristallen führte zu mineralisiertem Holz mit verbesserter Oberflächenhärte und Flammhemmung [57].

4. Veröffentlichungen

Kramár et al. (2020) veröffentlichten eine Publikation unter Beteiligung der Abteilung Holzbiologie und Holzprodukte der Georg-August-Universität Göttingen in der Fachzeitschrift „Construction and Building Materials“. Diese Publikation befasste sich ebenfalls mit der Verstärkung von Dreischichtspanplatten mit Hilfe von Basaltgeweben [30].

Die Ergebnisse des hier dargestellten Arbeitspaketes 3 wurden in Form eines Papers in einer Fachzeitschrift zur Veröffentlichung eingereicht. Darüber hinaus sind weitere Veröffentlichungen aus dem hier beschriebenen Arbeitspaket 1 und 4 des Forschungsvorhabens in entsprechenden Zeitschriften geplant.

VI. Literatur

- [1] M.C. Barbu, Evolution of Lightweight Wood Composites, *Pro Ligno* 11 (2015).
- [2] B. Mohebbi, F. Tavassoli, S. Kazemi-Najafi, Mechanical properties of medium density fiberboard reinforced with metal and woven synthetic nets, *Eur. J. Wood Wood Prod.* 69 (2011) 199–206.
- [3] Z. Cai, Selected properties of MDF and flakeboard overlaid with fiberglass mats, *For. Prod. J.* 56 (2006) 142–146.
- [4] A. Borri, M. Corradi, E. Speranzini, Reinforcement of wood with natural fibers, *Compos. Part B Eng.* 53 (2013) 1–8.
- [5] S. Sam-Brew, G.D. Smith, Flax and Hemp fiber-reinforced particleboard, *Ind. Crops Prod.* 77 (2015) 940–948.
- [6] S. Kramár, M. Trcala, K. Chitbanyong, P. Král, B. Puangsin, Basalt-Fiber-Reinforced Polyvinyl Acetate Resin: A Coating for Ductile Plywood Panels, *Materials*. 13 (2019).
- [7] S. Kramár, P. Král, Reinforcing effect of a thin basalt fiber-reinforced polymer plywood coating, *BioResources*. 14 (2019) 2062–2078.
- [8] S. Raj, V.R. Kumar, B.H. Barath Kumar, S. Gopinath, N.R. Iyer, Flexural studies on Basalt Fiber Reinforced Composite sandwich panel with profile sheet as core, *Constr. Build. Mat.* 82 (2015) 391–400.
- [9] Z.C. Girgin, M.T. Yildirim, Usability of basalt fibres in fibre reinforced cement composites, *Mater. Struct.* 49 (2016) 3309–3319.
- [10] C.H. Jiang, T.J. McCarthy, D. Chen, Q.Q. Dong, Influence of Basalt Fiber on Performance of Cement Mortar, *Key Eng. Mater.* 426–427 (2010) 93–96.
- [11] H. Yamaguchi, Low molecular weight silicic acid – inorganic compound complex as wood preservative, *Wood Sci. Technol.* 36 (2002) 399–417.
- [12] T. Furuno, Y. Imamura, Combinations of wood and silicate Part 6. Biological resistances of wood-mineral composites using water glass-boron compound system, *Wood Sci. Technol.* 32 (1998) 161–170.
- [13] S.J. Lee, V. Thole, Investigation of modified water glass as adhesive for wood and particleboard: mechanical, thermal and flame retardant properties, *Eur. J. Wood Wood Prod.* 76 (2018) 1427–1434.
- [14] G. Kowaluk, K. Kędzierawski, M. Zbieć, D. Fuczek, Possibilities of wood bonding with water glass., *Ann. Wars. Univ. Life Sci. - SGGW For. Wood Technol.* (2012) 158–161.
- [15] H.-J. Park, S.-M. Lee, Combustion Characteristics of Spruce Wood by Pressure Impregnation with Waterglass and Carbon Dioxide, *Fire Sci. Eng.* 26 (2012) 18–23.
- [16] Y. Peng, Y. Han, D.J. Gardner, Sodium silicate coated wood, *Proc. Intern. Conv. of Soc. of Wood Sci. and Techn.* (2010).
- [17] T. Furuno, K. Shimada, T. Uehara, S. Jodai, Combination of wood and silicate, 2: Wood-mineral composites using water glass and reactants of barium chloride, boric acid, and borax, and their properties, *J. Jpn. Wood Res. Soc.* (1992) 448–457.
- [18] DIN EN 1464:2010, Klebstoffe - Bestimmung des Schälwiderstandes von Klebungen - Rollenschälversuch.
- [19] DIN EN ISO 10319:2015, Geokunststoffe- Zugversuch am breiten Streifen.
- [20] DIN EN 310:1993, Holzwerkstoffe; Bestimmung des Biege-Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit.

- [21] DIN EN 319:1993, Spanplatten und Faserplatten; Bestimmung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene.
- [22] DIN EN 1087-1:1995, Spanplatten - Bestimmung der Feuchtebeständigkeit - Teil 1: Kochprüfung.
- [23] R. Shmulsky, P.D. Jones, Forest Products and Wood Science: An Introduction, 7th Edition, Wiley-Blackwell (2019).
- [24] S. Yu, K.H. Oh, J.Y. Hwang, S.H. Hong, The effect of amino-silane coupling agents having different molecular structures on the mechanical properties of basalt fiber-reinforced polyamide 6,6 composites, Compos. Part B Eng. 163 (2019) 511–521.
- [25] H. Stang, Z. Li, S.P. Shah, Pullout Problem: Stress versus Fracture Mechanical Approach, J. Eng. Mech. 116 (1990) 2136–2150.
- [26] J.-I. Choi, B.Y. Lee, Bonding Properties of Basalt Fiber and Strength Reduction According to Fiber Orientation, Materials. 8 (2015) 6719–6727.
- [27] O.I. Okoli, G. Smith, Failure modes of fibre reinforced composites: The effects of strain rate and fibre content, J. Mater. Sci. 33 (1998) 5415–5422.
- [28] J. Jacob, O.L.G. Barragán, Flexural Strengthening of Glued Laminated Timber Beams with Steel and Carbon Fiber Reinforced Polymers, Master Thesis at Chalmers University of Technology Göteborg, Sweden (2007).
- [29] J.-M. Park, R.V. Subramanian, Effects of silane coupling agents on internal reinforcement of wood by E-glass and basalt fibers, J. Adhes. Sci. Technol. 8 (1994) 1473–1483.
- [30] S. Kramár, A.K. Mayer, C. Schöpfer, C. Mai, Use of basalt scrim to enhance mechanical properties of particleboards, Constr. Build. Mater. 238 (2020).
- [31] DIN EN ISO 10365:2022, Klebstoffe - Bezeichnung der wichtigsten Bruchbilder.
- [32] DIN ISO 9276-1:2004, Darstellung der Ergebnisse von Partikelgrößenanalysen - Teil 1: Grafische Darstellung.
- [33] DIN ISO 9276-2:2018, Darstellung der Ergebnisse von Partikelgrößenanalysen - Teil 2: Berechnung von mittleren Partikelgrößen/-durchmessern und Momenten aus Partikelgrößenverteilungen.
- [34] DIN ISO 9276-4:2019, Darstellung der Ergebnisse von Partikelgrößenanalysen - Teil 4: Charakterisierung eines Trennprozesses.
- [35] J. Hao, X. Wu, G. Oporto, W. Liu, J. Wang, Structural analysis and strength-to-weight optimization of wood-based sandwich composite with honeycomb core under three-point flexural test, Eur. J. Wood Wood Prod. 78 (2020) 1195–1207.
- [36] P.M. Winistorfer, W.W. Moschler, S. Wang, E. DePaula, B.L. Bledsoe, Fundamentals of Vertical Density Profile Formation in Wood Composites. Part I. *In-Situ* Density Measurement of the Consolidation Process, Wood Fiber Sci. (2000) 209–219.
- [37] DIN EN ISO 11925-2, Prüfungen zum Brandverhalten - Entzündbarkeit von Produkten bei direkter Flammeneinwirkung - Teil 2: Einzelflammentest.
- [38] ISO 5660-1:2015, Prüfungen zum Brandverhalten von Baustoffen - Wärmefreisetzungs-, Rauchentwicklungs- und Masseverlustrate - Teil 1: Wärmefreisetzungsrate (Cone Calorimeter-Verfahren) und Rauchentwicklungsrate (dynamische Messung).
- [39] L. Lowden, T. Hull, Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction, Fire Sci. Rev. 2 (2013).
- [40] DIN 4102-1:1998, Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 1: Baustoffe; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen.
- [41] M.H. Simatupang, Der Wasserbedarf bei der Herstellung zementgebundener Holzspanplatten, Holz Als Roh-Werkst. 37 (1979) 379–382.
- [42] E.Y.A. Okino, M.R. de Souza, M.A.E. Santana, M.V. da S. Alves, M.E. de Sousa, D.E. Teixeira, Cement-bonded wood particleboard with a mixture of eucalypt and rubberwood, Cem. Concr. Compos. 26 (2004) 729–734.
- [43] M. Hachmi, A.A. Moslemi, A.G. Campbell, A new technique to classify the compatibility of wood with cement, Wood Sci. Technol. 24 (1990) 345–354.
- [44] M.R. Cabral, E.Y. Nakanishi, V. dos Santos, J.H. Palacios, S. Godbout, H. Savastano Junior, J. Fiorelli, Evaluation of pre-treatment efficiency on sugarcane bagasse fibers for the production of cement composites, Arch. Civ. Mech. Eng. 18 (2018) 1092–1102.
- [45] A. Mayer, A. Kuqo, T. Koddenberg, C. Mai, Seagrass- and wood-based cement boards: A comparative study in terms of physico-mechanical and structural properties, Compos. Part Appl. Sci. Manuf. 156 (2022).
- [46] DIN EN 1156:2013, Holzwerkstoffe - Bestimmung von Zeitstandfestigkeit und Kriechzahl.

- [47] A. Kuqo, A.K. Mayer, S.O. Amiandamhen, S. Adamopoulos, C. Mai, Enhancement of physico-mechanical properties of geopolymer particleboards through the use of seagrass fibers, *Constr. Build. Mater.* 374 (2023).
- [48] A. Kuqo, C. Mai, Mechanical properties of lightweight gypsum composites comprised of seagrass *Posidonia oceanica* and pine (*Pinus sylvestris*) wood fibers, *Constr. Build. Mater.* 282 (2021).
- [49] A. Kuqo, T. Koddenberg, C. Mai, Use of dry mixing-spraying process for the production of geopolymer-bonded wood and seagrass fibreboards, *Compos. Part B Eng.* 248 (2023).
- [50] DIN 4102-2, Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Bauteile, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen.
- [51] B. Wang, E.V. Bachtar, L. Yan, B. Kasal, V. Fiore, Flax, Basalt, E-Glass FRP and Their Hybrid FRP Strengthened Wood Beams: An Experimental Study, *Polymers*. 11 (2019).
- [52] A. Wdowiak, J. Brol, Effectiveness of Reinforcing Bent Non-Uniform Pre-Stressed Glulam Beams with Basalt Fibre Reinforced Polymers Rods, *Materials*. 12 (2019).
- [53] A. Wdowiak-Postulak, Natural Fibre as Reinforcement for Vintage Wood, *Materials*. 13 (2020).
- [54] S. Kramár, T. Pipíška, P. Sťahel, B. Pijáková, M. Stupavská, A. Oberle, P. Král, J. Ráhel', Effect of plasma sizing on basalt fibers adhesion with wood-working resins, *Eur. J. Wood Wood Prod.* 79 (2021) 873–885.
- [55] T. Ozyhar, C. Tschannen, F. Hilty, H. Thoemen, J. Schoelkopf, J.O. Zoppe, Mineral-based composition with deliquescent salt as flame retardant for melamine–urea–formaldehyde (MUF)-bonded wood composites, *Wood Sci. Technol.* 55 (2021) 5–32.
- [56] H. Yilmaz Atay, Novel eco-friendly flame retardant wood composites reinforced by huntite and hydromagnesite minerals, *Wood Mater. Sci. Eng.* 17 (2022) 648–658.
- [57] T. Fei, H.-J. Yi, R. Zboray, X.-Q. Yan, S.-S. Song, L. Ren, H. Guo, Y. Jiang, Bioinspired Enzymatic Mineralization Incorporates CaCO₃ Mesocrystals in Wood for Surface Reinforcement and Flame-Retardancy, *ACS Sustain. Chem. Eng.* 10 (2022) 16118–16124.