

**Hanfbastfasern als Bewehrungsmaterial
in klinkerarmen Betonen (BasEcoCrete)**

**Hanfbastfasern als Bewehrungsmaterial
in klinkerarmen Betonen (BasEcoCrete)**

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. T. Braml

Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Brünig

Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Kiendl

Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Siebert

Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Spannaus

Univ.-Prof. Dr.-Ing. K.-Ch. Thienel

Prof. Dr.-Ing. N. Gebbeken

Prof. Dr.-Ing. M. Keuser

Schriftleitung und Organisation:

Univ.-Prof. Dr.-Ing.K.-Ch. Thienel

Institut für Werkstoffe des Bauwesens

Univ.-Prof. Dr.-Ing. T. Braml

Institut für Konstruktiven Ingenieurbau

Universität der Bundeswehr München

Werner-Heisenberg-Weg 39

85577 Neubiberg

Tel.: 089-6004-2517

Email: sekretariat.ki@unibw.de

© 2025

Autoren

Werner-Heisenberg-Weg 39

85577 Neubiberg

Der Druck der Schriftenreihe erfolgt mit freundlicher Unterstützung des Fördervereins Konstruktiver Ingenieurbau der UniBw München e.V.

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten. Mit Genehmigung der Autoren/Herausgeber ist es gestattet, dieses Heft ganz oder teilweise zu vervielfältigen.

ISSN 1431-5122

Hanfbastfasern als Bewehrungsmaterial in klinkerarmen Betonen (BasEcoCrete)

Thienel, K.-C., Braml, T., Beuntner, N., Isaia, M., Rauch, L., Zürnstein, F.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen aus Mitteln der Zukunft Bau Forschungsförderung.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-23.31

Projektlaufzeit: 10.2023 bis 03.2025

DOI: 10.18726/2025_2

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

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
Kurzfassung.....	9
Abstract	11
1. Einführung.....	1
2. Motivation	3
2.1. Naturfasern in Praxis und Forschung.....	3
2.2. Besonderheiten der Materialkennwerte von Hanfbastfasern.....	7
3. Zielstellung und Entwicklungsbedarf	11
4. Forschungsdesign	13
4.1. Arbeitshypothesen und methodischer Ansatz	13
4.2. Projektteam und Kooperationspartner.....	15
5. Projektverlauf und Ergebnisse.....	16
5.1. Auswahl der Materialien und Methoden	16
5.1.1. Hanfbastfasern.....	16
5.1.2. Auswahl Epoxidharze.....	21
5.1.3. Bewehrungsstäbe	23
5.1.4. Bindemittel und Betone	31
5.1.5. Biegebalken und Demonstratoren.....	35
5.2. Charakterisierung der Hanfbastfasern	37
5.3. Oberflächenbehandlung glatter Stabelemente zur verbesserten Verbundkraftübertragung	45
5.4. Charakterisierung der Bindemittel.....	49
5.4.1. Eigenschaften der Bindemittel.....	49
5.4.2. Alkalität der Bindemittel.....	50
5.5. Herstellung und Charakterisierung der Ökobetone	51
5.5.1. Materialparameter der Ökobetone	51

5.5.2.	Frischbetoneigenschaften und Verarbeitbarkeit	52
5.5.3.	Schwindverhalten von ÖkoLB mit Hanfbastfasern	53
5.5.4.	Feuchteverteilung.....	54
5.5.5.	Ökobilanzierung der Betone.....	55
5.6.	Dauerhaftigkeitsuntersuchungen	56
5.6.1.	Dauerhaftigkeit der Epoxidharze	56
5.6.2.	Dauerhaftigkeit der Hanfbastfasern.....	59
5.7.	Herstellung und Bewertung von hanfbewehrten Biegebalken als Funktionsdemonstratoren	62
5.7.1.	Herstellung und Bewertung von hanfbewehrten Biegebalken	62
5.7.2.	Quellverhalten der Hanfbastbewehrungsstäbe	72
6.	Diskussion und Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext	75
6.1.	Einordnung der Eigenschaften von Hanfbastfasern und Hanfbastbewehrungsstäben	75
6.1.1.	Eigenschaften von Hanfbastfasern	75
6.1.2.	Eigenschaften der Hanfbastbewehrungsstäbe.....	77
6.2.	Betone mit zementklinkerarmer Bindemittelmatrix	83
6.2.1.	Einordnung der Bindemittel	83
6.2.2.	Einordnung der Betone	86
6.3.	Beurteilung der Dauerhaftigkeit.....	92
6.3.1.	Dauerhaftigkeit der Hanfbastfasern.....	92
6.3.2.	Dauerhaftigkeit der Epoxidharze	93
6.4.	Ökologische Einordnung	95
6.5.	Bewertung der Demonstratorversuche.....	100
7.	Zusammenfassung und Fazit	102
	Mitwirkende	106
	Kurzbiographien	106
	Literatur	108

Abbildungsverzeichnis	120
Tabellenverzeichnis	126
Anlagen	128
A. Faserzugversuch.....	128
B. Auszugversuche.....	128
C. Biegebalken Demonstratoren.....	129
D. Ökobilanzierung	131
E. Epoxidharze	133

Kurzfassung

Die Verwendung ökologisch-optimierter Materialien und der Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen stellen einen zentralen Aspekt für zukünftiges Bauen dar. Im Forschungsprojekt wurden daher neue Ansätze für klimafreundliche Konstruktionsbaustoffe verfolgt, indem klinkerarme, weniger CO₂-emittierende und zudem noch ressourcenschonende Betone mit Bewehrungselementen aus nachwachsendem Hanfbastfasern 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 die klassische Stahlbewehrung 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 Schwindbewehrung oder Stabbewehrung.

Eine erste Herausforderung im Projekt war die Bestimmung der Materialparameter von Hanfbastfasern und den damit hergestellten Bewehrungsstäben. 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 der eingesetzten Auswertemethodik konnten für die verwendeten Hanfbastfasern aus dem Stängel der Nutzhanfpflanze *Cannabis Sativa L.* die Zugfestigkeit und das Elastizitätsmodul 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 das Elastizitätsmodul erforscht. Anhand der Ergebnisse zur Alkalität der drei untersuchten Betone muss eine hohe Alkalibeständigkeit der Fasern und Hanfbastbewehrungsstäbe vor allem unmittelbar nach dem Einbau und in der ersten Nutzungsphase gewährleistet sein. Die Hanfbastfasern erwiesen sich als sehr leistungsfähig in hochporosierten Betonen, wie dem eingesetzten

hochwärmedämmenden Leichtbeton (ÖkoLB), dessen plastisches Schwinden sie mindern konnten.

Die im Pultrusionsverfahren hergestellten Hanfbastbewehrungsstäbe haben zunächst eine glatte Oberfläche. Deshalb wurden die Stäbe nachträglich händisch profiliert, um den Verbund zwischen Stab und Beton und damit die Leistungsfähigkeit zu verbessern. Die Eignung der vier gewählten Profilierungsvarianten wurde in Pull-Out Versuchen validiert. Dabei erreichten die Stäbe mit einer „besandeten“ Profilierung die höchsten Verbundspannungen. Die Realisierung und Einbindung der Profilierung in den Herstellungsprozess der Pultrusion ist 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, wie der Vorbehandlung der Fasern und der Identifikation von Störfaktoren im Herstellungsprozess der Pultrusion, verspricht aber aufgrund der vorliegenden Ergebnisse ein beträchtliches Potenzial für die Zukunft. Das Portfolio klimafreundlicher und nachhaltiger Baustoffe bekommt mit Hanfbastbewehrungsstäben neben den etablierten Baustoffen einen weiteren aussichtsreichen Kandidaten, der die Ressourcenschonung weiter forciert. Neben den etablierten Wertschöpfungsketten des Holzbaus entsteht mit der Einführung von Hanfbastfasern als alternative, ökologische Betonbewehrung in Fasern oder Stabform eine neue Verwertungskette. Die im Projekt entwickelten Ökobetone besitzen im Vergleich zu konventionellen Betonen eine um 64 % niedrigere 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. Somit kann es mit BasEcoCrete gelingen, nachwachsende Ressourcen gezielt zu nutzen und für das Bauwesen attraktiv zu machen, sowie klimaschädliche CO₂-Emissionen deutlich und nachhaltig zu reduzieren.

Abstract

One of the main challenges in modern building materials research is achieving sustainable development and ecological optimization of building materials through the targeted use of renewable raw materials. Therefore, an essential part of the scientific investigations within the framework of this research project consisted of advancing classic reinforced concrete construction by researching hemp bast as a starting material for producing alternative reinforcement elements and developing resource-saving concretes. The objective in concrete production was to deliberately use low-emission binders to reduce the clinker content by up to 73 wt.-%. This approach aimed to develop sustainable concretes with various densities and porosities while minimizing their carbon footprint. As the embedded classic steel reinforcement is no longer sufficiently protected against corrosion due to the reduced use of clinker, using non-corrosive hemp bast fibers in combination with epoxy resins as starting materials for a new type of reinforcement presented a potential solution to this problem within the project.

The first challenge in the project was determining all material parameters for hemp fibers as well as the reinforcing bars. The natural growth of the hemp plant results in single fibers with different morphologies that influence their material characteristics. These could be effectively determined using an approach to establish equivalent cross-sectional areas. Furthermore, through this evaluation method, the tensile strength and elastic modulus of the hemp fibers could be assessed which were derived from the stem of the industrial hemp plant, *Cannabis Sativa L.*

A further crucial focus of the research project was investigating the durability of the hemp fibers and the epoxy resins needed for reinforcing bars in alkaline environments. To this end, tests were conducted to analyze the tensile strengths and modulus of elasticity of samples exposed to varying alkaline conditions with different pH values. The results on the alkalinity of the three tested concretes indicated that high alkali resistance of the hemp fibers and the resin bound hemp fiber rods must be ensured, particularly immediately after installation and during the initial phase of use. Hemp fibers used as such for shrinkage reinforcement are particularly effective in preventing plastic shrinkage in highly porous concretes, like the highly insulating lightweight concrete (ÖkoLB) employed.

The hemp reinforcement bars manufactured in a pultrusion process originally had a smooth surface. They were subsequently manually profiled to guarantee an effective bond between the bar and the embedding concrete. Four different profiling variations were validated through pull-out tests. Sand coating proved particularly effective as profiling in achieving sufficiently high bond stresses. The integration and implementation of profiling in the continuous pultrusion process is the subject of further interdisciplinary research.

The successful use of the new construction material BasEcoCrete was demonstrated by the production of bending beams as demonstrators. The demonstrators achieved sufficient tensile load capacity with the hemp bast reinforcement bars. While the use of hemp in the construction industry still requires extensive research, such as fibers pretreatment and identification of disruptive factors in the pultrusion process, the current results indicate considerable potential for the future. The portfolio of climate-friendly and sustainable construction materials will grow with hemp reinforcement bars by one prospective promising candidate besides the established building materials, which will accelerate the conservation of resources. Introducing hemp bast fibers as an alternative, ecological fiber in concrete or as a replacement for steel bars is going to create a new value chain alongside the existing one in timber constructions. Compared to conventional concretes, the eco-concretes developed in this project have up to 64 % lower CO₂ emissions. In addition, they improve the outstanding construction material of the 20th century by contributing to appealing and convenient applications in the future. Costs for CO₂ emissions fees can be significantly reduced by the eco-concretes' improved environmental impacts and furthermore they ensure an attractive economically reliable material in future construction practice. By utilizing BasEcoCrete, the targeted promotion of renewable raw materials can occur, sustainably and significantly reducing climate-damaging carbon dioxide emissions.

1. Einführung

Die Verwendung ökologisch-optimierter Materialien und die Nutzung erneuerbarer Ressourcen stellen einen zentralen Aspekt für zukünftiges Bauen dar. Stahlbeton ist der Baustoff unserer Zeit und als Konstruktionswerkstoff unabdingbar, jedoch bringt er einen hohen CO₂-Fußabdruck mit sich. Deshalb sind neue Ansätze für den Konstruktionsbaustoff Stahlbeton dringend notwendig. Für den Beton selbst wird bereits intensiv das Ziel verfolgt, die graue Emission durch die Verwendung **klinkerarmer Zemente** beträchtlich zu senken. Dies führt nicht nur zu veränderten mechanischen Materialeigenschaften, sondern auch zu einer Absenkung der Alkalität im Beton. Infolgedessen ist die klassische Stahlbewehrung im Konstruktionsbaustoff über die üblicherweise geplante Lebensdauer von 50 Jahren ggf. nicht mehr ausreichend vor Korrosion geschützt und erfordert die Suche **nach alternativen Bewehrungsmaterialien**. Hier setzt das geförderte Forschungsvorhaben an, indem als neuartige Bewehrung Hanfbastfasern gezielt in Form von Fasern als **Schwindbewehrung oder als Stabbewehrung** als Weiterentwicklung zum klassischen Stahlbeton eingesetzt werden sollen.

Nachwachsende Hanfbastfasern werden aus dem Stängel der vor Ort kultivierbaren Nutzhanf pflanze gewonnen. Daraus können Fasern als Ersatz für emissionsreiche Kunststofffasern oder Stabbewehrung aus Rovingen der Hanfbastrinde mit Epoxidharzbindung und -umhüllung als Ersatz für die übliche Betonstahlbewehrung gewonnen werden. Die mechanischen und die Dauerhaftigkeitseigenschaften dieser neuartigen Bewehrungsmaterialien sind bisher nur unzureichend bekannt und müssen systematisch erforscht werden. Dabei liegt besonderes Augenmerk neben der Beständigkeit in alkalischer Umgebung des Betons auch auf der starken Hydrophilie der Hanfbastrinde aufgrund des glykosidischen molekularen Aufbaus und der daraus resultierenden starken Feuchtaufnahme. Dies kann zu unerwünschtem Faserquellen führen und den Verbund im Beton signifikant beeinträchtigen. Ebenso gilt es, die Beständigkeit von Epoxidharzen und ihre Eignung bei Umhüllung von Hanfbaststäben aufzuzeigen.

Ökologische, emissionsarme Betone zeichnen sich durch einen geringen Zementklinkergehalt aus und werden mit Bindemitteln unter Zugabe von hohen Anteilen an Zementersatzstoffen hergestellt. Letztere können Produkte aus Sekundärkreisläufen (Hüttensande, Steinkohlenflugaschen, Silicastaub), natürlich

vorkommende Gesteinsmehle (Kalksteinmehle) oder natürliche oder industriell hergestellte Puzzolane (Trass, calcinierte Tone, gebrannte Schiefer) sein. Die CO₂-Emission von Zementen mit nur 50 M.-% Klinkergehalt reduziert sich durch den Einsatz der Zementersatzstoffe um ca. 300 kg CO₂/t Zement gegenüber Portlandzement. Mit dem vermehrten Einsatz von klinkerreduzierten Bindemitteln verändern sich jedoch auch die Eigenschaften der Betone und die Voraussetzungen für dauerhafte Betonkonstruktionen. Die größte Herausforderung ist die sinkende Alkalität im Beton mit abnehmendem Klinkergehalt im Zement. Dadurch kann das alkalische Milieu für den Korrosionsschutz konventioneller Stahlbewehrung nicht über die gesamte Nutzungsdauer aufrechterhalten werden. Der Einsatz von nicht korrosionsgefährdeten Hanfbast-Bewehrungselementen stellt somit einen äußerst attraktiven Ansatz für zukünftige Konstruktionen dar. Dabei lassen sich nicht nur die mechanischen Eigenschaften der beiden Werkstoffe, sondern auch das gemeinsame ökologische Image gut vereinen.

Das übergeordnete Ziel des Forschungsprojektes besteht somit darin, Hanfbastrinde als Bewehrungselement in modernen, ökologisch optimierten Betonen zukunftsfähig zu machen und die Möglichkeiten dieses nachwachsenden Rohstoffes für die Bauindustrie darzulegen. Dafür sollen sowohl die technischen Eigenschaften des Materials, als auch seine Beständigkeit und Langlebigkeit im Beton aufgezeigt werden.

2. Motivation

2.1. Naturfasern in Praxis und Forschung

In der Menschheitsgeschichte zählt Nutzhanf zu den ältesten Kulturpflanzen der Welt. Im prähistorischen Alltag bildeten Schnüre und Seile einen wichtigen Bestandteil des täglichen Lebens (Böhm, 2020). In der Steinzeit wurde für die Herstellung feiner Fäden und Schnüren in verschiedenen Stärken oder auch von dicken Seilen eine Zwirntechnik angewandt. Ausgangsmaterial hierfür waren faserige Materialien wie Bastfasern aus Bäumen, Gräser, Binsen oder Pflanzenfasern wie Brennnessel-, Flachs- oder Hanfbastfasern (Reichert, 2020, S. 70). Später, zur Zeit der Kelten, wurde der Hanf und seine Faser zur Herstellung von Textilien eingesetzt. Dies belegen Funde eines frühkeltischen Fürstengrabes von Hochdorf zur Mitte des fünften Jahrhunderts v. Chr. (Küster, Keefer, Krause, & Landesdenkmalamt Baden-Württemberg, 1985). Eine weitere Verwendung von Hanf findet sich in der Seefahrt (Herer, 2022, Kap. 2). Dabei kam der Nutzhanf in Form von Seilen für die Takelage zum Einsatz. Im Vasa Museum in Stockholm sind Seilfragmente des gleichnamigen Schiffes aus dem siebzehnten Jahrhundert ausgestellt. Ende des neunzehnten Jahrhunderts findet sich eine der ersten wissenschaftlichen Untersuchungen über die mechanischen Eigenschaften von Hanf (Bauschinger & Föppl, 1888). Mit Aufkommen erster großer Stadthäuser im Zeitalter der Industrialisierung wurden die ersten Fahrstühle (damals als Fahrkörbe bezeichnet) unter anderem an Seilen aus Hanf aufgehängt und betrieben (Deutsche Bauzeitung & Deutscher Baukalender, 1880).

In den vergangenen 100 Jahren sind die Produkte, die auf Basis von Nutzhanf hergestellt werden können, zunehmend in Vergessenheit geraten. Hanf diente lange Zeit als Material zur Abdichtung von Rohrverbindungen und findet heute nur noch vereinzelt Anwendung. Vereinzelt wird der Hanf in kleinen Mengen zur Herstellung von Seilen oder in der Textilindustrie verwendet. Davon abgesehen erfreut sich der Nutzhanf allmählich erneuter Aufmerksamkeit in weiteren Anwendungsfällen. So wird er beispielweise als Faserverbundwerkstoff zur Herstellung von Biokompositen eingesetzt (Graupner, Weber & Müssig, 2021). Allerdings werden in der heutigen Nutzung des Hanfes bislang nicht alle Bestandteile der Pflanze verwendet. Die Nutzhanfpflanze besteht aus einem verholzten Innenteil, den sogenannten Schäben und der äußeren Rinde. Unterhalb der Rinde liegt das Bastgewebe mit seinen

Fasern, die dort als Faserbündel vorliegen (Hanf & Drescher, 1997; Heuser, König, Wagner, v. Frank, Oertel & Oertel, 1927; Schöberl, Grieb & Fritz, 2020). Hanfschäben besitzen hervorragende Dämmeigenschaften und werden aktuell bereits im Bauwesen zur Herstellung von Dämmplatten eingesetzt.

Die heutige Verwendung von verschiedenen Naturfasern beschränkt sich nicht nur auf den Einsatz in Biokompositen für Faserverbundwerkstoffe oder Dämmstoffe, sondern reicht auch bis zum Einsatz als Bewehrungselemente in Betonen. Naturfasern stellen dabei für den Einsatz in Betonen eine neuartige Entwicklung dar, die erst seit kurzem näher in den Fokus der Forschung rückt. Alternative Materialien zur klassischen Betonstahlbewehrung werden weltweit untersucht. Grundsätzlich kann die Bewehrung des Massivbaus in zwei Gruppen unterschieden werden: metallische und nichtmetallische Bewehrung. Seit Verwendung des Verbundwerkstoffs Stahlbeton ab Ende des neunzehnten Jahrhunderts ist die metallische Bewehrung in Form des bekannten Bewehrungsstahls etabliert. Neben der klassischen Betonstahlbewehrung existieren noch weitere Vertreter metallischer Bewehrung, wie nicht rostende Bewehrung aus Edelstahl oder beschichteter Betonstahl (Zintel, Angst, Keßler & Gehlen, 2014). Zur nichtmetallischen Bewehrung zählen synthetische Fasern wie Glas- oder Carbonfasern, sowie Fasern natürlichen Ausgangsmaterials wie Basalt- oder Naturfasern.

Nachwachsende Rohstoffe wurden von verschiedenen Forschergruppen auf ihre Eignung als Bewehrungsmaterial untersucht. In Nigeria untersuchte ein Team die Eignung von Streifen eines Kokosnuss-Stammes als Bewehrung einer Platte (Ofuyatan, Olowofoyeku, Adaramaja, Oluwafemi & Edeki, 2020). Auch schnell wachsende Rohstoffe wie Bambus wurden bereits als Bewehrungsmaterial in Beton verwendet. Bambus besitzt holzartige Eigenschaften, zählt allerdings zur Familie der Gräser (Murugesh Babu & Chandrasekhara, 2023, S. 3). Bereits zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts wurde Bambus als Bewehrungsmaterial untersucht. 1914 wurden am Massachusetts Institute of Technology erste Versuche mit Bambus als Bewehrungsmaterial für Beton durchgeführt (Chow, 1914). Im ersten Drittel und zur Mitte des letzten Jahrhunderts folgten weitere unabhängige Untersuchungen (Hebel, Javadian & Heise, 2013). In neuen Untersuchungen an Bambus wurde das Verbundverhalten besandeter Bambusbewehrung (Javadian, Wielopolski, Smith & Hebel, 2016) und von Steckbügeln aus Bambus (Javadian, Smith & Hebel, 2020) betrachtet.

Für Naturfasern finden sich weltweit Arbeiten, zur Eignung von Fasern unterschiedlichster Pflanzen für eine Anwendung in Beton. So ging man beispielsweise der Frage nach der Eignung von Rotkiefernadeln als Faserbewehrung in ultrahochfestem Beton (engl.: ultra high performance concrete - UHPC) in der Türkei nach (Tolga Cogurcu, 2022) oder untersuchte den Einsatz kurz geschnittener Bananenfaser (25 bis 30 mm Länge) und deren Eignung als Bewehrung für unbewehrten Beton (Anm. d. V.: Eignung als Schwindbewehrung) hinsichtlich der Verformungs- und Festigkeitseigenschaften (Kurda, Ali, Azab, Ahmed, El Ouni & Elhag, 2022). Mit dem Einsatz von Bananenfaser als Biegebewehrung eines Balkens konnte die Biegezugfestigkeit, verglichen mit einem unbewehrten Balken, um 25 % gesteigert werden (Mostafa, Elbehiry, Elnawawy, Kassem, Zaher & Uddin, 2020). In Indonesien ersetzten Forschende den Bewehrungsstahl durch Sisalfasern als konstruktive Bewehrung in Leichtbetonbalken. Dabei wurden acht Millimeter starke Bewehrungsstäbe aus Sisal-Seil hergestellt, die mit einem Polyesterharz überzogen waren (Murtiadi & Akmaluddin, 2016). Einen weiteren Bewehrungstyp auf der Basis von Fasern stellten Forschende aus Indien her. Bei diesem Komposit-Bewehrungsstab kamen Fasern der Areca Palme kombiniert mit Biokohle, hergestellt aus Pflanzenabfällen, und Epoxidharz zum Einsatz. Die Zugabe von Biokohle sollte die mechanischen Eigenschaften des Stabes weiter steigern. Als Ergebnis wurde bei einer Zugabe von 1 bis 3 Vol.-% Biokohle eine Steigerung der Zugfestigkeit des Bewehrungsstabes und bei der Zugabe von mehr als 5 Vol.-% eine Abnahme der Zugfestigkeit zusammen mit der verwendeten Areca Fasern festgehalten (Kumar & Parthipan, 2023).

Die Anwendung von Naturfasern im Bauwesen ist bislang noch nicht etabliert. Eine erste Anwendung neuer biobasierter Baustoffe, speziell von Naturfasern, ist der Hybrid-Flachs-Pavillon der Baden-Württembergischen Landesgartenschau 2024 in Wangen im Allgäu. Ein weiteres Beispiel für erste Anwendungen von Naturfasern im Bauwesen ist das EU-Projekt „Smart Circular Bridge“ aus dem Interreg North-West Europe Programm des European Regional Development Fonds. In diesem Projekt wurden drei Brücken für Radfahrer und Fußgänger aus einem Biokomposit bestehend aus Flachs und Hanf geplant. Die erste Brücke in Almere (Niederlande) wurde im Jahr 2022 eröffnet. Die zweite Brücke steht in Ulm (Deutschland) und wurde im Februar 2025 eingeweiht (Bernstein, 2025; Institut für Tragkonstruktion und konstruktives Entwerfen (Universität Stuttgart), 2025). Die Realisierung der geplanten dritten Brücke

in der Gemeinde Bergen op Zoom (Niederlande) steht noch aus (Dahy, 2023), erscheint allerdings unwahrscheinlich, da in der jüngsten Pressemeldung der Stadt Ulm nur noch von zwei Brücken im Projekt berichtet wird (Gildehaus, 2025). In einem vergleichbaren Projekt wurde 2016 eine Fußgängerbrücke aus Biokomposit Material über den Fluss Dommel in den Niederlanden realisiert (Blok, Smits, Gkaidatzis & Teuffel, 2019). Für die Anwendung von Flachs als Bewehrungselement in Beton wurden in Deutschland bereits erste Forschungsarbeiten mit Flachsfasertextilien als Bewehrung für einaxial zugbeanspruchte Bauteile (Ricker, Zecherle, Kuhn, Binde, Haxter, Winkelmann, Freitag & Hörmann, 2023; Zecherle, Ricker, Binde, Winkelmann & Haxter, 2023) und Flachsfasergewebe für den Bewehrungseinsatz in Beton untersucht (Ricker et al., 2023).

Naturfasern können in drei verschiedene Einsatzformen unterschieden werden: Fasern, Gewebe (gewellte Fadenlage) oder Gelege (gesteckte Fadenlage) und der Einsatz als stabförmiges Komposit. Hanfbastfasern wurden bereits als Schwindbewehrung in Spritzbeton eingesetzt und von der ‚American Shocrete Association‘ auf ihre Eignung untersucht (Morgan, Zhang & Pildysh, 2017). In den USA wurde die experimentelle Herstellungsmethode von vermengten Bewehrungsstäben aus Hanf- und Polypropylen Garnen mit einem Thermoplast untersucht. Betrachtet und bewertet wurde der Herstellungsprozess der vermengten Stäbe, wobei als Endprodukt jeweils ein glatter Stab vorhanden war. Diese Stäbe wurden in drei Herstellungsvarianten gefertigt: eine parallele Methode (parallel angeordnete Hanf- und Polypropylen-Garne), einer gewickelten Methode (Seil aus acht versponnene Hanf- und Polypropylen-Garnen) und einer Ummantelungsmethode (Ummantelung der Hanfgarne mit einem Thermoplast Polyethylene). Von den untersuchten Varianten wurde die Ummantelungsmethode als die Beste festgehalten, da an der Oberfläche der daraus hergestellten Stäbe die geringste Anzahl an freiliegenden Hanfgarne und damit die beste Überdeckung erzielt wurde (Cohen, 2021).

Der bisherige Einsatz von Hanf im Bauwesen umfasst vor allem die Schäben. Hanfschäben besitzen sehr gute wärmedämmende Eigenschaften und werden vor allem für nicht lastabtragende Strukturen als Dämmmaterial im sogenannten Hanfbeton (engl.: Hempcrete) verwendet (Bedlivá & Isaacs, 2014). Hanfkalk bzw. -beton setzt sich aus Hanfschäben und Naturkalk bzw. Zement zusammen. Hanfschäben besitzen eine geringe Druckfestigkeit, wodurch die Druckfestigkeit des Hanfbetons ebenfalls sehr gering ausfällt. In der Literatur reicht die Angabe der

Druckfestigkeit des Hanfbetons in Abhängigkeit seiner Dichte über 0,25 (Bohn, Mazelli & Bocco, 2022) und 0,35 (Chabannes, Garcia-Diaz, Clerc & Bénézet, 2015) bis hin zu einer Bandbreite von 0,06 – 0,825 MPa (Adam, Isopescu, Judele, Bucur & Lepădatu, 2022) oder 0,18 – 0,8 MPa (Elfordy, Lucas, Tancret, Scudeller & Goudet, 2008). Damit ist der Hanfbeton nur bedingt als Konstruktionsbaustoff einsetzbar (Bourdot, Moussa, Gacoin, Maalouf, Vazquez, Thomachot-Schneider, Bliard, Merabtine, Lachi, Douzane, Karaky & Polidori, 2017; Chabannes et al., 2015; Elfordy et al., 2008). Hanfbeton wird in Gebäuden mit Skelettbauweise zur Ausfachung für nicht lastabtragende Zwecke verwendet. Neuere Untersuchungen setzen den Hanfbeton auch zu lastabtragenden Zwecken ein (Bohn et al., 2022). Eine Verwendung der Fasern im Bauwesen ist bislang nicht weit verbreitet. Vereinzelt findet sich Beton, dem Fasern (Anmerk. d. Verf.: meist als Schwindbewehrung) beigemischt wurden (Li, Wang & Wang, 2006; Morgan et al., 2017).

Mit der aufkommenden Forschung an Textilbeton wurde zeitgleich in Deutschland in den 1990er Jahren zu Anbau, Ernte, Aufbereitung von Hanf und dessen stofflicher Verwertung geforscht (Hanf & Drescher, 1996, 1997; Technische Universität Chemnitz-Zwickau, Institut für Allgemeinen Maschinenbau und Kunststofftechnik, 1998). Eine Anwendung als Bewehrung in Beton stand zu diesem Zeitpunkt noch nicht in Aussicht.

2.2. Besonderheiten der Materialkennwerte von Hanfbastfasern

Hanf ist eine einjährige krautartige Pflanze und zählt zur Familie der Hanfgewächse (Cannabaceae) (Heuser et al., 1927, S. 11; Körber-Grohne, 1987, S. 379). Die Wuchshöhe liegt zwischen 1,0 und bis zu 4,5 m und hängt von der Art des Hanfes ab. Der Stängeldurchmesser wiederum ist abhängig von der Bepflanzungsdichte und damit dem zur Verfügung stehend Standraum. Morphologisch betrachtet besteht der Hanfstängel aus Holz- und Bastgewebe. Das Holzgewebe bildet die sogenannte Schäbenmasse. Das äußere Bastgewebe ist das Leitungssystem der Pflanze. Dort liegen unter anderem die Bastfasern. Die Fasern dienen der Zug-, Reiß- und Drehfestigkeit des Stängels. Mit fortschreitendem Pflanzenalter verholzen die Faserzellen und beeinflussen dadurch die Faserqualität. Die Lignine erhöhen die Druck- und Zugfestigkeit der Pflanze zum Nachteil der Reiß- und Drehfestigkeit sowie der Elastizität (Bòcsa & Karus, 1997, S. 26–30). Die Faserqualität beschreibt hierbei

die Eigenschaften wie Reife- oder Röstgrad, Festigkeit, Feinheit, Verteilung oder auch den Grad der Verschmutzung der Fasern (Gusovius & Müssig, 1998).

Hinsichtlich der Sorten bestehen beträchtliche Unterschiede im Fasergehalt und Erträgen der Pflanzenstängel sowie der Hanfsamen (Bòcsa & Karus, 1997, S. 65). Eine detaillierte Auflistung über Sorten und deren Erträge ist in (Bòcsa & Karus, 1997, Kap. 4.4) zu finden. Darin enthalten sind auch detaillierte Angaben zu den Anforderungen an den Boden, dessen Beschaffenheit und Bearbeitung sowie den Licht-, Wärme-, Wasser- und Nährstoffbedarf für den Anbau als Faserhanf, zu dem die in Mittel- und Südosteuropa angebauten Hanfsorten zählen. Faserhanf mit einem hohen Ertrag und guter Qualität benötigt einen sogenannten echten „Faserhanfboden“, der vor allem aus Löß entstanden ist. Solche Böden besitzen ein Potential von zehn Tonnen pro Hektar trockenem Stängelertrags (Bòcsa & Karus, 1997, S. 78). Demgegenüber steht eine Untersuchung zur Phytosanierung (Sanierung von kontaminierten oder verunreinigten Böden durch Pflanzen) von mit Schwermetall kontaminierten Böden durch Nutzhanf, bei der kein Einfluss der Schwermetalle auf die Faserfestigkeit und -qualität beobachtet wurde (Linger, Müssig, Fischer & Kobert, 2002).

Die Gewinnung der Bastfasern erfolgt in einem ersten Schritt in der sogenannten Röste (biologischer Prozess: Aufschluss der Pektine und Lignine zwischen Stängel und Fasern). Historisch betrachtet war vor allem die Feld- oder Wasserröste weit verbreitet und dauerte zwischen vier und sechs Wochen (Bòcsa & Karus, 1997, S. 139; Heuser et al., 1927, S. 79). Auch heute ist das übliche Ernteverfahren zur Fasergewinnung die Feldröste, mit dem Ziel eines leichten Lösens der Fasern von den Schäben, bei der die dann gerösteten und getrockneten Stängel bis zum mechanischen Aufschluss zu Ballen gepresst eingelagert werden können (Schöberl et al., 2020, S. 13). Mit den Untersuchungen zur stofflichen Nutzung der Hanfpflanze und dem Einsatz als Winterhanf ist neben der klassischen Feldröste auch eine Standröste über die Wintermonate möglich (Rinklebe & Richter, 2019). Der Röstgrad wird zumeist augenscheinlich über die Farbe der Fasern bestimmt und ist abhängig von den Wetterbedingungen während der Feldliegezeit des Hanfstrohs (Hanf & Drescher, 1996, S. 78). Mit der Verwendung optischer Hilfsmittel kann der Röstgrad auch mittels Spektroskopie im nahen Infrarotbereich (Nahinfrarot-, kurz NIR-Spektroskopie) erfolgen, wodurch indirekt der Abbau der Kittsubstanzen bestimmt wird. Das geschieht über das Verhältnis zwischen Faserschwärzung, entstanden durch sporentragende

Pilze, zur Zellulosebande (Gusovius & Müssig, 1998). Sobald die Kittsubstanzen im Stängel weitgehend, allerdings noch nicht vollständig abgebaut sind, ist der optimale Röstgrad für die Entholzung erreicht (Hanf & Drescher, 1996, S. 78). In neueren Literaturquellen wird der Zeitpunkt der ideellen Röste zur Fasergewinnung mit hoher Qualität als schwierig zu bestimmender Punkt beschrieben, da die Methoden nicht leicht anwendbar sind und nicht vollständig ausgereift sind (Angulu & Gusovius, 2024). Im Fall einer Unterröstung können die Fasern nur schwer vom verholzten Innenteil gelöst werden und die gewonnene Faser wird spröde und weniger geschmeidig. Eine Überröstung hat eine Abnahme der Faserfestigkeit und -ausbeute zur Folge, da hier neben den Kittsubstanzen eine ganze Schicht der Zellwand abgebaut wird (Hanf & Drescher, 1996, S. 78). Nach der Röste folgt der mechanische Faseraufschluss, in dem die Stängel aufgebrochen werden. Zumeist werden in diesem Schritt die Bastfasern bereits vom verholzten Innenteil getrennt. Neben dieser physikalischen Aufschlussart können allgemein noch drei weitere Verfahren zur Trennung von Schäben und Bastrinde unterschieden werden: physikalisch/chemisch (Dampfdruck-, Ultraschallaufschluss), chemisch- (in Lauge) oder der mikrobielle Aufschluss (Carus, Gahle, Cezar, Vogt, Ortman, Grotenhermen, Breuer & Schmidt, 2008, S. 106). Damit liegen die Bastfasern als Ausgangsmaterial zur Weiterverarbeitung vor.

Eine einzelne Hanfbastfaser ist ohne optische Hilfsmittel nicht zu identifizieren, denn sie besitzt einen Durchmesser von wenigen Mikrometern. Biologisch gesehen entspricht eine Einzelfaser einer Zelle (Fischer & Drieling, 2024, S. 200). Bei den vom menschlichen Auge erkennbaren Fasern wird von Faserbündeln gesprochen. In diesen Faserbündeln sind mehrere einzelne Fasern miteinander verklebt und verkittet (Schnegelsberg, 1999, S. 505). Nach Fischer & Drieling (2024, S. 200) stellen Faserbündel bei mechanisch aufgeschlossenen Fasern die kleinsten messbaren Elemente dar. Liegen mehrere Faserbündel zusammen, bilden diese ein Hanfbastfaserbündelkollektiv; mehrere Hanfeinzelfasern bilden hingegen ein Hanfeinzelfaserkollektiv (Fischer & Drieling, 2024, S. 200). Die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften einer einzelnen Hanfbastfaser ist damit aufgrund ihrer speziellen Struktur nicht mit vertretbarem Aufwand möglich (Gusovius & Müssig, 1998). Sie werden stets als Faserbündel bzw. als Faserbündelkollektiv bestimmt. Dementsprechend können in Kollektiven einerseits sehr grobe und andererseits sehr kleine Faserbündel zusammenkommen. Werden einzelne Hanfbastfaserbündel unter einem Rasterelektronenmikroskop betrachtet, so besitzen diese eine knotige (nodöse)

Struktur. Hinzu kommen die unterschiedlichen Faserverläufe der Einzelfaser. Einzelfasern können schlicht oder kraus ausgebildet sein. Krause Faserverläufe wiederum lassen sich in bogig, geknickt oder gewandelt unterteilen (Müssig, 2024, S. 9). Bei der Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Hanfbastfasern spielt die Faserfeinheit eine zusätzliche Rolle. Die Faserfeinheit ist eine Querschnittsgröße und beschreibt die Morphologie eines einzelnen Faserquerschnitts (Schnegelsberg, 1999, S. 214, 505). In der Bestimmung der mechanischen Eigenschaften besitzt die Faserfeinheit im Falle des Hanfs einen Einfluss auf die gemessene Werte. Hintergrund sind die unterschiedlichen Anordnungen der Einzelfasern in den Faserbündeln (Verwindungen, Verkürzungen, etc.) sowie die Querschnittsgröße der Einzelfasern. In einem Hanfbastfaserbündel kann bei der Durchführung eines Zugversuchs die Kraft von der Faserbündelfestigkeit auf die Einzelfaserfestigkeit übergehen (Fischer & Drieling, 2024, S. 205).

3. Zielstellung und Entwicklungsbedarf

Im vorliegenden Forschungsvorhaben galt es, die technischen Grundlagen zur Reaktivierung von Hanfbastfasern als nachwachsenden Rohstoff im Bauwesen zu schaffen. Dabei lag der Fokus auf der Entwicklung einer neuen, stabförmigen Bewehrung, welche aus den Hanfbastfasern mit Epoxidharzummhüllung besteht. Die Herstellung stabförmiger Bewehrungselemente im industriellen Maßstab steht dabei noch ganz am Anfang der Entwicklung und hat großes Entwicklungspotential. Für Naturfasern als Schwindbewehrung war die Eignung darzustellen, da sich hier ohne größeren technologischen Entwicklungsbedarf auch kurzfristig reelle Chancen für eine Anwendung ergeben. Damit könnten die bislang eingesetzten synthetischen und mineralischen Hochleistungsfasern ersetzt bzw. das Portfolio an Schwindbewehrung ergänzt werden. Das vorliegende Forschungsprojekt soll somit einen Beitrag zur Verlagerung von erdölbasierten und energieintensiven Ressourcen hin zu nachwachsenden und energiearmen Ressourcen zur Herstellung klimafreundlicher Baustoffe und Bauteile leisten.

Ziel des Projektes war es, erstmalig die Eignung von Hanfbast-Bewehrungselementen in emissionsarmen, zukunftsfähigen Betonen aufzeigen. Dafür mussten sowohl die technischen Eigenschaften dieser neuartigen Bewehrungsmaterialien, als auch seine Beständigkeit und Langlebigkeit in zukunftsfähigen Betonen aufgezeigt werden. Das Projekt beinhaltet **vier technische Meilensteine**.

Meilenstein 1: Oberflächenbehandlung glatter Stabelemente zur Verbundkraftübertragung

Der konstruktive Anspruch an stabförmige Bewehrungselemente erfordert den Verbund innerhalb der Materialfuge Stabelement - Beton. Damit in Wechselwirkung steht die Oberflächenbeschaffenheit der Stäbe und deren Durchmesser, die Zug- und Druckfestigkeit des Betons und die Betonüberdeckung zum freien Rand. Es mussten verschiedene Profilierungsvarianten untersucht und validiert werden.

Meilenstein 2: Eigenschaften der Bindemittel- und Betonmatrix sowie ökologische Bewertung der zukunftsfähigen Betone

Bindemittelreduzierte Betone unter dem Anspruch einer zukunftsfähigen Leistungsfähigkeit lassen auf ein großes Potential für klimagerechtes Bauen in der

Zukunft schließen. Die technischen Parameter dieser Betone sind jedoch nur unzureichend bekannt und müssen erforscht werden.

Eine signifikante Senkung des ökologischen Fußabdruckes kann durch leistungsfähige Zementersatzstoffe erreicht werden. Die Ökobilanz der entwickelten Betone für die Phasen A1-A3 wurde mit Branchenreferenzwerten verglichen und das Emissionseinsparpotential bewertet.

Meilenstein 3: Eignung der Hanfbastfaserbewehrung und Dauerhaftigkeitsuntersuchungen

Die Anwendung von Hanf als Bewehrung in einer Betonmatrix ist bislang neuartig. Die Dauerhaftigkeit der Hanfbastfaserbewehrung und der Epoxidharzummhüllung der stabförmigen Bewehrung wurde für das alkalische Milieu des Betons systematisch untersucht und dargestellt.

Meilenstein 4: Herstellung und Prüfung eines Funktionsdemonstrators

Als Funktionsdemonstratoren wurden Biegebalken aus den drei entwickelten Ökobetonen mit Hanfstabzugbewehrung verschiedener Profilierungen hergestellt. Die Zugkraftübertragung durch die Hanfbastbewehrungsstäbe wurde untersucht und die Praxistauglichkeit dieses neuartigen Verbundwerkstoffes bewertet.

Die Kriterien für zukünftiges Bauen werden neben den technologischen Anforderungen an den Beton einen besonderen Fokus auf eine gezielte CO₂-Einsparung sowie die Verwendung von den ökologischen, ressourcenschonenden Materialien erfüllen müssen und sollten daher gezielt betrachtet werden (Abbildung 1). Das vorliegende Forschungsvorhaben wird dazu einen entscheidenden Beitrag leisten.

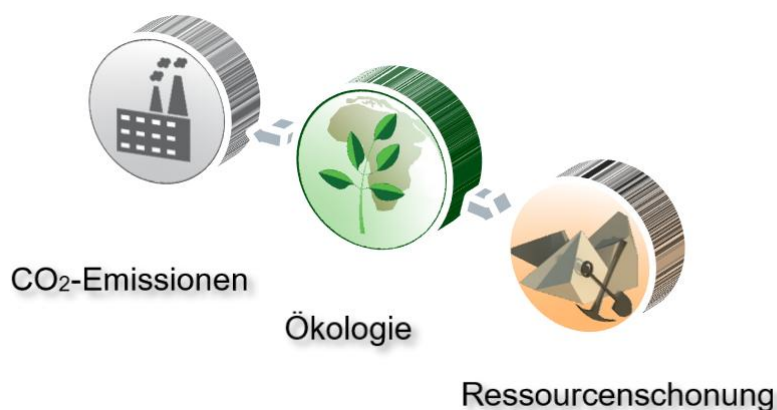


Abbildung 1 – Kriterien für zukünftiges Bauen mit Beton

4. Forschungsdesign

4.1. Arbeitshypothesen und methodischer Ansatz

Zukünftiges Bauen mit Beton erfordert den Einsatz von emissionsarmen, ressourcenschonenden Bindemitteln. Um klimafreundlichere Baustoffe zu entwickeln, wurden in diesem Projekt innovative Ansätze verfolgt. Insbesondere wird seit über 15 Jahren daran gearbeitet, die Treibhausgas-Emissionen von Beton durch den Einsatz von Bindemitteln mit geringem Klinkeranteil zu reduzieren. Dies bewirkt nicht nur Veränderungen der mechanischen Eigenschaften, sondern senkt auch die Alkalität des Betons. Die hohe Alkalität herkömmlicher Betone bietet konventionellen Stahlbewehrungen einen wirksamen Korrosionsschutz. Eine Herabsetzung dieser Eigenschaft führt daher notwendigerweise zur Auseinandersetzung mit alternativen Bewehrungsmaterialien. Dieses Projekt zielte darauf ab, Betone mit emissionsarmen Bindemitteln zu entwickeln und gleichzeitig dafür geeignete Bewehrungsstäbe aus Hanf und Epoxidharz zum Einsatz zu bringen. Dieser neuartige Werkstoff erhielt im Forschungsvorhaben das Akronym **BasEcoCrete**. Für die Entwicklung des neuen Konstruktionswerkstoffes BasEcoCrete lagen im Forschungsprojekt folgende Arbeitshypothesen und Forschungsfragen zugrunde:

Arbeitshypothesen

1. Fasern, die in der Bastschicht der Hanfstiele vorkommen, haben eine hohe Zugfestigkeit und eignen sich deshalb besonders gut als nachwachsender Werkstoff im Konstruktionsbeton.
2. Hanfbastfasern sind besonders attraktiv für klinkerarme Betone mit niedrigerer Alkalität, wie sie in Zukunft eingesetzt werden sollen, da sie keinen Korrosionsschutz in Form eines hochalkalischen Milieus benötigen.
3. Die Eigenschaften von klinkerarmen Betonen unterschiedlicher Dichte und Porosität prädestinierten sie für den Einsatz nachwachsender, korrosionsbeständiger Hanfbastfasern.
4. Die mechanischen Eigenschaften von Hanfbastfasern sind gut verträglich mit klinkerarmen Betonen, aufgrund ihres geringeren E-Moduls und ihrer Festigkeitseigenschaften.
5. Die klimaschädlichen Emissionen werden im Vergleich zu Stahlbeton durch diesen neuartigen Konstruktionsbaustoff deutlich und nachhaltig reduziert.

6. Mit dem Einsatz von Hanfbastfasern im Beton wird die Nutzung von regionalen und nachwachsenden Ressourcen gefördert.

Forschungsfragen

1. Die mechanischen Eigenschaften (Zugfestigkeit, E-Modul) von nachwachsenden Rohstoffen wie Hanfbastfasern und damit hergestellter Bewehrungsstäbe streuen stark und sind bis dato nicht systematisch erfasst. Die Kennwertbestimmung an Hanfbastfasern und damit hergestellter Bewehrungsstäbe ist ausgesprochen anspruchsvoll und erfordert eine große Fachexpertise gekoppelt mit entsprechendem Prüfequipment. Die Prüfmethodik ist im Vorhaben entsprechend weiterzuentwickeln.
2. Für den Einsatz von Hanfbastfasern in Form von Schwindbewehrung ist der Einfluss auf die Verarbeitbarkeit des Betons aufgrund einer hohen Wasseraufnahme der Fasern zu erforschen.
3. Das Verbundverhalten der Bewehrungsstäbe im Beton muss untersucht werden, um die Kraftübertragung sicherzustellen.

Zur Beantwortung dieser Forschungsfragen und Thesen wurde der in Abbildung 2 dargestellte Projektablauf gewählt.

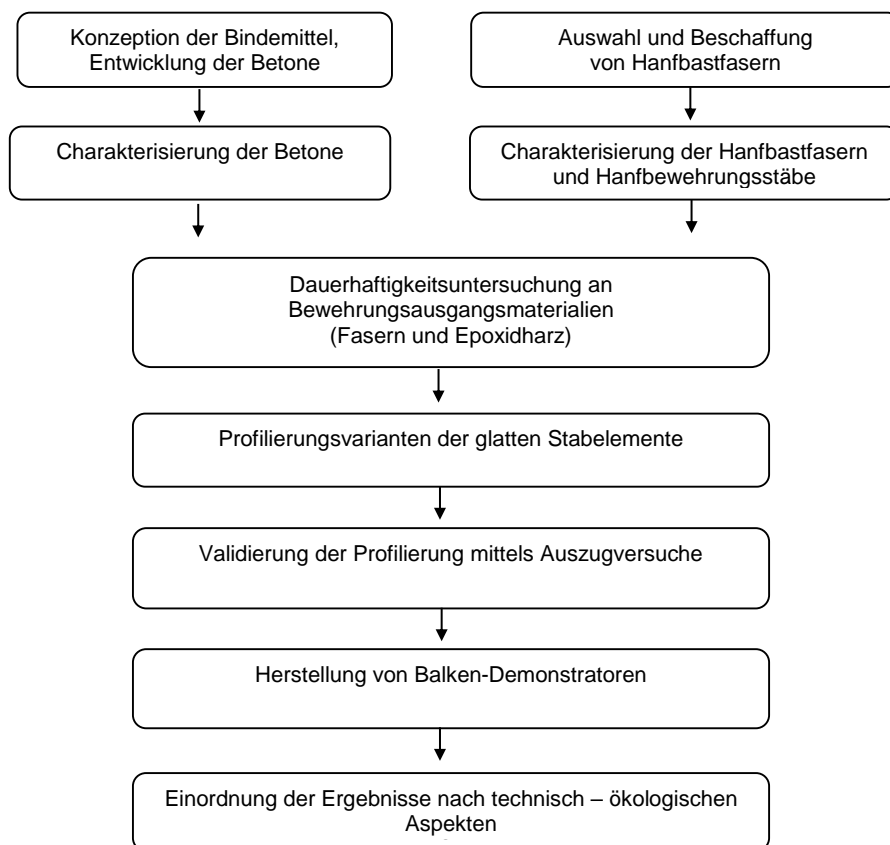


Abbildung 2 – Übersicht zum Projektablauf „BasEcoCrete“

4.2. Projektteam und Kooperationspartner

Das Forschungsprojekt **BasEcoCrete** wurde an der Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Bauingenieurwesen von den beiden Instituten

- **Institut für Werkstoffe des Bauwesens** unter Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. K.-Ch. Thienel
- **Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Professur für Massivbau** unter Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. T. Braml

bearbeitet. Die Herausforderung im Projekt lag in der Verknüpfung von Fachdisziplinen im stofflich-chemischen Bereich, in der Baustoffkunde und der Werkstoffprüfung sowie in Auseinandersetzung mit statisch-konstruktiven Fragestellungen. Die Komplexität der Forschungsfragen erforderte ein interdisziplinäres Team und modern ausgestattete Prüflabore mit einem breit gefächerten Equipment an apparativer Analytik. Unter der Leitung von Dr.-Ing. N. Beuntner und mit den wissenschaftlichen Mitarbeitern Manuel Isaia, M.Sc., Florian Zürnstein, M.Sc. und Lukas Rauch, M. Sc. wurden die Forschungsfragen in engem wissenschaftlichen Austausch bearbeitet. Als Kooperationspartner unterstützten die Firmen Fa. Naporo Klima Dämmstoff GmbH, die Fa. FEAL und die Fa. Max Bögl mit Materiallieferung, Beratung in konzeptionellen Aspekten und in der Evaluation der Ergebnisse.

5. Projektverlauf und Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die ausgewählten Materialien und die verwendeten Methoden vorgestellt (Kapitel 5.1). Anschließend finden sich in Kapitel 5.2 und 5.3 die Ergebnisse zur Charakterisierung der Hanfbastfasern und Hanfbastbewehrungsstäbe. Die gezielt zusammengesetzten klinkerarmen Bindemittel und deren Eigenschaften werden in Kapitel 5.4 vorgestellt. Die Herstellung der emissionsarmen Betone und deren Eigenschaften sowie eine ökologische Betrachtung finden sich in Kapitel 5.5. Ein wesentlicher Bestandteil des Projektes lag in der Untersuchung der Dauerhaftigkeitseigenschaften von Hanfbastfasern, Hanfstäben und Epoxidharz als Ummantelungsmaterial. Diese Ergebnisse enthält Kapitel 5.6. Abschließend werden in Kapitel 5.7 die Herstellung der Demonstratoren und die dabei erzielten Ergebnisse dargestellt.

5.1. Auswahl der Materialien und Methoden

5.1.1. Hanfbastfasern

Ausgangsmaterial für die Faserbewehrung und Bewehrungsstäbe sind Hanfbastfasern aus dem Stängel der Nutzhanfpflanze **Cannabis Sativa L.** Bei dem im Projekt verwendeten Hanfbastfasern handelt es sich um die Sorte **USO 31**, die im nördlichen Weinviertel Niederösterreichs angebaut wurde. Seitens des Projektpartners (Fa. Naporo) wurden zwei Chargen aktuell angebaute und verfügbarer Materialproben zur Verfügung gestellt. Bei **Hanf1** handelt es sich um Hanfstroh aus der Ernte des Oktobers 2023 wie gewachsen ohne Nachbearbeitung mit Schäben, nach Drusch gemäht, getrocknet und zu Ballen gepresst. Die Stängellänge beträgt teilweise über einen Meter. Das Hanfstroh ist in die Röstklasse zwei bis drei einzuordnen. **Hanf2** ist ein bearbeitetes Halbzeug aus der Ernte im September und Oktober des Jahres 2022 mit bearbeiteten kurzgeschnittenen Fasern von 10 cm Länge und einem geringen Schäbenanteil. Das Halbzeug ist der Röstklasse drei bis vier zuzuordnen. Einen Vergleich der Hanfbastfasern der beiden Chargen geben Abbildung 3 und Tabelle 1. Die umfangreichen Einflüsse, denen die Fasern während Pflanzenwachstum und Verarbeitung ausgesetzt sind, sowie die Literaturquellen zu Unterschieden der Sorten hinsichtlich Fasergehalt und Erträge, wurden in Kapitel 2.2 dargelegt. Eine Bewertung der damit verbundenen Konsequenzen und der Ausblick zu anderen Nutzhansorten

wird in Kapitel 6.1.1 gegeben. Üblicherweise liegen Hanfbastfasern für die Weiterverarbeitung als Hanfstroh vor. Daher wurde die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften für eine Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit mit anderen Sorten auf das unbearbeitete Hanfstroh Hanf1 begrenzt.



Abbildung 3 – Hanfstroh der Probe Hanf1 (links) und Halbzeug der Probe Hanf2 (rechts)

Tabelle 1 – Überblick und Beschreibung der Hanfbastfaser Chargen

	Hanf1 Charge: Hanfstroh	Hanf2 Charge: Halbzeug
Beschreibung:	Hanfstroh „as grown“ ohne Nachbearbeitung, nach Drusch gemäht, getrocknet und zu Ballen gepresst, mit Schäben	bearbeitetes kurzgeschnittenes Halbzeug mit nur noch wenigen Schäben
Ernte:	Oktober 2023	September / Oktober 2022
Faser Länge:	Stängellänge teilweise > 1 m	Fasern auf 10 cm Länge geschnitten
Röstklasse:	2-3	3-4

Zur Bestimmung der Materialparameter der Hanfbastfasern wurden Zugversuche an Faserbündeln der Charge Hanfstroh (Hanf1) durchgeführt. Für die Probennahme wurden zusammenhängende Stängel entnommen, die noch anhaftenden Schäben manuell entfernt und die so gewonnenen Fasern für die nachfolgenden Versuche in zwei Probenteile separiert.

Der erste Probenteil wurde zur Bestimmung der Reindichte mittels Heliumpyknometers „Pycnomatic ATC“ verwendet. Die Fasern des zweiten Probeteils wurden für die Zugversuche vorbereitet. In beiden Fällen erfolgte abweichend zum Normalklima nach DIN EN ISO 139 (2011) eine Konditionierung unter 20 °C bei 50 % relativer Luftfeuchte

für mindestens zehn Tage. Insgesamt wurden sieben Versuchsreihen mit je zehn Faserproben zu fünfzehn Zentimeter Länge für die Zugversuche vorbereitet.

Die **Bestimmung der Materialparameter** von Naturfasern ist nicht trivial. Für die Spannungs-Dehnungsdiagramme ist die Querschnittsfläche des Faserbündels zu bestimmen. Ein Faserbündel ist nicht homogen aufgebaut. Aufgrund der Morphologie und der Faser-Einzellängen innerhalb eines Faserbündels sind dort unterschiedliche Querschnittsteile von grob bis sehr fein vorhanden. In vergleichbaren Versuchsdurchführungen wird die Faserquerschnittsfläche beispielweise in einer Lasereinheit bestimmt (Fischer & Drieling, 2024, S. 203). Da dies allerdings nur mit einem erheblichen Aufwand zu bewerkstelligen ist, wurde für die hier betrachteten Zugversuche ein alternativer Ansatz gewählt, der Ansatz der **äquivalenten Querschnittswerten**. Dabei wird die betrachtete Faser gewogen und mit der zuvor bestimmten Reindichte ρ über das Verhältnis Masse durch Volumen die Gleichung zur Bestimmung eines Ersatzvolumens umgestellt (*Gleichung 1*). Mit bekannter Probenlänge lässt sich damit eine äquivalente Ersatzquerschnittsfläche berechnen (*Gleichung 2*), mit der im Weiteren die Zugspannung aus der gemessenen Zugkraft berechnet werden.

$$\rho = \frac{m}{V} \leftrightarrow V_{\text{Ersatz}} = \frac{m}{\rho} \quad \text{Gl. 1}$$

$$A_{\text{Ersatz}} = \frac{V}{l} \quad \text{Gl. 2}$$

In Summe wurden 70 Zugversuche in Anlehnung an DIN EN ISO 5079 (2021) durchgeführt. Vor Versuchsdurchführung wurden die konditionierten Fasern jeder Versuchsreihe zur Bestimmung der äquivalenten Ersatzquerschnittswerte gewogen und im Anschluss wieder für mindestens sieben Tage konditioniert.

Bastfasern reagieren sehr empfindlich auf Querdruckbeanspruchungen. Vergleichbare Untersuchungen verwenden daher Klemmbeläge aus Leder, Polyvinylchlorid (PVC) oder Plexiglas (Fischer & Drieling, 2024, S. 202, 203). Aufbauend auf diesen Ergebnissen erfolgte die Faserklemmung an den Einspannpunkten mit Belägen aus Polyvinylchlorid (PVC), um einen Faserdurchzug beziehungsweise eine Vorschädigung im Bereich der Klemmung zu vermeiden.

Die Zugversuche erfolgten an einer Zugprüfmaschine Zwick zwickiLine Z2.5 in einem klimatisierten Versuchsraum bei 20°C mit einer maximalen Zugkraft von 2,5 kN. Die Einspannlänge betrug zehn Zentimeter. Die Versuchsdurchführung erfolgte

weggesteuert mit einer Versuchsgeschwindigkeit von 1 mm/min. Als Abbruchkriterium wurde ein Lastabfall um 80 % definiert. Bis zum Erreichen einer Vorkraft von 1 N wurde die Versuchsgeschwindigkeit auf 5 mm/min gesetzt.

Mit dem Ansatz der äquivalenten Querschnittswerte erfolgt die Versuchsaufzeichnung mit der Kraft über den Weg. Im Nachgang wurde die Spannung sowie die Dehnung errechnet. In Abhängigkeit der Dicke des Faserbündels und produktionsbedingten Vorschädigungen (Knicke des Hanfstrohs infolge der Ballenpressung) streuen die Kräfte deutlich. Bei den durchgeführten Versuchen zeigt sich zu Beginn im Kraft-Weg-Diagramm ein flacher leicht gekrümmter Verlauf des Graphen. In diesem Bereich findet die Entkräuselung des Faserbündels statt. Im Anschluss steigt der Graph annähernd konstant bis zum ersten Faserbruch. Der Wendepunkt nach der Entkräuselung definiert den linear elastischen Bereich des Faserbündels. Der erste Faserbruch kann sich in einem plötzlichen Abfall der Kraft äußern und damit einem abrupten Stopp des Graphen bedeuten, was einem Faserreißen entspricht, oder auch nur einen geringfügig fallenden Verlauf des Graphens verursachen, wenn es noch einen Restquerschnitt gibt. Je nach Anordnung der Einzelfaser im Restquerschnitt und der Größe der Einzelfaser ist eine weitere Laststeigerung bis zum nächsten Faserbruch oder zur maximalen Kraft möglich. Ein geringfügig fallender Verlauf des Graphens ist ein Anzeichen für die Delaminierung von Einzelfasern entlang ihrer zugehörigen Faserlängen bis zur vollständigen Ablösung oder schließlich Reißen der Fasern.

In der Auswertung wird der linear elastische Bereich zwischen Wendepunkt und erstem Faserbruch durch Schranken festgelegt, um das Materialverhalten der Faserbündel eindeutig, reproduzierbar und vergleichbar zu erfassen. Das für die Auswertung angewendete Vorgehen der Bereichsdefinition zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls (E-Modul) orientiert sich an Fischer & Drieling (2024, S. 204–205, 208). Die Auswertung erfolgt visuell anhand der geplotteten Graphen durch den ersten Faserbruch (plötzlicher Kraftabfall) und die visuelle Definition des Wendepunktes. Anhand dieser zwei Punkte wird eine Regressionsgerade bestimmt, die das linear-elastische Materialverhalten beschreibt. Der E-Modul errechnet sich mit Hilfe des Hook'schen Gesetzes aus der Spannung bei erstem Faserbruch dividiert durch die Differenz der Dehnung zwischen erstem Faserbruch und korrigiertem Nullpunkt (Dehnung zum Zeitpunkt $\sigma = 0$) (*Gleichung 3*).

Hook'sches Gesetz:
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{Gl. 3}$$

mit: E: Elastizitätsmodul in [N/mm²]
 σ: Zugspannung [N/mm²] bestehend aus der Kraft F bei ersten Faserbruch, geteilt durch die äquivalente Ersatzquerschnittsfläche A_{Ersatz}: $\sigma = \frac{F}{A_{Ersatz}}$
 ε: Dehnung $\varepsilon = \varepsilon_{Ende} - \varepsilon_{Start}$
 Allgemeine $\varepsilon_{elastisch} = \frac{\Delta l_{elastisch}}{l_0}$ mit Ausgangslänge l₀ und Längenänderung Δl_{elastisch}

In Abbildung 4 ist exemplarisch die visuelle Auswertung anhand der Graphen der Spannungs-Dehnungs-Beziehung der durchgeführten Faserzugversuche dargestellt.

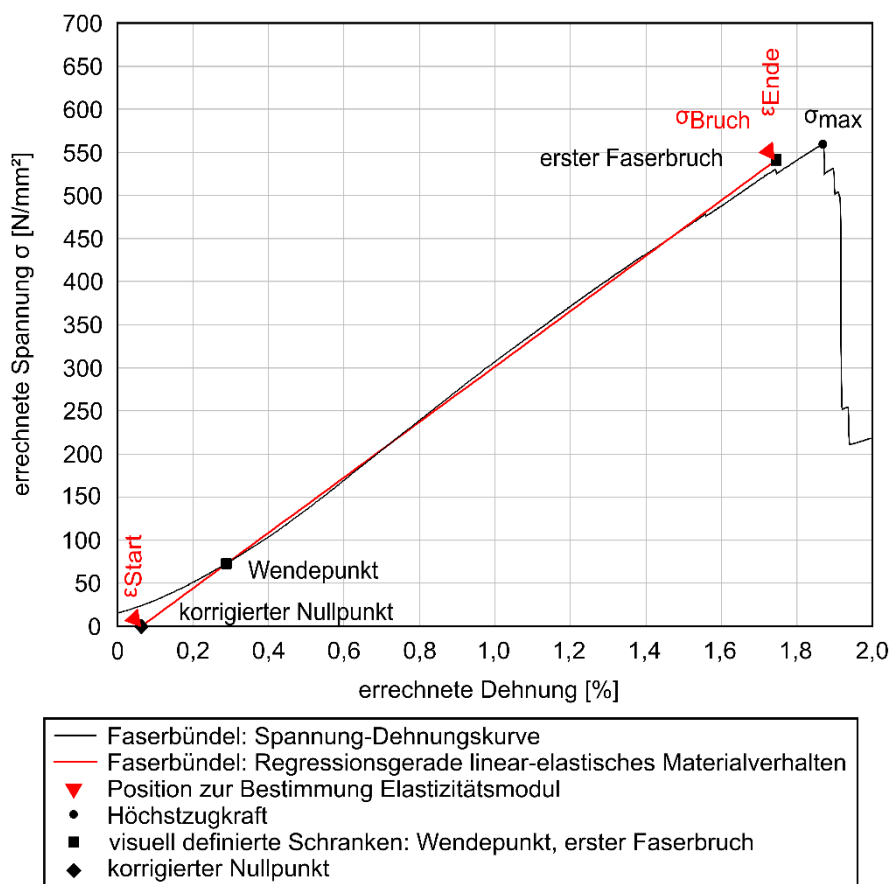


Abbildung 4 – Exemplarische Auswertung Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Faserzugversuche mit definierten Positionen der Regressionsgeraden zur Bestimmung des E-Moduls

Zur **Beurteilung der Dauerhaftigkeit** wurden beide Hanfbastfaser-Chargen (vgl. Tabelle 1) in Alkalilösungen aus Natronlauge bei pH-Werten von 11 und 13 eingelagert. Zuvor wurden die Fasern bei 105 °C ofengetrocknet und gewogen. Dabei wurde für jeden Probebehälter das Verhältnis zwischen der Masse der Fasern und der Masse der Laugen stets gleich eingestellt. Jeweils nach 100 und 180 Tagen Einlagerung wurden die Proben aus der Lösung entnommen, in Filterpapier abfiltriert und getrocknet. An diesen Proben wurden die Masseänderung und die Zugfestigkeit bestimmt. Zur optischen Beurteilung des Faserzustandes vor und nach Alkalilagerung

wurden beide Chargen mit dem Rasterelektronenmikroskop Zeiss EVO LS 15 mit LAB6-Kathode und CD2x-Detektor untersucht.

Zur Bestimmung der Wasseraufnahme der Hanfbastfasern wurden die Querschnittsflächen von 15 einzelnen und getrockneten Fasern unter einem Auflichtmikroskop (Zeiss Acio CAM Stemi SV6) ermittelt. Anschließend wurden diese Schnittflächen mit einer Pipette in jeweils einem Tropfen destilliertem Wasser für ca. 3 - 5 Sekunden gehalten und die nassen Querschnittsflächen innerhalb von 5 - 10 Sekunden nach Anfeuchtung erneut gemessen. Aus den Verhältnissen der trockenen und nassen Querschnittsflächen ließen sich unter der Annahme, dass das Quellvermögen an unterschiedlichen Stellen einer jeder Faser ähnlich sei, die Volumenänderung der Fasern bestimmen. Mit der ermittelten Reindichte der Hanfbastfasern von $1,4 \text{ g/cm}^3$ (vgl. Abbildung 19) konnte aus der Volumenänderung Vol.-% die Massenänderung M.-% berechnet werden.

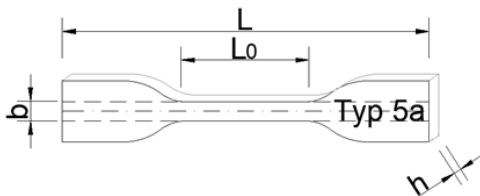
5.1.2. Auswahl Epoxidharze

Für das Projekt wurden vier Epoxidharze mit unterschiedlichen Eigenschaften ausgewählt. Eine Übersicht dazu enthält Tabelle 2. Das Epoxidharz ER_BIO30 enthält als Hauptkomponente Bisphenol A und den zugehörigen Härter auf Basis von iCyclohexanemethanamin. Nach Angaben des Herstellers enthält das ausgehärtete Produkt des ER_BIO30 bei Einhaltung der spezifischen Mischverhältnisse aus Harz und Härter 30 M.-% an biologischen Bestandteilen. Das zweite ausgewählte Epoxidharz ER_FH enthält als Hauptkomponente ein Derivat aus Bisphenol A mit einem Überschuss an Epichlorhydrin sowie den Härter Isophorondiamin. ER_FH härtet nach Herstellerangaben schnell aus und ist geeignet für Anwendungen auf feuchten Oberflächen. Die Verarbeitungszeit dieses Harzsystems beträgt bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C nur 20 Minuten. Außerdem wurden zwei weitere Epoxidharze mit hoher Temperaturbeständigkeit ausgewählt. Diese werden als ER_HTG_1 und ER_HTG_2 bezeichnet. Das Epoxidharz ER_HTG_1 enthält wie ER_FH ein Derivat aus Bisphenol A mit einem Überschuss an Epichlorhydrin mit dem zugehörigen Härter 2-Ethyl-4-methylimidazol und wies zudem eine hohe Chemikalienbeständigkeit auf. Das Epoxidharz ER_HTG_2 ist dem ER_HTG_1 chemisch sehr ähnlich (siehe Anlage E), weist jedoch eine deutlich kürzere Verarbeitungszeit auf.

Tabelle 2 – Übersicht zu den Eigenschaften der Epoxidharze

Epoxidharz-Kurzbezeichnung	ER_BIO30	ER_FH	ER_HTG_1	ER_HTG_2
Viskosität bei 25°C Harz / Härter [mPa*s]	1850 / 500	700 / 500	2600 / 200	n.b.
Dichte Harz + Härter [g/cm³]	1,14	1,10	1,11	n.b.
Glasübergangstemperatur [°C]	77	74	91	n.b.
Verarbeitungszeit [h]	0,75 h bei 25 °C	0,3 h bei 20 °C	16 h bei 10 °C	1,2 h bei 20 °C
Temperzeit bei 70°C [h]	7 Tage, 168 h	0,5 h	4 h	1,5 h
Charakteristisches Merkmal	30 M.-% Bioanteil	Schnelle Aushärtung	Hohe Chemikalien- und Temperaturbeständigkeit	Hohe Temperaturbeständigkeit

Zur Charakterisierung der Materialeigenschaften und zur Evaluierung der Beständigkeit der Epoxidharze im alkalischen Milieu wurden Probekörper nach EN ISO 527-2 hergestellt. Die Prüfung der Zugfestigkeit erfolgte nach DIN EN ISO 527-1 an mindestens fünf Probekörpern je Prüferie und an der Prüfmaschine „Inspect Blue 5 kN“, Hegewald & Peschke. Die Abmessungen der Zugprobekörper des Typs 5a sind in Abbildung 5 dargestellt. Die Herstellung der Epoxidprobekörper erfolgte in Silikonformen (Abbildung 6).



Mit $L = 75 \text{ mm}$; $L_0 = 20 \pm 0,5 \text{ mm}$; $b = 4 \pm 0,1 \text{ mm}$; $h = 2 \text{ mm}$

Abbildung 5 – Zugprobe des Typs 5a gem. DIN EN ISO 527-2 (nicht maßstäblich)

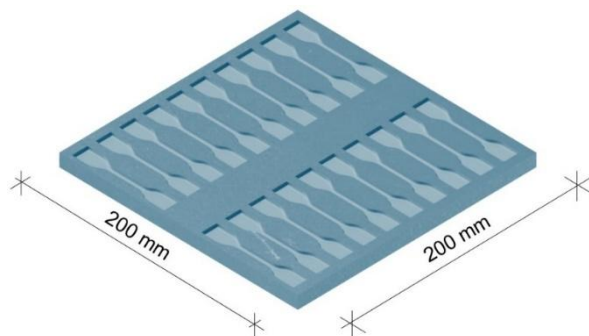


Abbildung 6 – 3D-Zeichnung einer angefertigten Schalung für Zugprobekörper des Typs 5a gem. DIN EN ISO 527-2 (2012)

Die Epoxidharze für die Hanfbastbewehrungsstäbe müssen im hohen Maße beständig in alkalischen Umgebungen mit pH-Werten über 8 sein. Die Dauerhaftigkeit der Epoxidharze in alkalischen Lösungen (pH-Werte von 9, 11 und 13) wurde anhand der Materialparameter Zugfestigkeit und E-Modul untersucht. Die Referenzprobekörper wurden nicht in NaOH-Lösungen eingelagert. Abbildung 7 zeigt exemplarisch eine eingebaute Zugprobe mit daran angesetztem Extensometer. Nach 28, 90 und 180 Tagen Einlagerung in den alkalischen Lösungen wurden die Parameter Zugfestigkeit, E-Modul und Massenänderung (nur an ausgewählten Proben) experimentell erfasst.

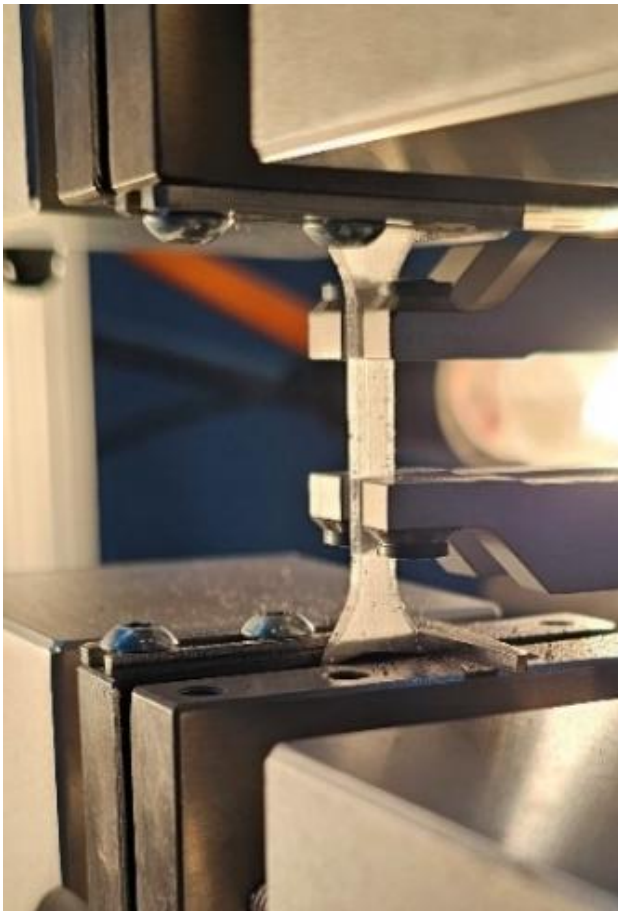


Abbildung 7 – Für Zugversuch eingebaute und instrumentierte Epoxidharz-Probe

5.1.3. Bewehrungsstäbe

Hanfbastbewehrungsstäbe werden im Pultrusionsverfahren hergestellt. Zu Beginn der Produktion durchläuft das Ausgangsmaterial, im Fall der Hanfbastfasern in Form eines Garns oder Rovings, eine Trockeneinheit, wird nachfolgend in einem Epoxidharzbad getränkt und schließlich durch ein Formwerkzeug gezogen, das meist beheizt wird. Dahinter folgt ein Wegaufnehmer, der das entstehende Profil kontinuierlich durch das Formwerkzeug zieht, sowie eine Ablängeinrichtung (Säge, Messer oder ähnliches zum

Durchtrennen der Stäbe auf Wunschlänge). Die in diesem Projekt verwendeten Hanfbastbewehrungsstäbe wurden am Deutschen Institut für Textil und Faserforschung (DITF) in Denkendorf pultrudiert. Eine ausführliche Beschreibung der Pultrusion von Naturfaserstäben auf der Basis von Hanfbastfasern sowie die Besonderheiten in der Verarbeitung sind in Spyridonos et al. (2024) angegeben. Produktionsbedingt entsteht mit dem Durchlaufen des Formwerkzeugs bislang eine sehr homogene glatte Oberfläche.

Die Hanfbastbewehrungsstäbe reagieren empfindlich auf Querdruckbeanspruchungen. Daher sind für die Durchführung der Zugversuche ähnliche Fragestellungen wie für die Faserbündel zu beantworten. Ohne eine zusätzliche Probenvorbereitung wären so Vorschädigungen an den Einspannstellen zu erwarten. Die Klemmbacken der Prüfmaschine erzeugen eine Querpressung auf den Stab und damit einen dreidimensionalen Spannungszustand, der die aufnehmbare Längszugkraft negativ beeinflusst. Zusätzlich zerstört die senkrechte Pressung der im Verbund liegenden Fasern die Epoxidharzmatrix. Damit geht der Matrix-Faser-Verbund verloren: der Hanfbaststab versagt durch Ausziehen von Faserbündeln aus dem Komposit. In der Folge versagen die Stäbe an der Einspannung vor Erreichen der Zugfestigkeit des Stabes. Vergleichbare Untersuchungen an Glasfaserbewehrungsstäben nutzen zum Schutz vor Querdruckbeanspruchung daher Stahlhülsen an den Einspannenden. Vergleichbare Untersuchungen an Glasfaserbewehrungsstäben nutzen zum Schutz vor Querdruckbeanspruchung daher Stahlhülsen an den Einspannenden (Kepp, 1985, S. 28). Für die Hanfbastbewehrungsstäbe wurde daher ebenfalls ein Schutz der Stabenden im Bereich der Einspannung vorgesehen. In Abbildung 8 ist das Prinzip schematisch dargestellt. Verwendet wurde eine handelsübliche Messinghülse mit einem Durchmesser von acht Millimetern und einer Wandstärke von 0,5 mm. Zusätzlich gewährleisten die Hülsen eine gleichmäßige Krafteinleitung an den Einspannstellen.

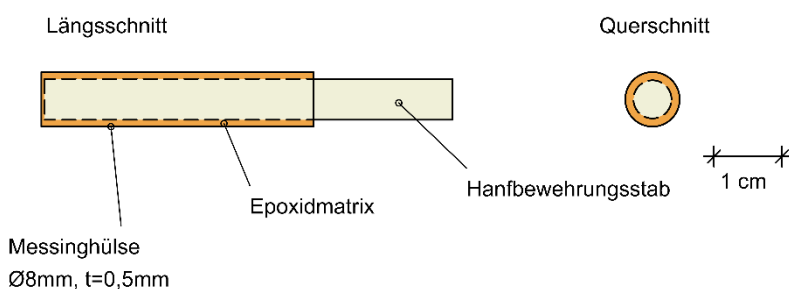


Abbildung 8 – Schematische Darstellung aufgeklebter Messinghülsen an den Stabenden der Hanfbastbewehrungsstäbe

An beiden Stabenden wurde eine Hülsenlänge von 55 mm analog zur Einspannlänge in DIN EN ISO 527-4 (2023) gewählt. Die Stäbe wurden mit einem Zweikomponenten Hochleistungsklebstoff auf Epoxidharzbasis in die Einspannhülsen eingeklebt, dessen Zugfestigkeit über der zu erwartenden Zugscherkraft der Klebefuge liegt. In Abbildung 9 sind die so vorbereiteten Stäbe dargestellt.



Abbildung 9 – Vorbereitete Proben für die Zugversuche der Hanfbastbewehrungsstäbe mit beidseitig geklebten Einspannhülsen

Die Zugversuche wurden in Anlehnung an DIN EN ISO 527-4 (2023) und DIN EN ISO 527-1 (2019) für anisotrope faserverstärkte Kunststoffe durchgeführt. In dem genormten Versuch wird ein linearer Probekörper in Richtung seiner nicht-unidirektionalen Verstärkung mittels Klemmbacken in einer geeigneten Prüfmaschine eingespannt. Die Kraft wird weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 2 mm/min eingeleitet und die verursachte Materialverformung im zentralen Bereich der Prüflänge mit einem externen Wegaufnehmer gemessen. Die Versuche wurden an einer 50 kN Universal Zugprüfmaschine (Hegewald & Peschke inspekt table 50-1). Die Verformungen wurden zudem mit einem sekundären optischen Messsystem mit dem Prinzip der digitalen Bildkorrelation (Anmerk. d. V.: englisch Digital Image Correlation – kurz DIC) für die Auswertung aufgezeichnet.

Nach Bestimmung der mechanischen Eigenschaften der glatten Ausgangsstäbe erfolgt die Untersuchung des Verbundverhaltens. Glatte Oberflächen, wie die der Hanfbastbewehrungsstäbe, wurden bereits zu Beginn des Stahlbetonbaus (damals noch als Eisenbeton bezeichnet) in Form blanker Drähte verwendet. Seither wurde die Verbundkraftübertragung glatter Stabelemente im Verbundbaustoff Stahlbeton bereits zahlreich und umfangreich untersucht. Die Kraftübertragung glatter Stabelemente

erfolgt nur über Haftung und Reibung zwischen der Staboberfläche und dem umgebenden Beton. Glatte Oberflächen sind daher für den Kraftübertrag nicht sonderlich gut geeignet.

Produktionsbedingt entsteht bei Hanfbastbewehrungsstäben mit dem Durchlaufen des Formwerkzeugs bislang eine sehr homogene, glatte Oberfläche. Derzeit kann im Herstellungsprozess nur vereinzelt in geeigneten Anlagen eine Profilierung aufgebracht werden. Daher werden die Stäbe bisher in der Regel nachträglich profiliert. Die Profilierungsvarianten unterscheiden sich hinsichtlich der Ausgangsmaterialien und dem Zeitpunkt ihres Aufbringens und können nach oder vor dem Erhärten des Harzes erfolgen (Pritschow, 2016, S. S. 48). Aus der Literatur sind besandete (Hofmann, Proske & Graubner, 2020; Javadian et al., 2016), umwickelte (Hammerl, Stoiber, Hämmerle, Shams, Bischoff & Kromoser, 2021) sowie eingefräste (Görtz, Lengert & Haack, 2023; Suppanz & Kromoser, 2020) Profilierungen aber auch natürliche Strukturen wie die eines geflochtenen Ausgangsrovings (Penzel, Abdkader, Friese, Overberg, Hahn, Butler, Mechtcherine & Cherif, 2023) bekannt. Eine Übersicht über verschiedene Profilierungsarten liefert Pritschow (2016).

Einige der in der Literatur angegebenen Profilierungen wurden für die Hanfbastbewehrung vorerst ausgeschlossen. Die Naturfaserbewehrungsstäbe werden von einer Epoxidharzmatrix vor Feuchtigkeit geschützt. Eine nachträgliche Fräsung durchtrennt das schützende Epoxidharz, legt die Fasern frei und schafft so eine mögliche Schwachstelle für den Feuchtigkeitseintritt. Am Beispiel anderer Bewehrungsstäbe aus nachwachsenden Rohstoffen wie der Untersuchung von Javadian et al. (2016) über das Verbundverhalten besandeter Bambus-Bewehrungsstäbe oder der Untersuchung des Verbundverhaltens besandeter basaltfaserverstärkter Kunststoffbewehrung von Hofmann et al. (2020) wurde auf Basis der Literaturquellen vier Profilierungsvarianten gewählt. In den Untersuchungen wurden die glatten Stabelemente mit einer „*Besandung aus feiner Körnung*“ (0,063 bis 0,2 mm), mit einer „*Besandung aus grober Körnung*“ (0,63 bis 1,25 mm), einer nachträglichen „*schlaffen Umwicklung mit Garn*“ (Feinheit: 1000 tex, Drehung: 53 ‚turns per meter‘, also die Drehung pro Meter - kurz tpm) sowie eine „*Kombination aus Umwicklung und Besandung*“ mit einem Sand grober Körnung (0,63 bis 1,25 mm) profiliert. Die Verklebung erfolgte mit einem biobasierten Epoxidharz (Bioanteil 30 M.-%). Die glatte Oberfläche der Stäbe wurde zuvor aufgeraut. Nach dem Aufbringen der Profilierung erfolgt die Aushärtung des Epoxidharzes im

Trockenschrank bei 60 °C für mindestens 24 Stunden. In Abbildung 10 sind die Hanfbastbewehrungsstäbe mit den applizierten Profilierungen dargestellt.



Abbildung 10 – profilierte Hanfbastbewehrungsstäbe mit sechs Millimeter Durchmesser (von oben nach unten: „besandet + umwickelt“, „umwickelt“, „grob besandet“, „fein besandet“)

Die Validierung des Profilierungskonzeptes erfolgte über Stab-Auszugsversuche. Aufgrund der begrenzten zur Verfügung stehenden Stablängen wurden die Auszugversuche in Anlehnung an den Versuchsaufbau für Verbundversuche an Betonstahl RC6 (RILEM, 1994) und nach DIN EN 10080 (2005) konzipiert. Aufbauend auf den Ergebnissen von Suppanz und Kromoser (2020) wurde die Kantenlänge der Würfel, in die die Stäbe einbetoniert wurden, abweichend zur RILEM (1994) auf 150 mm (anstatt den zehnfachen Stabdurchmesser oder min. 200 mm Kantenlänge) festgesetzt. Die Verbundlänge wurde ebenfalls abweichend zur RILEM (1994) auf 50 mm (anstatt des fünffachen Stabdurchmessers) festgelegt, da die Qualität der aufgetragenen Profilierung schwankt und mit dem geringen Abstand des fünffachen Stabdurchmessers (ca. 30 mm) im Fall der Umwicklung die Profilierung nicht ausreichend eingebunden war. In Anlehnung an DIN EN 10080 (2005) wurden je Profilierung drei Probekörper untersucht. In Abbildung 11 ist das Schema der Einbettung in die Würfelprüfkörper dargestellt. Bei dem verwendeten Beton handelt es sich um einen haufwerksporigen Leichtbeton ÖkoLB (siehe Kapitel 5.1.4).

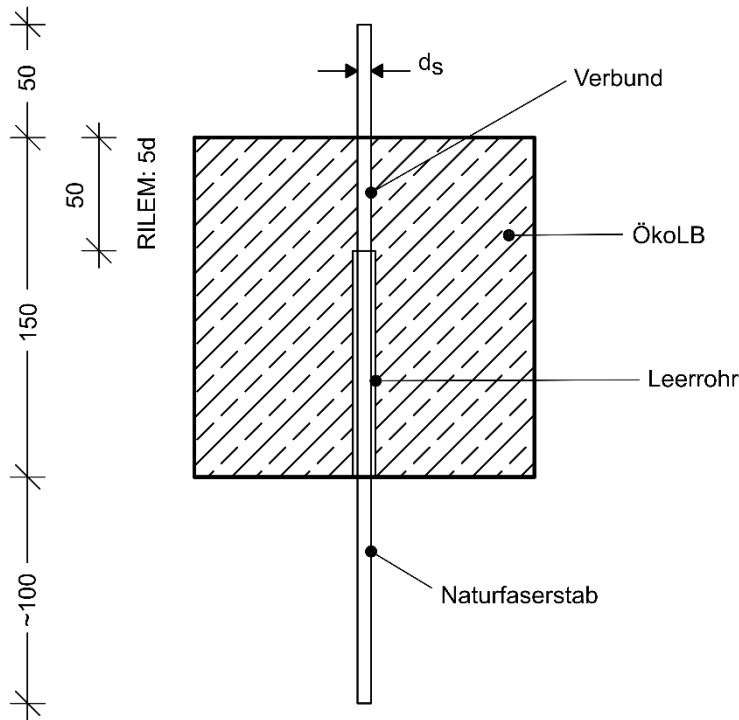


Abbildung 11 – Abmessungen der Prüfkörper und der Verbundlänge der durchgeführten Verbundversuche

Zur Bestimmung der Verbundspannung ist die maximale Auszugskraft und die im Beton eingebettete Fläche des Bewehrungsstabs zu bestimmen:

$$\tau_{bm} = \frac{F}{l_b \cdot U_b} = \frac{F}{A_{Stab}} \quad \text{Gl. 4}$$

Die Verbundoberfläche hängt stark von der Qualität der aufgetragenen Profilierung ab und variiert somit von Stab zu Stab. Der Anteil des anhaftenden Sandes und die Dicke sowie die Regelmäßigkeit des umwickelnden Garns streuen stark. Damit entstehen komplizierten Geometrien mit einer Vielzahl an Hebungen und Senken, die sich nicht ohne weiteres idealisieren oder vereinfachen lassen. Herstellungsbedingte Ungenauigkeiten sind damit unvermeidbar. Aus diesem Grund erfolgt die Bestimmung der Oberfläche mithilfe eines 3D-Hand-Scans (Zeiss T-Scan). Die Nachbearbeitung der 3D-Scans erfolgte mit der Reengineering Software Geomagic Design X 2023.3. Diese ermöglicht es, die Oberfläche aller gescannten Stäbe zu bestimmen. Allerdings handelt es sich hierbei um eine Abschätzung und Näherung der eingebundenen Fläche, da eine nachträgliche exakte Bestimmung der von Beton umschlossenen Fläche nicht möglich war. In Abbildung 12 sind die untersuchten Bewehrungsstäbe und die korrespondierende Oberfläche des 3D-Scans dargestellt. Ein Ausblick auf eine spätere baupraktische Umsetzung wird in Kapitel 6.1.2 gegeben.

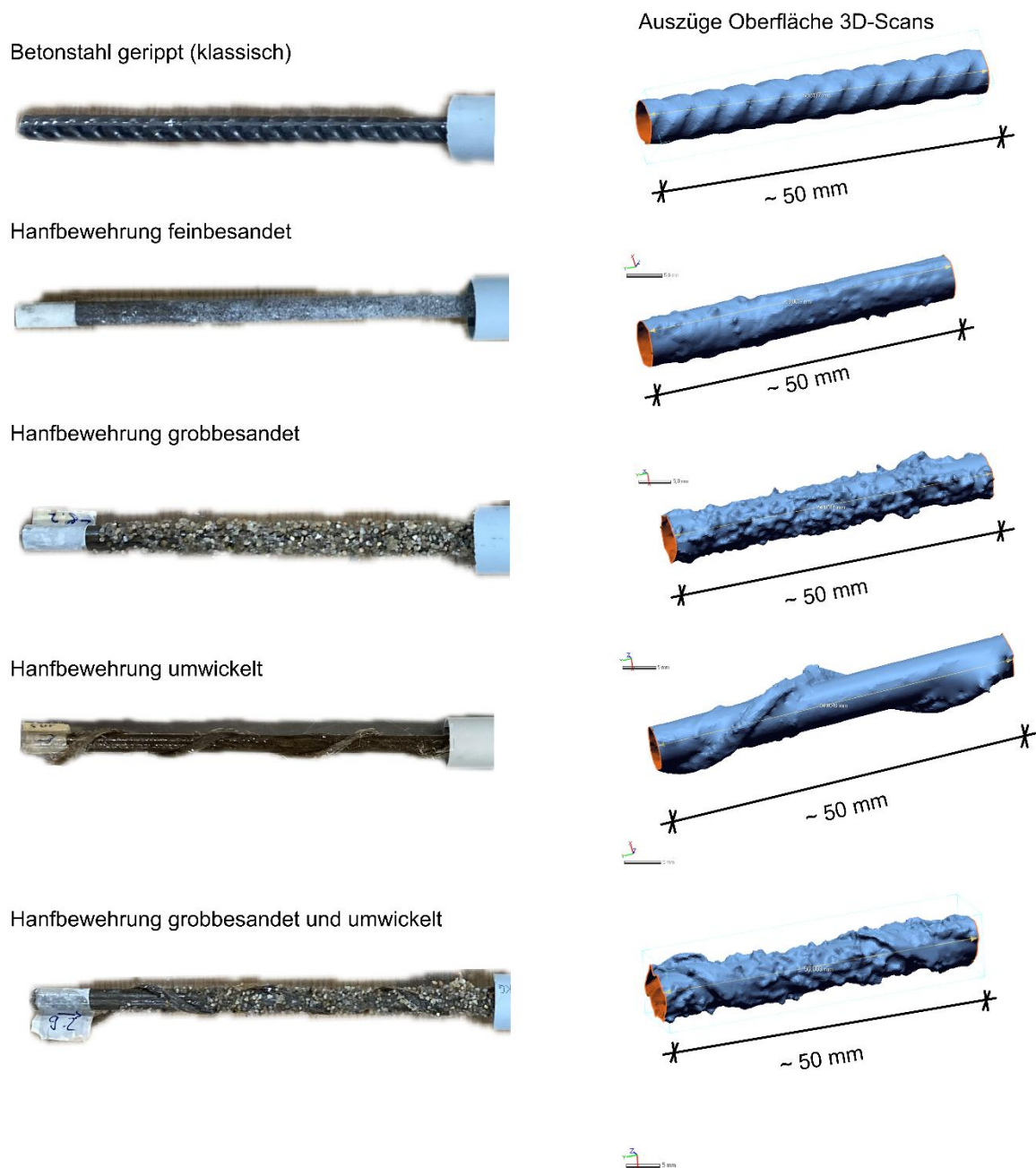


Abbildung 12 – Darstellung der Referenzbewehrung Betonstahl und der profilierten Hanfbastbewehrungsstäbe und den korrespondierenden Oberflächen der 3D-Scans (schematisch)

Nachdem die Oberfläche der zu untersuchenden Stäbe ermittelt war, wurden sie in Würfeln platziert und in eigens dafür hergestellten Schalungen betoniert. Zur Sicherstellung der Verbundlänge von 50 mm wurde ein Kunststoffrohr verwendet (Abbildung 11), das mit Silikon gegen ein Eindringen des Betons abgedichtet wurde. Während der Betonage erfolgte die Lagesicherung der Stäbe mit Hilfe eines Steges über der Würfelschalung. Neben den profilierten Hanfbastbewehrungsstäben wurden drei Referenzprobekörper mit herkömmlichem Bewehrungsstahl (B500B) und sechs Millimeter Durchmesser hergestellt.

Insgesamt wurden 15 Probekörper betoniert:

- Probekörper P01 bis P03:
Betonstahl (Referenz)
- Probekörper P04 bis P06:
Hanfbastbewehrungsstab „fein besandet“ (Körnung 0,063 bis 0,2 mm)
- Probekörper P07 bis P09:
Hanfbastbewehrungsstab „grob besandet“ (Körnung 0,63 bis 1,25 mm)
- Probekörper P10 bis P12:
Hanfbastbewehrungsstab „umwickelt“ (Garnfeinheit: 1000 tex, Drehung: 53 tpm)
- Probekörper P13 bis P15:
Hanfbastbewehrungsstab „besandet + umwickelt“ (Körnung 0,63 bis 1,25 mm + Garnfeinheit: 1000 tex, Drehung: 53 tpm)

Die Dauerhaftigkeit einbetonierter Hanfbastbewehrungsstäbe wurde für zwei Profilierungsvarianten mit den drei entwickelten Betonen in Kapitel 5.1.4 untersucht. Hierzu wurden die Proben mittels Mikrocomputertomographien (Micro-CT Modell Skydrive 1173, Messung bei 80 kV und 60 uA, mit Messingfilter) 28 Tage nach Herstellung gescannt. Anhand der Dichteunterschiede der Materialien ist es möglich, Zementstein, Gesteinskörnung, Bewehrung aus Hanfbastfasern mit Epoxidharz und Luft voneinander zu unterscheiden. Das gestattete die wiederholte Beurteilung der Qualität und der Funktionalität der profilierten Hanfbastbewehrungsstäben in den beiden Normalbetonen und dem Leichtbeton. Die Auswertung erfolgte grafisch. Anhand der Micro-CT-Scans wurden die Durchmesser der in Beton eingebetteten Bewehrungsstäbe 28 Tagen nach Herstellung an jeweils acht Stellen je Probe bestimmt. Anschließend wurden alle Proben bei 105°C im Ofen getrocknet und die Durchmesser der Bewehrungsstäbe im Beton durch erneutes Scannen ein zweites Mal erfasst. Aus den Differenzen der Durchmesser konnten für die beiden Profilierungsvarianten („umwickelt und besandet“), sowie für die drei Betone - ÖkoB1, ÖboB2 und ÖkoLB - flächenbezogene Schwindmaße berechnet und miteinander verglichen werden. Die Ergebnisse der Schwindmaße ermöglichten eine Bewertung des Verbundes zwischen Beton und den Bewehrungsstäben. Des Weiteren konnten anhand der 3D-Scans Risse, sowie Einschlüsse von Luft und darin enthaltene Feuchtigkeit detektiert werden.

5.1.4. Bindemittel und Betone

Die Entwicklung der klinkerarmen, ökologisch optimierten Betone umfasste die Konzeption von zwei Normalbetonen mit stark reduziertem Klinkeranteil. Beide Normalbetone unterscheiden sich ausschließlich in ihrer Bindemittelzusammensetzung und werden im weiteren Verlauf als ÖkoB1 und ÖkoB2 bezeichnet. Als dritter Beton wurde ein haufwerksporiger Leichtbeton (ÖkoLB) konzipiert. Dieser zeichnet sich durch eine geringe Dichte (kleiner 1.000 kg/m^3) aus (Chandra & Berntsson, 2002), was sowohl den Materialverbrauch reduziert als auch hervorragende Wärmedämmeigenschaften bietet (Chandra & Berntsson, 2002). Die Betonkonzepte und die daraus abgeleiteten Anforderungen an die Bindemittel sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3 – Betonkonzepte und daraus ableitende Anforderungen an Bindemittel

Beton-Bezeichnung	ÖkoB1	ÖkoB2	ÖkoLB
Betonsorte	Ökologischer, ressourcenschonender Normalbeton	Ökologischer, ressourcenschonender Normalbeton	Haufwerksporiger Leichtbeton
Bezeichnung der Bindemittel	BM1	BM2	BM3
Anforderungen an Bindemitteln	<ul style="list-style-type: none"> - Stark reduzierter Klinkeranteil - Einsatz von Zementersatzstoffen - Ausreichende Festigkeiten - Gute Verarbeitbarkeit 	<ul style="list-style-type: none"> - Stark reduzierter Klinkeranteil - Einsatz von Zementersatzstoffen - Ausreichende Festigkeiten - Gute Verarbeitbarkeit 	<ul style="list-style-type: none"> - Stark reduzierter Klinkeranteil - Geringe Hydratationswärme - Ausreichende Festigkeiten

Drei Bindemittelvarianten wurden zur Minderung des ökologischen Fußabdrucks genutzt. Bei BM1 wurde der Klinkeranteil durch eine Mischung aus einem CEM I 52,5 R, einem calcinierten Ton und Kalksteinmehl reduziert, während bei BM2 ein Hochofenzement CEM III/B 42,5 N LH SR(ft) und 10 M.-% Kalksteinmehl zum Einsatz kam. Bei BM3 liegt der Fokus in erster Linie auf einer verzögerten und möglichst niedrigen Wärmeentwicklung. Daher wurde für BM3 ein langsam erhärtender Hochofenzement CEM III/B 42,5 N LH SR(ft) ohne weiteren Zementersatzstoff gewählt. Die Zusammensetzung der Bindemittel ist in Abbildung 13 dargestellt.

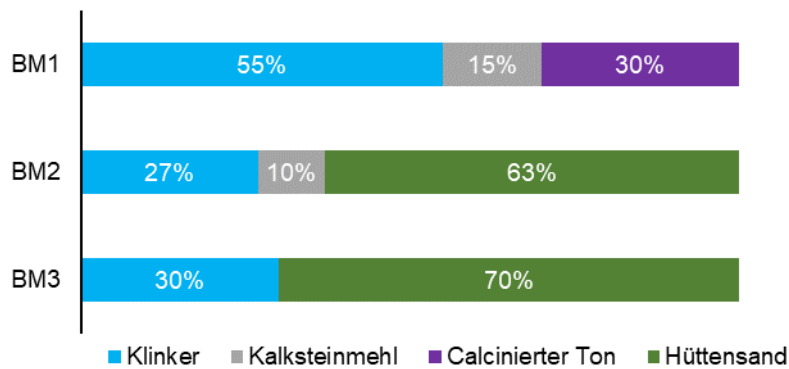


Abbildung 13 – Zusammensetzung der Bindemittel

Die Porenlösung wurde nach 28 Tagen mittels Auspressverfahren nach (Longuet, Burglen & Zelwer, 1973) an der Prüfmaschine „Alpha 3000“, Form+Test, aus den Bindemittelproben extrahiert. Der Portlanditgehalt wurde nach dem Stoppen der Hydratation der Bindemittelproben mit einer Heizrate von 2 K/min in der Thermoanalyseapparatur STA 449 F3 Jupiter ermittelt. Die Auswertung der Portlanditgehalte erfolgte nach (Ramachandran, Paroli, Beaudoin & Delgado, 2002).

Ausgehend von der Leistungsfähigkeit der drei Bindemittel wurden die drei Betone ÖkoB1, ÖkoB2 und ÖkoLB konzipiert. Die Zusammensetzung der Betone gibt Tabelle 4 wider. In allen drei Betonen kamen Hanfbastfasern zum Einsatz. Voruntersuchungen ergaben, dass eine Faserlänge von 10 bis 20 mm angestrebt werden sollte, da bei Faserlängen über 20 mm die Igelbildung im Frischbeton begünstigt und damit die Wirksamkeit und Verarbeitbarkeit des Betons verschlechtert wird.

Tabelle 4 – Betonzusammensetzung der drei konzipierten Betone ÖkoB1, ÖkoB2, ÖkoLB

Material	ÖkoB1 mit Hanf		ÖkoB2 mit Hanf		ÖkoLB mit Hanf	
	V [dm ³ /m ³]	M [kg/m ³]	V [dm ³ /m ³]	M [kg/m ³]	V [dm ³ /m ³]	M [kg/m ³]
Bindemittel	123	359	118	359	116	355
Wasser	180	180	180	180	185	185
Gesteinskörnung - Sieblinie B8 (Münchner Kies)	681	1803	686	1816	0	0
Leichte Gesteinskörnung - (Blähglas + Blähton)	0	0	0	0	519	270
Hanfbastfasern 10-20 mm	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0	1,5
Luft	15	0	15	0	180	0
Summe	1000	2344	1000	2357	1000	811
Betonzusatzmittel						
Fließmittel		0,252		0,252		1,186
Luftporenbildner						0,723

Als Materialeigenschaften der Betone wurden die Frischbetoneigenschaften und mechanischen Kennwerte nach Tabelle 5 bestimmt. Am ÖkoLB wurden zudem das plastische Schwinden am Schwindkegel beurteilt. Die Würfel- und Zylinderdruckfestigkeiten, sowie die E-Modul-Werte wurden an der Prüfmaschine Alpha 3000, Form+Test, und die Biegezugfestigkeiten an der Prüfmaschine „Inspect Table 50 kN“, Hegewald &Peschke, ermittelt.

Tabelle 5 – Versuchsprogramm am Frisch- und Festbeton

Betonsorte	Versuch	Norm	Abmessungen [mm]	Anzahl an Probekörper
ÖkoB1 ÖkoB2	Druckfestigkeit Würfel	(DIN EN 12390-3, 2019)	150x150x150	3
	Druckfestigkeit Zylinder	(DIN EN 12390-3, 2019)	h = 300mm, D = 150mm	3
	E-Modul Zylinder	(DIN EN 12390-13, 2021)	h = 300mm, D = 150mm	3
	Biegezugfestigkeit Balken	(DIN EN 12390-5, 2019)	100x100x500	3
	Ausbreitmaß am Frischbeton	(DIN EN 12350-5, 2019)	Kegel	1
	Frischbetonrohddichte	(DIN EN 12350-6, 2019)	Würfel 150x150x150	≥ 3
ÖkoLB	Druckfestigkeit Würfel	(DIN EN 1354-09, 2005)	150x150x150	3
	Druckfestigkeit Zylinder	(DIN EN 1354-09, 2005)	h = 300mm, D = 150mm	3
	E-Modul Zylinder	(DIN EN 1352-02, 1997)	h = 300mm, D = 150mm	3
	Biegezugfestigkeit Balken	(DIN EN 1351-02, 1997)	100x100x500	3
	Frühschwinden Kegel		H = 100mm, D = 100mm	3
	Frischbetonrohddichte	(DIN EN 12350-6, 2019)	Würfel 150x150x150	≥ 3
	Trockenrohddichte	(DIN EN 990)	Alle Probekörper	-

Die hergestellten Balken wurden ergänzend genutzt, um die Feuchteverteilung im Querschnitt zu analysieren (siehe Abbildung 14). Hierzu wurde Probenmaterial sowohl aus dem mittleren Bereich als auch aus den Randzonen entnommen und die Feuchte nach DIN EN 1097-5 bestimmt. Durch die Auswertung der Feuchteverteilung können Feuchtebedingungen im Beton beurteilt werden, denen die Bewehrungsstäbe aus Hanf und Epoxidharz ausgesetzt sind. Abbildung 14 zeigt die Entnahmestellen zur Feuchtebestimmung.

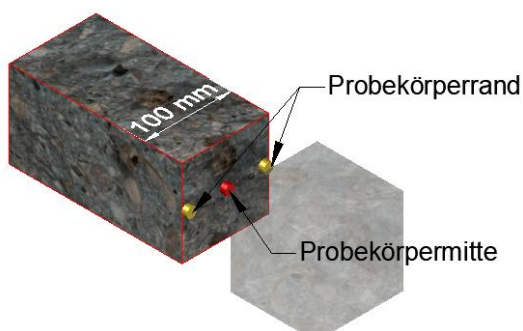


Abbildung 14 – Demonstrative Darstellung eines Balkens und der Entnahmestellen von Feuchtproben

5.1.5. Biegebalken und Demonstratoren

Zur Herstellung der Biegebalken versah das DITF die Stäbe mit zwei Profilierungen: eine Besandung und eine Umwicklung. Beide Varianten wurde im Nachgang zur Pultrusion mit Ultraviolett (UV) erhärtendem Klebstoff aufgebracht. Die Besandung erfolgte mit einem Quarzsand der Körnung 0 - 0,9 mm. Für die Umwicklung wurde der gleiche Roving wie zur Herstellung der Stäbe verwendet (1000 tex, 53 tpm). Als Harzbad für den Roving diente eine medizinische Spritze (ohne Stempel). Nach erfolgter Imprägnierung wurde der getränkte Roving unmittelbar auf die Stäbe gewickelt. Die erforderliche Wickelspannung wurde durch die Fixierung mithilfe eines Kabelbinder an den Stabenden sichergestellt.



Abbildung 15 – profilierte Bewehrungsstäbe der Balkendemonstratoren (links: Stäbe mit „Umwicklung“, rechts: „besandete“ Stäbe)

Aufgrund der geringen Anzahl zur Verfügung stehender Hanfbastbewehrungsstäbe wurden die Abmessungen der Balken auf zehn Zentimeter Höhe, zehn Zentimeter Breite und fünfzig Zentimeter Länge begrenzt (Abbildung 16). Die Betondeckung der Hanfbastbewehrungsstäbe von zwei Zentimetern wurde mit Abstandshaltern realisiert, die gleichzeitig als Lagesicherung dienten. Die Aufzeichnung der Verformungen erfolgte wie zuvor mit Hilfe eines optischen Messsystems der digitalen Bildkorrelation (DIC). Daher wurden die betonierten Balken kurz vor Versuchsdurchführung mit einem Speckle-Muster versehen. Dies geschah durch das Aufbringen einer weißen Acrylfarbe auf einer Messfläche von 19 × 10 cm auf die Probekörper. Das Aufbringen des Musters erfolgte manuell mit einem schwarzen Entwickler (der üblicherweise zur Risserkennung in Materialien wie Stahlbeton, Stahl oder Schweißverbindungen im Metallbau eingesetzt wird) durch Aufsprühen der Speckle-Punkte. Die Auswertung der mit DIC aufgezeichneten Versuche erfolgte mit der Software Istra4D. Das Muster des

Speckle-Kollektivs und eine exemplarische Abbildung eines Probekörpers zeigt Abbildung 16.

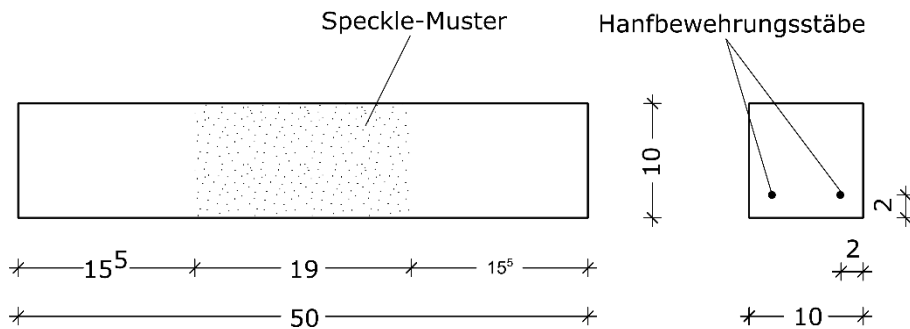


Abbildung 16 – Abmessungen der Biegebalken mit zugehörigem Speckle Muster für das optische Messsystem

Die Versuche der Biegebalken wurden an der Universal-Prüfmaschine inspekt table 50-1, Hegewald & Peschke, durchgeführt. Abbildung 17 zeigt den schematischen Versuchsaufbau mit Angabe der Auflagerabstände und den Punkten der Krafteinleitung.

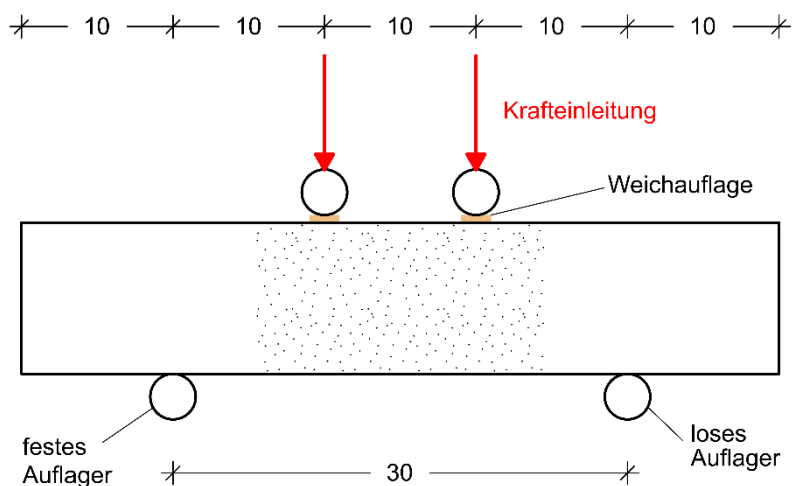


Abbildung 17 – Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus Biegebalken mit Abstand der Auflager und Angabe der Krafteinleitung

Um den ÖkoLB durch die zylindrischen Krafteinleitungspunkte nicht vorzuschädigen, wurde jeweils eine Weichauflage aus einer 0,5 cm Holzwolle-Dämmplatte über die gesamte Balkenbreite verwendet (siehe Abbildung 18).

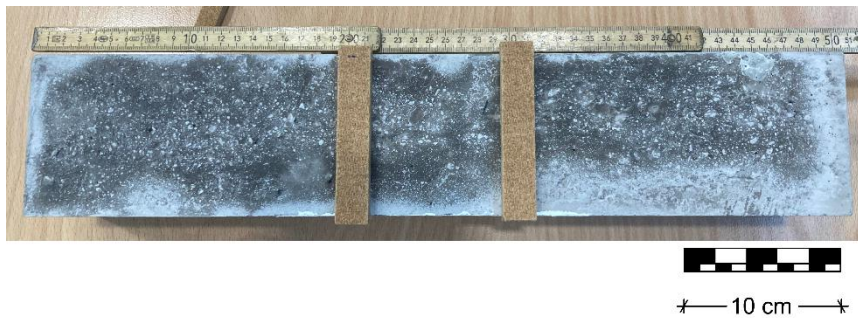


Abbildung 18 – Weichauflage zur Krafteinleitung der Prüfmaschine

5.2. Charakterisierung der Hanfbastfasern

Zur Bestimmung der Materialparameter der Hanfbastfasern wurden die Reindichten an 14 Hanfbastfaserproben sowie Zugversuche an Faserbündeln des Hanfstrohs Hanf1 durchgeführt. Die Ergebnisse und Auswertung der Reindichtemessung zeigt Abbildung 19.

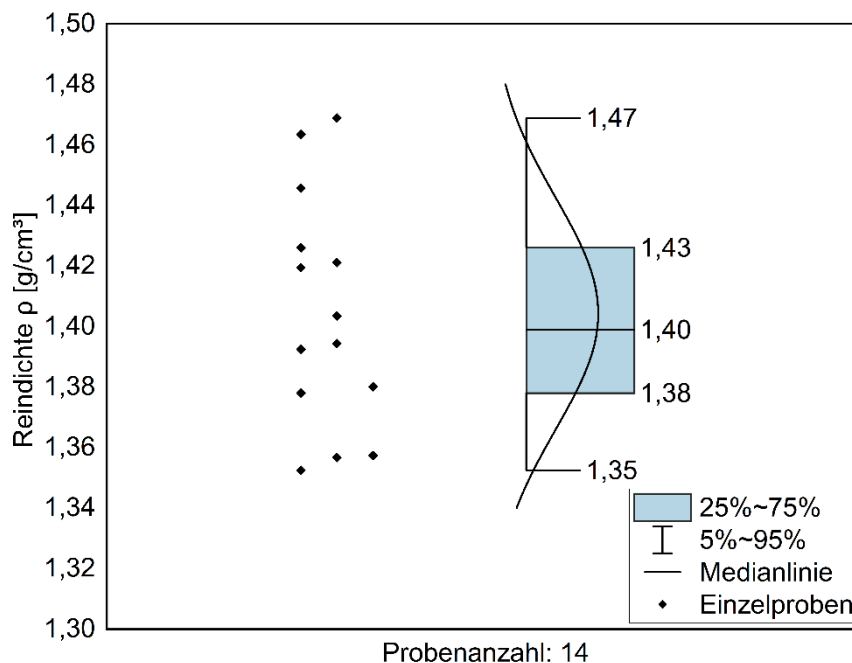


Abbildung 19 – Verteilung Reindichte mit Angabe des Medians, des 5 % und 95 % Quantils und der Ausreißer

Für die Zugversuche wurden von je einem Stängel die Fasern von den Schäben getrennt, in zwei Teile separiert und für die Zugversuche vorbereitet. Dadurch liegen Ergebnisse der Zugversuche der Fasern für je eine Pflanze vor.

Von den durchgeführten 70 Versuchen konnten 56 gültige ausgewertet werden. Bei 14 Versuchen versagten die Fasern im Klemmbereich und konnten daher nicht ausgewertet werden. In Abhängigkeit der Faserbündelstärke und der Anordnung der

Einzel Fasern streuen die Ergebnisse der Zugfestigkeit stark. Der Mittelwert der Zugfestigkeit der geprüften Faserbündel liegt bei 185 MPa und der Median bei 149 MPa. Für sehr feine Faserbündel liegen Ausreißer von nur 10 MPa vor, was einer Abweichung nach unten vom Median von 93 % entspricht. Für sehr starke Faserbündel konnten Ausreißer von bis zu 530 MPa bestimmt werden, was einer Abweichung von 256 % über dem Median entspricht. Das 5 % Quantil der Verteilung liegt bei 30 MPa und das 95 % Quantil liegt bei 502 MPa. Die Ergebnisse zeigen die Abbildung 20 und Abbildung 21.

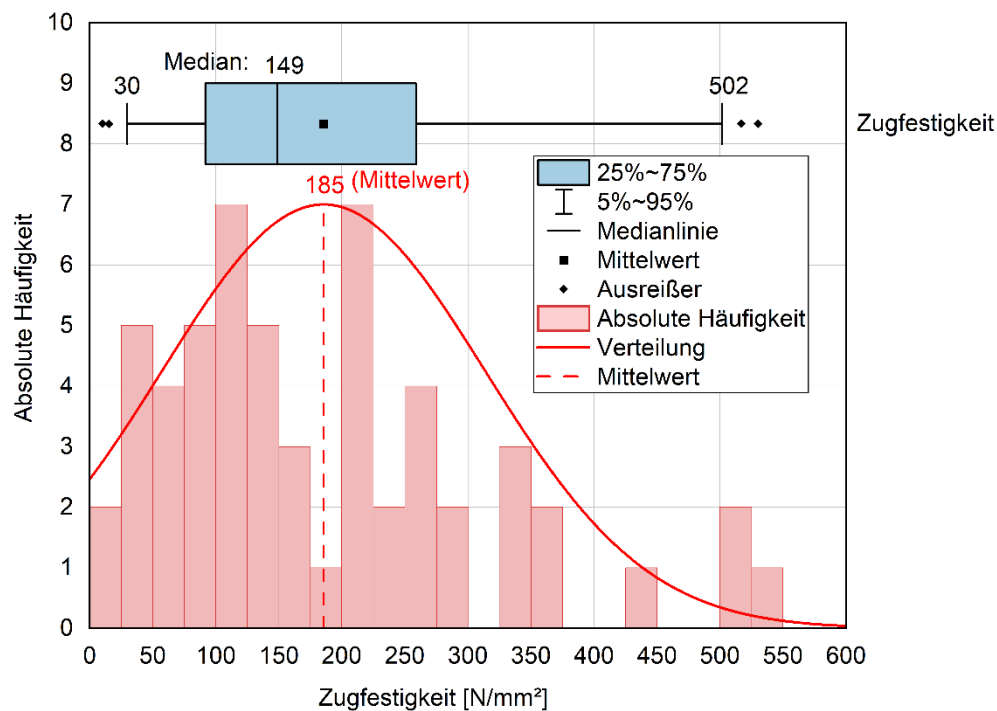


Abbildung 20 – Histogramm zur Verteilung der Zugfestigkeit mit horizontalem Boxplot

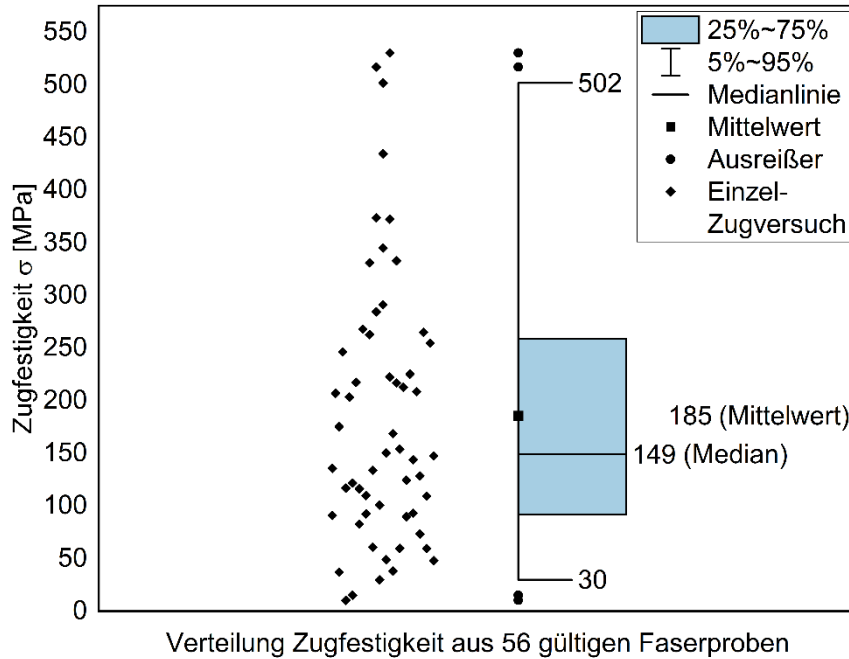


Abbildung 21 – Box-Plot der Zugfestigkeit mit Verteilung der Datenpunkte sowie Angabe der 5 und 95 % Quantile, des Mittelwerts und des Medians

Für die E-Moduln (Abbildung 22 und Abbildung 23) ergeben sich ebenfalls starke Streuungen in Abhängigkeit der Morphologie des zugehörigen Faserbündels. Hier liegt der Mittelwert bei 26.292 MPa und der Median bei 26.128 MPa. Die Ausreißer liegen im Vergleich zur Zugfestigkeit am unteren Ende mit 6.583 MPa bei 90 % Abweichung zum Median und am oberen Ende mit 51.987 MPa und somit 164 % über dem Median. Das 5 % Quantil der Verteilung liegt bei 6.583 MPa und das 95 % Quantil bei 51.987 MPa. Sowohl bei der Zugfestigkeit als auch beim E-Modul sind die Werte normalverteilt.

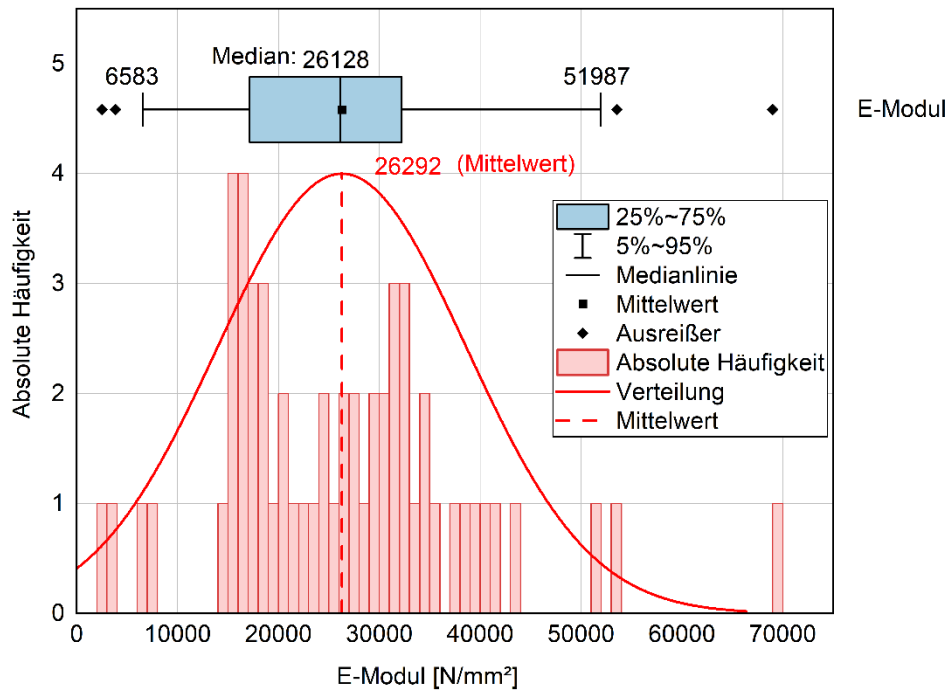


Abbildung 22 – Histogramm zur Verteilung des E-Moduls mit horizontalem Boxplot

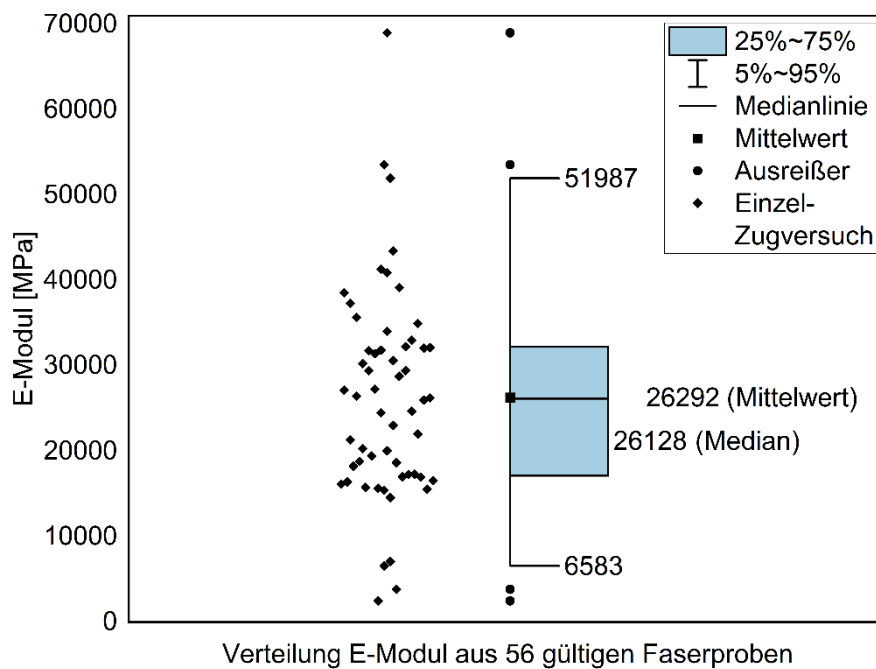


Abbildung 23 – Box-Plot des E-Moduls mit Verteilung der Datenpunkte sowie Angabe der 5 und 95 % Quantile, des Mittelwerts und des Medians

Eine Zusammenfassung der ermittelten mechanischen Eigenschaften zeigt Tabelle 6.

Tabelle 6 – Mechanische Eigenschaften der untersuchten Faserbündel Hanf 1 (56 gültige Zugversuche)

		Dichte [g/cm ³]	Zugfestigkeit [MPa]	Elastizitätsmodul [MPa]
Hanf1 Faserbündel:	Ausreißer Minimum	1,35	10	2495
	5 %-Quantil	1,35	30	6583
	Median	1,40	149	26128
	Mittelwert	1,40	185	26292
	95 %-Quantil	1,47	502	51987
	Ausreißer Maximum	1,47	530	69014
	Standardabweichung	0,04	128	12313

Neben den mechanischen Eigenschaften wurde ebenfalls die Wasseraufnahme der Hanfbastfasern untersucht. An 15 einzelnen Fasern konnte im Durchschnitt eine Volumenzunahme von 46 Vol.-% bestimmt werden. Daraus resultiert eine Wasseraufnahme der Hanfbastfasern von ca. 30 M.-%.

Die Maßhaltigkeit der im Pultrusionsverfahren hergestellten Hanfbastbewehrungsstäbe unterliegt einer gewissen Streuung. Da es sich bei Hanf und den daraus gewonnenen Bastfasern um ein Naturprodukt handelt, kann die Oberfläche der Stabelemente in Abhängigkeit der Fasermorphologie (feine bis starke Faserbündel in einem Garn) Schwankungen unterliegen und die enthaltenen Fasern können nicht perfekt gerade ausgebildet sein. In der Folge entstehen dadurch ovale Querschnittsbereiche entlang des Stabes. Um den Stabquerschnitt statistisch korrekt zu bestimmen, erfolgt eine Stichprobe von $n = 300$ Messungen über die Stablänge mithilfe eines Messschiebers (Abbildung 24). Messfehler werden über eine Rotation der Stäbe von 90° um die Stabachse nach der Hälfte der Messung ausgeglichen. So wird der Querschnitt in beiden Koordinatenrichtungen y- und z-Achse zu gleichen Teilen erfasst. Für die weitere Auswertung wird näherungsweise ein ideeller Kreisquerschnitt angesetzt.

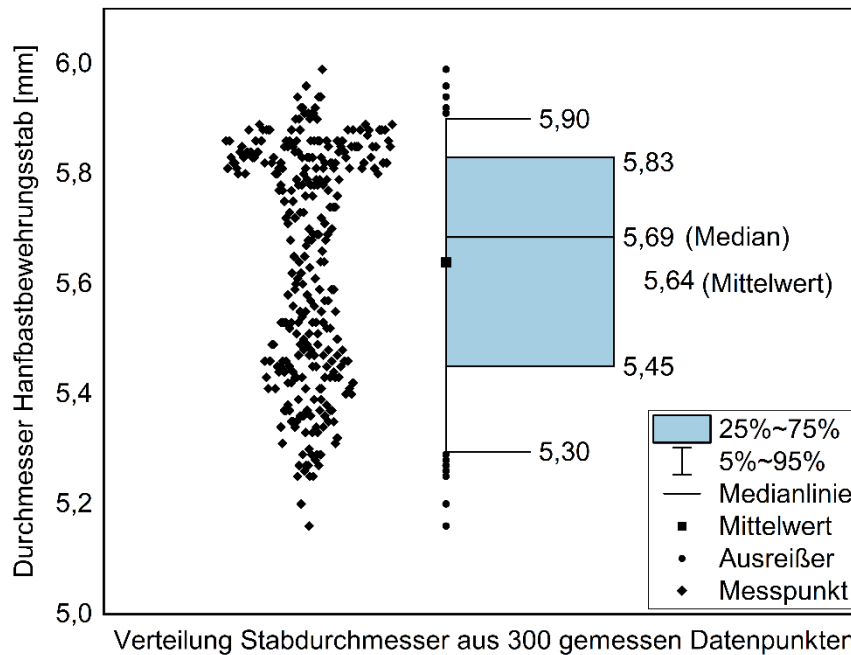


Abbildung 24 – Verteilung des Stabdurchmesser der Hanfbastbewehrungsstäbe mit Angabe der Ausreißer, des 5 % und 95 % Quantils, des Mittelwertes und Medians

Insgesamt wurden acht Zugversuche an den Hanfbastbewehrungsstäben an der universellen Zugprüfmaschine Zwick zwickiLine 5 kN durchgeführt. Für die Ermittlung des E-Moduls ist zuvor die Stabdehnung zu bestimmen. Der zurückgelegte Weg des Stabes wurde mit einem externen Extensometer im mittleren Bereich der Stablänge zwischen den Klemmbelägen mit einer Ausgangslänge von $L_0 = 55$ mm gemessen. Die Längenänderungen des Stabes Δl wird auf diese Ausgangslänge bezogen. Damit bestimmt sich der E-Modul wie zuvor in den Zugversuchen der Fasern analog zu Kapitel 5.1.1. Die Zugversuche wurden als Kraft-Weg-Diagramme ausgegeben. Die Auswertung erfolgt analog zu den Faserzugversuchen visuell durch Definition des ersten Bruchs (Faser oder Epoxidharz) im Kraft-Weg-Diagramm. Die Definition eines Wendepunktes entfällt für den pultrudierten Bewehrungsstab, denn die Faser sind fest eingebettet in der Epoxidharzmatrix. Eine Entkräuselung, wie im Fall der Einzelfasern, tritt bei den Stäben nicht auf. Ausgangspunkt für die Bestimmung der Dehnung ist der korrigierte Nullpunkt. Die Spannung wurde aus der Kraft geteilt durch die ideelle Kreisfläche der Stäbe, mit dem zuvor bestimmten Median des Durchmessers von 5,69 mm mit $A_{\text{Kreis}} = 25,43 \text{ mm}^2$, berechnet. Mit dem definierten Faserbruch der korrespondierenden Dehnung und der Dehnung am korrigierten Nullpunkt wurde der E-Modul der Stäbe berechnet. In Abbildung 25 ist exemplarisch ein Kraft-Weg-Diagramm mit dem korrespondierenden Spannungs-Dehnungs-Diagramm und der Definition des ersten Bruchs dargestellt.

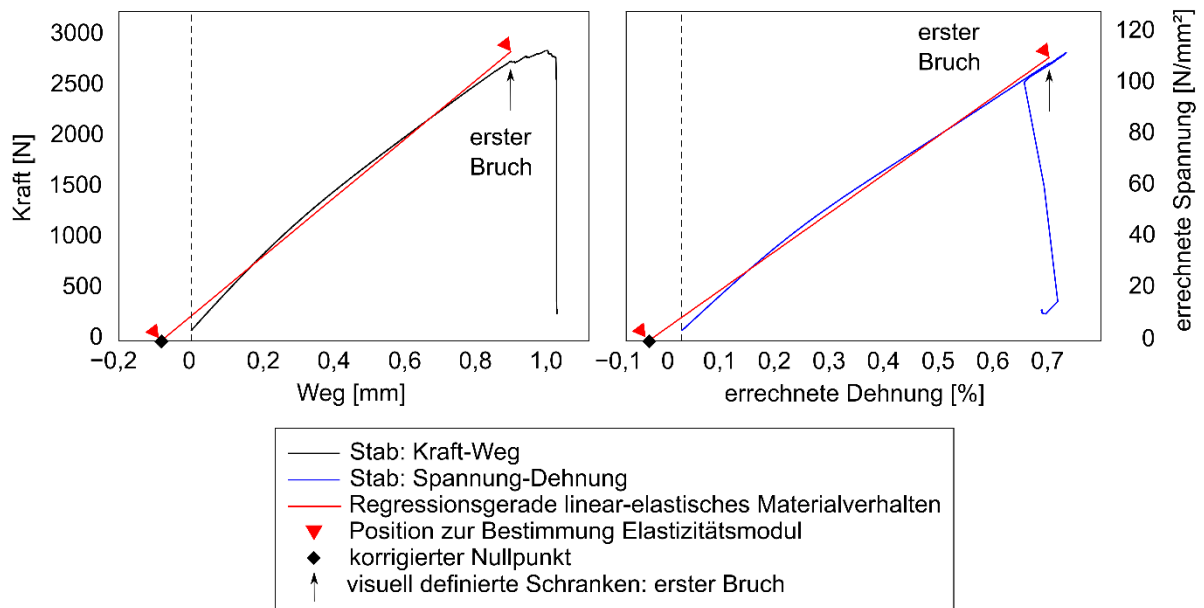


Abbildung 25 – Exemplarische Auswertung der Stäbe anhand der Kraft-Weg-Diagramme (links) und der korrespondierenden Spannungs-Dehnungs-Diagramme (rechts).

Alle gezogenen Bewehrungsstäbe versagten durch einen Bruch in unmittelbarer Nähe der Verklebung. Nach DIN EN ISO 527-4 (2023) sind Probekörper mit einem Versagen im Klemmbereich ungültig. In Abbildung 26 ist ein Hanfbastbewehrungsstab nach erfolgter Zugprüfung dargestellt.



Abbildung 26 – Versagte Zugprobe eines Hanfbastbewehrungsstabes

Die Auswertung des E-Moduls in Abbildung 27 zeigt eine geringe Streuung mit Ausnahme eines Ausreißers. Der Median liegt bei 15049 MPa, der Mittelwert bei 15217 MPa, das 5 % Quantil bei 14327 MPa und das 95 % Quantil bei 17278 MPa, was gleichzeitig dem Ausreißer entspricht.

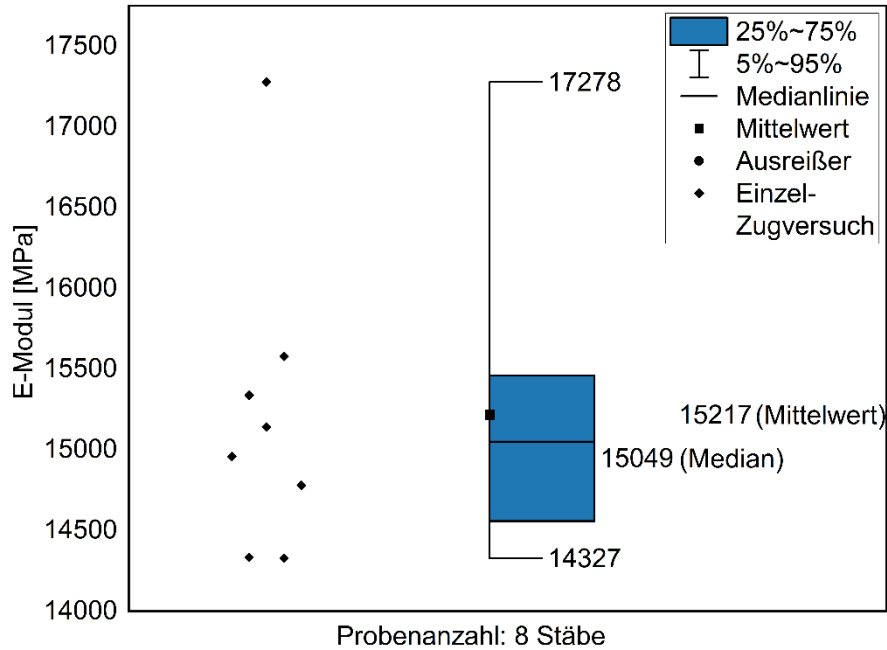


Abbildung 27 – Verteilung des E-Moduls der Hanfbastbewehrungsstäbe mit Angabe der Ausreißer, des 5 % und 95 % Quantils, des Mittelwertes und Medians

Zur Bestimmung der Zugfestigkeit wird der zuvor definierte Faserbruch verwendet. Die Auswertung liefert einen Median von 117 MPa, einen Mittelwert von 114 MPa sowie ein 5 % Quantil von 88 MPa und ein 95 % Quantil von 131 MPa. Abbildung 28 zeigt die Verteilung der Zugfestigkeitswerte. Eine Übersicht der mechanischen Eigenschaften enthält Tabelle 7.

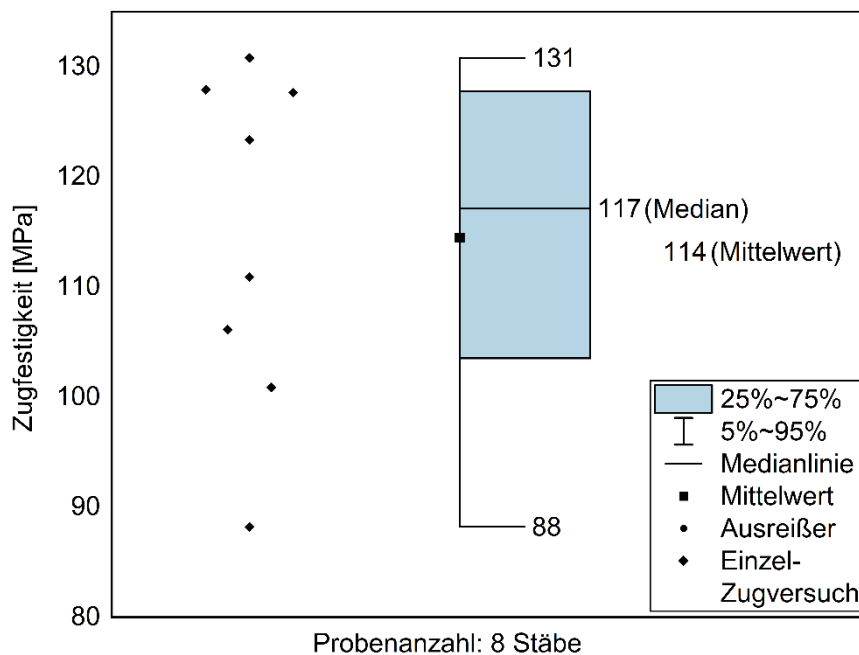


Abbildung 28 – Verteilung der Zugfestigkeit der Hanfbastbewehrungsstäbe mit Angabe der Ausreißer, des 5 % und 95 % Quantils, des Mittelwertes und Medians

Tabelle 7 – Durchmesser und mechanische Eigenschaften der Hanfbastbewehrungsstäbe (8 Probekörper)

		Durchmesser [mm]	Zugfestigkeit [MPa]	Elastizitäts- modul [MPa]
Hanfbastbewehrungsstäbe	Ausreißer Minimum	5,16	88	14327
	5 %-Quantil	5,30	88	14327
	Median	5,69	117	15049
	Mittelwert	5,64	114	15217
	95 %-Quantil	5,90	131	17278
	Ausreißer Maximum	5,99	131	17278
	Standardabweichung	0,21	15	943

5.3. Oberflächenbehandlung glatter Stabelemente zur verbesserten Verbundkraftübertragung

Die in Kapitel 5.1.3 vorgestellten Bewehrungsstäbe wurden in Versuchskörpern an einer hydraulischen Vier-Säulen-Prüfmaschine mit einer maximalen Prüflast von 630 kN getestet. Für die Hanffaserbewehrungsstäbe musste der Prüfaufbau entsprechend angepasst werden. Die Stäbe reagieren sehr empfindlich auf Querdruck-Beanspruchungen. Um eine Vorschädigung der Stäbe durch die hydraulischen Spannbacken zu verhindern, wurde eine manuelle Einspannbacke verwendet und durch ein geeignetes Adapterstück in den Prüfaufbau integriert. Der Prüfkörper befindet sich auf einer 20 mm dicken Stahlplatte. Diese ist mittels Gewindestangen am oberen Spannungspunkt der Maschine verankert. Nach dem Einspannen wird der Körper gegen die Stahlplatte nach unten gezogen. Der Schlupf (Verschiebung des Bewehrungsstabes) wird am freien Stabende mithilfe eines induktiven Wegaufnehmers gemessen. Die Versuche erfolgten weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 0,5 mm/min und einer Abtastrate des induktiven Wegaufnehmers von 10 Hz. Abbildung 29 zeigt den Versuchsaufbau.

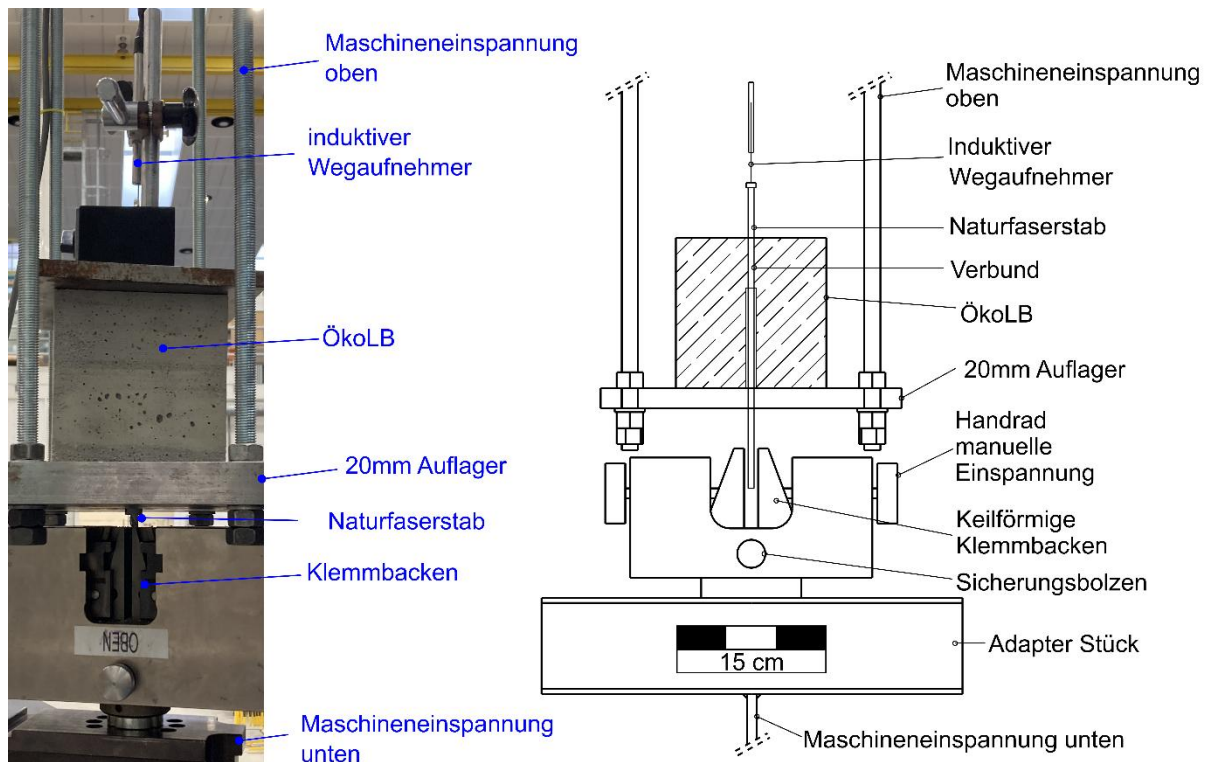


Abbildung 29 – Versuchsaufbau Auszugversuche

Nach der Herstellung wurden die Betonwürfel mit den eingebetteten Bewehrungsstäben 28 Tage in einem Klimaraum bei Normalklima von 20°C und einer Luftfeuchte von 65 % in Folie eingeschlagen gelagert.

Für den Aufzeichnungsstart der Messtechnik wurden die Stäbe mit einer geringen Vorkraft (0,15-0,25 kN) beaufschlagt. Bei den Versuchen mit der umwickelten Bewehrung versagte die Umwicklung aller Stäbe im Bereich der Einspannung. Im Fall des Probekörper P11 brach der Stab sogar im Bereich der Einspannung. Auch bei den Stäben mit der kombinierten Profilierung aus Besandung und Umwicklung brach bei Probekörper P15 die Umwicklung im Bereich der Einspannung. Die Klemmwirkung der beiden Spannbacken auf die Restfläche und die noch intakte Garnfläche der Umwicklung reichte in der Folge nicht aus, um den Stab weiter festzuhalten und er rutschte so durch die Spannbacken. Nachdem die gebrochene Umwicklung entfernt wurde, konnte der Versuch wieder aufgenommen werden.

Teilweise wiesen die Probekörper vor der Versuchsdurchführung auf der Würfeloberseite (freies Stabende) lotrecht zur Bewehrung verlaufende Risse auf (Abbildung 30). Davon betroffen waren vier hanfbastfaserbewehrte Probekörper (P8, P9, P10 und P13). Auch an den Biegebalken (siehe Kapitel 5.7) wurden derartige

Risse festgestellt. Ursache hierfür ist das Quellverhalten der Bewehrungsstäbe auf das in Kapitel 5.7.2 eingegangen wird.

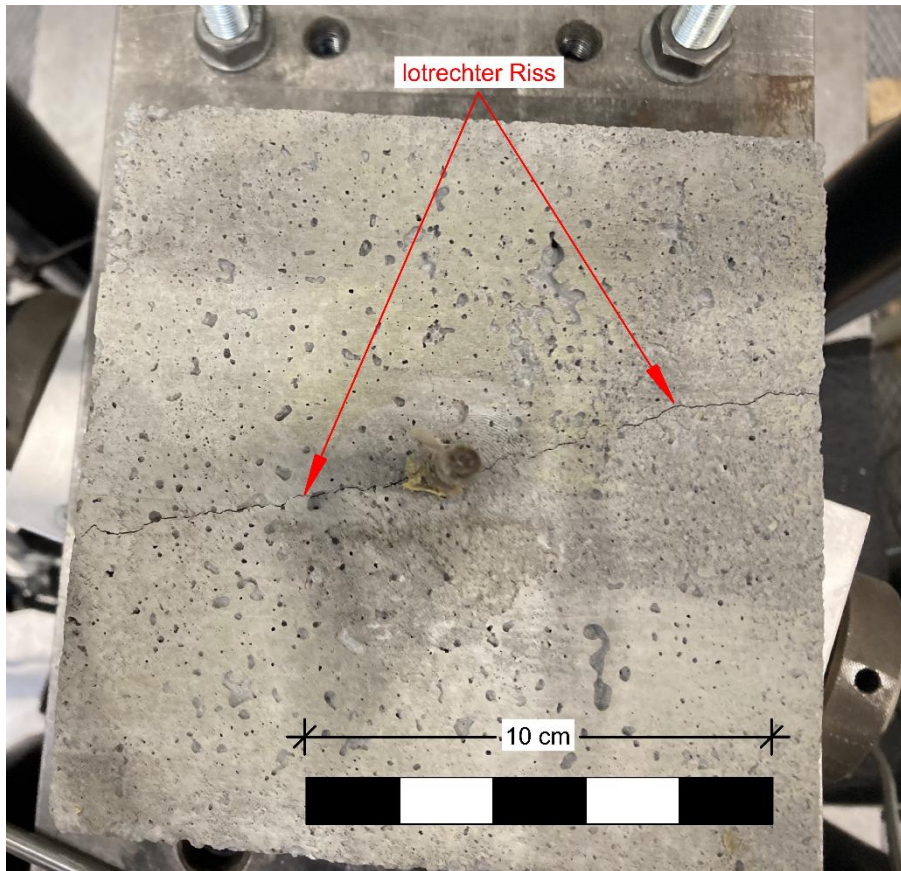


Abbildung 30 – Lotrecht zur Bewehrung verlaufender Riss in Probekörper P8 mit „grob besandetem“ Hanfbastbewehrungsstab

Der gemessene Schlupf bis zum Versagen des Verbundes liegt im Bereich weniger hundertstel bis tausendstel Millimetern, mit Ausnahme der Probe P15. Dort liegt der Schlupf im zehntel Millimeter Bereich. In Abbildung 31 ist die Verteilung der erzielten Verbundspannungen gruppiert nach Profilierungsvarianten dargestellt. Die Referenz-Probekörper (mit Betonstahl) lieferte die größten Verbundspannungswerte. Die Ergebnisse streuen gering, liegen in einem engen Wertebereich und besitzen einen Median von 3,40 MPa. Die geringsten Verbundspannungswerte erzielten die Stäbe der kombinierten Profilierung aus Besandung und Umwicklung mit einem Median von 1,67 MPa. Sie sind damit 50 % niedriger als die Referenzwerte des Betonstahls. Die minimalen und maximalen Werte der Verbundspannungen unterscheiden sich um 0,93 MPa. Die Werte für die ausschließlich „umwickelten“ Stäbe hatten die größte Streuung wobei Minimum und Maximum sich um 1,49 MPa unterscheiden. Dennoch lag der Median der Verbundspannung bei 2,69 MPa und damit lediglich 20 % unter dem Referenzwert des Betonstahls. Mit den beiden Besandungvarianten wurden

höhere Verbundspannungen als mit der Umwicklungsvariante bzw. der kombinierten Variante erzielt. Die feine Besandung liefert von allen Varianten die geringste Streuung der Verbundspannung. Zwischen Minimum und Maximum unterschieden sich die Werte lediglich um 0,18 MPa. Mit einem Median von 2,79 MPa liegt die feine Besandung allerdings 17 % unter dem Referenzwert der klassischen Bewehrung. Demgegenüber erzielte die grobe Besandung mit einem Median von 3,14 MPa die höchste Verbundspannung aller untersuchter Profilierung und liegt nur 7 % unter dem Referenzwert der klassischen Bewehrung. Wird die Spanne der minimalen und maximalen Werte betrachtet, so ist ein Ausreißer vorhanden, wodurch der Unterschied zwischen Minimum und Maximum 0,92 MPa beträgt.

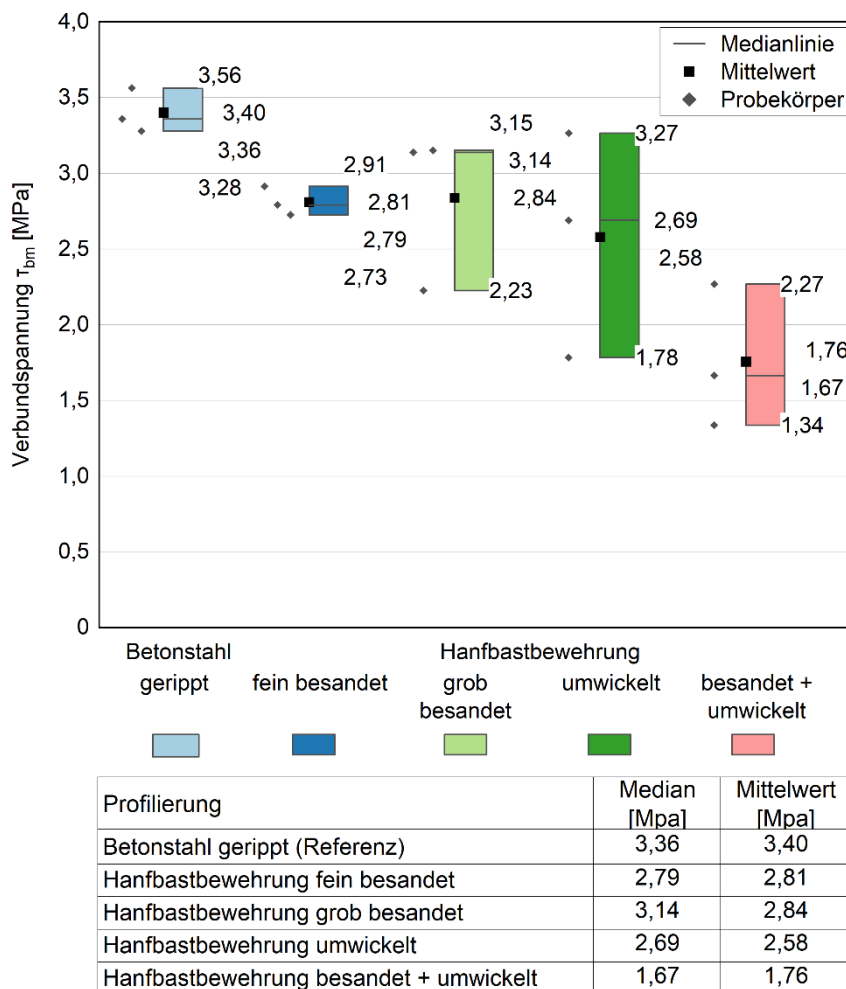


Abbildung 31 – Verteilung der Verbundspannung T_{bm} nach Referenzbewehrung und Profilierungsart mit Darstellung des Medians und Mittelwerts

5.4. Charakterisierung der Bindemittel

Der Fokus der Bindemittelauswahl lag neben technologisch optimierten Eigenschaften auch auf ökologischen Aspekten. Die Auswahl und Charakterisierung der Bindemittel erfolgten nach den Kriterien eines niedrigen Klinkergehaltes, einer ausreichend hohen Frühfestigkeitsentwicklung sowie nach den mechanischen Anforderungen der Betone (Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit). Die Bindemittelzusammensetzungen sind Kapitel 5.1.4 zu entnehmen.

5.4.1. Eigenschaften der Bindemittel

Die Hydratationswärmeentwicklungen von BM2 und BM3 (Abbildung 32) zeigen einen vergleichbaren Verlauf. Die Hydratationswärme von BM1 ist bereits in der frühen Hydratation deutlich größer und erreicht nach ca. 48 Stunden einen Wert von ca. 200 J/g_{Binder}. Bei der Betrachtung des Wärmeflusses in Abbildung 33 zeigt sich bei BM1 nach ca. 4 Stunden ein ausgeprägter Wärmepeak mit darauffolgendem signifikantem Abfall. Bei BM2 und BM3 ist der Wärmefluss der silikatischen und aluminatischen Klinkerreaktion deutlich getrennt und weniger intensiv als bei BM1.

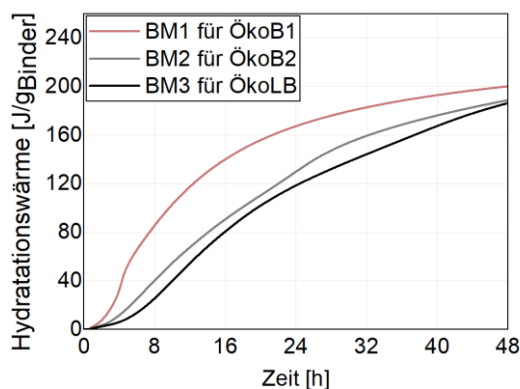


Abbildung 32 – Zeitlicher Verlauf der Hydratationswärme-Entwicklung der Bindemittel BM1, BM2 und BM3 in den ersten 48 Stunden

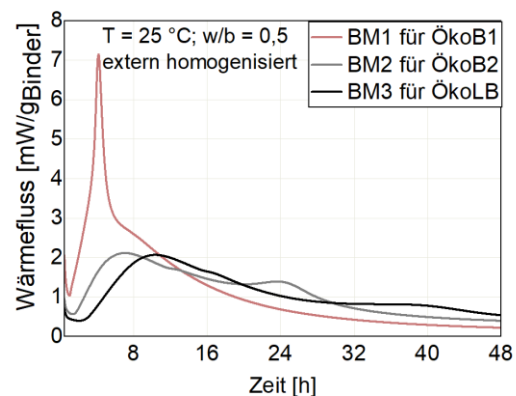


Abbildung 33 – Zeitlicher Verlauf des Wärmeflusses der Bindemittel BM1, BM2 und BM3 in den ersten 48 Stunden

Zusätzlich zur Untersuchung der Reaktivität der Bindemittel wurden die Druck- und Biegezugfestigkeiten an Mörtelprismen nach DIN EN 196-1 (2016) bestimmt. Die Herstellung der Mörtelprismen erfolgte nach DIN EN 197-1 (2011). Die Prüfungen wurden nach 2 und 28 Tagen durchgeführt. Die Ergebnisse in Abbildung 34, stellen die Druck- und Biegezugfestigkeit nach zwei und 28 Tagen dar. Die höchste Frühfestigkeit nach zwei Tagen konnte mit BM1 erzielt werden. Nach 28 Tagen erreichte BM3 mit 67,7 MPa die höchsten Druck- und Biegezugfestigkeiten. Mit diesen

Werten erfolgt in Kapitel 6.2.1 die Einordnung der Bindemittel in Normzemente gem. DIN EN 197-1 (2011) bzw. DIN EN 197-5 (2021).

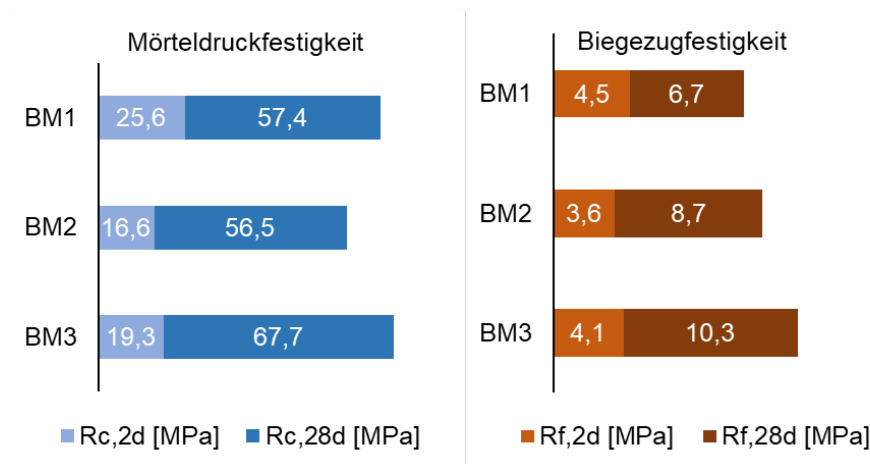


Abbildung 34 – Ergebnisse der Prüfungen an Mörtelprismen nach DIN EN 196-1 (2016) nach 2 und 28 Tagen, Diagramm links: Ergebnisse der Druckfestigkeiten / Diagramm rechts: Ergebnisse der Biegezugfestigkeiten

5.4.2. Alkalität der Bindemittel

Die Ergebnisse an den extrahierten Porenflüssigkeiten nach (Longuet et al., 1973) sind in Abbildung 35 dargestellt. Es wurden der pH-Wert gemessen, sowie die Gehalte an gelöstem Ca^{2+} , K^+ und Na^+ mittels Emissionsspektrometer bestimmt. Die höchste Alkalität konnte bei BM1 und die niedrigste bei BM3 nachgewiesen werden.

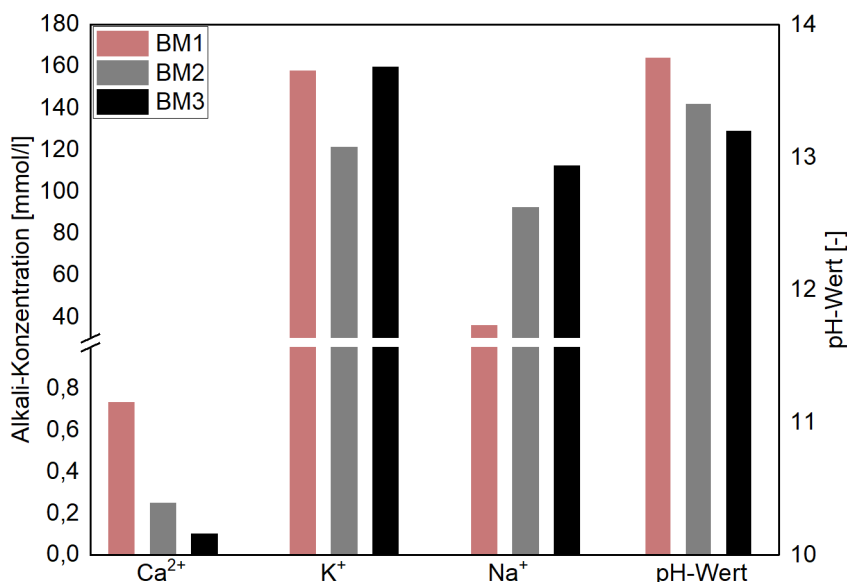


Abbildung 35 – Ergebnisse der chemischen Analyse der Porenflüssigkeiten (linke y-Achse) und der pH-Werte (rechte x-Achse)

In Abbildung 36 sind die gemessenen Portlanditgehalte ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) der drei untersuchten Bindemittel dargestellt. Die Portlanditgehalte liegen zwischen 15 und

17 g/100g_{Binder}. Der geringste Portlanditgehalt konnte bei BM1 festgestellt werden, dem einzigen Bindemittel mit puzzolanischem Zementersatzstoff.

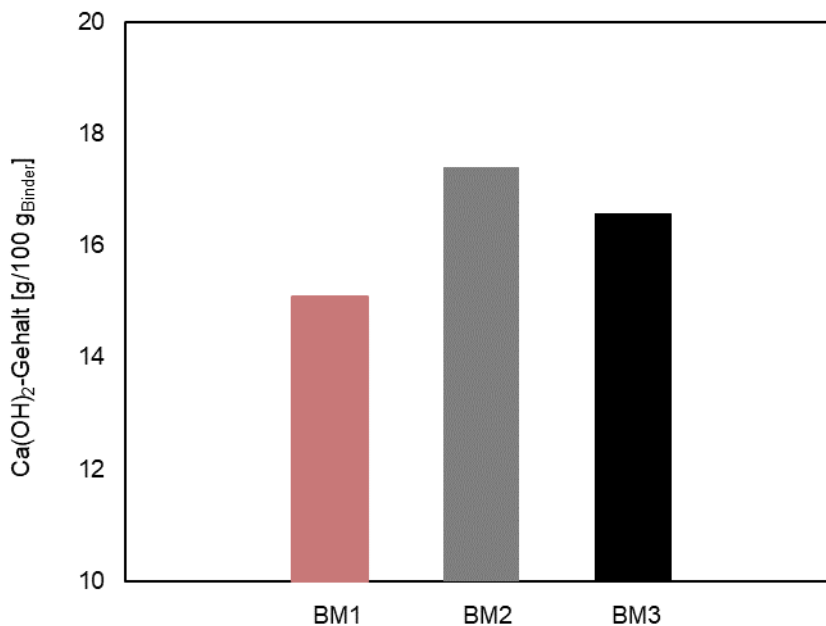


Abbildung 36 – Ca(OH)₂-Gehalt in den Bindemitteln BM1, BM2 und BM3

5.5. Herstellung und Charakterisierung der Ökobetone

5.5.1. Materialparameter der Ökobetone

Für das in Tabelle 5 vorgestellte Prüfprogramm wurden entsprechende Probekörper hergestellt. Probekörper aus Normalbetonen (ÖkoB1 und ÖkoB2) wurden gemäß DIN EN 12390-2 (2019) und Probekörper aus haufwerksporigem Leichtbeton (ÖkoLB) entsprechend DIN EN 1354 (2005) gelagert. In Tabelle 8 sind die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen ($f_{c,cube}$ und $f_{c,cyl}$) die E-Modul- sowie die Biegezugfestigkeitswerte ($f_{ct,fl}$) für die drei Betone ohne Hanfbastfaserzusatz und die entsprechenden Betone mit Hanfbastfasern dargestellt. Die angegebenen Mittelwerte basieren auf jeweils drei Versuchen. Die Druckfestigkeitsprüfungen wurden nach 2, 28 und 90 Tagen durchgeführt. Die Prüfung der Biegezugfestigkeit und der E-Moduln fand jeweils nach 28 Tagen statt.

Die Zugabe von Hanfbastfasern beeinflusste die Festigkeitseigenschaften der Betone. Beim ÖkoB1 wurden bei Zusatz von Hanfbastfasern bis zu einem Prüfzeitpunkt von 28 Tagen geringere Werte für alle untersuchten Materialparameter festgestellt. Nach 90 Tagen lagen die Ergebnisse der Würfeldruckfestigkeit mit und ohne Fasern auf

gleichem Niveau. Bei den Probekörpern aus ÖkoB2 mit Hanfbastfasern wurden nach 28 und 90 Tagen jeweils tendenziell geringere Würfeldruckfestigkeitswerte erzielt, als bei den Probekörpern aus ÖkoB2 ohne Hanfbastfasern. Im Gegensatz dazu stiegen die Zylinderdruck- und die Biegezugfestigkeit bei der Zugabe von Fasern leicht an. Beim ÖkoLB führte der Zusatz von Hanfbastfasern nur zu geringen Unterschieden in der Würfeldruckfestigkeit und der Biegezugfestigkeit, lieferte jedoch eine höhere Zylinderdruckfestigkeit und ein gesteigertes E-Modul. Bei einer Betrachtung der Ergebnisse an den ÖkoLB-Zylindern mit und ohne Hanfbastfasern, ist zu beachten, dass eine Abweichung der Trockenrohdichten ρ_d vorliegt, welche einen Einfluss auf den E-Modul und die Druckfestigkeit hat.

Tabelle 8 – Gegenüberstellung der Materialparameter $f_{c,cube}$, $f_{c,cyl}$, $f_{ct,fl}$, E-Modul und Rohdichte (für ÖkoB1, B2) sowie Trockenrohdichte $\rho_{d,28d}$ für ÖkoLB mit 0,1 Vol.-% Hanffasern und ohne Hanffasern

	Alter bei Prüfung	ÖkoLB		ÖkoB1		ÖkoB2	
	[Tage]	Mit Fasern	Ohne Fasern	Mit Fasern	Ohne Fasern	Mit Fasern	Ohne Fasern
$f_{c,cube}$ [MPa]	2	6,1	5,6	25,3	28,2	20,1	20,1
	28	10,4	10,3	56,8	62,5	58,1	64,9
	90	11,5	10,5	66,0	65,1	67,0	70,0
$f_{c,cyl}$ [MPa]	28	11,0	9,1	50,0	53,6	53,8	51,5
$f_{ct,fl}$ [MPa]	28	1,5	1,5	5,6	6,2	6,6	6,4
E-Modul [MPa]	28	6470	4837	27757	29914	32040	31436
Rohdichte [kg/m ³]	28	959	963	2340	2374	2374	2403
$\rho_{d,28d}$ [kg/m ³]	28	817	801				

5.5.2. Frischbetoneigenschaften und Verarbeitbarkeit

Eine zentrale Frage war, welchen Einfluss die Hanfbastfasern auf die Verarbeitbarkeit und Konsistenz im Frischbeton haben. In Tabelle 9 sind die Frischbetoneigenschaften dargestellt. Die Konsistenz, ermittelt über das Ausbreitmaß für die beiden Normalbetone ÖkoB1 und ÖkoB2, nahm durch die Hanfbastfasern ab. Alle drei Betone mit Hanfbastfasern hatten etwas geringere Frischbetonrohdichten.

Tabelle 9 – Frischbetoneigenschaften der Ökobetone

Betonsorte	Frischbetonrohdichte gemessen [kg/m ³]	Ausbreitmaß [mm]	Frischbetontemperatur [°C]
ÖkoB1 mit Hanfbastfasern	2345	350	24
ÖkoB1 ohne Hanfbastfasern	2385	375	-
ÖkoB2 mit Hanfbastfasern	2388	375	22
ÖkoB2 ohne Hanfbastfasern	2404	405	-
ÖkoLB mit Hanfbastfasern	905	-	23
ÖkoLB ohne Hanfbastfasern	911	-	22

5.5.3. Schwindverhalten von ÖkoLB mit Hanfbastfasern

Wie in 5.1.4 beschrieben, wurden dem ÖkoLB Hanfbastfasern mit einer Länge von 10-20 mm hinzugegeben. Die Messungen des Fröhschwindverhaltens erfolgte mit dem Schwindkegel der Firma Schleibinger am ÖkoLB ohne Hanfbastfasern (REF), mit Hanfbastfasern (Hanf) und zum Vergleich mit Kunststofffasern (Kunststoff). Die Kunststofffaser waren ca. 10 mm lang. In Abbildung 37 sind die Ergebnisse des Fröhschwindens dieser drei genannten Varianten dargestellt. Jeder Verlauf gibt den Mittelwert aus drei Einzelmessungen wider, welche jeweils über einen Zeitraum von 72 Stunden erfolgten. Alle drei Graphen zeigen eine Zunahme des Schwindmaßes nur in den ersten vier bis sechs Stunden. Für alle drei untersuchten Leichtbetone wiesen im weiteren Verlauf bis ca. 36 Stunden nach Wasserzugabe einen Rückgang des Schwindmaßes und damit ein geringfügiges Quellen auf. Nach 36 Stunden stagnierten die Verläufe und die Schwindverformungen nahmen wieder zu.

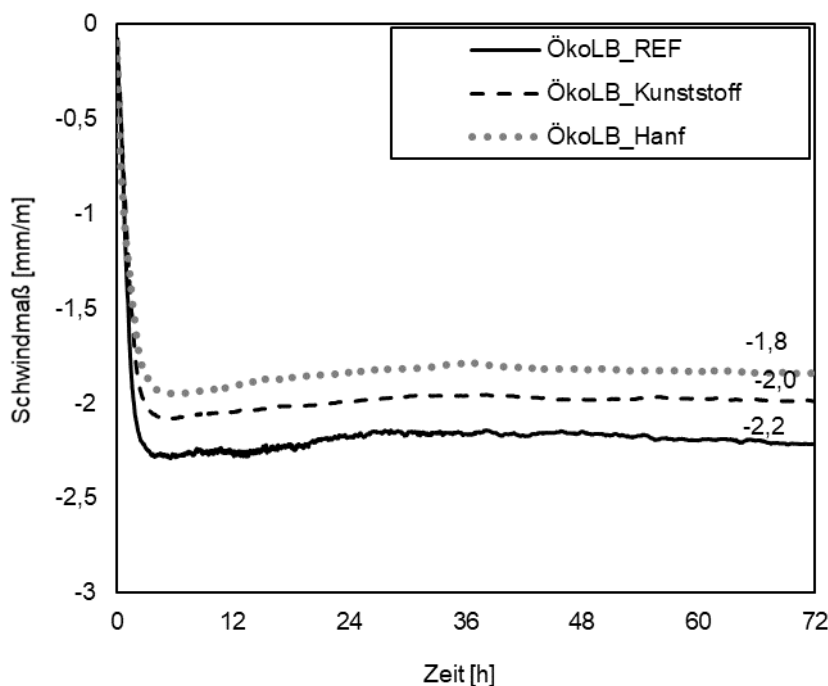


Abbildung 37 – Fröhschwinden des ÖkoLB ohne Fasern als Referenz sowie mit Kunststofffasern und mit Hanfbastfasern

Wie in Tabelle 10 dargestellt, konnte das Schwindmaß mit Kunststofffasern um 9 %, mit Hanfbastfasern um 18 % reduziert werden.

Tabelle 10 – Zusammenfassung der Ergebnisse der Schwindverformungen nach 72h

Betonsorte	Schwindmaß nach 72h [mm/m]	Reduktion des Schwindmaßes [%]
ÖkoLB – Referenz	-2,2	-
ÖkoLB + Kunststofffasern	-2,0	- 9 %
ÖkoLB + Hanfbastfasern	-1,8	- 18 %

5.5.4. Feuchteverteilung

Aus den hergestellten Balken mit den Abmessungen 100x100x500 mm aus ÖkoB1, ÖkoB2 und ÖkoLB, wurden nach 60 Tagen jeweils an den Rändern und in der Mitte Proben entnommen und der Feuchtegehalt ermittelt. Die Grafik in Abbildung 38 zeigt eine Feuchte bei ÖkoB1 und ÖkoB2 am Rand von 3,7 M.-% und in Probekörpermitte von ca. 6,3 M.-%. Bei ÖkoLB wurde am Rand ein Feuchtegehalt von 7,1 M.-% und in Probekörpermitte von 12,5 M.-% erfasst. Bei Leichtbeton ist seine geringere Rohdichte (nur ein Drittel im Vergleich zu den Betonen ÖkoB1 und ÖkoB2) zu beachten, die zu den vergleichsweisen hohen, massebezogenen Werten führt. Daher wird der Feuchtegehalt in Abbildung 38 zusätzlich volumenbezogen angegeben.

Die Berechnung des Feuchtegehaltes (F_V) in Vol.-% erfolgte nach *Gleichung 5* unter Bezugnahme des massebezogenen Feuchtegehaltes (F_m) und der Trockenrohddichte ρ_d :

$$F_V [\text{Vol.-%}] = \frac{\rho_d \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot F_m \left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right]}{1000 \text{ l}} \quad \text{Gl. 5}$$

Die volumenbezogenen Feuchtegehalte für ÖkoB1 und ÖkoB2 liegen somit bei rund 14 Vol.-% in Probekörpermitte und bei rund 8 Vol.-% am Probekörperperrand. Der untersuchte ÖkoLB weist eine geringere volumenbezogene Feuchtigkeit in Probekörpermitte mit 10,2 Vol.-% und am Rand mit 5,8 Vol.-% auf.

Tabelle 11 – Ermittlung des volumenbezogenen Feuchtegehalts F_V aus Trockenrohddichte ρ_d und massebezogenen Feuchtegehalt F_m

	Frischbetonrohddichte ρ_{FR} [kg/m ³]	F_m [M.-%]	Trockenrohddichte ρ_d [kg/m ³]	F_V [Vol.-%]
ÖkoB1-Mitte	2345	6,2	2200	13,6
ÖkoB1-Rand	2345	3,7	2200	8,1
ÖkoB2-Mitte	2388	6,3	2238	14,1
ÖkoB2-Rand	2388	3,7	2238	8,3
ÖkoLB-Mitte	905	12,5	817	10,2
ÖkoLB-Rand	905	7,1	817	5,8

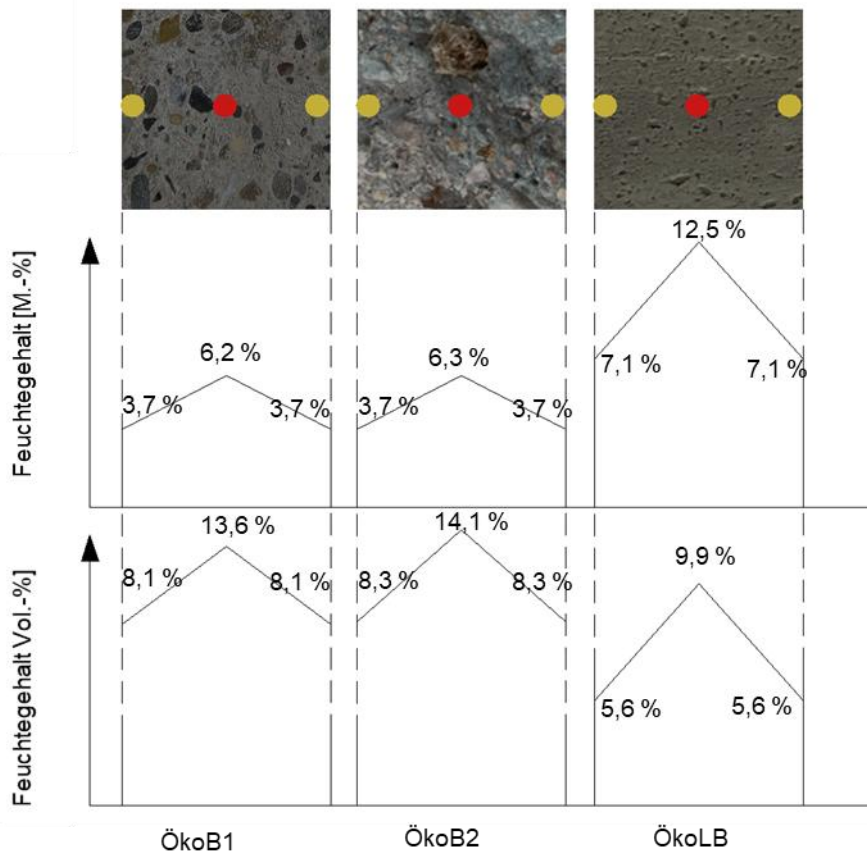


Abbildung 38 – Massebezogener und volumenbezogener Feuchtegehalt in der Mitte und am Rand der Betonbalken aus ÖkoB1, ÖkoB2 und ÖkoLB

5.5.5. Ökobilanzierung der Betone

Die Bestimmung der Ökobilanz erfolgt nach DIN EN 15804 (2022) in verschiedenen Phasen. Für die drei Betone ÖkoB1, ÖkoB2 und ÖkoLB wurde der Lebenszyklus von der Wiege bis zum Werkstor mit den Phasen Rohstoffbereitstellung A1, Transport A2 und Herstellung A3 betrachtet. Für die Bindemittel der Betone liegen Umweltproduktdeklaration (engl. Environmental Product Declaration, Abkürzung: EPD) mit Angabe eines CO₂-Äquivalents (engl. global warming potential, Abkürzung: GWP) vor. Mit bekannter Betonrezeptur und den angegebenen GWP der Bindemittel wird das CO₂-Äquivalent der drei Öko-Betone berechnet. Für das enthaltene Wasser werden die Prozessschritte Rohstoffgewinnung (Förderung und Aufbereitung) und der Transport in Rohrleitungssystemen (Blume, Kroll & Buck, 2020) verwendet. Die Ökobilanzierung der Betone erfolgte auf Basis der EPD des Institut Bauen und Umwelt e.V. und der Datenbank ÖkobaDat des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. Damit ergibt sich für den ÖkoB1 ein GWP von 175 kg CO₂/m³ Beton, 102 kg CO₂/m³ Beton für den ÖkoB2 und für ÖkoLB ein Wert

von 207 kg CO₂/m³ Beton. Der Branchenreferenzwert für einen C35/45 wird mit einem GWP von 286 kg CO₂/m³ Beton angesetzt (Concrete Sustainability Council (CSC), 2021). Damit kann für den ÖkoB1 eine Reduzierung um 38 % und für den ÖkoB2 eine Reduzierung um 64 % festgehalten werden. Der ÖkoLB liegt als haufwerksporiger Beton mit 130 kg CO₂/m³ Beton im Bereich emissionsarmer Betone. Ein direkter Vergleich mit Normalbeton ist nicht möglich. Eine Übersicht über die verwendeten EPDs und den Anteil der Bindemittel ist in Anlage D enthalten. Eine Einordnung im Vergleich zu etablierten Betonen folgt in Kapitel 6.4.

5.6. Dauerhaftigkeitsuntersuchungen

5.6.1. Dauerhaftigkeit der Epoxidharze

In mehreren Serien wurden an Epoxidharz-Proben die Zugfestigkeit und die E-Moduln bei alkalischer Einlagerung mit pH 9, pH 11 und pH 13 nach 28 Tagen, 100 Tagen und 178 Tagen ermittelt. In Abbildung 39 sind die ermittelten Zugfestigkeitswerten der Epoxidharze ER_BIO30 und ER_FH und in Abbildung 40 die der Epoxidharze ER_HTG_1 und ER_HTG_2 dargestellt. Die Ergebnisse der Zugfestigkeiten und E-Moduln in Abbildung 39 bis Abbildung 42 sind Durchschnittswerte aus bis zu sechs Einzelergebnissen. Die Temperatur während der Einlagerung der Proben betrug 20 °C. Die Messungen wurden bei einer Temperatur von 27 ± 1 °C durchgeführt.

Aus den Ergebnissen lassen sich Aussagen über den Einfluss der Alkalilagerung auf die Dauerhaftigkeit von Epoxidharzen treffen. Die größte Zugfestigkeit der Referenzproben wies das Epoxidharz ER_FH auf. Die Zugfestigkeitswerte der drei Epoxidharze ER_FH, ER_HTG_1 und ER_HTG_2 fielen nicht oder nur gering durch die Alkalilagerung ab. Beim Epoxidharz ER_BIO30 war ein deutlicher Verlust der Zugfestigkeit um 34 % (16 MPa) zu verzeichnen.

Die Höhe des pH-Wertes hatte im untersuchten Bereich zwischen pH9 und pH13 keinen klaren Einfluss auf den Wert der Zugfestigkeit.

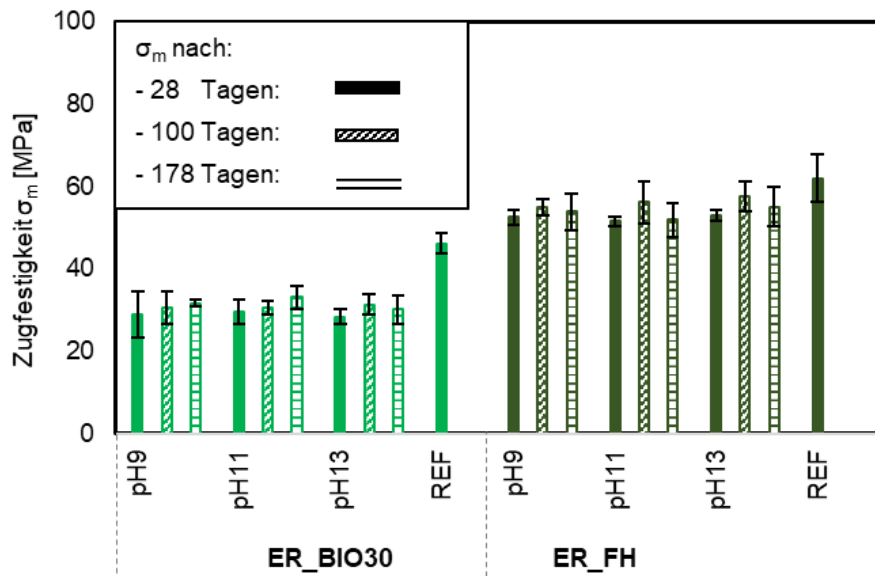


Abbildung 39 – Zugfestigkeiten der Epoxidharze ER_BIO30 und ER_FH nach 28, 100 und 178 Tagen Alkalilagerung

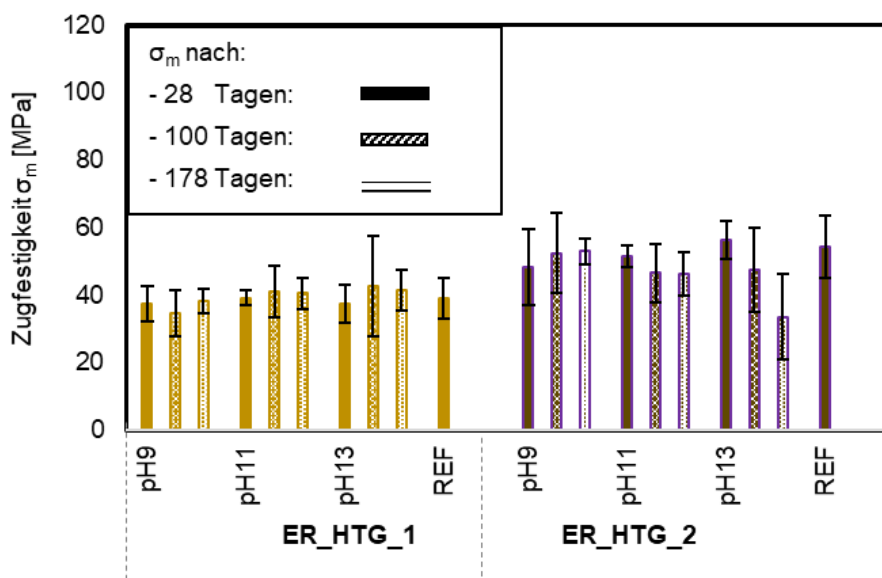


Abbildung 40 – Zugfestigkeiten der Epoxidharze ER_HTG_1 und ER_HTG_2 nach 28, 100 und 178 Tagen Alkalilagerung

Mit Beginn der Durchführung der Zugversuche wurde mittels eines Extensometers die Dehnung bis $\epsilon = 1\%$ aufgezeichnet. Mit Hilfe dieser Messung wurde der E-Modul jeweils im Bereich zwischen $\epsilon = 0,0015\%$ und $\epsilon = 0,05\%$ berechnet. Die Ergebnisse der ermittelten E-Moduln der Probekörper aus den Epoxidharzen ER_BIO30 und ER_FH sind in Abbildung 41 und die aus den Epoxidharzen ER_HTG_1 und ER_HTG_2 sind in Abbildung 42 dargestellt. Bei ER_BIO30 fällt der E-Modul mit Einlagerung bei verschiedenen pH-Werten um rund 25 % nach 178 Tagen ab. Bei ER_FH und ER_HTG_1 bleibt der E-Modul im Rahmen der Streuungen nahezu

konstant. Bei ER_HTG_2 tritt das Phänomen auf, dass nach 28 Tagen bei Einlagerung in pH 9 und pH 11 der E-Modul stärker abfällt und nach 178 Tagen wieder auf das Niveau der Referenz ansteigt.

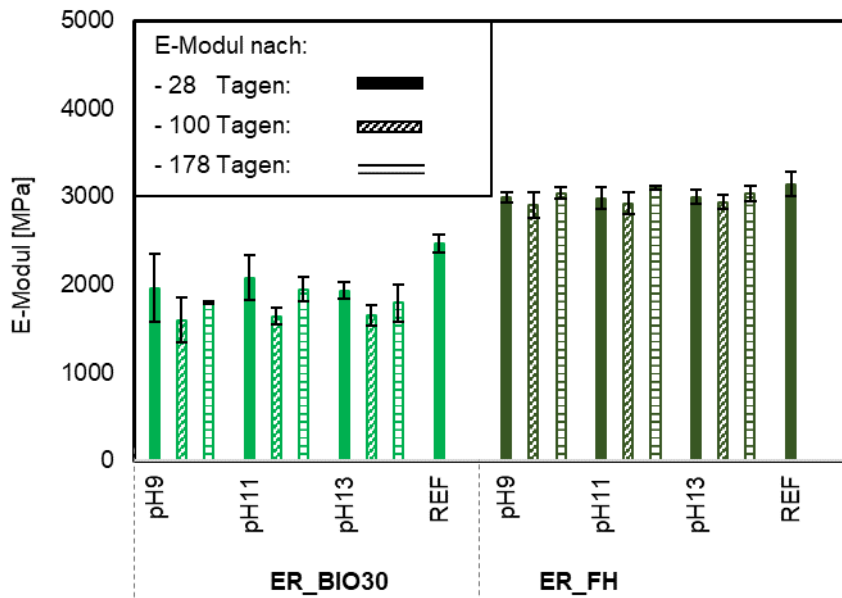


Abbildung 41 – E-Moduln der Epoxidharze ER_BIO30 und ER_FH nach 28, 100 und 178 Tagen Alkalilagerung

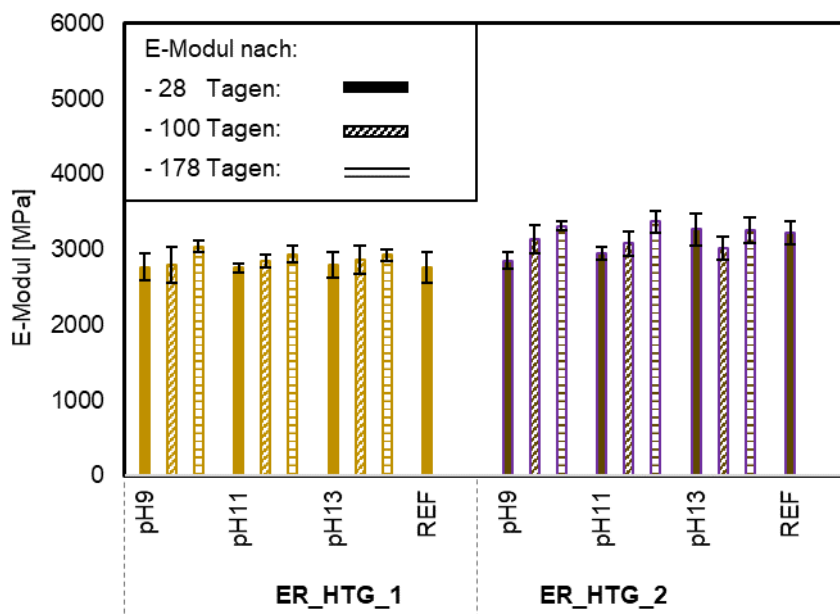


Abbildung 42 – E-Moduln der Epoxidharze ER_HTG_1 und ER_HTG_2 nach 28, 100 und 178 Tagen Alkalilagerung

Der Einsatz von Epoxidharzen als Umhüllung von Hanfbastbewehrungsstäben verfolgt das Ziel, die in den Stäben eingebetteten Hanfbastfasern ausreichend vor Feuchtigkeit und dem alkalischen Milieu des Betons zu schützen. Für diese Aufgabe muss die Epoxidharzummantelung dicht sein. Deshalb wurden an je zwei Proben aller Prüfserien, die in NaOH-Lösungen mit pH 13 eingelegt wurden, die Trockenmassen

mit einer Genauigkeit von mindestens 0,01 g bestimmt. Die Prüfung erfolgte nach 28 Tagen und 100 Tagen. Die mit Abstand größte Massenzunahme zeigte sich nach 100 Tagen bei ER_BIO30 mit ca. 3,5 M.-%.

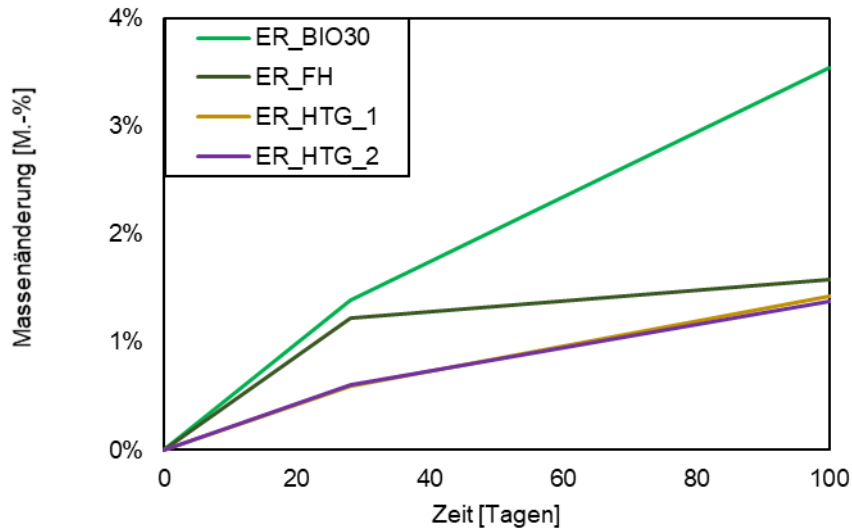


Abbildung 43 – Massenänderung der Epoxidharze nach 28 Tagen und 100 Tagen in NaOH-Lösungen mit pH13

5.6.2. Dauerhaftigkeit der Hanfbastfasern

Die in Kapitel 5.1.1 in Tabelle 1 beschriebenen Chargen an Hanfbastfasern wurden in NaOH-Lösungen bei pH-Werten von 11 und 13 eingelagert. Der Masseverlust der Hanfbastfasern ist in Abbildung 44 dargestellt. Die größten Massenverluste nach 100 Tagen und 180 Tagen weisen die in NaOH-Lösung mit pH11 eingelagerten und nichtgerösteten Hanfbastfasern Hanf2, die geringsten Massenverluste die in NaOH-Lösung mit pH13 eingelagerten und gerösteten Hanfbastfasern Hanf1 auf.

Zusammenfassend lässt sich feststellen: Hanfbastfasern, die einer geringeren Alkalität ausgesetzt waren, wiesen nach einer längeren Einlagerungszeit größere Massenverluste auf. Nicht geröstete Hanfbastfasern verloren über einen längeren Zeitraum mehr Masse als geröstete Hanfbastfasern.

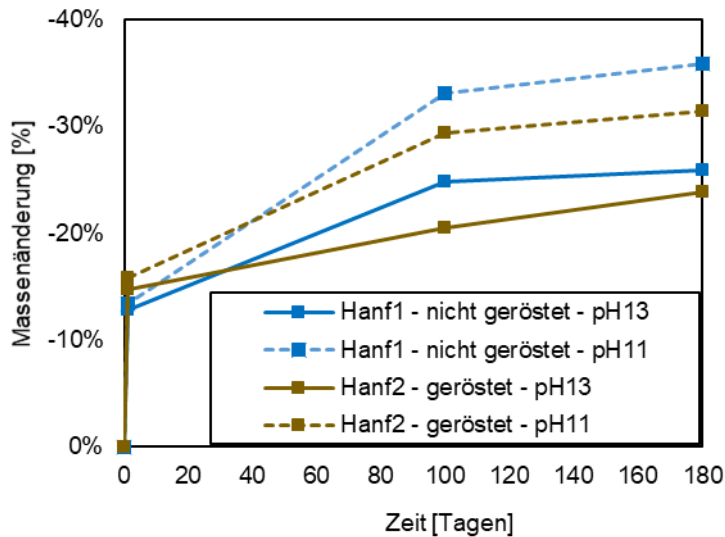


Abbildung 44 – Zeitlicher Verlauf des Masseverlustes der Hanfbastfaser Hanf1 und Hanf2 bei alkalischer Einlagerung

Neben der Bestimmung des Masseverlustes wurden auch Zugfestigkeitsprüfungen zur Bestimmung der Dauerhaftigkeit bei alkalischer Exposition durchgeführt. Abbildung 45 zeigt die Zugfestigkeitswerte der Fasern Hanf1 und Abbildung 46 die Zugfestigkeitswerte der Fasern Hanf2 jeweils nach 100 und 180 Tagen in NaOH-Lösungen mit pH 11 und pH 13. Die Zugfestigkeitswerte liegen nach 100 Tagen bei Hanf1 für pH 11 und pH 13, sowie bei Hanf2 für pH 11 im Bereich der Werte der Referenzprobekörper. Die Zugfestigkeitswerte der Probekörper aus Hanf2 nach 100 Tagen und für alle Probekörper nach 180 Tage Lagerung büßten im Vergleich zur Referenzprobe deutlich an Festigkeit zwischen 10 und 26 % ein. Nach 180 Tagen ist für Hanf1 bei pH 13 ein Verlust von 17 %, für pH 11 um 10 % und für Hanf2 ein Zugfestigkeitsverlust von 26 % (bei pH 13) und 20% bei pH 11 festzuhalten.

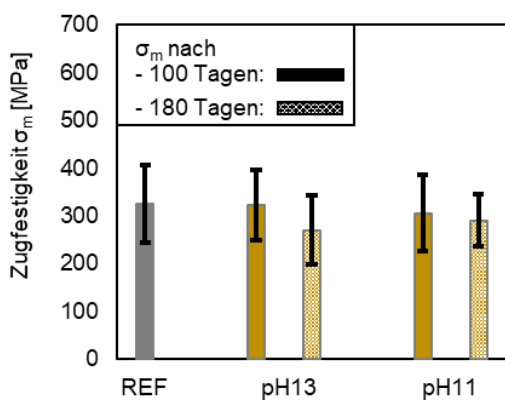


Abbildung 45 – Zugfestigkeitswerte an Hanfbastfasern aus Hanf1 nach Einlagerung in NaOH-Lösungen mit pH11 und pH13 nach 100 Tagen und 180 Tagen

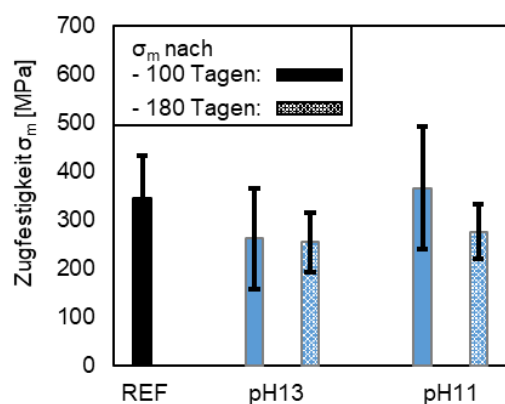


Abbildung 46 – Zugfestigkeitswerte an Hanfbastfasern aus Hanf2 nach Einlagerung in NaOH-Lösungen mit pH11 und pH13 nach 100 Tagen und 180 Tagen

Um mögliche Schädigungen der Hanfbastfasern durch die Alkalilagerung identifizieren zu können, wurden Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop bei 100-facher Vergrößerung durchgeführt. Diese Aufnahmen sind in Abbildung 47 für Hanf1 und in Abbildung 49 für Hanf2 nach einer Einlagerungsdauer von 100 Tagen jeweils bei pH13 dargestellt. Zum Vergleich wurden nicht alkalisch ausgesetzte Hanffasern aus Hanf1 (Abbildung 48) und aus Hanf2 (Abbildung 50) aufgenommen. Zu sehen sind einzelne, zusammenhängende Faserbündel. Risse oder Löcher sind nicht zu erkennen, jedoch weisen die Aufnahmen der Referenzproben mögliche Anhaftungen auf. Eine Interpretation dieser Ergebnisse ist in Kapitel 6.3.1 zu finden.

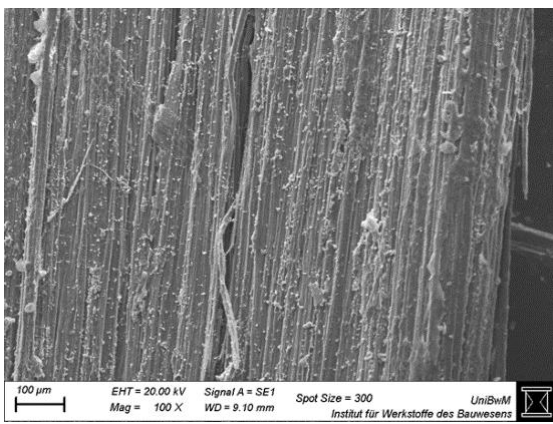


Abbildung 47 – Aufnahme der Hanfbastfasern mit dem Rasterelektronenmikroskop, Hanf1, Lagerung in pH13 für 100 Tage, Vergrößerung: 100x

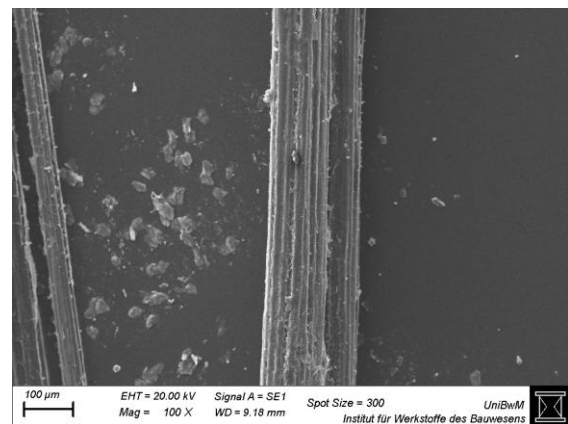


Abbildung 48 – Aufnahme der Hanfbastfasern mit dem Rasterelektronenmikroskop, Hanf1, keine alkalische Lagerung, Vergrößerung: 100x

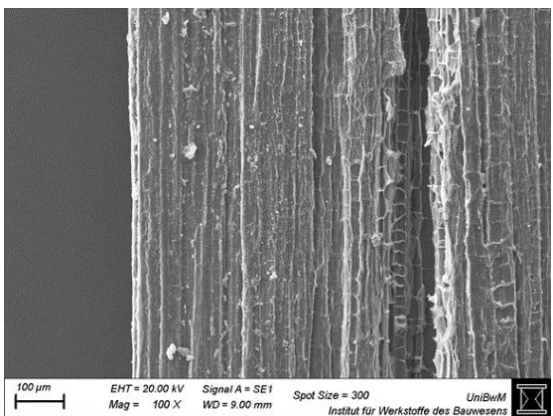


Abbildung 49 – Aufnahme der Hanfbastfasern mit dem Rasterelektronenmikroskop, Hanf2, Lagerung in pH13 für 100 Tage, Vergrößerung: 100x

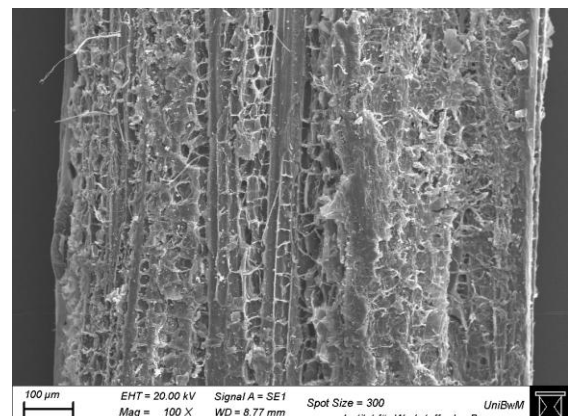


Abbildung 50 – Aufnahme der Hanfbastfasern mit dem Rasterelektronenmikroskop, Hanf2, keine alkalische Lagerung, Vergrößerung: 100x

5.7. Herstellung und Bewertung von hanfbewehrten Biegebalken als Funktionsdemonstratoren

5.7.1. Herstellung und Bewertung von hanfbewehrten Biegebalken

Mit den beiden in Kapitel 5.1.3 vorgestellten Stabprofilierungen („besandete und umwickelte“ Bewehrung) wurden insgesamt fünfzehn Biegebalken bestehend aus drei Probekörpern ÖkoB1, drei aus ÖkoB2 und neun Probekörpern aus ÖkoLB betoniert. Auf den ÖkoLB wurde im Rahmen dieses Projektes der Fokus gelegt, da dieser die zukünftigen Bauvorhaben des Massivbaus und seine Produktpalette um einen leistungsstarken Baustoff ergänzen soll, der eine nicht korrosionsanfällige Bewehrung benötigt. Für die Baupraxis wird zukünftig ein großes Potenzial für ÖkoLB als Beton für Sockelelemente von Lärmschutzwänden aufgrund des deutlich geringeren Gewichtes gesehen. Sie eignen sich auch als Anknüpfungspunkt für Infraleichtbetone, für die sich gerade eine Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton in Bearbeitung befindet.

Tabelle 12 gibt eine Übersicht über die Probekörper, ihre Bewehrung und die zugehörigen Betone.

Tabelle 12 – Übersicht der Probekörper mit zugehörigem Beton sowie Bewehrung und Profilierung

Probekörper	Beton	Bewehrung und Profilierung	Faserbewehrung
B1	ÖkoB1	Hanfbastbewehrungsstab „umwickelt“	-
B2	ÖkoB1	Hanfbastbewehrungsstab „besandet“	-
B3	ÖkoB1	Betonstahl Ø 6 mm gerippt (Referenz)	-
B4	ÖkoB2	Hanfbastbewehrungsstab „umwickelt“	-
B5	ÖkoB2	Hanfbastbewehrungsstab „besandet“	-
B6	ÖkoB2	Betonstahl Ø 6 mm gerippt (Referenz)	-
B7 bis B9	ÖkoLB	Hanfbastbewehrungsstab „umwickelt“	1 cm lange Hanfbastfasern Hanf1
B10 bis B12	ÖkoLB	Hanfbastbewehrungsstab „besandet“	1 cm lange Hanfbastfasern Hanf1
B13 bis B15	ÖkoLB	Betonstahl Ø 6 mm gerippt (Referenz)	1 cm lange Hanfbastfasern Hanf1

Je ein Biegebalken des ÖkoB1 und des ÖkoB2 wurde als Referenz mit einer herkömmlichen sechs Millimeter Betonstahlbewehrung betoniert. Die weiteren beiden Probekörper wurden mit einer „umwickelten“ sowie „besandeten“ Hanfbastbewehrung hergestellt (siehe Abbildung 51).



Abbildung 51 – vorbereitete Schalung der Probekörper ÖkoB2 mit Proben B4 „unwickeltem“ Hanfbastbewehrungsstab (links), B5 „besandedem“ Hanfbastbewehrungsstab (rechts) und B6 Ø 6 mm Betonstahl Referenz (mittig) Probekörper ÖkoB1 Proben B1 bis B3 analog

Die neun Funktionsdemonstratoren des ÖkoLB bestanden aus drei Referenz-Biegebalken bewehrt mit herkömmlichen sechs Millimeter starken Betonstahl, drei Biegebalken bewehrt mit „unwickelter“ und drei Biegebalken bewehrt mit „besandeder“ Hanfbewehrung. Alle Balken wurden mit einer reinen Biege- ohne Querkraftbewehrung versehen. Die neun Funktionsdemonstratoren aus ÖkoLB enthielten zusätzlich eine Faserbewehrung aus geschnittenen Hanfbastfasern mit Faserlängen von ca. 1 cm aus Hanf1 (siehe Kapitel 5.1.1, Tabelle 1).

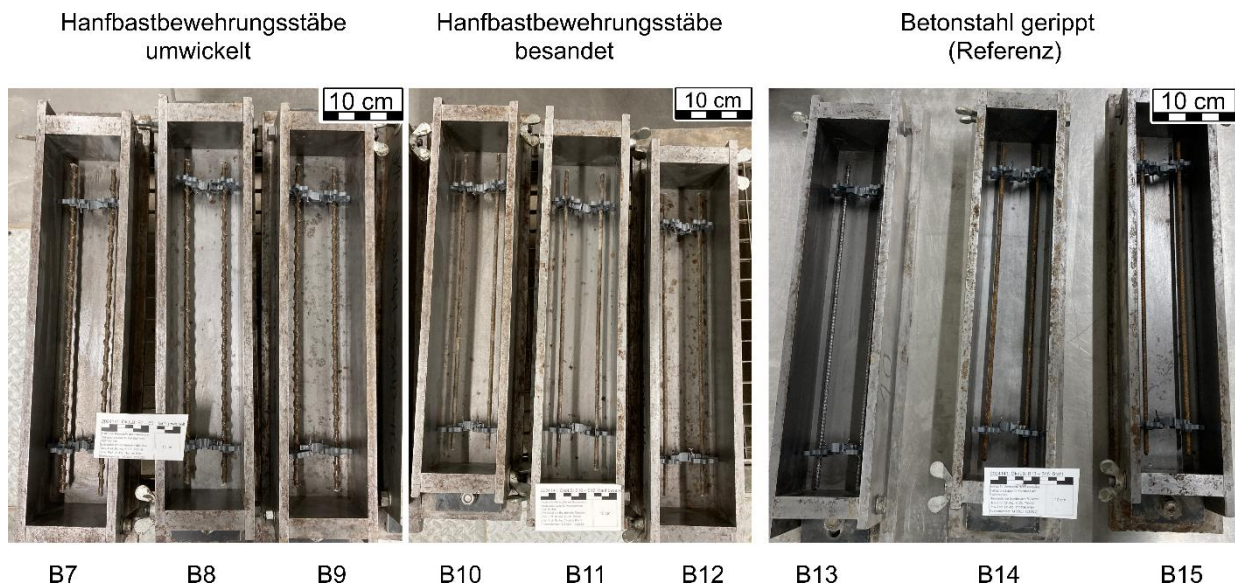


Abbildung 52 – vorbereitete Schalung der Probekörper aus ÖkoLB mit Proben B7-B9 Hanfbastbewehrungsstäbe „umwickelt“ (links), B10-B12 Hanfbastbewehrungsstäbe „besandet“ (mittig) und B13-B15 Ø6 mm Betonstahl Referenz (rechts)

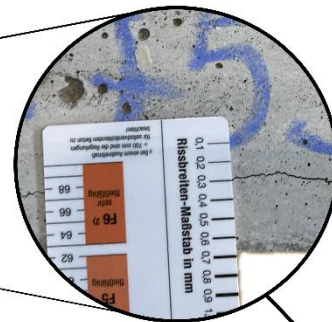
Die sechs Biegebalken des ÖkoB1 und ÖkoB2 wurden bis zur Prüfung nach 28 Tagen im Wasserbad gelagert. Die neun Biegebalken aus ÖkoLB wurden für 28 Tage in Folie eingeschlagen und in einem Klimaraum bei 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte gelagert. Unmittelbar vor Versuchsdurchführung wurden die Prüfkörper mit einem Speckle-Muster für die Aufzeichnung und Auswertung der digitalen Bildkorrelation (DIC) versehen. Um den ÖkoLB durch die zylindrischen Krafteinleitungspunkte nicht vorzuschädigen, wurde dort jeweils eine Weichauflage in Form eines 0,5 cm starken Holzwolle Dämmplattenstreifens über die gesamte Balkenbreite verwendet (siehe Kapitel 5.1.5).

Jeder Probekörper wurde gewogen und in seiner Länge, Breite und Höhe an drei Punkten gemessen, um daraus den Median sowie Mittelwert zu bilden. Die Ergebnisse sind in Anlage C dargestellt. Die Versuche wurden mit einer Vorkraft bis 3 kN weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/min und nach Erreichen der Vorkraft mit einer Geschwindigkeit von 0,5 mm/min bis zum vollständigen Versagen gefahren. Die Belichtungsfrequenz des optischen Messsystems betrug 100 Hz. Die Weichauflage wurde mit fortschreitender Lastaufbringung sukzessive verformt. Sie erzielte damit den gewünschten Effekt einer weiteren Lastverteilung für die Versuche der Biegebalken des ÖkoLB. Damit wurde eine Querdruckversagen unter den Belastungsrollen vor Versagen der Biegebewehrung verhindert.

Auffällig war zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung eine Vorschädigung in Form horizontaler Risse auf Höhe der Bewehrung bei allen mit Hanfbastbewehrungsstab

bewehrten Biegebalken der Proben B1 und B2 (ÖkoB1) und den Proben B7 bis B12 (ÖkoLB). Einzig in den Probe B4 und B5 des ÖkoB2 sowie den Betonstahl bewehrten Biegebalken (B3, B6, B13 bis B15) war keine Vorschädigung vorhanden. In Abbildung 53 ist der Probekörper B7 exemplarisch dargestellt. Auf der Vorderseite befindet sich ein horizontaler Riss mit einer Rissweite von 0,3 mm auf Höhe der Bewehrung. Auf der Rückseite betrug die Rissweite des horizontalen Risses auf Höhe der Bewehrungslage 0,2 mm. Zu sehen ist die Erstrissbildung und die zugehörige Kraft sowie das vollständige Rissbild nach Versuchsende.

(A) Vorderseite vor Prüfung - Probenvorbereitung ohne Speckle-Muster:

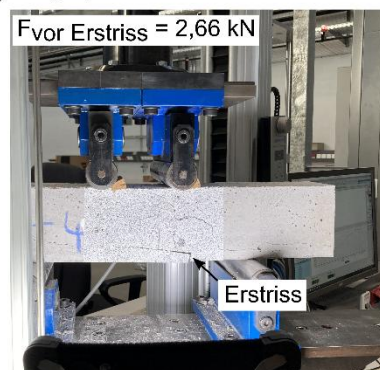


Rissweite 0,3 mm des vorgeschädigten Probekörpers vor Versuch

(B) Rückseite vor Prüfung



(C) Eingespannte Probe



Rissbild Probe B7 nach Versuch

(D) Vorderseite nach Prüfung mit entstandem Rissbild



10 cm

Abbildung 53 – Vorderseite (A) des vorgeschädigter Probekörper B7 mit Rissweite von 0,3 mm, Rückseite (B), eingespannt in Prüfmaschine (C) mit Markierung Erstriss und zugehöriger Kraft sowie Vorderseite nach erfolgter Prüfung (D)

Die Versuchskörper B1 und B2 (ÖkoB1 mit Hanfbastbewehrungsstäben) folgten nach Initialrissbildung zunächst den Rissen der Vorschädigung. Für die „besandete“ Bewehrung konnte im Vergleich zur Umwicklung eine größere Kraft vor Erstrissbildung beobachtet werden. Die Rissentwicklung des Probekörpers B2 und die Ausbreitung entlang der Vorschädigung ist in Abbildung 54 dargestellt. Die größte aufnehmbare Kraft der Biegebalken aus ÖkoB1 lieferte die Referenz mit Betonstahl bewehrter Probekörper. Bis zum Erreichen der maximalen Maschinenkraft von 50 kN bildeten

sich zwei vertikale Risse, deren Risslänge sich ausgehend vom unteren Querschnittsrand über zwei Drittel der Probenkörperhöhe erstreckte.

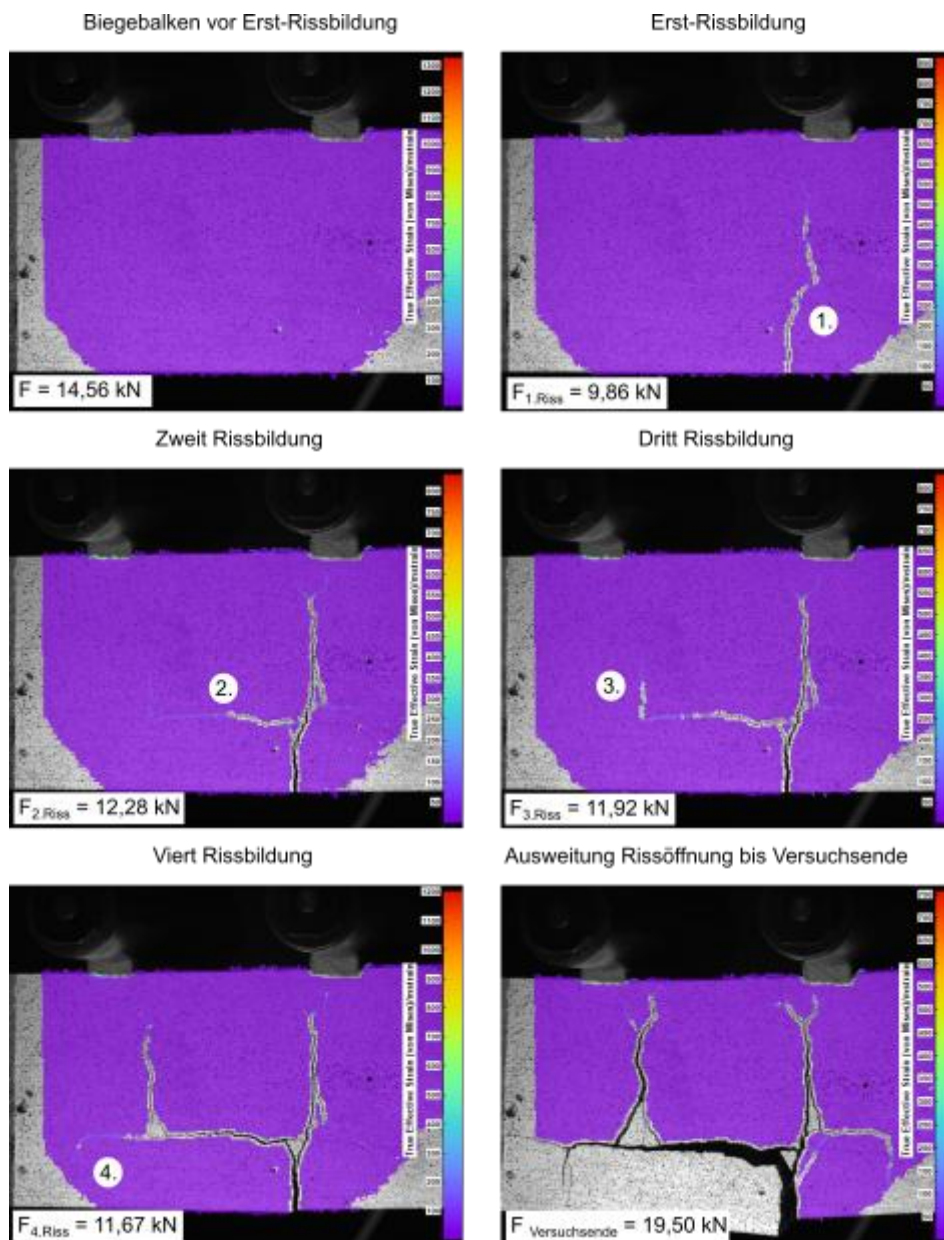


Abbildung 54 –Rissentwicklung (schematisch) der Istra4D Auswertung in Probekörper B2 („besandete“ Hanfbastbewehrung ÖkoB1) mit initial- und fortlaufenden Rissen zwei, drei und vier bis Versuchsende und farblicher Darstellung der effektiven Dehnung im Regenbogenfarbverlauf (lila 0 bis rot 850/ max. 1200)

In den Versuchen der Biegebalken des ÖkoB2 bildete sich in den hanfbewehrten Probekörpern B4 und B5 jeweils ein vertikaler Riss. Während in Probekörper B4 die Rissbildung in Feldmitte erfolgte, startete in Probekörper B5 der Riss unterhalb der linken Belastungsrolle. Beide Versuche wurden bis zum kompletten Versagen fortgesetzt. In beiden Versuchen wuchs die Rissbreite an, wodurch die Betondruckzone stets kleiner wurde und die Zugkraft in den Bewehrungsstäben weiter stieg bis schließlich der Bewehrungsstab versagte und riss.

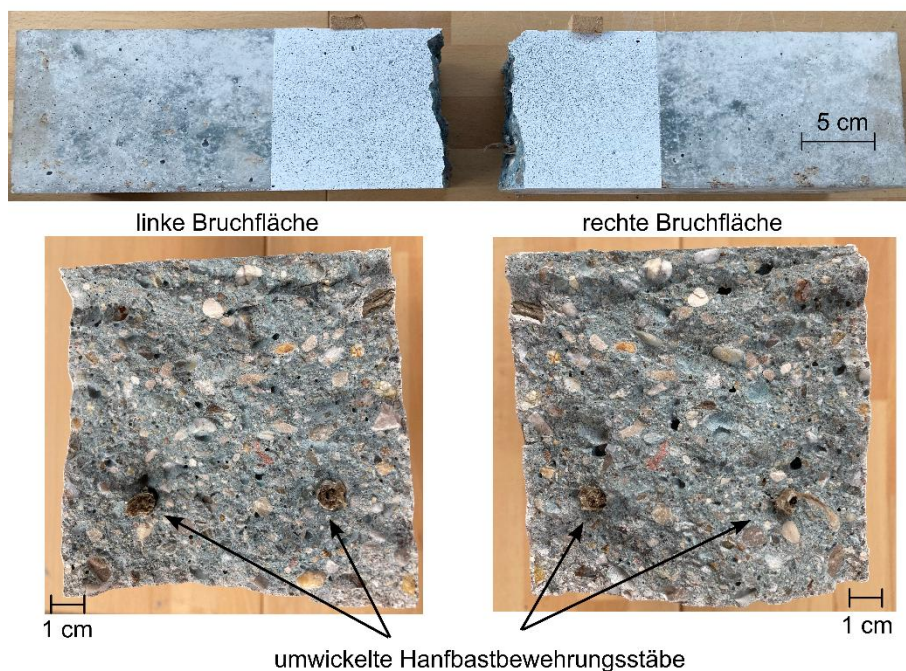
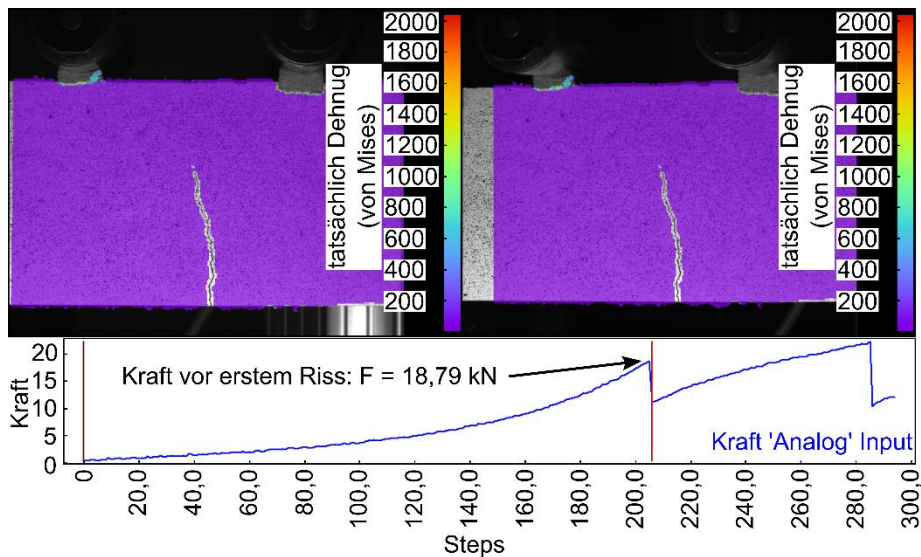


Abbildung 55 – Visualisierung und Auswertung in Istra4D (schematisch) des Probekörper B4 zum Zeitpunkt des ersten Risses (Bild oben), gebrochener Probekörper (Bild mitte) und Ansicht der zugehörigen Bruchflächen (Bild unten).

In dem mit Betonstahl bewehrten Referenz-Biegebalken B6 stieg die Kraft nach Erstrissbildung weiter an. Der zweite Riss bildete sich unterhalb der rechten Belastungsrolle. Bei Erreichen der maximalen Maschinenkraft von 50 kN waren insgesamt drei vertikale Risse vorhanden. Das Herbeiführen eines kompletten Versagens des Prüfkörpers war damit nicht mehr möglich. Bei der kontrollierten Entlastung konnte ein elastisches Verhalten des Probekörpers beobachtet werden. Die Rissweite ging sukzessive zurück, bis sich die Rissufer augenscheinlich schlossen. Im Zuge der Auswertung des Bildmaterials konnte bei Betrachtung des zurückgelegten

Weges eine plastische Verformung von 0,2 mm gegenüber der Ausgangsposition festgehalten werden.

Im Fall der neun Biegebalken aus ÖkoLB zeigten sich Unterschiede in der Rissweite der Erstrisse. Die stahlbewehrten Referenz-Biegebalken besaßen im Vergleich zu den hanfbewehrten Biegebalken geringe Rissweiten. Mit fortschreitender Belastung vergrößerten sich die Rissöffnungen der hanfbewehrten Biegebalken. Der Probekörper B8 wurde bis zur Zugfestigkeit der Hanfbastbewehrung belastet. Die Bewehrung versagte bei einer aufgetragenen Last von 6,90 kN.

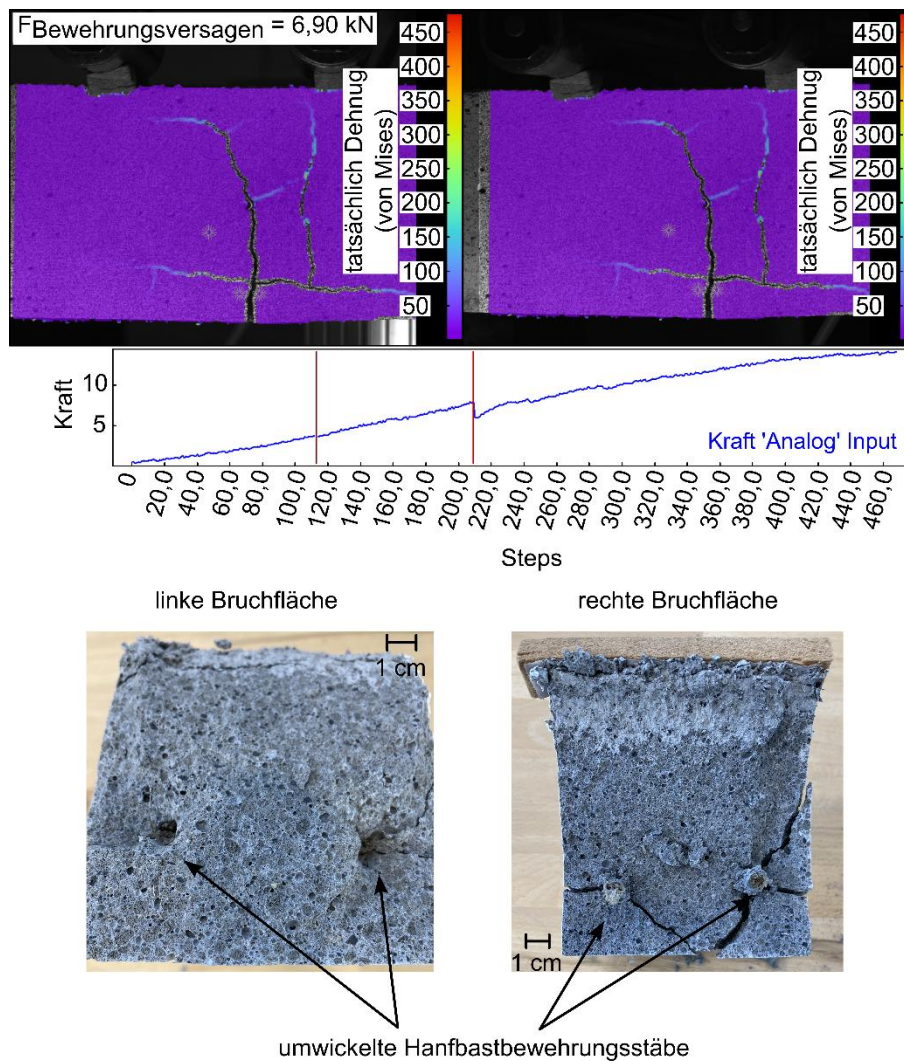


Abbildung 56 – Visualisierung und Auswertung in Istra4D (schematisch) des Bewehrungsversagens von Versuchskörper B8 (Bild oben) und Darstellung der Bruchflächen nach Versuchsende (Bild unten)

Für die Auswertung diente die Erstrissbildung als Indikator zur Vergleichbarkeit der aufgenommenen Kräfte. In Abbildung 57 ist die Kraft vor Auftreten des ersten Risses dargestellt.

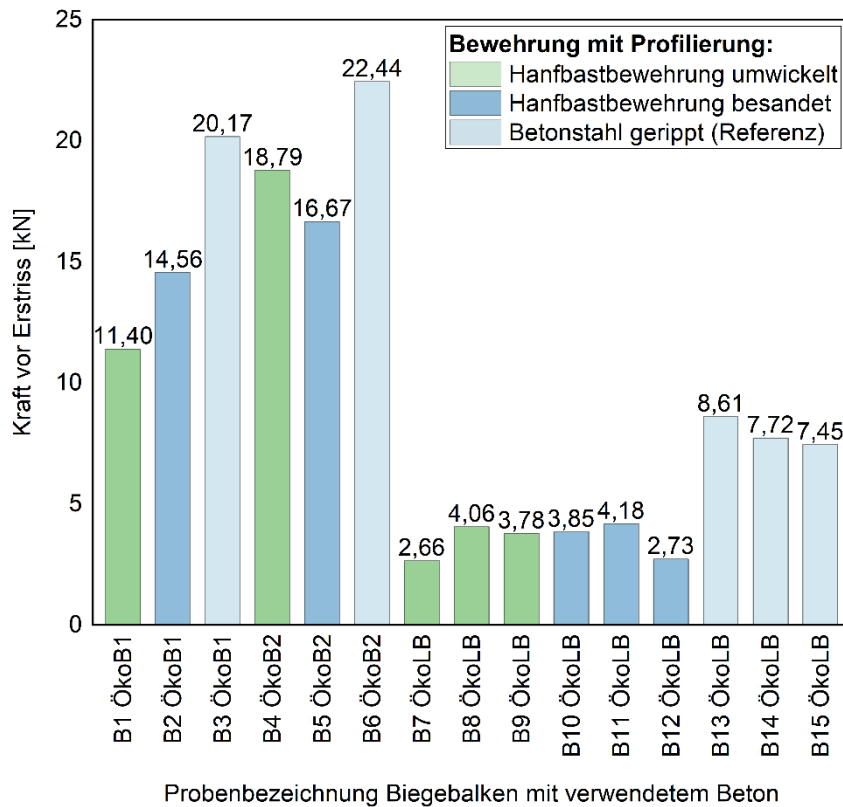


Abbildung 57 – Balkendiagramm der 15 Biegeversuche mit Darstellung der Kräfte vor dem ersten Riss und Unterscheidung der verwendeten Bewehrung

Mit den in Abbildung 57 angegebenen Kräfte wurde die Biegezugfestigkeit des gesamten Prüfkörper in Anlehnung an DIN EN 12390-5 (2019, Kap. 8) nach Gleichung 6 ermittelt:

$$f_{ct,fl} = \frac{F \cdot l}{d_1 \cdot d_2^2} = \frac{F \cdot l}{b \cdot h^2} \quad \text{Gl. 6}$$

mit: $f_{ct,fl}$: Biegezugfestigkeit [MPa]
 F: Kraft vor dem ersten Riss [N]
 l: Abstand zwischen den Auflagerrollen [mm]
 d_1, b : Querschnittsbreite [mm]
 d_2, h : Querschnittshöhe [mm]

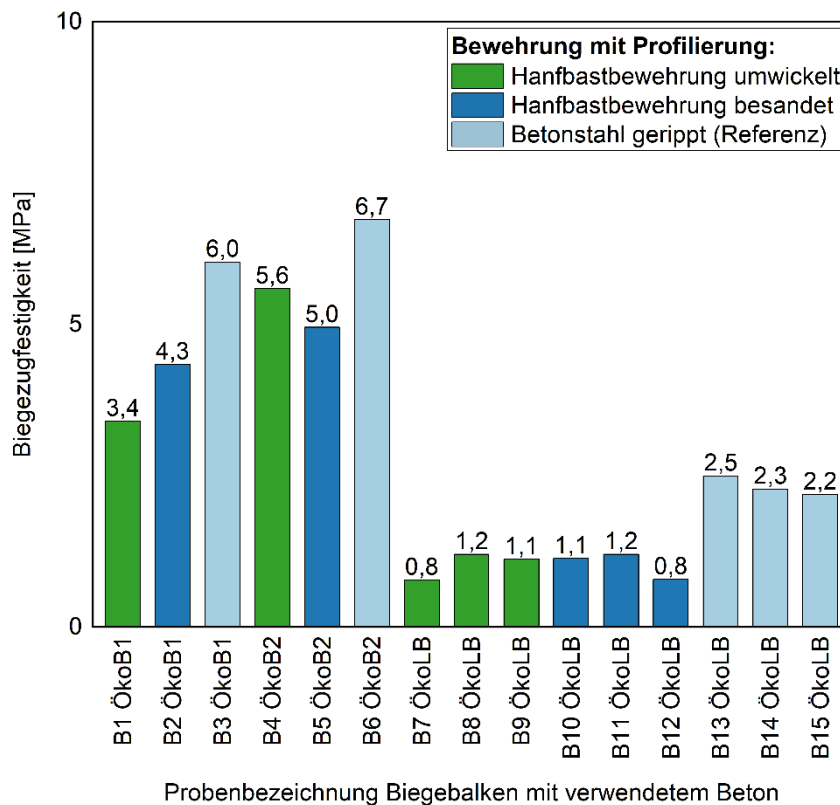


Abbildung 58 – Biegezugfestigkeit der 15 Demonstratoren unter Variation der verwendeten Bewehrung

Bei ÖkoB1 erzielte der Probekörper B2 mit einer „besandeten“ Hanfbastbewehrung im Vergleich zur Referenz aus Stahl die größte Biegezugfestigkeit. Gemessen an der Referenz erreicht die „unwickelte“ Hanfbastbewehrung des Biegebalken B1 57 % und der Biegebalken B2 72 % der Biegezugfestigkeit der stahlbewehrten Referenz. Für den ÖkoB2 erzielte die „unwickelte“ Hanfbastbewehrung eine höhere Biegezugfestigkeit als die „besandete“. Im Vergleich liegt der Probekörper B4 bei 84 %, wohingegen B5 bei 75 % der Biegezugfestigkeit des mit Stahl bewehrten Biegebalkens erreicht. Werden die hanfbewehrten ÖkoLB-Biegebalken betrachtet, so liegen die ermittelten Werte auf etwa gleicher Höhe und erreichen ca. 45 % der Biegezugfestigkeit der stahlbewehrten Referenz. In Abbildung 59 ist die Verteilung der Biegezugfestigkeit für die ÖkoLB-Biegebalken dargestellt. Eine Bewertung der Ergebnisse erfolgt in Kapitel 6.5.

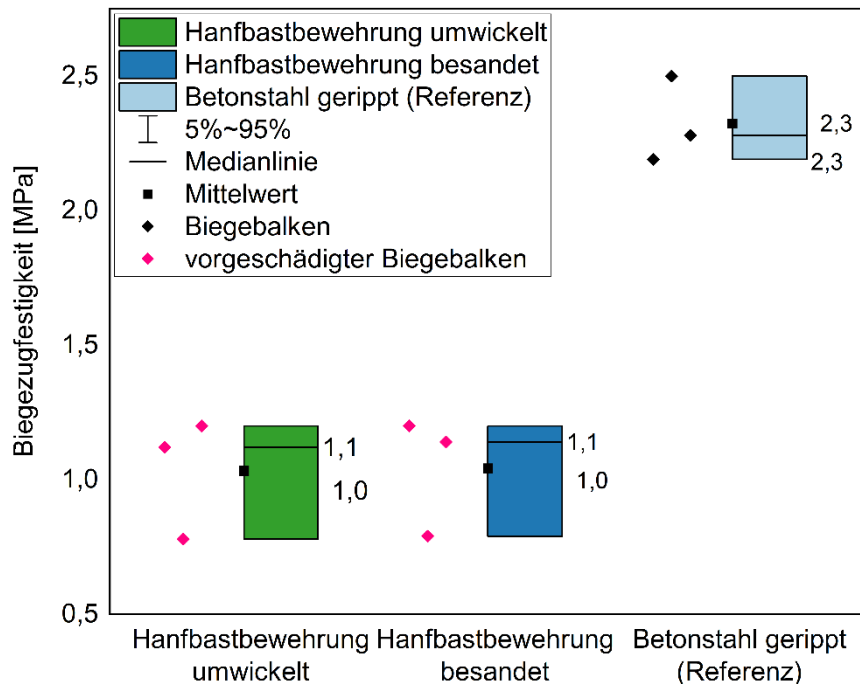


Abbildung 59 – Verteilung der Biegezugfestigkeit der ÖkoLB Biegebalken

Ein nachträgliches stichprobenartiges Durchtrennen der ÖkoLB-Biegebalken nach Versuchsdurchführung zeigte an den herausgetrennten Scheiben eine durchgängige Rissbildung entlang des gesamten Querschnitts. Die Scheiben wurde aus dem unbelasteten Bereich des Probekörpers außerhalb der beiden Auflagerrollen entnommen. Vereinzelt waren nicht durchgängige Risse vorhanden, die auf Höhe der Bewehrung endeten. Der Großteil besaß ein durchgängiges Rissbild auf Höhe der Bewehrung. Es ist davon auszugehen, dass die mit Rissen auf Höhe der Bewehrung vorgeschädigten Versuchskörper einen durchgängigen Riss entlang des gesamten Querschnitts besaßen. In Abbildung 60 ist die Rissbildung der hanfbewehrten ÖkoLB-Biegebalken an Querschnitten der Probekörper B8 (Rissbildung bis auf Höhe der Bewehrung), B10 (Trennriss) und B11 (Rissbildung bis auf Höhe der Bewehrung) dargestellt.

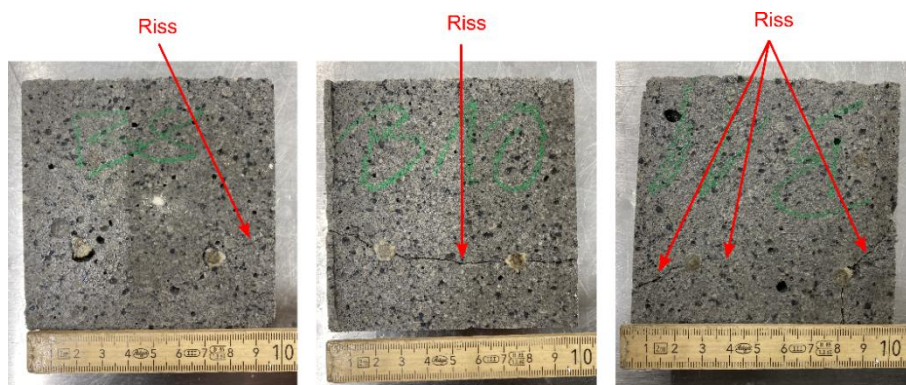


Abbildung 60 – Exemplarische Risse entlang der Querschnitte B8, B10, B12 der hanfbewehrten ÖkoLB Biegebalken

5.7.2. Quellverhalten der Hanfbastbewehrungsstäbe

Das Quellverhalten der Hanfbastbewehrungsstäbe wurde an speziellen präparierten Probekörpern des Verbundwerkstoffes BasEcoCrete, bestehend aus Hanfbastbewehrungsstäben unterschiedlicher Profilierung und den drei Betonen ÖkoB1, ÖkoB2 und ÖkoLB, nach 28 Tagen untersucht. Dafür wurde der Hanfbastbewehrungsstab mittig in einen Betonzylinder einbetoniert und das Verformungsverhalten des Stabes (Quellen und Schwinden) mittels Mikro-CT analysiert. Der Ausgangs-Durchmesser der Hanfbastbewehrung betrug ca. 5.900 µm. Wie aus Abbildung 61 hervorgeht, liegen die flächenbezogenen Schwindmaße der Hanfbastbewehrungsstäbe mit unterschiedlichen Profilierungstypen („besandet und umwickelt“) in den Fällen von ÖkoB2 und ÖkoLB bei ca. 3 %. Die Probenkombination ÖkoB1 und „besandete“ Hanfbastbewehrungsstäbe wiesen mit ca. 5 % ein höheres flächenbezogenes Schwindmaß auf, als jene mit ÖkoB1 und „umwickelten“ Hanfbastbewehrungsstäben mit ca. 3 %.

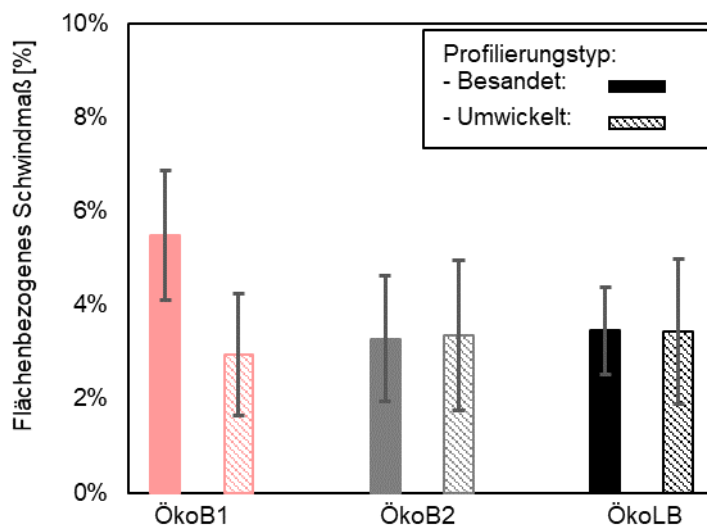


Abbildung 61 – Flächenbezogenes Schwindmaß „besandeter“ und „umwickelter“ Hanfbastbewehrungsstäbe in ÖkoB1, ÖkoB2 und ÖkoLB nach 28 Tagen nach Herstellung und Ofentrocknung bei 105 °C. Balken setzen sich jeweils aus acht Einzelwerten zusammen.

Wie sich in Tabelle 13 zeigt, quellen innerhalb von 28 Tagen nach Herstellung die „besandeten“ Hanfbastbewehrungsstäbe im ÖkoB1 am deutlichsten. Beide Profilierungsvarianten wiesen in ÖkoB2 und die „umwickelte“ Variante in ÖkoB1 hingegen geringere Durchmesser auf. Die Hanfbastbewehrungsstäbe beider Varianten in ÖkoLB nahmen deutlich mehr Wasser auf. Die Wasseraufnahme der Hanfbastbewehrungsstäbe im Beton wurde durch Ofentrocknung der Proben bei 105 °C bestimmt. Bei einer Wiederholung der Scans konnten bei allen Stäben

Durchmesser gemessen werden, die dem Ausgangsdurchmesser von ca. 5.900 μm entsprachen.

Tabelle 13 – Durchmesser der im Beton eingebauten Bewehrung zum Prüfzeitpunkt nach 28 Tagen nach Herstellung D,wet und Durchmesser nach Ofentrocknung bei 105 °C D,dry. Angaben für D,wet und D,dry sind Mittelwerte von je acht Einzelwerten.

Material	Durchmesser nass [μm]	Durchmesser trocken [μm]
Hanf-Bewehrung als Ausgangsmaterial	5.900	5.900
Hanfbastbewehrung „besandet“ in ÖkoB1	6.230	5.890
Hanfbastbewehrung „umwickelt“ in ÖkoB1	6.070	5.890
Hanfbastbewehrung „besandet“ in ÖkoB2	6.060	5.860
Hanfbastbewehrung „umwickelt“ in ÖkoB2	6.070	5.860
Hanfbastbewehrung „besandet“ in ÖkoLB	6.130	5.910
Hanfbastbewehrung „umwickelt“ in ÖkoLB	6.160	5.940

In Abbildung 62 ist exemplarisch der Scan einer Probe mit einem „besandeten“ Hanfbastbewehrungsstab im ÖkoB1 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich im Beton ein luftgefüllter Riss, jedoch keine Luft zwischen diesem und dem Bewehrungsstab befindet. Erst nach der Ofentrocknung von 105 °C bildete sich ein Luftmantel zwischen dem eingebetteten Stab und dem Beton. Es sind vier Teilgrafiken in der Abbildung 62 dargestellt, welche mit A, B, C und D gekennzeichnet sind. Die verschiedenen Materialien konnten aufgrund ihrer Dichteunterschiede in unterschiedlichen Farben dargestellt werden Hanfbastbewehrung (grün), Zementstein (blau), Gesteinskörnung (dunkelblau), Luft (rot).

In Teilgrafik A ist ein Betonkern aus ÖkoB1 mit Hanfbastbewehrung vor Ofentrocknung zu sehen. Des Weiteren deutet sich ein vertikal zur Bewehrung führender luftgefüllter Riss (rot) an. Unter Teilgrafik B wird der Betonkern nach Ofentrocknung dargestellt. Es zeigt sich ein luftgefüllter (roter) Bereich um den Hanfbastbewehrungsstab. In Teilgrafik C wird der halbe Betonkern aus ÖkoB1 mit ausgeblendeter Hanfbastbewehrung nach Ofentrocknung visualisiert. Der unter B erschienene rote Bereich ist in C deutlich zu erkennen und wird als Luftmantel beschrieben. Teilgrafik D zeigt nur den sich um die Bewehrung gebildeten Luftmantel.

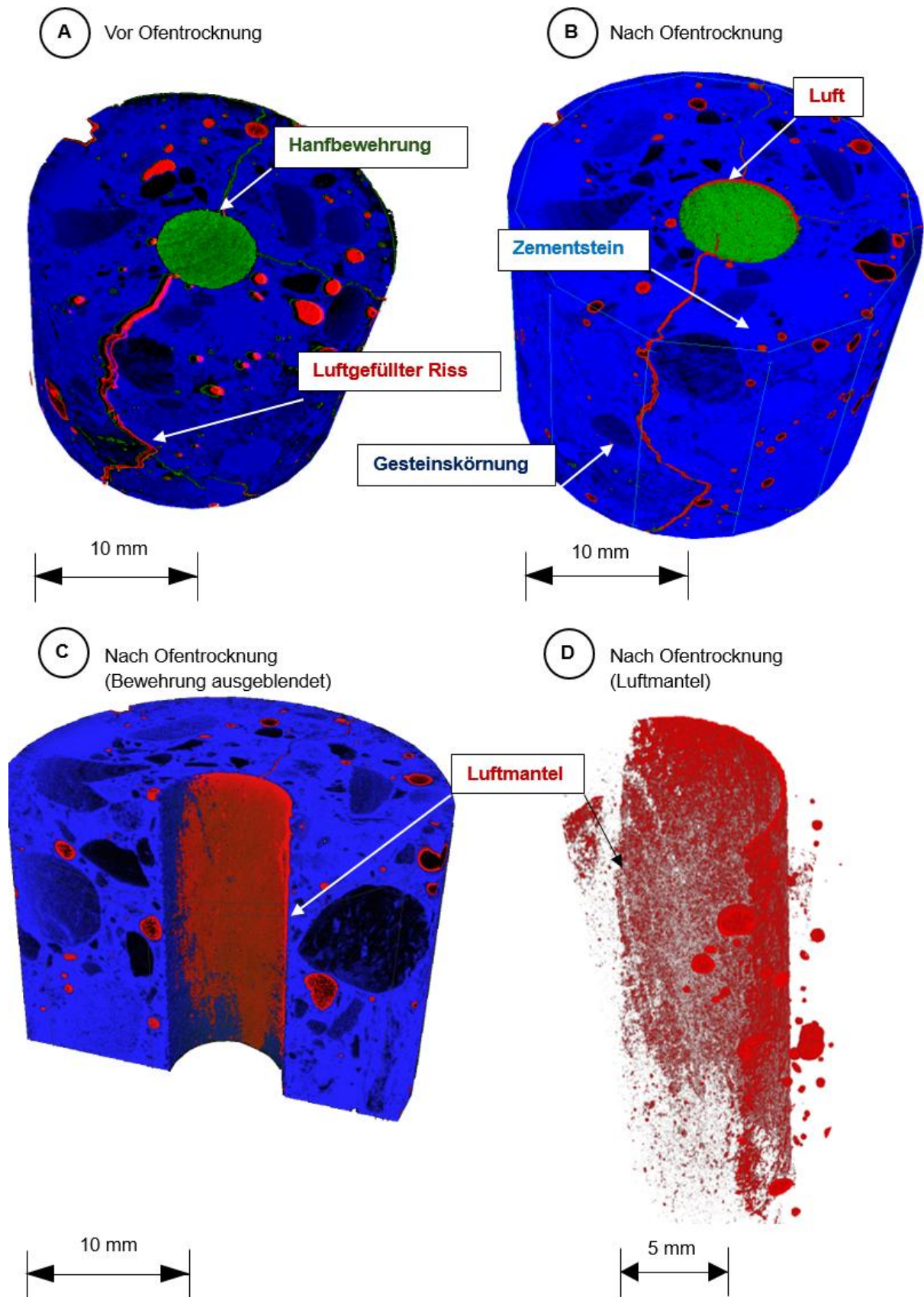


Abbildung 62 – MikroCT-Aufnahmen besandeter Hanfbastbewehrung im Beton (ÖkoB1), **A** Betonprobe vor Ofentrocknung **B** Betonprobe nach Ofentrocknung bei 105 °C **C** Betonprobe nach Ofentrocknung bei 105 °C mit ausgeblendeter Bewehrung **D** Luftmantel um Bewehrung nach Ofentrocknung bei 105 °C

6. Diskussion und Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext

6.1. Einordnung der Eigenschaften von Hanfbastfasern und Hanfbastbewehrungsstäben

6.1.1. Eigenschaften von Hanfbastfasern

Durch die Randbedingungen des Ernteprozesses sind viele der untersuchten Fasern in Charge Hanf1 bereits vorgeschädigt. Dies stellt eine Herausforderung bei der Bestimmung der Zugfestigkeitswerte dar. Insbesondere vorgeschädigte Fasern, sei es durch Knicke oder Einrisse, versagten im Zugversuch vornehmlich in den geschädigten Bereichen. Weitere Versagensbereiche sind natürlichen Ursprungs wie Wuchsfehler der Pflanze oder Bereiche mit Abspelßungen. Gut zu beobachten war ein Delaminierungsversagen beginnend mit dem Ablösen von Einzelfasern aus dem Faserbündel. In der Folge übernahmen immer weniger Einzelfasern den Kraftübertrag des Faserbündels bis schließlich nur noch wenige intakte und damit tragende Einzelfasern des vormaligen Faserbündelquerschnitts bis zum endgültigen Faserreißen vorhanden waren. Dieses Verhalten wird Feinheitseinfluss genannt und ist in der Literatur (Fischer & Drieling, 2024, S. 205) für Hanf als besonders ausgeprägt beschrieben. Der Wechsel vom Faserbündel- auf die Einzelfaserfestigkeit konnte in den durchgeführten Versuchen ebenfalls beobachtet werden und deckt sich mit den Ergebnissen der Literatur. Mit dem abnehmenden Faserbündelquerschnitt reißen die Fasern aufgrund unterschiedlicher Dehnungen und Festigkeiten nacheinander. Dieser Effekt wird in der Literatur als Bündeleffekt bezeichnet (Kohler & Kessler, 1998, S. 55). Der vorhandene Restquerschnitt gestattet noch eine deutliche Resttragfähigkeit des Faserbündels, die deutlich über dem Niveau des ersten Faserbruchs liegt. Ursache ist die nicht optimale Einspannung des Faserbündels in die Klemmbacken der Zugprüfmaschine. Dadurch entstehen Exzentrizitäten, wodurch das Faserbündel nicht achsgerecht gezogen wird und die Einzelfaserfestigkeit über Schrägzug bereits früher erreicht wird. Ein weiterer Effekt ist das Ablösen einer Einzelfaser durch den Schrägzug gefolgt von einer fortschreitenden Delaminierung des Faserbündels bis hin zum ersten Faserreißen oder dem Faserbruch. Aufgrund der unterschiedlichen Faserfeinheit der

untersuchten Faserbündel variieren die erzielten Zugfestigkeitswerte und die errechneten E-Moduln erheblich. Die gemessenen Zugfestigkeitswerte der Faserbündel lagen mit einem Median von 149 MPa um 32 MPa über dem Median der Hanfbastbewehrungsstäbe von 117 MPa (siehe Kapitel 5.2).

Nachdem die Materialkennwerte aufgrund des Ernte- und Verarbeitungsprozesses und des natürlichen Wachstums der Pflanze per se einer starken Streuung unterliegen, sind die zusätzlichen in Kapitel 2.2 gelisteten besonderen Anforderungen an den Anbau des Faserhanfes für den Einsatz als Bewehrungselement in zukünftigen Massivbauwerken als vernachlässigbar einzustufen. Entscheidender sind die Fasergewinnung im Ernteprozess, die Röste und der spätere Faseraufschluss zu bewerten. Hier kann das Potential der Hanfbastfasern durch eine Minimierung oder gar Vermeidung von Vorschädigungen sowie Optimierung der Fasergewinnung und des Faseraufschlusses über die bereits bekannten Parameter der Röste weiter gesteigert werden. Dennoch sind für eine Vergleichbarkeit der mechanischen Eigenschaften weitere Untersuchungen an unterschiedliche Nutzhanfsorten notwendig. Dafür kann ebenfalls unbearbeitetes Hanfstroh verwendet werden. Eine allgemeingültige Aussage zur Faserqualität und den erwartbaren Ergebnissen auf die mechanischen Eigenschaften für andere Nutzhanfsorten ist daher nur bedingt möglich. Erwartbar sind Vorschädigungen aufgrund der Ernteprozesse und Einflüsse aus der durchgeführten Röste. Eine Übertrag oder gar eine Einstufung bzw. Rangordnung der mechanischen Kennwerte von Nutzhanfsorte und in Abhängigkeit der Erträge (Faser, Samen, etc. (Bòcsa & Karus, 1997, Kap. Kap. 4.4) ist mit einer untersuchten Hanfsorte nicht möglich ist.

Im Hinblick auf die Eingliederung und einer späteren Standardisierung der Materialkennwerte nach der Semiprobabilistik werden hier, wie für alle natürlich gewachsenen organischen Materialien des Bauwesens keine Einschränkungen für eine Verwendung entstehen. Für eine spätere Bemessung wird nach Optimierung des Herstellungsprozesses der 5 % Quantile verwendet, wie er im Bauwesen bereits bekannt und etabliert ist. Damit ist eine sichere Bemessung und gezielter Einsatz der Hanfbastfasern und deren Einsatz in Hanfbastbewehrungsstäben möglich.

6.1.2. Eigenschaften der Hanfbastbewehrungsstäbe

Zugfestigkeit der Hanfbastbewehrungsstäbe

Im Zugfestigkeitsversuch versagten alle Hanfbastbewehrungsstäbe im Bereich der Einspannung. Obwohl nach DIN EN ISO 527-4 (2023) Probekörper, die im Klemmbereich versagen, nicht in die Auswertung einzubeziehen sind, wurden die Zugfestigkeitswerte sowie das Elastizitätsmodul dennoch Mangels weiterer Proben aus den gemessenen Daten ermittelt. Die ermittelten Kennwerte bilden daher nicht das mechanische Leistungspotential der Stäbe ab, sondern können nur als Anhaltspunkte für eine Art untere Grenze dienen. Die einseitige Belastung des Stabquerschnitts ist anhand der Daten des optischen Messsystems und der Auswertung der digitalen Bildkorrelation erkennbar. Die maximale Faser-Matrix Dehnung des Komposits tritt am äußeren Querschnittsrand im Bereich der Einspannung auf. Infolge dieser Spannungsspitze stellt sich zum Versagenszeitpunkt ein umlaufender Riss entlang des Stabquerschnitts ein. Dies führt zum Versagen des Stabes und damit dem Versuchsabbruch. Der beobachtete Versagensmechanismus lässt eine kombinierte Biegezugbeanspruchung des Stabes vermuten. Die aufgebrachte Zugkraft der Maschine verursacht eine Normalkraft in Stablängsachse. Die aufgeklebten Stabhülsen besitzen eine Exzentrizität e zur Stabachse und erzeugen damit ein Versatzmoment. Infolge der exzentrisch aufgeklebten Hülsen an beiden Stabenden entsteht so eine Schiefstellung um den Winkel θ zwischen der idealen Maschinenzugachse innerhalb der beiden Einspannpunkte und der realen Längsachse des Stabes. In der Folge entsteht ein lineares Biegemoment M_y mit einem Maximum an beiden Auflagern und einem Nulldurchgang auf halber Höhe der Einspannlänge. In Abbildung 63 ist das durch die Schiefstellung der Stabachse zur Maschinenachse bedingte Versatzmoment dargestellt. Unter Annahme eines homogenen Materials, eines elastischen Dehnungsverhaltens und des Ebenbleibens der Querschnitte kann die entstehende Biegezugsspannungen σ_{max} auf Höhe der Verklebungskante mit den Stabschnittgrößen nach *Gleichung 7* bestimmt werden.

$$\sigma_{max} = \frac{N}{A_{Stab}} + \frac{M_y}{W_{y,Stab}} \quad \text{Gl. 7}$$

mit: σ_{max} : Biegezugspannung [MPa]
 N : Normalkraft (Zug) [N]
 A_{Stab} : Stabquerschnitt [mm²]
 M_y : Biegemoment $M_y = 2 \cdot \sin(\theta) \frac{l}{2} \cdot \alpha N$ [Nmm]

mit Länge l zwischen den Hülsen, Winkel θ , und dem linearem Skalierungsfaktor α der Normalkraft N

$W_{y, Stab}$ Widerstandsmoment runder Hanfbastbewehrungsstab

$$W_{y, Stab} = \frac{\pi}{4} r^3 [\text{mm}^3]$$

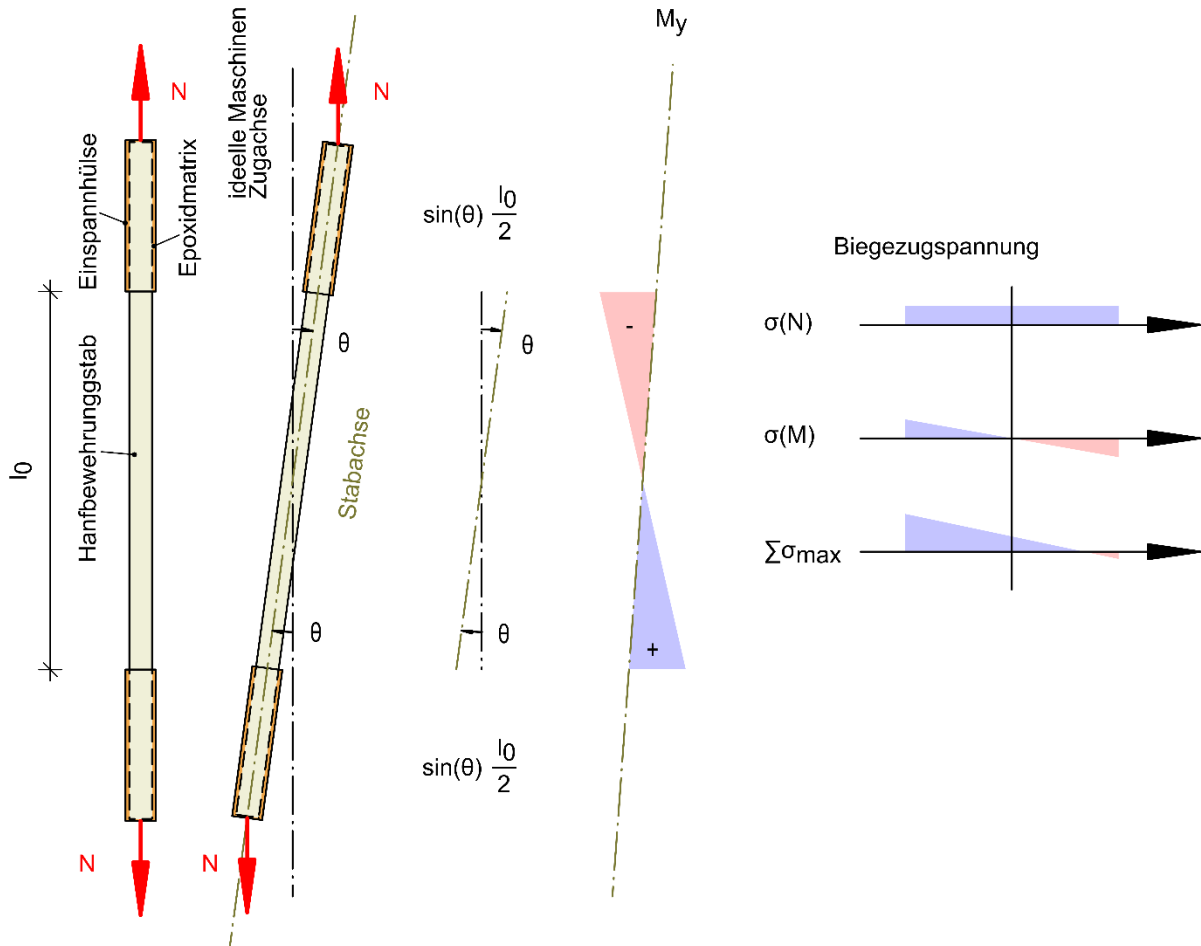


Abbildung 63 – Spannungszustand Biegezugspannungen an den Stabenden der Einspannhülsen

Durch weiterführende Untersuchungen anhand eines digitalen Rechenmodells, bei denen der Winkel θ und der lineare Skalierungsfaktor α der Kraft N variiert wurden, konnte der große Einfluss der Imperfektion verdeutlicht werden. Die Kraft N besitzt einen linearen Einfluss auf die resultierende Spannung. Für kleine Winkel θ ist der Einfluss aus Imperfektion annähernd linear. Die Stabspannung ermittelt sich aus den beiden Anteilen der Normalkraft und dem Moment. Bis zu einer Imperfektion von ca. $0,45^\circ$ ist der Einfluss aus dem Anteil der Normalkraft maßgebend. In diesem Punkt schneiden sich die beiden Kurven in Abbildung 64. Danach überwiegt der Anteil des Momentes. Die Schiefstellung hat für einen Stab unter Biegezugbeanspruchung - infolge des Momentes aus der exzentrischen Position der Stabachsen - einen großen Einfluss auf die resultierende Spannung. Die ermittelten mechanischen

Materialkennwerte der Hanfbastbewehrungsstäbe liegen damit unter ihrem eigentlichen Potential.

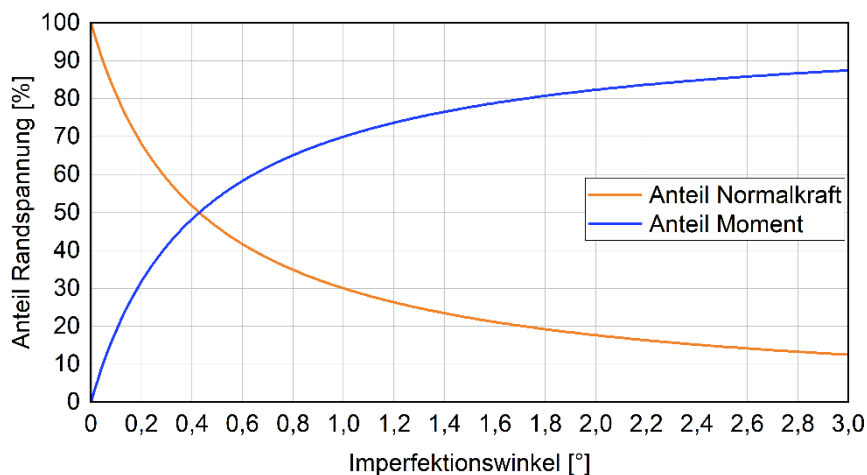


Abbildung 64 – Spannungsanteil der Normalkraft sowie des Momentes der Biegezugspannung in Abhängigkeit des Imperfektionswinkels θ

Verbundverhalten der Hanfbastbewehrungsstäbe

Die geringere Zugfestigkeit wirkt sich nicht auf die Untersuchung des Verbundverhaltens aus, da die maximale Verbundspannung der Versuche unterhalb der Zugfestigkeit der Stäbe liegt. Anders als bei einer Stahlbewehrung in Normalbeton ist in haufwerksporigen Leichtbetonen der Schlupf deutlich geringer. Der Schlupf bis zum Versagen des Verbundes erreicht hier nur wenige tausendstel bis hundertstel Millimeter. Referenz sind die drei durchgeführten Versuche mit herkömmlichem Bewehrungsstahl. Die kombinierte Variante des Hanfbastbewehrungsstabes mit einer Umwicklung und einer groben Besandung liefert die niedrigste Verbundspannung. Sie ist somit eine ungeeignete Profilierung. Bei den „umwickelten“ Stäben konnte die Verbundspannung gesteigert werden und reicht im Fall des Probekörper P12 annähernd an die der Referenzprobe (Stahl P3) heran. Die Mittelwerte der Verbundspannungen der Stabvarianten mit der feinen und groben Besandung waren annähernd gleich gut, wobei die grobe Besandung in den untersuchten Varianten minimal höhere Werte lieferte. Im Hinblick auf eine spätere industrielle Umsetzbarkeit ist ein Oberflächenscan der einzubauenden Bewehrungsstäbe zur Bestimmung der geometrischen Daten für die Bemessung nicht praxistauglich. Zur Berechnung der Verbundspannungen ist ein Ansatz analog der „bezogenen Rippenfläche“ oder „bezogene Profilfläche“ nach DIN EN 15630 (2019) für Betonstahl denkbar. Ebenfalls möglich ist die Bestimmung einer Nennquerschnittsfläche und des -durchmessers analog des Vorgehens gemäß der Richtlinie für Betonbauteile nichtmetallischer

Bewehrung des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) (2024, Teil 4, Kap. 3.2), in dem die Faserstränge mithilfe einer Bürette anhand der Volumenänderung einer definierten Wassermenge gemessen werden. Allerdings ist diese Variante aufgrund des festgestellten Quellverhaltens von Hanfbastbewehrungsstäbe als eher ungeeignet zu bewerten. Durch Schaffung eines empirischen Beiwertes auf Basis der statistischen Verteilung der Oberflächengeometrie könnte in Zukunft ein baupraktischer Ansatz zur Bestimmung der Verbundspannungen geschaffen werden. Dies erfordert allerdings noch weitere Untersuchungen, um eine repräsentative Datenmenge für die Auswertung und Festlegung des empirischen Beiwertes zu schaffen.

Vergleich der Stabzugkräfte der Auszugversuche mit den Stabzugkräften der hanfbewehrten Funktionsdemonstratoren

Zur Bestimmung der in den Stäben entstehenden Schnittgrößen infolge der einwirkenden Kraft zum Zeitpunkt der Erstrissbildung wird die Auswertung der Biegebalkenversuche verwendet und in einem Ingenieurmodell berechnet (siehe Abbildung 65). Damit werden die aufgenommenen Zugkräfte der Bewehrungsstäbe bestimmt und so das Potential der Hanfbastbewehrungsstäbe im Vergleich zur Referenz der Stahlbewehrung aufgezeigt und verglichen. Für die Spannungs-Dehnungslinie des Betons wird die Annahme eines linear-elastischen Materialgesetzes der bekannten Stahlbetonbauweise gewählt. Nach der Bernoulli-Hypothese wird von einem Ebenbleiben des Querschnitts ausgegangen. Damit ändert sich die Betondruckspannung linear über den Querschnitt.

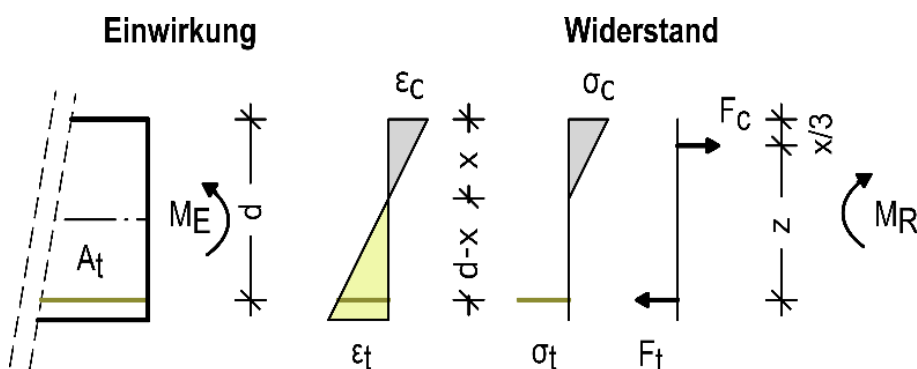


Abbildung 65 – Einwirkung und Widerstand am Bauteil

Die Zugkraft der Bewehrungsstäbe wurde über den Hebelarm der inneren Kräfte und das Kräftegleichgewicht ermittelt. Eine detaillierte Herleitung ist in Rempel u. a. (2020)

zu finden. Die berechneten Zugkräfte je Bewehrungsstab sind in Abbildung 66 dargestellt.

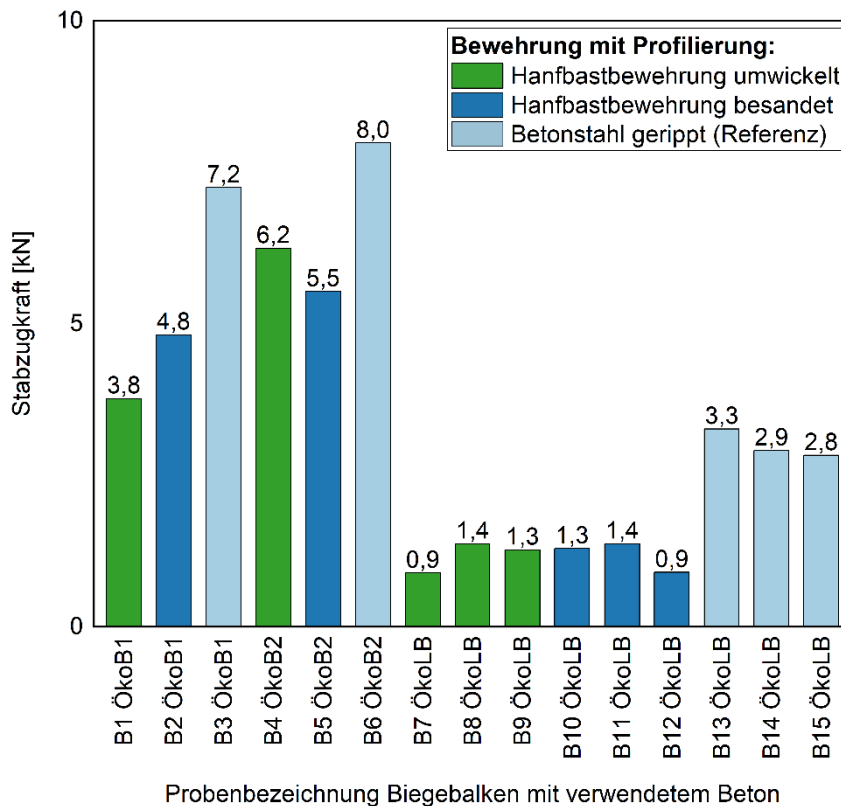


Abbildung 66 – Berechnete Stabzugkraft angegeben je Bewehrungsstab der durchgeführten Biegeversuche.

Wird die nach dem Ingenieurmodell errechnete Zugkraft betrachtet, so lassen sich für die neun Funktionsdemonstratoren geringe Streuungen zwischen den Bewehrungsarten feststellen. Anders als im Fall der Auszugversuche fallen hier die Unterschiede zwischen der „besandeten“ und „umwickelten“ Bewehrung sehr gering aus. Die gemessenen Stabzugkräfte der Auszugversuche (siehe Kapitel 5.3) stimmen für die Referenz aus Bewehrungsstahl gut mit den errechneten Zugkräften der Funktionsdemonstratoren überein. Für die profilierten Hanfbastbewehrungsstäbe unterscheiden sie sich deutlich. Die Zugkräfte sind in Tabelle 14 dargestellt.

Ein Grund für die Unterschiede der Stabzugkräfte besteht im Verhältnis der E-Moduln von Bewehrung zu Beton, welches sich in der Berechnung der Schnittgröße im Ingenieurmodell direkt auf die Druckzonenhöhe und damit den inneren Hebelarm z der Kräfte auswirkt. Das Verhältnis der E-Moduln α kann als linearer Skalierungsfaktor der Druckzonenhöhe interpretiert werden. Mit einer geringeren Druckzonenhöhe vergrößert sich der innere Hebelarm z und die Querschnittsfläche der Bewehrung zur Aufnahme der Zugkraft kann geringer ausfallen. Die aufnehmbare Zugkraft hängt von der Zugfestigkeit der Bewehrung ab.

Tabelle 14 – Übersicht der Zugkräfte: Auszugversuche – maximale Zugkraft zur Berechnung der Verbundspannung – und Biegebalkenversuche – errechnete Zugkraft nach Ingenieurmodell.

	Betonstahl gerippt (Referenz) [kN]	Hanfbastbewehrungsstab „umwickelt“ [kN]	Hanfbastbewehrungsstab „fein besandet“ [kN]
Mittelwert:		(errechnet)	(errechnet)
Kraft aus Auszugversuchen:	3,31	2,94	2,89
Errechnete Zugkraft nach Ingenieurmodell der Biegebalkenversuche	3,00	1,19	1,18
Median:		(errechnet)	(errechnet)
Kraft aus Auszugversuchen:	3,27	3,01	2,84
Errechnete Zugkraft nach Ingenieurmodell der Biegebalkenversuche	2,91	1,29	1,25

Daraus ergibt sich die erforderliche Bewehrungsfläche und damit der erforderliche Stabdurchmesser sowie die Stabanzahl. Der Querschnitt lässt sich weiter durch die Anpassung der Betondeckung der Stäbe optimieren. An den Proben B9, B11 und B12 versagte der Beton nach der Erstrissbildung entlang der horizontalen Vorschädigung. In Abbildung 67 sind der abgelöste Beton und der entstandene Spalt zu Versuchsende dargestellt.

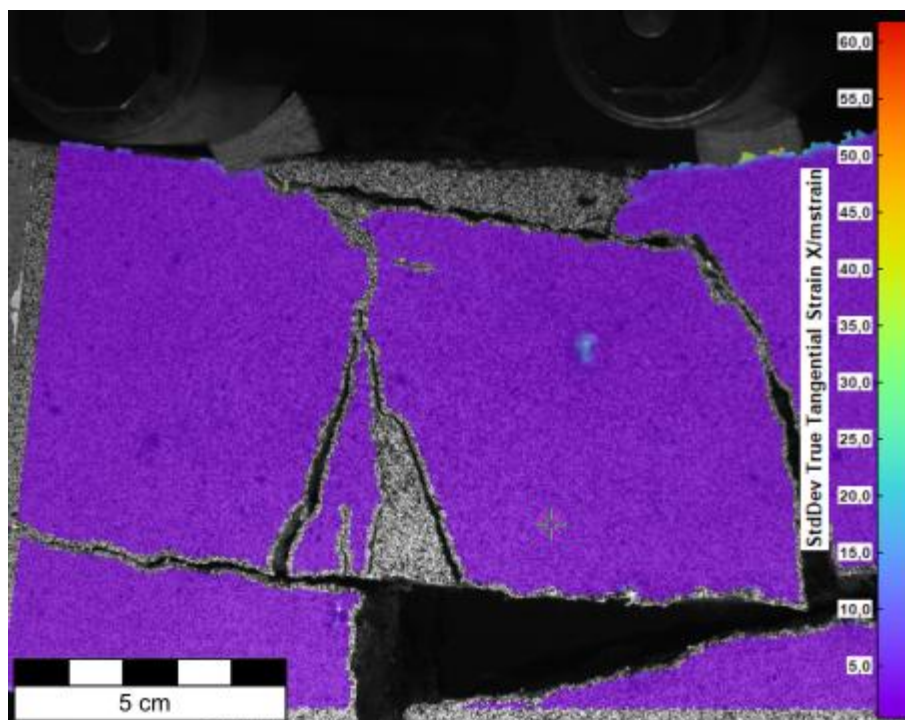


Abbildung 67 – abgelöste Betondeckung Biegebalken B12 bei Versuchsende

Die Vergleichbarkeit der Kräfte und ein Rückschluss auf die Verbundbedingungen vor der ersten Rissbildung ist nicht möglich, da die Biegebalken bis zum kompletten Versagen belastet wurden. Durch den Vergleich der Kraftverläufe der Biegebalkenversuche und der dort vorhandenen Ausschläge (siehe Abbildung 55, Abbildung 56) liegt die Vermutung nahe, dass in Teilbereichen des Stabes ein Verbundversagen vor der Erstrissbildung eintrat. Eine mögliche Ursache für die Rissbildung und das Verbundversagen ist das Quellen der Bewehrungsstäbe. Die Risse wurden nicht nur an den Betonwürfeln der Verbundversuche, sondern auch an den Biegebalken festgestellt. Das Quellen könnte auf Mikrorisse der Epoxidharzmatrix der Stäbe zurückgeführt werden, wodurch eventuell Feuchte in den Stabquerschnitt eindringen konnte. Dafür sprechen die über die gesamte Probekörperlänge auftretenden horizontalen Risse auf Höhe der Bewehrung (siehe Abbildung 53). Eine weitere Ursache der Feuchteaufnahme könnte eine Schwachstelle an den Stabenden der Bewehrungsstäbe sein. Die Stabenden wurden vor der Betonage mit einem Klebstoffpfropfen verschlossen, der den Feuchteschutz der Fasern gewährleisten sollte. Durch eine mögliche Leckage und einen sich dadurch einstellenden kapillaren Saugeffekt könnten die Fasern außer über die Mikrorisse zusätzlich Feuchtigkeit aufgenommen haben, was das Quellen der Fasern noch verstärkt haben könnte. Die Gründe für das Quellen der Stäbe müssen Bestandteil weiterer Untersuchungen sein, um diese Problematik zukünftig bei der Stabherstellung zu vermeiden.

6.2. Betone mit zementklinkerarmer Bindemittelmatrix

Die im Rahmen des Projektes entwickelten Bindemittel und die damit hergestellten Betone sollen den Betonbau ökologischer machen und gleichzeitig den Einsatz von Hanfbastfasern ermöglichen. Für eine Bewertung der erzielten Ergebnisse bietet es sich an, die nachfolgenden Vergleiche mit den derzeitigen normativen Regeln und mit Literaturwerten vorzunehmen.

6.2.1. Einordnung der Bindemittel

Die im Rahmen des Projektes entwickelten Bindemittel, werden nach verschiedenen Kriterien in Klassen unterteilt. Ein Gesichtspunkt ist die Geschwindigkeit der Festigkeitsentwicklung. Dazu wird die Anfangsfestigkeit nach 2 bzw. 7 Tagen und die Normfestigkeit nach 28 Tagen betrachtet. Die Einordnung der verwendeten Bindemittel

in Tabelle 1 in die Familie der Normzemente erfolgt nach DIN EN 197-1 (2011) bzw. DIN EN 197-5 (2021).

Zum Vergleich werden Zemente der Festigkeitsklasse 52,5 herangezogen. Deren Grenzen für die 2-Tage-Festigkeit liegt bei 10 bzw. 20 MPa. Die Normfestigkeit nach 28 Tagen muss mindestens 52,5 MPa betragen.

Anhand der erzielten Festigkeitswerte können die drei verwendeten Bindemittel wie folgt eingestuft werden:

- BM1 – 52,5 N (Festigkeitsklasse 52,5, normale Anfangsfestigkeit)
- BM2 – 52,5 L (Festigkeitsklasse 52,5, niedrige Anfangsfestigkeit)
- BM3 – 52,5 L (Festigkeitsklasse 52,5, niedrige Anfangsfestigkeit)

In Kombination der verwendeten Bestandteile mit der Festigkeitsklasse ergeben sich für BM1 und BM3 folgende Bezeichnungen:

- BM1 – CEM II/C-M (Q-LL) 52,5 N (DIN EN 197-5, 2021)
- BM3 – CEM III/B 52,5 L (DIN EN 197-1, 2011)

BM2 hat eine Zusammensetzung mit einem sehr niedrigen Klinkergehalt, die aktuell nicht normativ abgedeckt ist, aber den angestrebten Zielen zur Minimierung der CO₂-Emissionen sehr nah kommt. Am ehesten entspricht er in seiner Zusammensetzung einem VLH V/B nach (DIN EN 14216, 2015). Um seine Perspektive aufzuzeigen, wird er nachfolgend als neuer Zementtyp angesehen:

- BM2 – CEM II/X-M (S-LL)

Die Reaktivität der Bindemittel ist für ihre unterschiedlichen Einsatzszenarien entscheidend. Hier kommt der Hydratationswärmeentwicklung eine große Bedeutung zu. Von ökologischen Bindemitteln wird eine langsame Erhärtung und damit verbunden eine geringere Wärmefreisetzung erwartet. Aus diesem Grund werden ein Portlandzement und drei Hochofenzemente der niedrigen Festigkeitsklasse 32,5 für den Vergleich herangezogen. Im vorliegenden Projekt wurde die Hydratationswärmeentwicklung nach 48 Stunden gestoppt. Daher werden die Angaben aus dem Vergleich der Hydratationswärmern nach Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2008, S. 321) ebenfalls nur bis zu den 48 Stunden-Werten für einen Portlandzement CEM I 32,5R und für einen Hochofenzement CEM III/B 32,5 N

entnommen und in Tabelle 15 mit den Hydratationswärmern von BM1, BM2 und BM3 verglichen. Die Hydratationswärmeentwicklungen der drei eigenen Bindemittel liegen nach 48 h zwischen den zu erwartenden Wärmeentwicklungen der beiden Vergleichszemente, obwohl alle drei Bindemittel der höchsten Festigkeitsklasse 52,5 zugeordnet wurden, für die üblicherweise deutliche höhere Hydratationswärmern zu erwarten sind. In diesem Projekt ist es somit gelungen, Bindemittel mit hoher Festigkeit, niedriger Wärmeentwicklung und niedrigen Emissionswerten zu entwickeln.

Tabelle 15 – Vergleich von Hydratationswärmern aus Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2008, S. 321) mit den Ergebnissen zu BM1, BM2 und BM3 nach jeweils 48 h

	Hydratations-Wärme J/g
CEM I 32,5R	250
CEM III/B 32,5N	150
BM1	200
BM2	180
BM3	180

Vergleich des pH-Wertes der Bindemittel mit etablierten Bindemitteln

Mit dem Einsatz der klinkerreduzierten Bindemittel wurde das Ziel verfolgt, ökologischere Betone zu entwickeln und sie im Rahmen dieses Projektes einzusetzen. Damit einhergehend wird eine reduzierte Alkalität der Betone erwartet.

Die pH-Werte der Porenflüssigkeit lagen zwischen 13,7 für BM1 und 13 für BM3. Die Reihung folgte nicht dem Klinker- und damit dem Portlandit-Gehalt der Porenflüssigkeit und entsprach damit nicht den Erwartungen. Der Vergleich mit einem CEM I 42,5 R ergab für diesen einen höheren Wert von 13,9 (Beuntner, 2019). Abgesehen von der Reihung wurde insgesamt ein deutlich niedrigerer pH-Wert für die klinkerreduzierten Bindemittel erwartet.

Der pH-Wert wird nicht nur durch den Portlandit-Gehalt maßgebend beeinflusst. Für eine differenzierte Betrachtung ist es deshalb erforderlich, die Konzentrationen der Alkali- und Erdalkalitionen (Ca^{2+} , K^+ und Na^+) der drei Bindemittel mit denen herkömmlicher Bindemittel zu vergleichen. So sind in (Beuntner, 2019) für einen CEM I 42,5 R nach 28 Tagen ein Ca^{2+} -Wert von 2,59 mmol/l, ein K^+ -Wert von 226,57 mmol/l und ein Na^+ -Wert von 42,47 mmol/l beschrieben.

Die ermittelten Konzentrationen an Ca^{2+} -Ionen in den Porenflüssigkeiten von BM1, BM2 und BM3 lagen, wie aus Abbildung 35 hervorgeht, deutlich unterhalb dieses

Wertes. Der hohe pH-Wert von BM1 ist daher nicht auf die Ca(OH)_2 -Konzentration zurückzuführen. Auch die K^+ -Konzentrationen der drei Bindemittel lag unterhalb des beim CEM I 42,5 R beschriebenen Wertes nach 28 Tagen. Auffällig sind besonders die Na^+ -Konzentrationen. Diese sind zwischen BM1 mit dem CEM I 42,5 R vergleichbar, liegen bei BM2 und BM3 jedoch deutlich höher. Daraus lässt sich schließen, dass die hohen Alkalitäten der drei Bindemitteln maßgeblich auf der hohen Na^+ -Ionenkonzentration beruhen.

6.2.2. Einordnung der Betone

Die Einordnung der beiden Normalbetone ÖkoB1, ÖkoB2 in Druckfestigkeitsklassen ist mit den Ergebnissen der Würfel- und Zylinderprüfungen nach 28 Tagen gem. DIN EN 206 (2021) und DIN 1045-2 (2023) bzw. DIN EN 1992-1-1 (2011) möglich. ÖkoB1 und ÖkoB2 mit Hanfbastfasern entsprechen jeweils einem Beton der Druckfestigkeitsklasse C35/45. Beide Betone ohne Hanfbastfasern sind in die Druckfestigkeitsklasse C40/50 einzuordnen. Es gelingt, mit dem niedrigsten Klinkeranteil die höchsten Festigkeiten zu erzielen. Dies ist ein gewaltiger ökologischer Vorteil. Die beiden ÖkoLB (mit und ohne Hanfbastfasern) sind als haufwerksporige Leichtbetone nach DIN EN 1520 (2011) einzuordnen. Zudem ist bei Leichtbetonen neben der Festigkeitsklasse immer zwingend die Rohdichteklasse anzugeben. Die durchschnittliche Trockenrohddichte (Tabelle 8) beträgt ohne Hanfbastfasern 801 kg/m^3 und mit Hanfbastfasern 817 kg/m^3 . Beide ÖkoLB gehören damit in die Rohdichteklasse D1,0. Anhand der Festigkeitswerte werden sie in die Festigkeitsklasse LAC 6 eingeordnet. Abweichend von den Ökobetonen ist die Festigkeit des ÖkoLB mit Hanfbastfasern etwas höher als ohne. Der Unterschied geht auf dessen etwas höhere Rohddichte zurück. Eine entscheidende Frage sind die mechanischen Leistungskennwerte der Ökobetone. Beim Betonentwurf wurde für ÖkoB1 und ÖkoB2 jeweils eine Druckfestigkeitsklasse von C30/37 angestrebt. In Abbildung 68 sind die Abhängigkeit der Druckfestigkeit und in Abbildung 69 die der E-Module vom w/z-Wert dargestellt, wie sie auf Grundlage empirischer Daten erwartet werden. Beide Ökobetone haben mit ihren klinkerreduzierten Bindemitteln signifikant höhere Druckfestigkeitswerte erreicht, als zu erwarten war ($f_{ck,Ziel}$). Die E-Modulwerte liegen unter dem rechnerischen Erwartungswert für die vorliegende Druckfestigkeitsklasse. Hier ist allerdings zu beachten, dass der tatsächliche Wert vom Erwartungswert nach DIN EN 1992-1-1 (2011) $\pm 50 \%$ abweichen kann (Deutscher Ausschuss für

Stahlbeton, 2003). Diese Bandbreite geht auf den Einfluss der Steifigkeit der Gesteinskörnung zurück. Mit dem verwendeten Münchner Moränekies werden tendenziell Werte oberhalb des Erwartungswerts ermittelt. Die im Projekt ermittelten Werte unterhalb der Kurve gehen daher auf die entwickelten, ökologischeren Bindemittelzusammensetzungen zurück.

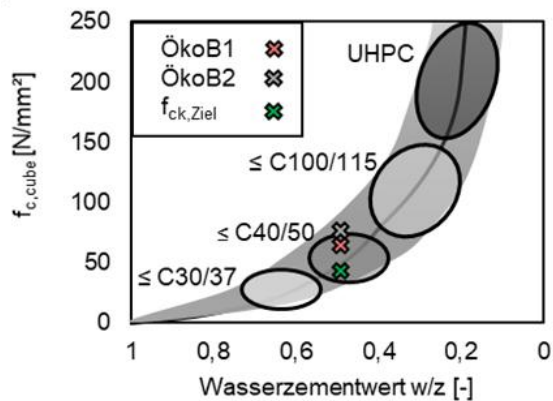


Abbildung 68 – Druckfestigkeit von Betonen in Abhängigkeit vom w/z-Wert. Grafik aus Literatur (Schneider, Horvath, König & Dehn, 2001, S. 468) nachgebildet und mit Ergebnissen aus Tabelle 8 und mit der Zielfestigkeit $f_{ck,Ziel}$ aus dem Betonkonzept ergänzt.

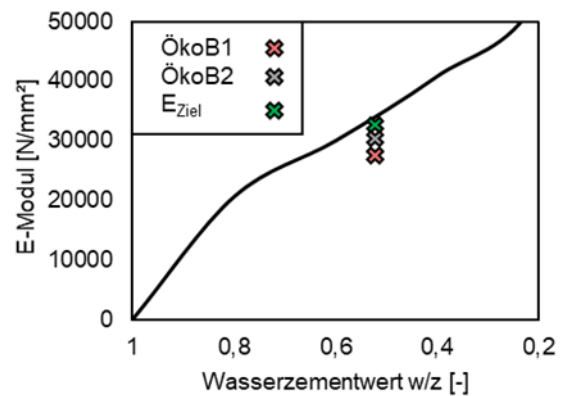


Abbildung 69 – E-Module in Abhängigkeit vom w/z-Wert. gem. DIN EN 1992-1-1 (2011) mit $E_{cm}=22*(f_{cm}/10)^{0,3}$ aus (Schneider et al., 2001, S. 468) abgeleitet und mit Ergebnisse aus Tabelle 8 und des rechnerisch zu erwartenden E-Moduls E_{Ziel} ergänzt

Die Abbildung 70 zeigt die zu erwartende Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit von der Betondruckfestigkeit f_{ck} gemäß DIN EN 1992-1-1 (2011) im Vergleich mit den Werten für ÖkoB1, ÖkoB2 mit und ohne Hanfbastfasern aus Tabelle 8. Ein Einfluss der Fasern auf die Ökobetone zeichnet sich demnach nicht ab und die Abweichungen liegen im Rahmen üblicher Streuungen.

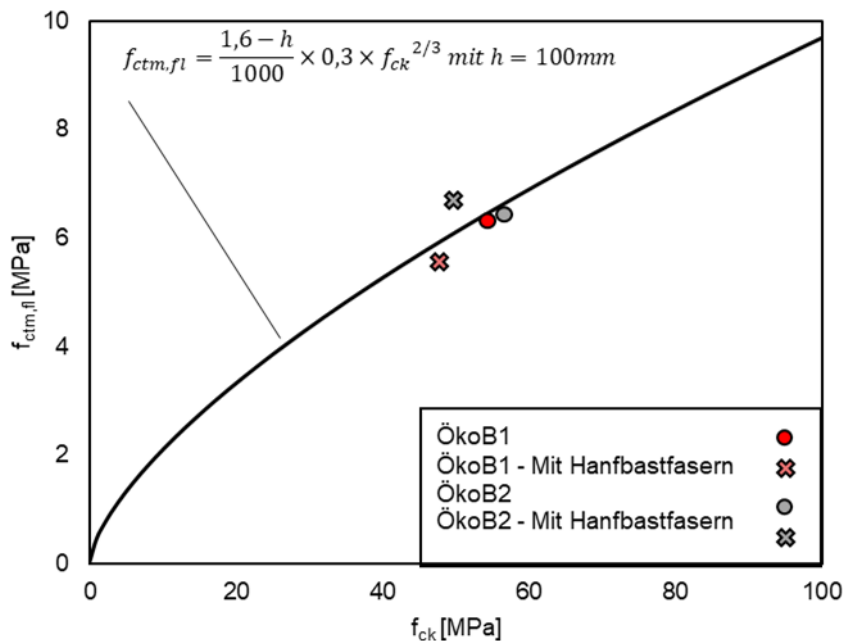


Abbildung 70 – Darstellung der zu erwartenden Biegezugfestigkeit eines Normalbetons in Abhängigkeit von der Betondruckfestigkeit f_{ck} nach DIN EN 1992-1-1 (2011) und Vergleich mit den Ergebnissen der Biegezugfestigkeit von ÖkoB1 und ÖkoB2 aus Tabelle 8.

Die Rezeptur des haufwerksporigen Leichtbetons ÖkoLB liefert Festigkeitswerte im erwartbaren Bereich. Dies wird im Vergleich mit Angaben aus der Literatur deutlich (Callsen & Thienel, 2017). Entgegen der Erwartung, haben die Hanfbastfasern weder auf die Druck- noch auf Biegezugfestigkeit einen Einfluss. Anders sieht es beim Elastizitätsmodul aus. Ohne Fasern liegt der Wert bereits deutlich über dem nach DIN EN 1520 (2011) prognostizierten Wert und wird durch die Fasern sogar nochmals um mehr als 30 % gesteigert.

Die Ermittlung der volumenbezogenen Feuchteverteilung erfolgte nach 60 Tagen, da die Hydratation des Bindemittels zu dem Zeitpunkt bereits fortgeschritten war, was zu repräsentativen Ergebnissen führt. Bei der Betrachtung der Gradienten der Feuchteverteilungen in Abbildung 38 (siehe Kap. 5.5.4) wird ersichtlich, dass ÖkoB1 und ÖkoB2 ähnliche Feuchtegehalte in Probekörpermitte und an den Rändern aufweisen. Die steileren Gradienten des ÖkoLB's weisen auf eine größere Differenz bei der Feuchtigkeit zwischen Probekörpermitte und den -Rändern hin. Dies ist auch zu erwarten, da der haufwerksporige Leichtbeton aufgrund seiner geringen Dichte und seines geringeren Diffusionswiderstands an den Rändern schneller trocknet, während das gespeicherte Wasser innerhalb der leichten Gesteinskörnung die Feuchte im Kern noch länger auf einem hohen Niveau hält. Insgesamt sind die Feuchtegehalte beim ÖkoLB volumenbezogen geringer als bei ÖkoB1 und ÖkoB2.

Um die ermittelten Feuchtegehalte zu vergleichen, wurde ein theoretischer Ansatz zur Berechnung der Trockenrohdichte unter Berücksichtigung chemisch gebundener Wasseranteile der Bindemittel herangezogen. Bei vollständiger Hydratation bindet Portlandzementklinker etwa 25 M.% an Wasser chemisch. Während Wasser aus den Kapillarporen verdunsten kann, verbleibt das an den Zementstein gebundene Wasser auch bei der Durchführung eine Ofentrocknung von 105 °C enthalten. Die Bindemitteln BM1, BM2 und BM3 enthalten neben Klinker auch SCMs wie Hüttensand und calcinierten Ton, welche ebenfalls Wasser chemisch in ihre Hydratationsprodukte einbinden. Nur das Kalksteinmehl in BM1 und BM2 verhält sich inert und wird bei der Berechnung der Wasseraufnahme nicht betrachtet. Mit diesem Hintergrund wurden theoretische Trockenrohdichten gemäß *Gleichung 8* für alle drei Betone berechnet, woraus zusammen mit den Frischbetonrohdichten (Tabelle 4) theoretische Feuchtigkeitswerte abgeleitet wurden.

$$\text{Trockenrohdichte } \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]: \quad \rho_d \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] = M_{GK} + 1,25 \cdot M_B \quad \text{Gl. 8}$$

mit:

M_{GK} – Masse der Gesteinskörnung

M_B – Masse des Bindemittels (ausgenommen Kalksteinmehl)

In Abbildung 71 sind die tatsächlichen und die theoretischen Feuchtegehalte der drei Betone gegenübergestellt. Während bei ÖkoB1 und ÖkoB2 die tatsächlichen Feuchtegehalte in etwa den theoretischen entsprechen, zeigt sich bei ÖkoLB eine deutlich niedrigere gemessene Feuchtigkeit, als rechnerisch ermittelt, was auch an dieser Stelle erneut aufzeigt, dass der ÖkoLB dazu neigt, schnell auszutrocknen.

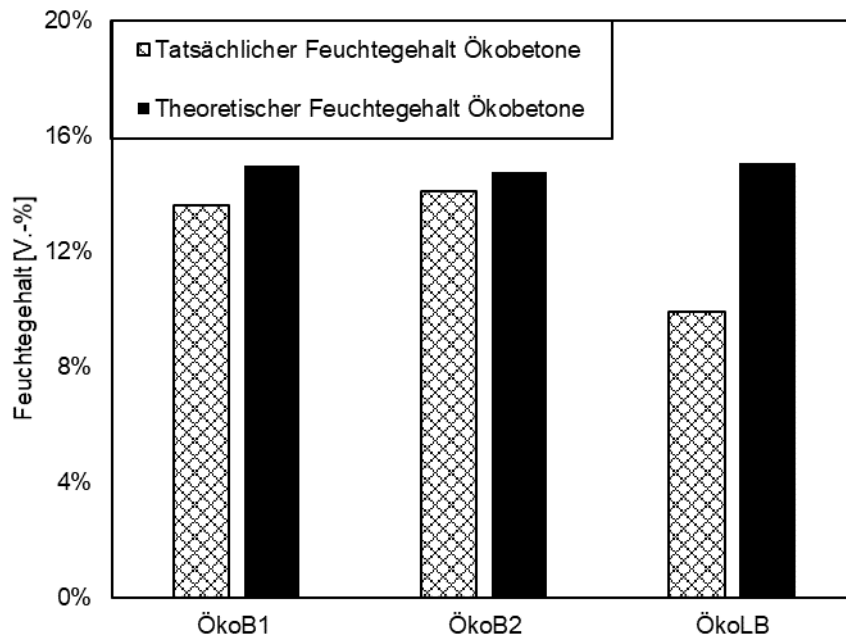


Abbildung 71 – Tatsächlicher und theoretischer Feuchtegehalt von Ökobetonen in Bauteilmitte von Betonbalken

Bei Vorversuchen wurden die Faserlängen variiert und Test-Betonagen durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass eine Zunahme der Faserlänge zu einer inhomogeneren Verteilung der Fasern im Beton führt. Während der Mischvorgänge bildeten sich teils Fasernester. Eine bessere Faserverteilung konnte schließlich durch das Reduzieren der Faserlängen auf 10 bis maximal 20 mm erreicht werden. Dies stimmt mit den Beobachtungen zu anderen Fasern gut überein (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 2012). Vollständig konnten Fasernester nicht in jedem Fall vermieden werden. In Abbildung 72 ist beispielhaft ein Fasernest in der Bruchfläche eines geprüften Betonbalkens zu sehen.

Der Einsatz von Hanfbastfasern konnte das Frühschwinden des ÖkoLBs im Vergleich zum Einsatz mit Kunststofffasern bis 72 h leicht reduzieren. Gegenüber ÖkoLB ohne Fasern ist dies besonders ausgeprägt.



Abbildung 72 – Fasernest in der Bruchfläche eines Ökobetons

Insbesondere beim ÖkoLB stellten die Hanfbastfasern eine besondere Herausforderung dar, da sie sich durch die zusätzlich eingebrachte Oberfläche und ihre Wasseraufnahme massiv auf dessen Luftporengefüge auswirken. Mit Hanfbastfasern steifte der ÖkoLB deutlich an. Daher musste die Fließmitteldosierung so angepasst werden, dass eine bessere Verarbeitbarkeit, sowie eine erwünschte Wirkung durch den Luftporenbildner möglich wurde.

6.3. Beurteilung der Dauerhaftigkeit

6.3.1. Dauerhaftigkeit der Hanfbastfasern

Aufgrund der nachgewiesenen hohen Alkalität der Ökobetone unmittelbar nach dem Einbau und in der ersten Nutzungsphase ist die Dauerhaftigkeit der Hanfbastfasern bei hohen pH-Werten essenziell. Die Ergebnisse zeigen bei Lagerung der Hanfbastfasern in pH 11 unerwartet den höchsten Massenverlust. Die Zugfestigkeitswerte wurden nach 180 Tagen durch eine alkalische Lagerung um 20-25 % für die nicht gerösteten Fasern bzw. um 10-17 % bei den gerösteten Fasern gemindert. Bereits von Tubach & Nebel (1997) wird der Einfluss der Qualität der Röste auf die Faserfestigkeit aufgezeigt. Die vorliegenden Untersuchungen erweitern diese Erkenntnis auch auf eine Alkalilagerung. Die Forschungsergebnisse von Elfaleh et al. (2023) zeigten jedoch gegenläufige Effekte. In dieser Arbeit wurde die Zugfestigkeit durch eine Exposition in sehr hohen pH-Werten signifikant gesteigert. Die Übertragbarkeit von verschiedenen Forschungsergebnissen scheint aufgrund der Vielzahl an Hanfbastfasern und der zusätzlichen Einflussfaktoren aus Röste (Bòcsa & Karus, 1997, S. 114; Gusovius & Müssig, 1998, S. 46; Gusovius, Prochnow, Hanh & Müssig, 1999) und Bodenbeschaffenheit sowie Lichtverhältnisse im Anbaugebiet (Bòcsa & Karus, 1997, S. 76,78) schwierig und muss individuell betrachtet werden. Für den üblichen Einsatz des Hanfs als Faserbewehrung stellen die Ergebnisse keine Einschränkung dar. Ihre Wirkung wird in erster Linie zur Begrenzung des Schwindens und zur Vermeidung von Schwindrissen benötigt. Diese Prozesse sind nach den ersten Wochen abgeschlossen. Gleichzeitig heben die Ergebnisse die Bedeutung einer schützenden Umhüllung der Fasern durch Epoxidharz im Fall der Bewehrungsstäbe hervor. Deren Funktionstüchtigkeit wird auch langfristig benötigt.

Zur Beurteilung von Schädigungen an der Hanfbastfaser durch das alkalische Milieu des Betons wurden beide Hanfchargen für 100 Tage unter alkalischen Bedingungen mit pH 13 eingelagert und im Anschluss anhand der Rasterelektronenmikroskopie bewertet. Die Referenz bildeten Hanffasern bei einer Lagerung an der Luft. Die Hanfbastfasern wurden auf Schädigungen infolge der Alkali-Lagerung untersucht. Dabei konnten keine Fehlstellen in Form von Rissen oder Löchern in der Struktur der Fasern festgestellt werden. Im Vergleich zu den Referenzproben sind allerdings Ablagerungen sowie eine prinzipielle Zunahme angelösten Strukturen erkennbar.

6.3.2. Dauerhaftigkeit der Epoxidharze

Die Dauerhaftigkeit der Epoxidharze wurde anhand von Zugversuchen an Proben ermittelt, die in NaOH-Lösungen mit pH 9, 11 und 13 eingelagert waren. Die Ergebnisse zu den Zugfestigkeiten von ER_BIO30 und ER_FH in Abbildung 39, sowie von ER_HTG_1 und ER_HTG_2 in Abbildung 40 (siehe Kap. 5.6.1) belegen, für das Epoxidharz-System ER_BIO30 zu allen Zeitpunkten und auch bei verschiedenen pH-Werten einen deutlichen Festigkeitsverlust gegenüber der Referenz-Zugfestigkeit, während die Zugfestigkeitswerte von ER_FH und ER_HTG_1 bei gleichen Prüfkonditionen nur geringfügige Abweichungen aufzeigen. Bei ER_HTG_2 nehmen bei Lagerung in pH 9 die Zugfestigkeitswerte über die Zeit zu. Sie sind nach 28 Tagen bei Zunahme des pH-Wertes leicht erhöht. Nach 178 Tagen zeigt sich jedoch bei pH 13 eine Abnahme der Zugfestigkeitswerte. Von allen vier Epoxidharz-Systemen zeigte ER_FH die größten Zugfestigkeitswerte sowohl bei den Referenz-, als auch bei den alkaligelagerten Proben. Die Ergebnisse für die Elastizitätsmodulwerte unterschieden sich kaum zwischen Referenz- und eingelagerten Probekörpern.

Um die festgestellten Unterschiede der vier Epoxidharz-Systeme bewerten zu können, müssen die Inhaltsstoffe und deren Erhärtungsverhalten betrachtet werden. Ein entscheidender Aspekt für die Dauerhaftigkeit stellt die Zusammensetzung der Epoxidharze dar. Die Verarbeitungs- und Endigenschaften sind vielfältig und werden durch den Harztyp, die Modifikation des Härterers und das Mengenverhältnis von Harz/Härter bestimmt (d'Almeida & Monteiro, 1996; Wesche, 1988). Die Hauptkomponente im Harz von ER_BIO30 besteht laut Hersteller aus einem oligomeren Reaktionsprodukt aus Bisphenol-A und Epichlorhydrin, wohingegen die Harze von ER_FH und ER_HTG_1 die Hauptkomponente Bisphenol-A-diglycidylether enthalten. Diese Komponenten beeinflussen die Reaktivität bzw. Vernetzung und damit auch die Eigenschaften der Epoxidharze wesentlich (Wesche, 1988, S. 199). Über das Epoxidharz ER_HTG_2 wurden herstellereitig keine Informationen über die Zusammensetzung und die Inhaltsstoffe zur Verfügung gestellt. Anhand von spektroskopischen Untersuchungen mittels FT-IR (siehe Anlage E) können jedoch typische Banden für Polyamine als Härter (vergleichbar mit ER_BIO30_Härter und ER_FH_Härter) und Bisphenol-A-diglycidylether (ER_FH_Harz und ER_HTG_1_Harz) als Bestandteile im Harz nachgewiesen werden.

Es zeigen sich zudem für alle vier Epoxidharze deutliche Unterschiede in den Viskositäten der Harzkomponenten bei 25 °C. Die Viskosität von ER_FH beträgt nur etwa 38 % der von ER_BIO30. Die Viskosität kann gezielt durch Zugabe von Reaktivverdünnern, wie bspw. Monoglycidether, herabgesenkt werden (Benedix, 2015, S. 503). Dieser ist in den Epoxidharzen ER_BIO30 und ER_FH in unterschiedlichen Anteilen enthalten. Die Zugabe von Reaktivverdünnern kann die mechanischen Eigenschaften des ausgehärteten Epoxidharzes aufgrund der Ausbildung einer ungleichmäßigen Mikrostruktur beeinflussen (Khalina, Beheshty & Salimi, 2019; Yuan, Wang, Yao, Huang, Zuo & Huang, 2023). Die oligomeren Reaktionsprodukte im Harz ER_BIO30 bedingen größere Moleküllängen und erhöhen die Viskosität (Jin, Li & Park, 2015). Das Epoxidharz ER_BIO30 weist des Weiteren die längste Temperzeit (7 Tage bei 70 °C) von allen verwendeten Epoxidharzen auf, während das am schnellsten aushärtende Epoxidharz ER_FH unter gleichen Konditionen nur eine Temperzeit von 0,5 h benötigt. Nach (Kickelbick, 2008, S. 356) kann mit Zunahme der Kettenlänge eines Oligomers eine steigende Reaktionsträgheit beobachtet werden, welche mit einer langsameren Reaktion zwischen Harz und Härter einhergeht. Laut (Jin et al., 2015) variiert die Erhärtungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Molekularstruktur der verwendeten Härter. Für das Epoxidharz ER_BIO30 wurde eine verminderte Beständigkeit gegenüber Alkalilösungen festgestellt. In Anlage E sind die Infrarotspektren (IR-Aufnahmen) der zwei Probekörper ER_BIO30_Referenz und ER_BIO30_pH (Probe nach Alkalilagerung über 100 Tage bei pH 13) enthalten. Die Änderung des IR-Signals (Signalverbreiterung, verschieden starke Signalintensitäten) der alkalisch eingelagerten Proben (ER_BIO30_pH) gegenüber der Referenz deutet auf eine strukturelle Veränderung hin (z.B. Bildung zusätzlicher OH-Gruppen), die infolge der Alkalilagerung stattgefunden hat und sich in einer Abnahme der Zugfestigkeit am Probekörper äußert.

Das Epoxidharz ER_FH zeigte die höchsten Zugfestigkeiten sowohl in der Referenz als auch nach Alkalilagerung. Die Verwendung des trifunktionellen Monomers (Diethylentriamin) als typische Härterkomponente in Epoxidharzen führt zu einem hohen Vernetzungsgrad (Kickelbick, 2008, S. 356; Wesche, 1988, S. 199) welcher sich folglich auch positiv auf die Festigkeit des ausgehärteten Epoxidharzes und dessen Dauerhaftigkeit (chemische Widerstandsfähigkeit) auswirkt.

Zusammenfassend sind für die Herstellung der Hanfbastfaserstäben Epoxidharze mit einem hohen Vernetzungsgrad, einer hohen Beständigkeit gegenüber Wasser und Chemikalien sowie einer schnellen Härtezeit prädestiniert.

6.4. Ökologische Einordnung

Die Bestimmung einer Ökobilanz erfolgt nach DIN EN 15804 (2022) in vier verschiedenen Phasen: Herstellungs-, Bau-, Nutzungs- und Entsorgungsphase. Für einen Bewehrungsstab auf Basis von Hanfbastfasern existiert bislang noch keine Umweltproduktdeklaration (EPD). Daher eignen sich für die Bestimmung der Hanfbastbewehrung in einem ersten Schritt die Betrachtung der Herstellungsphase von der Wiege bis zum Werkstor. Dies beinhaltet die Phase A1 „Rohstoffbereitstellung“, A2 „Transport“ und A3 „Herstellung“ (DIN EN 15804, 2022, Kap. Kapitel 5.2, 6.2.2). Die Bauphasen A4 „Transport“ und A5 „Bau-/Einbauprozess“ sind von den jeweiligen Bauvorhaben abhängig. Das betrifft auch die Nutzungsphasen B1 „Nutzung“, B2 „Instandhaltung“, B3 „Reparatur“, B4 „Ersatz“, B5 „Umbau/Erneuerung“, B6 „betrieblicher Energieeinsatz“ und B7 „betrieblicher Wassereinsatz“. Auch die Entsorgungsphase hängt von dem jeweiligen Bauvorhaben mit C1 „Rückbau, Abriss“, C2 „Transport“, C3 „Abfallbehandlung“ und C4 „Deponierung“ ab. Die Betrachtungen der Wiege bis zum Werkstor mit den Optionen Entsorgungsphase oder Bauphase sowie die Betrachtung von der Wiege bis zur Bahre mit allen Phasen ist an dieser Stelle nicht möglich. Ein Ziel der Erstellung einer EPD ist die Ermittlung des Treibhauspotenzials (GWP) (siehe Kap. 5.5.5) angegeben als Kilogramm CO₂-Äquivalent.

Ausgangsmaterial der Hanfbastbewehrungsstäbe sind Hanfbastfasern und ein Epoxidharz. Beide Ausgangsmaterialien haben bereits Produktionsphasen durchlaufen und besitzen demnach schon ein CO₂-Äquivalent. Für die meisten Epoxidharze existieren EPDs, die in einer weiteren Verarbeitung zur Herstellung eines Produktes und der damit verbundenen Erstellung einer Ökobilanz verwendet werden können. Für die Hanfbastfasern gestaltet sich die Ermittlung des CO₂-Äquivalents deutlich schwieriger. Zwar könnte für eine erste Bestimmung die Systemgrenze tatsächlich am Werkstor mit dem Ausgangsmaterial beginnen (Wiege), in diesem Fall mit den Fasergarnen und dem Epoxidharz, und über die Phase A2 dem Transport und der Herstellung Phase A3 am Werkstor enden, dies würde allerdings das CO₂-Äquivalent der bereits bearbeiteten Hanfgarne und des Epoxidharzes vollkommen

unterschlagen und die indirekten Emissionen nicht berücksichtigen. Damit entsteht eine verfälschte Ökobilanz. Als Orientierung könnten andere Bereiche dienen, in denen Hanfbastfasern bereits verarbeitet werden, wie die Textil- oder Bio-Komposit Kunststoffindustrie. Die Erfahrungen aus der Textilindustrie können bis zu einem gewissen Punkt auch für Hanfbastfasern in Bewehrungsstäben angesetzt werden. Die größten Auswirkungen auf die Umwelt entstehen bei der Aufbereitung der Fasern (Teufel, López, Moch & Gascón, 2024, S. 16). Zur Gewinnung der Fasern kann der sogenannte Faseraufschluss mit einem mechanischen, chemischen oder biologischen Verfahren erfolgen. In Abhängigkeit des gewählten Verfahrens kann Abwasser mit einer erhöhten Umweltbelastung entstehen. Dieser Effekt war bereits 1927 in dem traditionellen Verfahren der Wasserröste gegenüber der traditionellen Feldröste bekannt. Im Fall der Wasserröste entstanden Rückstände, die eine Reihe von hygienischen und wirtschaftlichen Mängeln bei der Luftqualität, Gewässerverunreinigung und der gesundheitlichen Gefährdung der Arbeiter mit sich bringen (Heuser et al., 1927, S. 82). Aber auch bei der Anlehnung an die Erfahrungen der Textilindustrie wird nicht der gesamte Prozess berücksichtigt. Die Schritte reichen hier nicht aus. Die Ermittlung des CO₂-Äquivalentes der Nutzhanf-pflanze erfordert umfangreiche Annahmen: beginnend bei der Aussaat auf dem Feld, dem Wachstumsprozess der Pflanze, Ernte, Faseraufschluss und der Faseraufbereitung. Begleitet wird dies von Energie und Transportwegen, die für die einzelnen Stationen erforderlich ist. Die Energie beinhaltet weiter den Bedarf der Maschinenteknik, für Transportwege und den Stromverbrauch. Eine detaillierte Aufschlüsselung für die verwendeten Hanfbastfasern ist an dieser Stelle nicht möglich. Aufgrund der komplexen Prozessketten müssen Annahmen getroffen werden.

Um die EPD explizit für den Hanfbastbewehrungsstab anzugeben, müssten weitere Informationen wie genaue Prozess- und Lieferketten vorhanden sein, um tatsächlich den einzelnen Weg nachzuvollziehen und beispielsweise Transportketten, Energieverbrauch während des Faseraufschlusses und der Weiterverarbeitung zu einem Garn bestimmen zu können. Hinzu kommt der Verarbeitungsprozess der Garne und der Epoxidharze im Pultrusionsverfahren. Für den Energieverbrauch der Maschinen (Strom) während der Herstellung könnte der Strommix in Deutschland angesetzt werden (Icha & Lauf, 2024). Alternativ auch der Datensatz ‚Strom-Mix-Szenario 2030‘ der Ökobaudat (2024). Hierfür sind dann allerdings die Verbräuche

aller Maschinen zu ermitteln (vergleiche Ablauf des Pultrusionsprozesses Kapitel 5.1.3) und in der Berechnung bis zum Werkstor zu berücksichtigen.

Aufgrund der umfangreichen Randbedingungen und der Anzahl an Projektbeteiligten erfolgte die Ökobilanzierung der Hanfbastbewehrungsstäbe unter Annahmen und dient daher lediglich als erste Orientierung, die das Potential der Bewehrung aufzeigt. Die Ermittlung des GWP_s der Hanfbastbewehrungsstäbe erfolgte auf Basis der EPD eines geeigneten Epoxidharzes (EPD-DBC-20220174-IBF1-EN, 2022) und anhand von Literaturwerten zu Umweltauswirkungen von Hanfbastfasern aus Anbau, Produktion und Lieferung mit 1600 kg CO₂/t (González-García, Hospido, Feijoo & Moreira, 2010). Hinzu kommen Angaben europäischer Hanfbastfasern als Ausgangsmaterial zur Weiterverarbeitung bei einer Koppelnutzung von Fasern und Samen von 420 kg CO₂/t (exklusive eingespeichertes CO₂ der Fasern) und - 980 kg CO₂/t (inklusive eingespeichertes CO₂ der Fasern) (Albrecht u. a. 2020). Der Anteil an Epoxidharz in einem Hanfbastbewehrungsstab wurde mit 60 M.-%, der Faseranteil mit 40 M.-% berücksichtigt. Mit den Anteilen wird die Dichte des Hanfbastbewehrungsstabes bestimmt und das CO₂-Äquivalent eines Stabes mit 10 mm Durchmesser je Laufmeter berechnet. Abbildung 73 gibt einen Vergleich des Hanfbaststabes zu etablierter metallischer und nichtmetallischer Bewehrung. Eine Auflistung der Literaturquellen zu den Bewehrungsstäben befindet sich in Anlage D.

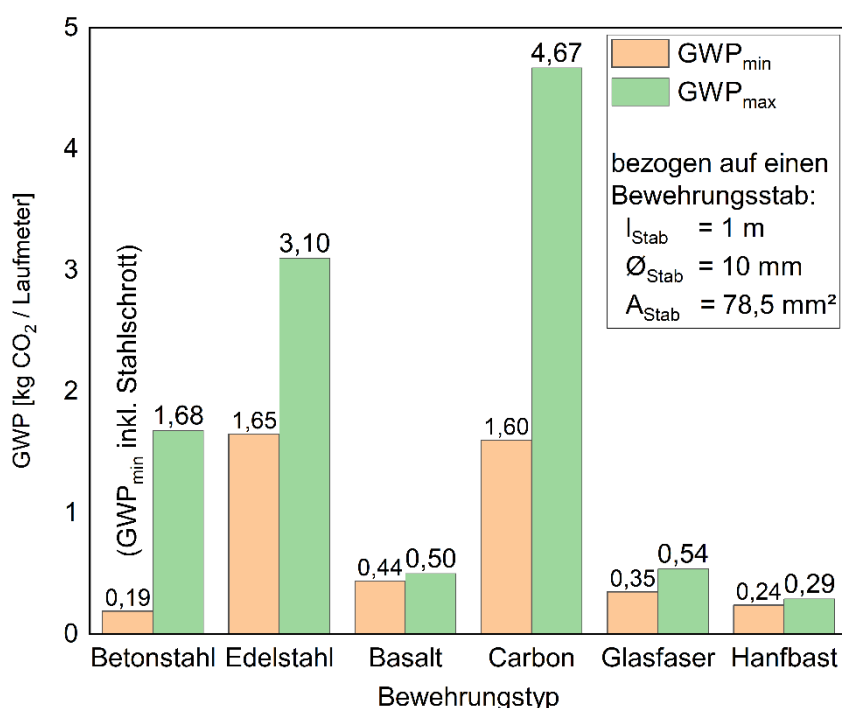


Abbildung 73 – GWP unterschiedlicher Bewehrungstypen für einen Referenzstab Ø 10 mm und Stablänge 1 m mit Angabe der minimalen und maximalen Literaturwerte für Betonstahl, Basalt, Carbon, Glasfaser und Hanfbastfasern

Für die Betone konnte aufbauend auf den Ausgangsmaterialien und den vorhanden zugehörigen EPD's eine Ökobilanzierung erstellt werden. In Abbildung 74 ist das errechnete CO₂-Äquivalent in Kilogramm je Kubikmeter Beton für die Phasen A1 bis A3 dargestellt. Werden die Öko-Betone nun mit den klassischen Betonen der Festigkeitsklasse C8/10 bis C50/60 verglichen, so sind für beide Betone deutliche Einsparungen festzustellen. Die Werte der klassischen Betone entstammen EPDs (siehe Anlage D) wurden auf ein kg-CO₂-Äquivalent je m³ unbewehrten Beton umgerechnet.

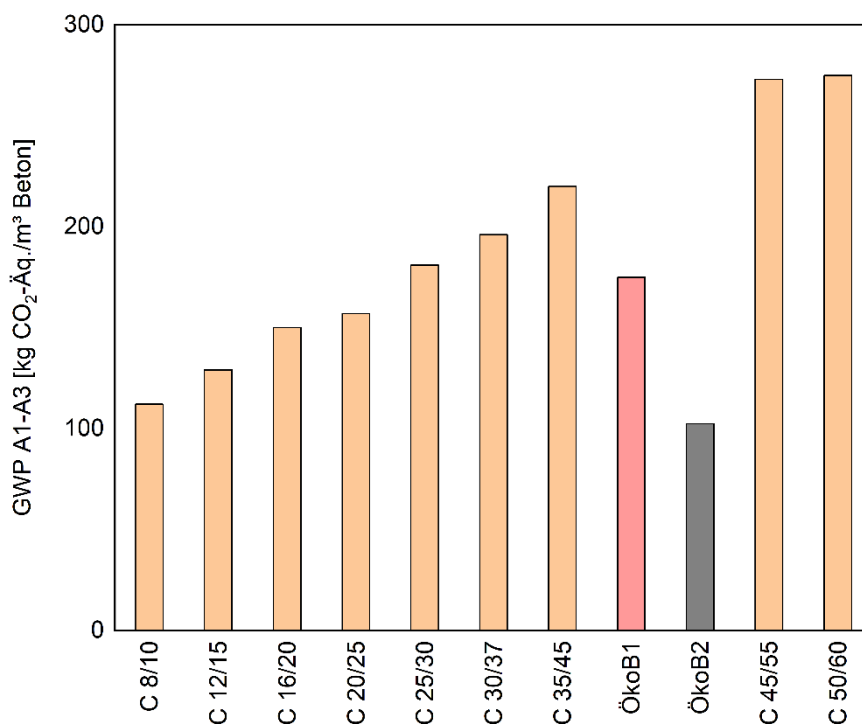


Abbildung 74 – Einordnung des GWP der Öko Betone zu klassischen Betonen der Festigkeitsklasse C8/10 bis C50/60 sortiert nach der Betonfestigkeit

Mit dem Vergleich der Öko-Betone mit etablierten Betonen kann das enorme Einsparpotential an CO₂ nochmals verdeutlicht werden. Die einzulegende Bewehrung variiert im Hinblick auf das jeweilige Bauteil und die zugehörige Beanspruchung. Für die Hanfbastbewehrung ist bislang nur eine erste Abschätzung und Einordnung im Vergleich zu metallischer und nichtmetallischer Bewehrung möglich. Im Ausblick auf zukünftige Forschungsarbeiten ist die Aufnahme der Leistungsfähigkeit der jeweiligen Bewehrungen in die Ökobilanz durch eine Wichtung der erforderlichen Querschnittsmengen vorgesehen. Ausgehend von der errechneten Bewehrungsmenge eines Bauteils könnte die notwendige Fläche und damit der Stabquerschnitt sowie die Stabanzahl klassischer Betonstahlbewehrung oder

nichtmetallischer Alternativen wie Carbon-, Glasfaser-, Basaltfaser- oder Hanfbastbewehrung bestimmt werden. Die so ermittelte Bewehrung kann dann in der Ökobilanz des Bauteiles aufgenommen werden. Damit wird die Leistungsfähigkeit der Materialien berücksichtigt.

In der Literatur (Scrivener, John & Gartner, 2018) wird die leistungsbezogene CO₂-Emission in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit analysiert. Dabei zeigt sich, dass ein Vergleich der leistungsbezogenen CO₂-Emissionen zwischen Betonen mit niedriger und hoher Druckfestigkeit wenig aussagekräftig ist. Leichtbetone – und hier insbesondere die haufwerksporigen – fallen in eine gänzlich andere Kategorie. Sie bieten den Vorteil einer geringen Dichte und ermöglichen Einsparungen bei anderen Baustoffen, etwa bei der Wärmedämmung. Diese indirekten CO₂-Einsparungen können jedoch derzeit nicht in die Berechnung der leistungsbezogenen CO₂-Emissionen einfließen. Ein sinnvoller Vergleich dieser Emissionen ist daher nur für Normalbetone mit ähnlicher Druckfestigkeit möglich. Abbildung 75 zeigt die leistungsbezogenen CO₂-Emissionen, die sich in drei Bereiche unterteilen lassen, die jeweils unterschiedlichen Zementtypen zugeordnet werden können. ÖkoB1 befindet sich im unteren Bereich, der für Kompositzemente typisch ist, während ÖkoB2 unterhalb des für Kompositzemente gekennzeichneten Bereichs liegt.

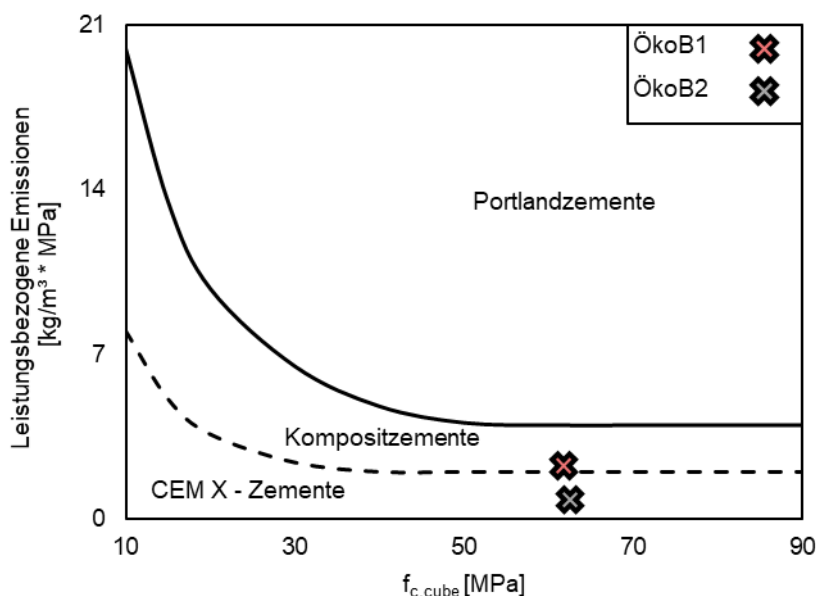


Abbildung 75 – Einordnung der leistungsbezogenen CO₂-Emissionen von ÖkoB1 und ÖkoB2 in literaturbekannte Angaben aus (Scrivener et al., 2018) mit Betonen mit klinkerreduzierten Bindemitteln.

6.5. Bewertung der Demonstratorversuche

Im Zuge des Forschungsvorhabens wurde der Fokus auf die Ermittlung der zu Grunde liegenden Materialkennwerte gelegt. Vor Erarbeitung konstruktiver Randbedingungen für den Einsatz in der Praxis haben sich während der Bearbeitung Fragen ergeben, die vor einem Einsatz in einem Bauteil weiter beantwortet werden müssen. Das betrifft den Sachverhalt des Quellens der Stäbe, was zu Rissbildung führt und die Bauteile vorschädigt. Für den konstruktiven Einsatz sind damit zuvor die Fragestellungen rund um den Herstellungsprozess der Stäbe zu beantworten. Dabei ist das festgestellte Quellverhalten eine zusätzliche Herausforderung, die durch die festgestellte Rissbildung Einfluss auf das Tragverhalten besitzt. In weiterführenden Untersuchungen ist die aufgezeigte Rissbildung und das Verhalten des verwendeten Epoxidharzes weiter zu erforschen. Mit den durchgeführten Verbundversuchen mit profilierten Stäben konnte die Eignung einer Besandung als beste Variante festgehalten werden. Eine Empfehlung zur Betonüberdeckung ist an dieser Stelle nur bedingt möglich.

Gemessen an den Biegeversuchen der Funktionsdemonstratoren erreichte die rechnerisch ermittelte Zugkraft der Hanfbastbewehrung in ÖkoB1 und ÖkoB2 50 % und 80 % der Referenz aus Betonstahl. Die Biegebalken lieferten in Abhängigkeit der Profilierungsvariante vielversprechende Ergebnisse zur Aufnahme der Zugkräfte. Im Falle der ÖkoLB-Biegebalken sind die Unterschiede der Profilierungsvarianten weniger deutlich ersichtlich. Hier wurde mit der Hanfbastbewehrung nahezu 50 % der Biegezugfestigkeit der stahlbewehrten Referenz erreicht. Es liegt die Vermutung nahe, dass die Vorschädigung der Balken entlang des gesamten Querschnitts vorhanden war. Bei Betrachtung der Biegezugfestigkeit wurde so die Querschnittshöhe des Ausgangsbalkens reduziert und der Querschnitt in zwei Teile geteilt. Die Querschnittshöhe wird in der Berechnung der Biegezugspannung quadratisch im Nenner, mit der Folge einer deutlich schneller ansteigenden Biegezugspannung an den Querschnittsrändern des abgetrennten Querschnitts, berücksichtigt. In der Folge entsteht die Erstrissbildung am unteren Querschnittsteil (Betondeckung der Zugzone getrennt durch die horizontale Rissbildung auf Höhe des Biegebalkens entlang des gesamten Querschnitts). Dafür spricht die beobachtete Rissbildung an den Probekörpern B7 und B9 bis B12. Hier erfolgte die Erstrissbildung am unteren Querschnittsrand und breitet sich im Anschluss entlang der Vorschädigung aus. Erst

später erfolgte die Rissbildung im oberen Querschnittsteil jedes Prüfkörpers mit einem Versatz zur Erstrissbildung. Einzig in Probekörper B8 war dieser Versatz in der Rissbildung nicht zu beobachten. Die Vorschädigung war bei Biegebalken B8 vermutlich nicht über den gesamten Querschnitt vorhanden.

Durch weitere Untersuchungen mit Pull-Out-Tests an exzentrisch bewehrten rechteckigen Probekörpern könnten Stäbe mit variierender Betondeckung hergestellt werden und anhand der erwartbaren Bruchkegel Rückschluss auf eine geeignete Mindestbetondeckung gezogen werden. Der Versuchsaufbau könnte sich in Anlehnung an den Untersuchungen zur Bestimmung der Verankerungslänge von Görtz et al. (2023) orientieren. Mit den Erfahrungen aus der Betonage der Biegebalken sind die Hanfbastbewehrungsstäbe an den vorgesehenen Stellen zu fixieren und gegen Aufschwimmen zu sichern. Andernfalls ändert sich die Lage der Bewehrung was eine Auswirkung auf das spätere Ingenieurmodell und den ansetzbaren statischen Hebelarm mit sich bringt. Werden die geometrischen Randbedingungen nicht eingehalten, sinkt die aufnehmbare Kraft des Bauteils. Dies führt im schlimmsten Fall zum vorzeitigen Versagen. Im Zug einer bauseitigen Verarbeitung ist ein besonderes Augenmerk auf das Ablängen der Stäbe zu richten. Nach dem Durchtrennen der Stäbe liegen die Stabenden ungeschützt vor und müssen erneut verschlossen werden, um die Fasern vor eindringender Feuchte zu schützen. Die Dauerhaftigkeitsuntersuchungen zeigten eine gute Beständigkeit des Komposits Hanfbastbewehrungsstäbe aus Epoxidharz und Hanfbastfasern. Damit kann die Betonüberdeckung im Vergleich zur herkömmlichen korrosionsgefährdeten Stahlbewehrung reduziert werden. Für die Übertragung der Verbundkräfte ist dennoch eine Betondeckung erforderlich. Die Realisierung und Einbindung in den Herstellungsprozess der Pultrusion ist Inhalt weiterer interdisziplinärer Forschungsarbeiten.

7. Zusammenfassung und Fazit

Aktiver Klimaschutz ist eine der größten globalen Herausforderungen unserer Zeit. Die Bauindustrie steht dabei besonders in der Verantwortung, da rund 7 % der weltweiten anthropogenen CO₂-Emission bei der Zementherstellung freigesetzt werden und die Themen Ressourcenschonung sowie Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen aktueller denn je sind. Im Forschungsprojekt wurden daher neue Ansätze für klimafreundliche Konstruktionsbaustoffe verfolgt, indem klinkerarme, weniger CO₂-emittierende und zudem noch ressourcenschonende Betone mit Bewehrungselementen aus nachwachsenden Hanfbast als Weiterentwicklung zum klassischen Stahlbetonbau untersucht wurden. Dieses neuartige Konzept erhielt im Forschungsvorhaben das Akronym **BasEcoCrete**.

Nachwachsende Hanfbastfasern werden aus dem Stängel der vor Ort kultivierbaren Nutzhanf pflanze gewonnen. Mit der Verwendung der Fasern für den Einsatz stabförmiger Bewehrungselemente kann somit eine klimaangepasste Erzeugung konstruktiver Bewehrung realisiert werden. Gelingt es, die Fasern als Rohstoff zur Herstellung von Bewehrungselementen im Betonbau zu verwenden, kann die energieintensive Herstellung von Bewehrungsstahl deutlich reduziert, Treibhausgasemissionen vermieden und natürliche Ressourcen erhalten werden. Über die Nutzung des Hanfs im Bauwesen könnte sich somit eine Wertschöpfungskette für eine der ältesten Nutzpflanzen der Menschheit reaktivieren lassen. Jedoch steht die Entwicklung insbesondere für stabförmige Elemente noch am Anfang. Eine erste Herausforderung im Projekt war die Bestimmung der Materialparameter an Hanfbastfasern und den damit hergestellten Bewehrungsstäben. Kapitel 5.2 umfasst die Ermittlung der Kennwerte an Hanfbastfasern, wie Reindichte, Zugfestigkeit und E-Modul. Dafür wurden Hanfbastfasern aus dem Stängel der Nutzhanf pflanze Cannabis Sativa L vom Projektpartner Fa. Naporo zur Verfügung gestellt. Es handelt sich dabei um die Sorte USO31, die im nördlichen Weinviertel Niederösterreichs angebaut wird. Herausfordernd gestaltete sich die Bestimmung der Zugfestigkeit, da aufgrund der Morphologie und der unterschiedlich starken Faserbündel nur über den Ansatz von äquivalenten Querschnittswerten die Zugfestigkeit aus den gemessenen Kräften berechnet werden konnte. Die ermittelten Kenngrößen streuen stark und liegen (mit

einer Reindichte von $1,40 \text{ g/cm}^3$) bei einem Medianwert der Zugfestigkeit von 149 MPa und Medianwert des E-Moduls von ca. 26.100 MPa.

Im weiteren Projektverlauf wurde die Dauerhaftigkeit der Fasern in alkalischen Medien bei pH 11 und 13 über die Zugfestigkeit, den E-Modul und über rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen beurteilt (Kapitel 5.6.2). Die Ergebnisse zeigen unerwartet den höchsten Massenverlust bei Lagerung in pH 11. Dabei verloren die nicht gerösteten Fasern gegenüber den gerösteten Fasern mehr Masse über den Prüfzeitraum von 180 Tagen. Die Zugfestigkeitswerte wurden nach 180 Tagen durch eine alkalische Lagerung um 20-25 % für die nicht gerösteten Fasern bzw. um 10-17 % bei den gerösteten Fasern gemindert.

Die im Pultrusionsverfahren hergestellten **Hanfbastbewehrungsstäbe** wurden mit einer Zugfestigkeit von 117 MPa und einem E-Modul von 15.049 MPa charakterisiert. Herstellungsbedingt haben die Hanfbastbewehrungsstäbe eine glatte Oberfläche. Deshalb wurden die Stäbe nachträglich händisch profiliert, um den Verbund zwischen Stab und Beton und damit die Leistungsfähigkeit zu verbessern. Es wurden dabei die Profilierungsvarianten „fein besandet“, „grob besandet“, „umwickelt“ sowie „besandet und umwickelt“ untersucht. Die Validierung des Profilierungskonzeptes erfolgte an Auszugversuchen in Anlehnung an Pull-out Tests in Kapitel 5.3. Dafür wurden Auszugprobekörper mit den vier gewählten profilierten Hanfbastbewehrungsstäben und ÖkoLB hergestellt. Als Referenzprobekörper wurden mit konventionellem Betonstahl bewehrte Proben hergestellt. Um die Verbundspannung nach den Auszugversuchen berechnen zu können, musste die in ÖkoLB eingebettete Bewehrungsfläche vorab mit einem 3D-Handscanner ermittelt werden. Die Verbundspannung lag mit Stahlbewehrung bei 3,4 MPa. Die erzielten Verbundspannungen an den Hanfbastbewehrungsstäben reichten sich mit „grob besandet“ und „fein besandet“ (2,8 MPa), „umwickelt“ (2,6 MPa) sowie „besandet und umwickelt“ (1,8 MPa). Somit kann in weiteren Forschungsprojekten eine besandete Profilierung empfohlen werden und die Integration in den Herstellungsprozess der Pultrusion unter interdisziplinärerer Zusammenarbeit weiter forciert werden.

Für Herstellung von stabförmigen Bewehrungselementen auf Basis von Hanfbastfasern sind Erkenntnisse zur Eignung und Dauerhaftigkeit des umhüllenden **Epoxidharzes** notwendig. Dafür wurden im Projekt vier Epoxidharze (ein biobasiertes Epoxidharz, ein Epoxidharz mit schnellen Aushärtungseigenschaften und zwei

Epoxidharze mit hoher Temperaturbeständigkeit) ausgewählt. Die Charakterisierung der Materialeigenschaften und die Beständigkeit im alkalischen Milieu (Kapitel 5.6.1) erfolgte an Zugprobekörpern nach DIN EN ISO 527-2. Die Zugfestigkeitswerte zeigen bis 178 Tage Alkalilagerung keine Abhängigkeit vom pH-Wert des Mediums. Für das biobasierte Harz wurden sowohl Zugfestigkeit als auch der E-Modul deutlich bis 178 Tage Einlagerungsdauer reduziert. Der Abfall der Zugfestigkeit lag bei rund 34 % und für den E-Modul bei rund 25 %.

Es wurden gezielt **ökologisch optimierte Betone** mit klinkerarmen Bindemitteln unterschiedlicher Dichte und Porosität entwickelt (Kapitel 5.4.1 und 5.5), um die mechanischen Eigenschaften der beiden Materialien klinkerarmer Beton und Hanfbastbewehrungsstäbe möglichst gut aneinander anzupassen. Dabei wurde der Klinkergehalt in den verwendeten Zementen um mindestens 55 %, im ÖkoB2 sogar um 73 % reduziert. Trotz des hohen Gehaltes an Zementersatzstoffen erreichten die beiden gefügedichten Normalbetone ÖkoB1 und ÖkoB2 eine Leistungsfähigkeit mit Betonfestigkeitsklassen C40/50 sowie einem E-Modul von ca. 30.500 MPa. Der eingestellte ÖkoLB kann in die Festigkeits- bzw. Rohdichteklasse LAC6/D1,0 eingeordnet werden und ist ein hochwärmedämmender Leichtbeton. Die Zugabe von Hanfbastfasern führte zudem zu einer Reduzierung des Frühschwindmaßes im ÖkoLB. Ein weiterer wichtiger Aspekt für die den **Konstruktionswerkstoff BasEcoCrete** ist die Alkalität der klinkerarmen Betone und die damit verbundene notwendige Alkalibeständigkeit des Bewehrungsmaterials. Zur Bestimmung der Alkalität wurden analytische Untersuchungen am erhärteten Bindemittel durchgeführt. Sowohl der pH-Wert als auch die für den Korrosionsschutz wichtige Größe des Portlanditgehaltes zeigt ein hochalkalisches Milieu nach 28 Tagen mit pH-Werten größer 13 und Portlanditgehalten über 14 g/100 g Bindemittel. Somit müssen Hanfbastfasern als auch Hanfbastbewehrungsstäbe in ihren Eigenschaften gegenüber einem hochalkalischen Milieu widerstandsfähig sein. Eine deutliche Absenkung der Alkalität im Beton ist erst im Laufe der Nutzungsdauer, vor allem für den haufwerksporigen Leichtbeton ÖkoLB, zu erwarten.

Das **ökologische Image** der verwendeten Materialien wurde in Kapitel 6.4 bewertet. Für die klinkerarmen Normalbetone konnte der GWP-Wert im Vergleich zum Branchenreferenzwert (für einen C35/45 wird ein GWP von 286 kg CO₂/m³ Beton angesetzt) um 38 % für ÖkoB1 und um 64 % für ÖkoB2 gesenkt werden. Der ÖkoLB liegt mit 130 kg CO₂/m³ Beton im Bereich emissionsarmer Betone. Für stabförmige

Bewehrungselemente konnte aufgrund fehlender Produktionsparameter nur eine erste Abschätzung der Emissionen in A1-A3 gemacht werden. Der GWP A1-A3 liegt dabei bei 0,4 kg CO₂ je Laufmeter Bewehrung für einen Stabdurchmesser von 6 mm.

Die Herstellung von Biegebalken als **Demonstratoren** für einen erfolgreichen Einsatz des neuen Konstruktionswerkstoffe BasEcoCrete rundete das Forschungsprojekt ab. Hierbei konnte die Leistungsfähigkeit der Hanfbastbewehrungsstäbe in den drei ökologisch-optimierten Betonen gezeigt werden. Trotz Vorschädigung durch Quellen der Hanfbastbewehrungsstäbe im Beton erreichten die profilierten Bewehrungsstäbe im ÖkoB1 und im ÖkoB2 zwischen 50 und 80 % der Biegezugfestigkeit zur Referenz mit Betonstahl. Im ÖkoLB wurden rund 50 % der Biegezugfestigkeit erreicht. Mit den ermittelten Zugfestigkeiten der Hanfbastbewehrungsstäbe konnte mit Hilfe eines Ingenieurmodells die Zugkraft in den Bewehrungsstäben bestimmt und so mit den bekannten Ansätzen aus dem Stahlbetonbau verglichen werden. Damit ist eine erste Eingliederung der Hanfbastbewehrungsstäbe in den bekannten Bewehrungskontext möglich.

Das Forschungsvorhaben BasEcoCrete zeigt somit eindrucksvoll, dass klinkerarme Betone mit nicht korrosionsgefährdeten Hanfbast-Bewehrungselementen für zukünftige Konstruktionen einen äußerst attraktiven Ansatz darstellen, bei dem sich nicht nur die mechanischen Eigenschaften der beiden Werkstoffe, sondern auch das gemeinsame ökologische Image gut vereinen lassen.

Mitwirkende

Kurzbiographien

Thienel, Karl-Christian, Univ.-Prof. Dr.-Ing.

Bauingenieurstudium TU Braunschweig 1981-1986, wissenschaftlicher Mitarbeiter Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (ibmb) der TU Braunschweig 1988-1993, Promotion am ibmb 1993; Feodor-Lynen-Forschungsstipendiat der AvH-Stiftung am NSF Center for Science and Technology of Advanced Cement-Based Materials, Northwestern University, Ill, USA; Liapor GmbH & Co. KG 1995-2003; seit 2003 Univ.-Prof. und Leiter Institut für Werkstoffe des Bauwesens, UniBw M, 2016-2021 Vizepräsident UniBw M

Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85579 Neubiberg

Braml, Thomas, Univ.-Prof. Dr.-Ing.

Bauingenieurstudium Technische Hochschule Deggendorf 1995-2000; 2000-2007 Projektleiter und Gruppenleiter Brückenbau Ing.-Büro Prof. Bulicek + Ingenieure, Passau; 2002-2006 Fernstudium Bauingenieurwesen TU Dresden; 2007 – 2010 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für konstruktiven Ingenieurbau Universität der Bundeswehr München; 2010-2012 Facultatives Underwriting für Großrisiken Munich Re; 2012-2013 Gruppenleiter konstruktiver Ingenieurbau WTM Engineers GmbH; seit 2013 Geschäftsführender Gesellschafter HFR Ingenieure GmbH, München; seit 2018 Professor für Massivbau am Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Universität der Bundeswehr München

Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85579 Neubiberg

Beuntner, Nancy, Dr.-Ing.

Bauingenieurstudium mit Schwerpunkt Baustoffe und Sanierung an der Bauhaus Universität Weimar, Abschluss 2002; 2002 bis 2008 Mitarbeiterin der Rohrdorfer Baustoffgruppe; ab 2009 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Werkstoffe des Bauwesens der Universität der Bundeswehr München, seit 2013 wissenschaftliche Laborleiterin; 2017 Promotion am Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Universität der Bundeswehr München

Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85579 Neubiberg

Isaia, Manuel, M. Sc.

Bauingenieurstudium an der Leibniz Universität Hannover, Abschluss 2023. Von 2019 bis 2023 Projektleiter in der Objekt-und Tragwerksplanung bei „Merkin und Völker GmbH“. Seit 2023 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Universität der Bundeswehr München.

Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85579 Neubiberg

Rauch, Lukas, M. Sc.

Bauingenieurstudium an der Technischen Universität München, Abschluss 2019. Seit 2019 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Universität der Bundeswehr München

Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85579 Neubiberg

Zürnstein, Florian, M. Sc.

Bauingenieurstudium an der Technischen Universität München, Abschluss 2020. 2020 bis 2025 Projektingenieur bei ISP-Scholz Beratende Ingenieure AG. Seit 2023 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Universität der Bundeswehr München.

Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85579 Neubiberg

Literatur

- Adam, L., Isopescu, D. N., Judele, L., Bucur, R. D. & Lepădatu, D. (2022). Statistical Analysis of preliminary studies for hemp concrete. *Journal of Applied Life Sciences an Environment*, 55(2), 145–158. <https://doi.org/10.46909/alse-552052>
- Albrecht, K., Finkbeiner, M., Görmer, M., Hein, A., Huber, E., Kirupaparan, N., Ford-Werke, Konstruktionsbüro Hein, Neustadt, M-Base Engineering Software GmbH, Aachen, Bionik-Innovations-Centrum, Bremen, Institut für Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe, Institut für Technischen Umweltschutz, Technische Universität Berlin, & LyondellBasell. (2020). *Integration von ökologischen Kennwerten biobasierter Werkstoffe in den industriellen Planungs- und Konstruktionsprozess - Methodologie und Werkzeuge: Schlussbericht zum Verbundvorhaben: gemeinsamer Bericht aller Partner: Laufzeit: 01.07.2017 bis 30.04.2020*. Aachen. Zugriff am 25.7.2024. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.2314/KXP:1752077857>
- d'Almeida, J. R. M. & Monteiro, S. N. (1996). The effect of the resin/hardener ratio on the compressive behavior of an epoxy system. *Polymer Testing*, 15(4), 329–339. [https://doi.org/10.1016/0142-9418\(95\)00037-2](https://doi.org/10.1016/0142-9418(95)00037-2)
- Angulu, M. & Gusovius, H.-J. (2024). Retting of Bast Fiber Crops Like Hemp and Flax—A Review for Classification of Procedures. *Fibers*, 12(3), 28. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/fib12030028>
- Bauschinger, J. & Föppl, A. (1888). *Mitteilungen aus dem Mechanisch Technischen Laboratorium der Technischen Hochschule München Band 17 = Mitteilung 21. 1888*. Elektronische Reproduktion, Digitalisierung: Bayerische Staatsbibliothek. München: K. Technischen Hochschule. Zugriff am 5.8.2024. Verfügbar unter: <https://mdz-nbn-resolving.de/details:bsb11454853>
- Bedlivá, H. & Isaacs, N. (2014). Hempcrete – An environmentally friendly material? *Advanced Materials Research*, 1041, 82–86. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1041.83>
- Bernstein, G. (2025). Die „Smart Circular Bridge“: Eine unkonventionelle Fußgängerbrücke für die kleine Blauinsel. Zugriff am 30.1.2025. Verfügbar unter: <https://www.ulm.de/leben-in-ulm/verkehr-und-mobilitaet/verkehrsprojekte/bruecke-lautenberg-blauinsel>
- Beuntner, N. (2019). *Zur Eignung und Wirkungsweise calcinierter Tone als reaktive Bindemittelkomponente in Zement (On the suitability and mode of action of calcined clays as reactive binder components in cement)* (Band 628). Berlin, Germany: Beuth Verlag.
- Blok, R., Smits, J., Gkaidatzis, R. & Teuffel, P. (2019). Bio-Based Composite Footbridge: Design, Production and In Situ Monitoring. *Structural Engineering International*, 29(3), 453–465. <https://doi.org/10.1080/10168664.2019.1608137>
- Blume, F., Kröll, D. & Buck, F. (2020). *Vergleich des CO2 Fußabdrucks von Mineral- und Trinkwasser*. Berlin: CUT Zertifizierungsgesellschaft für Managementsysteme.
- Böcsa, I. & Karus, M. (1997). *Der Hanfanbau - Botanik, Sorten, Anbau und Ernte* (1. Auflage). Heidelberg: C. F. Müller Verlag, Hüthig GmbH.
- Böhm, S. (2020). „Einfach genial – genial einfach: Schnüre und Seile im prähistorischen Alltag“ - ein Austausch unter Kolleg*innen / „Simply Ingenious – Ingeniously Simple: Cords and Ropes in Prehistoric Everyday Life“ - Sharing Information between Colleagues (Archäologische Informationen aus Baden-Württemberg). In J. Banck-Burgess & L.-M. Rösch (Hrsg.), *Verknüpft und zugenäht! Bound and Stitched Up! Gräser, Bast, Rinde - Alleskönner der Steinzeit! / Grass, Bast, Bark - Stone Age All-Rounders* (Band 82, S. 118–123). Heidelberg: Propylaeum. Zugriff am 13.8.2024. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.11588/propylaeum.643>
- Bohn, A., Mazelli, R. & Bocco, A. (2022). Load bearing hempcrete? A preliminary research. Gehalten auf der 18th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies (NOCMAT 2022). <https://doi.org/10.5281/zenodo.6631769>

- Bourdot, A., Moussa, T., Gacoin, A., Maalouf, C., Vazquez, P., Thomachot-Schneider, C., Bliard, C., Merabtine, A., Lachi, M., Douzane, O., Karaky, H. & Polidori, G. (2017). Characterization of a hemp-based agro-material: Influence of starch ratio and hemp shive size on physical, mechanical, and hygrothermal properties. *Energy and Buildings*, 153, 501–512. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.022>
- Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB). (2018). Prozess-Datensatz: Blähglas Körnung (de). Datensatz, ÖkobaDat. Zugriff am 12.2.2025. Verfügbar unter: <https://oekobaDat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=e2306538-776d-4bc5-ae3b-1c920fb40285&lang=de>
- Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB). (2024). ÖkobaDat - Informationsportal Nachhaltiges Bauen. Datensatz, ÖkobaDat. Zugriff am 10.11.2024. Verfügbar unter: <https://www.oekobaDat.de/>
- Callsen, B. & Thienel, K.-C. (2017). Besondere Aspekte bei der Entwicklung und Ausführung eines hochwärmedämmenden Hochleistungs-Leichtbetons mit sehr niedriger Betonrohddichte. *Beton*, 67(4), 128–134.
- Carus, M., Gahle, C., Cezar, P., Vogt, D., Ortmann, S., Grotenhermen, F., Breuer, T. & Schmidt, C. (2008). *Band 26: Studie zur Markt- und Konkurrenzsituation bei Naturfasern und Naturfaser-Werkstoffen (Deutschland und EU)* (Gülzower Fachgespräche). Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. mit Förderung des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Zugriff am 20.11.2023. Verfügbar unter: <https://mediathek.fnr.de/band-26-studie-zur-markt-und-konkurrenzsituation-bei-naturfasern-und-naturfaser-werkstoffen-deutschland-und-eu.html>
- Chabannes, M., Garcia-Diaz, E., Clerc, L. & Bénézet, J.-C. (2015). Studying the hardening and mechanical performances of rice husk and hemp-based building materials cured under natural and accelerated carbonation. *Construction and Building Materials*, 94, 105–115. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.032>
- Chandra, S. & Berntsson, L. (2002). *Lightweight Aggregate Concrete* (Building Materials Science Series) (1st Auflage). Norwich: Noyes Publications.
- Chow, H. K. (1914). *Bamboo as a material for reinforcing concrete*. Thesis B.S. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology. Zugriff am 16.7.2024. Verfügbar unter: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/81516>
- Cohen, D. (2021, August). *Hempwerks: non-corroding concrete reinforcing made with natural fiber and thermoplastics*. Master Thesis. Troy: Rensselaer Polytechnic Institute.
- Concrete Sustainability Council (CSC). (2021, Dezember 8). Concrete Sustainability Council - Hintergrundbericht – CO₂-Modul. Berlin, Germany.
- Dahy, H. (2023). Materials as Design Tool: Digital Fabrication Strategies for Sustainable Architecture. *Technology|Architecture + Design*, 7(2), 153–158. Routledge. <https://doi.org/10.1080/24751448.2023.2245707>
- Deutsche Bauzeitung & Deutscher Baukalender (Hrsg.). (1880). *Deutsches Bauhandbuch: eine systematische Zusammenstellung der Resultate der Bauwissenschaften mit allen Hilfswissenschaften in ihrer Anwendung auf das Entwerfen und die Ausführung der Bauten. 2,1, Baukunde des Architekten* (Elektronische Reproduktion, München.). Berlin: Toeche. Zugriff am 7.8.2024. Verfügbar unter: <https://mdz-nbn-resolving.de/details:bsb11558593>
- Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. (2003). *Heft 525 - Erläuterungen und ergänzende Anwendungsregeln zu DIN 1045-1*. Berlin: Beuth Verlag.
- Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. (2012). *DAfStb-Richtlinie „Stahlfaserbeton“, Teil 2: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*. Berlin: Beuth Verlag.

- Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. (2024). *DAFStb-Richtlinie Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung*. Berlin: DIN Media GmbH.
- DIN 1045-2. (2023, August). DIN 1045-2:2023-08, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1 (Concrete, reinforced and prestressed concrete structures – Part 2: Concrete – Specification, properties, production and conformity – Application rules for DIN EN 206-1). Berlin, Germany: Beuth-Verlag. <https://doi.org/10.31030/3445766>
- DIN EN 196-1. (2016, November). DIN EN 196-1:2016-11, Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit. Berlin, Germany: DIN Media GmbH. <https://doi.org/10.31030/2482416>
- DIN EN 1351-02. (1997, Februar). DIN EN 1351:1997-02, Bestimmung der Biegezugfestigkeit von dampfgehärtetem Porenbeton. Berlin, Germany: DIN Media GmbH. <https://doi.org/10.31030/7312263>
- DIN EN 1352-02. (1997, Februar). DIN EN 1352:1997-02, Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls unter Druckbeanspruchung von dampfgehärtetem Porenbeton und von haufwerksporigem Leichtbeton. Berlin, Germany: DIN Media GmbH. <https://doi.org/10.31030/7312272>
- DIN EN 1354-09. (2005, September). DIN EN 1354:2005-09, Bestimmung der Druckfestigkeit von haufwerksporigem Leichtbeton. DIN Media GmbH. <https://doi.org/10.31030/9646792>
- DIN EN 1992-1-1. (2011, Januar). DIN EN 1992-1-1:2011-01, Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Berlin, Germany: Beuth-Verlag. <https://doi.org/10.31030/1723945>
- DIN EN 10080. (2005, August). DIN EN 10080:2005-08, Stahl für die Bewehrung von Beton - Schweißgeeigneter Betonstahl - Allgemeines. Berlin, Germany: Beuth-Verlag. <https://doi.org/10.31030/9541224>
- DIN EN 12390-5. (2019, Oktober). DIN EN 12390-5:2019-10, Prüfung von Festbeton - Teil 5 Biegezugfestigkeit von Probekörpern. Berlin, Germany: Beuth-Verlag. <https://doi.org/10.31030/3045736>
- DIN EN 14216. (2015, September). DIN EN 14216:2015-09, Zement - Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Sonderzement mit sehr niedriger Hydratationswärme. September Berlin: Beuth-Verlag. <https://doi.org/10.31030/2333349>
- DIN EN 15804. (2022, März). DIN EN 15804:2022-03, Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte. Berlin, Germany: Beuth-Verlag. <https://doi.org/10.31030/3294005>
- DIN EN ISO 139. (2011, Oktober). DIN EN ISO 139:2011-10, Textilien - Normalklimate für die Probenvorbereitung und Prüfung. Berlin, Germany: Beuth-Verlag. <https://doi.org/10.31030/1762430>
- DIN EN ISO 527-1. (2019, Dezember). DIN EN ISO 527-1:2019-12, Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 1: Allgemeine Grundsätze. Berlin, Germany: Beuth-Verlag. <https://doi.org/10.31030/3059426>
- DIN EN ISO 527-2. (2012, Juni). DIN EN ISO 527-2:2012-06, Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen. Berlin, Germany: Beuth-Verlag. <https://doi.org/10.31030/1860304>
- DIN EN ISO 527-4. (2023, Juli). DIN EN ISO 527-4:2023-07, Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 5: Prüfbedingungen für isotrop und anisotrop faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe. Berlin, Germany: Beuth-Verlag. <https://doi.org/10.31030/3434328>
- DIN EN ISO 5079. (2021, Februar). DIN EN ISO 5079:2021-02, Textilfasern - Bestimmung der Höchstzugkraftdehnung an einzelnen Fasern (ISO 5079:2020). Berlin, Germany: Beuth-Verlag. <https://doi.org/10.31030/3181427>
- DIN EN ISO 15630-1. (2019, Mai). DIN EN ISO 15630-1:2019-05, Stähle für die Bewehrung und das Vorspannen von Beton - Prüfverfahren - Teil 1: Bewehrungsstäbe, Walzdraht und Draht. Berlin, Germany: Beuth-Verlag. <https://doi.org/10.31030/2885797>

- DIN EN 197-1. (2011, November). DIN EN 197-1:2011-11, Zement - Teil: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement (Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements). Berlin, Germany: Beuth-Verlag. <https://doi.org/10.31030/1758792>
- DIN EN 197-5. (2021, Juli). DIN EN 197-5:2021-07, Zement - Teil 5: Portlandkompositzement CEM II/C-M und Kompositzement CEM VI; Deutsche Fassung EN 197-5:2021. Berlin, Germany: Beuth-Verlag. <https://doi.org/10.31030/3211365>
- DIN EN 206-1. (2021, Juni). DIN EN 206-1:2021-06, Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Berlin, Germany: DIN Media GmbH. <https://doi.org/10.31030/3198971>
- DIN EN 1520. (2011, Juni). DIN EN 1520:2011-06, Vorgefertigte Bauteile aus haufwerksporigem Leichtbeton und mit statisch anrechenbarer oder nicht anrechenbarer Bewehrung (Prefabricated reinforced components of lightweight aggregate concrete with open structure with structural and non-structural reinforcement). Berlin, Germany: Beuth Verlag GmbH. <https://doi.org/10.31030/1720849>
- DIN EN 12350-5. (2019, September). DIN EN 12350-5:2019-09, Prüfung von Frischbeton - Teil 5: Ausbreitmaß (Testing fresh concrete – Part 5: Flow table test). Berlin, Germany: Beuth-Verlag. <https://doi.org/10.31030/3045714>
- DIN EN 12350-6. (2019, September). DIN EN 12350-6:2019-09, Prüfung von Frischbeton - Teil 6: Frischbetonrohichte. Berlin, Germany: DIN Media GmbH. <https://doi.org/10.31030/3045731>
- DIN EN 12390-2. (2019, Oktober). DIN EN 12390-2:2019-10, Prüfung von Festbeton - Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen; Deutsche Fassung (Testing hardened concrete - Part 2: Making and curing specimens for strength tests; German Version of EN 12390-2). Berlin, Germany: Beuth-Verlag. <https://doi.org/10.31030/3045734>
- DIN EN 12390-3. (2019, Oktober). DIN EN 12390-3:2019-10, Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern (Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens). Berlin, Germany: Beuth-Verlag. <https://doi.org/10.31030/3045735>
- DIN EN 12390-13. (2021, September). DIN EN 12390-13:2021-09, Prüfung von Festbeton - Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul) (Testing hardened concrete – Part 13: Determination of secant modulus of elasticity in compression). Berlin, Germany: Beuth-Verlag. <https://doi.org/10.31030/3240156>
- Elfaleh, I., Abbassi, F., Habibi, M., Ahmad, F., Guedri, M., Nasri, M. & Garnier, C. (2023). A comprehensive review of natural fibers and their composites: An eco-friendly alternative to conventional materials. *Results in Engineering*, 19, 101–271. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101271>
- Elfordy, S., Lucas, F., Tancret, F., Scudeller, Y. & Goudet, L. (2008). Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete (“hempcrete”) manufactured by a projection process. *Construction and Building Materials*, 22(10), 2116–2123. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.016>
- EPD International AB. (2021). Process Data set: S-P-13160 PINKBAR®+ Fiberglas™ Rebar (en). The International EPD System. Zugriff am 7.2.2025. Verfügbar unter: <https://data.environdec.com/datasetdetail/process.xhtml?uuid=b466f17c-43ec-472a-f670-08dc4e83d24b&version=07.01.002&stock=Environdata&lang=en>
- EPD-ARM-20210054-CBC1-EN. (2021). Umwelt-Produktdeklaration Reinforcing steel in bars. EPD, Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU): IBU-EPD-Programm. Zugriff am 7.2.2025. Verfügbar unter: <https://epd-online.com/EmbeddedEpdList/Detail?id=13356>
- EPD-DBC-20220174-IBF1-EN. (2022). Environmental Product Declaration products based on epoxy-resin, group 1. EPD, Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU): IBU-EPD-Programm. Zugriff am 13.2.2025. Verfügbar unter: <https://epd-online.com/EmbeddedEpdList/Detail?id=14686>
- EPD-DBE-20230566-IBG3-EN. (2024). Umwelt-Produktdeklaration Concrete admixtures - Plasticizers and Superplasticizers for CO2 optimized concrete, group B. EPD, Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU): IBU-

- EPD-Programm. Zugriff am 8.2.2025. Verfügbar unter: <https://epd-online.com/EmbeddedEpdList/Detail?id=20262>
- EPD-HCG-20210008-CAA2-DE. (2021). Umwelt-Produktdeklaration Portlandzement Hochofenzement CEM III/B 42,5 N LH/SR (na). EPD, Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU): IBU-EPD-Programm. Zugriff am 8.2.2025. Verfügbar unter: <https://epd-online.com/EmbeddedEpdList/Detail?id=20259>
- EPD-IES-0003562. (2024). Environmental Product Declaration Steel for the reinforcement of concrete D500E and D500N. EPD, China: The International EPD System. Zugriff am 10.2.2025. Verfügbar unter: <https://www.environdec.com/library/epd3562>
- EPD-IES-0005739. (2023). Environmental Product Declaration Aggregates & Granular Fill. EPD, Ireland: The International EPD System. Zugriff am 8.2.2025. Verfügbar unter: <https://www.environdec.com/library/epd5739>
- EPD-IES-0014125. (2026). Environmental Product Declaration Fabricated Steel reinforcing bar. EPD, Australia: The International EPD System. Zugriff am 10.2.2025. Verfügbar unter: <https://www.environdec.com/library/epd14125>
- EPD-IES-0015614. (2024). Environmental Product Declaration Fabricated steel reinforcement products (cut and bent rebar). EPD, United Kingdom: The International EPD System. Zugriff am 10.2.2025. Verfügbar unter: <https://www.environdec.com/library/epd15614>
- EPD-IES-0015618. (2024). Environmental Product Declaration Fabricated steel reinforcement products (cut and bent rebar). EPD, United Kingdom: The International EPD System. Zugriff am 10.2.2025. Verfügbar unter: <https://www.environdec.com/library/epd15618>
- EPD-IES-0015620. (2024). Environmental Product Declaration Fabricated steel reinforcement products (cut and bent rebar). EPD, United Kingdom: The International EPD System. Zugriff am 10.2.2025. Verfügbar unter: <https://www.environdec.com/library/epd15620>
- EPD-IES-0018167. (2025). Environmental Product Declaration Reinforcing steel in bars. EPD, Germany: The International EPD System. Zugriff am 10.2.2025. Verfügbar unter: <https://www.environdec.com/library/epd18167>
- EPD-IZB-20230328-IBG1-DE. (2023). Umwelt-Produktdeklaration Beton der Druckfestigkeitsklasse C30/37. EPD, Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU): IBU-EPD-Programm. Zugriff am 7.1.2025. Verfügbar unter: <https://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Dokumente/PDF/Wissen/Beton-Bautechnik/Nachhaltigkeit/2023-10-20-EPD-C30-37.pdf>
- EPD-IZB-20230417-IBA1-DE. (2023). Umwelt-Produktdeklaration Beton der Druckfestigkeitsklasse C8/10. EPD, Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU): IBU-EPD-Programm. Zugriff am 7.1.2025. Verfügbar unter: <https://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Dokumente/PDF/Wissen/Beton-Bautechnik/Nachhaltigkeit/2023-10-20-EPD-C8-10.pdf>
- EPD-IZB-20230418-IBA1-DE. (2023). Umwelt-Produktdeklaration Beton der Druckfestigkeitsklasse C12/15. EPD, Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU): IBU-EPD-Programm. Zugriff am 7.1.2025. Verfügbar unter: <https://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Dokumente/PDF/Wissen/Beton-Bautechnik/Nachhaltigkeit/2023-10-20-EPD-C12-15.pdf>
- EPD-IZB-20230419-IBA1-DE. (2023). Umwelt-Produktdeklaration Beton der Druckfestigkeitsklasse C16/20. EPD, Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU): IBU-EPD-Programm. Zugriff am 7.1.2025. Verfügbar unter: <https://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Dokumente/PDF/Wissen/Beton-Bautechnik/Nachhaltigkeit/2023-10-20-EPD-C16-20.pdf>
- EPD-IZB-20230420-IBA1-DE. (2023). Umwelt-Produktdeklaration Beton der Druckfestigkeitsklasse C20/25. EPD, Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU): IBU-EPD-Programm. Zugriff am 7.1.2025. Verfügbar unter: <https://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Dokumente/PDF/Wissen/Beton-Bautechnik/Nachhaltigkeit/2023-10-20-EPD-C20-25.pdf>

- EPD-IZB-20230421-IBA1-DE. (2023). Umwelt-Produktdeklaration Beton der Druckfestigkeitsklasse C25/30. EPD, Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU): IBU-EPD-Programm. Zugriff am 7.1.2025. Verfügbar unter: <https://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Dokumente/PDF/Wissen/Beton-Bautechnik/Nachhaltigkeit/2023-10-20-EPD-C25-30.pdf>
- EPD-IZB-20230422-IBA1-DE. (2023). Umwelt-Produktdeklaration Beton der Druckfestigkeitsklasse C35/45. EPD, Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU): IBU-EPD-Programm. Zugriff am 7.1.2025. Verfügbar unter: <https://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Dokumente/PDF/Wissen/Beton-Bautechnik/Nachhaltigkeit/2023-10-20-EPD-C35-45.pdf>
- EPD-IZB-20230423-IBA1-DE. (2023). Umwelt-Produktdeklaration Beton der Druckfestigkeitsklasse C45/55. EPD, Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU): IBU-EPD-Programm. Zugriff am 7.1.2025. Verfügbar unter: <https://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Dokumente/PDF/Wissen/Beton-Bautechnik/Nachhaltigkeit/2023-10-20-EPD-C45-55.pdf>
- EPD-IZB-20230424-IBA1-DE. (2023). Umwelt-Produktdeklaration Beton der Druckfestigkeitsklasse C50/60. EPD, Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU): IBU-EPD-Programm. Zugriff am 7.1.2025. Verfügbar unter: <https://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Dokumente/PDF/Wissen/Beton-Bautechnik/Nachhaltigkeit/2023-10-20-EPD-C50-60.pdf>
- EPD-LIA-20230117-CCC1-EN. (2023). Environmental Product Declaration Lightweight expanded clay aggregate for loose-fill applications. EPD, Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU): IBU-EPD-Programm. Verfügbar unter: <https://epd-online.com/EmbeddedEpdList/Detail?id=16605>
- EPD-SBG-20200240-IBA1-DE. (2021). Umwelt-Produktdeklaration Schöck Combar. EPD, Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU): IBU-EPD-Programm. Zugriff am 7.2.2025. Verfügbar unter: <https://epd-online.com/EmbeddedEpdList/Detail?id=12968>
- EPD-S-P-03166. (2022). Environmental Product Declaration V-Rod Glass Fiber Reinforced Rebars. EPD, Canada: The International EPD System. Zugriff am 10.2.2025. Verfügbar unter: <https://www.environdec.com/library/epd3166>
- EPD-S-P-12185. (2024). Environmental Product Declaration Mateenbar Fiberglass Rebars & Dowels. EPD, Saudi Arabia: The International EPD System. Zugriff am 10.2.2025. Verfügbar unter: <https://www.environdec.com/library/epd12185>
- EPD-VDZ-20220153-IAG1-DE. (2022). Umwelt-Produktdeklaration Portlandzement (CEM I). EPD, Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU): IBU-EPD-Programm. Zugriff am 8.2.2025. Verfügbar unter: <https://epd-online.com/EmbeddedEpdList/Detail?id=16002>
- Fischer, H. & Drieling, A. (2024). Mechanische Faserprüfung. In B. Plinke, S. Fischer, H. Fischer, N. Graupner & J. Müssig (Hrsg.), *Charakterisierung von Holz- und Naturfasern: Eine praxisbezogene Einführung für die Werkstoffentwicklung* (S. 199–213). Weinheim: WILEY-VCH. Zugriff am 11.12.2023. Verfügbar unter: <https://www.doi.org/10.1002/9783527804191>
- FSKB-2018-1-Ecoinvent. (2018). Durchschnitts-EPD für Gesteinskörnungen. EPD, Schweiz. Zugriff am 8.2.2025. Verfügbar unter: https://www.sugb.ch/wp-content/uploads/2020/05/CLEAR_2018-09-04_EPD-Dokument-de_eco-00001218.pdf
- Gildehaus, M. (2025). Pressemitteilung PM6/30.01.2025 - Mit Flachs und Bio-Harz über die Kleine Blau. (Pressestelle Stadt Ulm, Hrsg.). Zugriff am 1.2.2025. Verfügbar unter: <https://www.ulm.de/-/media/ulm/zoea/downloads/2025/erffnung-smart-circular-bridge.pdf>
- González-García, S., Hospido, A., Feijoo, G. & Moreira, M. T. (2010). Life cycle assessment of raw materials for non-wood pulp mills: Hemp and flax. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(11), 923–930. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.01.011>

- Görtz, S., Lengert, K. & Haack, R. (2023). Tragfähigkeit und Anwendungen von Betonbauteilen mit Bewehrung aus basaltfaserverstärktem Kunststoff. *Beton- und Stahlbetonbau*, 118(8), 607–625. <https://doi.org/10.1002/best.202300042>
- Graupner, N., Weber, D. & Müssig, J. (2021). *Faserverbundwerkstoffe aus Naturfasern für strukturelle Anwendungen auf der Basis von neuartigen, niedrig gedrehten Bastfasergarnen; Teilvorhaben 1: Demonstrator, Koordinierung; Schlussbericht zum Vorhaben; Laufzeit: 01.01.2018 bis 30.04.2021*. Bremen: Hochschule Bremen. <https://doi.org/10.2314/KXP:1813386080>
- Gusovius, H. J. & Müssig, J. (1998). Der Einfluß von Ernteverfahren und Feldliegezeit auf die Faserqualität von Hanf. *Stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe: 5. internationale Tagung, 28.10. - 29.10.1998 in Chemnitz; Tagungsband* (S. 39–47). Chemnitz.
- Gusovius, H.-J., Prochnow, A., Hanh, J. & Müssig, J. (1999). Faserqualität von Hanf. *Landtechnik*, 54(4), 230–231.
- Hammerl, M., Stoiber, N., Hämmerle, J., Shams, A., Bischoff, T. & Kromoser, B. (2021). Verbundverhalten umwickelter CFK-Stäbe in Beton – Kurzzeituntersuchung der Verbundeigenschaften mittels Pull-out-Tests. *Beton- und Stahlbetonbau*, 116(12), 935–946. <https://doi.org/10.1002/best.202100079>
- Hanf, C. H. & Drescher, K. (Hrsg.). (1996). *Hanf. Wissenschaftliche Untersuchung zum Thema Anbau, Ernte und Aufbereitung sowie Verwendung von Hanf, Teil 1* (Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe) (Band 7). Münster: Landwirtschaftsverlag.
- Hanf, C. H. & Drescher, K. (Hrsg.). (1997). *Hanf. Wissenschaftliche Untersuchung zum Thema Anbau, Ernte und Aufbereitung sowie Verwendung von Hanf, Teil 2* (Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe) (Band 7). Münster: Landwirtschaftsverlag;
- Hebel, D., Javadian, A. & Heise, F. (2013). Engineering Bamboo: The new composite Reinforcement. *1st Annual International Conference on Architecture and Civil Engineering (ACE 2013)*. Global Science & Technology Forum (GSTF). https://doi.org/10.5176/2301-394x_ace13.26
- Herer, J. (2022). *Die Wiederentdeckung der Nutzpflanze Hanf, Cannabis Marihuana*. (M. Bröckers & Katalyse Institut, Hrsg.) (45. Auflage.). CH - Solothurn: Nachtschatten Verlag.
- Heuser, O., König, P., Wagner, O., v. Frank, G., Oertel, H. & Oertel, Fr. (1927). *Hanf und Hartfasern* (Technologie der Textilfasern,). (O. Herzog, Hrsg.). Berlin, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-91015-9>
- Hofmann, S., Proske, T. & Graubner, C.-A. (2020). Verbundverhalten besandeter basaltfaserverstärkter Kunststoffbewehrung. *Beton- und Stahlbetonbau*, 115(7), 514–522. <https://doi.org/10.1002/best.201900076>
- Icha, P. & Lauf, T. (2024). *Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2023*. Nr. 23. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/23_2024_cc_strommix_11_2024.pdf
- Institut für Tragkonstruktion und konstruktives Entwerfen (Universität Stuttgart). (2025). Eröffnung der Smart Circular Bridge von BioMat in Ulm - News - 07.02.2025. Zugriff am 15.1.2025. Verfügbar unter: <https://www.itke.uni-stuttgart.de/de/institut/aktuelles/Eröffnung-der-Smart-Circular-Bridge-von-BioMat-in-Ulm/>
- Javadian, A., Smith, I. F. C. & Hebel, D. E. (2020). Application of Sustainable Bamboo-Based Composite Reinforcement in Structural-Concrete Beams: Design and Evaluation. *Materials*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/ma13030696>
- Javadian, A., Wielopolski, M., Smith, I. F. C. & Hebel, D. E. (2016). Bond-behavior study of newly developed bamboo-composite reinforcement in concrete. *Construction and Building Materials*, 122, 110–117. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.084>

- Jin, F.-L., Li, X. & Park, S.-J. (2015). Synthesis and application of epoxy resins: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 29, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.03.026>
- Kepp, B. (1985). *Zum Tragverhalten von Verankerungen für hochfeste Stäbe aus Glasfaserverbundwerkstoff als Bewehrung im Spannbetonbau*. Braunschweig: Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, IBMB der Technische Universität Braunschweig, Materialprüfanstalt für das Bauwesen - MPA Braunschweig. Zugriff am 17.2.2025. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.24355/dbbs.084-201608261032-0>
- Khalina, M., Beheshty, M. H. & Salimi, A. (2019). The effect of reactive diluent on mechanical properties and microstructure of epoxy resins. *Polymer Bulletin*, 76(8), 3905–3927. <https://doi.org/10.1007/s00289-018-2577-6>
- Kickelbick, G. (2008). *Chemie für Ingenieure*. Pearson Studium, München.
- Kohler, R. & Kessler, R. (1998). Faseraufbereitung und Qualitätskriterien von Naturfasern für Verbundwerkstoffe. *Stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe: 5. internationale Tagung, 28.10. - 29.10.1998 in Chemnitz; Tagungsband* (S. 51–60). Chemnitz.
- Körber-Grohne, U. (1987). *Nutzpflanzen in Deutschland*. Stuttgart: Theiss.
- Kumar, R. N. & Parthipan, G. (2023). Optimization of reinforcement characteristics on eco-friendly polymer composite rebar building material developed using domestically discarded vegetable waste biochar and areca chopped fiber. *Biomass Conversion and Biorefinery: Processing of Biogenic Material for Energy and Chemistry*, 1–9. Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04775-9>
- Kurda, R., Ali, B., Azab, M., Ahmed, H., El Ouni, M. H. & Elhag, A. B. (2022). Investigation of physical, strength, and ductility characteristics of concrete reinforced with banana (*Musaceae*) stem fiber. *Journal of Building Engineering*, 61, 105024. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105024>
- Küster, H., Keefer, E., Krausse, D., & Landesdenkmalamt Baden-Württemberg (Hrsg.). (1985). *Hochdorf 1 Neolithische Pflanzenreste aus Hochdorf, Gemeinde Eberdingen (Kreis Ludwigsburg)* (Forschungen und Berichte zur Vor- und Frühgeschichte in Baden-Württemberg) (1. Auflage, Band 1). Stuttgart: Theiss.
- Li, Z., Wang, X. & Wang, L. (2006). Properties of hemp fibre reinforced concrete composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(3), 497–505. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.01.032>
- Linger, P., Müssig, J., Fischer, H. & Kobert, J. (2002). Industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) growing on heavy metal contaminated soil: fibre quality and phytoremediation potential. *Industrial Crops and Products*, 16(1), 33–42. [https://doi.org/10.1016/S0926-6690\(02\)00005-5](https://doi.org/10.1016/S0926-6690(02)00005-5)
- Longuet, P., Burglen, L. & Zelwer, A. (1973). *La phase liquide de ciment hydraté*. Paris: Centre d'Etudes et de Recherches de l'Industrie des Liants Hydrauliques.
- Milieurelevante Productinformatie (MRPI). (2021a). Process Data set: Basalt Fibre Reinforced Polymer Rebar, 10mm (en). EPD, Russia: MRPI. Zugriff am 7.2.2025. Verfügbar unter: <https://data.mrpi.nl/datasetdetail/process.xhtml?uuid=c28dea00-549e-4aff-a90b-85e515d4c883&version=06.01.003&stock=PUBLIC&lang=en>
- Milieurelevante Productinformatie (MRPI). (2021b). Process Data set: Basalt Fibre Reinforced Polymer Rebar, 10mm (en). EPD, Tschechien: MRPI. Zugriff am 7.2.2025. Verfügbar unter: <https://data.mrpi.nl/datasetdetail/process.xhtml?uuid=314e2efc-fd00-4e52-ab8e-1eec647bb349&version=10.00.003&stock=PUBLIC&lang=en>
- Morgan, D., Zhang, L. & Pildysh, M. (2017). *New Hemp-Based Fiber Enhances Wet-Mix Shotcrete Performance*. American Shotcrete Association. Zugriff am 23.10.2023. Verfügbar unter: https://shotcrete.org/wp-content/uploads/2020/05/2017Spr_Morgan.pdf
- Mostafa, M., Elbehiry, A., Elnawawy, O., Kassem, M., Zaher, A. & Uddin, N. (2020). Performance of concrete beams reinforced using banana fiber bars. *Case Studies in Construction Materials*, 13(e00361). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00361>

- Murtiadi, S. & Akmaluddin, A. (2016). Sisal Fiber as Steel Bar Replacement of Lightweight Concrete under Flexural Loading. *Applied Mechanics and Materials*, 845, 202–207. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.845.202>
- Muruges Babu, K. & Chandrasekhara, S. M. (2023). *Bamboo Fibres Processing, Properties and Applications* (The Textile Institute Book Series). Cambridge: Woodhead Publishing. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85782-6.00008-8>
- Müssig, J. (2024). Begriffe und Definitionen. In B. Plinke, S. Fischer, H. Fischer, N. Graupner & J. Müssig (Hrsg.), *Charakterisierung von Holz- und Naturfasern: Eine praxisbezogene Einführung für die Werkstoffentwicklung* (S. 1–21). Weinheim: WILEY-VCH. Verfügbar unter: <https://www.doi.org/10.1002/9783527804191>
- NEPD-2084-939-EN. (2020). Environmental Product Declaration Rebars Baltic Region. EPD, The Norwegian EPD Foundation. Zugriff am 10.2.2025. Verfügbar unter: <https://epdnorway.lca-data.com/datasetdetail/process.xhtml?uuid=2d8f36d2-b02b-4f8c-9bde-b90c5d566eaf&version=00.03.001&stock=PUBLIC&lang=en>
- NEPD-2193-988-EN. (2020). Environmental Product Declaration Rebar. EPD, Norway: The Norwegian EPD Foundation. Zugriff am 10.2.2025. Verfügbar unter: <https://epdnorway.lca-data.com/datasetdetail/process.xhtml?uuid=9e31336f-dbfa-4066-a975-498e588ac4e2&version=00.03.001&stock=PUBLIC&lang=en>
- Ofuyatan, O., Olowofoyeku, A., Adaramaja, G., Oluwafemi, J. & Edeki, S. (2020). Potential use of coconut stem as reinforcement in concrete slab. *Case Studies in Construction Materials*, 13(e00355). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00355>
- Penzel, P., Abdkader, A., Friese, D., Overberg, M., Hahn, L., Butler, M., Mechtcherine, V. & Cherif, C. (2023). Improved Tensile and Bond Properties through Novel Rod Constructions Based on the Braiding Technique for Non-Metallic Concrete Reinforcements. *Materials*, 16(6), 2459. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/ma16062459>
- Pritschow, A. (2016). *Zum Verbundverhalten von CFK-Bewehrungsstäben in Bauteilen aus ultrahochfestem Beton*. Dissertation. Zugriff am 26.10.2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.18419/opus-8800>
- Ramachandran, V. S., Paroli, R. M., Beaudoin, J. J. & Delgado, A. H. (2002). *Handbook of Thermal Analysis of Construction Materials*. Norwich, NY: Elsevier Science.
- Reichert, A. (2020). Zwrinen von Fäden, Schnüren und Seilen / Twining of Threads, Cords and Ropes (Archäologische Informationen aus Baden-Württemberg). In J. Banck-Burgess & L.-M. Rösch (Hrsg.), *Verknüpft und zugenäht! Bound and Stitched Up! Gräser, Bast, Rinde - Alleskönner der Steinzeit! / Grass, Bast, Bark - Stone Age All-Rounders* (Band 82, S. 70–75). Heidelberg: Propylaeum. Zugriff am 13.8.2024. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.11588/propylaeum.643>
- Rempel, S., Ricker, M. & Hegger, J. (2020). Biegebemessungsmodell mit einer geschlossenen und iterativen Lösung für Textilbetonbauteile. *Beton- und Stahlbetonbau*, 115(3), 218–230. <https://doi.org/10.1002/best.201900086>
- Ricker, M., Zecherle, K., Kuhn, S., Binde, J., Haxter, C., Winkelmann, J., Freitag, L. & Hörmann, K. (2023). *Untersuchung nachhaltiger Bewehrungen aus Naturfasern für Textilbetonbauteile (Laborphase)*. Biberach: Hochschule Biberach, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Fraunhofer Institut für Holzforschung, Fabrino GmbH & Co KG. Zugriff am 11.3.2024. Verfügbar unter: <https://www.dbu.de/projektdatenbank/35830-01/>
- RILEM. (1994). RC6 Bond test for reinforcement steel. 2. Pull-out test. *RILEM Technical Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials* (S. 218–219). New York: Taylor & Francis.

- Rinklebe, J. & Richter, S. (2019). *Anbau von Hanf (Cannabis sativa L.) als Winterzwischenfrucht*. Endbericht. Wuppertal: Bergische Universität Wuppertal. Zugriff am 22.7.2024. Verfügbar unter: <https://www.fnr.de/index.php?id=11150&fkz=22015811>
- Schnegelsberg, G. (1999). *Handbuch der Faser - Theorie und Systematik der Faser* (Band 1). Frankfurt am Main: Deutscher Fachverlag.
- Schneider, U., Horvath, J., König, G. & Dehn, F. (2001). Materialverhalten von ultrahochfesten Betonen (UHPC). *Beton- und Stahlbetonbau*, 96(7), 468–477. <https://doi.org/10.1002/best.200100560>
- Schöberl, V., Grieb, M. & Fritz, M. (2020). *TFZ-Bericht 68: Hanf zur stofflichen Nutzung - Stand und Entwicklung*. 68. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe. Verfügbar unter: https://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/rohstoffpflanzen/dateien/tfz_bericht_68_hanfstoff_bfrei_ges.pdf
- Scrivener, K. L., John, V. M. & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
- S-P-00253. (2024). Environmental Product Declaration steel deformed bars for concrete reinforcement. EPD, Italy: The International EPD System. Zugriff am 10.2.2025. Verfügbar unter: <https://www.environdec.com/library/epd253>
- S-P-01234. (2023). Environmental Product Declaration Steel Rebar G42, G52 or A706. EPD, Mexico: The International EPD System. Zugriff am 10.2.2025. Verfügbar unter: <https://www.environdec.com/library/epd1234>
- S-P-01235. (2024). Environmental Product Declaration Steel rebar and spooled rebar manufactured from steel scrap. EPD, Mexico: The International EPD System. Zugriff am 10.2.2025. Verfügbar unter: <https://www.environdec.com/library/epd1235>
- S-P-01661. (2024). Environmental Product Declaration Steel rebar manufactured from steel scrap. EPD, Mexico: The International EPD System. Zugriff am 10.2.2025. Verfügbar unter: <https://www.environdec.com/library/epd1661>
- S-P-01944. (2020). Environmental Product Declaration reinforcement steel products. EPD, Lithuania: The International EPD System. Zugriff am 10.2.2025. Verfügbar unter: <https://www.environdec.com/library/epd1944>
- S-P-02388. (2024). Environmental Product Declaration Fabricated steel reinforcement products (cut and bent rebar). EPD, United Kingdom: The International EPD System. Zugriff am 10.2.2025. Verfügbar unter: <https://www.environdec.com/library/epd2388>
- S-P-02630. (2024). Environmental Product Declaration steel reinforcement bar. EPD, Sweden: The International EPD System. Zugriff am 10.2.2025. Verfügbar unter: <https://www.environdec.com/library/epd2630>
- S-P-03902. (2021). Environmental Product Declaration Stainless Steel Reinforcing Rebar. EPD, Spain: The International EPD System. Zugriff am 10.2.2025. Verfügbar unter: <https://www.environdec.com/library/epd3902>
- S-P-04160. (2023). Environmental Product Declaration Steel Rebars. EPD, Lithuania: The International EPD System. Zugriff am 10.2.2025. Verfügbar unter: <https://www.environdec.com/library/epd4160>
- S-P-04809. (2022). Environmental Product Declaration Rebar Mill. EPD, Turkey: The International EPD System. Zugriff am 10.2.2025. Verfügbar unter: <https://www.environdec.com/library/epd4809>
- S-P-05018. (2022). Environmental Product Declaration Steel Rebar. EPD, India: The International EPD System. Zugriff am 10.2.2025. Verfügbar unter: <https://www.environdec.com/library/epd5018>
- S-P-09225. (2023). Environmental Product Declaration Steel rebar. EPD, India: The International EPD System. Zugriff am 10.2.2025. Verfügbar unter: <https://www.environdec.com/library/epd9225>

- S-P-10576. (2023). Environmental Product Declaration Hot-rolled rebar. EPD, Denmark: The International EPD System. Zugriff am 10.2.2025. Verfügbar unter: <https://www.environdec.com/library/epd10576>
- S-P-11616. (2023). Environmental Product Declaration Green steel rebars from (steel proceeding from an electric arc furnace using 100% renewable energy). EPD, Lithuania: The International EPD System. Zugriff am 10.2.2025. Verfügbar unter: <https://www.environdec.com/library/epd11616>
- S-P-11714. (2024). Environmental Product Declaration Hot rolled rebar - Laminés Marchands Européens SAS - Trith Saint Leger. EPD, Italy. Zugriff am 10.2.2025. Verfügbar unter: <https://www.environdec.com/library/epd11714>
- S-P-11960. (2024). Environmental Product Declaration steel reinforcement products. EPD, Latvia: The International EPD System. Zugriff am 10.2.2025. Verfügbar unter: <https://www.environdec.com/library/epd11960>
- S-P-12057. (2024). Environmental Product Declaration TMT Rebar - ARS Fe 550D. EPD, India: The International EPD System. Zugriff am 10.2.2025. Verfügbar unter: <https://www.environdec.com/library/epd13773>
- S-P-12333. (2024). Environmental Product Declaration Stainless steel cold drawn bar & rebar. EPD, United Kingdom: The International EPD System. Zugriff am 10.2.2025. Verfügbar unter: <https://www.environdec.com/library/epd12333>
- S-P-13773. (2024). Environmental Product Declaration Rebar. EPD, Vietnam: The International EPD System. Zugriff am 10.2.2025. Verfügbar unter: <https://www.environdec.com/library/epd13773>
- 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). *Composites Part C: Open Access*, 14, 100492. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2024.100492>
- Suppanz, F. & Kromoser, B. (2020). Verbundverhalten subtraktiv bearbeiteter CFK-Stäbe in UHPC. *Beton- und Stahlbetonbau*, 115(7), 504–513. <https://doi.org/10.1002/best.201900088>
- Technische Universität Chemnitz-Zwickau, Institut für Allgemeinen Maschinenbau und Kunststofftechnik (Hrsg.). (1998). *Stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe : 5. internationale Tagung, 28.10. - 29.10.1998 in Chemnitz ; Tagungsband* (Schriftenreihe Strukturleichtbau) (Band 1). Chemnitz. Verfügbar unter: <https://www.tib.u/de/suchen/id/TIBKAT%3A269255699>
- Teufel, J., López, V., Moch, K. & Gascón, L. (2024). *Ökologische Bewertung textiler Fasern - von „klassischen“ Fasern über Recyclingfasern bis hin zu innovativen und wiederentdeckten Fasern*. Nr. 117/2024. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Zugriff am 18.9.2024. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/oekologische-bewertung-textiler-fasern-von>
- Thienel, K.-C., Scherb, S., Beuntner, N., Maier, M. & Sposito, R. (2023). 1:1 or 2:1 - Does it matter for calcined clay as supplementary cementitious material? (Dr.-Ing. Dirk Jesse, Hrsg.) *ce/papers*, 6(6), 363–372. <https://doi.org/10.1002/cepa.2775>
- Tolga Cogurcu, M. (2022). Investigation of mechanical properties of red pine needle fiber reinforced self-compacting ultra high performance concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00970. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00970>
- Tubach, M. & Nebel, K. (1997). Technologie der Hanfverarbeitung und die Bedeutung der Produktqualität für die Hanfverwertung. In C.H. Hanf & K. Drescher (Hrsg.), *Hanf. Wissenschaftliche Untersuchung zum Thema Anbau, Ernte und Aufbereitung sowie Verwendung von Hanf, Teil 2* (S. 301–492). Münster: Landwirtschaftsverlag.
- Verein Deutscher Zementwerke e.V (Hrsg.). (2008). *Zement Taschenbuch* (51. Ausgabe.). Düsseldorf: Verlag Bau+Technik.
- Wesche, K. (1988). *Baustoffe für tragende Bauteile - Band 4: Holz und Kunststoffe (Organische Stoffe): Herstellung, Eigenschaften, Verwendung, Dauerhaftigkeit* (2., Bände 1-4, Band 4). Wiesbaden: Bauverlag.

- Yuan, Q., Wang, Z., Yao, H., Huang, J., Zuo, S. & Huang, H. (2023). Comparative study of reactive diluents with different molecular structures on the curing properties of epoxy adhesives and the interface bonding properties with mortar. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 126, 103473. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2023.103473>
- Zecherle, K., Ricker, M., Binde, J., Winkelmann, J. & Haxter, C. (2023). Zugtragverhalten von Betonbauteilen mit getränkter Textilbewehrung aus Flachsfasern. *Beton- und Stahlbetonbau*, 118(1), 25–35. <https://doi.org/10.1002/best.202200088>
- Zintel, M., Angst, U., Keßler, S. & Gehlen, C. (2014). Epoxidharzbeschichtete Bewehrung. *Beton- und Stahlbetonbau*, 109(1), 3–14. <https://doi.org/10.1002/best.201300066>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 – Kriterien für zukünftiges Bauen mit Beton.....	12
Abbildung 2 – Übersicht zum Projektablauf „BasEcoCrete“.....	14
Abbildung 3 – Hanfstroh der Probe Hanf1 (links) und Halbzeug der Probe Hanf2 (rechts)	17
Abbildung 4 – Exemplarische Auswertung Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Faserzugversuche mit definierten Positionen der Regressionsgeraden zur Bestimmung des E-Moduls.....	20
Abbildung 5 – Zugprobe des Typs 5a gem. DIN EN ISO 527-2 (nicht maßstäblich). 22	
Abbildung 6 – 3D-Zeichnung einer angefertigten Schalung für Zugprobekörper des Typs 5a gem. DIN EN ISO 527-2 (2012)	22
Abbildung 7 – Für Zugversuch eingebaute und instrumentierte Epoxidharz-Probe..	23
Abbildung 8 – Schematische Darstellung aufgeklebter Messinghülsen an den Stabenden der Hanfbastbewehrungsstäbe.....	24
Abbildung 9 – Vorbereitete Proben für die Zugversuche der Hanfbastbewehrungsstäbe mit beidseitig geklebten Einspannhülsen.....	25
Abbildung 10 – profilierte Hanfbastbewehrungsstäbe mit sechs Millimeter Durchmesser (von oben nach unten: „besandet + umwickelt“, „umwickelt“, „grob besandet“, „fein besandet“)..	27
Abbildung 11 – Abmessungen der Prüfkörper und der Verbundlänge der durchgeführten Verbundversuche.....	28
Abbildung 12 – Darstellung der Referenzbewehrung Betonstahl und der profilierten Hanfbastbewehrungsstäbe und den korrespondierenden Oberflächen der 3D-Scans (schematisch)	29
Abbildung 13 – Zusammensetzung der Bindemittel	32
Abbildung 14 – Demonstrative Darstellung eines Balkens und der Entnahmestellen von Feuchtproben.....	34
Abbildung 15 – profilierte Bewehrungsstäbe der Balkendemonstratoren (links: Stäbe mit „Umwicklung“, rechts: „besandete“ Stäbe).....	35
Abbildung 16 – Abmessungen der Biegebalken mit zugehörigem Speckle Muster für das optische Messsystem.....	36
Abbildung 17 – Schematische Darstellung des Versuchsaufbau Biegebalken mit Abstand der Auflager und Angabe der Krafteinleitung	36
Abbildung 18 – Weichauflage zur Krafteinleitung der Prüfmaschine	37

Abbildung 19 – Verteilung Reindichte mit Angabe des Medians, des 5 % und 95 % Quantils und der Ausreißer	37
Abbildung 20 – Histogramm zur Verteilung der Zugfestigkeit mit horizontalem Boxplot	38
Abbildung 21 – Box-Plot der Zugfestigkeit mit Verteilung der Datenpunkte sowie Angabe der 5 und 95 % Quantile, des Mittelwerts und des Medians.....	39
Abbildung 22 – Histogramm zur Verteilung des E-Moduls mit horizontalem Boxplot	40
Abbildung 23 – Box-Plot des E-Moduls mit Verteilung der Datenpunkte sowie Angabe der 5 und 95 % Quantile, des Mittelwerts und des Medians	40
Abbildung 24 – Verteilung des Stabdurchmesser der Hanfbastbewehrungsstäbe mit Angabe der Ausreißer, des 5 % und 95 % Quantils, des Mittelwertes und Medians.	42
Abbildung 25 – Exemplarische Auswertung der Stäbe anhand der Kraft-Weg-Diagramme (links) und der korrespondierenden Spannungs-Dehnungs-Diagramme (rechts).	43
Abbildung 26 – Versagte Zugprobe eines Hanfbastbewehrungsstabes	43
Abbildung 27 – Verteilung des E-Moduls der Hanfbastbewehrungsstäbe mit Angabe der Ausreißer, des 5 % und 95 % Quantils, des Mittelwertes und Medians	44
Abbildung 28 – Verteilung der Zugfestigkeit der Hanfbastbewehrungsstäbe mit Angabe der Ausreißer, des 5 % und 95 % Quantils, des Mittelwertes und Medians	44
Abbildung 29 – Versuchsaufbau Auszugversuche	46
Abbildung 30 – Iotrecht zur Bewehrung verlaufender Riss in Probekörper P8 mit „grob besandetem“ Hanfbastbewehrungsstab	47
Abbildung 31 – Verteilung der Verbundspannung T_{bm} nach Referenzbewehrung und Profilierungsart mit Darstellung des Medians und Mittelwerts	48
Abbildung 32 – Zeitlicher Verlauf der Hydratationswärme-Entwicklung der Bindemittel BM1, BM2 und BM3 in den ersten 48 Stunden.....	49
Abbildung 33 – Zeitlicher Verlauf des Wärmeflusses der Bindemittel BM1, BM2 und BM3 in den ersten 48 Stunden	49
Abbildung 34 – Ergebnisse der Prüfungen an Mörtelprismen nach DIN EN 196-1 (2016) nach 2 und 28 Tagen, Diagramm links: Ergebnisse der Druckfestigkeiten / Diagramm rechts: Ergebnisse der Biegezugfestigkeiten	50
Abbildung 35 – Ergebnisse der chemischen Analyse der Porenflüssigkeiten (linke y-Achse) und der pH-Werte (rechte x-Achse).....	50
Abbildung 36 – $Ca(OH)_2$ -Gehalt in den Bindemitteln BM1, BM2 und BM3	51

Abbildung 37 – Frühschwinden des ÖkoLB ohne Fasern als Referenz sowie mit Kunststofffasern und mit Hanfbastfasern.....	53
Abbildung 38 – Massebezogener und volumenbezogener Feuchtegehalt in der Mitte und am Rand der Betonbalken aus ÖkoB1, ÖkoB2 und ÖkoLB.....	55
Abbildung 39 – Zugfestigkeiten der Epoxidharze ER_BIO30 und ER_FH nach 28, 100 und 178 Tagen Alkalilagerung.....	57
Abbildung 40 – Zugfestigkeiten der Epoxidharze ER_HTG_1 und ER_HTG_2 nach 28, 100 und 178 Tagen Alkalilagerung.....	57
Abbildung 41 – E-Moduln der Epoxidharze ER_BIO30 und ER_FH nach 28, 100 und 178 Tagen Alkalilagerung.....	58
Abbildung 42 – E-Moduln der Epoxidharze ER_HTG_1 und ER_HTG_2 nach 28, 100 und 178 Tagen Alkalilagerung.....	58
<i>Abbildung 43 – Massenänderung der Epoxidharze nach 28 Tagen und 100 Tagen in NaOH-Lösungen mit pH13</i>	<i>59</i>
Abbildung 44 – Zeitlicher Verlauf des Masseverlustes der Hanfbastfaser Hanf1 und Hanf2 bei alkalischer Einlagerung	60
Abbildung 45 – Zugfestigkeitswerte an Hanfbastfasern aus Hanf1 nach Einlagerung in NaOH-Lösungen mit pH11 und pH13 nach 100 Tagen und 180 Tagen	60
Abbildung 46 – Zugfestigkeitswerte an Hanfbastfasern aus Hanf2 nach Einlagerung in NaOH-Lösungen mit pH11 und pH13 nach 100 Tagen und 180 Tagen	60
Abbildung 47 – Aufnahme der Hanfbastfasern mit dem Rasterelektronenmikroskop, Hanf1, Lagerung in pH13 für 100 Tage, Vergrößerung: 100x	61
Abbildung 48 – Aufnahme der Hanfbastfasern mit dem Rasterelektronenmikroskop, Hanf1, keine alkalische Lagerung, Vergrößerung: 100x	61
Abbildung 49 – Aufnahme der Hanfbastfasern mit dem Rasterelektronenmikroskop, Hanf2, Lagerung in pH13 für 100 Tage, Vergrößerung: 100x	61
Abbildung 50 – Aufnahme der Hanfbastfasern mit dem Rasterelektronenmikroskop, Hanf2, keine alkalische Lagerung, Vergrößerung: 100x	61
Abbildung 51 – vorbereitete Schalung der Probekörper ÖkoB2 mit Proben B4 „umwickeltem“ Hanfbastbewehrungsstab (links), B5 „besandetem“ Hanfbastbewehrungsstab (rechts) und B6 Ø 6 mm Betonstahl Referenz (mittig) Probekörper ÖkoB1 Proben B1 bis B3 analog	63

Abbildung 52 – vorbereitete Schalung der Probekörper aus ÖkoLB mit Proben B7-B9 Hanfbastbewehrungsstäbe „umwickelt“ (links), B10-B12 Hanfbastbewehrungsstäbe „besandet“ (mittig) und B13-B15 Ø6 mm Betonstahl Referenz (rechts)	64
Abbildung 53 – Vorderseite ① des vorgeschädigter Probekörper B7 mit Rissweite von 0,3 mm, Rückseite ②, eingespannt in Prüfmaschine ③ mit Markierung Erstriss und zugehöriger Kraft sowie Vorderseite nach erfolgter Prüfung④.....	65
Abbildung 54 –Rissentwicklung (schematisch) der Istra4D Auswertung in Probekörper B2 („besandete“ Hanfbastbewehrung ÖkoB1) mit initial- und fortlaufenden Rissen zwei, drei und vier bis Versuchsende und farblicher Darstellung der effektiven Dehnung im Regenbogenfarbverlauf (lila 0 bis rot 850/ max. 1200)	66
Abbildung 55 –Visualisierung und Auswertung in Istra4D (schematisch) des Probekörper B4 zum Zeitpunkt des ersten Risses (Bild oben), gebrochener Probekörper (Bild mitte) und Ansicht der zugehörigen Bruchflächen (Bild unten). ...	67
Abbildung 56 – Visualisierung und Auswertung in Istra4D (schematisch) des Bewehrungsversagens von Versuchskörper B8 (Bild oben) und Darstellung der Bruchflächen nach Versuchsende(Bild unten).....	68
Abbildung 57 – Balkendiagramm der 15 Biegeversuche mit Darstellung der Kräfte vor dem ersten Riss und Unterscheidung der verwendeten Bewehrung	69
Abbildung 58 – Biegezugfestigkeit der 15 Demonstratoren unter Variation der verwendeten Bewehrung	70
Abbildung 59 – Verteilung der Biegezugfestigkeit der ÖkoLB Biegebalken.....	71
Abbildung 60 – Exemplarische Risse entlang der Querschnitte B8, B10, B12 der hanfbewehrten ÖkoLB Biegebalken	71
Abbildung 61 – Flächenbezogenes Schwindmaß „besandeter“ und „umwickelter“ Hanfbastbewehrungsstäbe in ÖkoB1, ÖkoB2 und ÖkoLB nach 28 Tagen nach Herstellung und Ofentrocknung bei 105 °C. Balken setzen sich jeweils aus acht Einzelwerten zusammen.....	72
Abbildung 62 – MikroCT-Aufnahmen besandeter Hanfbastbewehrung im Beton (ÖkoB1), ① Betonprobe vor Ofentrocknung ② Betonprobe nach Ofentrocknung bei 105 °C ③ Betonprobe nach Ofentrocknung bei 105 °C mit ausgeblendeter Bewehrung ④ Luftmantel um Bewehrung nach Ofentrocknung bei 105 °C	74
Abbildung 63 – Spannungszustand Biegezugspannungen an den Stabenden der Einspannhülsen	78

Abbildung 64 – Spannungsanteil der Normalkraft sowie des Momentes der Biegezugspannung in Abhängigkeit des Imperfektionswinkels θ	79
Abbildung 65 – Einwirkung und Widerstand am Bauteil	80
Abbildung 66 – Berechnete Stabzugkraft angegeben je Bewehrungsstab der durchgeführten Biegeversuche.....	81
Abbildung 67 – abgelöste Betondeckung Biegebalken B12 bei Versuchsende	82
Abbildung 68 – Druckfestigkeit von Betonen in Abhängigkeit vom w/z-Wert. Grafik aus Literatur (Schneider, Horvath, König & Dehn, 2001, S. 468) nachgebildet und mit Ergebnissen aus Tabelle 8 und mit der Zielfestigkeit $f_{ck,Ziel}$ aus dem Betonkonzept ergänzt.....	87
Abbildung 69 – E-Module in Abhängigkeit vom w/z-Wert. gem. DIN EN 1992-1-1 (2011) mit $E_{cm}=22*(f_{cm}/10)^{0,3}$ aus (Schneider et al., 2001, S. 468) abgeleitet und mit Ergebnissen aus Tabelle 8 und des rechnerisch zu erwartenden E-Moduls E_{Ziel} ergänzt	87
Abbildung 70 – Darstellung der zu erwartenden Biegezugfestigkeit eines Normalbetons in Abhängigkeit von der Betondruckfestigkeit f_{ck} nach DIN EN 1992-1-1 (2011) und Vergleich mit den Ergebnissen der Biegezugfestigkeit von ÖkoB1 und ÖkoB2 aus Tabelle 8.....	88
Abbildung 71 – Tatsächlicher und theoretischer Feuchtegehalt von Ökobetonen in Bauteilmitte von Betonbalken	90
Abbildung 72 – Fasernest in der Bruchfläche eines Ökobetons	91
Abbildung 73 – GWP unterschiedlicher Bewehrungstypen für einen Referenzstab \emptyset 10 mm und Stablänge 1 m mit Angabe der minimalen und maximal Literaturwerte für Betonstahl, Basalt, Carbon, Glasfaser und Hanfbastfasern.....	97
Abbildung 74 – Einordnung des GWP der Öko Betone zu klassischen Betonen der Festigkeitsklasse C8/10 bis C50/60 sortiert nach der Betonfestigkeit	98
Abbildung 75 – Einordnung der leistungsbezogenen CO ₂ -Emissionen von ÖkoB1 und ÖkoB2 in literaturbekannte Angaben aus (Scrivener et al., 2018) mit Betonen mit klinkerreduzierten Bindemitteln.....	99
Abbildung E 1 – Infrarotspektren von Harzen von ER_BIO30, ER_FH, ER_HTG_1, ER_HTG_2.....	133
Abbildung E 2 – Infrarotspektren der Härter von ER_BIO30, ER_FH, ER_HTG_1, ER_HTG_2.....	134

Abbildung E 3 – Infrarotspektren der ausgehärteten Epoxidharzproben von ER_BIO30.
Diagramm oben zeigt IR-Spektrum einer Referenzprobe, Diagramm unten zeigt IR-
Spektrum einer für 100 Tage in pH 13 gelagerten Probe..... 134

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 – Überblick und Beschreibung der Hanfbastfaser Chargen	17
Tabelle 2 – Übersicht zu den Eigenschaften der Epoxidharze.....	22
Tabelle 3 – Betonkonzepte und daraus ableitende Anforderungen an Bindemittel ...	31
Tabelle 4 – Betonzusammensetzung der drei konzipierten Betone ÖkoB1, ÖkoB2, ÖkoLB.....	33
Tabelle 5 – Versuchsprogramm am Frisch- und Festbeton.....	34
Tabelle 6 – Mechanische Eigenschaften der untersuchten Faserbündel Hanf 1 (56 gültige Zugversuche)	41
Tabelle 7 – Durchmesser und mechanische Eigenschaften der Hanfbastbewehrungsstäbe (8 Probekörper)	45
Tabelle 8 – Gegenüberstellung der Materialparameter $f_{c,cube}$, $f_{c,cyl}$, $f_{ct,fl}$, E-Modul und Rohdichte (für ÖkoB1, B2) sowie Trockenrohddichte $\rho_{d,28d}$ für ÖkoLB mit 0,1 Vol.-% Hanffasern und ohne Hanffasern.....	52
Tabelle 9 – Frischbetoneigenschaften der Ökobetone.....	52
Tabelle 10 – Zusammenfassung der Ergebnisse der Schwindverformungen nach 72h	53
Tabelle 11 – Ermittlung des volumenbezogenen Feuchtegehalts F_v aus Trockenrohddichte ρ_d und massenbezogenen Feuchtegehalt F_m	54
Tabelle 12 – Übersicht der Probekörper mit zugehörigem Beton sowie Bewehrung und Profilierung	62
Tabelle 13 – Durchmesser der im Beton eingebauten Bewehrung zum Prüfzeitpunkt nach 28 Tagen nach Herstellung D_{wet} und Durchmesser nach Ofentrocknung bei 105 °C D_{dry} . Angaben für D_{wet} und D_{dry} sind Mittelwerte von je acht Einzelwerten.	73
Tabelle 14 – Übersicht der Zugkräfte: Auszugversuche – maximale Zugkraft zur Berechnung der Verbundspannung – und Biegebalkenversuche – errechnete Zugkraft nach Ingenieurmodell.	82
Tabelle 15 – Vergleich von Hydratationswärmern aus Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2008, S. 321) mit den Ergebnissen zu BM1, BM2 und BM3 nach jeweils 48 h	85
Tabelle A 1 – Reindichte für die Bestimmung der äquivalenten Querschnittswerte der durchgeführten Faserzugversuche	128

Tabelle B 1 – Ergebnisse der Auszugversuche der Bewehrungsstäbe	128
Tabelle C 1 – Geometrische Größen der Biegebalken, mit Angabe des Gewichtes, des verwendeten Stabdurchmessers und dem inneren Hebelarm d	129
Tabelle C 2 – Eingangswerte des Ingenieurmodells zur Ermittlung der Stabzugkräfte	130
Tabelle D 1 – Auflistung der CO ₂ -äquivalente (Phasen A1-A3) für ÖkoB1, ÖkoB2, ÖkoLB und der Referenzbetone C 8/10 bis C 50/60 mit Angabe der zugehörigen EPDs	131
Tabelle D 2 - CO ₂ -äquivalent für den Hanfbastbewehrungsstab mit Angabe der verwendeten EPDs	132
Tabelle D 3 – Übersicht Literaturwerte CO ₂ -äquivalent (Phasen A1-A3) unterschiedlichen Bewehrungsmaterialien	132

Anlagen

A. Faserzugversuch

Tabelle A 1 – Reindichte für die Bestimmung der äquivalenten Querschnittswerte der durchgeführten Faserzugversuche

Versuchsreihe	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7
Reindichte ρ [g/cm ³]	1,39	1,36	1,40	1,47	1,39	1,38	1,42
Standardabweichung: σ [%]	0,27	0,37	0,50	0,41	0,14	0,46	0,29

B. Auszugversuche

Tabelle B 1 – Ergebnisse der Auszugversuche der Bewehrungsstäbe

Probekörper	Bewehrung und Profilierung	Oberfläche [mm ²]	Maximale Kraft Auszugversuch [N]	Schlupf [mm]	Verbundspannung T_{bm} [MPa]
P01	Betonstahl gerippt	969,1	3453	0,021	3,56
P02	Betonstahl gerippt	980,6	3215	0,002	3,28
P03	Betonstahl gerippt	972,2	3266	0,066	3,36
P04	Hanfbastbewehrungsstab „fein besandet“	972,5	2715	0,005	2,79
P05	Hanfbastbewehrungsstab „fein besandet“	975,8	2843	0,003	2,91
P06	Hanfbastbewehrungsstab „fein besandet“	1144,3	3120	0,010	2,73
P07	Hanfbastbewehrungsstab „grob besandet“	1166,0	3674	0,004	3,15
P08	Hanfbastbewehrungsstab „grob besandet“	1242,5	3900	0,017	3,14
P09	Hanfbastbewehrungsstab „grob besandet“	1096,7	2442	0,024	2,23
P10	Hanfbastbewehrungsstab „umwickelt“	1183,2	2111	0,051	1,78
P11	Hanfbastbewehrungsstab „umwickelt“	1119,6	3012	0,003	2,69
P12	Hanfbastbewehrungsstab „umwickelt“	1130,2	3692	0,008	3,27
P13	Hanfbastbewehrungsstab „besandet + umwickelt“	1312,9	1755	0,002	1,34
P14	Hanfbastbewehrungsstab „besandet + umwickelt“	1331,9	2219	0,048	1,67
P15	Hanfbastbewehrungsstab „besandet + umwickelt“	1408,5	3195	0,151	2,27

C. Biegebalken Demonstratoren

Tabelle C 1 – Geometrische Größen der Biegebalken, mit Angabe des Gewichtes, des verwendeten Stabdurchmessers und dem inneren Hebelarm d

Probekörper	Beton	Bewehrung und Profilierung	Faserbewehrung	Länge [mm]	Breite Mittelwert [mm]	Breite Median [mm]	Höhe Mittelwert [mm]	Höhe Median [mm]	Gewicht [kg]	Betondeckung c_{nom} [mm]	Stabdurchmesser [mm]	innerer Hebelarm d [mm]
B1	ÖkoB1	Hanfbastbewehrungsstab „umwickelt“	-	501,0	100,1	100,1	100,6	100,6	11,775	20	5,7	77,7
B2	ÖkoB1	Hanfbastbewehrungsstab „besandet“	-	500,0	100,1	100,1	100,4	100,4	11,848	20	5,7	77,6
B3	ÖkoB1	Betonstahl Ø6 gerippt (Referenz)	-	500,0	100,0	100,0	100,5	100,3	11,908	20	6,0	77,3
B4	OkoB2	Hanfbastbewehrungsstab „umwickelt“	-	501,0	100,4	100,4	100,2	100,0	11,891	20	5,7	77,2
B5	ÖkoB2	Hanfbastbewehrungsstab „besandet“	-	500,0	100,3	100,2	100,2	100,1	11,927	20	5,7	77,3
B6	ÖkoB2	Betonstahl Ø6 gerippt (Referenz)	-	500,0	100,0	100,0	100,0	100,0	12,060	20	6,0	77,0
B7	ÖkoLB	Hanfbastbewehrungsstab „umwickelt“	1 cm Hanfbastfasern	500,5	100,6	100,5	102,1	102,0	4,727	20	5,7	79,2
B8	ÖkoLB	Hanfbastbewehrungsstab „umwickelt“	1 cm Hanfbastfasern	500,8	100,2	100,2	101,0	101,0	4,651	20	5,7	78,2
B9	ÖkoLB	Hanfbastbewehrungsstab „umwickelt“	1 cm Hanfbastfasern	500,0	99,9	100,0	101,1	101,5	4,595	20	5,7	78,7
B10	ÖkoLB	Hanfbastbewehrungsstab „besandet“	1 cm Hanfbastfasern	500,5	100,0	100,0	101,9	101,5	4,670	20	5,7	78,7
B11	ÖkoLB	Hanfbastbewehrungsstab „besandet“	1 cm Hanfbastfasern	505,0	100,8	100,6	103,1	103,2	4,799	20	5,7	80,4
B12	ÖkoLB	Hanfbastbewehrungsstab „Besandet“	1 cm Hanfbastfasern	498,0	100,3	100,1	103,0	102,9	4,727	20	5,7	80,1
B13	ÖkoLB	Betonstahl Ø6 gerippt (Referenz)	1 cm Hanfbastfasern	500,0	100,9	101,0	101,2	101,4	4,893	20	6,0	78,4
B14	ÖkoLB	Betonstahl Ø6 gerippt (Referenz)	1 cm Hanfbastfasern	500,0	99,8	99,8	101,9	102,0	4,803	20	6,0	79,0
B15	ÖkoLB	Betonstahl Ø6 gerippt (Referenz)	1 cm Hanfbastfasern	500,0	100,4	100,3	101,4	101,4	4,858	20	6,0	78,4

Tabelle C 2 – Eingangswerte des Ingenieurmodells zur Ermittlung der Stabzugkräfte

Probekörper	Beton	E-Modul Beton [MPa]	E-Modul Bewehrung [MPa]	Fläche Bewehrungsstab [mm ²]	Breite Median [mm]	Höhe Median [mm]	Abstand Auflagerrollen [mm]	innerer Hebelarm d [mm]	Druckzonenhöhe x [mm]	Moment M _y [kNm]	Hebelarm der inneren Kräfte z [mm]	Stabzugkraft je Bewehrungsstab [kN]
B1	ÖkoB1	29.910	15.049	2 × 25,4 = 50,9	100,1	100,6	300	77,7	6,1	0,57	57,7	3,76
B2	ÖkoB1	29.910	15.049	2 × 25,4 = 50,9	100,1	100,4	300	77,6	6,0	0,73	57,5	4,82
B3	ÖkoB1	29.910	200.000	2 × 28,3 = 55,6	100,0	100,3	300	77,3	20,7	1,01	69,6	7,25
B4	ÖkoB2	31.440	15.049	2 × 25,4 = 50,9	100,4	100,0	300	77,2	5,9	0,94	75,2	6,25
B5	ÖkoB2	31.440	15.049	2 × 25,4 = 50,9	100,2	100,1	300	77,3	5,9	0,83	75,3	5,54
B6	ÖkoB2	31.440	200.000	2 × 28,3 = 55,6	100,0	100,0	300	77,0	20,2	1,12	70,3	7,98
B7	ÖkoLB	6.470	15.049	2 × 25,4 = 50,9	100,5	102,0	300	79,2	12,5	0,13	75,0	0,89
B8	ÖkoLB	6.470	15.049	2 × 25,4 = 50,9	100,2	101,0	300	78,2	12,5	0,20	74,0	1,37
B9	ÖkoLB	6.470	15.049	2 × 25,4 = 50,9	100,0	101,5	300	78,7	12,5	0,19	74,5	1,27
B10	ÖkoLB	6.470	15.049	2 × 25,4 = 50,9	100,0	101,5	300	78,7	12,5	0,19	74,5	1,29
B11	ÖkoLB	6.470	15.049	2 × 25,4 = 50,9	100,6	103,2	300	80,4	12,6	0,21	76,1	1,37
B12	ÖkoLB	6.470	15.049	2 × 25,4 = 50,9	100,1	102,9	300	80,1	12,6	0,14	75,8	0,90
B13	ÖkoLB	6.470	200.000	2 × 28,3 = 55,6	101,0	101,4	300	78,4	37,6	0,43	65,9	3,27
B14	ÖkoLB	6.470	200.000	2 × 28,3 = 55,6	99,8	102,0	300	79,0	37,9	0,39	66,4	2,91
B15	ÖkoLB	6.470	200.000	2 × 28,3 = 55,6	100,3	101,4	300	78,4	37,7	0,37	65,8	2,83

D. Ökobilanzierung

Tabelle D 1 – Auflistung der CO₂-äquivalente (Phasen A1-A3) für ÖkoB1, ÖkoB2, ÖkoLB und der Referenzbetone C 8/10 bis C 50/60 mit Angabe der zugehörigen EPDs

Beton	Material	CO ₂ A1-A3 [kg CO ₂ /m ³ Beton]	EPD-Quelle
ÖkoB1	Gesteinskörnung 0/4	2,4	(FSKB-2018-1-Ecoinvent, 2018)
	Gesteinskörnung 4/8	0,7	(FSKB-2018-1-Ecoinvent, 2018)
	CEM I 52,5 R (ft)	131,7	(EPD-VDZ-20220153-IA1-DE, 2022)
	Calciniertes Ton	32,4	(Thienel, Scherb, Beuntner, Maier & Sposito, 2023)
	Kalksteinmehl	0,4	(EPD-IES-0005739, 2023)
	Wasser	4,9	(Blume et al., 2020)
	Fließmittel	2,5	(EPD-DBE-20230566-IBG3-EN, 2024)
ÖkoB2	Gesteinskörnung 0/4	2,4	(FSKB-2018-1-Ecoinvent, 2018)
	Gesteinskörnung 4/8	0,7	(FSKB-2018-1-Ecoinvent, 2018)
	CEM III/B 42,5 N LH/SR (ft)	91,7	(EPD-HCG-20210008-CAA2-DE, 2021)
	Kalksteinmehl	0,2	(EPD-IES-0005739, 2023)
	Wasser	4,9	(Blume et al., 2020)
	Fließmittel	2,5	(EPD-DBE-20230566-IBG3-EN, 2024)
ÖkoLB	Leichte Gesteinskörnung: Blähglas Granulat 0-2	22,8	(Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB), 2018)
	Leichte Gesteinskörnung: Blähglas Granulat 2-4	17,2	(Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB), 2018)
	Blähton	61,0	(EPD-LIA-20230117-CCC1-EN, 2023)
	CEM III/B 42,5 N LH/SR (ft)	98,5	(EPD-HCG-20210008-CAA2-DE, 2021)
	Wasser	5,0	(Blume et al., 2020)
	Fließmittel	1,6	(EPD-IES-0005739, 2023)
	LP	1,0	(EPD-IES-0005739, 2023)
C 8/10	unbewehrter Beton	112	(EPD-IZB-20230417-IBA1-DE, 2023)
C 12/15	unbewehrter Beton	129	(EPD-IZB-20230418-IBA1-DE, 2023)
C 16/20	unbewehrter Beton	150	(EPD-IZB-20230419-IBA1-DE, 2023)
C 20/25	unbewehrter Beton	157	(EPD-IZB-20230420-IBA1-DE, 2023)
C 25/30	unbewehrter Beton	181	(EPD-IZB-20230421-IBA1-DE, 2023)
C 30/37	unbewehrter Beton	186	(EPD-IZB-20230328-IBG1-DE, 2023)
C 35/45	unbewehrter Beton	220	(EPD-IZB-20230422-IBA1-DE, 2023)
C 45/55	unbewehrter Beton	273	(EPD-IZB-20230423-IBA1-DE, 2023)
C 50/60	unbewehrter Beton	275	(EPD-IZB-20230424-IBA1-DE, 2023)

Tabelle D 2 - CO₂-äquivalent für den Hanfbastbewehrungsstab mit Angabe der verwendeten EPDs

Hanfbastbewehrung Stab Ø10 mm	Dichte [kg/m ³]	Anteil [%]	GWP [kg CO ₂ /t Material]	EPD-Quelle
Epoxidharz	1179	60	3800	(EPD-DBC-20220174-IBF1-EN, 2022)
Hanfbastfaser	1400	40	1600 -980 (inkl. biog. C) 420 (exkl. biog. C)	(González-García et al., 2010) (Albrecht et al., 2020) (Albrecht et al., 2020)

Tabelle D 3 – Übersicht Literaturwerte CO₂-äquivalent (Phasen A1-A3) unterschiedlichen Bewehrungsmaterialien

Bewehrungs- material Stab: Ø10 mm	GWP A1-A3 [kg CO ₂ / lfm]	Land	EPD-Quelle
Betonstahl	0,23 bis 0,54	Deutschland	(EPD-ARM-20210054-CBC1-EN, 2021) (EPD-IES-0018167, 2025)
	0,31 bis 0,49	Italien	EPD-ITALY-0776 2024) (S-P-00253, 2024) (S-P-11714, 2024)
	0,29	Schweden	(S-P-02630, 2024)
	0,61 bis 0,81	Norwegen	(NEPD-2084-939-EN, 2020) (NEPD-2193-988-EN, 2020)
	0,30 bis 0,34	Vereinigtes Königreich	(EPD-IES-0015614, 2024) (EPD-IES-0015618, 2024) (EPD-IES-0015620, 2024) (S-P-02388, 2024)
	0,36 bis 0,71	Litauen	(S-P-01944, 2020) (S-P-04160, 2023) (S-P-11616, 2023)
	0,25	Lettland	(S-P-11960, 2024)
	MIN 0,19 bis 0,42	Mexiko	(S-P-01234, 2023) (S-P-01235, 2024) (S-P-01661, 2024) (S-P-04809, 2022)
	0,94	Australien	(EPD-IES-0014125, 2026)
	0,46	Vietnam	(S-P-13773, 2024)
	1,33	China	(EPD-IES-0003562, 2024)
	0,52 bis MAX 1,68	Indien	(S-P-05018, 2022) (S-P-12057, 2024)
Edelstahl	MAX 3,10 MIN 1,70 1,65 2,14	Spanien Indien Dänemark Vereinigtes Königreich	(S-P-03902, 2021) (S-P-09225, 2023) (S-P-10576, 2023) (S-P-12333, 2024)
Basalt	MIN 0,44 MAX 0,50	Tschechische Republik Russland	(Milieurelevante Productinformatie (MRPI), 2021a) (Milieurelevante Productinformatie (MRPI), 2021b)
Glasfaser	0,47 0,39 0,35 0,54	Canada Saudi Arabien Deutschland USA	(EPD-S-P-03166, 2022) (EPD-S-P-12185, 2024) (EPD-SBG-20200240-IBA1-DE, 2021) (EPD International AB, 2021)
Hanfbast- bewehrung	0,20 bis 0,29	Deutschland	(EPD-DBC-20220174-IBF1-EN, 2022) (Albrecht et al., 2020) (González-García et al., 2010)

E. Epoxidharze

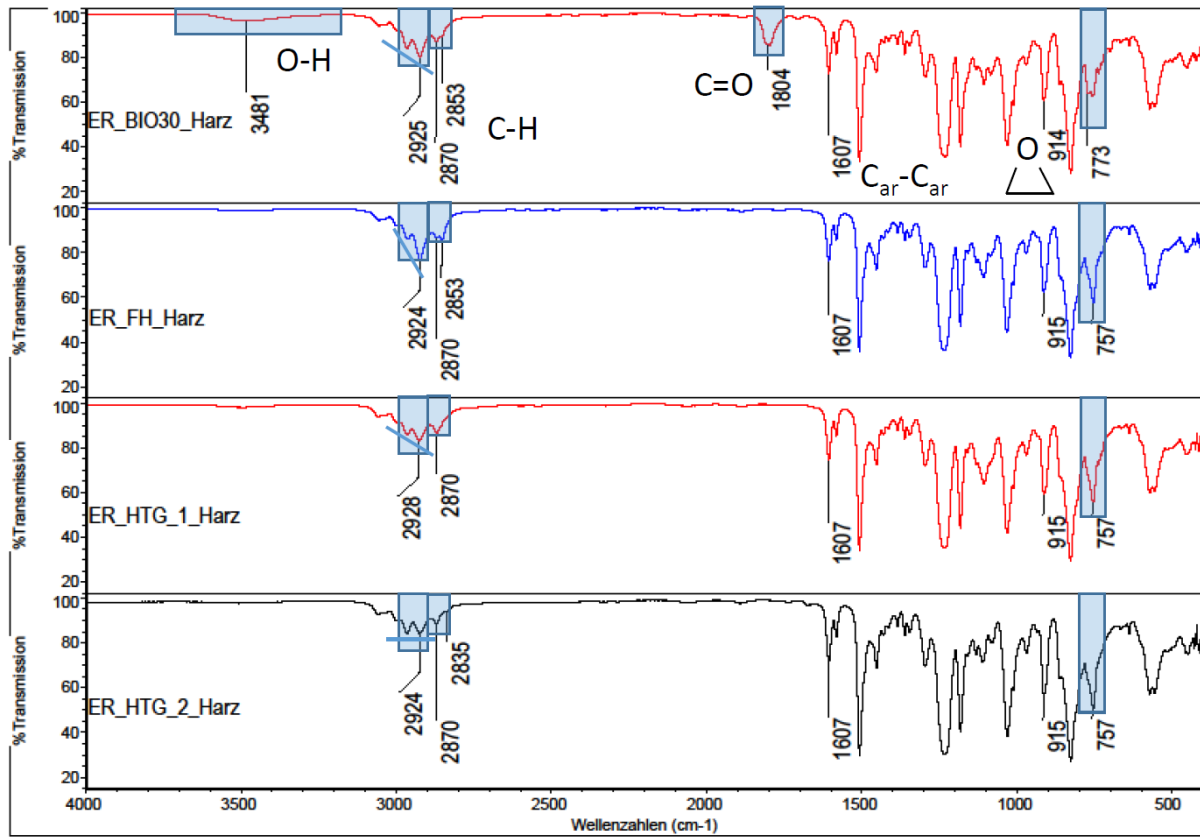


Abbildung E 1 – Infrarotspektren von Harzen von ER_BIO30, ER_FH, ER_HTG_1, ER_HTG_2

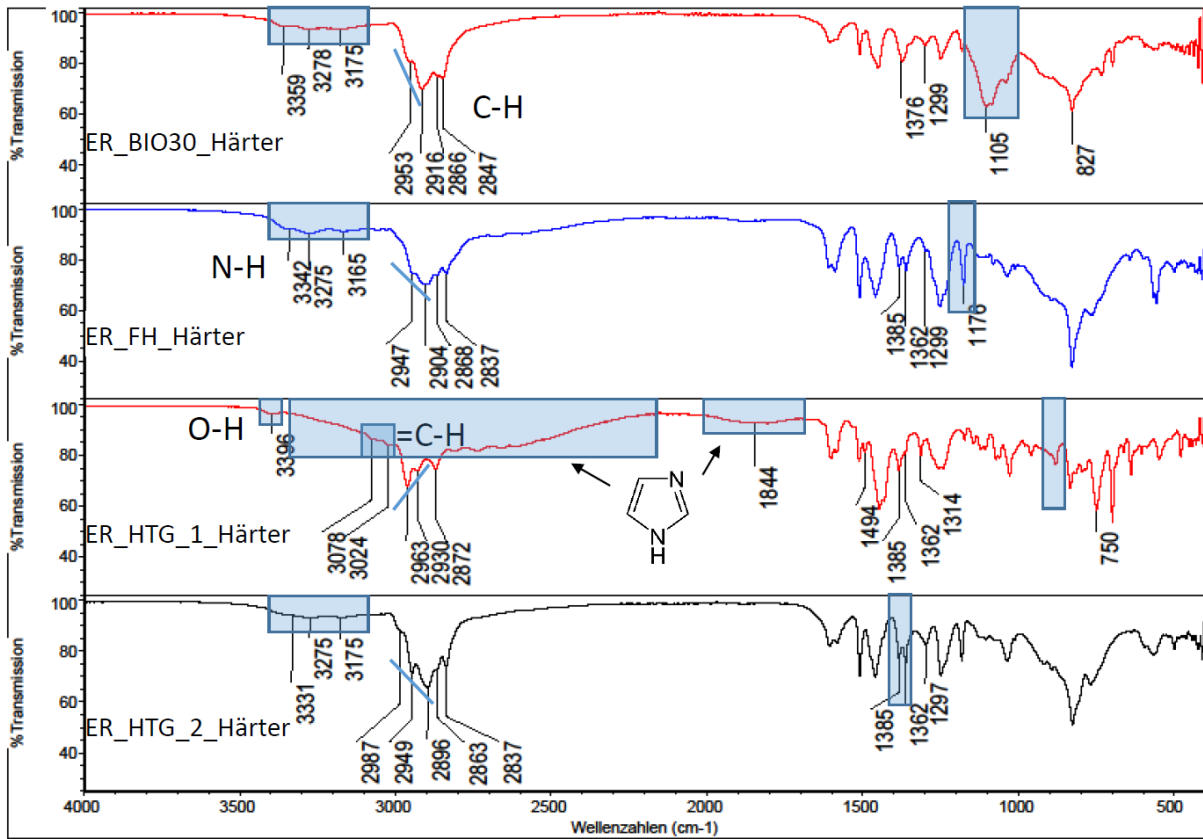


Abbildung E 2 – Infrarotspektren der Härter von ER_BIO30, ER_FH, ER_HTG_1, ER_HTG_2

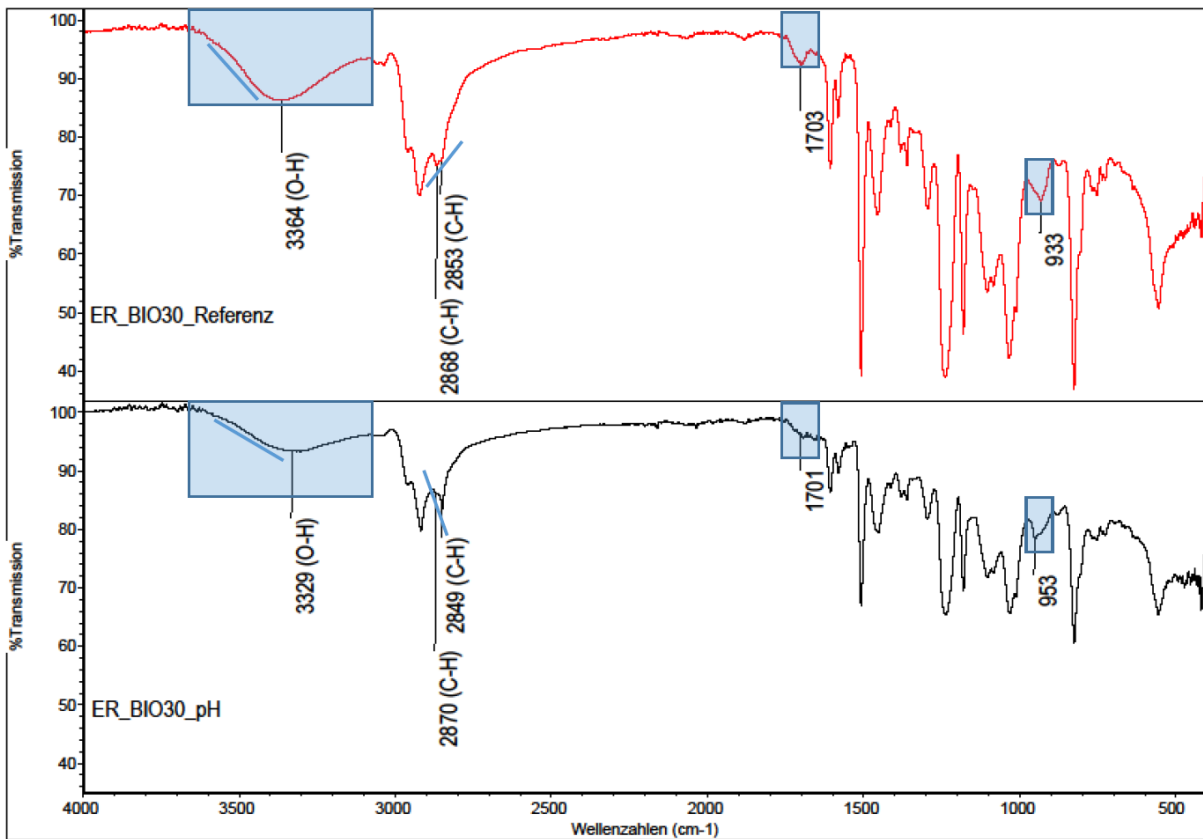


Abbildung E 3 – Infrarotspektren der ausgehärteten Epoxidharzproben von ER_BIO30. Diagramm oben zeigt IR-Spektrum einer Referenzprobe, Diagramm unten zeigt IR-Spektrum einer für 100 Tage in pH 13 gelagerten Probe

Verzeichnis der in dieser Schriftenreihe erschienenen Hefte

- 96/1** **Gebbeken, N.:** *Zur Untersuchung des linearen Tragverhaltens von Faserverbundkonstruktionen mittels numerischer Methoden*
- 97/1** **Rötzer, J.:** *Ein Beitrag zur Berechnung von Stahlbetontragwerken unter hohen Dehnungsgeschwindigkeiten und hohen Drücken*
- 97/2** **Gebbeken, N.; Wanzek, T.; Petersen, C.:** *„Semi-rigid“ Verbindungen – Versuche an „T-stubs“. Versuchsbericht*
- 97/3** **Jian, Y.:** *Tragverhalten dünner rechteckiger Stahlplatten mit großen Verformungen unter Berücksichtigung der Membranwirkung*
- 97/4** **Reif, F.:** *Mittels geregelter harmonischer Endpunktverschiebung induzierte räumliche Seilschwingungen.*
- 97/5** **Wei, Y.:** *Influences of Creep, Shrinkage and Steel Relaxation on Structural Behaviour.*
- 97/6** **Wurzer, O.:** *Zur Tragfähigkeit von Betondübeln.*
- 97/7** **Wanzek, T.:** *Zu Theorie, Numerik und Versuchen verformbarer Anschlusskonstruktionen.*
- 97/8** **Gebbeken, N.; Rothert, H.; Wanzek, T.:** *Zur Theorie und Finite-Element-Berechnung des Tragverhaltens von verformbaren (semi-rigid) Anschlusskonstruktionen im Stahlbau.*
- 99/1** **Böge, G.:** *MAKROS – Pre- und Postprozessing für Finite Elemente – AutoCAD-Erweiterung zur Generierung von FE-Modellen.*
- 00/1** **Gebbeken, N.:** *Beiträge zur Begabungs-, Bildungs- und Hochschulpolitik.*
- 00/2** **Bettin, I.; Urrutia Galicia, J.C.; Gebbeken, N.:** *On the analysis of vertical circular cylindrical tanks under earthquake excitation at its base.*
- 00/3** **Gebbeken, N.:** *Wörterbuch Bauwesen Englisch-Deutsch Deutsch-Englisch.*
- 00/4** **Ruppert, M.:** *Zur numerischen Simulation von hochdynamisch beanspruchten Betonstrukturen.*
- 00/5** **Sauer, M.:** *Adaptive Kopplung des netzfreien SPH-Verfahrens mit finiten Elementen zur Berechnung von Impaktvorgängen.*
- 01/1** **Zapfe, C.:** *Trag- und Verformungsverhalten von Verbundträgern mit Betondübeln zur Übertragung der Längsschubkräfte.*
- 01/2** **Urrutia-Galicia, J. L.:** *Contributions to Applied Mathematics in Engineering*
- 01/3** **Gebbeken, N.:** *Wörterbuch Bauwesen Englisch-Deutsch Deutsch-Englisch ergänzte und überarbeitete 2. Auflage*
- 02/1** **Matias León, J.C.:** *Ein Beitrag zur Wirkung von Wellen und Schockwellen in Tragwerken*
- 02/2** **Bosl, R.:** *Zum Nachweis des Trag- und Verformungsverhaltens von Wandscheiben aus Brettlagenholz*
- 02/3** **Fischer, O.; Heinen, A.H.; Thalheim, J.-U.:** *Nichtlineare räumliche Seilschwingungen*

- 02/4 Paulke, S.:** *Ein Beitrag zur Herleitung und Lösung nichtlinearer, thermomechanisch gekoppelter Grundgleichungen für Schalenträgerwerke*
- 02/5 Mangerig, I.; Zapfe, C.:** *Nachweisverfahren und Sanierungsmöglichkeiten für Stahlträgerdecken mit Betonausfachung*
- 03/1 Gebbeken, N.:** *Wörterbuch Bauwesen Englisch-Deutsch Deutsch-Englisch erheblich ergänzte Auflage, 3. Auflage*
- 03/2 Urrutia-Galicia, J.L.:** *„The Best Manifold Theory“, In Frequency Interpretation of Time Dependent Functions, An Application To Seismic Engineering.*
- 03/3 Gebbeken, N.; Bletzinger, K.-U.; Rothert, H.:** *Hrsg. Aktuelle Beiträge aus Baustatik und Computational Mechanics*
- 03/4 Gebbeken, N.; Dittrich, G.; Mueller-Hagen, S.:** *Zur Verwendung und Berechnung von Fahnenblechanschlüssen*
- 04/1 Weiß, J.:** *Vereinfachte Integration von Fachwissen in Computerprogramme am Beispiel eines Planungssystems für die Bauindustrie*
- 04/2 Thalheim, J.-U.:** *Nichtlineare Seilschwingungen und Stabilitätsanalysen für Seilbewegungen*
- 04/3 Gebbeken, N.:** *Wörterbuch Bauwesen Englisch-Deutsch Deutsch-Englisch ergänzte Auflage, 4. Auflage*
- 04/4 Greulich, S.:** *Zur numerischen Simulation von Stahlbeton- und Faserbetonstrukturen unter Detonationsbeanspruchung.*
- 04/5 Ehrlich, I.:** *Impactverhalten schwach gekrümmter Strukturen aus faserverstärkten Kunststoffen*
- 05/1 Lichte, U.:** *Klimatische Temperatureinwirkungen und Kombinationsregeln bei Brückenbauwerken*
- 05/2 Petersen, C.:** *Studien zum Einsatz von Erdbebenschutzsystemen*
- 06/1 Kustermann, A.; Keuser, M.; Zimbelmann R. K.; Grimm, R.:** *Hochfeste Bindemittel und Zuschlagstoffe für hochfeste Betone unterschiedlicher Güte“ für Schutzanlagen der militärischen Sonderinfrastruktur*
- 06/2 Bludau, Ch.; Keuser, M.; Kustermann, A.; Thienel K.-Ch.:** *Schutzplatten aus hochfestem Beton (Abschlussbericht)*
- 06/3 Purainer, R.; Keuser, M.:** *Versuche an Stahlbetonscheiben und –platten unter Zugbeanspruchung*
- 06/4 Gebbeken, N.; Keuser, M.; Klaus, M.; Mangerig, I.; Thoma, K. (Hrsg.):** *2. Workshop „BAU-PROTECT“ Sicherheit der baulichen Infrastruktur vor außergewöhnlichen Einwirkungen*
- 07/1 Gollwitzer, T.:** *Finite Stabelemente für mehrteilige nachgiebige Verbundquerschnitte zur Berechnung von Brettrippenschalen*
- 08/1 Urrutia-Galicia, J.L.:** *Contributions to Applied Mathematics in Engineering*
- 08/2 Gebbeken, N.; Thoma, K. (Hrsg.):** *3. Workshop „BAU-PROTECT“ Sicherheit der baulichen Infrastruktur vor außergewöhnlichen Einwirkungen*
- 09/1 Hartmann, T.:** *Zur mesomechanischen Modellierung von Beton und ihrer Anwendung zur makromechanischen Modellbildung*

- 10/1 **Baumhauer, A.:** *Beurteilung geschädigter Brückenbauwerke unter Berücksichtigung unscharfer Tragwerksparameter*
- 10/2 **Bierbrauer, K.:** *Ein Beitrag zur Ermittlung der Biegetragfähigkeit bestehender Stahlbetonbrücken unbekannter Eigenschaften*
- 10/3 **Rüdiger, L.:** *Tragverhalten von Stahlbetonplatten unter Berücksichtigung der Steifigkeitsänderung im gerissenen Zustand*
- 10/4 **Fuchs, M.:** *Stahlbetonbauteile nach außergewöhnlichen Einwirkungen – Schadensquantifizierung und Instandsetzung*
- 10/5 **Braml, T.:** *Zur Beurteilung der Zuverlässigkeit von Massivbrücken auf der Grundlage der Ergebnisse von Überprüfungen am Bauwerk*
- 10/6 **Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ingbert Mangerig**
- 10/7 **Seel, U.:** *Der konzeptionelle Entwicklungswandel von Flughafenterminalgebäuden in der Gegenüberstellung zur Entstehungsgeschichte des Flughafens München*
- 11/1 **Retze, U.:** *Beispielhafte Untersuchung zum Einsatz von Monitoringmethoden an einer Brücke*
- 11/2 **Burger, S.:** *Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten von Betondübeln im Verbundbau*
- 11/3 **Kroyer, R.:** *Instationäres Temperatur- und Strukturverhalten von Stabwerkstrukturen*
- 11/4 **Urrutia-Galicia, J. L.:** *Contributions to Applied Mathematics in Engineering III*
- 11/5 **Köck, B.:** *Barocke Dachwerke: Konstruktion und Tragverhalten*
- 12/1 **Teich, M.:** *Interaktionen von Explosionen mit flexiblen Strukturen*
- 12/2 **Beucher, S.:** *Zur aktiven Temperierung von Brückenfahrbahnen*
- 12/3 **Döge, T.:** *Zur Reflexion von Luftstoßwellen an nachgiebigen Materialien und Baustrukturen*
- 12/4 **Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manfred Keuser**
- 12/5 **Gebbeken, N.; Klaus, M.; Thoma, K. (Hrsg.):** *5. Workshop „BAU-PROTECT“ Sicherheit der baulichen Infrastruktur vor außergewöhnlichen Einwirkungen*
- 12/6 **Linse, T.:** *Materialmodelle für Mörtel und Ziegel für die diskrete Modellierung von Mauerwerk unter dynamischen Einwirkungen*
- 13/1 **Haese, A.:** *Beitrag zur Bemessung scheibenbeanspruchter Stahl-Glas-Elemente*
- 14/1 **Wensauer, R.:** *Zum Einfluss hochdynamischer Einwirkungen auf das Verbundverhalten von Stahlbeton*
- 14/2 **Lenner, R.:** *Safety Concept and Partial Factors for Military Assessment of Existing Concrete Bridges*
- 14/3 **Pfeiffer, E.; Rödig, P.:** *Lebenszyklusbegleitende Nutzbarkeit digitaler Bauwerksinformationen*
- 16/1 **Herrmann, T.:** *Untersuchungen zu punktgestützten Verglasungen mit Senkkopfhaltern*

- 17/1 Ampunant, P.:** *Numerische Untersuchungen zur Druck-Sog-Belastung auf Lärmschutzwände an Hochgeschwindigkeitsstrecken der Bahn*
- 17/2 Michal, M.:** *Verbund von Beton und Bewehrung unter hochdynamischen Beanspruchungen*
- 17/3 Friedl, R.:** *Grundlagenorientierte theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Schwingungsverhalten einer modifizierten Schwenktraversendehnfuge sowie zu fahrbahnunebenheitsinduzierten Radkraftschwankungen von Straßenfahrzeugen im Hinblick auf die daraus resultierende Streuung messtechnisch erfasster Fahrzeuggewichte*
- 17/4 Niederwald, M.:** *Zum Einfluss der viskoelastischen Eigenschaften des beschichteten Bewehrungsmaterials auf das Zugtragverhalten von carbonbewehrtem Beton*
- 18/1 Mano, T.:** *Numerical and experimental analysis of the load-carrying behaviour of laminated elastomeric bearings as seismic isolators*
- 18/2 Gebbeken N., Lindner T., Hiermaier S. (Hrsg.):** *8. Workshop „BAU-PROTECT“ Schutz der baulichen Infrastruktur vor außergewöhnlichen Einwirkungen*
- 18/3 Romen, N.:** *Zum Rückstellverhalten von Gleitpendellagern unter seismischer Einwirkung*
- 19/1 Wagner, R.:** *Untersuchungen zum Tragverhalten von Betondübeln in vorwiegend ruhend und nicht ruhend beanspruchten Konstruktionen*
- 19/2 Nehring, G.:** *Bemessung und Formfindung von kalt gebogenen Schalenstrukturen aus Dünnglas*
- 19/3 Neumer, D.:** *Beitrag zur Aussteifung von Gebäuden durch Glas – Konzentrierte Lasteinleitung im Eckbereich*
- 19/4 Kraus, M. A.:** *Machine Learning Techniques for the Material Parameter Identification of Laminated Glass in the Intact and Post-Fracture State*
- 20/1 Berger, J.:** *Zum nichtlinearen Riss- und Verformungsverhalten von Stahlbetonplatten mit beliebiger Bewehrungsrichtung unter Gebrauchslast*
- 20/2 Botz, M.:** *Beitrag zur versuchstechnischen und numerischen Beschreibung von Verbundglas mit PVB-Zwischenschicht im intakten und gebrochenen Zustand*
- 20/3 Festschrift zum 70. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Ingbert Mangerig**
- 20/4 Zircher, T. F.:** *Vermeidung des Trümmerfluges bei Stahlfaserbauteilen unter Kontaktdetonation – Entwicklung eines Ingenieurmodells*
- 21/1 Meinhardt, M.:** *Zur Berechnung von Rissbreiten und Rissabständen in Stahlbetonzugstäben unter Berücksichtigung zufällig verteilter und räumlich korrelierter Materialparameter*
- 21/2 Küttenbaum, S.:** *Zur Validierung von zerstörungsfreien Messverfahren für die probabilistische Beurteilung von Bestandsbauwerken mit gemessenen Daten*
- 21/3 Toffolon, A.:** *Generalised slenderness-based resistance method for the strength prediction of hollow sections*
- 22/1 Festschrift zum 70. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Manfred Keuser**

25/1 Thienel, K.-C., Braml, T., Beuntner, N., Isaia, M., Rauch, L., Zürnstein, F.:
Hanfbastfasern als Bewehrungsmaterial in klinkerarmen Betonen
(BasEcoCrete)

