

Hanfbastfasern in klinkerarmen Betonen

Ökologische Ansätze für Kon-
truktionsbaustoffe der Zukunft

Prof. Dr.-Ing. Karl-Christian Thienel
Prof. Dr.-Ing. Thomas Braml
Dr.-Ing. Nancy Beuntner
Manuel Isaia
Florian Zürnstein

**Nachwachsender
Hanfbast als Bewehrung
für den Massivbau
von morgen**

**Ökobeton –
die nachhaltige Perspek-
tive von Beton**

**BasEcoCrete –
der Weg in die Zukunft**



BBSR

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Kurzfassung

Die Verwendung ökologisch-optimierter Materialien und der Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen stellen einen zentralen Aspekt für zukünftiges Bauen dar (Beuntner et al. 2019; Haller et al. 2025; Müller 2025). Im Forschungsprojekt wurden daher neue Ansätze für klimafreundliche Konstruktionsbaustoffe verfolgt, indem klinkerarme, weniger CO₂-emittierende Betone mit Bewehrungselementen aus nachwachsenden Hanfbast als Weiterentwicklung zum klassischen Stahlbetonbau untersucht wurden. Dieses neuartige Konzept erhielt im Forschungsvorhaben das Akronym BasEcoCrete. Für den Beton selbst wurde dabei das Ziel verfolgt, gezielt emissionsarme Bindemittel mit einer Zementklinkerreduktion von bis zu 73 M.-% einzusetzen und dabei nachhaltige Betone unterschiedlicher Dichte und Porosität sowie mit geringem CO₂-Fußabdruck herzustellen. Solche Betone schützen allerdings den klassischen Betonstahl nicht mehr ausreichend vor Korrosion. Der weitere Fokus des Forschungsvorhabens lag daher in der Nutzung von nicht korrosionsgefährdeten Hanfbastfasern als neuartige Bewehrung in Form von Schwind- oder Stabbewehrung.

Eine erste Herausforderung im Projekt war die Bestimmung aller Materialparameter an Hanfbastfasern und Stäben. Mit dem natürlichen Wachstum der Hanfpflanze entstehen Faserbündel beziehungsweise Einzelfasern unterschiedlichster Morphologie (Oberflächenbeschaffenheiten) deren Materialkennwerte über den Ansatz der äquivalenten Querschnittswerte zielführend bestimmt wurden. Mit dieser erstmals eingesetzten Auswertemethodik konnten für die verwendeten Hanfbastfasern aus dem Stängel der Nutzhanfpflanze *Cannabis Sativa L.* die mechanischen Eigenschaften der Zugfestigkeit und der Elastizitätsmodul (E-Modul) bestimmt werden.

Einen weiteren wichtigen Schwerpunkt im Forschungsvorhaben bildeten die Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit im alkalischen Milieu sowohl der Fasern als auch der für die Bewehrungsstäbe notwendigen bindenden und umhüllenden Epoxidharze. Hier wurden Versuche in alkalischen Lösungen durchgeführt und der Einfluss auf die Festigkeiten und den E-Modul erforscht. Anhand der Ergebnisse zur Alkalibeständigkeit der Fasern und Hanfbastfaserstäbe vor allem unmittelbar nach dem Einbau und in der ersten Nutzungsphase gewährleistet sein. In hochporosierten Beto-

nen, wie dem eingesetzten Leichtbeton (ÖkoLB) erwiesen die Hanfbastfasern eine hohe Leistungsfähigkeit zur Minderung des plastischen Schwindens.

Die im Pultrusionsverfahren hergestellten Hanfbastbewehrungsstäbe besitzen prozessbedingt zunächst eine glatte Oberfläche. Für die Übertragung der Verbundkraft zwischen Bewehrungsstab und Beton wurden die Stäbe daher nachträglich händisch profiliert, um den Verbund zwischen Stab und Beton und damit die Leistungsfähigkeit zu verbessern. Die Eignung der vier gewählten Profilierungsvarianten wurden in Pull-out-Versuchen validiert. Dabei erreichten die Stäbe mit einer besandeten Profilierung die höchsten Verbundspannungen. Die Realisierung und Einbindung der Profilierung von Naturfaserstäben in den Herstellungsprozess der Pultrusion ist der Inhalt weiterer interdisziplinärer Forschungsarbeiten.

Die Herstellung von Biegebalken als Demonstratoren für einen erfolgreichen Einsatz des neuen Konstruktionswerkstoffes BasEcoCrete rundete das Forschungsprojekt ab. Mit den Demonstratoren konnte eine ausreichende Aufnahme von Zugkräften durch die Hanfbastbewehrungsstäbe gezeigt werden. Die Nutzung des Hanfs im Bauwesen bedarf noch einiger Forschungsarbeit, verspricht aber aufgrund der vorliegenden Ergebnisse ein beträchtliches Potenzial für die Zukunft. So mit bereitet BasEcoCrete die Basis, um nachwachsende Ressourcen gezielt zu nutzen, sowie klimaschädliche Emissionen deutlich und nachhaltig zu reduzieren.

Hanfbastfasern

Hanfbastfasern liegen in der Bastrinde der Nutzhanfpflanze. Eine einzelne Hanffaser besitzt einen Durchmesser von wenigen Mikrometern. Die vom menschlichen Auge erkennbaren Fasern werden als Faserbündel bezeichnet und bestehen aus mehreren miteinander verklebt und verkitteten Einzelfasern unterschiedlichster Morphologie und Länge. Der Pflanzenwuchsrichtung folgend können Einzelfasern zueinander bogig, kraus, geknickt und gewendet angeordnet sein und beeinflussen so die Materialkennwerte.

Ergebnisse

11 Hanfbastfasern – Ausgangsmaterial nachhaltiger Bewehrung

Hanfbastfasern aus dem Stängel der Nutzhanfpflanze *Cannabis Sativa L* dienten als Ausgangsmaterial für die Faserbewehrung und Bewehrungsstäbe. Bei dem im Projekt verwendeten Hanfbastfasern handelt es sich um die Sorte USO 31, die im nördlichen Weinviertel Niederösterreichs angebaut wurde. Für die Untersuchungen an Fasern wurden zwei Chargen verwendet. Bei Hanf1 handelt es sich um Hanfstroh mit Stängellängen von teilweise über einem Meter wie gewachsen, ohne Nachbearbeitung mit Schäben, nach Drusch gemäht, getrocknet und zu Ballen gepresst. Das Hanfstroh ist in die Röstkasse zwei bis drei einzuordnen. Hanf2 ist ein bearbeitetes Halbzeug mit kurzgeschnittenen Fasern von 10 cm Länge und einem geringen Schäbenanteil. Das Halbzeug ist der Röstkasse drei bis vier zuzuordnen. Abbildung 1 zeigt die Hanffasern der beiden Chargen im Anlieferungszustand.



Abb. 1: Hanfbastfasern der beiden Chargen im Anlieferungszustand, Foto: Universität der Bundeswehr München

Hanfbastfasern werden nach der Feldröstung in einem Faseraufschluss gewonnen (Böcsa/Karus 1997). Dabei können die Einzelfasern im Faserbündel unterschiedlichen Geometrien unterliegen und besitzen unterschiedliche Morphologien (Müssig 2024; Schnegelsberg 1999).

Die Bestimmung der Zugfestigkeit an Hanfbastfasern stellte eine Herausforderung dar und benötigte eine präzise Prüfmethodik und Auswertung.

Bei der Auswertung wurde aufgrund der Fasermorphologie und Zusammensetzung der Faserbündel erstmals

der Ansatz von äquivalenten Querschnittswerten bei der Berechnung der Zugfestigkeit verwendet. Abbildung 2 zeigt die ermittelten Zugfestigkeiten aus 56 Einzelwerten und gibt zugleich einen Einblick zur Streuung der Ergebnisse. Die hohe Streuung sind der Naturfaser per se und deren Faserfeinheit (Fischer/Drieling 2024: 205) sowie dem Ernteprozess und der späteren Verarbeitung (entstehende Knicke) geschuldet.

Röstkasse/Röstgrad

Röstkasse und Röstgrad ist die Einstufung der Faserqualität aufgrund augenscheinlicher Kriterien. Startpunkt der Fasergewinnung ist die Feldröstung. Biologische Prozesse sorgen für den Abbau der Kitt-Substanzen (Lignine und Pektine) zwischen Bastfasern und verholztem Innenteil. Die Röstkasse beschreibt den optischen Zustand der Fasern anhand der Farbe (hellgrün bis braungrau) und stuft sie nach Ziffern zwischen eins und zehn ein. Sie liefert damit indirekt einen Hinweis für die Dauer des biologischen Prozesses (Feldliegezeit nach Ernte).

Äquivalenter Querschnitt

Ein äquivalenter Querschnitt wird in der Regel genutzt, da es schwierig ist, die Querschnittsfläche von Naturfasern zutreffend zu definieren und darauf bezogene Größen wie Festigkeitswerte korrekt anzugeben. Daher weicht man auf eine Ersatzgröße aus: den äquivalenten Querschnitt. Dazu wird zunächst ein Ersatzvolumen aus der Masse der Hanfbastfaser berechnet und durch deren Reindichte dividiert. Aus dem Ersatzvolumen wird die Ersatzquerfläche der Hanfbastfaser berechnet und idealisiert als „äquivalenter Querschnitt“ bezeichnet.

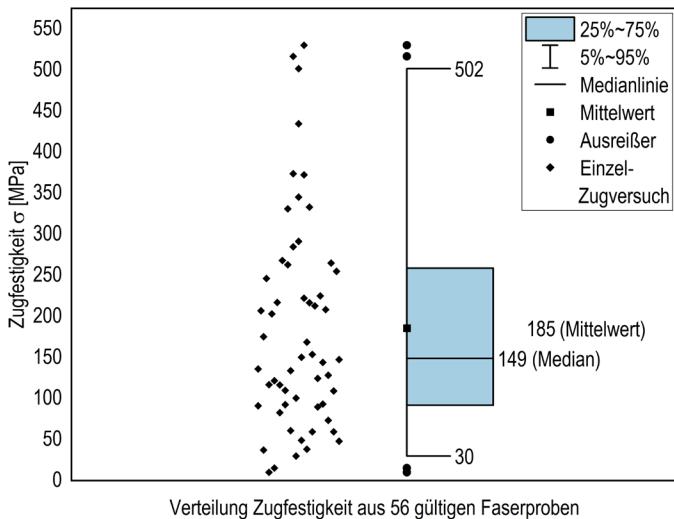


Abb. 2: Zugfestigkeit der Hanffasern als halber Box-Plot mit Verteilung der Datenpunkten sowie Angabe der 5 und 95 % Quantile, des Mittelwertes und Medians, Quelle: Universität der Bundeswehr München

Der Einsatz als Faserbewehrung zur Vermeidung von Schwindrissen ist eine Möglichkeit, die Hanfbastfasern in Beton zu verwenden. Dafür wurden die Fasern auf Längen von 10 bis 20 mm zugeschnitten. Im Frischbeton führen die Hanfbastfasern aufgrund ihrer Wasseraufnahme von ca. 30 M.-% zu einer steiferen Konsistenz. Ihre starke Neigung zur Igelbildung erschwerte die Verarbeitung. Beim Einsatz im porosierten, haufwerksporigen Leichtbeton ÖkoLB konnten die Hanfbastfasern ihr Potenzial zeigen und das plastische Schwinden um 18 Vol.-% reduzieren. Ein wesentliches Kriterium für den Einsatz als Schwindbewehrung stellt die Dauerhaftigkeit der Fasern gegenüber dem alkalischen Milieu des Betons dar. Diese Eigenschaft der Fasern wurde im Projekt über eine 180-tägige Lagerung bei pH 11 und 13 geprüft. Die Ergebnisse zeigen unerwartet den höchsten Massenverlust bei Lagerung in pH 11. Dabei verloren die nicht gerösteten Fasern gegenüber den gerösteten Fasern mehr Masse. Die gerösteten Fasern verloren 20–25 % und die nicht gerösteten Fasern 10–17 % ihrer anfänglichen Zugfestigkeit.

1.2 Epoxidharze – Matrix und Schutz für Hanfbastbewehrungsstäbe

Die stabförmigen Bewehrungselemente bestehen aus einem Hanfgarn und einem einbettenden und zugleich umhüllenden Epoxidharz. Für ihre Herstellung sind Erkenntnisse zur Eignung und Dauerhaftigkeit der Epoxidharze notwendig. Im Projekt wurden vier Epoxidharze mit unterschiedlichen Verarbeitungs- und Anwendungseigenschaften (Temperzeit, Verarbeitungszeit, Chemikalien- und Temperaturbeständigkeit) ausgewählt. Ihre Be-

ständigkeit im alkalischen Milieu (pH 9, 11, 13) wurde über eine Einlagerungsdauer von 178 Tagen an speziellen Zugprobekörpern nach DIN EN ISO 527-2 geprüft.

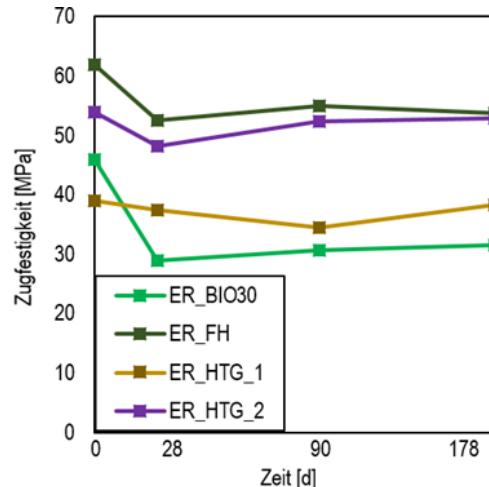
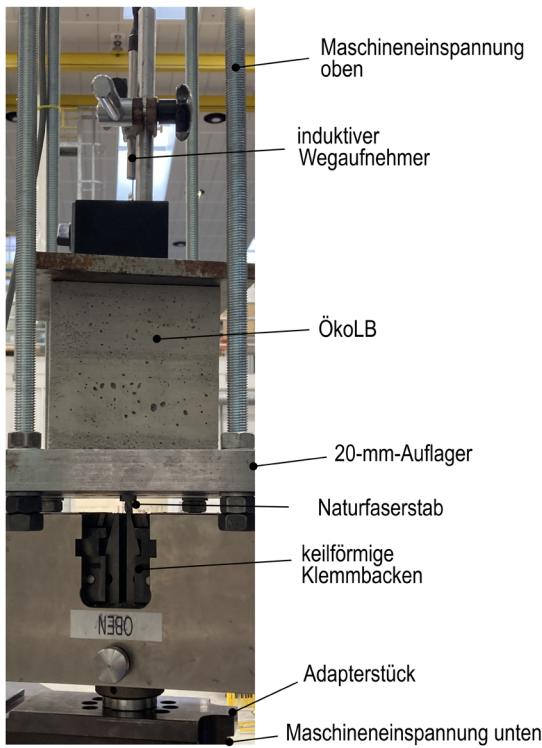


Abb. 3: Zugfestigkeiten der Epoxidharze ER_BIO30, ER_FH, ER_HTG_1, ER_HTG_2 bei Alkalilagerung in pH 9 bis 178 Tage Einlagerungsdauer, Quelle: Universität der Bundeswehr München

Das biobasierte Harz verlor deutlich an Zugfestigkeit und zeigte einen deutlich verringerten E-Modul nach Einlagerung. Der Abfall der Zugfestigkeit lag bei rund 34 % und für den E-Modul bei rund 25 %. Für die drei weiteren untersuchten Epoxidharze konnte ein marginaler Abfall der Zugfestigkeiten bzw. des E-Moduls verzeichnet werden. Der pH-Wert schien dabei keine Einflussgröße darzustellen. Die Ergebnisse der Zugversuche aller vier Epoxidharze bei pH 9 zeigt Abbildung 3.

Klinker-Faktor

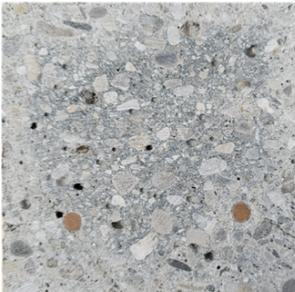
Als Klinker-Faktor wird der Anteil des emissionsreichen Zementklinkers im Zement bezeichnet. Ein Klinker-Faktor von 0,45 bedeutet, dass in einer Tonne Zement 450 kg Zementklinker enthalten sind. Der Klinker-Faktor im heutigen Zement beträgt derzeit 0,71 und soll bis 2050 auf 0,53 gesenkt werden. Zemente mit niedrigem Klinkerfaktor werden als klinkereffiziente Kompositzemente bezeichnet und sind ein wichtiger Baustein zur Dekarbonisierung der Zement- und Betonindustrie.



ÖkoB1



ÖkoB2



ÖkoLB

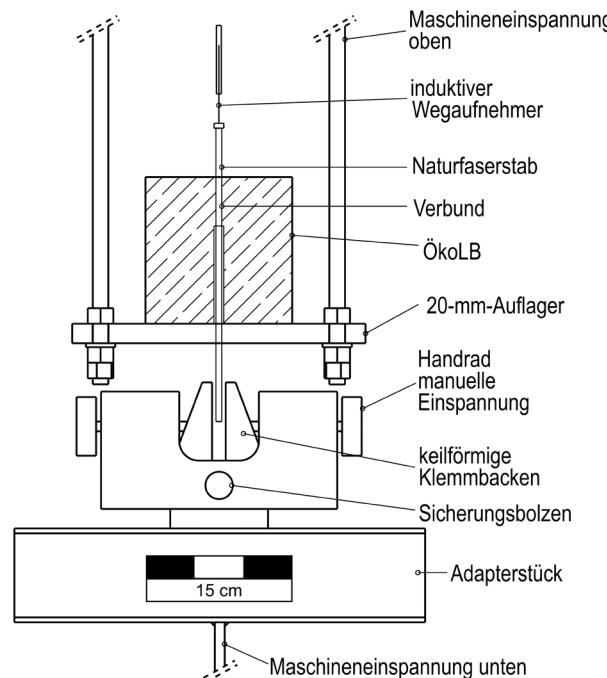
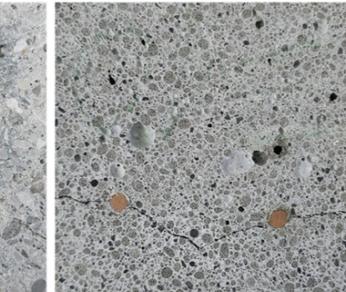


Abb. 4: Versuchsaufbau Auszugversuche zur Validierung der Profilierungskonzepte, Foto: Universität der Bundeswehr München

Abb. 5: Betongefüge der drei ökologisch optimierten Betone ÖkoB1 (links), ÖkoB2 (mitte) und ÖkoLB (rechts) mit Hanfbastfaserbewehrung in der Betonzugzone, Foto: Universität der Bundeswehr München

10 mm

1.3 Hanfbastbewehrungsstäbe – Verbund durch Profilierung

Die im Pultrusionsverfahren hergestellten Hanfbastbewehrungsstäbe weisen herstellungsbedingt zunächst glatte Oberflächen auf (Spyridonos et al. 2024). Da glatte Stabelemente die Zugkräfte nur unzureichend über Verbund aus dem umgebenden Beton aufnehmen können, mussten die Stäbe für die erforderliche Verbundkraftübertragung zwischen Bewehrungsstab und Beton nachträglich händisch profiliert werden. Es wurden dabei die Profilierungsvarianten (I) fein besandet, (II) grob besandet, (III) umwickelt sowie (IV) besandet und umwickelt untersucht (Abbildung 6). Die Validierung des Profilierungskonzeptes erfolgte mittels Auszugversuchen in Anlehnung an Pull-out-Tests. Abbildung 4 zeigt den Versuchsaufbau der Auszugsversuche. Für die Berechnung der Verbundspannung (Kraftübertrag zwischen Beton und Bewehrungsstab) wurde die Oberfläche des Stabes

mit einem 3D-Hand-Scanner ermittelt. Die Verbundspannung einer konventionellen Stahlbewehrung im Beton lag bei 3,4 MPa. Die profilierten Hanfbastbewehrungsstäbe erreichten mit der Profilierungsvariante grob besandet und fein besandet eine Verbundspannung von 2,8 MPa. Für umwickelte Stäbe lag sie bei 2,6 MPa und für die kombinierte Profilierung aus Besandung und Umwicklung bei 1,8 MPa. Auf Basis der Ergebnisse kann für weitere Forschungsprojekte eine besandete Profilierung empfohlen und die Integration in den Herstellungsprozess der Pultrusion von Hanfbastfasern unter interdisziplinärer Zusammenarbeit weiter forciert werden.

1.4 Ökologisch optimierte Betone

Im Forschungsvorhaben wurden gezielt drei ökologisch optimierte Betone mit klinkerarmen Bindemitteln (ÖkoB1,

ÖkoB2 und ÖkoLB) unterschiedlicher Dichte und Porosität entwickelt (Abbildung 5), um die mechanischen Eigenschaften der beiden Materialien, klinkerarmer Beton und Hanfbaststäbe, möglichst gut aneinander anzupassen. Der Klinker-Faktor der verwendeten Zemente wurde auf maximal 0,45, im ÖkoB2 sogar auf 0,27 reduziert. Dies gelang durch den Einsatz von Kalksteinmehl, calciniertem Ton und Hüttensand. Der ökologische Fußabdruck dieser Betone für die Lebensphasen A1–A3 (A1 Rohstoffbereitstellung, A2 Transport und A3 Herstellung) nach DIN EN 15804 konnte deutlich unter den Branchenreferenzwert für einen C35/45 gesenkt werden, der mit einem Treibhauspotenzial (engl. Global Warming Potential - GWP) und einem CO₂-Äquivalent von 286 kg CO₂/m³ Beton angesetzt wird. Der berechneten GWP lag für ÖkoB1 bei 175 kg CO₂/m³ Beton und für ÖkoB2 bei 102 kg CO₂/m³ Beton. Beim ÖkoLB fällt als haufwerksporiger Leichtbeton der deutlich höhere GWP-Wert auf. Dieser beruht allerdings in hohem Maße auf der eingesetzten leichten Gesteinskörnung, die in einem thermischen Prozess erzeugt wird. Aus diesem Grund muss ein Vergleich mit üblichen haufwerksporigen Leichtbetonen geführt werden. Deren GWP liegt trotz des Einsatzes klinkerarmer Zemente bei 255 – 295 kg CO₂/m³ (Richter 2022). Beim ÖkoLB konnte der GWP-Wert auf 207 kg CO₂/m³ Beton reduziert werden.

Ökobetone

Als Ökobetone werden Betone mit einem um mindestens 30 % reduzierten CO₂-Fußabdruck gegenüber konventionellen Betonen bezeichnet. Dies Ziel kann über einen verringerten Anteil des emissionsreichen Portlandzementklinkers im Bindemittel erreicht werden. Anstelle des Zementklinkers kommen ressourcenschonende Zementersatzstoffe zum Einsatz. Diese können die Frisch- und Festbetoneigenschaften verändern, wie zum Beispiel die Fließfähigkeit, die Verarbeitungsdauer, Früh- und Endfestigkeiten und Dauerhaftigkeit.



Abb. 6: Profilierungsvarianten der Hanfbastbewehrungsstäbe,
Foto: Universität der Bundeswehr München

Nutzen für die Praxis

Der Anteil des Bausektors an den weltweiten CO₂-Emissionen beträgt ca. 47 %. Zur Erreichung der globalen Klimaziele ist zwingend ein Wandel im Bausektor umzusetzen. Innerhalb der Europäischen Gemeinschaft werden ab 2027 neben dem Verkehr auch Gebäude in den EU-Emissionshandel aufgenommen. Zukünftig wird sich das auch auf eine CO₂-Bepreisung der Materialien des Bauwesens auswirken. Damit rücken Produkte auf Basis natürlicher Rohstoffe mit einem niedrigen GWP gegenüber sehr energieintensiven Produkten mit einem hohen GWP stärker in den Fokus zukünftigen Bauens. Dementsprechend steckt in der Kombination nachwachsender Rohstoffe und neuer ressourcenschonender, emissionsarmer Betone enormes Potential für nachhaltige und generationengerechte Massivbaulösungen. Die Anwendung von Hanfbastfasern als Bewehrung in einer ökologisch-optimierten Betonmatrix ist ein innovativer Ansatz, der das Ziel verfolgt, neue Anwendungsmöglichkeiten für einen nachwachsenden Rohstoff zu finden und im nächsten Schritt die Grundlagen für die praktische Umsetzung in der Bauindustrie zu schaffen. Mit dem Einsatz lokal verfügbarer Rohstoffe können durch Verwendung von Hanfbastbewehrungsstäben mehrere Ziele realisiert werden. Das Portfolio klimafreundlicher und nachhaltiger Baustoffe bekommt mit Hanfbastbewehrungsstäben neben den etablierten Baustoffen einen zusätzlichen aussichtsreichen Kandidaten, der die Ressourcenschönung weiter forciert. Neben den etablierten Wertschöpfungsketten des Holzbau entsteht mit der Einführung von Hanfbastfasern als alternative, ökologische Betonbewehrung in Fasern oder Stabform eine neue Verwertungskette. Durch die Verwendung des nachwachsenden Nutzhanfs für Bewehrungsstäbe steigt die Nachfrage nach verfügbaren Hanfbastfasern. Durch eine sichere Absatzperspektive werden für die Landwirtschaft zusätzliche Anbaureize geschaffen. Bislang fallen Fasern und Schäben des Stängels bei der Nutzhanfproduktion als Neben- beziehungsweise Abfallprodukt an. Damit entsteht zusätzlich ein neuer finanzieller Anreiz, auch die bislang wenig bis nicht beachteten Pflanzenteile zu verwerten. Die Nutzhanfpflanze stellt wenig Anforderungen an die Bodenbeschaffenheit und eignet sich hervorragend für den Einsatz als Zwischenfrucht zur Erweiterung der Fruchtfolge und dem Schutz der Biodiversität. Wird die Hanfpflanze über die Wintermonate genutzt, können die im Feld verbliebenen Stängel einen Beitrag zum Erosionsschutz unserer wertvollen Böden leisten. Gleichzeitig bringt die Zeit über die Wintermonate den Effekt der Röste mit sich und erleichtert damit die spätere Faser-gewinnung und den Faseraufschluss. Auch eine kombinierte Nutzung der Nutzhanfpflanze für unterschiedliche Industriezweige (Verwendung von Samen, Blättern oder Blüten für Nahrungsmittel, Lacke oder technische Öle) ist möglich, wobei die Erträge und Qualität von den jeweiligen Wuchsbedingungen abhängig sind. Unter günstigen Bedingungen entstehen Fasern hoher Qualität und umgekehrt sinkt die Qualität unter schlechten Bedingungen für das Pflanzenwachstum. Im Forschungsvorhaben konnten eine Vielzahl an Einflussfaktoren auf die mechanischen Eigenschaften der Hanfbastfasern herausgearbeitet werden. Die Naturfasern weisen in Hinblick auf Festigkeit und E-Modul eine große Streuung auf. Inwiefern die Qualität der Hanfbastfasern infolge klimatischer Randbedingungen und der Anbaugebiete mit den mechanischen Eigenschaften korreliert, ist in weiteren Forschungsvorhaben zu untersuchen. Mit der Kombination verschiedener Absatzschienen kann das Nutzungs-potenzial der Hanfpflanze vollumfänglich erschlossen werden. Die Hanfbastfasern stellen dabei eine ökologische Ergänzung für die Bewehrung von Beton gegenüber dem konventionellen Bewehrungsstahl dar, dessen Herstellung sehr energieintensiv und mit hohen Emissionen verbunden ist.

Die im Projekt entwickelten Ökobetone besitzen im Vergleich zu konventionellen Betonen sehr niedrige CO₂-Emissionen, durch die sie den Baustoff des 20. Jahrhunderts weiter verbessern und auch in Zukunft attraktiv und verwendungsfreundlich gestalten. Durch die deutliche Verbesserung der Umweltwirkungen des Betons werden die Kosten für zukünftige Emissionsabgaben vermindert und sichern damit die Attraktivität eines wirtschaftlichen, zuverlässigen Werkstoffs der Baupraxis. Die Verwendung klinkerarmer Zemente in den entwickelten Betonen erfordert die Suche nach alternativen Bewehrungen, da der Betonstahl wegen des geringen Klinker gehaltes korrosionsgefährdet ist. In der Folge ist der Betonstahl nicht mehr ausreichend geschützt. Zukünftige Betone werden schneller carbonatisieren. Deshalb werden diese Betone die übliche Nutzungsdauer von 50 Jahren für den klassischen Hochbau unserer bebauten Umwelt hinweg nicht das passivierende Milieu für einen Korrosionsschutz der Bewehrung aufweisen. Sobald die

Carbonatisierungsfront die im Beton eingebettete Stahlbewehrung erreicht, verliert die Oberfläche des Bewehrungsstahls die sie schützende Schicht – sie wird depasiviert. Ab diesem Zeitpunkt setzt dann der eigentliche Korrosionsprozess ein. Es besteht die Gefahr einer großflächigen Bewehrungskorrosion. Die Folge sind Schädigungen an den Bauwerken und die Notwendigkeit einer kostspieligen außerplanmäßigen Sanierung deutlich über den sonst üblichen Instandhaltungsarbeiten. Eine verfrühte Sanierung vor Erreichen der bemessenen Nutzungsdauer entspricht nicht einer nachhaltigen Massivbaulösung. Um dieses sich abzeichnende Problem zu vermeiden, sind Alternativen dringend erforderlich, die auch ohne das passivierende Milieu beständig bleiben. Hier bieten sich die im Projekt untersuchten Hanfbastfasern als Ausgangsmaterial für Faser- und Stabbewehrung an. Mit dem Ersetzen des korrosionsgefährdeten Betonstahls durch Hanfbastbewehrungsstäbe kann auch die Betonüberdeckung, die zuvor zum Schutz des Stahls vor Carbonatisierung notwendig war, reduziert werden. Folglich sinkt die Menge des eingesetzten Betons sowie die damit verbundenen, auf ein bestimmtes Bauteil bezogenen, CO₂-Emissionen. Ein weiterer Nebeneffekt bei dem Einsatz von Hanfbastbewehrungsstäben ist der Wegfall der Anforderung eines hohen Carbonatisierungswiderstands des Betons. Durch eine gezielte Ausnutzung von Carbonatisierungs-Potentialen kann die Druckfestigkeit der Betone weiter gesteigert werden. Die Supplementierung von Stahl beziehungsweise synthetischen und mineralischen Fasern durch Hanfbastfasern zusammen mit modernen Öko-Betonen hat das Potential, die Emissionen des Verbundbaustoffes Beton, neben dem Einsatz klinkerarmer Zemente, erheblich zu verbessern. Im Rahmen des Forschungsprojektes konnte eine erste Abschätzung des GWPs für Hanfbastbewehrungsstäbe ermittelt werden.

In Abbildung 7 ist das GWP der Hanfbastbewehrungsstäbe im Vergleich zu etablierter metallischer und nichtmetallischer Bewehrung dargestellt.

Auch hier stellt sich das Potenzial für klimagerechte Lösungen des modernen Massivbaus unter Verwendung nachwachsender Rohstoffe klar heraus. Der Massivbau der Zukunft besteht aus klimafreundlichen Konstruktionsbaustoffen nachwachsender Hanfbastbewehrungsstäben kombiniert mit ressourcenschonenden Betonen.

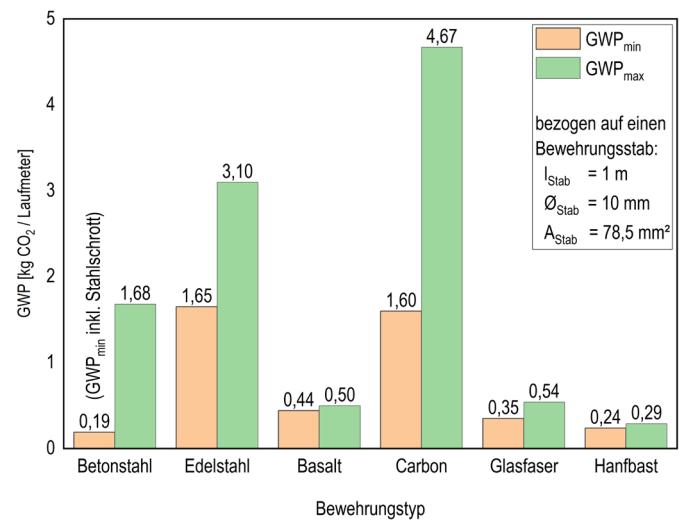


Abb 7: GWP nach Bewehrungstypen auf Basis von Umweltproduktdeklarationen für einen 10 mm Stabdurchmesser je Laufmeter, Quelle: Universität der Bundeswehr München

Treibhauspotenzial

Das Treibhauspotenzial (engl. Global Warming Potential – GWP) beschreibt die Umweltwirkung eines Stoffes im Hinblick auf die Erwärmung der Troposphäre. Es wird mit der Referenzeinheit Kilogramm-CO₂-Äquivalent angegeben. Die Umweltwirkungen bei der Herstellung von Baustoffen werden im Rahmen von Umweltproduktdeklarationen (EPD) in den Kategorie A1-A3 ausgewiesen, die die Prozesse von der „Wiege zum Werk“ erfassen.

In vielen Bauteilen des konstruktiven Ingenieurbaus ist eine Bewehrung für die Aufnahme der Zugspannung infolge des Betonschwindens erforderlich. Die Hanfbastfasern besitzen das Potential, diese Zugspannung vollständig aufzunehmen. Mit den durchgeführten Versuchen konnte die Eignung als Schwindbewehrung und die deutliche Reduktion des Schwindverhaltens gezeigt werden: Die Hanfbastfasern eignen sich damit für die Aufnahme der entstehenden Zugkräfte in frühem Zwang, so dass eine zusätzliche Bewehrung aus herkömmlichen Betonstahl nicht erforderlich ist. Je nach Bauteil und Einsatzgebiet können so auch Zugspannungen aus späterem Zwang aus äußeren Einwirkungen (beispielsweise Temperatur) ebenso von den Hanfbastfasern aufgenommen werden. Ein entscheidender Einsatz für die Baupraxis kann hier bereits in Sockeln für Lärmschutzwände

in Aussicht gestellt werden. Mit der Verwendung haufwerksporiger Leichtbetone sinkt das Gewicht der Sockel zu Gunsten der bauseitigen Verarbeitbarkeit. Verglichen mit herkömmlicher Stahlbewehrung wird das Korrosionsproblem mit Verwendung von Hanfbastbewehrungsstäben wie gezeigt gelöst. Die bauseitige Herstellung eines hanfbewehrten Lärmschutzwandsockels kann aufgrund des geringeren Gewichtes schneller und effizienter erfolgen. Das steigert die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten und erhöht die Wettbewerbsfähigkeit. Neben dem Einsatzgebiet der Sockelelemente bei Lärmschutzwänden können die Hanfbastfasern darüber hinaus in untergeordneten Bauteilen des Fertigteilskelettbau, beispielsweise in Frostschürzen angewendet werden. Ebenso im Bereich nichttragender Innenwände, Fassadenplatten oder Brandschutzwänden. Gerade letztere stellen einen umfangreichen Anwendungsfall dar. Die erzielten Ergebnisse über das Materialverhalten der Hanfbastfasern und Bewehrungsstäbe liefern wichtige Grundlagen für die baupraktische Planung und Bemessung anhand der bekannten Ansätze aus dem Stahlbeton. Aus den Ergebnissen zur maximalen Durchbiegung und zur Biegezugfestigkeit, die im Rahmen des Projektes erzielt wer-

den konnten, können erste Anpassungen beim Ansatz konventioneller statischer Berechnungsmodelle abgeleitet werden. Zudem wurden neue Herausforderungen identifiziert, wie beispielsweise die Herstellung von Bewehrungsstäben auf Basis von Naturfasern im Pultrusionsprozess. Neben der Herstellung der Stäbe ist auch noch die Gewährleistung der Feuchtebeständigkeit (Verhinderung des Quellens im Beton) tiefergehend zu untersuchen, da ansonsten eine Schädigung der Betonmatrix nicht auszuschließen ist. Es konnte gezeigt werden, dass die verwendeten Fasern bereits als Schwindbewehrung in den beschriebenen Anwendungsfeldern des konstruktiven Ingenieurbau und Hochbaus eingesetzt werden können. Bei untergeordneten Bauteilen mit statisch gering beanspruchten Konstruktionen konnte erfolgreich nachgewiesen werden, dass die Hanfbastbewehrungsstäbe auftretende Zugkräfte im Beton übernehmen können. Für weitere Pilotanwendungen sind neben der Streuung der Materialeigenschaften und des Quellverhaltens der Stäbe weitere Untersuchungen für die Optimierung des Verbundverhaltens erforderlich.

Methodik und Projektverlauf

3.1 Methodik

Ziel des Forschungsvorhabens war es, die technischen Eigenschaften der nachwachsenden Nutzhanfpflanze als ressourceneffizientes Bewehrungsmaterial und seine Beständigkeit und Langlebigkeit in zukunftsfähigen, emissionsarmen Betonen aufzuzeigen. Um diese Ziele zu erreichen, wurden im ersten Teil des Projektes sowohl Hanfbastfasern und Epoxidharze als auch daraus im Pultrusionsverfahren hergestellte Bewehrungsstäbe umfassend charakterisiert. Dies umfasste die Ermittlung der mechanischen Kennwerte an Zugprüfmaschinen (Universalprüfmaschine mit 2,5, 5 und 50 kN) und der Dauerhaftigkeit in alkalischen Medien. Rasterelektronenmikroskopische und computertomografische Untersuchungen gaben Einblick in die Mikrostruktur vor und nach Exposition in Alkalilösung und rundeten das Versuchsprogramm ab.

Die Entwicklung und Prüfung der Betone, der Hanfbastfasern und Hanfbastbewehrungsstäbe erfolgte in den vollausgestatteten Prüflaboren des Institutes für Werkstoffe des Bauwesens und des Institutes für Konstruktiven Ingenieurbau. Die Herstellung der Betone, insbesondere des haufwerksporigen Leichtbetons, erfolgte in dafür geeigneten Mischern.

Für die Bestimmung der Zusammensetzung der Porenlösung der Betone wurde eine spezielle Auspressvorrichtung an der Prüfpresse BPES 5000 kN bei einem Maximaldruck von 1500 MPa genutzt. Die anschließende chemische Analyse der Porenlösung mittels Emissionspektroskopie lieferte Ergebnisse zu den Gehalten an Alkali-Ionen. Der Portlanditgehalt wurde mit der Thermoanalyseapparatur STA 449 F3Jupiter bestimmt.

Im zweiten Teil des Forschungsvorhabens lag der Fokus auf dem Verbundverhalten der Bewehrungsstäbe in den Betonen. Dafür wurden vier verschiedene Profilierungsvarianten erprobt und mittels Auszugversuche (Pull-out-Test) nach DIN EN 10080 beziehungsweise RILEM RC6 an einer hydraulischen Vier-Säulen-Prüfmaschine mit einer maximalen Prüflast von 630 kN validiert. Für die Demonstratorversuche wurden Biegebalken mit den drei entwickelten Betonen und zwei Profilierungsvarianten hergestellt. Die Referenzbalken wurden mit konventionellem Betonstahl bewehrt. Die Biegezugprüfung erfolgte an der 50 kN Universal Prüfmaschine Hegewald

& Peschke inspekt table 50-1 gekoppelt mit dem optischen Messsystem der digitalen Bildkorrelation (engl. Digital Image Correlation – kurz DIC) Istra4D. Die Ermittlung der Biegezugsspannung und die Stabzugkräfte erfolgte auf Grundlage der DIN EN 1992 und der DIN EN 1520 mit der Spannungs-Dehnungslinie des Betons und der Annahme eines linear-elastischen Materialgesetztes der Stäbe der bekannten Stahlbetonbauweise

3.2 Projektverlauf

Das Forschungsprojekt BasEcoCrete wurde an der Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Bauingenieurwesen kooperativ vom Institut für Werkstoffe des Bauwesens und vom Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Professur für Massivbau bearbeitet. Die Herausforderung im Projekt lag in der Verknüpfung von Fachdisziplinen im stofflich-chemischen Bereich, in der Baustofftechnologie und der Werkstoffprüfung sowie in der Auseinandersetzung mit statisch-konstruktiven Fragestellungen. Die Komplexität der Forschungsfragen erforderte ein interdisziplinäres Team und modern ausgestattete Prüflabore mit einem breit gefächerten Equipment zur apparativen Analytik. Der Projektablauf mit den thematischen Schwerpunkten des Arbeitsprogrammes ist in Abbildung 8 dargestellt.

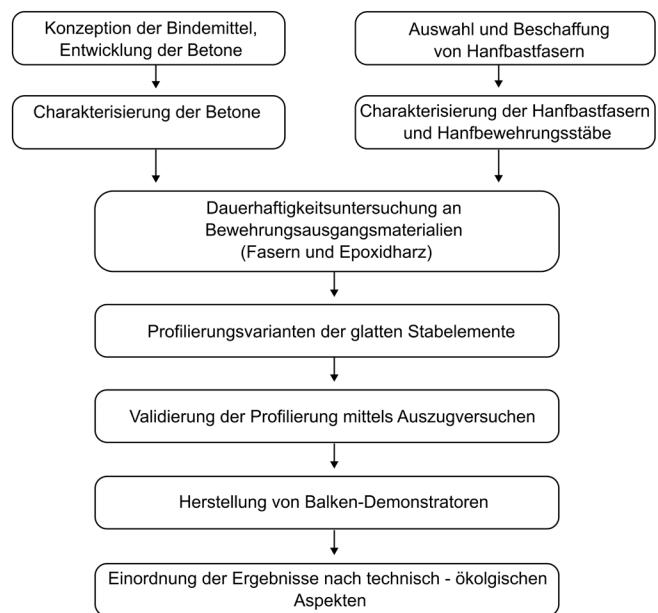


Abb. 8: Übersicht zum Projektablauf „BasEcoCrete“, Quelle: Universität der Bundeswehr München

Anhang

Literatur

Beuntner, N.; Sposito, R.; Thienel, K.-C., 2019: Potential of Calcined Mixed-Layer Clays as Pozzolans in Concrete. *ACI Materials Journal*, 116 (4): 19–29. <https://doi.org/10.14359/51716677>

Böcsa, I.; Karus, M., 1997: Der Hanfanbau – Botanik, Sorten, Anbau und Ernte (1. Aufl.). Heidelberg.

Fischer, H.; Drieling, A., 2024: Mechanische Faserprüfung. In: Plinke, B.; Fischer, S.; Fischer, H.; Graupner, N.; Müssig, J. (Hrsg.): Charakterisierung von Holz- und Naturfasern: Eine praxisbezogene Einführung für die Werkstoffentwicklung: 199–213. Weinheim. <https://www.doi.org/10.1002/9783527804191>

Haller, T.; Scherb, S.; Beuntner, N.; Thienel, K.-C., 2025: Renewable construction with lightweight concrete – Reclaimed recycled material systems with CO₂-absorption. *Construction and Building Materials* (466): 140339. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140339>

Müller, C., 2025: Vom Klinkerfaktor zur CO₂-Abscheidung – Klimafreundliche Zemente und Betone heute und morgen. *Beton* (75): 76–82.

Müssig, J., 2024: Begriffe und Definitionen. In: Plinke, B.; Fischer, S.; Fischer, H.; Graupner, N.; Müssig, J. (Hrsg.): Charakterisierung von Holz- und Naturfasern: Eine praxisbezogene Einführung für die Werkstoffentwicklung: 1–21. Weinheim. <https://www.doi.org/10.1002/9783527804191>

Richter, A. R., 2022: Zement-Merkblatt Betontechnik B14 – Infraleichtbeton.

Schnegelsberg, G., 1999: Handbuch der Faser-Theorie und Systematik der Faser (Bd. 1). Frankfurt am Main.

Spyridonos, E.; Witt, M.-U.; Dippon, K.; Milwich, M.; Gresser, G. T.; Dahy, H., 2024: Natural fibre pultruded profiles: Illustration of optimisation processes to develop high-performance biocomposites for architectural and structural applications. *Composites Part C: Open Access* (14): 100492. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2024.100492>

Projektbeteiligte



Universität der Bundeswehr München
Institut für Werkstoffe des Bauwesens
Prof. Dr.-Ing. Karl-Christian Thienel
Dr.-Ing. Nancy Beuntner
Manuel Isaia, M. Sc.



Universität der Bundeswehr München
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau
Prof. Dr.-Ing. Thomas Braml
Florian Zürnstein, M. Sc.

Naporo Klima Dämmstoff GmbH
Auggenthal 158
A-2054 Haugsdorf

FEAL d.o.o.
Trnska cesta 146
88220 Široki Brijeg
Bosnien und Herzegowina

Max Bögl Group
Max-Bögl-Straße 1
92369 Sengenthal

Impressum

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG



Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-23.31
Projektaufzeit: 10.23 bis 03.25
Bundesmittel in €: 129.639,50

Zuwendungsempfangende:
Universität der Bundeswehr München

Über Zukunft Bau

Mit dem Innovationsprogramm Zukunft Bau stärkt das BMWSB gemeinsam mit dem BBSR die Zukunfts- und Innovationsfähigkeit des Bausektors. Die Zukunft Bau Forschungsförderung schafft Vorbilder, die die Machbarkeit von neuen Ideen ausloten und die Baupraxis weiterentwickeln. Gefördert werden Forschungs- und Entwicklungsprojekte, die einen Gebäudebezug als Schwerpunkt haben und einen substantiellen Beitrag zur Bewältigung aktueller und künftiger Herausforderungen im Baubereich erwarten lassen.

zukunftbau.de

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31-37
53179 Bonn

Wissenschaftliche Begleitung

Dr.-Ing. Michael Brüggemann,
Brüggemann Kisseler Ingenieure
im Auftrag des BBSR, Referat WB 3
„Forschung und Innovation im Bauwesen“
zb@bbr.bund.de

Autorinnen und Autoren

Prof. Dr.-Ing. Karl-Christian Thienel
Universität der Bundeswehr München,
Neubiberg
christian.thienel@unibw.de

Prof. Dr.-Ing. Thomas Braml
Universität der Bundeswehr München,
Neubiberg

Dr.-Ing. Nancy Beuntrner
Universität der Bundeswehr München,
Neubiberg

Manuel Isaia
Universität der Bundeswehr München,
Neubiberg

Florian Zürnstein
Universität der Bundeswehr München,
Neubiberg

Redaktion

Universität der Bundeswehr München,
Neubiberg
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

Stand

März 2025

Grafisches Konzept

www.sans-serif.de

Satz und Barrierefreiheit

www.sans-serif.de
www.satzweiss.com

Bildnachweis

Titelbild: Universität der Bundeswehr München

Vervielfältigung



Dieses Werk ist lizenziert unter der Creative-Commons-Lizenz Attribution – Share Alike 4.0 (CC BY-SA 4.0). Diese Lizenz erlaubt unter Voraussetzung der Namensnennung des Urhebers und der Weitergabe unter gleichen Bedingungen die Bearbeitung, Vervielfältigung und Verbreitung des Materials in jedem Format oder Medium für beliebige Zwecke, auch kommerziell. Nähere Informationen zu dieser Lizenz finden sich unter: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de/>.

Die Bedingungen der Creative-Commons-Lizenz gelten nur für Originalmaterial. Die Wiederverwendung von Material aus anderen Quellen erfordert ggf. weitere Nutzungsgenehmigungen durch den jeweiligen Rechteinhaber.

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitiervorschlag

Thienel, K.-C.; Braml, T.; Beuntrner, N.; Isaia, M.; Zürnstein, F., 2025: Hanfbastfasern in klinkerarmen Betonen: Ökologische Ansätze für Konstruktionsbaustoffe der Zukunft. Herausgeber: BBSR – Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. Zukunft Bau – Forschung KOMPAKT 3/2025. Bonn. <https://doi.org/10.58007/n3z2-cf32>

 Bonn 2025
ISSN 2944-067X

Dieses Werk ging aus folgendem Forschungsbericht hervor:

Thienel, K.-C.; Braml, T.; Beuntrner, N.; Isaia, M.; Rauch, L.; Zürnstein, F., 2025: Hanfbastfasern als Bewehrungsmaterial in klinkerarmen Betonen (BasEcoCrete): Ökologische Ansätze für Konstruktionsbaustoffe der Zukunft. Herausgeber: Braml, T.; Brüning, M.; Kiendl, J.; Siebert, G.; Spannaus, M.; Thienel, K.-C.; Gebbeken, N.; Keuser, M.: Berichte aus dem konstruktiven Ingenieurbau 25 (1). Neubiberg.

Hier geht es zum kostenfreien Forschungsbericht:

 https://doi.org/10.18726/2025_2