Bericht über den Verwendungsnachweis für das N-FRICS-Projekt

Teil I (Kurzbericht)

Das Projekt „Optimierung der CO_2-Bilanz durch naturfaserverstärkte Verbundwerkstoffe auf Zementbasis für ein nachhaltiges Bauen (N-FRICS)“ zwischen Deutschland und Brasilien hatte zum Ziel, teure und energieintensive synthetische Fasern, die üblicherweise in Faserzementprodukten verwendet werden, durch nachhaltigere Naturfasern (Bambus, Eukalyptus und Flachs) zu ersetzen. Um dieses Ziel zu erreichen, konzentrierte sich das Projekt auf die Funktionalisierung der Naturfasern, um deren Kompatibilität mit der Zementmatrix sowie ihr Schwellverhalten zu verbessern.

Ein effektiver Wissens- und Verfahrenstransfer erfolgte unter anderem durch die deutschen Projektmitglieder im Rahmen einer Dienstreise nach Brasilien. Dabei wurden zwei Workshops durchgeführt sowie das Unternehmen INFIBRA und die Forschungseinrichtungen an der USP (Universidade de São Paulo) besucht. Die inhaltlichen Schwerpunkte lagen auf den aktuellen Trends und Herausforderungen der Zementindustrie sowie auf dem komplexen Produktionsprozess, die intensiv diskutiert wurden.

Im Anschluss erfolgte die Entwicklung eines Produktionsprozesses am Fraunhofer WKI mit dem das Herstellungsverfahren von Faserzementplatten nach dem aktuellen Industriestandard simuliert werden konnte. Die Herstellung im Labormaßstab erfolgt durch ein vakuumbasiertes Entwässerungssystem. Durch den verwendeten Unterdruck erfolgt eine Verdichtung der Faserverbundplatten bei einer gleichzeitigen Entwässerung.

Die zuvor an der HSB funktionalisierten Fasern konnten in dem Verfahren erfolgreich eingesetzt werden. Während der Voruntersuchungen zeigte die Modifizierung auf der Basis der Fasermineralisierung mit Calciumcarbonat ($CaCO_3$) signifikant bessere Ergebnisse hinsichtlich der physikalischen und mechanischen Eigenschaften der entwickelten Faserzementplatten. Von besonderer Bedeutung sind dabei die verbesserte Kompatibilität zwischen den mineralisierten Fasern und der Zementmatrix, die sich in einer geringeren Anzahl von Defekten (Poren) und damit besseren mechanischen Eigenschaften äußert, sowie die reduzierte Wasseraufnahme der

entwickelten Faserzementplatten auf der Basis mineralisierter Fasern, die für eine geringere Quellung bei Außenanwendungen sorgt.

Um den Prozess der Fasermineralisierung zu vereinfachen, der bislang auf einem langen und recht komplizierten chemischen Verfahren beruht, wurde im Rahmen des Projekts ein alternatives Verfahren entwickelt. Bei diesem Verfahren werden die Fasern zusammen mit einer kleinen Menge Wasser und feinen Mineralpartikeln (z. B. Zement, Kalkstein, Kalziumkarbonat) in einen Mischer verarbeitet. Dadurch lagern sich die Partikel an der Faseroberfläche an und führen zu einer vollständigen Ummantelung. Nach einigen Minuten des Mischens werden die mineralisierten Fasern mit den übrigen Bindemittelkomponenten kombiniert und in einem Verfahren ähnlich dem der herkömmlichen zementgebundenen Spanplatten verpresst. Neben der deutlichen Vereinfachung des Prozesses der Fasermineralisierung wiesen die neu entwickelten Platten im Vergleich zu den zuvor entwickelten Faserzementplatten auf der Basis mineralisierter Fasern vergleichbare mechanische Eigenschaften und bessere physikalische Eigenschaften (insbesondere eine geringere Wasseraufnahme) auf. Weitere Vorteile der neu entwickelten Platten liegen in ihrem Herstellungsprozess, der im Vergleich zu Faserzement deutlich weniger Wasser benötigt (100 ml gegenüber 10 l für eine Platte gleichen Volumens) und eine höhere Variabilität der Rohstoffe erlaubt. So können neben Zellstoff, der bei Faserzement die einzige Option ist, auch Rohfasern und Partikel verwendet werden. In Verbindung mit ihrem Potenzial für eine größere Produktionskalierung bieten diese Vorteile eine praktikable Möglichkeit für die Herstellung fester und dauerhafter mineralgebundener Platten auf der Basis von Naturfasern. Darüber hinaus erlaubt die Vorgehensweise, die dem Produktionsprozess von kommerziellen Produkten ähnelt, die Einführung in bestehende Anlagen ohne erhebliche Neuinvestitionen.

Die im Rahmen des Projekts gewonnenen Erkenntnisse belegen die Vorteile der Fasermodifizierung durch Mineralisierung, die zu einer erhöhten Beständigkeit und Festigkeit der Faserzementplatten führt. Künftige Forschungsaktivitäten werden sich auf die Optimierung des Mineralisierungsprozesses im Hinblick auf Praktikabilität, Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit konzentrieren. So könnten beispielsweise Abfälle aus der Stein- und Betonverarbeitung (Mineralstäube) in einem ähnlichen Verfahren wie dem im Rahmen dieses Projekts entwickelten, effizient als Mineralisierungsmittel für Naturfasern oder Partikel rezykliert werden.

Bericht über den Verwendungsnachweis für das N-FRICS-Projekt

Teil II

Der zweite Teil des Abschlussberichts ist in zwei Teilabschnitte gegliedert. Im ersten Teil werden die Arbeiten, die für jedes einzelne Projektarbeitspaket durchgeführt wurden, beschrieben und die wichtigsten Ergebnisse vorgestellt. Im zweiten Teil werden die neuen Partnerschaften, die während des Projekts entstanden sind, sowie die Pläne für die zukünftige Zusammenarbeit innerhalb des N-FRICS-Projektkonsortiums erörtert. Zusätzlich werden die geplanten Transfermaßnahmen bezüglich der Projektergebnisse beschrieben.

1. Arbeitspakete

Im folgenden Teilabschnitt werden die Tätigkeiten der beiden Forschungseinrichtungen in Kooperation mit der USP (Universidade de Sao Paulo, Brasilien) und den Unternehmen CSP-Technologies GmbH und JAPES GmbH anhand der beschriebenen Arbeitspakete dargestellt.

Arbeitspaket 1 – Extraktion und Funktionalisierung der Naturfasern (HSB, USP)

In AP1 erfolgte die Auswahl möglicher Naturfasern. Durch geeignete Aufschlussmethoden wurde eine Vorbereitung für den Einsatz in naturfaserverstärkten zementgebundenen Verbundwerkstoffen durchgeführt. Weiterhin wurde eine Optimierung der Fasern für den Einsatz in Verbundwerkstoffen mithilfe von Funktionalisierungen durchgeführt. Die Funktionalisierung wurde gewählt, um eine Stabilisierung der Fasern in wässriger Umgebung zu erzielen, ihre Haftung zu verbessern und dadurch letztlich die mechanischen Eigenschaften im Verbundwerkstoff zu erhöhen.

Die Auswahl der Naturfasern ist in Kooperation mit der USP und im Anschluss an einen Wissenstransfer erfolgt; hierzu diente auch die Durchführung von Workshops und der Besuch und Austausch bei INFIBRA Ltda. (Leme, Sao Paulo, Brasilien), zwischen dem 06.-17.11.2023. Dabei wurden, abweichend vom Projektantrag, eine in Europa heimische Naturfaser (Flachs) sowie zwei in Brasilien bzw. Südamerika vorkommende Faserarten (Eukalyptus und Bambus) ausgewählt. Im Auswahlprozess wurden unterschiedliche Aspekte berücksichtigt. Darüber hinaus handelt es sich bei den ausgewählten Faserarten um Faserarten, die am Markt etabliert sind und bereits industriell verwendet werden. Aus dem Diskurs mit der USP ergaben sich Sisalfasern als weitere potenzielle Option, bedingt durch das gute Eigenschaftsprofil dieser Faser. Trotz des guten Eigenschaftsprofils ist eine industrielle Anwendung aus wirtschaftlicher Perspektive aufgrund der geringen frei verfügbaren Kapazitäten nicht möglich. Im Gegensatz zur verbreiteten Anwendung von Bambus und Eukalyptus in der Bauindustrie in südamerikanischen Ländern ist die Verwendung von Flachsfasern in Europa in der Bauindustrie nicht gebräuchlich. Basierend auf dem Anbau von Ölleinflachs ergibt sich eine potenzielle Wertschöpfungskette, die eine Nutzung des Flachses aus der Ölleinproduktion für eine Anwendung im Bausektor ermöglicht.

Entsprechend der zuvor beschriebenen Anwendungsszenarien wurden Flachsfasern für eine textile Anwendung (Kardenband aus der Produktion von R-Lincore, Depestele, Frankreich) und eine Variante Ölleinflachs verwendet (Agram, Ekotex, Tschechien). Darüber hinaus wurde eine Flachspulpe für die Produktion von papierbasierten Produkten beschafft (Celta, CELULOSA DE LEVANTE, S.A., Spanien). Die Eukalyptusfasern lagen, entsprechend der Nutzung im industriellen Kontext, in Form von Pulpe für die Produktion von Papier vor. Die Extraktion der Fasern und die Weiterverarbeitung erfolgten im Sulfatverfahren entsprechend der Norm NIST 8496 (Sigma-Aldrich, Deutschland).

Die Bambusfasern wurden aus Bambus, welcher in Brasilien durch die USP angebaut wurde, gewonnen. Um einen Transport in die EU und zum WKI zu ermöglichen, erfolgte eine chemische Behandlung mit Dinatriumoctaborat-Tetrahydrat durchgeführt. Die chemische Behandlung erfolgte, um eine Kontamination durch in Bambus vorhandene Mikroorganismen zu verhindern, hatte jedoch keinen Einfluss auf die physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Bambus.Die Bambusfasern wurden anschließend mit einem atmosphärischen Refiner am Fraunhofer WKI zu Fasern (Länge unter 2 mm) verarbeitet.

In Absprache mit der USP wurden potenzielle Funktionalisierungen der Fasern definiert. Diese Vorauswahl von möglichen Funktionalisierungen umfasste die Behandlung der Faserarten durch eine Hornifizierung, eine $CaCO_3$-Behandlung, eine Merzerisierung und eine Funktionalisierung durch den Einsatz von Silanen. Diese Vorauswahl wurde aufgrund technischer und zeitlicher Rahmenbedingungen auf die Hornifizierung und die $CaCO_3$-Behandlung beschränkt.

Die Hornifizierung wurde mit 5 Nass- und Trockenzyklen durchgeführt. Im Nasszyklus wurden die zu behandelnden Fasern für 3 Stunden in ein Wasserbad mit demineralisiertem Wasser gelegt. Im anschließenden Trockenzyklus wurden die Fasern für 16 Stunden bei 60 °C getrocknet. Vor dem nächsten Nasszyklus wurden die Fasern langsam auf eine Temperatur unter 35 °C gekühlt, bevor der nächste Nasszyklus erfolgt ist.

Die $CaCO_3$-Behandlung erfolgte in dem 100 g Fasern für 30 min in 0,8 mmol/L aq. $CaCl_2$-Lösung bei 95 UPM im Mischer (Controls 65-L0502, Controls, S.p.A., Italien) gerührt. Anschließend wurde 0,8 mmol/L aq. Na_2CO_3-Lösung mit einer Geschwindigkeit von 25 ml/min über einen Zeitraum von 40 min hinzugefügt. Abschließend wurde die Suspension für 25 min gerührt, bevor die Fasern ausgesiebt und mit demineralisiertem Wasser über einen Zeitraum von 15 min ausgewaschen wurden. Die Fasern wurden bei 60 °C getrocknet. Die Eukalyptus- und Flachs-Pulpe wurde, aufgrund der erhöhten Wasseraufnahme der Fasern, im Vorfeld mit Wasser gesättigt. Die Wasseraufnahme erfolgte durch Submersion der Fasern für 3 Stunden unter ständigem Rühren.

Um den Erfolg der durchgeführten CaCO3-Behandlung zu prüfen, wurden REM- Aufnahmen (10 kV, JSM-6510, Jeol (Germany) GmbH, Schweiz) erstellt. Die Aufnahmen sind Abbildung 1 zu entnehmen. Eine kristalline Ablagerung lässt sich auf der Faseroberfläche erkennen, was mit der Annahme, dass es sich dabei um CaCO3 handelt, eine erfolgreiche Behandlung indiziert.

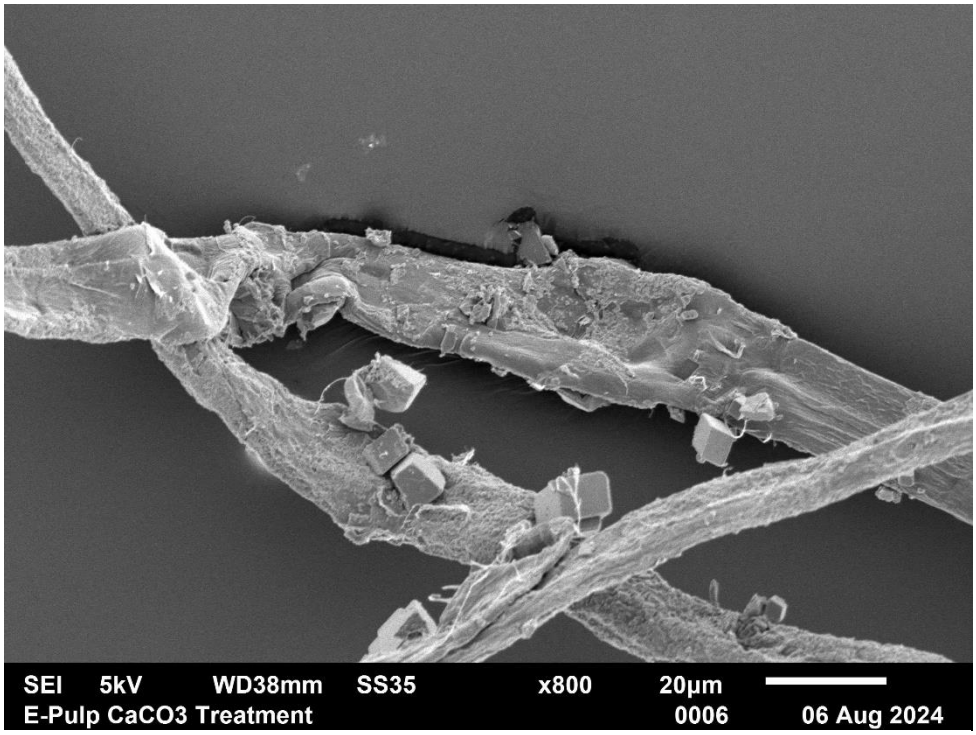


Abbildung 1 – REM-Aufnahme der mit CaCO3 funktionalisierten Eukalyptusfasern. Zu sehen sind die kristallinen Ablagerungen an der Faseroberfläche.

<u>Arbeitspaket 2 – Charakterisierung der funktionalisierten Fasern (HSB, WKI, USP)</u>

In AP2 erfolgte die Charakterisierung der Fasern hinsichtlich der morphologischen und mechanischen Eigenschaften. Darüber hinaus wurde im Rahmen des Arbeitspaketes eine Methodik zur Ermittlung der Adhäsion zwischen Faser und Matrix entwickelt und etabliert. Es erfolgte eine Charakterisierung der Adhäsion mithilfe der entwickelten Methodik und einer Faserauszugsmethode in unterschiedlichen Matrixsystemen.

Die mechanische Charakterisierung der Fasern/Faserbündel wurde anhand von Einzelelementzugversuchen vorgenommen. Aufgrund der vorliegenden Faserlängen konnten die Zugversuche nur für die Flachsfasern bzw. -bündel durchgeführt. Die Präparation erfolgte in vorgefertigten Papierrahmen, in denen die Fasern bzw. Faserbündel eingeklebt werden, sodass ein Einspannen in den Klemmen der Zugprüfmaschine (Fafegraph M, Textechno Herbert Stein GmbH, Deutschland) möglich ist (siehe: Haag, K. and Müssig, J. (2016) "Scatter in tensile properties of flax fibre bundles: influence of determination and calculation of the cross-sectional area," Journal of Materials Science, 51(17), pp. 7907-7917). Nach der Präparation erfolgt eine Vermessung der Fasern bzw. -bündel anhand von Scans mit der Software ImageJ (1.53T, Wayne Rasband and contributors National Institutes of Health, USA). Entsprechend der Norm DIN EN ISO (291) wurde eine Klimatisierung der Fasern vor dem Testen vorgenommen (20 °C / 65 % RH). Eine Auswertung der Zugversuche erfolgt anhand des E-Moduls, der Zugfestigkeit, der Bruchdehnung und der Fläche der Fasern/Faserbündel. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 2 zusammenfassend dargestellt. Die beiden Funktionalisierungen der Faser ergeben eine Steigerung der Zugfestigkeit und der Steifigkeit der Faser. Zusätzlich erfolgt eine Verringerung der Bruchdehnung. Die Steifigkeit der $CaCO_3$-

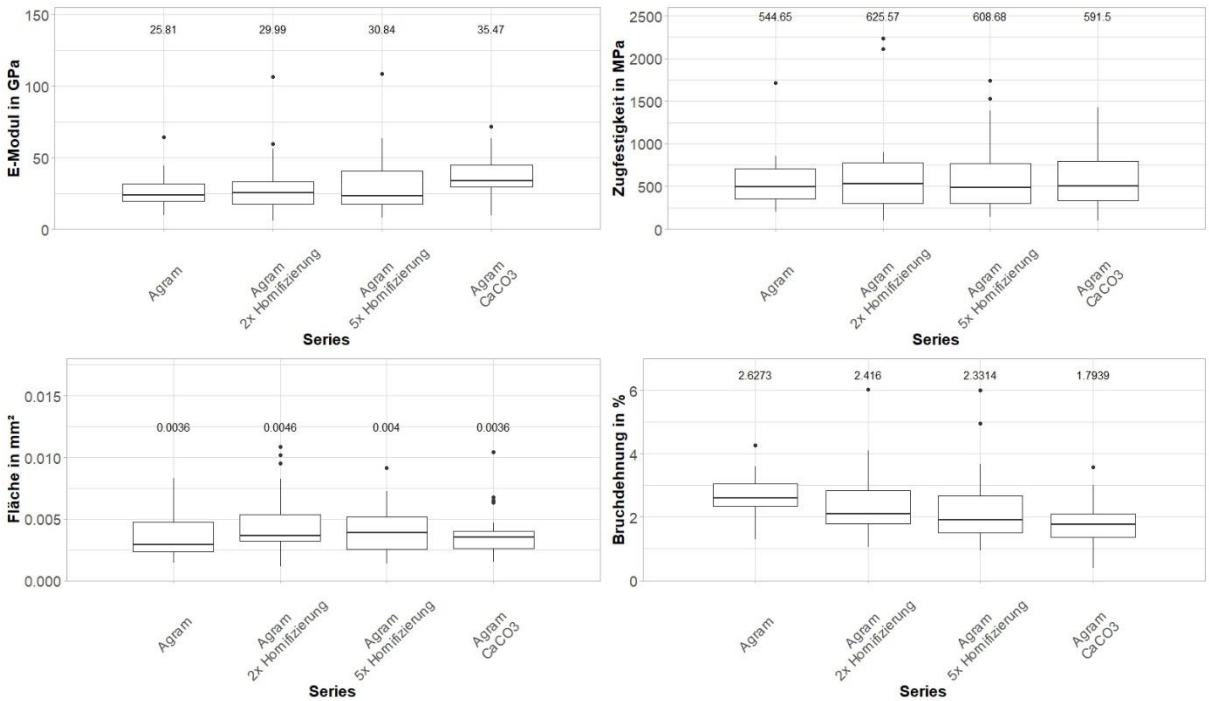


Abbildung 2 – Vergleich der Fasereigenschaften der funktionalisierten Flachsfaserbündel.

behandelten Fasern bzw. -bündel ist signifikant erhöht und die Bruchdehnung signifikant verringert. Die Erhöhungen der Steifigkeiten und Verringerung der Bruchdehnung durch die Hornifizierung sind statistisch nicht signifikant. Die Veränderung der Zugfestigkeiten ist statistisch nicht signifikant. Insbesondere durch die Funktionalisierung der Fasern mit $CaCO_3$ konnte eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften erzielt werden.

Die Morphologie und Wasseraufnahme von unmodifizierten und mit Calciumcarbonat modifizierten Fasern wurden am Fraunhofer WKI untersucht, um die Wirksamkeit der Modifizierung zu bewerten (Abbildung 3).

Zur Analyse wurde ein Faseranalysator (Valmet FS5, Valmet, Espoo, Finnland) eingesetzt, mit dem die morphologischen Eigenschaften von Fasern (d.h. Faserlänge und -breite) in einem wasserdispergierten Zustand bestimmt werden können. Dies ermöglicht einen realistischen Einblick in den morphologischen Zustand der Fasern während der Herstellung von Faserzement, da die Fasern ebenfalls in Wasser dispergiert werden, bevor sie mit der Zementmischung vermischt und zu Faserzementplatten weiterverarbeitet werden. Pro Probentyp wurden durchschnittlich etwa zwei Millionen einzelne Fasern gemessen.

Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl die Länge als auch die Breite der Fasern nach der Modifizierung mit Calciumcarbonat zugenommen haben, was ein Beweis dafür ist, dass sich das Calciumcarbonat in der Molekülstruktur abgelagert hat. Das bedeutet, dass feine Calciumcarbonatpartikel in die Zellwände der Fasern eindringen können, was aufgrund des zusätzlichen Molekülvolumens zu einer allgemeinen Volumenvergrößerung der Fasern führt. Würde sich Calciumcarbonat nur auf der Oberfläche der Fasern ablagern, wäre keine Volumenvergrößerung zu erwarten.

Eine Herausforderung im Arbeitspaket stellte die Charakterisierung der Grenzschicht dar. In der Literatur können im Wesentlichen zwei Arten von Verfahren unterschieden werden.

Ein Verfahren zur Bestimmung der Adhäsion ist der optische Vergleich der Bruchflächen mithilfe von REM-Aufnahmen. Dabei erfolgt die Betrachtung des Faserauszugs nach einer vorherigen mechanischen Prüfung des Verbundwerkstoffs. Vergleichend kann eine Charakterisierung der Anbindung zwischen Matrix und Faser durchgeführt werden. Bei schlechterer Adhäsion zwischen Faser und Matrix liegt ein Spalt vor; durch die schlechtere Bindung und den damit verbundenen Spalt zwischen Faser und Matrix resultiert eine schlechtere Kraftübertragung von der Matrix auf die Faser. Darüber hinaus kann eine Betrachtung der einzelnen, durch das Bruchereignis herausgezogenen Fasern erfolgen. Dabei können sowohl die Länge der herausgezogenen Fasern als auch Rückstände der Matrix einen Aufschluss über die Adhäsion zwischen Faser und Matrix geben. Die 3 betrachteten Charakteristika ermöglichen es, einen qualitativen Eindruck über die Adhäsion zu gewinnen.

Weiterhin sind in der Literatur verschiedene Verfahren zur Messung der Auszugskraft von verstärkenden Elementen in einer zementhaltigen Matrix beschrieben. Es werden verschiedene Probengeometrien (Auszugslänge, Größe und Form der Matrix) für unterschiedliche Arten von Verstärkungselementen definiert. Das grundlegende Funktionsprinzip ist das 1-dimensionale Herausziehen des Verstärkungselements in einem Zugversuch. Das Verstärkungselement wird dafür in eine Zementmatrix mit einer definierten Länge eingebettet. Anhand der auftretenden Kraft beim erfolgten Auszug und der definierten

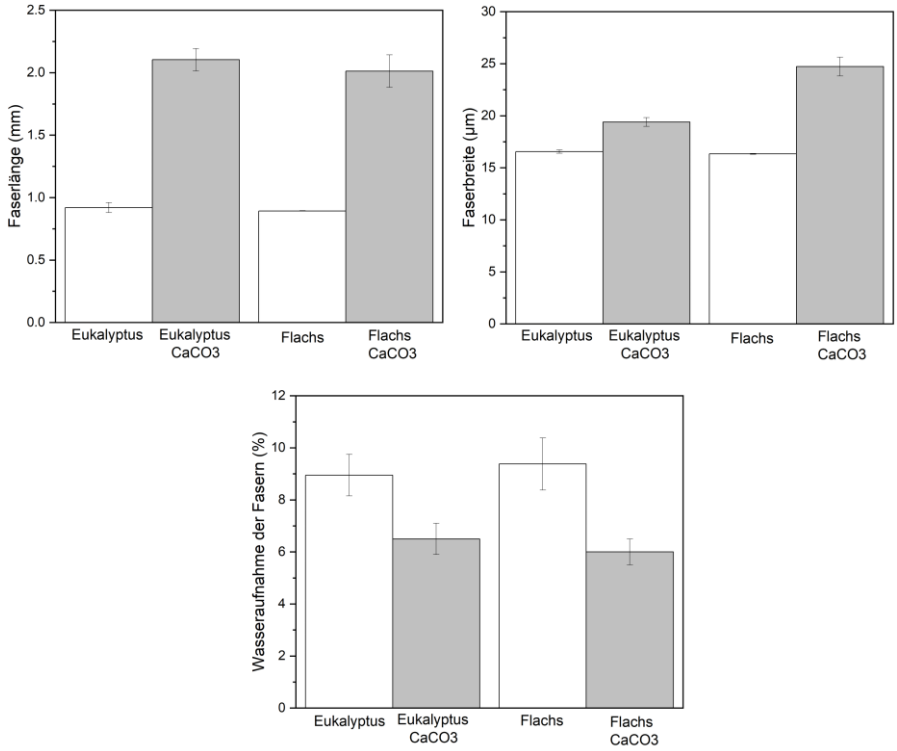


Abbildung 3 – Fasermorphologie (Länge und Breite) und Wasseraufnahme.

eingeschlossenen Oberfläche kann die interlaminare Scherfestigkeit errechnet werden. Dieses Verfahren findet im großen Maßstab für Stahlbeton oder im kleineren Maßstab für die Verstärkung mit textilen Garnen oder Fasern Verwendung. Dabei liegt der Fokus der Anwendung auf der Nutzung von synthetischen Fasern und Stahlfasern. Die Problematik dieser Methode besteht in ihrer eingeschränkten Anwendbarkeit auf Naturfasern. Üblicherweise liegen in Zementverbundwerkstoffen verarbeitete Naturfasern, die vor allem für

eine bessere Prozessierbarkeit eingesetzt werden, in kurzen Faserlängen vor. Dadurch wird die Einbettung der Fasern bei der genannten Prüfmethode sehr schwer oder gar unmöglich.

Anhand der interlaminaren Scherfestigkeit kann durch Berechnung die kritische Länge ermittelt werden. Diese ist abhängig von den mechanischen Eigenschaften der Faser, der Adhäsion zwischen Faser und Matrix und ist als minimale Länge für eine verstärkende Wirkung der Faser ausschlaggebend für die Festigkeit des Verbundwerkstoffes. Weiterhin besteht ein Verfahren zur Bestimmung der kritischen Länge mithilfe eines Faserauszugsverfahrens (siehe: Larson, B., Lawrence, K., Drzal, T. and Sorousian, P. (1990) "Carbon fibre-cement adhesion in carbon fibre reinforced cement composites." Composites, 21.3, 205-215). Dabei wurden Kohlenstofffasern auf der einen Seite in eine Epoxidharz-Matrix eingebettet. Auf der anderen Seite wurden die Kohlenstofffasern auf unterschiedliche Längen in definierten Abstufungen geschnitten und in eine Zementmatrix eingebettet. Im anschließenden Zugversuch erfolgte ein Auszug der Fasern bis zur kritischen Länge. Die Fasern, die eine längere Einbettlänge als die kritische Länge der Fasern aufwiesen, versagen im Zugversuch, sodass die kritische Länge als die größtmögliche herausgezogene Faserlänge definiert werden kann. Die Verwendung dieser Methode ist aufgrund der Inhomogenität der Naturfasern nicht möglich. Da die Methode in direkter Abhängigkeit von der Zugfestigkeit der Fasern steht und diese in Korrelation mit der Festigkeit der Grenzfläche steht, wird durch den unterschiedlichen Faserquerschnitt und die abweichenden mechanischen Eigenschaften die kritische Länge beeinflusst. Durch die Inhomogenität von Naturfasern müsste eine hohe Anzahl an Proben getestet werden, bedingt durch die hohe Variabilität der einzelnen Faser. Darüber hinaus kann ein Versagen einer potentiell beschädigten oder minderwertigen Faser bei einer vor Erreichen der tatsächlichen kritischen Länge ggf. nicht ausgeschlossen werden. Zusätzlich stellt die Präparation von Proben aus bspw. Eukalyptusfasern mit geringer Faserlänge (durchschnittlich 0,6 bis 0,8 mm) eine Herausforderung dar.

Angelehnt an die zuvor beschriebenen Methoden zur vergleichenden Bestimmung der Adhäsion mittels bildgebender Verfahren, wurde ein neues Verfahren zur Bestimmung der Adhäsion von Naturfasern in zementbasierten Werkstoffen erarbeitet. Dabei erfolgt die Betrachtung der erzeugten Bruchflächen nach einer mechanischen Prüfung von faserverstärkten Verbundwerkstoffen mit anorganischer Matrix. Von der Bruchfläche wurden Aufnahmen mit einem Mikroskop gemacht (Science ADL 601 P, Bresser GmbH, Deutschland). Dabei wurden durch die Einstellung der verschiedenen Fokusebenen und Beleuchtungen die herausgezogenen Fasern vom Ursprung, an der Bruchfläche, bis zum Ende der Faser aufgenommen. Die Fasern konnten so in der Länge und Breite vermessen werden. Die Faserlänge und Breite geben gleichzeitig Aufschluss über die Haftung und die Morphologie der herausgezogenen Fasern. Die entwickelte Methode hat den Vorteil, dass sie an ohnehin notwendige mechanische Testverfahren anknüpft und damit die Herstellung zusätzlicher Proben überflüssig macht. Darüber hinaus kommt das Verfahren ohne weitere Zerstörung aus, sodass weitere bildgebende Verfahren oder alternative Analysemethoden an der Bruchfläche umgesetzt werden können.

Im Rahmen des Projekts wurden 3 verschiedene Verfahren zur Charakterisierung der Grenzfläche eingesetzt: (1) die zuvor beschriebene Methode (Mikroskopie-Methode), (2) die Betrachtung der Bruchflächen mittels REM-Aufnahmen und (3) das Faserauszugsverfahren.

Für die Mikroskopie-Methode wurden Vielzweckprüfkörper angelehnt an den Typ 1A entsprechend der Norm DIN EN ISO 527 hergestellt. Diese wurden im Zugversuch getestet.

Zusätzlich wurden Proben, welche im Rahmen von AP4 bzw. AP6 hergestellt und im Biegeversuch getestet wurden, auf ihre Haftung untersucht. Die Ergebnisse lassen sich den Abbildungen 4-6 entnehmen.

Die Haftungswerte der Agram-Varianten mit den unterschiedlichen Funktionalisierungen sind nicht signifikant voneinander unterschiedlich. Die Auszugslängen sind signifikant länger im Vergleich zu den Auszugslängen der textilen Flachsvariante (Kardenband; R-Lincore). Zwischen den unterschiedlichen Matrixsystemen in Kombination mit der textilen Flachsfaser-Variante besteht kein statistisch nachweisbarer Unterschied. Die mittlere gemessene Auszugslänge erscheint für die Variante mit dem Zement-Kalkstein-Gemisch im Trend höher als die der anderen Matrixvarianten. Auffallend ist, dass die Auszugslängen der textilen Flachsvariante deutlich geringer ausfallen, als die der Ölleinflachsvariante. Die Verbesserung der Haftung kann in der höheren Feinheit der textilen Flachsfaser begründet sein. Zusätzlich könnten Behandlungen im Rahmen der Herstellung des Kardenbands zu einer Verbesserung der Haftung beitragen. Der potenzielle Einfluss dieser Behandlungen sollte zukünftig genauer untersucht und gegebenenfalls bei der Bestimmung der Haftung berücksichtigt werden.

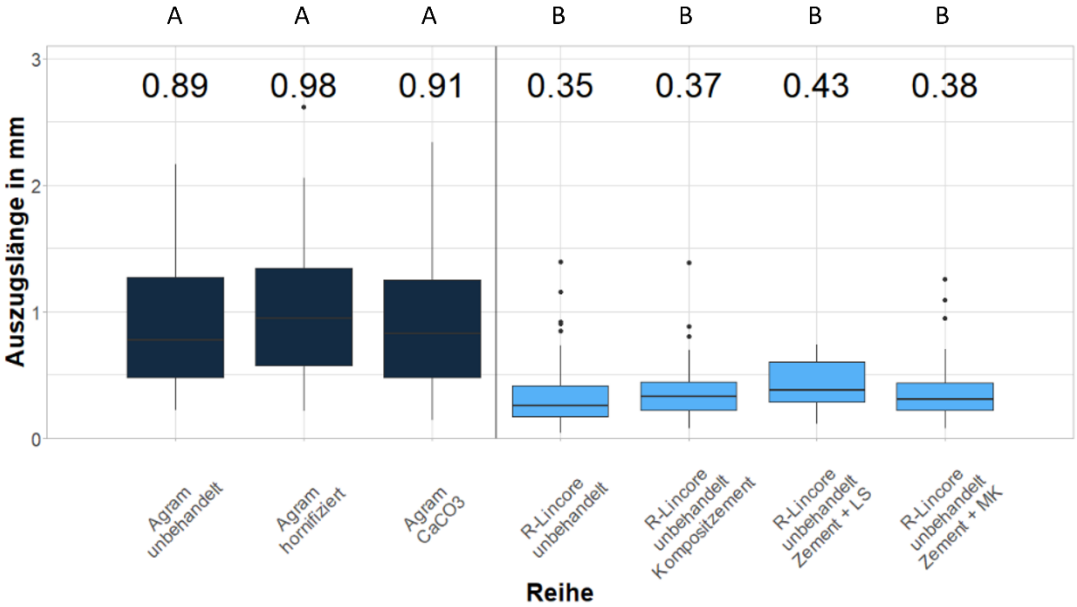
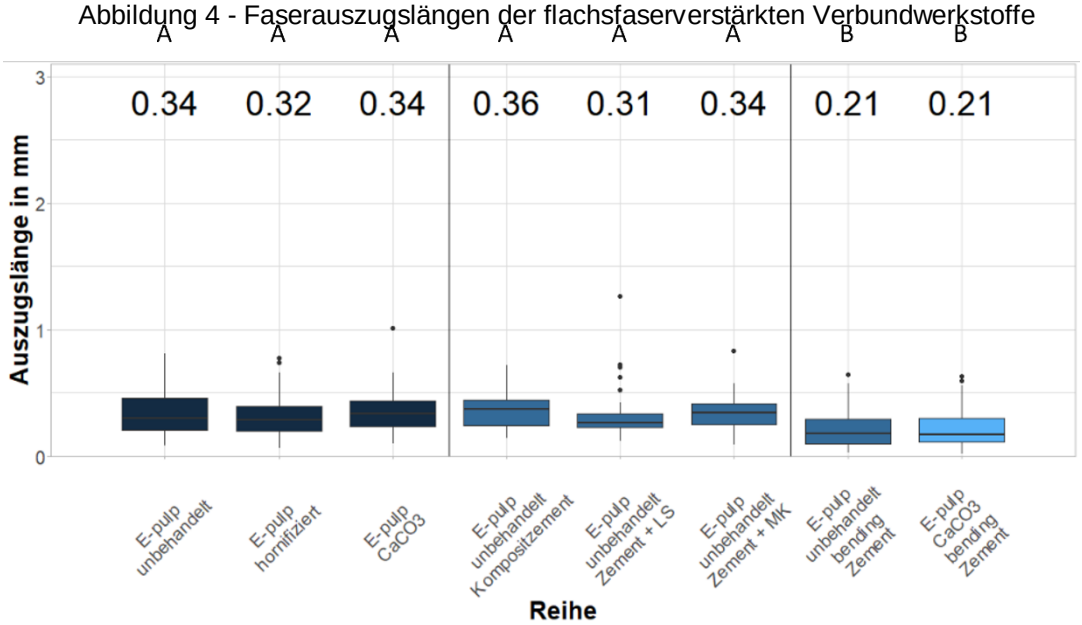


Abbildung 4 - Faserauszugslängen der flachsfaserverstärkten Verbundwerkstoffe



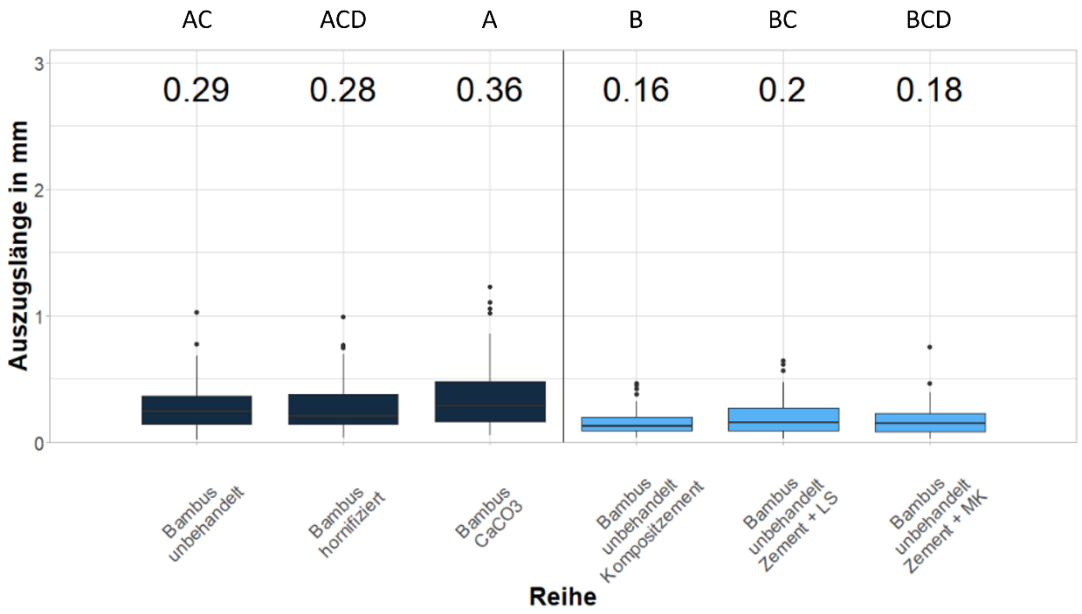


Abbildung 6 - Faserauszugslängen der bambusfaserverstärkten Verbundwerkstoffe.

Die Auszugslängen der Zugproben weisen keine signifikanten Unterschiede auf. Die Proben der Matrixzusammensetzung aus Zement und Kalkstein zeigen die niedrigsten Auszugslängen und damit verbunden die beste Haftung auf. Die Biegeproben, welche im Rahmen von AP4 hergestellt wurden, weisen geringere Auszugslängen auf als die im Zugversuch getesteten Proben. Zwischen den $CaCO_3$-funktionalisierten und den unbehandelten Proben lässt sich kein Unterschied feststellen. Die bessere Haftung in den Proben für den Biegeversuch im Vergleich zu den für den Zugversuch hergestellten Proben lässt sich auf die Herstellungsmethode zurückführen. Durch den Entzug von Wasser und die Applizierung eines Vakuums wird bei den Proben für den Biegeversuch eine höhere Packungsdichte erzielt. Die erhöhte Packungsdichte führt vermutlich zu einer verbesserten Haftung im Vergleich zu den Proben, die ohne die Applizierung eines Vakuums hergestellt und somit weniger verdichtet werden konnten.

In Abbildung 5 sind die Auszugslängen für die bambusfaserverstärkten Proben dargestellt. Es besteht kein statistisch nachweisbarer Unterschied zwischen den unterschiedlichen Funktionalisierungen. Die verschiedenen Matrixkompositionen weisen eine verbesserte Haftung auf als die funktionalisierten und unbehandelten Fasern mit der reinen Zementmatrix. Dabei weist die Kompositzement-Matrix die geringsten Faserauszugslängen auf, gefolgt von der Matrix, bestehend aus Zement und Metakaolin. Die Matrixvariante, bestehend aus Zement und Kalkstein, weist die höchsten Auszugslängen auf. Die Haftung für die entsprechende Variante ist geringer im Vergleich zu den anderen Matrixvarianten. Dieselbe Abstufung der Auszugslängen ist beim textilen Flachs wiederzufinden. Dabei ist die Variante hergestellt mit dem Kompositzement leicht geringer im Vergleich zur Variante mit dem Metakaolin, während die Variante bestehend aus Zement und Kalkstein eine schlechtere Haftung aufweist.

Für den Faserauszugsversuch wurden Flachsfaserbündel präpariert und in einer speziellen Form wurde die Zementmatrix um die Faserbündel appliziert, sodass sich eine Einbettlänge von 5 mm ergab. Die Faserbündel wurden gescannt und anschließend vermessen, um die Ummantelungsfläche der Faser zu bestimmen. Die Proben wurden im Faserauszugsversuch, (Z020 Universalprüfmaschine, Zwick/Roell GmbH, Deutschland), mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min, einer Einspannlänge von 10 mm und einer Kraftmessdose

von 5 N getestet. Die Matrix wurde auf einer Scherplatte platziert und die Faserbündel in manuellen Klemmbacken eingespannt. Die Grenzflächenscherfestigkeit wurde entsprechend der folgenden Gleichung berechnet. Die Ergebnisse lassen sich aus der Abbildung 7 entnehmen.

$$\tau = \frac{F_{MAX}}{5\pi r^2}$$

Die errechnete Grenzflächen-Scherfestigkeit entspricht den aus den Faserauszugslängen ableitbaren Ergebnissen. Die Ölleinflachsvariante weist eine schlechtere Haftung im Vergleich zur textilen Flachsvariante auf. Dabei bedingt die Hornifizierung die schlechteste Scherfestigkeit respektive die größeren Auszugslängen. Durch die Verwendung der textilen

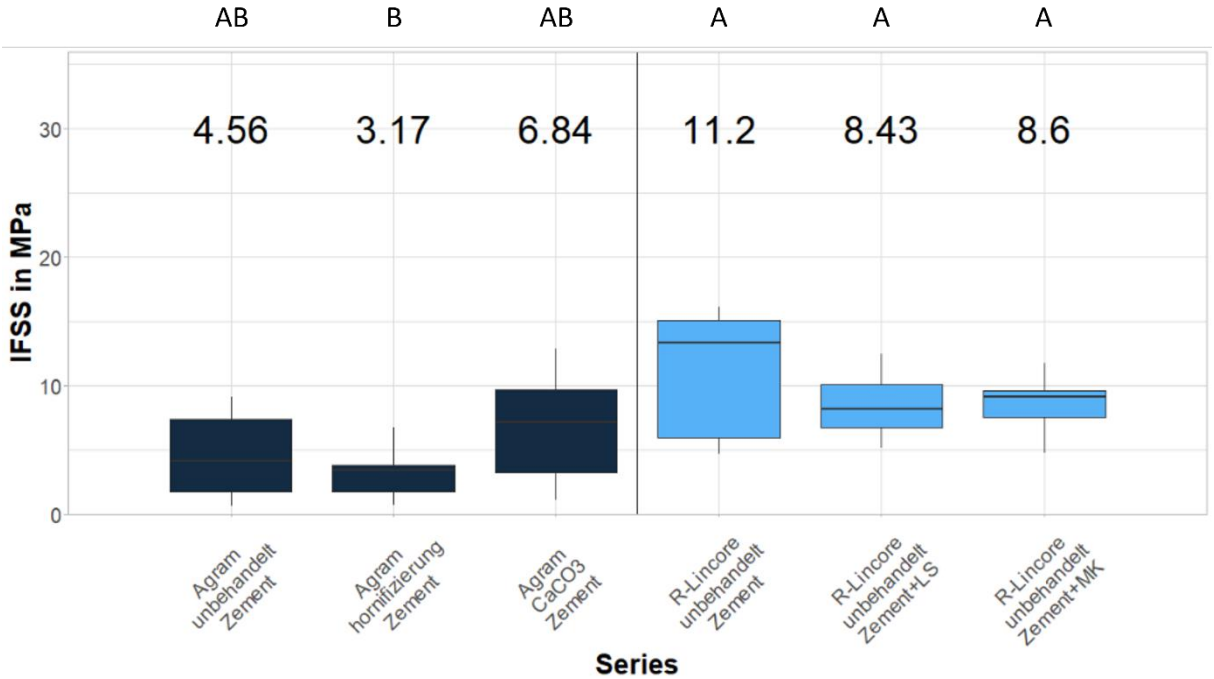


Abbildung 7 - Scherflächenfestigkeit der flachsfaserverstärkten Verbundwerkstoffe.

Flachsvariante kann die Haftung signifikant gesteigert werden. Die Varianten mit den textilen Flachsfasern und den unterschiedlichen Matrixsystemen weisen eine deutlich verbesserte Haftung im Vergleich zu den Varianten mit dem Ölleinflachs auf. Der signifikante Unterschied zwischen den unbehandelten Flachsfasern (der Ölleinflachsvariante und der textilen Faser) ist möglicherweise auf die höhere Feinheit der Faser zurückzuführen. Dabei bedingt eine höhere Feinheit eine größere Oberfläche in Relation zum Querschnitt, was aufgrund der verbesserten Bindungsmöglichkeiten und eine verbesserte Lastübertragung von der Faser auf die Matrix sorgt.

<u>Arbeitspaket 3 - Modifikation der Zementmatrix (WKI, USP)</u>

Zusätzlich zum im Zwischenbericht beschriebenen Metakaolin wurde ein alternativer CEM II-Zementtyp mit Flugasche und Silikastaub getestet (in AP2 als Kompositzement bezeichnet). Aufgrund des hohen Gehalts an puzzolanischen Bestandteilen wurde eine Reduzierung der Alkalität der Matrix erwartet, was potenziell vorteilhaft für die Stabilität von Naturfasern in der Faserzementmatrix ist. Die Modifizierung der Matrix zeigte jedoch keine signifikanten positiven Effekte auf die physikalischen und mechanischen Eigenschaften der hergestellten Faserzementplatten. Abbildung 8 zeigt dies exemplarisch für Platten mit Eukalyptusfasern;

vergleichbare Ergebnisse wurden auch für andere Fasertypen erzielt. Besonders auffällig war, dass die Wasseraufnahme der Platten unabhängig von der Matrixzusammensetzung nahezu unverändert blieb. Daher bieten diese alternativen Matrizes keine zusätzlichen Vorteile für die Dauerhaftigkeit von Faserzementplatten im Außenbereich. Die Ergebnisse stimmen mit den Faserauszugsversuchen (AP2) überein, bei denen kein signifikanter Unterschied zwischen den verschiedenen Matrixsystemen festgestellt wurde.

Nach den wenig erfolgreichen Versuchen mit geänderten Matrixkompositionen entwickelten die Projektpartner von WKI und USP gemeinsam mit neuen Kooperationspartnern der LUH alternative Strategien zur Effizienzsteigerung von Naturfasern in anorganischen Bindemittelsystemen. In ersten Experimenten wurde ein neuer Ansatz zur Herstellung faserverstärkter Zementverbundwerkstoffe erprobt, bei dem die Fasermodifizierung direkt in den Produktionsprozess integriert ist. Dabei blieben die eingesetzten Rohstoffe unverändert, jedoch ließen sich die Ressourcen- und Kosteneffizienz sowie die Gesamtflexibilität der biobasierten Verstärkungsfasern deutlich verbessern.

Da dieser neue Ansatz nicht direkt im Rahmen der Matrixmodifizierung (AP3) entwickelt wurde, wurde ein neues Arbeitspaket (AP6) mit dem Titel „Alternatives Verfahren zur Herstellung von mineralgebundenen Platten mit integrierter Fasermineralisierung“ in das Projekt aufgenommen. Die Details zum Verfahren sowie die Eigenschaften der resultierenden

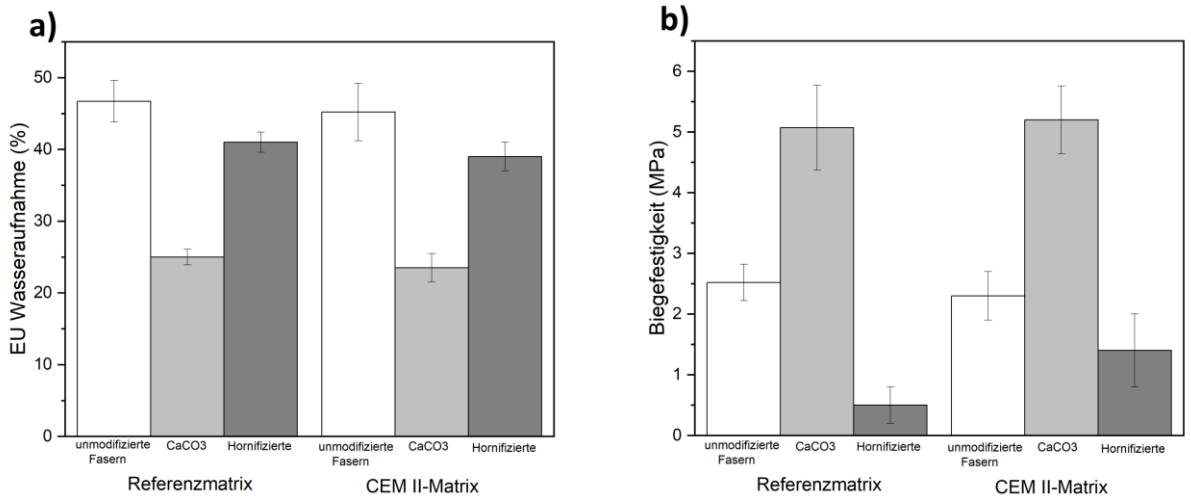


Abbildung 8 - (a) Wasseraufnahme und (b) Biegefestigkeit von wassergesättigten Proben von Faserzementproben aus unterschiedlich behandelten Eukalyptusfasern und Matrixformulierungen

Platten werden daher im Abschnitt AP6 erläutert.

<u>Arbeitspaket 4 – Herstellung von Verbundwerkstoffen und Entwicklung von Optimierungsansätzen (WKI, HSB, CSP/JAPES, USP)</u>

Zur besseren technischen Vorbereitung und zum Sammeln praktischer Erfahrungen für die Faserzementplattenproduktion am Fraunhofer WKI wurde ein Besuch bei INFIBRA (Leme, Sao Paulo, Brasilien), einem der größten Faserzementhersteller Brasiliens, organisiert. Während einer ausführlichen Werksbesichtigung wurden alle relevanten Produktionsschritte und Anlagen vorgestellt und diskutiert. Im Anschluss fand ein fachlicher Austausch zwischen N-FRICS-Projektmitgliedern und Infibra-Vertretern statt, bei dem insbesondere die Verfahrenstechnik, Prozessspezifikationen und produktspezifischen Anforderungen für den brasilianischen und deutschen Markt durch CSP-Technologies und Infibra präsentiert wurden.

Die dabei gewonnenen Erkenntnisse zeigten, dass die technischen Anforderungen für eine effiziente Plattenherstellung im Projektantrag unterschätzt worden waren. Das zunächst verwendete manuelle Entwässerungssystem – wie im Zwischenbericht beschrieben – konnte keine Faserzementplatten in ausreichender Qualität liefern. Hauptproblem war die zu geringe Entwässerungsrate der Zementaufschlämmung: Für eine anschließende Heißpressung muss etwa 80 % des Wassers entfernt werden, um eine Verformung der Platten zu verhindern. Um die notwendige Entwässerungsrate zu erreichen, wurde ein völlig neues System entwickelt und aufgebaut. Dieses neue System, das gemeinsam von WKI, CSP und USP konzipiert wurde, basiert auf einer vakuumunterstützten Entwässerung, mit der über 90 % des Wassers entfernt werden kann (Abbildung 9). Die Planung und Umsetzung der Anlage wurden durch mehrere Vor-Ort-Besprechungen mit CSP am Fraunhofer WKI begleitet und unterstützt.

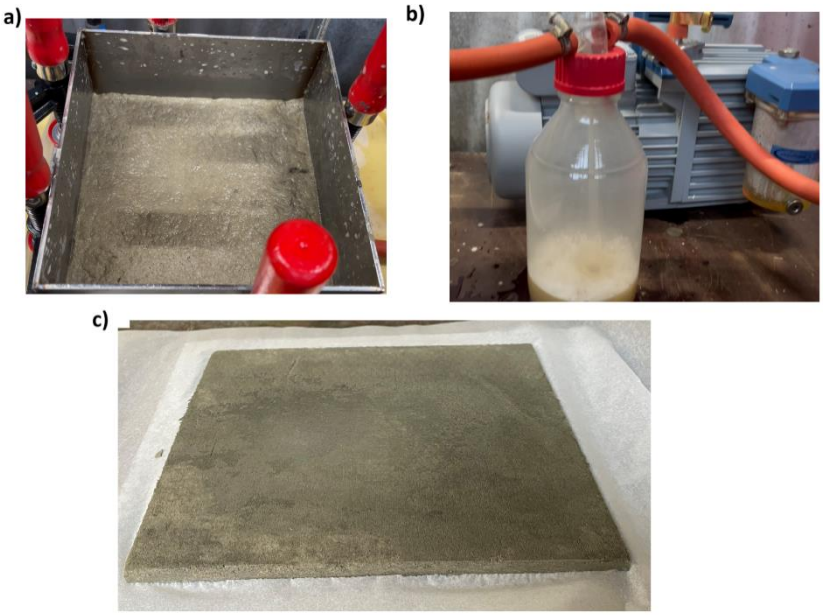


Abbildung 9 - Das entwickelte System zur Herstellung von Faserzementplatten. a) Die Plattenkammer, in die die Faserzementmasse auf ein 1 mm Sieb gegossen wird; b) Eine Glasflasche zum Auffangen von Wasser, die auf der einen Seite mit der Faserzementschlammkammer und auf der anderen Seite mit einer Vakuumpumpe verbunden ist; c) Die Faserzementplatte nach Entwässerung (vor dem Pressen).

Mit dem neuen Entwässerungssystem – ohne Berücksichtigung der zuvor gefertigten Platten minderer Qualität – wurden insgesamt 80 Faserzementplatten (250 × 250 × 5 mm^3) hergestellt. Diese wurden anschließend zu Biegeproben zugeschnitten, um physikalische und mechanische Prüfungen durchzuführen. Insgesamt wurden 220 Proben auf Dichte, Wasseraufnahme und Vierpunktbiegefestigkeit getestet. Für die Bestimmung der Porosität mittels Computertomographie wurden aufgrund des hohen Aufwands nur wenige repräsentative Proben untersucht.

Flachs- und Eukalyptusfasern zeigten in Faserzement eine gute Leistungsfähigkeit, während Bambusfasern – unabhängig von der Art der Modifizierung – eine geringe Kompatibilität mit der Zementmatrix aufwiesen. Während der Plattenherstellung mit Bambus wurde eine stark verzögerte Aushärtung der Zementschlämme beobachtet, was zu unzureichender Festigkeit der Platten führte. Dies wird vermutlich durch den hohen Zuckergehalt in Bambusfasern verursacht, der die Zementhydration hemmt (siehe: Kochova, K., et al. (2017) "Effect of

saccharides on the hydration of ordinary Portland cement." Construction and Building Materials 150, 268-275). Die angewandten Modifizierungsverfahren konnten das Auslaugen der Zuckerstoffe nicht verhindern. Deutlich bessere Ergebnisse zeigten jedoch Platten, die mit dem in AP6 beschriebenen alternativen Herstellungsverfahren produziert wurden, da dieses Verfahren ohne feuchte Zementschlämme auskommt und somit die Zuckerfreisetzung reduziert – weitere Details dazu sind in AP6 erläutert.

Auch Platten aus hornifizierten Fasern zeigten sehr schlechte mechanische Eigenschaften (siehe Abbildung 7, AP3). Da jedoch bei der Einzelprüfung dieser Fasern (AP2) keine negativen Effekte auf ihre mechanischen Eigenschaften festgestellt wurden, deutet dies auf eine geringere Kompatibilität der hornifizierten Fasern mit der Zementmatrix hin. Im Gegensatz dazu führte die Calciumcarbonat-Behandlung, welche eine Mineralisierung der Fasern bewirkt, zu deutlichen Verbesserungen der physikalischen und mechanischen Eigenschaften der Platten. Faserzementplatten mit mineralisierten Fasern wiesen eine höhere Trockendichte auf als Referenzplatten – sowohl mit als auch ohne handelsübliche Polypropylen-(PP)-Fasern als Verstärkung (Abbildung 10).

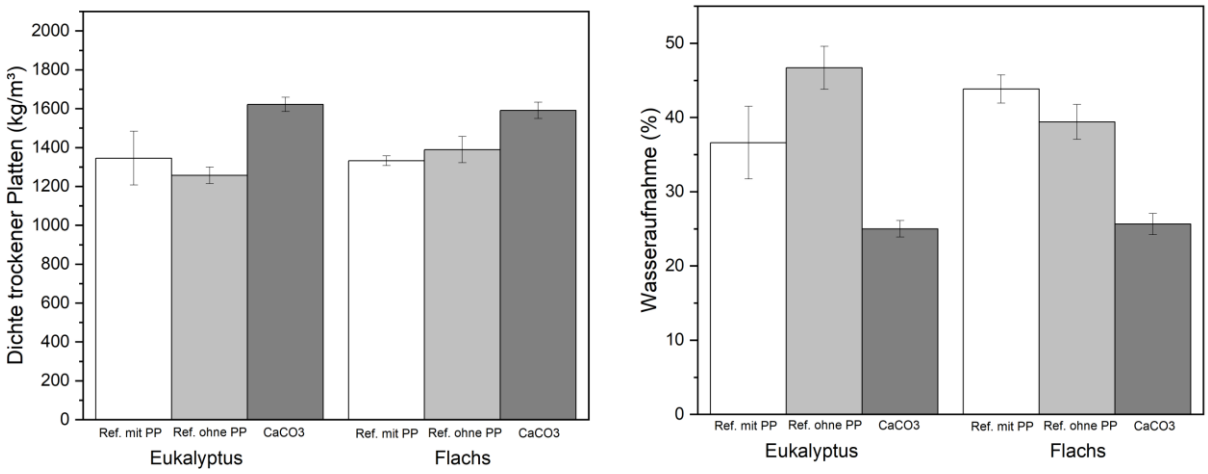


Abbildung 10 - Dichte und Wasseraufnahme von Faserzementplatten auf Basis von Referenz- und mineralisierten Naturfasern.

Dies bedeutet eine bessere Packungsdichte (d. h. eine bessere physikalische Verbindung) zwischen mineralisierten Fasern und Zementmatrix. Zusätzlich zur erhöhten Plattendichte ist auch die Wasseraufnahme von Faserzementplatten auf Basis mineralisierter Fasern deutlich reduziert. Die verringerte Wasseraufnahme ist wahrscheinlich eine Kombination aus 1) einer verringerten Wasseraufnahme der mineralisierten Fasern (wie in Abbildung 3 zu sehen) und 2) einer verringerten Porosität der Zementmatrix, die sich aus der erhöhten Plattendichte ergibt.

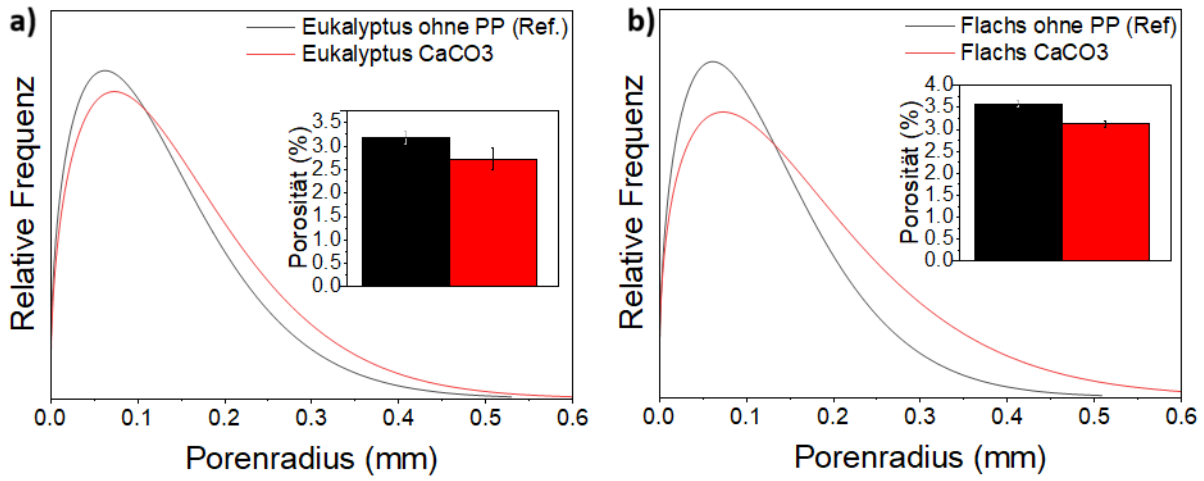


Abbildung 11 – Porengrößenverteilung von Faserzemetnplatten auf Basis von a) Eualyptus- und b) Flachsfasern. Die eingefügten Grafiken zeigen die Unterschiede in der Gesamtporosität.

Um die zweite Annahme zu überprüfen, wurde die Mikroporosität der Zementmatrix mit einem Röntgen-Computertomographiesystem gemessen. Für jeden Probentyp wurden vier Proben gescannt, wobei jeweils etwa 400 000 Poren erkannt wurden. Bei beiden Fasertypen wurden Unterschiede in der Porengrößenverteilung festgestellt. Vor allem die Faserzementplatten auf Basis mineralisierter Fasern weisen im Vergleich zu Faserzement auf Basis unbehandelter Fasern eine geringere Anzahl kleinerer Poren (Radius < 1,5 mm) und eine höhere Anzahl größerer Poren (Radius 0,15 – 0,5 mm) auf (Abbildung 11). In Bezug auf die Gesamtporosität weisen Faserzementplatten auf Basis mineralisierter Fasern eine geringere Gesamtporosität auf, was mit der in Abbildung 10 beobachteten höheren Dichte übereinstimmt und ein weiterer Indikator für eine bessere Kompatibilität zwischen mineralisierten Fasern und der Zementmatrix ist. Es ist möglich, dass die insgesamt geringere Porosität (15–20 % geringer im Vergleich zu Faserzement auf Basis unbehandelter Fasern) auf die geringere Anzahl von Poren um die mineralisierten Fasern in der Zementmatrix zurückzuführen ist. Die Quellung der Naturfasern aufgrund der Ablagerung von Calciumcarbonat in ihrer Struktur (siehe Abbildung 3) reduziert voraussichtlich ihre Quellung in Wasser während der Faserzementherstellung und das anschließende Schrumpfen während der Trocknung der Platten. Dadurch bleiben die mineralisierten Fasern formstabiler und die physikalische Verbindung mit der Zementmatrix bleibt erhalten.

Wie erwartet führten die verbesserte Packungsdichte und die geringere Wasseraufnahme zu einer deutlichen Verbesserung der mechanischen Eigenschaften der Faserzementplatten, sowohl im trockenen als auch im wassergesättigten Zustand. Die erhöhte Festigkeit und Steifigkeit der Platten mit mineralisierten Fasern sind in Abbildung 12 (a–d) gut erkennbar. Gleichzeitig zeigen diese Proben eine geringere Duktilität auf, feststellbar anhand der Darstellung in Abbildung 12 e) und f).

Die reduzierte Duktilität lässt sich vermutlich auf zwei Faktoren zurückführen: 1) die höhere Dichte der Matrix, die zwar die Festigkeit erhöht, aber typischerweise die Verformbarkeit einschränkt, und 2) die Mineralisierung der Fasern, die deren natürliche Sprödigkeit leicht verstärkt (Abbildung 2). Da Faserzementprodukte überwiegend in nichttragenden Anwendungen eingesetzt werden, stellt die geringere Duktilität kein wesentliches Problem dar. Sie sollte jedoch bei potenziellen alternativen Anwendungen mineralisierter Fasern berücksichtigt werden. Zusammenfassend zeigt die Fasermineralisierung eine signifikante

Verbesserung der Kompatibilität zwischen Naturfasern und der anorganischen Zementmatrix. Dies äußert sich in einer erhöhten Dichte und Festigkeit sowie einer deutlich reduzierten Wasseraufnahme der Faserzementplatten. Für eine breitere industrielle Umsetzung sollte jedoch die Entwicklung einfacherer und kostengünstigerer Behandlungsverfahren weiterverfolgt werden, wie in den Abschnitten AP5 und AP6 diskutiert.

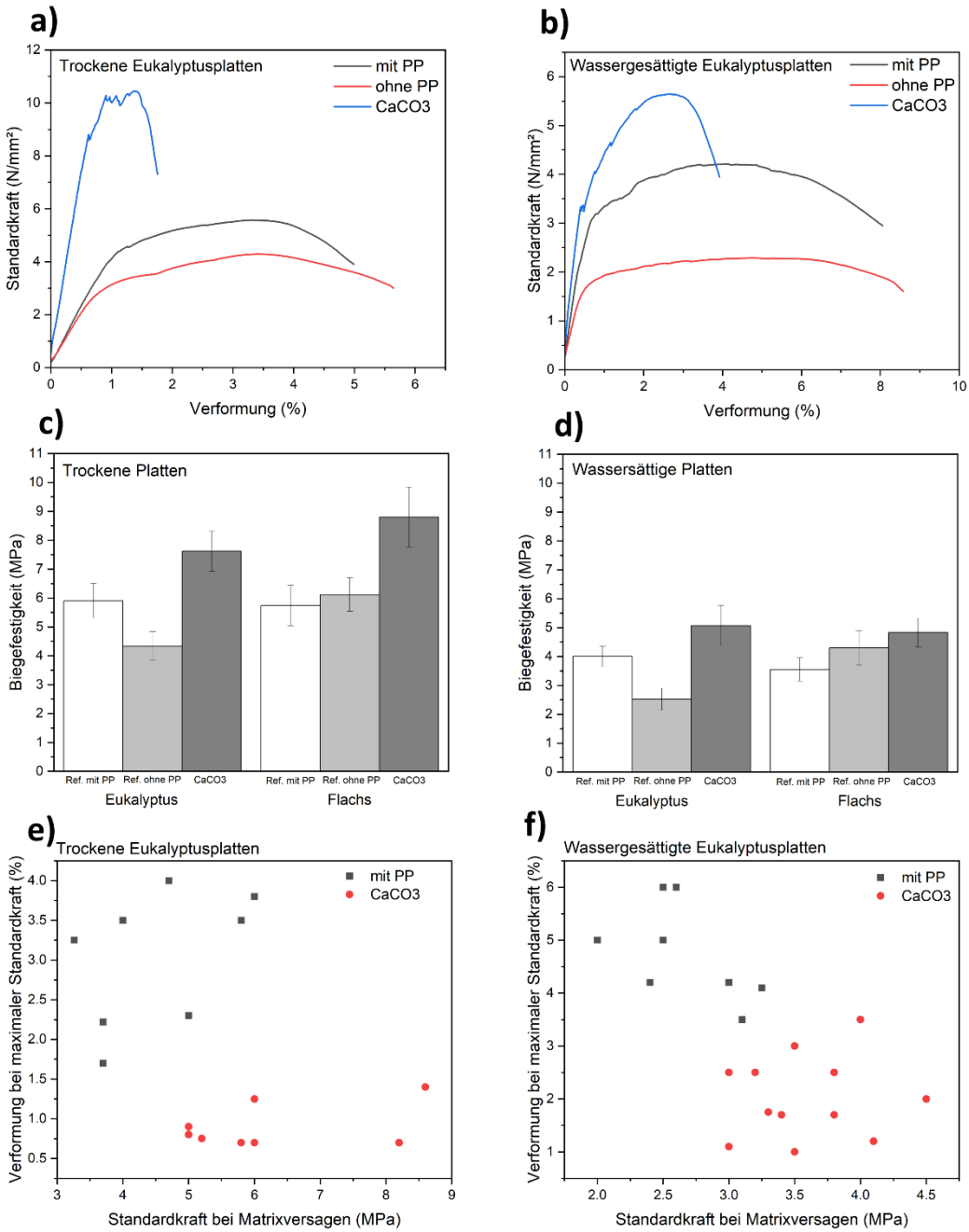


Abbildung 12 – Mechanische Eigenschaften der Faserzementplatten auf Basis mineralisierter Fasern. a) und b) zeigen Spannungs-Dehnungs-Kurven für Faserzementplatten im trockenen und wassergesättigten Zustand. c) und d) zeigen die Biegefestigkeit von Faserzementplatten im trockenen und wassergesättigten Zustand. e) und f) zeigen die Duktilität, ausgedrückt als Funktion der Standardkraft bei Matrixversagen gegenüber der Verformung bei maximaler Standkraft, von trockenen und wassergesättigten Proben. Die Unterabbildungen a, b, e und f zeigen nur Daten für Eukalyptus, da die Daten für Flachs sehr ähnliche Trends aufweisen.

Arbeitspaket 5 – Validierung der Lösungen im industriellen Maßstab (CSP/JAPES, IMBRALIT; WKI, USP)

Das Hauptziel des AP5 war es, die industrielle Skalierbarkeit der Produktion neuer Faserzementplatten unter Verwendung modifizierter Fasern zu bewerten. Der Schwerpunkt lag auf der Entwicklung von Konzepten zur Integration des Modifizierungsprozesses in den Faserzement-Produktionsprozess und der Abschätzung, ob dies wirtschaftlich vorteilhaft wäre. Um die gesamte Produktionslinie bei IMBRALIT und Infibra, zwei großen Herstellern von Faserzementprodukten, besser zu verstehen, reisten die CSP-Projektpartner nach Brasilien, um die Details des Produktionsprozesses zu besprechen und mögliche Änderungen zu identifizieren, die zu technischen und wirtschaftlichen Vorteilen führen könnten (siehe Abschnitt 2). Außerdem fanden mehrere Treffen am Fraunhofer WKI statt, um sicherzustellen, dass der im kleinen Maßstab am Fraunhofer WKI entwickelte Prozess skalierbar ist und die Anforderungen der Großserienfertigung erfüllt. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Entwicklung von Faserzement in kleinem Maßstab (AP4) wurde beschlossen, dass sich AP5 ausschließlich auf $CaCO_3$-modifizierte Eukalyptusfasern (kommerzielle Fasern für Faserzement in Brasilien) konzentrieren sollte, da andere Fasermodifizierungsverfahren keine Vorteile brachten, die mit aktuellen Produkten mit synthetischen Polypropylenfasern konkurrieren könnten. Für Flachs und andere für Europa relevante Naturfasern können die für Eukalyptus entwickelten Prinzipien angewendet werden, da sich die Verarbeitungsanlagen und -parameter nicht je nach Fasertyp ändern.

Um zu demonstrieren, wie der Modifizierungsprozess für Naturfasern in der bestehenden Produktionsanlage von Infibra umgesetzt werden könnte, erstellte CSP Flowsheets, die die zusätzlich erforderliche technische Ausrüstung für die Anlage und deren optimale Integration in den aktuellen Produktionsprozess zeigen. Insbesondere sind zusätzliche Anlagenfläche und finanzielle Investitionen für die zur Umsetzung der Fasermineralisierung erforderlichen Mischer, Siebe, Zwischenbunker und Förderbänder erforderlich. Das bestehende Flow-Sheet für die Anlage und ein Flow-Sheet, in dem das neue Anlagenkonzept dargestellt ist, sind als Anhang am Ende dieses Dokuments beigefügt.

Zusätzlich zu den erforderlichen Investitionen und Anlagenanpassungen war es das Ziel von AP5, zu bewerten, ob die Faserzementplatten auf Basis modifizierter Naturfasern wirtschaftlich mit den kommerziellen Faserzementplatten auf Basis synthetischer Polypropylenfasern konkurrieren können. Die Tabellen 1 und 2 zeigen die Unterschiede zwischen den derzeit von Infibra und Imbralit verwendeten Faserzementformulierungen und den neu vorgeschlagenen Formulierungen auf Basis modifizierter Eukalyptusfasern. Die Kosten wurden von den brasilianischen Industrieprojektpartnern bereitgestellt.

Tabelle 1 – Preise und gravimetrische Anteile der Materialien in kommerziellen Faserzementformulierungen in Brasilien.

Material	Preise	Anteile	Preis für 1 Tonne Faserzement
Zement	95 € / t	70%	66,50 €
Kalksteinmehl	35 € / t	20%	7,00 €
Zellstof aus Eukalyptus	530 € / t	9%	47,70 €
Polypropylen (PP)	2970 € / t	1%	29,70 €
			Totalpreis: 150,90 €

Aus den obigen Tabellen geht hervor, dass die neue Komposition etwa 7 % teurer ist als die derzeit verwendete. Mit anderen Worten: Die Menge der für die Faser-Mineralisierung verwendeten Chemikalien ist höher als der Preis für Polypropylenfasern. Es ist möglich, dass die Menge der Chemikalien, die in diesem Projekt zur Mineralisierung der Fasern verwendet wurden, unter Beibehaltung der Vorteile erheblich reduziert werden kann, da die Konzentration der Chemikalien in den Lösungen relativ hoch war. Dies würde dazu führen, dass der neue Ansatz gegenüber dem bestehenden wirtschaftlich wettbewerbsfähiger wäre. Es sollten auch neue, kostengünstigere Ansätze für die Fasermineralisierung in Betracht gezogen werden. Ein solcher Ansatz wird im folgenden AP6 vorgestellt.

Tabelle 2 – Preise und gravimetrische Anteile der Materialien für die neu entwickelten Faserzementprodukte auf Basis mineralisierter Fasern. Calciumchlorid und Natriumcarbonat sind Chemikalien, die für die Faser-Mineralisierungsbehandlung benötigt werden.

Material	Preise	Anteile	Preis für 1 Tonne Faserzement
Zement	95 € / t	70%	66,50 €
Kalksteinmehl	35 € / t	20%	7,00 €
Zellstof aus Eukalyptus	530 € / t	10%	53,00 €
Calciumchlorid	210 € / t	/	18,90 €
Natriumcarbonat	195 € / t	/	16,58 €
			Totalpreis: 161,98 €

*900 kg Calciumchlorid und 850 kg Natriumcarbonat werden benötigt, um 1000 kg Eukalyptuszellstoff zu modifizieren.

Arbeitspaket 6 – Alternatives Verfahren zur Herstellung von mineralgebundenen Platten mit integrierter Fasermineralisierung

Die Mineralisierung der Fasern hat ein erhebliches Potenzial zur Verbesserung der Kompatibilität zwischen Flachs- und Eukalyptusfasern und der Zementmatrix gezeigt, was sich in deutlich verbesserten physikalischen und mechanischen Eigenschaften des entwickelten Faserzements widerspiegelt. Allerdings ist der in AP1 beschriebene Mineralisierungsprozess relativ komplex und schwer in industrielle Prozesse zu integrieren. Aus diesem Grund wurde AP6 in das Projekt einbezogen, um praktischere und einfacher umsetzbare Methoden zur Modifizierung natürlicher Fasern unter Beibehaltung hoher Leistungsfähigkeit zu entwickeln.

Nach Versuchen mit verschiedenen Verarbeitungsparametern wurde ein Verfahren entwickelt, bei dem Naturfasern in einem industriellen Mischer mit Zement, einer geringen Menge Wasser und einem Zementabbindebeschleuniger vermischt werden. Bereits nach wenigen Minuten sind die Fasern mit einer feinen Zementschicht überzogen (Abbildung), die während der späteren Plattenherstellung die Haftung an der Zementmatrix verbessert. Im Gegensatz zur in AP1 und AP2 beschriebenen Mineralisierung durch Calciumcarbonat-Ablagerung in der Fasermolekülstruktur basiert dieses Verfahren auf der mechanischen Fixierung von feinen Zementpartikeln an der Faseroberfläche. Dabei dient das Wasser als Haftvermittler, während der Härter dafür sorgt, dass der Zement dauerhaft an den Fasern haftet. Die Hauptvorteile dieses Ansatzes liegen in der Zeit- und Kosteneffizienz: Der Prozess dauert nur wenige Minuten und kommt ohne den Einsatz teurer Chemikalien aus.

Abbildung 13 – Naturfasern nach dem entwickelten Mischverfahren

Nach der Fasermineralisierung werden die behandelten Fasern mit den restlichen Bindemittelkomponenten (Zement und Kalkstein) vermischt, zu einer Platte vorgeformt und anschließend gepresst. Dieser Herstellungsprozess unterscheidet sich grundlegend vom herkömmlichen Faserzementverfahren, bei dem alle Komponenten mit einer sehr großen Menge Wasser (etwa das Fünffache der Rohstoffmenge) zu einer Aufschlämmung vermischt und durch Entwässerung geformt werden. Der neue Ansatz reduziert den Wasserverbrauch drastisch (nur ca. 100 ml im Vergleich zu rund 10 Litern im Standardverfahren) und ermöglicht den Einsatz einer größeren Bandbreite an Biomasse.

Da die Naturfasern vor der Verarbeitung nicht vollständig in Wasser dispergiert werden müssen, können potenziell auch Rohholzfasern oder -partikel verwendet werden, die bislang ungeeignet waren. Zudem umgeht das Verfahren ein zentrales Problem bei der Verwendung zuckerhaltiger Fasern wie Bambus: Die Zucker gelangen nicht in Lösung und beeinträchtigen somit die Zementhydratation nicht. Wie in gezeigt, wirken sich diese Zucker im neuen Verfahren nicht negativ auf die mechanischen Eigenschaften der Platten aus, im Gegensatz zu den Ergebnissen aus der klassischen Faserzementproduktion.

Ein Vergleich der Eigenschaften der alternativ hergestellten Faserplatten mit den zuvor analysierten Faserzementplatten (AP4) zeigt, dass die Biegefestigkeit im wassergesättigten Zustand vergleichbar ist, während die Wasseraufnahme bei den alternativen Platten geringer ist (Abbildung 15). Dies zeigt, dass die neu entwickelten Faserplatten gegenüber klassischen Faserzementplatten nicht nur konkurrenzfähig sind, sondern auch zusätzliche Vorteile

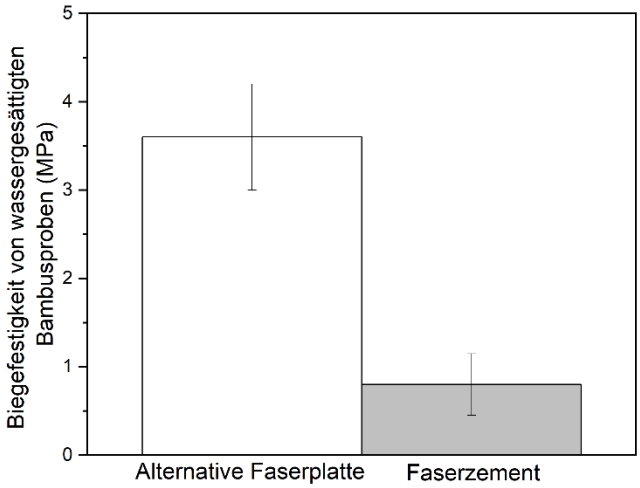


Abbildung 14 - Biegefestigkeit von wassergesättigten Bambusfaserplatten und Faserzement.

aufweisen: eine einfachere und kostengünstigere Fasermineralisierung, eine höhere Ressourceneffizienz (insbesondere durch deutlich geringeren Wasserverbrauch) sowie eine größere Flexibilität bei den eingesetzten Rohstoffen (z. B. Rohfasern, Partikel oder Hackschnitzel statt Zellstofffasern). Insgesamt wurden 30 alternative Platten hergestellt und 20 Proben je Plattentyp geprüft. Weitere Pläne zur Skalierung und Optimierung des Verfahrens werden im folgenden Kapitel erläutert.

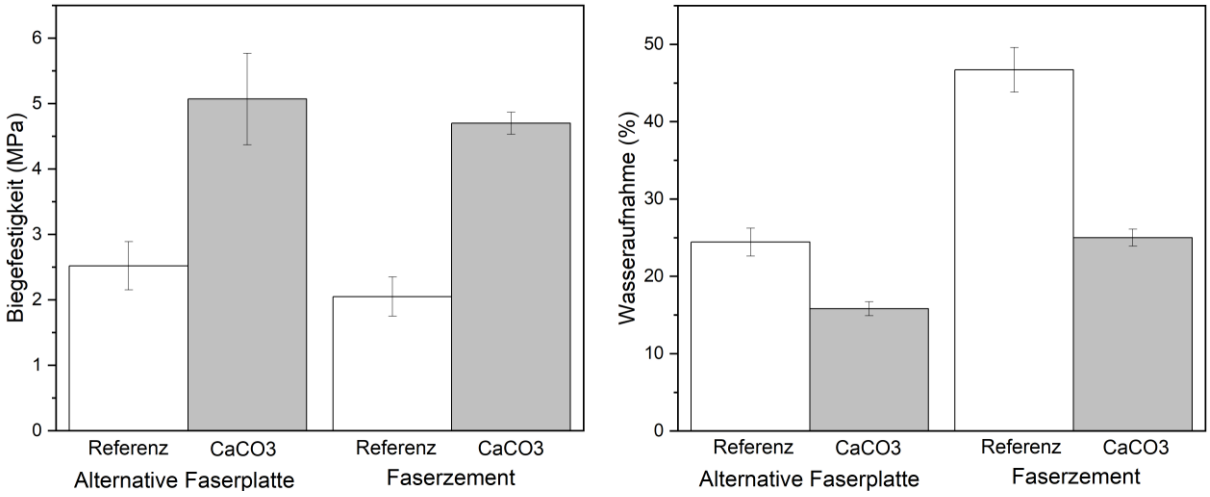


Abbildung 15 - Biegefestigkeit (wassergesättigte Proben) und Wasseraufnahme von alternativen Faserplatten und Faserzement im Fall von Eukalyptusfasern.

2. Projektergebnisse und Zukunftsperspektiven

2.1. Kooperation und Wissenstransfer in Brasilien

Um die Zusammenarbeit mit den brasilianischen Partnern zu stärken und neue Experten auf dem Gebiet des Faserzements kennenzulernen, wurde im November 2023 eine Reise nach Brasilien organisiert. Die Projektpartner vom Fraunhofer WKI, der Hochschule Bremen – HSB – und CSP-Technologies nahmen an der Reise teil. Tagespauschalen, Transport, Unterkunft und Konferenzkosten wurden von der Projektförderung für alle deutschen Projektmitglieder übernommen. Im Rahmen der Reise wurde ein Wissenstransfer und -Austausch zwischen den beteiligten deutschen und brasilianischen Forschungseinrichtungen, sowie den deutschen und brasilianischen Unternehmen angestrebt. Diesbezüglich erfolgte die Teilnahme an der Fachkonferenz „NOCMAT 2023: The International Conference on Non-conventional Materials and Technologies“, darüber hinaus wurden mehrere Workshops organisiert und durchgeführt („Low-Carbon, Lightweight Cement-Based Panel Technologies for Modular Construction“ Low-Carb Light-Cem (LC)²“ und ein Workshop an der USP). Zusätzlich erfolgte der Besuch des Unternehmens INFIBRA mit einer Werksführung und einem offenen Diskurs über die Trends und Notwendigkeiten im brasilianischen Bausektor. Im Anschluss an Transferveranstaltungen hat Herr Behrens (HSB) eine weitere Woche im Labor an der USP mitgearbeitet und die dortigen Verfahren kennengelernt. Der Verbleib von Herrn Behrens an der USP hat maßgeblich zur Entwicklung der beschriebenen Methodik zur Charakterisierung der Haftung und der Etablierung der Faserauszugsmethode beigetragen (s. Abschlussbericht Teil 3).

2.2 Zusammenarbeit mit der Bausal GmbH

Im Rahmen des Projekts nahm das Fraunhofer WKI Kontakt zur Bausal GmbH auf, einem der führenden europäischen Anbieter und Entwickler von zementgebundenen Spanplatten. Bausal plant, die erste Produktionsstätte für zementgebundene Spanplatten in der Region São Paulo, Brasilien, zu errichten, um den brasilianischen Wohnungsbaumarkt zu erschließen. Da sich die in Deutschland und Brasilien verfügbaren Holzarten deutlich unterscheiden, sind Forschungs- und Entwicklungsarbeiten notwendig, um die Produkte an die lokalen Rohstoffe anzupassen. Das Fraunhofer WKI übernimmt hierbei die Aufgabe, geeignete brasilianische Holzarten für die Herstellung von zementgebundenen Spanplatten zu identifizieren und zu optimieren. Ein besonderer Fokus liegt auf der Wasseraufnahme und dem Gehalt an wasserlöslichen Zuckern, die in vielen brasilianischen Holzarten enthalten sind und die Zementbindung negativ beeinflussen können. Die in den Arbeitspaketen AP4 und AP6 erarbeiteten Projektergebnisse bilden die Grundlage für diese Entwicklungsarbeit.

2.3 Zusammenarbeit mit CETRIS und BNB

CETRIS mit Sitz in Tschechien ist einer der führenden Hersteller von zementgebundenen Spanplatten in Europa. Für ein neues, speziell für den Außenbereich entwickeltes Produkt besteht die Notwendigkeit, Maßänderungen (z. B. Quellen) infolge wechselnder relativer Luftfeuchtigkeit und Niederschlag zu minimieren. Um dieses Ziel zu erreichen, wird CETRIS in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer WKI das in AP6 beschriebene Verfahren zur Fasermineralisierung weiterentwickeln und an industrielle Bedingungen anpassen. Der Fokus liegt auf der Verwendung kostengünstiger, mineralischer Reststoffe zur Fasermodifikation, um sowohl die Produktionskosten zu senken als auch die Nachhaltigkeit des Gesamtprozesses zu erhöhen. In diesem Kontext wurde auch das Unternehmen BNB (Potsdam, Deutschland) als Partner eingebunden. BNB ist auf Produkte auf Betonbasis spezialisiert und übernimmt die Aufgabe, Holzpartikel im industriellen Maßstab unter Einsatz von feinem Mineralstaub aus der Betonverarbeitung zu mineralisieren. Die so behandelten Partikel sollen anschließend von CETRIS für die Plattenherstellung genutzt werden. Ein detaillierter Projektplan befindet sich derzeit in der Abstimmung. Nach dessen Finalisierung wird ein gemeinsamer Projektantrag ausgearbeitet und zur Förderung im Rahmen der Initiative IraSME eingereicht.

2.4 Zusammenarbeit mit der Leibniz Universität Hannover

Während des Projekts wurde Herr Christian Reck von der Leibniz Universität Hannover (LUH) aufgrund seiner ausgewiesenen Expertise im Bereich mineralischer Bindemittel in das Projektkonsortium aufgenommen. Sein Fachwissen trug maßgeblich zu den im Rahmen von AP4 und AP6 erzielten Projektergebnissen bei. Derzeit werden zwei, gemeinsam vom Fraunhofer WKI und der LUH entwickelte Forschungsideen in enger Abstimmung mit weiteren Partnern aus Deutschland zu einem Forschungsprojektantrag ausgearbeitet, der zeitnah eingereicht werden soll.

2.5 Zusammenarbeit mit der ETH Zürich

Das Institut für Baustoffe der ETH Zürich befasst sich derzeit mit der Entwicklung innovativer mineralischer Bindemittel für den Einsatz in mineralisch gebundenen Verbundwerkstoffen aus Naturfasern und Holz. Aufgrund ähnlicher Interessen bereiten die ETH und das Fraunhofer WKI derzeit einen Forschungsantrag vor, bei dem die ETH für die Entwicklung alternativer mineralischer Bindemittel und das Fraunhofer WKI für die Verbundentwicklung und -optimierung verantwortlich ist. Das entwickelte System zur Herstellung von Faserzementplatten sowie das entwickelte Verfahren zur Mineralisierung der Fasern sind

wichtige Aspekte der Projektarbeit im Zusammenhang mit den Arbeitspaketen des Fraunhofer WKI.

2.6 Weitere Zusammenarbeit innerhalb des Projektkonsortiums

Im Rahmen der N-FRICS-Projektaktivitäten haben die Projektpartner aus Deutschland und Brasilien aktiv neue Kooperationsmöglichkeiten identifiziert, um die Projektergebnisse strategisch weiterzuentwickeln.

Im Jahr 2024 wurde ein Projektentwurf bei der Förderinitiative Bioeconomy International 2025 eingereicht. Die Projektidee basiert teilweise auf den im N-FRICS-Projekt erzielten Fortschritten bei der Entwicklung mineralisch gebundener Bambusverbundwerkstoffe und verfolgt das Ziel, die Kompatibilität zwischen Bambusfasern und mineralischen Matrizen weiter zu optimieren. Die Skizze (Stufe 1) wurde im Juli 2025 erfolgreich begutachtet; aktuell befindet sich der offizielle Antrag (Stufe 2) in Begutachtung.

Darüber hinaus wurde ein Projektantrag im Rahmen der FAPESP/Fraunhofer Seed Funding-Initiative eingereicht. Im Falle einer Förderzusage ermöglicht das Programm den Projektpartnern der Universität São Paulo und des Fraunhofer WKI, über einen Zeitraum von zwei Jahren gemeinsame Forschungsaktivitäten und wissenschaftliche Austauschformate durchzuführen. Ziel ist es, die Zusammenarbeit weiter zu intensivieren und neue strategische Kooperationsrichtungen zu definieren. Im Fokus des Antrags steht die Entwicklung innovativer mineralisch gebundener Holz- und Naturfaserverbundwerkstoffe mit einem besonderen Augenmerk auf die Leistungsfähigkeit und die Nachhaltigkeit. Zusätzlich bereitet derzeit ein brasilianischer Postdoktorand der Universität São Paulo einen Antrag auf ein CAPES-Humboldt-Forschungsstipendium vor. Eine Bewilligung würde ihm einen bis zu zweijährigen Forschungsaufenthalt am Fraunhofer WKI ermöglichen, mit dem Ziel, seine wissenschaftliche Laufbahn im Bereich mineralisch gebundener Holzwerkstoffe weiter auszubauen.

Veröffentlichung der Projektergebnisse

Eine Open-Access-Publikation auf Grundlage der Projektergebnisse aus AP1, AP2 und AP4 wird derzeit vorbereitet und soll bei einem begutachteten Journal (Q1) eingereicht werden. Sobald ergänzende Daten zu AP6 im Rahmen der laufenden deutsch-brasilianischen Zusammenarbeit vorliegen, ist die Vorbereitung einer weiteren wissenschaftlichen Publikation geplant.

Geplantes Promotionsverfahren

Aus dem Projekt heraus entstand ein Kontakt zwischen der Hochschule Bremen und Prof. Dr. Carsten Mai (Abteilung Holzbiologie und Holzprodukte, Georg-August-Universität Göttingen). Auf der Basis dieses Austausches soll eine kooperative Promotion zum Thema Naturfasern in anorganischen Matrixsystemen zwischen der HSB und der Universität Göttingen hervorgehen.

Bericht über den Verwendungsnachweis für das N-FRICS-Projekt

Teil III

1. Wissenschaftlich-technische Ergebnis des Vorhabens, die erreichten Nebenergebnisse und die gesammelten wesentlichen Erfahrungen

1.1. Mineralisierung von Naturfasern

Von allen untersuchten Verfahren zur Modifizierung von Naturfasern ist die Fasermineralisierung, bei der eine hohe Menge feiner Kalziumpartikel in der Fasermikrostruktur abgelagert wird, am erfolgversprechendsten. Die mineralisierten Fasern weisen insbesondere eine geringere Wasseraufnahme und eine deutlich verbesserte Kompatibilität mit der Zementmatrix auf, was sich in einer geringeren Porosität der Zementmatrix und verbesserten mechanischen Eigenschaften des Faserzements zeigt. Während die Funktionalisierung mithilfe von mineralischen Substanzen bereits in der Vergangenheit zur Verbesserung der Feuerbeständigkeit von Holz und Naturfasern untersucht wurde, konnte nun erstmals nachgewiesen werden, dass die Mineralisierung von Biomasse deren Anwendungspotenzial in mineralisch gebundenen Verbundwerkstoffen deutlich verbessern kann. Von besonderem Interesse sind hier die erhöhte Dimensionsstabilität und die geringere Wasseraufnahme von Faserzementplatten auf der Basis mineralisierter Fasern, wodurch neue Einsatzgebiet im Außenbereich erschlossen werden bzw. die Einsatzmöglichkeiten erweitert werden (z. B. Fassadenplatten).

1.2. Herstellung von Faserzementplatten im Labormaßstab

Die industrielle Herstellung von Faserzementprodukten basiert auf dem sogenannten Hatschek-Verfahren, die Komplexität des Verfahrens erschwert eine Umsetzung im Labormaßstab. Um die Produktionsparameter aus der industriellen Praxis erfolgreich simulieren zu können, wurde am Fraunhofer WKI eine Anlage zur Herstellung von Faserzementplatten entwickelt und gebaut. Während der Planungs- und Fertigungsphase wurde durch den engen Austausch mit Industriepartnern aus Brasilien sichergestellt, dass die am Fraunhofer WKI entwickelten Faserzementplatten repräsentativ für die in Unternehmen wie Imbralit und Infibra hergestellten Platten sind. Das neue System ermöglicht die Untersuchung neuer Variationen in der Faser- und Matrixsystem (z. B. Verwendung modifizierter Fasern) und Verarbeitungsparameter ohne hohe Investitionen und ist zudem zeiteffizient. In diesem Zusammenhang wurde die technische Wettbewerbsfähigkeit des Fraunhofer WKI im Laufe des Projekts weiter verbessert, und das entwickelte System wird in zukünftigen Projekten weiter genutzt werden.

1.3. Verständnis der Auswirkungen der Fasermineralisierung auf die Eigenschaften von Faserzement

Wie bereits erwähnt, haben mineralisierte Naturfasern das beste Potenzial als Ersatz für häufig verwendete synthetische Polypropylenfasern in Faserzementprodukten gezeigt. Die Faser-

zementprodukte auf der Basis von mineralisierten Flachs- und Eukalyptusfasern weisen im Vergleich zu Referenzproben mit synthetischen Polypropylenfasern sowohl unter trockenen als auch unter wassergesättigten Bedingungen deutlich verbesserte physikalische (geringere Wasseraufnahme und Quellung) und mechanische (höhere Festigkeit und Steifigkeit) Eigenschaften auf. Um die Wirksamkeit und Kosteneffizienz der Fasermineralisierung weiter zu verbessern, war es wichtig, die Mechanismen zu verstehen, die zu der verbesserten Leistung der entwickelten Faserzementplatten führten. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Eigenschaften sowohl an isolierten Fasern (Mikroskopie und Faserauszugstests) als auch an Faserzementproben (Dichte, Wasseraufnahme, Porosität und Biegefestigkeit) bestimmt. Die Ergebnisse zeigten, dass die verbesserte Leistung nicht auf eine höhere Hydrophobie oder verbesserte mechanische Eigenschaften der mineralisierten Fasern zurückzuführen ist. Stattdessen deutete die Analyse der Mikroporositätsdaten darauf hin, dass die Verbesserung der Faserzement-Eigenschaften wahrscheinlich auf die verringerte Mikroporosität der Proben mit mineralisierten Fasern zurückzuführen ist. Die verringerte Porosität ist wahrscheinlich das Ergebnis einer verbesserten physikalischen Bindung zwischen den mineralisierten Faseroberflächen und der umgebenden Zementmatrix. Die geringere Porosität führt zu weniger Raum für Wasser, während die verbesserte Dichtepackung zu einer Erhöhung der Festigkeit und Steifigkeit führt. Diese Daten bieten die Möglichkeit, die Mineralisierungsparameter in zukünftigen Studien und Projekten besser zu optimieren.

1.4. Entwicklung alternativer Faserplatten auf der Basis mineralisierter Fasern

Obwohl das entwickelte Verfahren zur Mineralisierung von Fasern vielversprechende Ergebnisse lieferte, können die Komplexität des Verfahrens und die Kosten für die erforderlichen Chemikalien das Potenzial für eine großtechnische Anwendung beeinträchtigen, wie der Projektpartner CSP (AP5) aufgezeigt hat. Um diese Herausforderungen zu bewältigen, wurden im Rahmen des Projekts neue Ansätze zur Mineralisierung von Fasern untersucht. Das erfolgreichste Ergebnis basierte auf einem neu entwickelten Ansatz, bei dem Naturfasern zunächst mit einer geringen Menge Wasser und einer mineralischen Komponente (z. B. Zement) gemischt werden, wodurch sich eine mineralische Schicht auf den Faseroberflächen bildet. Dieser Ansatz basierte auf der zuvor diskutierten Annahme, dass die Verbesserungen der Faserzement-Eigenschaften hauptsächlich durch die verbesserte physikalische Bindung zwischen den Naturfaseroberflächen und der Zementmatrix bestimmt werden (Abschnitt 1.3.). Eine Mineralisierung der Fasermolekülstruktur durch sorgfältig überwachte chemische Reaktionen ist in diesem Fall wahrscheinlich nicht erforderlich. Dies wurde durch die Ergebnisse physikalischer und mechanischer Untersuchungen bestätigt, die eine vergleichbare oder in einigen Fällen sogar bessere Leistung im Vergleich zu den Proben mit Fasern zeigten, die mit dem ursprünglichen Ansatz mineralisiert worden waren. Der neu entwickelte Prozess ist nicht nur deutlich kostengünstiger und kürzer, sondern auch wesentlich besser skalierbar, da für die Fasermineralisierung lediglich ein großtechnischer Industriemischer erforderlich ist. Um die Ressourceneffizienz des Produkts weiter zu verbessern, könnten die für die Fasermineralisierung verwendeten Mineralien auch aus Stein- und Betonverarbeitungsbetrieben bezogen werden, die erhebliche Mengen an mineralischen Abfällen in Form von Feinpartikeln erzeugen, die als Abfallstoffe gelten.

2. Fortschreibung des Verwertungsplans

2.1. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Kurzfristig (2025-2028)

Kurzfristig liegt der Schwerpunkt auf der Verbesserung der Wirtschaftlichkeit des Fasermineralisierungsprozesses, um dessen Skalierbarkeit und Wettbewerbsfähigkeit gegenüber kommerziellen synthetischen Fasern weiter zu steigern. In diesem Zusammenhang sollen die im Arbeitspaket 6 erzielten Fortschritte fortgesetzt werden, indem geeignete kostengünstige Mineralisierungsmöglichkeiten identifiziert werden, die nicht auf zeitaufwändigen chemischen Reaktionen und teuren Chemikalien basieren. Von besonderem Interesse ist dabei der bei der Verarbeitung von Stein- und Betonelementen anfallende mineralische Abfallstaub, da dieses Material keine Verwendung findet und daher in der Regel deponiert wird. Dieses Nebenprodukt könnte stattdessen in einem ähnlichen Verfahren wie dem vom Fraunhofer WKI im Arbeitspaket 6 entwickelten, zur Mineralisierung der Oberflächen von Naturfasern verwendet werden. Derzeit werden Gespräche mit Betonverarbeitungsunternehmen geführt, um die Menge der verfügbaren mineralischen Abfälle, ihre Zusammensetzung und die weiteren Verarbeitungsanforderungen zu ermitteln, bevor sie für die Fasermineralisierung verwendet werden können.

Langfristig (2028-2033)

Sobald der Mineralisierungsprozess in großem Maßstab erfolgreich demonstriert und seine wirtschaftliche Machbarkeit bestätigt ist, besteht der nächste Schritt darin, ihn in den Produktionsprozess für kommerziell relevante Produkte zu integrieren, insbesondere in Faserzement und zementgebundenen Spanplatten. Von besonderem Interesse sind mineralgebundene Verbundwerkstoffe auf Holz- und Naturfaserbasis für Außenanwendungen, da diese Produkte oft eine hohe Dimensionsstabilität und Feuchtigkeitsbeständigkeit erfordern, die durch den entwickelten Mineralisierungsprozess gewährleistet werden kann. Mehrere deutsche und internationale Unternehmen, die sich auf mineralgebundene Holz- und Naturfaserverbundwerkstoffe spezialisiert haben, haben bereits Interesse an dem entwickelten Mineralisierungsprozess bekundet, und Kooperationen wurden bereits initiiert (siehe Abschnitt 2.3).

2.2. Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten

Kurzfristig (2025-2028)

Während des Projekts hat die Fasermineralisierung sehr positive Ergebnisse für Flachs- und Eukalyptusfasern gezeigt, während Bambusfasern aufgrund ihres von Natur aus hohem Zuckergehalt eine schlechte Leistung zeigten. In den nächsten Phasen sollte der Einfluss der Chemie von Naturfasern oder Holz auf die Wirksamkeit des Mineralisierungsprozesses besser verstanden werden. Darüber hinaus sollte der Prozess nach Möglichkeit so angepasst werden, dass die wasserlöslichen Zucker, die in einigen Naturfasern und Holzarten natürlich vorkommen und die Zementaushärtung behindern können, ebenfalls während des Mineralisierungsprozesses abgebaut werden. Dies würde eine breitere Anwendbarkeit des Verfahrens ermöglichen, da viele klimaresistente Holzarten, die für die Holzindustrie zunehmend an Bedeutung gewinnen, einen hohen Zuckergehalt aufweisen und anfällig für feuchtigkeitsbedingtes Quellen und Schwinden sind. Neben Naturfasern sollte die Wirksamkeit der Mineralisierung auch für unterschiedlich verarbeitete Rohstoffe wie Holzspäne und Schäben untersucht werden. Dies ist für viele kommerzielle Produkte wie zementgebundene

Spanplatten relevant. Schließlich muss der Einfluss der Verarbeitungsparameter auf die endgültigen Eigenschaften der mineralisierten Biomasse untersucht und optimiert werden, um die Effektivität zu steigern und die Kosten des Prozesses zu senken.

Langfristig (2028-2033)

Der langfristige Fokus der Forschungs- und Entwicklungsarbeit sollte auf der Nutzbarmachung verschiedener mineralischer Abbinder, welche in naher Zukunft in den Markt eintreten werden, liegen. Der Vorteil alternativer Abbinder (bspw. Geopolymere) liegt in den deutlich geringeren CO_2-Emissionen. Aufgrund der chemischen Unterschiede zwischen den herkömmlichen zementbasierten Abbindern und zukünftigen Abbindersystemen muss eine Anpassung des Mineralisierungsprozesses vorgenommen werden, um eine Kompatibilität für zukünftige Anwendungen zu gewährleisten.

2.3. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

In diesem Abschnitt werden die neuen Kooperationen vorgestellt, die aufgrund der Ergebnisse des N-FRICS-Projekts ins Leben gerufen wurden.

2.3.1 Weitere Zusammenarbeit mit Brasilien

Um die Zusammenarbeit mit den brasilianischen Partnern zu stärken und neue Experten auf dem Gebiet des Faserzements kennenzulernen, wurde im November 2023 eine Reise nach Brasilien organisiert. Die Projektpartner vom Fraunhofer WKI, der Hochschule Bremen – HSB – und CSP-Technologies nahmen an der Reise teil. Tagespauschalen, Transport, Unterkunft und Konferenzkosten wurden von der Projektförderung für alle deutschen Projektmitglieder übernommen. Von besonderer Bedeutung für die Reise waren die Teilnahme an der „Internationalen Konferenz über nicht-konventionelle Materialien und Technologien“, die Organisation des Workshops „Low-Carbon, Lightweight Cement-Based Panel Technologies for Modular Construction“ sowie Gespräche mit Infibra (Faserzementhersteller) und Forschern der Universität von São Paulo.

Während der genannten und nachfolgenden Projektaktivitäten haben die Projektpartner aus Deutschland und Brasilien zusätzlich zu den Fortschritten im N-FRICS-Projekt aktiv neue Möglichkeiten der Zusammenarbeit identifiziert, um die Projektergebnisse strategisch weiterzuentwickeln. Im Jahr 2024 wurde ein Projektentwurf bei der Förderinitiative Bioeconomy International 2025 eingereicht. Die Projektidee basiert teilweise auf den im N-FRICS-Projekt erzielten Fortschritten bei der Entwicklung mineralisch gebundener Bambusverbundwerkstoffe, mit dem Ziel, die Kompatibilität zwischen Bambusfasern und mineralischen Matrizen weiter zu optimieren. Dieser Entwurf wurde im Juli 2025 angenommen; aktuell befindet sich der offizielle Antrag in Vorbereitung.

Darüber hinaus wurde ein Projektantrag im Rahmen der FAPESP/Fraunhofer Seed Funding-Initiative eingereicht. Im Falle einer Förderzusage ermöglicht das Programm den Projektpartnern der Universität São Paulo und des Fraunhofer WKI, über einen Zeitraum von zwei Jahren gemeinsame Forschungsaktivitäten und wissenschaftliche Austauschformate durchzuführen. Ziel ist es, die Zusammenarbeit weiter zu intensivieren und neue strategische Kooperationsrichtungen zu definieren. Im Fokus des Antrags steht die Entwicklung innovativer mineralisch gebundener Holz- und Naturfaserverbundwerkstoffe mit einem besonderen Augenmerk auf Leistungsfähigkeit und Nachhaltigkeit. Zusätzlich bereitet derzeit ein brasilianischer Postdoktorand der Universität São Paulo einen Antrag auf ein CAPES-Humboldt-Forschungsstipendium vor. Eine Bewilligung würde ihm einen bis zu zweijährigen

Forschungsaufenthalt am Fraunhofer WKI ermöglichen, um seine wissenschaftliche Laufbahn im Bereich mineralisch gebundener Holzwerkstoffe weiter auszubauen.

2.3.2 Zusammenarbeit mit CETRIS und BNB

CETRIS mit Sitz in Tschechien ist einer der führenden Hersteller von zementgebundenen Spanplatten in Europa. Für ein neues, speziell für den Außenbereich entwickeltes Produkt besteht die Notwendigkeit, Maßänderungen (z. B. Quellen) infolge wechselnder relativer Luftfeuchtigkeit und Niederschlag zu minimieren. Um dieses Ziel zu erreichen, wird CETRIS in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer WKI das in AP6 beschriebene Verfahren zur Fasermineralisierung weiterentwickeln und an industrielle Bedingungen anpassen. Der Fokus liegt auf der Verwendung kostengünstiger, mineralischer Reststoffe zur Fasermodifikation, um sowohl die Produktionskosten zu senken als auch die Nachhaltigkeit des Gesamtprozesses zu erhöhen. In diesem Kontext wurde auch das Unternehmen BNB (Potsdam, Deutschland) als Partner eingebunden. BNB ist auf Produkte auf Betonbasis spezialisiert und übernimmt die Aufgabe, Holzpartikel im industriellen Maßstab unter Einsatz von feinem Mineralstaub aus der Betonverarbeitung zu mineralisieren. Die so behandelten Partikel sollen anschließend von CETRIS für die Plattenherstellung genutzt werden. CSP wird ebenfalls beteiligt sein und BNB und Fraunhofer WKI bei der Optimierung der Verarbeitungsparameter für den Mischprozess und der Anpassung der Anlagen unterstützen, um beste Ergebnisse zu erzielen. Ein detaillierter Projektplan befindet sich derzeit in der Abstimmung. Nach dessen Finalisierung wird ein gemeinsamer Projektantrag ausgearbeitet und zur Förderung im Rahmen der Initiative IraSME eingereicht.

2.3.3 Zusammenarbeit mit Bausal GmbH

Im Rahmen des Projekts nahm der Fraunhofer WKI Kontakt zur Bausal GmbH auf, einem der führenden europäischen Vertreiber und Entwickler von zementgebundenen Spanplatten. Bausal plant, die erste Produktionsstätte für zementgebundene Spanplatten in der Region São Paulo zu errichten, um den brasilianischen Wohnungsbaumarkt zu erschließen. Da sich die in Deutschland und Brasilien verfügbaren Holzarten deutlich unterscheiden, sind Forschungs- und Entwicklungsarbeiten notwendig, um die Produkte an die lokalen Rohstoffe anzupassen. Das Fraunhofer WKI übernimmt hierbei die Aufgabe, geeignete brasilianische Holzarten für die Herstellung von zementgebundenen Spanplatten zu identifizieren und zu optimieren. Ein besonderer Fokus liegt auf der Wasseraufnahme und dem Gehalt an wasserlöslichen Zuckern, die in vielen brasilianischen Holzarten enthalten sind und die Zementbindung negativ beeinflussen können. CSP ist ebenfalls an dieser Zusammenarbeit beteiligt und wird für die Planung der Anlage sowie für die Bereitstellung von Informationen über die erforderliche Ausrüstung verantwortlich sein, um eine erfolgreiche Umsetzung zu gewährleisten. Die in den Arbeitspaketen AP4 und AP6 erarbeiteten Projektergebnisse bilden die Grundlage für diese weitere Entwicklungsarbeit.

2.3.4 Zusammenarbeit mit der Leibniz Universität Hannover

Während des Projekts wurde Herr Christian Reck von der Leibniz Universität Hannover (LUH) aufgrund seiner ausgewiesenen Expertise im Bereich mineralischer Bindemittel in das Projektkonsortium aufgenommen. Sein Fachwissen trug maßgeblich zu den im Rahmen von AP4 und AP6 erzielten Projektergebnissen bei. Derzeit werden zwei gemeinsam vom Fraunhofer WKI und der LUH entwickelte Forschungsideen in enger Abstimmung mit weiteren Partnern aus Deutschland zu einem Forschungsprojektantrag ausgearbeitet, der zeitnah eingereicht werden soll.

2.3.5 Zusammenarbeit mit ETH Zürich

Das Institut für Baustoffe der ETH Zürich befasst sich derzeit mit der Entwicklung innovativer mineralischer Bindemittel für den Einsatz in mineralisch gebundenen Verbundwerkstoffen aus Naturfasern und Holz. Aufgrund ähnlicher Interessen bereiten die ETH und das Fraunhofer WKI derzeit einen Forschungsantrag vor, bei dem die ETH für die Entwicklung alternativer mineralischer Bindemittel und das Fraunhofer WKI für die Verbundentwicklung und -optimierung verantwortlich ist. Das entwickelte System zur Herstellung von Faserzementplatten sowie das entwickelte Verfahren zur Mineralisierung der Fasern sind wichtige Aspekte der Projektarbeit im Zusammenhang mit den Arbeitspaketen des Fraunhofer WKI.

2.3.6 Veröffentlichung der Projektergebnisse

Derzeit werden zwei Open-Access-Veröffentlichungen auf Grundlage der Projektergebnisse aus AP1, AP2 und AP4 vorbereitet. Die erste Veröffentlichung wird sich auf die Präsentation der Ergebnisse aus der Entwicklung von Methoden zur Faserauszuganalyse (AP2) konzentrieren, während die zweite Veröffentlichung den Einfluss modifizierter Naturfasern auf die physikalischen und mechanischen Eigenschaften der Faserzementplatten (AP1/AP2/AP4) zum Schwerpunkt haben wird. Sobald im Rahmen der laufenden deutsch-brasilianischen Zusammenarbeit ergänzende Daten zu AP6 vorliegen, ist die Vorbereitung einer dritten wissenschaftlichen Publikation geplant.

Aus dem Projekt heraus entstand ein Kontakt zwischen der Hochschule Bremen und Prof. Dr. Carsten Mai (Abteilung Holzbiologie und Holzprodukte, Georg-August-Universität Göttingen). Auf der Basis dieses Austausches soll eine kooperative Promotion zum Thema Naturfasern in anorganischen Matrixsystemen zwischen der HSB und der Universität Göttingen hervorgehen.

3. Angaben zu Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Arbeitspaket 1 – Extraktion und Funktionalisierung der Naturfasern (HSB, USP)

Ziel des AP1 war eine erfolgreiche Optimierung für den Einsatz von Naturfasern in anorganischen Matrixsystemen durchzuführen. Die Funktionalisierung sollte die verschiedenen Nachteile von Naturfasern in anorganischen Matrixsystemen berücksichtigen und verbessern. Entsprechend wurden Funktionalisierungen gewählt, die für eine verbesserte Haftung und eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften genutzt werden sollten. Die Durchführung der Hornifizierung hat für eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften der Fasern gesorgt, im Verbundwerkstoff wiesen die hornifizierten Fasern die schlechteste Haftung und die schlechtesten Biegeeigenschaften. Entsprechend hat die Art der Funktionalisierung nicht zu einer Lösung geführt.

Arbeitspaket 2 – Charakterisierung der funktionalisierten Fasern (HSB, WKI, USP)

Im Rahmen von AP2 wurden zwei Methoden zur Bestimmung der Adhäsion zwischen Faser und Matrix an der HSB etabliert. Die eine Methode beinhaltet das Herausziehen einer Faser oder eines Faserbündels, mit einer bestimmten Einbettlänge, aus der Zementmatrix. Es wurden verschieden Ansätze verfolgt, um eine geeignete Form zu erstellen, um die Proben herstellen zu können. In diesem Entwicklungsprozess wurde deutlich, dass die Herstellung

von Faserauszugsproben aus Kurzfasern nicht durchführbar ist. Die Schwierigkeiten in der Etablierung des Verfahrens konnten im Rahmen des Wissenstransfers in den Workshops in Kooperation mit der USP adressiert und beseitigt werden.

Arbeitspaket 3 - Modifikation der Zementmatrix (WKI, USP)

Das Ziel des Arbeitspakets 3 war es, neue Faserzementmatrixformulierungen vorzuschlagen, die zu einer besseren Kompatibilität zwischen Naturfasern und anorganischen zementbasierten Matrizen führen würden. Die Modifizierung der Matrix hatte jedoch keine signifikanten positiven Auswirkungen auf die physikalischen und mechanischen Eigenschaften der hergestellten Faserzementplatten. Besonders auffällig war, dass die Faserauszugstests keine Unterschiede zeigten, wenn die Fasern in unterschiedliche Matrixformulierungen eingebettet waren. Darüber hinaus blieb die Wasseraufnahme der Faserzementplatten unabhängig von der Matrixzusammensetzung nahezu unverändert. Daher boten die im Projekt untersuchten alternativen Matrixformulierungen keine zusätzlichen Vorteile für die Dauerhaftigkeit von Faserzementplatten im Außenbereich.

Anstelle der weiteren Verfolgung der in AP3 beschriebenen Aktivitäten wurde beschlossen, den Produktionsprozess für die Platten und das Verfahren zur Mineralisierung der Fasern weiter zu optimieren, um die Kosteneffizienz und Zeiteffizienz weiter zu steigern. Aus diesem Grund wurde ein neues Arbeitspaket (AP6) in das Projekt aufgenommen.

Arbeitspaket 4 - Modifikation der Zementmatrix (WKI, USP)

Während Eukalyptus und Flachsfasern in anorganischer Matrixsystemen ein gutes Eigenschaftsprofil aufweisen, sind die mechanischen Eigenschaften mit Bambusfasern signifikant schlechter unabhängig von der durchgeführten Funktionalisierung der Faser.

Insbesondere bei der Herstellung von Platten aus Bambus wurde eine erhebliche Verzögerung der Aushärtung der Zementschlämme festgestellt, was zu einer unzureichenden Festigkeit der Platten führte. Dies ist wahrscheinlich auf den hohen Zuckergehalt in Bambusfasern zurückzuführen, der die Zementhydratation behindert. Die verwendeten Modifizierungsverfahren konnten das Auslaugen von Zuckern nicht verhindern. Deutlich bessere Ergebnisse wurden jedoch mit Platten erzielt, die mit dem in AP6 beschriebenen alternativen Herstellungsverfahren hergestellt wurden, da dieses Verfahren keine feuchte Zementschlämme erfordert und somit die Zuckerfreisetzung reduziert (weitere Details sind in AP6 (Teil 2 des Berichts) zu finden).

Was die Wirksamkeit der Fasermodifizierung auf die Leistungsfähigkeit von Faserzementplatten angeht, zeigten Platten aus hornifizierten Fasern ebenfalls sehr schlechte mechanische Eigenschaften (AP4). Bei der Prüfung der hornifizierten Fasern in Auszugstests wurden jedoch keine negativen Auswirkungen festgestellt, was darauf hindeutet, dass die Probleme während des Produktionsprozesses auftreten könnten (d. h. die Fasern lassen sich nicht gut in Wasser dispergieren oder bilden keinen guten Kontakt mit der Faserzementaufschlämmung). Es wurde festgestellt, dass die Hornifizierung von Fasern kein geeignetes Verfahren zur Verbesserung der Fasereigenschaften für die Verwendung in Faserzementplatten ist.

5. Angaben über die Einhaltung der Ausgaben- und der Zeitplanung

Die folgenden Tabellen zeigen den Projektfortschritt im Hinblick auf den im Antrag dargelegten Zeitplan. Was die finanziellen Ausgaben angeht, so entspricht die Projektarbeit dem im Projektantrag vorgeschlagenen Finanzierungsplan. Zusätzliche Kosten entstanden durch die Einbeziehung der Leibniz Universität Hannover (LUH) als externen Partner in den Arbeitspaketen 4 und 6. Die Kosten für die Arbeit der Partner der LUH wurden jedoch aus eigenen Mitteln des Fraunhofer WKI und nicht aus Mitteln des N-FRICS-Projekts gedeckt.

Tabelle 1 - Fortschritt der Arbeitspakete entsprechend dem Zeitplan.

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Berabeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
AP 1 - Extraktion und Funktionalisierung der Naturfasern (HSP, USP)	03/2023 - 11/2024	Naturfasern wurden erfolgreich modifiziert und ihre Leistungsfähigkeit verbessert. Aufgrund technischer und zeitlicher Einschränkungen wurde diese Vorauswahl auf Hornifizierung und CaCO3-Behandlung reduziert.
AP 2 - Charakterisierung der funktionalisierten Fasern (HSB, WKI)	03/2023 - 11/2024	Die mechanischen und physikalischen Eigenschaften von Naturfasern und ihre Kompatibilität mit Zement wurden charakterisiert. Mineralisierte Fasern zeigten die erfolgversprechendsten Eigenschaften.
AP 3 - Modifikation der Zementmatrix (WKI, USP)	03/2023 - 10/2024	Die Matrixmodifikation hat keinen positiven Einfluss auf die Eigenschaften von Faserzement gezeigt. Stattdessen konzentrierten sich weitere Optimierungsansätze auf die Optimierung des Produktionsprozesses (neu eingeführtes AP6).
AP 4 - Herstellung von Verbundwerkstoffen und Entwicklung von Optimisierungsansätzen (WKI, HSP, CSP/JAPES, USP)	05/2023 - 12/2024	Faserzementplatten wurden erfolgreich im Pilotmaßstab hergestellt. Platten auf Basis mineralisierter Fasern weisen im Vergleich zu Referenzplatten auf Basis synthetischer Fasern verbesserte mechanische und physikalische Eigenschaften auf.
AP 5 - Validierung der Lösungen im industriellen Maßstab (CSP/JAPES, IMBRALIT, WKI, USP)	09/2023 - 02/2025	Es wurde ein neues Anlagenkonzept vorgeschlagen, das den Prozess der Faser-Mineralisierung einschließt. Eine Kostenanalyse hat ergeben, dass die Kosten für Platten auf Basis mineralisierter Fasern um ca. 7 % höher sind als die für kommerzielle Platten.
AP 6 - Alternatives Verfahren zur Herstellung von mineralgebundenen Platten mit integrierter Fasermineralisierung (WKI, LUH)	06/2024 - 02/2025	Ein neues Verfahren zur Herstellung von Platten wurde entwickelt, das eine vereinfachte Version der Fasermineralisierung umfasst. Die Platten weisen im Vergleich zu den in AP4 hergestellten Platten vergleichbare mechanische und verbesserte physikalische Eigenschaften auf.

Das Arbeitspaket 6 wurde nach Projektbeginn eingeführt, um die in Arbeitspaket 3 festgestellten Einschränkungen zu beheben.

Tabelle 2 – Meilensteinplan.

Meilensteine (M) (lt. Planung im Antrag)	Fälligkeit (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
M1 - Erste Funktionalisierungen der Faserstoffe sind erfolgreich	Projekmonat 6 (Jahr 1)	Erfolgreich abgeschlossen.
M2 - Optimierte Zementmatrix für Werkstoffe liegt vor	Projektmonat 3 (Jahr 2)	Verbesserungen der Platten durch Optimierung der Zementmatrix blieben erfolglos. Stattdessen wurde AP6 zur Optimierung des Produktionsprozesses eingeführt, was zu einer deutlichen Verbesserung der Platteneigenschaften führte.
M3 - Reproduzierbare Herstellung der anorganisch gebundenen Plattenwerktoffe im Pilotmaßstab	Projektmonat 8 (Jahr 2)	Erfolgreich abgeschlossen.
M4 - Abstimmung mit den Industriepartner ist erfolgt, erste Konzepte für eine Anlage liegen vor	Projekmonat 9 (Jahr 2)	Erfolgreich abgeschlossen.

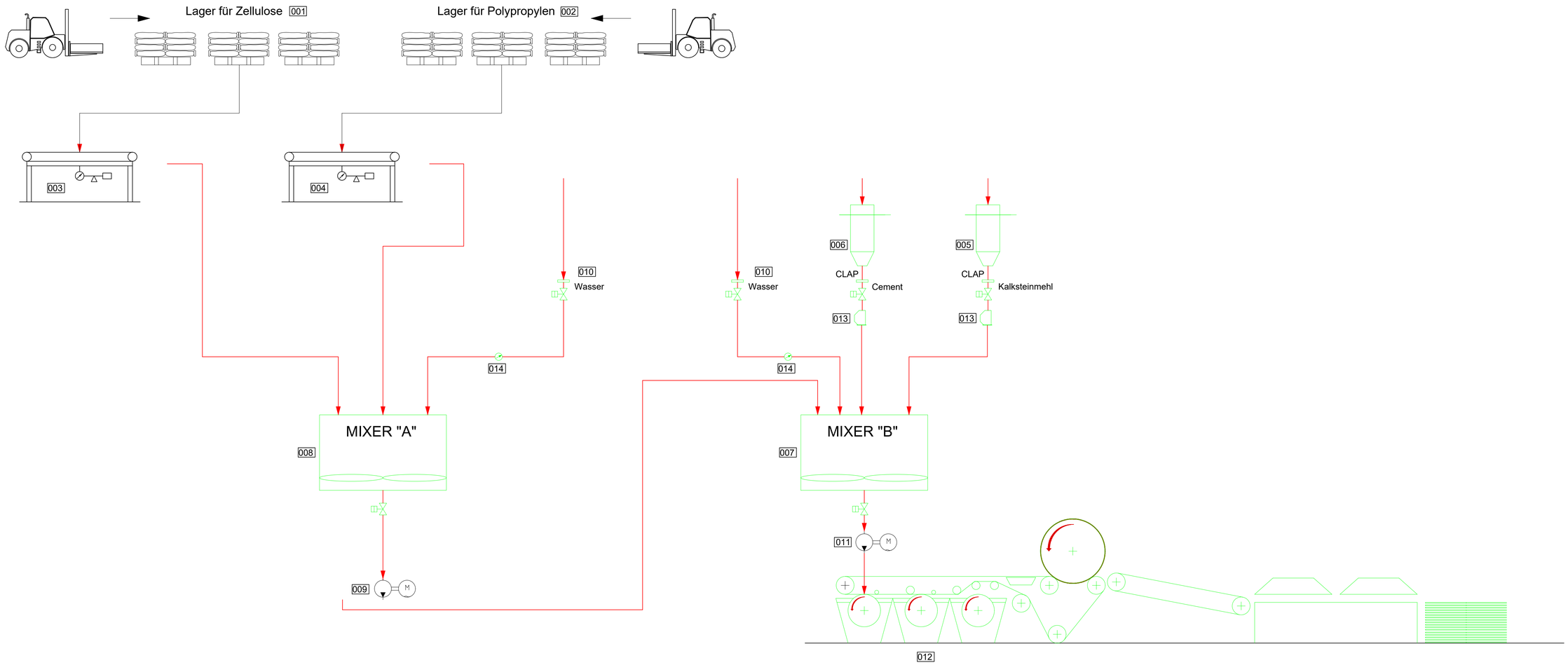
Bericht über den Verwendungsnachweis für das N-FRICS-Projekt

Flowsheets zum Arbeitspaket 5 (Validierung von Lösungen im industriellen Maßstab)

Teil II

Das Flowsheet der bestehenden Anlage bei Infibra ist auf Seite 2 dargestellt.

Das Flowsheet des neuen Anlagenkonzepts einschließlich der für die Mineralisierung der Fasern erforderlichen Ausrüstung ist auf Seite 3 dargestellt.



Legende:

001 Lager für Zellulose
002 Lager für PP
003 Waage Zellulose
004 Waage PP
005 Kalksteinmehl
006 Cement
007 Mischer "B"
008 Mischer "A"
009 Pumpe
010 Wasser
011 Pumpe
012 Vorratsbehälter
013 Freifallwaage
014 Durchflussmesser

General tolerance ISO 2768 -m -K
Workpiece edges DIN 6784
Surfaces ISO 1302
Copyright according DIN 34

DIN 6

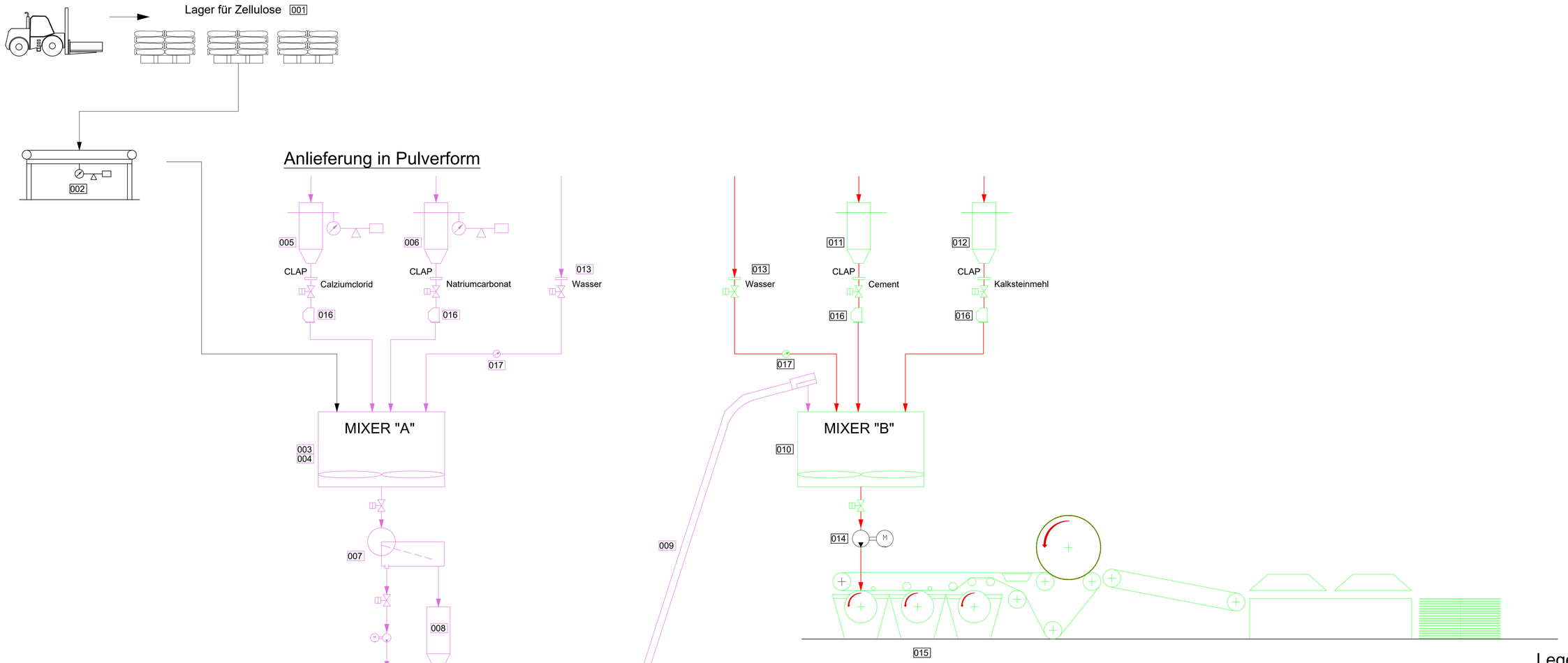
	Date	Name
Prepared	11.08.2025	Dreier
Checked		
Approved		

Rev.	Modification	Date	Name

Scale: %
Project: N-Frics
Capacity
Format:

Description:
Flowsheet 1
Rezeptur in Brasilien

Drawing No.: P10-1101-050
Sheet: –
Filename: P10P10-1101-050.dwg
A1



Legende:

001 Zellulose
002 Waage Zellulose
003 Mischer "A"
004 Rührwerk
005 Calziumclorid
006 Natriumcarbonat
007 Sieb
008 Zwischenbunker
009 Förderband
010 Mischer "B"
011 Cement
012 Kalksteinmehl
013 Wasser
014 Pumpe
015 Vorratsbehälter
016 Freifallwaage
017 Durchflussmesser

neue Anlagenkomponenten
Mehr-Investition

General tolerance ISO 2768 -m -K
Workpiece edges DIN 6784
Surfaces ISO 1302
Copyright according DIN 34

DIN 6

	Date	Name
Prepared	11.08.2025	Dreier
Checked		
Approved		

Rev.	Modification	Date	Name

CSP TECHNOLOGIES

Scale: %
Project: N-Frics
Capacity
Format:

Description:
Flowsheet 2
Rezeptur mit behandelten Eucalyptuszellstoff

Drawing No.: P10-1101-060
Sheet: –
Filename: P10P10-1101-060.dwg
A1