Check for updates

ce/papers Proceedings in civil engineering

WILEY

22. Internationale Baustofftagung

ibausil

16. - 18. SEPTEMBER 2026
IN WEIMAR

Einsatzmöglichkeiten recycelter Glasfasern aus Rotorblättern von ausrangierter Windenergieanlagen in zementgebundenen Baustoffen

Cynthia Morales Cruz[1] | Maria Modestou[2] | Spyros Soulis[2] | Dionisis Semitekolos[2] | Costas Charitidis[2] | Tung Duc Dao[3] | Genis Colomino Garcia[4] | Anya Vollpracht[1]

Ansprechpartner

Dr.-Ing. Cynthia Morales Cruz
RWTH Aachen University
Institut für Baustoffforschung
Schinkelstr. 3
52062 Aachen
E-Mail: morales@ibac.rwth-aachen.de

[1] Institut für Baustoffforschung, Aachen, Deutschland
[2] R-NanoLab, School of Chemical Engineering, National Technical University of Athens (NTUA), Athens, Greece
[3] Holcim Innovation Hub, Lyon, France
[4] PreZero España, Madrid, Spain

Abstract

Rotorblattabfälle aus Windenergieanlagen (wind turbine blade waste, WTBW) stellen einen wachsenden Abfallstrom dar, für den bislang nur wenige hochwertige Verwertungswege existieren. Untersucht wurden alternative Nutzungspfade für mechanisch, thermisch und chemisch recycelte WTBWs in zementgebundenen Baustoffen. Der Fokus lag auf dem Einsatz als Supplementary Cementitious Material (SCM) sowie auf der Verminderung der Schwindrissbildung. Die mechanisch aufbereiteten WTBW-Fraktionen beeinflussten die Verarbeitbarkeit der Mörtelmischungen nur geringfügig und zeigten keine nachteiligen Auswirkungen auf die frühe Festigkeitsentwicklung. Im R³-Test zeigten thermisch und chemisch recycelte Fraktionen mit Wärmefreisetzungen von rund 390 J/g deutlich höhere Reaktivitäten als mechanisch aufbereitete WTBW. Ein direkter Zusammenhang zur Druckfestigkeitsentwicklung konnte jedoch nicht festgestellt werden. Im Windkanalversuch reduzierten mechanisch aufbereitete WTBW die plastische Schwindrissbildung deutlich. Im Windkanalversuch zeigten mechanisch aufbereitete WTBW eine ausgeprägte schwindrissmindernde Wirkung. Die Gesamtrissfläche wurde von etwa 3000 mm² bei der Referenzmischung auf 456 mm² bei einer Dosierung von 0,3 Vol.-% und auf lediglich 11 mm² bei 0,7 Vol.-% reduziert.

Keywords

Rotoblattabfälle, Recycling, Schwindrissbildung, SCM, R³-Test

1 Einleitung

Die Windenergie ist eine zentrale Säule der Energiewende in Deutschland und trägt maßgeblich zur Verringerung der Treibhausgasemissionen bei [1]. Ende 2025 waren bundesweit über 29.000 Windenergieanlagen (WEA) mit einer installierten Gesamtleistung von etwa 68 GW in Betrieb. Ein großer Teil dieser Anlagen nähert sich inzwischen dem Ende der ursprünglich vorgesehenen Nutzungsdauer; nahezu die Hälfte des deutschen Anlagenbestands ist älter als 15 Jahre, während rund ein Drittel bereits seit mehr als 20 Jahren betrieben wird [2]. Diese Alterung des Anlagenparks führt zu einer wachsenden Bedeutung von Rückbau- und Recyclingprozessen. Die Anzahl der jährlich stillgelegten Windenergieanlagen in Deutschland betrug 294 im Jahr 2021, stieg auf 472 im Jahr 2023 und wurde für 2025 mit 508 Anlagen angegeben [3]. Während der überwiegende Teil einer WEA

© 2026 The Author(s). ce/papers published by John Wiley & Sons Ltd.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

aus Stahl und Beton in etablierten Recyclingstrukturen verwertet werden kann, gestaltet sich die Verwertung der Rotorblätter deutlich komplexer [4].

Rotorblätter bestehen hauptsächlich aus Faserverbundwerkstoffen, bei denen glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) dominieren. Carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) werden lediglich in lokal hoch belasteten Zonen eingesetzt. Bereits bis 2023 fielen in Deutschland etwa 110 kt Rotorblattabfälle (WTBW) aus End-of-Life-Windenergieanlagen an. Für das Jahr 2050 prognostizieren Johst et al. insgesamt etwa 698 kt WTBW, wovon etwa 492 kt auf reine GFK-Strukturen und weitere 206 kt auf hybride GFK- und CFK-Rotoblätter entfallen. Der tatsächliche CFK-Massenanteil beträgt dabei lediglich etwa 12,4 kt. Trotz des zunehmenden CFK-Einsatzes dominieren damit weiterhin GFK-basierte Verbundwerkstoffe die zukünftigen Abfallströme. [5]

Für diese Materialien existieren bislang nur begrenzte werkstoffliche Verwertungswege. Gemäß aktuellen Übersichtsarbeiten zum Stand der Technik des WEA-Rückbaus erfolgt die Verwertung von GFK-Teilen überwiegend über die Mitverbrennung in Zementwerken [4], [6]. Bei diesem Verfahren findet nach einer mehrstufigen Zerkleinerung eine stoffliche und energetische Verwertung statt [6]. Dabei wird der organische Harzanteil energetisch genutzt, während die anorganischen Glasfasern als Rohstoffersatz für den Zementklinker dienen [7]. Obwohl dieser Weg einer Deponierung vorzuziehen ist, geht das ursprüngliche Potenzial der Fasern als hochfestes Verstärkungsmaterial verloren [5].

Es werden mechanische, thermische und chemische Recyclingverfahren untersucht. Diese Verfahren beeinflussen jedoch Fasergeometrie, Oberflächenbeschaffenheit und Materialeigenschaften unterschiedlich stark. Thermische Verfahren, insbesondere die Pyrolyse, werden vor allem für CFK-Abfälle eingesetzt, um wertvolle Kohlenstofffasern zurückzugewinnen. Die derzeit verfügbaren Verarbeitungskapazitäten sind jedoch noch begrenzt. Chemische Verfahren wie die Solvolyse nutzen Lösungsmittel zur Auflösung der Harzmatrix, wodurch die Faserstruktur weitgehend erhalten bleibt. Diese Verfahren befinden sich bislang jedoch überwiegend im Forschungs- und Entwicklungsstadium und gelten technisch sowie wirtschaftlich noch nicht als vollständig ausgereift [6]. Gleichzeitig fehlen bislang einheitliche Standards für Rückbau, Materialcharakterisierung und Kreislaufstrategien [8]

Vor diesem Hintergrund untersucht das europäische Forschungsprojekt Blades2Build [9] die Entwicklung werkstofflicher Kreislaufstrategien für Abfälle aus WEA. Das Projekt vereint mehrere industrielle und wissenschaftliche Partner entlang der gesamten Wertschöpfungskette von Rückbau, Recycling und Wiederverwendung von Faserverbundwerkstoffen und verfolgt das Ziel, nachhaltige Nutzungspfade für WTBW in unterschiedlichen technischen Anwendungen zu entwickeln. Der vorliegende Beitrag greift diese Zielsetzung auf, fokussiert jedoch auf alternative Verwertungsstrategien für mechanisch aufbereitete WTBW in zementgebundenen Baustoffen.

2 Stand der Forschung und Abgrenzung der vorliegenden Arbeit

Der nachfolgende Überblick fokussiert sich insbesondere auf aktuelle Forschungsergebnisse aus dem Projekt Blades2Build sowie auf ausgewählte verwandte Arbeiten zur Verwertung von WTBW in zementgebundenen Baustoffen.

Die Verwertung von ausgedienten Rotorblättern von Windkraftanlagen stellt aufgrund der steigenden Abfallmengen und der komplexen Verbundwerkstoffstruktur eine zunehmende ökologische Herausforderung dar [10], [11]. Konventionelle Entsorgungswege wie Deponierung oder thermische Verwertung gelten zunehmend als nicht nachhaltig und stehen teilweise im Widerspruch zu aktuellen regulatorischen Anforderungen [12]. Daher wird die stoffliche Wiederverwertung von WTBW in zementgebundenen Baustoffen wie Beton und Mörtel intensiv untersucht. Für das Recycling von WTBW werden hauptsächlich mechanische, chemische und thermische Verfahren betrachtet. Das mechanische Recycling ist derzeit die wirtschaftlich und technisch weitest verbreitete Methode. Dabei werden die Rotorblätter zerkleinert und als geschredderte WTBW mit unterschiedlichen Partikelgrößen weiterverwendet [10]. Chemische Verfahren wie die Solvolyse zielen auf die Auflösung der Polymermatrix zur Rückgewinnung der Glasfasern ab [12], während thermische Verfahren, beispielsweise die Pyrolyse, ebenfalls zur Trennung von Fasern und Harz untersucht werden.

Mechanisch aufbereitete WTBW können in zementgebundenen Werkstoffen gleichzeitig mehrere Funktionen übernehmen, unter anderem als partieller Ersatz für Gesteinskörnungen oder als faserartige Verstärkung [10]. Der Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften wird in der Literatur jedoch unterschiedlich bewertet. Mehrere Studien berichten von einer Reduktion der Druckfestigkeit infolge einer geringen Materialdichte sowie eines unzureichenden Verbunds zwischen WTBW und Zementmatrix [11]. Gleichzeitig zeigen Untersuchungen, dass durch optimierte Mischungszusammensetzungen und eine angepasste Partikelpackung weiterhin hohe

25097075, 2026, 6, Downloaded from https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cepa.70958 by Cochrane Greece, Wiley Online Library on [11/11/2026]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

Druckfestigkeiten erreicht werden können [10]. Duyal et al. [10] erzielten unter Anwendung des modifizierten Andreasen-und-Andersen-Modells trotz erhöhter Ersatzmengen Druckfestigkeiten von über 45 N/mm². Darüber hinaus wurde eine deutliche Verbesserung des Nachrissverhaltens beobachtet. Duyal et al. berichteten für ausgewählte Mischungen über eine Erhöhung der Restbiegezugfestigkeit um bis zu 250 % gegenüber der Referenzmischung [10].

Neben den mechanischen Eigenschaften spielen auch chemische Wechselwirkungen und Dauerhaftigkeitsaspekte eine wichtige Rolle. Die Bestandteile der WTBW interagieren dabei unterschiedlich mit dem Zementstein. Während Glasbestandteile die Gelbildung fördern und die Mikrostruktur verdichten können, wurde für bestimmte Harzbestandteile eine Verzögerung der frühen Hydratation beobachtet [13]. Dauerhaftigkeitsuntersuchungen ergaben zudem, dass geschredderte WTBW keine kritischen Alkali-Kieselsäure-Reaktionen auslösen [10]. Auch mikrostrukturelle Untersuchungen verdeutlichen die komplexe Wirkung des Materials. Mittels Röntgen-Computertomographie konnte gezeigt werden, dass größere Rotorblattpartikel trotz erhöhter Gesamtporosität teilweise zu günstigeren Porengeometrien führen. Paraskevoulakos et al. [11] beobachteten kugelförmigere Porenstrukturen sowie reduzierte Spannungskonzentrationen, wodurch lokal sogar Verbesserungen der Druckfestigkeit erreicht werden konnten. Die bisherigen Untersuchungen, insbesondere im Rahmen des Projekts Blades2Build sowie verwandter Forschungsarbeiten, zeigen, dass WTBW grundsätzlich ein hohes Potenzial für die stoffliche Verwertung in zementgebundenen Baustoffen besitzen. Gleichzeitig verdeutlichen die teilweise widersprüchlichen Ergebnisse der Literatur, dass insbesondere Recyclingroute, Partikelgeometrie, Restharzanteil und Mischungsdesign einen entscheidenden Einfluss auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften besitzen.

Während viele bisherige Forschungsarbeiten den Einsatz von WTBW als Zuschlagstoffersatz oder als mechanisch wirksame Faserverstärkung mit Fokus auf Festigkeitssteigerung und strukturelle Leistungsfähigkeit untersuchen, liegt der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeiten am Institut für Baustoffforschung der RWTH Aachen University (ibac) auf alternativen Anwendungsstrategien. Dabei steht insbesondere nicht die dauerhafte statische Wirksamkeit der recycelten Fasern im Sinne einer tragenden Bewehrung im Vordergrund. Stattdessen wird untersucht, inwieweit WTBW in Form von Kurzfasern zur Reduktion frühzeitiger Schrumpfrissbildung in zementgebundenen Systemen eingesetzt werden können. Der Fokus liegt damit auf rissminimierenden und verformungskontrollierenden Mechanismen im frühen Materialalter und nicht auf einer strukturellen Lastabtragung. Darüber hinaus wird untersucht, ob fein aufbereitete WTBW als Supplementary Cementitious Material (SCM) beziehungsweise als funktionelle Feinfraktion genutzt werden können. Im Gegensatz zu Ansätzen, die auf strukturelle Anwendungen oder den Erhalt der Langzeitbeständigkeit der Fasern abzielen, adressiert dieser Forschungsansatz gezielt die Nutzung heterogener und potenziell niederwertiger Recyclingfraktionen. Ziel ist es, robuste und praxisnahe Verwertungswege für WTBW zu entwickeln, die auch ohne hohe Anforderungen an Fasergeometrie oder dauerhafte mechanische Leistungsfähigkeit realisierbar sind.

3 Materialien und Methoden

3.1 Verwendete Materialien und Aufbereitung der Rotorblattabfälle

Die untersuchten WTBW stammten aus End-of-Life-Windenergieanlagen und wurden im Rahmen des Projekts Blades2Build von den Industriepartnern PreZero und Eldan bereitgestellt. Das eingesetzte WTBW wurde zunächst als vorgeschreddertes Faserverbundmaterial bereitgestellt. Das Ausgangsmaterial stammte aus Deponiebeständen und wurde durch A TEC geliefert. Die weitere mechanische Aufbereitung erfolgte durch PreZero über eine zweistufige Zerkleinerungsroute bestehend aus einem Zweiwellen-Vorzerkleinerer und einem Crossflow-Schredder. Hierbei kamen Siebgrößen von 60, 40, 20 und 10 mm zum Einsatz. Durch den Zerkleinerungsprozess entstand ein heterogener Materialstrom mit breiter Partikelgrößenverteilung, der in Abhängigkeit von der späteren Anwendung zusätzliche Sortier-, Sieb- sowie thermische oder chemische Aufbereitungsschritte erforderte. Zusätzlich wurde eine mechanisch aufbereitete Rotorblattfraktion durch die Firma Eldan bereitgestellt.

Die von Holcim bereitgestellte Fraktion mit der Bezeichnung B9644 wurde im Jahr 2024 aus einer zuvor von PreZero erzeugten 0/10-mm-Fraktion abgesiebt. Die Siebung erfolgte manuell unter Verwendung von Sieben mit Maschenweiten von 63 µm und 1 mm, wodurch eine Fraktion im Bereich von 0,063 bis 1 mm erhalten wurde. Die von PreZero bereitgestellten Fraktionen stammen aus einem Siebversuch am Russell Finex Test Center. Als Ausgangsmaterial diente eine mechanisch aufbereitete 0/20-mm-Rotorblattfraktion aus einem vorangegangenen Schredderversuch. Die Fraktionierung erfolgte mittels Vibrationssiebtechnik unter Verwendung von Siebweiten

25097075, 2026, 6, Downloaded from https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cepa.70958 by Cochrane Greece, Wiley Online Library on [11/11/2026]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

von 200 µm, 400 µm, 1000 µm, 2500 µm und 7100 µm. Die verwendeten Probenbezeichnungen und Partikelgrößenbereiche sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Übersicht der untersuchten Rotorblattabfälle (WTBW), ihrer Herkunft, Aufbereitungsroute und zugehörigen Fraktionen

WTBW - Bezeichnung	Material-quelle	Aufbereitung	Fraktion / Partikelgröße	Dichte in g/cm³	Glühverlust in M.-%
B9530	PreZero	mechanisch	> 2500 µm	1,985	36,7
B9531	PreZero	mechanisch	1000–2500 µm	1,946	36,8
B9532	PreZero	mechanisch	400–1000 µm	1,996	34,7
B9533	PreZero	mechanisch	< 200 µm	1,991	33,9
B9534	PreZero	mechanisch	1000–7100 µm	1,944	41,1
B9041*	Holcim	mechanisch	63 µm–1 mm	1,867	29,9
B9644	Holcim	mechanisch	63 µm–1 mm	1,781	43,0
B9657 / B9658	NTUA	chemisch (Solvolyse)	–	2,721 / 2,707	0,2 / 0,1
B9659 / B9660	NTUA	thermisch (Pyrolyse/Oxidation)	–	2,726 / 2,678	0,02 / 0,2
B9710	ELDAN	mechanisch	–	2,034	34,1

* 1. Lieferung, hier nur für Windkanaluntersuchungen verwendet

Die mechanisch aufbereiteten Rotorblattabfälle wurden anschließend thermisch beziehungsweise chemisch weiterbehandelt. Abbildung 1 zeigt repräsentative Rotorblattfraktionen nach mechanischer, thermischer und chemischer Aufbereitung.



Abbildung 1: Repräsentative WTBW nach unterschiedlichen Aufbereitungsrouten: (a) mechanisch aufbereitete Fraktion, (b) chemisch recycelte Fraktion nach Solvolyse sowie (c) thermisch recycelte Fraktion nach Pyrolyse und Oxidation.

Die chemische Aufbereitung erfolgte an der National Technical University of Athens (NTUA) mittels Solvolyse unter nah- beziehungsweise überkritischen Bedingungen. Ziel des Verfahrens war die Zersetzung der Polymermatrix zur Rückgewinnung glasfaserreicher Fraktionen. Hierzu wurde Aceton als Lösungsmittel eingesetzt, da überkritisches Aceton die Polymermatrix ohne stark alkalische Katalysatoren zersetzen kann und prinzipiell zurückgewonnen und wiederverwendet werden kann. Die Versuche wurden in einem 4-L-Autoklaven (s. Abbildung 1a) durchgeführt, der mit 2 L Aceton befüllt und mit einer mechanischen Rührung bei 200 rpm betrieben wurde. Im Rahmen der Prozessoptimierung wurden Materialmenge, Reaktionszeit, Temperatur und Druck variiert, um eine möglichst vollständige Matrixentfernung bei gleichzeitigem Erhalt der Faserstruktur zu erreichen. Basierend auf den Vorversuchen wurden schließlich folgende Prozessparameter gewählt: 200 g WTBW, 4 h Reaktionszeit, 350 °C und 222 bar. Die optimierten Bedingungen wurden anschließend in weiteren Chargen reproduziert, um ausreichende Mengen rezyklierter Glasfasern für die Herstellung zementgebundener Prüfkörper bereitzustellen. Die dabei erzeugten chemisch recycelten Chargen wurden mit den Probenbezeichnungen B9657 und B9658 gekennzeichnet.

Die thermische Aufbereitung erfolgte ebenfalls an der NTUA über ein zweistufiges Verfahren aus Pyrolyse und anschließender Oxidation (s. Abbildung 1b). Ziel war die Zersetzung der Polymermatrix sowie die Gewinnung glasfaserreicher Fraktionen. Im ersten Schritt wurde das WTBW bei 550 °C über 5 h unter Stickstoffatmosphäre pyrolysiert. Anschließend erfolgte eine Oxidation bei 500 °C über 1 h unter Luftatmosphäre, um verbliebene kohlenstoffreiche Rückstände zu entfernen. Während der Pyrolyse wurde die Polymermatrix zersetzt und zunächst ein kohlenstoffreicher Feststoffrückstand gebildet, wobei die Geometrie des Ausgangsmaterials weitgehend erhalten blieb. Erst durch den nachgeschalteten Oxidationsschritt wurden die Glasfasern freigelegt. Das Verfahren wurde anschließend als Batch-Prozess in einem Rohrofen umgesetzt und schrittweise von 60 g auf zunächst 100–150 g und schließlich auf 300 g pro Charge skaliert. Während der Hochskalierung traten insbesondere oberhalb von 300 °C gasförmige und teerartige Nebenprodukte auf, weshalb zusätzlich eine Kühlfalle zur Kondensation

25097075, 2026, 6, Downloaded from https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cepa.70958 by Cochrane Greece, Wiley Online Library on [11/11/2026]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

und Abscheidung dieser Nebenprodukte integriert wurde. Die thermisch aufbereiteten Proben wurden mit den Bezeichnungen B9659 und B9660 gekennzeichnet.

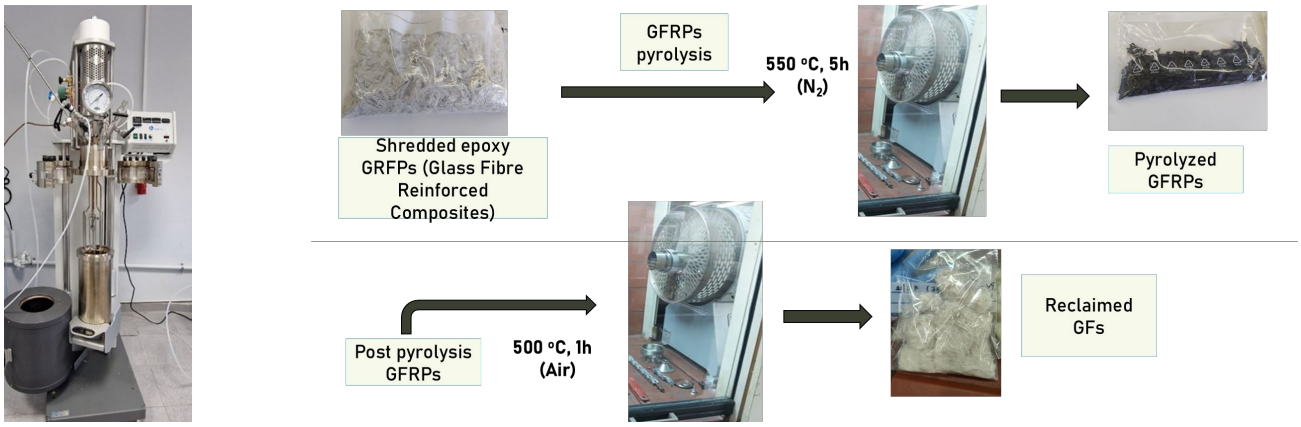


Abbildung 2: Aufbauten der chemischen und thermischen Aufbereitung von Rotorblattabfällen: (a) Autoklavreaktor für die Solvolyse unter überkritischen Bedingungen; (b) zweistufiges thermisches Recyclingverfahren. Abbildungen bereitgestellt durch NTUA.

Für die Windkanalversuche wurden die in den Zulassungsgrundsätzen des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) definierten Prüfmischungen Beton IIA und Beton IIB verwendet [14]. Beton IIA enthielt die jeweilige WTBW-Fraktion, während Beton IIB als Referenzmischung ohne WTBW ausgeführt wurde. Die vergleichende Untersuchung beider Mischungen ermöglicht eine direkte Bewertung des Einflusses der WTBW-Fraktionen auf die plastische Schwindrissbildung. Als Bindemittel wurde ein CEM I 32,5 R nach DIN EN 197-1 verwendet. Die Gesteinskörnung bestand aus Kiessand nach DIN EN 12620 mit einer Kornzusammensetzung B8 nach DIN 1045-2. Der Wasserzementwert betrug 0,75. Zusätzlich wurde ein Mehlkorn- und Feinstsandanteil von etwa 800 kg/m³ eingesetzt. Die Zusammensetzungen der verwendeten Betonmischungen sind in Tabelle 2 dargestellt.

Zur Untersuchung der Eignung der WTBW-Fraktionen als SCM wurden Mörtelmischungen nach DIN EN 196-1 hergestellt. Die Referenzmischung bestand aus einem Teil Zement, drei Teilen CEN-Normsand sowie einem halben Teil Wasser, entsprechend einem Wasserzementwert von 0,50. Als Bindemittel wurde ein CEM I 42,5 R verwendet. Jede Mischung bestand aus 450 g Zement, 1350 g CEN-Normsand sowie 225 g Wasser. Den Mörtelmischungen wurden zusätzlich 8 g der jeweiligen WTBW-Fraktion zugegeben, was einem Anteil von 1,8 M.-% bezogen auf die Zementmasse entspricht. Die WTBW-Fraktionen wurden dabei als zusätzliche Komponente zur Referenzmischung dosiert.

Tabelle 2: Mischungszusammensetzungen der verwendeten Beton- und Mörtelmischungen für die Untersuchungen zur Verminderung der Schrumpfrissneigung und zur Festigkeitsentwicklung

Komponente	Einheit	Beton IIA	Beton IIB
Zement CEM I 32,5 R nach DIN EN 197-1	kg/m³	360	360
Wasser nach DIN EN 1008	kg/m³	270	270
Kalksteinmehl	kg/m³	368	368
Gesteinskörnung B8 nach DIN EN 12620	kg/m³	1227	1227
WTBW (B9041 / B9644 / B9710)	Vol.-%	0,3 / 0,5 / 0,7 / 0,9	-
w/z-Wert	–	0,75	0,75

3.2 Charakterisierung der recycelten WTBW-Fraktionen

Zur Charakterisierung der untersuchten WTBW-Fraktionen wurden die Dichte, der Glühverlust sowie die Mikrostruktur der Materialien untersucht. Die Dichte und der Glühverlust wurden für alle untersuchten WTBW-Fraktionen bestimmt. Zur Bestimmung des Glühverlusts wurden die Proben zunächst bei 600 °C vorgeglüht und anschließend für 1 h bei 600 °C geglüht. Die ermittelten Dichte- und Glühverlustwerte sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die chemisch und thermisch recycelten Glasfaserfraktionen wurden anschließend mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) sowie thermogravimetrischer Analyse (TGA) charakterisiert, um die Oberflächenbeschaffenheit der Fasern sowie mögliche verbleibende organische Rückstände zu untersuchen.

Die chemisch recycelten Fasern zeigten im REM überwiegend saubere und gut separierte Glasfasern ohne sichtbare Harzrückstände auf den Faseroberflächen (Abbildung 3a). Die Ergebnisse der TGA bestätigten diese Beobachtungen. Über den untersuchten Temperaturbereich wurde nahezu kein Masseverlust festgestellt und es

25097075, 2026, 6, Downloaded from https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cepa.70958 by Cochrane Greece, Wiley Online Library on [11/11/2026]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

traten keine charakteristischen Massenverluste auf, die auf die thermische Zersetzung verbliebener Polymerbestandteile hindeuten würden. Dies weist auf eine weitgehende Entfernung der Polymermatrix und einen sehr geringen Restgehalt organischer Bestandteile hin.

Im Gegensatz dazu zeigten die thermisch recycelten Fasern zwar freigelegte Glasfasern, jedoch waren lokal weiterhin Oberflächenablagerungen und Rückstände sichtbar (Abbildung 3b). Die TGA-Untersuchungen ergaben einen Gesamtmassenverlust von etwa 10 %, der überwiegend im Temperaturbereich zwischen 300 °C und 500 °C auftrat. Dies deutet auf verbleibende organische Rückstände auf den Faseroberflächen hin. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die thermische Behandlung erfolgreich glasfaserreiche Fraktionen aus dem WTBW gewonnen werden konnten, jedoch geringe Mengen organischer Restbestandteile auf den Faseroberflächen verblieben. Die Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede zwischen chemisch und thermisch recycelten Glasfaserfraktionen hinsichtlich des Oberflächenzustands und verbleibender organischer Rückstände.

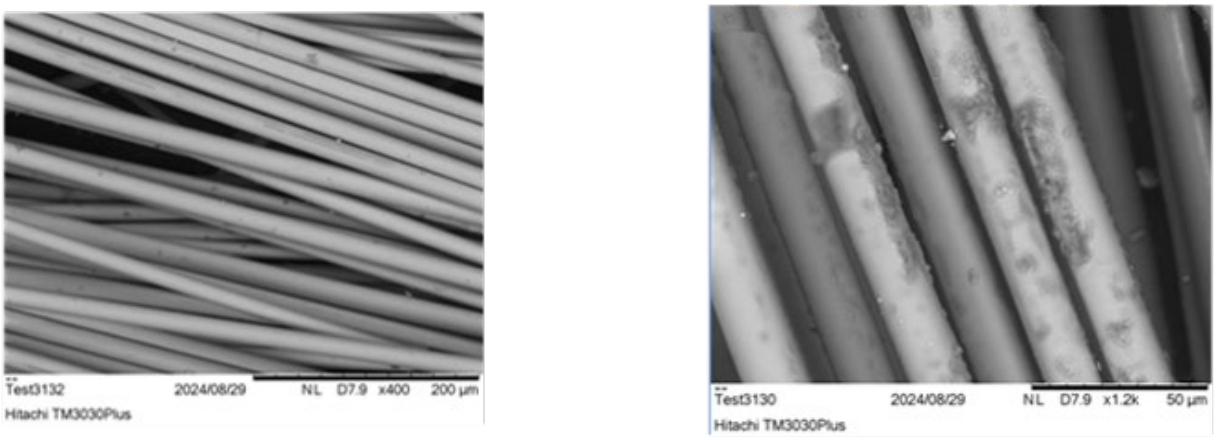


Abbildung 3: REM-Aufnahmen recycelter Glasfaserfraktionen aus WTBW: (a) chemisch recycelte Fraktion nach Solvolyse mit überwiegend sauberen und separierten Glasfasern und (b) thermisch recycelte Fraktion nach Pyrolyse und Oxidation mit lokal verbleibenden Oberflächenrückständen. Abbildungen bereitgestellt durch NTUA.

3.3 Prüfmethoden

Zur Untersuchung des Frühschwind- und Rissverhaltens wurde ein Windkanalversuch durchgeführt. Derartige Prüfverfahren werden in Deutschland unter anderem im Rahmen der Zulassung von Fasern für Beton angewendet, um die Wirksamkeit von Fasern hinsichtlich der Verminderung plastischer Schwindrisse nachzuweisen [14]. Die Prüfverfahren basieren auf den Untersuchungen von Manns [15] und Wischers [16] zur Frühschwindrissbildung von Beton.

Die Untersuchungen wurden als vergleichende Prüfungen durchgeführt. Hierzu wurden jeweils zwei Betonplatten parallel hergestellt und geprüft: eine Referenzmischung ohne WTBW (Beton IIB) sowie eine Mischung mit WTBW-Zugabe (Beton IIA). Für beide Mischungen wurde eine DIBt-definierte Prüfmischung gemäß Tabelle 2 verwendet. Der verwendete Windkanal orientiert sich an den Anforderungen der DIBt-Prüfungen. Die Betonplatten wurden mit Abmessungen von 1600 × 600 × 80 mm³ in einen Stahlrahmen mit umlaufender Randbewehrung eingebracht, wodurch ein behinderter Schwindzustand erzeugt wurde. Nach dem Betonieren wurde die Probe mit einem transparenten Windkanal abgedeckt und einem Luftstrom von etwa 5 m/s ausgesetzt. Die Wasserverdunstung wurde über separate Teilproben kontinuierlich erfasst. Zusätzlich wurden Temperatur, relative Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit während des Versuches überwacht. Nach Abschluss des Versuches erfolgte die Bewertung der Schwindrissbildung anhand von Rissanzahl, Risslänge und Rissbreite. Zusätzlich wurde die aufsummierte Rissöffnungsfläche bestimmt, welche sich aus der Summe der einzelnen Rissflächen ergibt.

Die Herstellung der Mörtelmischungen erfolgte entsprechend den in Abschnitt 3.1 beschriebenen Zusammensetzungen. Kleinere Ansatzmengen (≤ 2 l) wurden mit einem Labormischer hergestellt, während größere Ansatzmengen (≤ 8 l) in einem Eimermischer gemischt wurden. Die Mischreihenfolge erfolgte nach DIN EN 196-1 [17] zur Herstellung von Normmörtelprüfkörpern. Die Frischmörtelkennwerte wurden anhand des Ausbreitmaßes nach DIN EN 1015-3 [18], der Frischrohdichte nach DIN EN 1015-6 [19] sowie des Luftgehalts nach DIN EN 1015-7 [20] bestimmt. Ziel dieser Untersuchungen war die Bewertung des Einflusses der verschiedenen WTBW-Fraktionen auf die Verarbeitbarkeit der Mörtelmischungen.

Zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften wurden prismatische Prüfkörper mit Abmessungen von 40 mm

25097075, 2026, 6, Downloaded from https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cepa.70958 by Cochrane Greece, Wiley Online Library on [11/11/2026]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

× 40 mm × 160 mm gemäß DIN EN 196-1 hergestellt und normgerecht gelagert. Die Biegezug- und Druckfestigkeitsprüfungen erfolgten im Alter von 2 und 7 Tagen. Für ausgewählte Mörtelmischungen wurde zusätzlich das Erstarrungs- und Erhärtungsverhalten mittels Ultraschallmessungen mit einem Ultrasonic Multiplex Tester (IP-8, Ultratest GmbH) untersucht. Die Messungen erfolgten über einen Zeitraum von sieben Tagen mit einem Messintervall von 10 s. Die zeitliche Entwicklung der Schallgeschwindigkeit wurde zur Beurteilung der Struktur- und Festigkeitsbildung während der Hydratation herangezogen.

Die puzzolanische Reaktivität ausgewählter WTBW-Fraktionen wurde mithilfe des R³-Tests nach ASTM C1897-20 [21] bestimmt. Hierzu wurden Modellpasten aus 5,0 g WTBW, 15,0 g Calciumhydroxid ($Ca(OH)_2$), 2,5 g Calciumcarbonat ($CaCO_3$) sowie 27,0 g einer Kaliumsulfat (K_2SO_4)-/Kaliumhydroxid (KOH)-Lösung hergestellt. Die Ausgangsstoffe wurden vor der Versuchsdurchführung bei 40 °C temperiert. Nach Zugabe der Lösung wurden die Komponenten zunächst manuell homogenisiert und anschließend für 2 min bei 1600 min^{-1} gemischt. Unmittelbar danach wurden jeweils 15 g Paste in Kalorimeterampullen abgefüllt und innerhalb von 10 min nach Mischbeginn in das Kalorimeter eingesetzt. Die Bestimmung der Reaktivität erfolgte mittels isothermer Kalorimetrie (Methode A nach [21]) bei 40 °C über einen Zeitraum von sieben Tagen. Als Bewertungsgröße diente die kumulative Wärmefreisetzung bezogen auf die Masse des eingesetzten WTBW, welche als Maß für die hydraulische bzw. puzzolanische Reaktivität der untersuchten Fraktionen herangezogen wurde.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Wirksamkeit von WTBW zur Verminderung der Schwindrissbildung

Die Ergebnisse der Windkanalversuche sind in Tabelle 4 dargestellt. Die Bewertung der Wirksamkeit der WTBW-Fraktionen erfolgte primär anhand der Gesamtrissfläche, da diese sowohl die Risslänge als auch die Rissbreite berücksichtigt und damit die schwindrissmindernde Wirkung der Fasern umfassender beschreibt als die alleinige Betrachtung der Rissanzahl.

In der ersten Messreihe zeigte die mechanisch aufbereitete WTBW-Fraktion B9041 die stärkste Reduzierung der Schwindrissbildung. Bereits bei einer Dosierung von 0,3 Vol.-% verringerte sich die Gesamtrissfläche gegenüber der Referenz deutlich auf 456 mm². Bei einer Dosierung von 0,7 Vol.-% wurde mit einer Gesamtrissfläche von lediglich 11 mm² nahezu keine Rissbildung mehr festgestellt (s. Abbildung 4a-c).

Die Ergebnisse der zweiten Messreihe zeigen ebenfalls eine Verringerung der Schwindrissbildung durch die Zugabe mechanisch aufbereiteter WTBW-Fraktionen. Allerdings wiesen die beiden verwendeten Windkanäle unterschiedliche Referenzwerte auf. Während für die Referenzmischung im linken Windkanal eine Gesamtrissfläche von 3092 mm² ermittelt wurde, lag diese im rechten Windkanal bei 4000 mm². Die Ergebnisse beider Windkanäle können daher nur eingeschränkt direkt miteinander verglichen werden.

Tabelle 4: Kenngrößen der Schrumpfrissbildung aus den Windkanalversuchen

Messreihe	WTBW-Mischung	Dosierung Vol.-%	Mittlere Rissbreite mm	Maximale Rissbreite mm	Gesamtrisslänge cm	Gesamtrissfläche mm²
1	Referenz	0,0	0,8	2,0	361,9	3000
1	B9041	0,3	0,4	3,0	104,0	456
1	B9041	0,7	0,1	0,2	8,8	11
2 (links)	Referenz	0,0	0,7	3,0	383,4	3092
2 (links)	B9644	0,9	0,5	2,0	158,9	806
2 (links)	B9710	0,9	0,4	1,5	342,1	1496
2 (rechts)	Referenz	0,0	1,3	3,0	306,7	4000
2 (rechts)	B9644	0,5	1,0	3,0	284,6	2691
2 (rechts)	B9710	0,5	0,9	2,5	340,0	3005

TABELLENHINWEIS: Messreihe 1 und Messreihe 2 wurden unabhängig voneinander durchgeführt und ausgewertet. Die Ergebnisse der zweiten Messreihe wurden in zwei parallel betriebenen Windkanälen ermittelt. Aufgrund unterschiedlicher Referenzwerte zwischen linkem und rechtem Windkanal sind direkte Vergleiche zwischen beiden Kanälen nur eingeschränkt möglich. Die Bewertung der Faserwirksamkeit erfolgte daher primär im Vergleich zur jeweiligen Referenzmischung derselben Messreihe. desselben Windkanals.

Im Vergleich zur jeweiligen Referenz führte die Zugabe von B9644 und B9710 zu einer Verringerung der Gesamtrissfläche. Die stärkste Reduktion wurde für B9644 bei 0,9 Vol.-% mit einer Gesamtrissfläche von 806 mm² beobachtet (s. Abbildung 4d). Für B9710 bei 0,9 Vol.-% wurde eine Gesamtrissfläche von 1496 mm² bestimmt.

25097075, 2026, 6, Downloaded from https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cepa.70958 by Cochrane Greece, Wiley Online Library on [11/11/2026]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

Die Versuche mit 0,5 Vol.-% zeigten dagegen lediglich moderate Reduktionen der Gesamtrissfläche auf 2691 mm² (B9644) beziehungsweise 3005 mm² (B9710). Insgesamt deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die untersuchten WTBW-Fraktionen die Ausbildung plastischer Schwindrisse reduzieren können. Die Verringerung der Gesamtrissfläche fiel dabei teilweise deutlich stärker aus als die Abnahme der Gesamtrisslänge. Dies weist darauf hin, dass die Fasern insbesondere die Rissöffnung begrenzen und dadurch die resultierende Rissfläche reduzieren. Ein vergleichbares Verhalten wurde auch von Fontana [22] für mechanisch recycelte Rotorblattfasern beschrieben.

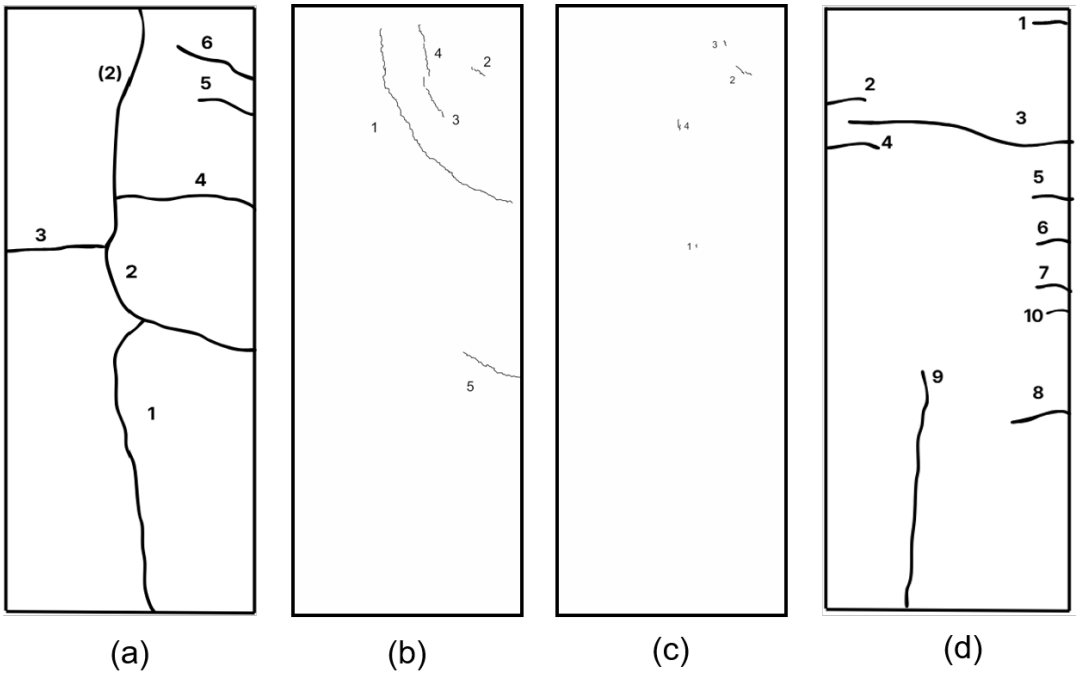


Abbildung 4: Rissbilder ausgewählter Windkanalversuche nach 7 h Windbeanspruchung: a) Referenzmischung ohne WTBW, b) B9041 mit 0,3 Vol.-% WTBW, c) B9041 mit 0,7 Vol.-% WTBW und d) B9644 mit 0,9 Vol.-% WTBW

4.2 Einfluss der WTBW auf Frisch-, Frühfestigkeits- und Reaktivitätseigenschaften

Die Ergebnisse der Frischmörteluntersuchungen sind in Tabelle 4 dargestellt. Die Referenzmischung erreichte ein Ausbreitmaß von 200 mm. Die mechanisch aufbereiteten WTBW-Fraktionen zeigten mit Ausbreitmaßen zwischen 180 mm und 200 mm insgesamt ein vergleichbares Verhalten. Bei einer Dosierung von 8 g WTBW je Mischung, entsprechend 1,8 M.-% bezogen auf die Zementmasse, konnte kein wesentlicher Einfluss der mechanisch aufbereiteten Fraktionen auf die Verarbeitbarkeit des Mörtels festgestellt werden.

Demgegenüber zeigten die chemisch und thermisch recycelten WTBW-Fraktionen deutlich geringere Ausbreitmaße. Die chemisch recycelten Fraktionen B9657 und B9658 erreichten jeweils etwa 150 mm und lagen damit rund 25 % unter dem Wert der Referenzmischung. Die thermisch recycelte Fraktion B9660 wies mit 140 mm das niedrigste Ausbreitmaß aller untersuchten Mischungen auf. Im Gegensatz dazu erreichte die ebenfalls thermisch recycelte Fraktion B9659 mit 190 mm ein Ausbreitmaß im Bereich der mechanisch aufbereiteten Fraktionen. Die Ergebnisse zeigen somit eine größere Streuung der Verarbeitbarkeit innerhalb der thermisch recycelten WTBW-Fraktionen.

25097075, 2026, 6, Downloaded from https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cepa.70958 by Cochrane Greece, Wiley Online Library on [11/11/2026]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

25097075, 2026, 6, Downloaded from https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cepa.70958 by Cochrane Greece, Wiley Online Library on [11/11/2026]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

Tabelle 4: Frischmörtel- und Festigkeitskennwerte der untersuchten WTBW-Mörtelmischungen

WTBW-Mischungen	Ausbreitmaß mm	Luftporengehalt Vol.-%	Rohdichte kg/m³	$f_{c,2d}$ N/mm²	$f_{ct,2d}$ N/mm²	$f_{c,7d}$ N/mm²	$f_{ct,7d}$ N/mm²
B9534	200	2,1	2.290	25,0 ± 0,6	5,0 ± 0,2	43,2 ± 1,5	7,2 ± 0,1
B9533	200	1,7	2.270	20,0 ± 0,9	4,3 ± 0,1	37,4 ± 1,3	7,0 ± 0,1
B9532	200	2,0	2.290	24,4 ± 0,4	5,1 ± 0,1	41,5 ± 1,2	7,1 ± 0,4
B9644	180	2,3	2.270	24,1 ± 0,5	4,9 ± 0,1	41,4 ± 0,6	7,0± 0,6
B9710	190	1,9	2.240	26,2 ± 0,5	5,4 ± 0,1	44,5 ± 1,5	7,3 ± 0,3
B9660	140	2,2	2.270	19,1 ± 4,0	5,7 ± 0,3	33,5 ± 2,3	7,5 ± 0,4
B9659	190	3,6	2.270	24,0 ± 0,6	5,5 ± 0,4	36,3 ± 1,7	7,2 ± 0,3
B9658	150	2,2	2.260	24,0 ± 0,6	5,2 ± 0,2	32,4 ± 1,2	7,1 ± 0,1
B9657	150	2,0	2.270	23,9 ± 1,1	5,3 ± 0,7	34,4 ± 1,7	6,4 ± 0,3
Referenz	200	-	-	21,9 ± 0,9	4,7 ± 0,1	34,1 ± 1,2	6,5 ± 0,1

Die Ergebnisse der Biegezug- und Druckfestigkeitsprüfungen sind in Tabelle 3 dargestellt. Für die mechanisch aufbereiteten WTBW-Fraktionen wurden nach 2 Tagen Druckfestigkeiten zwischen 20,0 N/mm² und 26,2 N/mm² ermittelt. Mit Ausnahme von B9533 lagen die Mittelwerte oberhalb der Referenzmischung (21,9 ± 0,9 N/mm²). Nach 7 Tagen erreichten die mechanisch aufbereiteten Fraktionen Druckfestigkeiten zwischen 37,4 N/mm² und 44,5 N/mm² und lagen damit durchweg über dem Referenzwert von 34,1 ± 1,2 N/mm². Die Standardabweichungen der Messungen waren insgesamt gering und deuten auf eine gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse hin. Die thermisch recycelten Fraktionen zeigten ein differenzierteres Verhalten. Während B9659 nach 2 und 7 Tagen Druckfestigkeiten von 24,0 ± 0,6 N/mm² beziehungsweise 36,3 ± 1,7 N/mm² erreichte und damit leicht oberhalb der Referenz lag, wurden für B9660 geringere Druckfestigkeiten von 19,1 ± 4,0 N/mm² nach 2 Tagen und 33,5 ± 2,3 N/mm² nach 7 Tagen bestimmt. Gleichzeitig weist B9660 die größte Streuung aller untersuchten Mischungen auf. Auch die chemisch recycelten Fraktionen erreichten nach 2 Tagen Druckfestigkeiten oberhalb der Referenz. Nach 7 Tagen lagen die Festigkeiten mit 32,4 ± 1,2 N/mm² (B9658) beziehungsweise 34,4 ± 1,7 N/mm² (B9657) im Bereich der Referenzmischung.

Ein ähnliches Bild ergibt sich für die Biegezugfestigkeiten. Die mechanisch aufbereiteten Fraktionen erreichten nach 2 Tagen Werte zwischen 4,9 N/mm² und 5,4 N/mm² und lagen damit geringfügig oberhalb der Referenz (4,7 ± 0,1 N/mm²). Nach 7 Tagen wurden Biegezugfestigkeiten zwischen 7,0 N/mm² und 7,3 N/mm² bestimmt. Die thermisch recycelten Fraktionen erreichten mit 5,5–5,7 N/mm² nach 2 Tagen beziehungsweise 7,2–7,5 N/mm² nach 7 Tagen die höchsten Biegezugfestigkeiten der untersuchten Mischungen. Die chemisch recycelten Fraktionen lagen mit 5,2–5,3 N/mm² nach 2 Tagen sowie 6,4–7,1 N/mm² nach 7 Tagen ebenfalls im Bereich oder leicht oberhalb der Referenzmischung.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die Zugabe der untersuchten WTBW-Fraktionen in der gewählten Dosierung von 1,8 M.-% bezogen auf die Zementmasse keine nachteiligen Auswirkungen auf die frühe Festigkeitsentwicklung hatte. Die teilweise höheren Druck- und Biegezugfestigkeiten gegenüber der Referenzmischung lassen jedoch keine eindeutigen Rückschlüsse auf eine aktive hydraulische oder puzzolanische Wirkung der WTBW-Fraktionen zu, da die Materialien als zusätzliche Komponente und nicht als Zementersatz dosiert wurden.

Die Entwicklung der Ultraschall-Impulsgeschwindigkeit (UPV) der untersuchten WTBW-Mörtelmischungen ist in Abbildung 5a dargestellt. Sowohl die Verläufe der Schallgeschwindigkeit als auch der Schallbeschleunigung zeigen für die untersuchten mechanisch aufbereiteten WTBW-Fraktionen B9532, B9534 und B9644 ein sehr ähnliches Erstarrungs- und Erhärtungsverhalten. Die Doppelbestimmungen von B9532 und B9644 weisen eine hohe Übereinstimmung auf und bestätigen die gute Reproduzierbarkeit der Messungen.

Nach einer anfänglichen Induktionsphase stieg die Schallgeschwindigkeit bei allen Mischungen kontinuierlich an und erreichte nach sieben Tagen Werte von etwa 4400 bis 4500 m/s. Auch die Verläufe der Schallbeschleunigung zeigten vergleichbare Maxima innerhalb der ersten Stunden nach dem Anmischen. Signifikante Unterschiede zwischen den untersuchten WTBW-Fraktionen konnten weder hinsichtlich der Hydratationskinetik noch der Endgeschwindigkeit festgestellt werden. Die Ultraschallergebnisse stimmen mit den Druckfestigkeitsuntersuchungen überein, bei denen für die untersuchten Mischungen nach 2 und 7 Tagen ebenfalls vergleichbare Festigkeitsniveaus bestimmt wurden. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die mechanisch aufbereiteten WTBW-Fraktionen die frühe Struktur- und Festigkeitsbildung der Mörtelmischungen nicht wesentlich beeinflussen.

Verglichen mit den im RILEM TC 267-TRM [23] für etablierte SCMs berichteten Bereichen liegen die mechanisch aufbereiteten WTBW überwiegend im Bereich schwach bis mäßig reaktiver Materialien, während die chemisch und thermisch recycelten Fraktionen Wärmefreisetzungen erreichen, die mit natürlichen Puzzolanen und teilweise Flugaschen vergleichbar sind. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass insbesondere die Entfernung der Polymermatrix durch chemische oder thermische Aufbereitung zu einer deutlich erhöhten Reaktivität der WTBW-Fraktionen führt. Ein direkter Zusammenhang zwischen R³-Reaktivität und Druckfestigkeitsentwicklung konnte jedoch nicht festgestellt werden. So erreichte die thermisch recycelte Fraktion B9660 die höchsten Wärmefreisetzungen, ohne gleichzeitig die höchsten Druckfestigkeiten aufzuweisen. Die Ergebnisse verdeutlichen daher, dass neben der chemischen Reaktivität weitere Faktoren wie Partikelgrößenverteilung, Morphologie und Wechselwirkungen mit der Zementhydration die mechanischen Eigenschaften der Mörtel beeinflussen.

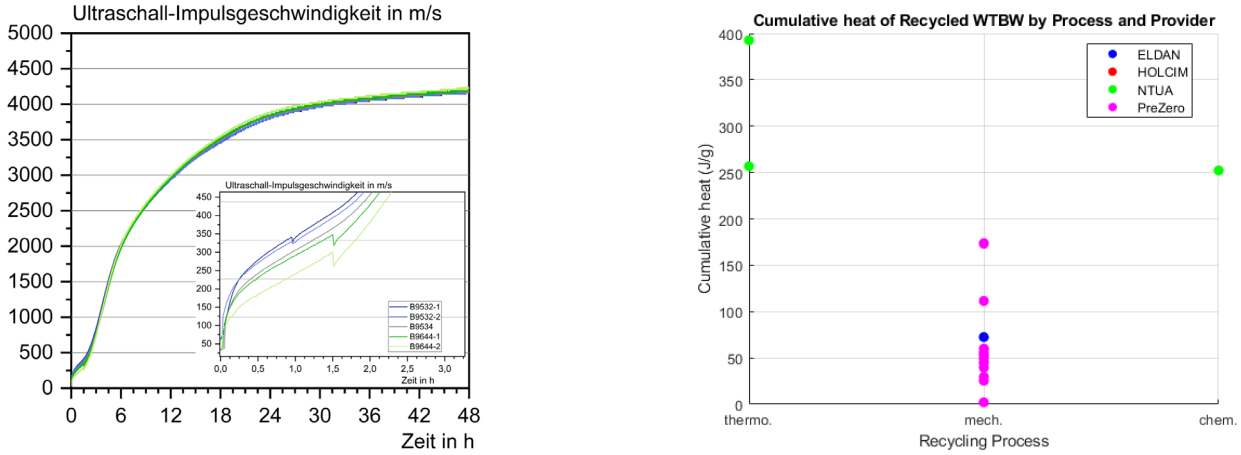


Abbildung 5: (a) Entwicklung der Ultraschall-Impulsgeschwindigkeit der untersuchten WTBW-Mörtelmischungen während der ersten 48 h nach dem Anmischen und (b) kumulative Wärmefreisetzung der untersuchten WTBW-Fraktionen nach 7 Tagen im R³-Test gemäß ASTM C1897-20, gruppiert nach Aufbereitungsroute und Materialquelle.

5 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Studie wurden verschiedene mechanisch, chemisch und thermisch recycelte WTBW hinsichtlich ihres Potenzials für die stoffliche Verwertung in zementgebundenen Baustoffen untersucht. Der Fokus lag auf zwei alternativen Verwertungsstrategien: der Nutzung als SCM sowie dem Einsatz zur Verminderung plastischer Schwindrissbildung.

- Die chemische und thermische Aufbereitung führte zu glasfaserreichen Fraktionen mit deutlich unterschiedlichen Materialeigenschaften. Die chemisch recycelten Fasern wiesen im REM saubere und weitgehend rückstandsfreie Faseroberflächen auf, während bei den thermisch recycelten Fraktionen trotz erfolgreicher Freilegung der Glasfasern geringe organische Restbestandteile nachgewiesen wurden.
- Die mechanisch aufbereiteten WTBW-Fraktionen beeinflussten die Verarbeitbarkeit der Mörtelmischungen bei einer Dosierung von 1,8 M.-% bezogen auf die Zementmasse nur geringfügig. Die Druckfestigkeiten nach 7 Tagen lagen zwischen 37,4 und 44,5 N/mm² und damit überwiegend oberhalb der Referenzmischung (34,1 N/mm²).
- Thermisch und chemisch recycelte WTBW-Fraktionen zeigten im R³-Test deutlich höhere Reaktivitäten als mechanisch aufbereitete Fraktionen. Ein direkter Zusammenhang zwischen R³-Reaktivität und Druckfestigkeitsentwicklung konnte jedoch nicht festgestellt werden.
- Die Ultraschalluntersuchungen ergaben für die untersuchten mechanisch aufbereiteten WTBW-Fraktionen ein vergleichbares Erstarrungs- und Erhärtungsverhalten sowie keine signifikanten Unterschiede in der frühen Strukturentwicklung.
- Im Windkanalversuch reduzierten mechanisch aufbereitete WTBW die Schwindrissbildung deutlich. Die Fraktion B9041 verringerte die Gesamtrissfläche von etwa 3000 mm² auf 456 mm² bei 0,3 Vol.-% sowie auf lediglich 11 mm² bei 0,7 Vol.-%.
- Die Ergebnisse zeigen, dass WTBW sowohl als schwindrissmindernde Faserkomponente als auch als potenziell reaktive Feinfraktion in zementgebundenen Baustoffen genutzt werden können. Die Wahl der geeigneten Recyclingroute hängt dabei maßgeblich von der angestrebten Anwendung ab.

25097075, 2026, 6, Downloaded from https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cepa.70958 by Cochrane Greece, Wiley Online Library on [11/11/2026]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

- Die chemisch und thermisch recycelten WTBW-Fraktionen zeigten im R³-Test eine deutlich höhere Reaktivität als die mechanisch aufbereiteten Fraktionen. Ein direkter Zusammenhang zwischen R³-Reaktivität und Druckfestigkeitsentwicklung konnte jedoch nicht festgestellt werden.

6 Danksagung

Die vorgestellten Arbeiten wurden im Rahmen des von der Europäischen Union geförderten Horizon-Europe-Projekts Blades2Build – Recycle, Repurpose and Reuse End-of-Life Wind Blade Composites: A Coupled Pre- and Co-Processing Demonstration Plant durchgeführt. Das Projekt wird unter der Finanzhilfevereinbarung (Grant Agreement) Nr. 101096437 gefördert (https://doi.org/10.3030/101096437).

7 Quellen

[1] Bredemann, C.; Rauschenbach, P.; Spuziak-Salzenberg, D. (2026) Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen – Status quo, rechtliche Rahmenbedingungen und technologische Entwicklungen [online]. Berlin: Fachagentur Wind und Solar. https://www.fachagentur-wind-solar.de/fileadmin/Veroeffentlichungen/Wind/Rueckbau/FA_Wind_Solar_Rueckbau-und-Recycling-von-WEA.pdf [abgerufen am: 01.06.2026]

[2] Quentin, J. (2026) Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland im Jahr 2025 – Statistik Windenergie an Land Jahr 2025 [online]. Berlin: Bundesverband WindEnergie e.V. https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/06-zahlen-und-fakten/20260115_Status_des_Windenergieausbaus_an_Land_Jahr_2025.pdf [abgerufen am: 01.06.2026]

[3] Fachagentur Wind und Solar (2026) Stilllegungen von Windenergieanlagen [online]. Berlin: Fachagentur Wind und Solar. https://www.fachagentur-wind-solar.de/veroeffentlichungen/wind-und-solar-monitor/stilllegungen-wind [abgerufen am: 01.06.2026]

[4] Bundesverband WindEnergie e.V. (2023) BWE-Informationspapier: Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen [online]. Berlin: Bundesverband WindEnergie e.V. https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/02-technik-und-netze/09-rueckbau/20230801_BWE-Informationspapier_Rueckbau_und_Recycling_von_Windenergieanlagen.pdf [abgerufen am: 01.06.2026]

[5] Johst, P.; Bühl, M.; Enderle, C.; Kupfer, R.; Modler, N.; Böhm, R. (2024) Forecasting wind turbine blade waste with material composition and geographical distribution: Methodology and application to Germany. Resources, Conservation and Recycling 211, 107876. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107876

[6] DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP) (2020) DIN SPEC 4866: Nachhaltiger Rückbau, Demontage, Recycling und Verwertung von Windenergieanlagen. Berlin: DIN Media GmbH.

[7] Kühne, C.; Stapf, D.; Holz, P.; Baumann, W.; Mülhopt, S.; Wexler, M.; Hauser, M.; Kalkreuth, J.; Mahl, J.; Zeller, M. et al. (2022) Entwicklung von Rückbau- und Recyclingstandards für Rotorblätter – Abschlussbericht. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

[8] Otto, S.-J.; Meyer, S.; Helmes, S.; Schmelting, R.; Rohde, M.; Rubner, P.; Ziehe, M.; Kraus, H.; Spohn, D.; Faulstich, M. et al. (2023) Entwicklung eines Konzepts und Maßnahmen zur Sicherung einer guten Praxis bei Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

[9] Blades2Build Consortium (2026) Blades2Build – Circular solutions for end-of-life wind turbine blades [online]. https://blades2build.com/ [abgerufen am: 01.06.2026]

[10] Duyal, C.; Chevalier, M.; Lushnikova, N.; Gauvin, F.; Brouwers, H. (2026) Optimized incorporation of shredded wind turbine blade waste in concrete using a particle packing approach. Construction and Building Materials 521, 146102. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2026.146102

[11] Paraskevoulakos, C.; Liu, T.; Lima, A.T. (2026) Investigating the microstructure of mortar systems reinforced with wind turbine blade waste using X-ray computed tomography. Construction and Building Materials 509, 145187. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2026.145187

25097075, 2026, 6, Downloaded from https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cepa.70958 by Cochrane Greece, Wiley Online Library on [11/11/2026]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

[12] Modestou, M.A.; Mylona, A.; Kyriakou, G.; Constantinou, A.; Vyrides, I. (2025) Recycling of Glass Fibers from Wind Turbine Blade Wastes via Chemical-Assisted Solvolysis. Fibers 13, 163. https://doi.org/10.3390/fib13120163

[13] Liu, T.; Duyal, C.; Paraskevoulakos, C.; Enemark-Rasmussen, K.; Tyurkay, A.; Lushnikova, N.; Gauvin, F.; Lima, A.T. (2026) Effect of wind turbine blade waste on cement hydration and gel structure: Competitive interaction of glass and polyester resin. Composites Part B: Engineering 311, 113273. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2025.113273

[14] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt) (2005) Zulassungs- und Überwachungsgrundsätze – Faserprodukte als Betonzusatzstoff. Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik.

[15] Manns, W.; Zeus, K.; Betzle, M. (1979) Einfluß von Zusatzmitteln auf den Widerstand von jungem Beton gegen Rißbildung bei scharfem Austrocknen. Berlin: Ernst & Sohn.

[16] Wischers, G.; Manns, W. (1973) Ursachen für das Entstehen von Rissen in jungem Beton. Beton 23, H. 4, S. 167–171; H. 5, S. 222–229.

[17] DIN EN 1015-3 (2007) Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 3: Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel (mit Ausbreittisch). Berlin: Beuth Verlag.

[18] DIN EN 1015-6 (2007) Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 6: Bestimmung der Frischrohdichte von Frischmörtel. Berlin: Beuth Verlag.

[19] DIN EN 1015-7 (1998) Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 7: Bestimmung des Luftgehaltes von Frischmörtel. Berlin: Beuth Verlag.

[20] DIN EN 196-1 (2016) Prüfverfahren für Zement – Teil 1: Bestimmung der Festigkeit. Berlin: Beuth Verlag.

[21] ASTM C1897-20 (2020) Standard Test Methods for Measuring the Reactivity of Supplementary Cementitious Materials by Isothermal Calorimetry and Bound Water Measurements. West Conshohocken, PA: ASTM International.

[22] Londono-Zuluaga, D.; Gholizadeh-Vayghan, A.; Winnefeld, F.; Avet, F.; Ben Haha, M.; Bernal, S.A.; Cizer, Ö.; Cyr, M.; Dolenec, S.; Durdzinski, P. et al. (2022) Report of RILEM TC 267-TRM phase 3: validation of the R3 reactivity test across a wide range of materials. Materials and Structures 55. https://doi.org/10.1617/s11527-022-01947-3

[22] Fontana, P.; Pirskawetz, S. (2012) Beurteilung der Wirksamkeit von Fasern zur Reduzierung von Schrumpfrissen in Beton. Beton- und Stahlbetonbau 107, H. 5, S. 311–319. https://doi.org/10.1002/best.201200007

[23] Londono-Zuluaga, D.; Gholizadeh-Vayghan, A.; Winnefeld, F.; Avet, F.; Ben Haha, M.; Bernal, S.A.; Cizer, Ö.; Cyr, M.; Dolenec, S.; Durdzinski, P. et al. (2022) Report of RILEM TC 267-TRM phase 3: validation of the R3 reactivity test across a wide range of materials. Materials and Structures 55. https://doi.org/10.1617/s11527-022-01947-3

25097075, 2026, 6, Downloaded from https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cepa.70958 by Cochrane Greece, Wiley Online Library on [11/11/2026]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License